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

MULTI-BODY MODELY DYNAMICKÝCH SOUSTAV S ELEKTRO-MECHANICKÝMI REZONÁTORY

MULTI-BODY SYSTEM OF STRUCTURES WITH ELECTRO-MECHANICAL RESONATORS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE — **Bc. JIŘÍ TICHÝ**

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — **doc. Ing. ZDENĚK HADAŠ, Ph.D.**

SUPERVISOR

BRNO 2021

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadaní diplomové práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	**Bc. Jiří Tichý**
Studijní program:	Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor:	Inženýrská mechanika a biomechanika
Vedoucí práce:	**doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.**
Akademický rok:	2020/21

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 diplomové práce:

Multi–body modely dynamických soustav s elektro–mechanickými rezonátory

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Úkolem práce je využít dynamické multi–body modely vybraných mechanických soustav pro simulaci odezvy energy harvesting zařízení a zhodnotit jejich funkci jako senzoru či generátoru elektrické energie. Modely jednotlivých soustav s elektromechanickými rezonátory budou realizovány v prostředí MSC.ADAMS. Modely vybraných soustav budou zjednodušeny na potřebné úrovni. Zjednodušeny budou i modely daného elektromechanického rezonátoru, které jsou buzeny vibrací struktury. Cílem práce je analyzovat chování rezonátorů a jejich odezvu při provozu vybrané soustavy a vybrat vhodné umístění rezonátoru s ohledem na maximální elektrickou odezvu rezonátoru.

Cíle diplomové práce:

1. Rešerše aplikací elektromechanických rezonátorů pro sledování odezvy mechanických struktur a monitorování jejich provozu.
2. Vytvoření multi–body systému pro vybrané mechanické modely.
3. Implementace modelu elektromechanického rezonátoru a analýza jeho odezvy.
4. Analýza vlivu umístění a parametrů rezonátoru na velikost odezvy při dynamickém namáhání.

Seznam doporučené literatury:

HAUG, Edward J ., 1989. Computer Aided Kinematics and Dynamics of Mechanical Systems. B.m.: Prentice Hall College Div. ISBN 978-0205116690.

PRIYA, Shashank a Daniel J. INMAN, ed., 2009. Energy Harvesting Technologies [online]. Boston, MA: Springer US. ISBN 978-0-387-76463-4. Dostupné z: doi:10.1007/978-0-387-76464-1.

ULIANOV, Cristian, Zdeněk HADAŠ, Paul HYDE a Jan SMILEK, 2020. Novel Energy Harvesting Solutions for Powering Trackside Electronic Equipment. In: Sustainable Rail Transport. B.m.: Springer, Cham, s. 229–255.

BAI, Yang, Pavel TOFEL, Zdenek HADAS, Jan SMILEK, Petr LOSAK, Pavel SKARVADA a Robert MACKU, 2018. Investigation of a cantilever structured piezoelectric energy harvester used for wearable devices with random vibration input. Mechanical Systems and Signal Processing [online]. 106, 303–318. ISSN 08883270.

HADAS, Zdenek, Cestmir ONDRUSEK a Vladislav SINGULE, 2010. Power sensitivity of vibration energy harvester. Microsystem Technologies [online]. 16(5), 691–702 [vid. 2013-09-12]. ISSN 0946-7076. Dostupné z: doi:10.1007/s00542-010-1046-4.

CAHILL, Paul, Budhaditya HAZRA, Raid KAROUMI, Alan MATHEWSON a Vikram PAKRASHI, 2018. Vibration energy harvesting based monitoring of an operational bridge undergoing forced vibration and train passage. Mechanical Systems and Signal Processing [online]. ISSN 10961216.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

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 tvorbou výpočtových modelů elektromechanických rezonátorů určených pro získávání elektrické energie z mechanických vibrací. Byly vytvořeny výpočtové modely rezonátorů založených na translačním a obecném rovinném pohybu. Tyto modely jsou tvořeny v MSC Adams. Prezentované rezonátory k přeměně mechanických vibrací na elektrickou energii používají elektromagnetickou indukci. Pro dosažení co nejlepšího výstupního výkonu byl každý rezonátor naladěn na vlastní frekvenci vhodnou pro zvolenou aplikaci.

Nejdříve je prezentován výpočtový model elektromechanického rezonátoru pro železniční trať. Pro ověření použitelnosti tohoto rezonátoru byl vytvořen i výpočtový model simulující rovný úsek trati, buzený silou s průběhem odpovídajícím přejezdu vlakové soupravy o lokomotivě a dvou vagónech.

Následně je prezentován nelineární elektromechanický rezonátor určený pro nekotvenou bóji. Po jeho naladění na vlastní frekvenci $1,6\ Hz$ byl vytvořen výpočtový model. Ten byl pro ověření funkčnosti buzen sinovým signálem a signálem odpovídajícím pohybu bóje po moři. Při buzení klidným mořem byl okamžitý špičkový výkon tohoto rezonátoru $9\ \mu W$, a při buzení odpovídajícím rozbouřenému moři byl nejvyšší okamžitý výkon dokonce $7,5\ mW$.

Summary

This thesis is dealing with creation of computation model of energy harvestors. Harvestors based on translational motion and planar motion were modeled. These models were created in MSC Adams. Proposed harvestors are tranforming mechanical vibrations into electrical energy by electromagnetical induction. To achieve better electrical output, harvestors were tuned to natural frequency suitable for chosen aplication.

First proposed harvestor is meant for railway track. For validation of its usability in intended application, model of railway track section is also proposed. Force generated by passing train is used for excitation of the track model.

Second harvestor is nonlinear electromechanical oscilator proposed for use on unanchored sea buoy (drifter). After retuning previously proposed concept of energy harvestor to natural frequency $1.6\ Hz$, computation model for simulation purposes was created. After the simulation of sinusoidal excitation, the excitation based on real sea data was simulated. When excited by regular sea, the peak electric power $9\ \mu W$ was achieved. When excited by irregular sea the peak electrical power of the generator was $7.5\ mW$.

Klíčová slova
energy harvesting, elektromechanický rezonátor, železniční trať, bóje, monitoring moře, mořský výzkum

Keywords
energy harvesting, vibration energy harvesting, trackside energy harvesting, railway track, seawave energy harvesting, sea monitoring

Bibliografická citace

TICHÝ, J.*Multi-body modely dynamických soustav s elektro-mechanickými rezonátory.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2021. 64 s. Vedoucí doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Multi-body modely dynamických soustav s elektro-mechanickými rezonátory“ vypracoval samostatně bez cizí pomoci, na základě rad a pokynů vedoucího diplomové práce doc. Ing. Zdeňka Hadaše, Ph.D. Vycházel jsem přitom ze svých znalostí, odborných konzultací a literárních zdrojů.

Bc. Jiří Tichý

Chtěl bych poděkovat především doc. Ing. Zdeňku Hadašovi, Ph.D. za trpělivost, cenné rady a ochotu při konzultacích. Dále bych chtěl poděkovat všem, kteří mi během psaní této práce, ale i v průběhu celého studia, byli oporou a bez nichž by nebyl vznik této práce možný.

Obsah

1 Úvod **3**

2 Vymezení problémové situace **5**
2.1 Formulace problému 5
2.2 Cíle řešení problému 5

3 Aplikace elektromechanických rezonátorů pro sledování odezvy mechanických struktur a monitorování jejich provozu **7**
3.1 Elektromechanické generátory 8
3.2 Elektromechanické rezonátory 12
3.2.1 Rezonátory založené na translačním pohybu 12
3.2.2 Rezonátory založené na obecném rovinném pohybu 15
3.3 Aplikace rezonátorů představených v této práci 16

4 Výpočtový model elekromechanického rezonátoru **17**

5 Elektromechanický rezonátor na železniční trati **21**
5.1 Výpočtový model rezonátoru 21
5.1.1 Chování výpočtových modelů rezonátorů při sinovém buzení 24
5.1.2 Porovnání jednotlivých vlastních frekvencí elektromechanických rezonátorů 26
5.2 Výpočtový model železniční trati 26
5.3 Ideální trať 28
5.3.1 Průjezd soupravy rychlostí **40 km/h** 29
5.3.2 Průjezd soupravy rychlostí **72 km/h** 31
5.3.3 Průjezd soupravy rychlostí **120 km/h** 32
5.4 Vůle pod pražcem 34
5.5 Vozidlo s defektní ploškou na kole 36
5.6 Zhodnocení výpočtového modelu trati a chování rezonátorů umístěných na trati 39

6 Elektromechanický rezonátor pro nekotvenou bóji na moři **41**
6.1 Volba parametrů rezonátoru 41
6.2 Chování rezonátoru při sinovém buzení 45
6.3 Buzení mořem 48
6.4 Zhodnocení rezonátoru pro bóji 50

7 Závěr **53**

8 Seznam příloh **55**

1. Úvod

V současné době je svět zaplněný elektronikou. Zařízení, která potřebují přívod elektrické energie, nás obklopují na každém kroku. V běžném životě každého z nás je to mobilní telefon, hodinky a mnohé další. V technické praxi tomu pak není jinak - elektronické snímače a zařízení, která zpracovávají a předávají dál jejich signály, nalezneme naprosto všude. Zvyšují bezpečnost a efektivitu v čím dál více odvětvích lidské činnosti a v rámci internetu věcí dochází k jejich dalšímu rozšiřování. Analogové snímače jsme již takřka všude nahradili digitálními, které potřebují zajištění přívodu elektrické energie.

Právě kvůli masovému rozšíření elektroniky, ať už v osobním životě, nebo v technické praxi, nastává nutnost zajistit spolehlivé zdroje energie pro čím dál více zařízení na čím dál více místech. Některá z těchto míst jsou špatně dostupná, odlehlá, nebo by konvenční přivedení elektrické energie k nim bylo komplikované. Například u nositelné elektroniky je zajištění permanentního připojení k elektrické síti prakticky nemožné.

V řadě dalších aplikací pak představují komplikace například ztráty na vedení, riziko přerušení vedení či výpadku vnějšího zdroje energie. Tohle všechno jsou faktory, které zvyšují provozní náklady, ztěžují údržbu a snižují spolehlivost, což je například u senzorů nežádoucí.

Právě v situacích, kdy přichází do úvahy tyto komplikace, je vhodné zamyslet se nad použitím nějaké formy energy harvestingu. Ten představuje způsob, jak prodloužit intervaly mezi dobíjením, či výměnou baterie, případně jak zajistit úplnou energetickou soběstačnost menších zařízení. To nám umožňuje umístit snímače na místa, na kterých by to dříve, vzhledem k nákladům spojeným se zajištěním zdroje elektrické energie, bylo neekonomické.

Energy harvesting označuje alternativní metody získávání elektrické energie přeměnou jiné energie, která by jinak nebyla využita, na elektrickou. Typicky se používá pro aplikace, kde nám stačí relativně malé elektrické výkony. Umožňuje tedy zajistit zdroj energie pro snímač přímo v místě měření, díky čemuž odpadá nutnost energii přivádět ze sítě, nebo měnit baterie.

Forem energy harvestingu je mnoho - elektrickou energii můžeme získávat například pomocí změny teploty, ze slunečního záření nebo z vibrací. Pro aplikaci v technických soustavách, na kterých probíhají dynamické děje, se však nejvíce hodí energy harvesting založený na vibracích. V takových soustavách často potřebujeme měřit vibrace. Vibrační energy harvestor (EH) může za určitých okolností sloužit i jako samotný snímač. Takovýto harvestor má často podobu elektromechanického rezonátoru.

Právě na vibrační energy harvesting se zaměřuje tato práce. Její náplní je zpracování a vyhodnocení počítačových výpočtových modelů vibračních elektromechanických rezonátorů, které k přeměně mechanické energie na elektrickou využívají elektromagnetickou indukci.

2. Vymezení problémové situace

Pro snímání chování různých, nejen technických, soustav a jejich okolí, ke kterým není možné přivedení elektrické energie nějakým konvenčním způsobem, je nedostupný dlouhodobě spolehlivý elektrický zdroj. Právě kvůli nedostupnému konvenčnímu zdroji elektrické energie v těchto soustavách na nich nemůžeme provádět požadovaná měření. Ve většině těchto soustav je však dostatek energie v jiné formě, například kinetické, kterou můžeme pomocí elektromechanického rezonátoru převést na elektrickou energii. Převedení takové kinetické energie na elektrickou je jedním z možných řešení problémů s napájením elektroniky v těchto aplikacích.

2.1. Formulace problému

Použití těchto technologií je limitováno tím, že nevíme, kolik lze takovýmto způsobem získat elektrické energie. Proto je cílem této práce vytvoření výpočtového modelu, který kvantifikuje tento převod a popíše chování elektromechanického rezonátoru, který slouží jako převodník mechanické energie na elektrickou. Následně bude možné s pomocí tohoto výpočtového modelu určit, jaké množství elektrické energie jsme schopni ve zvolené aplikaci získat.

Hlavním úkolem bude nasimulovat neznámou odezvu mechanické části multidisciplinárního výpočtového modelu rezonátoru a mechanické soustavy, ke které je připojen. Tato simulace je nezbytná, protože potřebujeme detailně znát chování mechanické části rezonátoru v konkrétní aplikaci. Bez ní totiž není možné správně nasimulovat výstupy elektrické části rezonátoru. Tyto simulace budou realizovány v MSC Adams.

Tento model je důležitý, protože pro navržení vhodného rezonátoru potřebujeme být schopni vhodným způsobem, zejména pomocí výpočtového modelování, nasimulovat chování tohoto rezonátoru v daných podmínkách. Tato práce se bude zabývat takovouto simulací vibračních elektromechanických rezonátorů.

2.2. Cíle řešení problému

Cílem této práce je vytvořit výpočtové multidisciplinární modely, které budou zahrnovat jak mechanickou, tak elektrickou část zvolených mechanických soustav s vibračními elektromechanickými rezonátory. Tento cíl je rozdělen do těchto dílčích kroků:

1. Vytvoření výpočtových modelů mechanické části elektromagnetického rezonátoru v takovém rozsahu, aby byly schopny zajistit dostatečně kvalitní vstupní data pro výpočtové modelování, sloužící k návrhu elektrické části. Doplnění těchto výpočtových modelů o takové výpočtové modely elektrické části, které budou schopny simulovat, jak elektrická část zpětně ovlivní část mechanickou a jaké budou výstupní parametry získaného elektrického proudu.

2. Vytvořit počítačové modely, které budou sloužit k simulaci chování mechanických soustav. Ty budou schopny do vytvořených výpočtových modelů rezonátorů vnést

vstupy odpovídající mechanickému chování jejich okolí, respektive soustav, ke kterým jsou rezonátory připojeny. Tyto modely budou schopny simulace chování těchto mechanických soustav, interakcí v nich a jejich buzení, respektive podstatných vlivů okolí.

3. Integrovat výpočtové modely rezonátorů do výpočtových modelů mechanických soustav, na kterých budou působit, a tím simulovat odezvu jejich mechanické i elektrické části na chování těchto soustav.

4. Na základě výsledků simulací provést vyhodnocení použitých rezonátorů.

3. Aplikace elektromechanických rezonátorů pro sledování odezvy mechanických struktur a monitorování jejich provozu

Elektromechanické rezonátory, použitelné pro energy harvesting, vychází z různých fyzikálních principů. Principy, použitelné pro konverzi mechanické energie na elektrickou, jsou například elektromagnetická indukce, magnetostrikce, triboelektrický jev, elektrostatická indukce, nebo piezoelektrický jev [1].

Elektromagnetické rezonátory jsou v podstatě přímo použitelné nejen jako zdroje elektrické energie pro snímače, ale i jako snímače samotné. Jako zdroje elektrické energie pro snímače jsou použitelné i další formy energy harvestingu, jako například harvestory založené na termoelektrickém jevu, nebo solární články, případně elektromagnetické generátory buzené například větrem. Nejsou však samy o sobě schopny snímače mechanického chování soustavy nahradit, proto jim nebude v této práci věnována pozornost.

Tato kapitola, s ohledem na praktickou část této práce, je zaměřena na vibrační energy harvesting, zejména na jeho aplikaci v přepravě, především železniční, a v monitoringu moří, respektive získávání energie z vlnobití.

Vibrační harvesting na trati a jejím blízkém okolí je značně ovlivněn parametry trati - typem pražců, kolejnicí, spojem mezi pražcem a kolejnicí, tím, zda trať leží na náspu, nebo je s podložím spojena jinak (například na mostech, kde je chování ovlivněno jejich konstrukcí) a typem podloží. Je také vhodné zmínit, že vliv má i údržba trati - dobře udržovaná nebo nová trať bude vykazovat vyšší tuhost, než trať, jejíž údržba se dlouhodobě zanedbává [1]. Stejně tak je harvesting ovlivněn projíždějící soupravou - hmotnostmi jednotlivých vagónů, počtem jejich kol, vzdálenostmi mezi koly, počtem vagónů a rychlostí, kterou souprava projíždí.

Parametry trati definují tuhost a tlumení soustavy, projíždějící vlak představuje buzení. Platí, že čím vyšší tuhost a tlumení soustavy, tím menší výchylky a naopak čím větší buzení, tím větší výchylky trati. Obojí tedy má vliv na elektrický výkon získaný elektromechanickým generátorem.

Aby mělo použití energy harvestingu smysl, musí zvolený elektromechanický generátor dosahovat minimálně stejné spolehlivosti jako konvenční zdroje elektrické energie, náklady na jeho výrobu, umístění, provoz, montáž atd. nesmí přesáhnout náklady na konvenční řešení. Také nesmí být náchylnější k poškození vnějším působením, jako jsou například vlivy počasí, potopení atd., než konvenční řešení.

Ze jmenovaných fyzikálních principů se pro použití na železnici nejčastěji používají elektromechanické rezonátory, které generují elektrickou energii na základě relativního pohybu součástí. Jedná se tedy o aplikaci mechanického oscilátoru. Další variantou je použití translačního generátoru, jehož pohyb může být usměrněn na rotační pohyb. Poslední variantou je použití elektromechanických rezonátorů založených na piezoelektrickém jevu. Ostatní principy se buď využívají velmi málo, nebo vůbec.

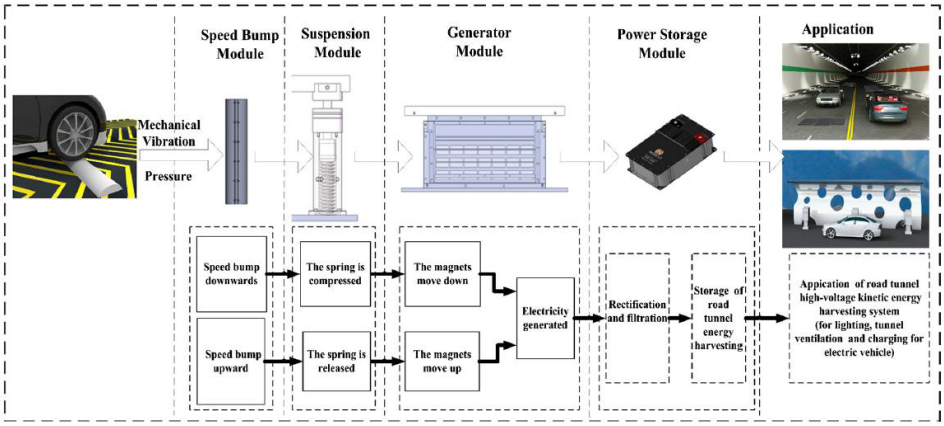
Harvesting moře je oproti harvestingu v železniční dopravě závislý především na atmosferických podmínkách, které na vodní hladině vytvářejí vlny. Toto vlnění pak přímo působí jako buzení aplikované na technickou soustavu, ve které je umístěn elektromechanický generátor. Touto soustavou je zpravidla kotvená, nebo nekotvená bóje. Typ a velikost tohoto generátoru pak závislí především na zvolené aplikaci. Typickými aplikacemi jsou vodní elektrárny u pobřeží nebo napájení senzorů volně plujících bójí.

3.1. Elektromechanické generátory

Jednou z vhodných variant pro získávání elektrické energie z dynamických soustav jsou elektromechanické generátory. Ty fungují zpravidla na principu přímého převodu pohybu v soustavě na pohyb generátoru vyrábějícího elektrickou energii.

Základním typem vibračních elektromechanických generátorů jsou generátory založené na vybuzení kmitavého pohybu magnetu v poli cívky.

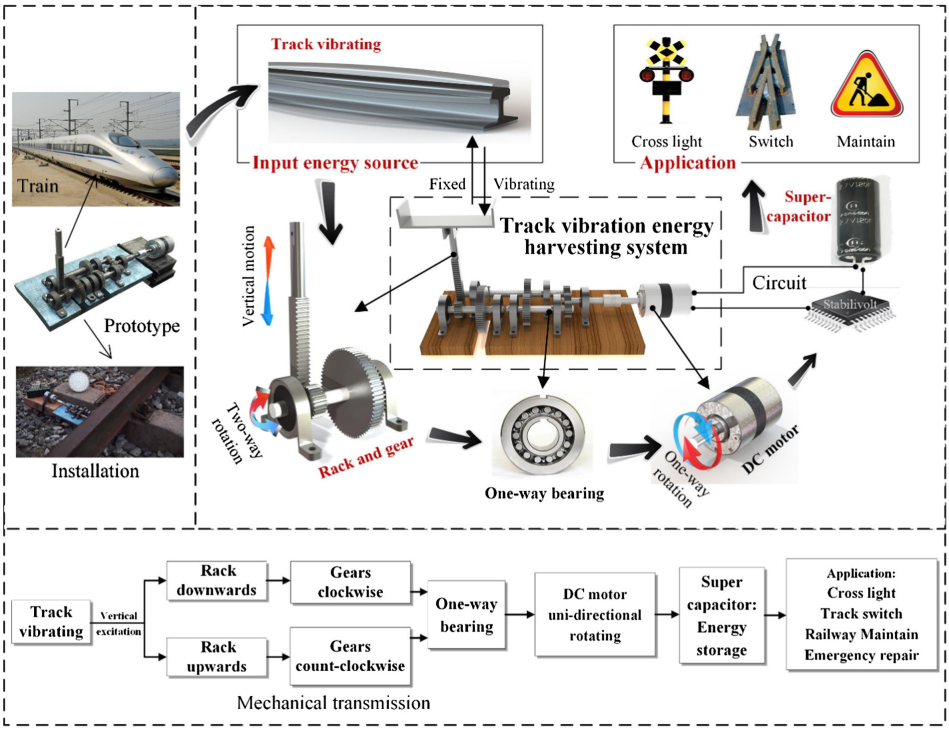
Podobný princip byl využit pro získávání elektrické energie ze silničního zpomalovacího prahu v rámci práce [2]. Tato aplikace je koncepčně shodná se získáváním elektrické energie z pohybu železničního pražce. Při průjezdu automobilu rychlostí 40 km/h bylo získáno špičkové napětí 194 V a průměrné napětí bylo 55, 2 V.



Obrázek 3.1: Lineární elektromechanický generátor pro použití pod zpomalovacím prahem [2]

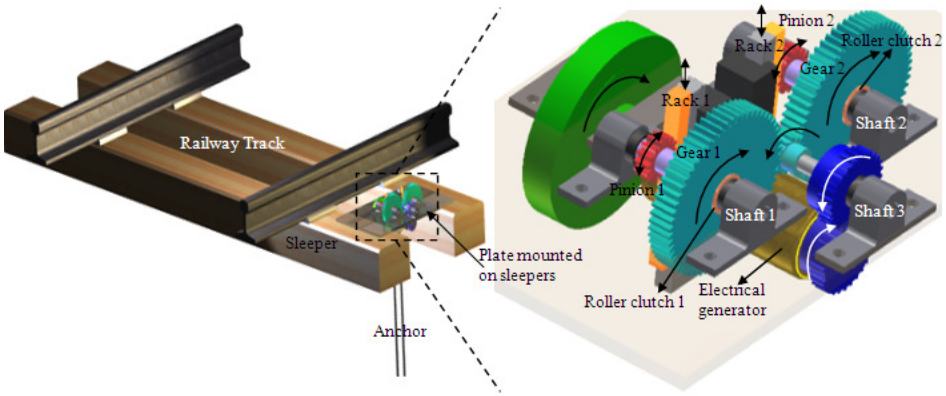
Mnohem rozšířenější jsou složitější typy elektromechanických generátorů, které využívají převod kmitání části soustavy na rotační pohyb pomocí převodového ústrojí.

Jednou z variant je použití ozubeného hřebene, který přenáší kmitání trati na rotační pohyb ozubeného kola, které pohání stejnosměrný generátor elektrického proudu [3, 4]. Toto řešení slouží k tomu, aby pomocí vhodného převodového poměru došlo k zesílení vibrací způsobených průjezdem vlaku a jejich převedení na rotační pohyb hřídele. Tato rotace se následně přenáší na dvě větve, z nichž jedna slouží k přenosu pohybu hřebene směrem dolů a druhá k přenosu pohybu hřebene směrem nahoru. Přenos rotace správné větve na hřídel elektrického generátoru je zajištěn tím, že ozubená kola, která přenáší rotaci jednotlivých větví na hřídel připojený ke generátoru, jsou na své hřídele připojeny ložisky přenášejícími rotaci pouze jedním směrem. Maximální dosažené napětí bylo 58 V při buzení s výchylkou o amplitudě 2, 5 mm a frekvenci 1 Hz.



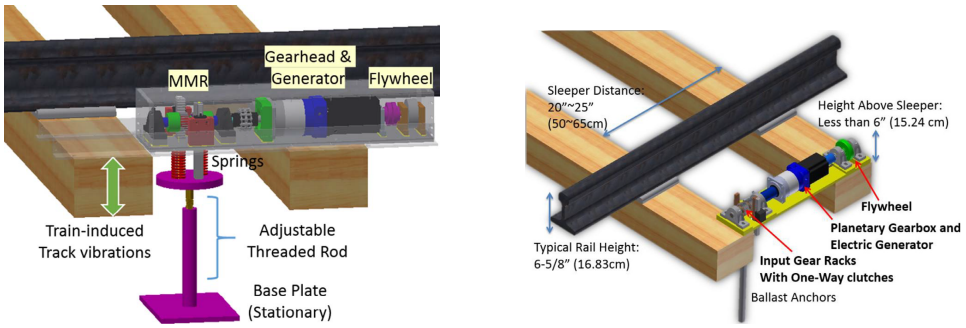
Obrázek 3.2: Lineární generátor využívající k převodu vibrací na rotační pohyb ozubený hřeben [3]

Další možnost představuje použití mechanického usměrňovače. Lineární generátor založený na tomto principu opět využívá převodu posuvného pohybu trati na jednosměrný rotační pohyb [5]. Problémem tohoto řešení, podobně jako předchozího, je však snížení účinnosti, zejména kvůli ztrátám způsobeným třením. Při buzení vibracemi s frekvencí 1 Hz a amplitudou výchylky zhruba 6 mm (0,25 palce) bylo tímto generátorem získáno maximální napětí zhruba 6 V.



Obrázek 3.3: Lineární generátor využívající usměrňovač k převodu vibrací trati na rotační pohyb [5]

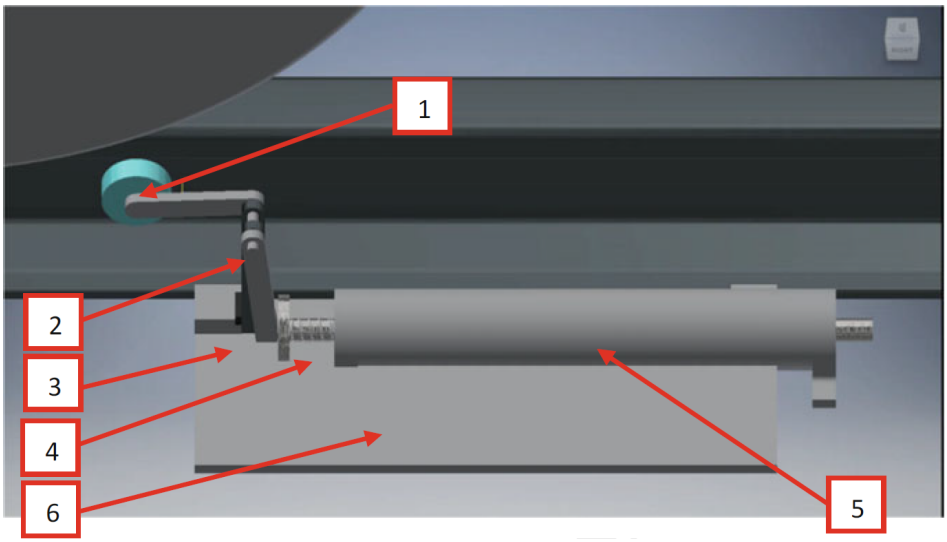
Zajímavou možností je i použití generátoru, který není kotven k podloží [6, 7]. Generátor představený v citovaných článcích také převádí pohyb trati na jednosměrný rotační pohyb. Na základě testování na zkušební trati se s tímto elektromechanickým generátorem podařilo dosáhnout maximálního špičkového výkonu až 56 W a průměrného výkonu 7 W.



(a) [6] (b) [7]

Obrázek 3.4: Lineární generátor bez kotvení

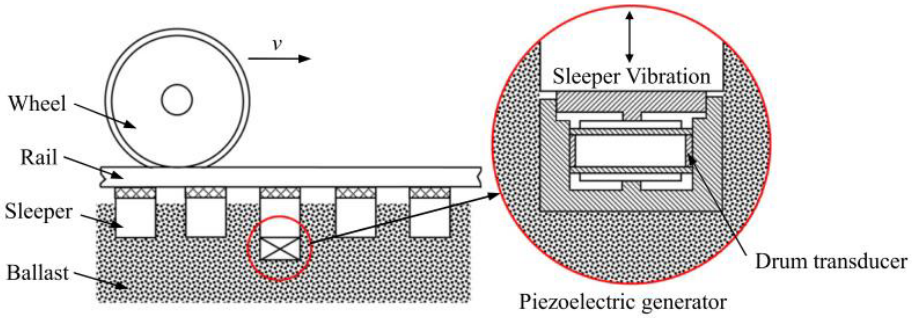
Dalším možným lineárním generátorem je generátor vyvinutý v rámci EU Horizon 2020 projektu ETALON představený v práci [8]. Tento generátor využívá k převodu buzení na pohyb generátoru principu páky a je tudíž jednodušší než generátory využívající převod pomocí ozubených kol. Koncept tohoto generátoru je na obrázku 3.5.



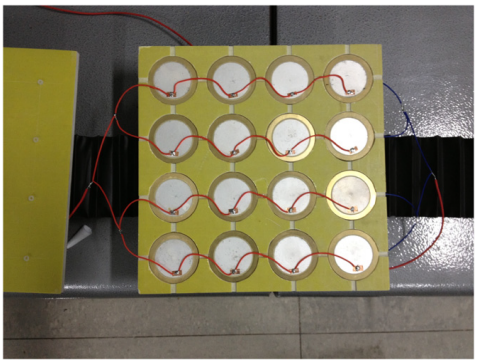
Obrázek 3.5: Pákový lineární elektromechanický generátor: (1) - připojení generátoru ke kolejnici; (2) - řídící mechanismus; (3) - omezující mechanismus; (4) - vratná pružina; (5) - lineární elektrický generátor; (6) - rám [8]

Dalším principem, na kterém může fungovat lineární generátor, je piezoelektrický jev. Ten umožňuje získávání elektrické energie přímo z deformace nějakého prvku soustavy. Takovýto generátor je v porovnání s předchozími výhodný především svou jednoduchostí a absencí pohyblivých částí. Není u nich potřeba převádět pohyb trati na rotační pohyb, ani zvětšovat výchylku jejího posuvu pomocí pákového mechanismu, protože energie je tvořena na základě deformace piezoelektrického materiálu.

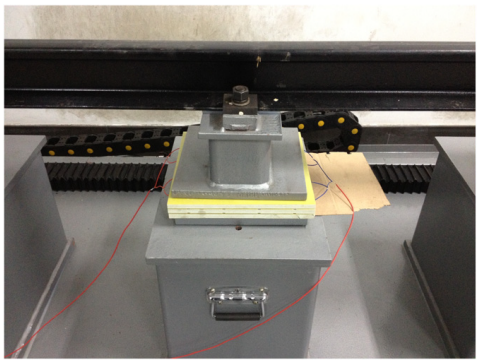
Takovýto generátor je prezentován například v článku [9]. V tomto článku je prezentován jednoduchý piezogenerátor bubnového tvaru, který je umístěn pod pražcem, tudíž není třeba pražec jakkoliv upravovat. Toto umístění navíc umožňuje využít toho, že na spodní straně pražce, respektive v železničním náspu, nejsou žádná výrazná prostorová omezení, se kterými se musíme vypořádávat při umístění generátoru jinde na trati. Při experimentu bylo s tímto generátorem dosaženo výstupní napětí $16,5\ V$ a výkon $0,1\ W$.



(a) schéma umístění



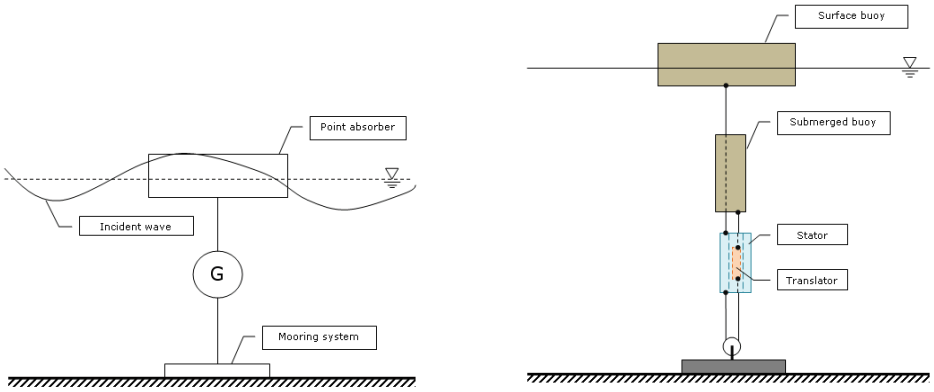
(b) zapojení generátorů



(c) umístění generátorů

Obrázek 3.6: Bubnový piezo generátor [9]

Generátory, které používají translační pohyb a nepřevádí jej na pohyb rotační, jsou poměrně rozšířené v rámci získávání elektrické energie z mořských vln. Takový generátor je představen například v práci [10]. Generátor prezentovaný v tomto článku se skládá z hladinové bóje, která se vlivem hladinových vln posouvá oproti kotvení a ponořené bóji, která zajišťuje pohyb mechanismu při pohybu hladinové bóje směrem dolů. Podle citovaného článku je možné s elektrárnou, sestavenou z dvanácti takových generátorů, dosáhnout výkonu 4 063 W.

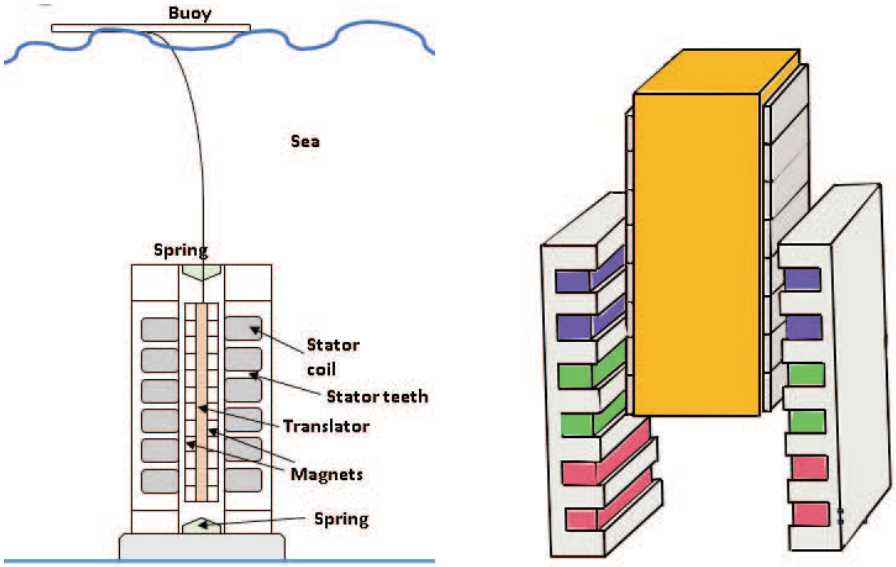


(a) obecné schéma

(b) schéma generátoru prezentovaného v článku

Obrázek 3.7: Schéma lineárního elektromagnetického generátoru využívajícího energii mořských vln [10]

Tento přístup k získávání energie z vln byl dále rozvíjen například v článku [11]. Ten se zaměřuje na optimalizaci dříve navrženého generátoru. Autorům se podařilo dosáhnout zlepšení oproti původnímu stavu a zvednout výstupní výkon generátoru na 1 425 W.



(a) celkové uspořádání

(b) detail statoru a posuvné části (žluté těleso s šedými magnetickými destičkami)

Obrázek 3.8: Schéma lineárního elektromagnetického generátoru využívajícího energii mořských vln [11]

3.2. Elektromechanické rezonátory

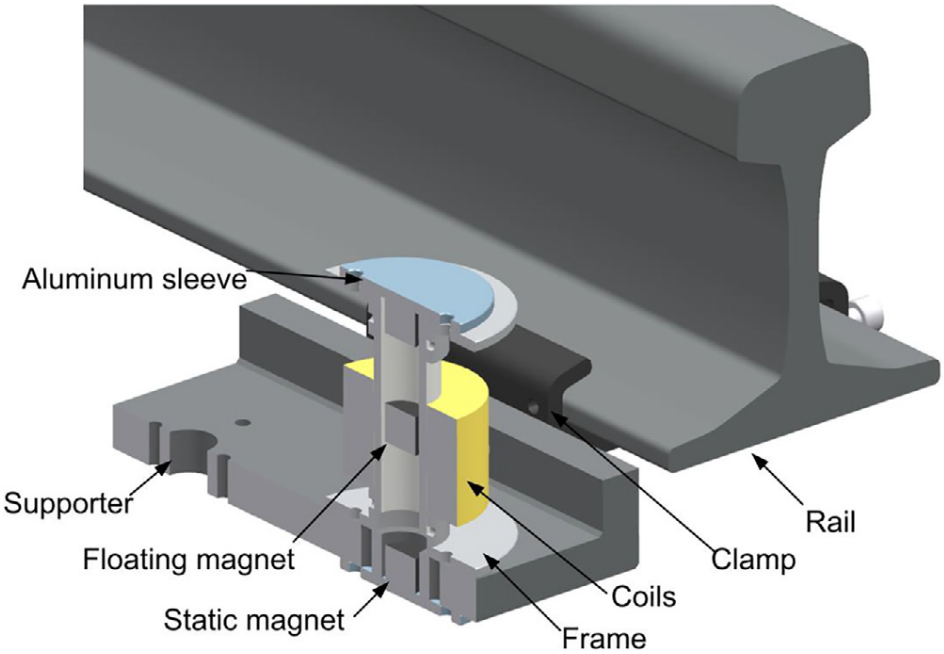
Alternativu generátorům představují rezonátory, které převádí impulzy způsobené dynamickým chováním soustavy na oscilační pohyb. Tento přístup je náročnější na provádění simulací takovýchto zařízení. Vlastní frekvence rezonátoru totiž musí být nastavena tak, aby odpovídala dominantní vlastní frekvenci vybuzené stochastickými impulzy, kterými je buzena dynamická soustava.

3.2.1. Rezonátory založené na translačním pohybu

Přímá aplikace tohoto principu na železniční trať je představena v práci [12]. V citovaném článku je představený kompaktní rezonátor určený k umístění na kolejnici, ve kterém magnetickou indukci zajišťuje magnet umístěný na pružince, který kmitá v magnetickém poli cívky. V uvedeném článku je tento rezonátor navržený pro budící frekvence v rozsahu $3 \div 7\ Hz$. Při buzení s amplitudou $1,2\ mm$ je s tímto rezonátorem možno dosáhnout špičkového napětí $2,32\ V$ a výkonu $119\ mW$.

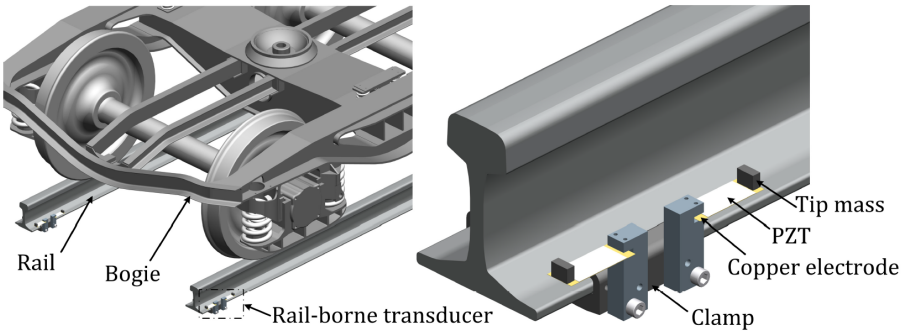
Autoři tento koncept dále rozpracovávají v článku [13], kde navrhují odstranění pružiny. Rezonátor pak kmitá díky magnetické levitaci. Tím je oscilátor zjednodušen do podoby, ve které je jedinou pohybující se součástí oscilující magnet. V této konfiguraci autoři při budící frekvenci 20 Hz a výchylce 2 mm předpokládali průměrný výkon $33,8\ mW$.

Při porovnání s experimentem byla zjištěna chyba o velikosti $14,7$ %. Autoři také zkoušeli simulovat buzení s frekvencí 440 Hz a amplitudou $0,655$ mm. Za těchto podmínek získali teoretický maximální výkon $547,7$ mW. Porovnání s měřením ukázalo odchylku $0,42$ %. Tento tým se popisu rezonátoru založeného na principu magnetické levitace a měřicí soustavy, která je k němu připojená, věnoval dále v článcích [14] a [15].



Obrázek 3.9: Energy harvestor založený na mechanickém oscilátoru - schéma bez mechanické pružiny [13]

Další možností jak aplikovat princip elektromechanického rezonátoru je použití pásků potažených piezomateriálem. Tyto pásky se chovají jako nosníky, na jedné straně vetknuté do svorky, která je připevněna ke kolejnici, a na jejich druhém konci jsou závaží, která slouží k zvětšení jejich deformace [16]. Dosažené výstupní napětí s tímto generátorem bylo $22,1$ V a výkon $4,88$ mW při výchylce trati $0,2 \div 0,4$ mm a frekvenci buzení $5 \div 7$ Hz.



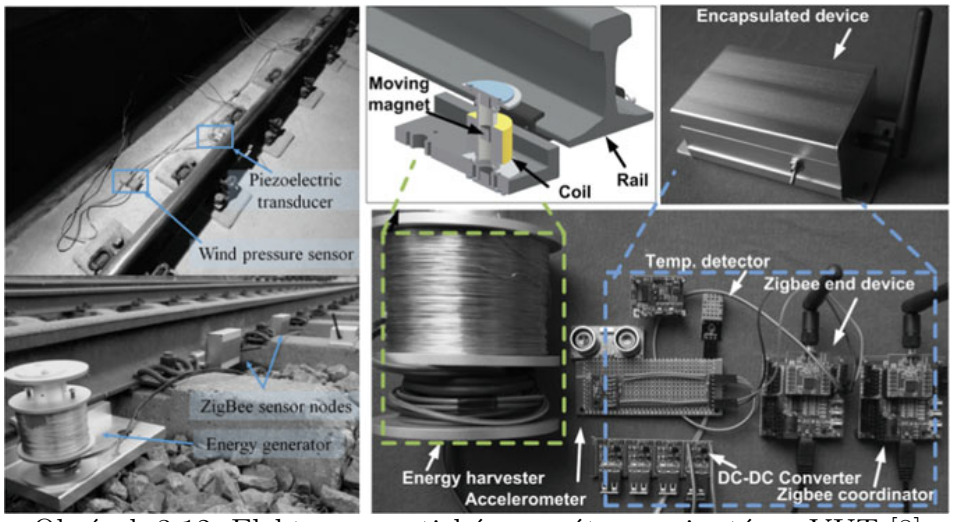
Obrázek 3.10: Elektromechanický rezonátor založený na piezoelektrickém jevu připevněný svorkou na kolejnici [16]

Komerčně elektromechanické rezonátory vyvíjí a dodává švédská firma ReVibe Energy [17]. Tato firma se zabývá jejich vývojem pro různá odvětví jako je letectví, průmysl a železniční doprava. Pro železniční aplikace nabízí tři varianty rezonátorů s různými frekvenčními rozsahy buzení, které pokrývají spektrum $10 \div 150$ Hz a rozsah budících

amplitud zrychlení $0,05 \div 10\ g$. Výstupní výkon, kterého tato řešení dosahují, je v rozmezí $0,5 \div 200\ mW$. Rezonátory dodávané touto firmou pro železniční aplikace jsou určené k uchycení na kolejnici.

Obrázek 3.11: Železniční aplikace rezonátoru firmy ReVibe [17]

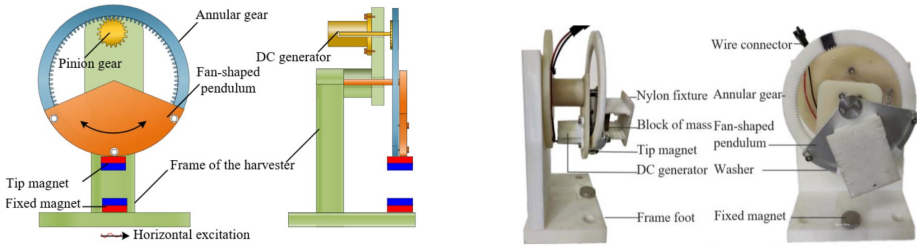
Vývoj rezonátorů probíhá i na VUT, kde byl navržen rezonátor, který lze umístit na klasický pražec, nebo jej do pražce integrovat přímo při výrobě [8]. Tento rezonátor je na trati s malou tuhostí a tlumením schopen dosahovat špičkového výkonu většího než $1\ W$.



Obrázek 3.12: Elektromagnetický rezonátor vyvinutý na VUT [8]

3.2.2. Rezonátory založené na obecném rovinném pohybu

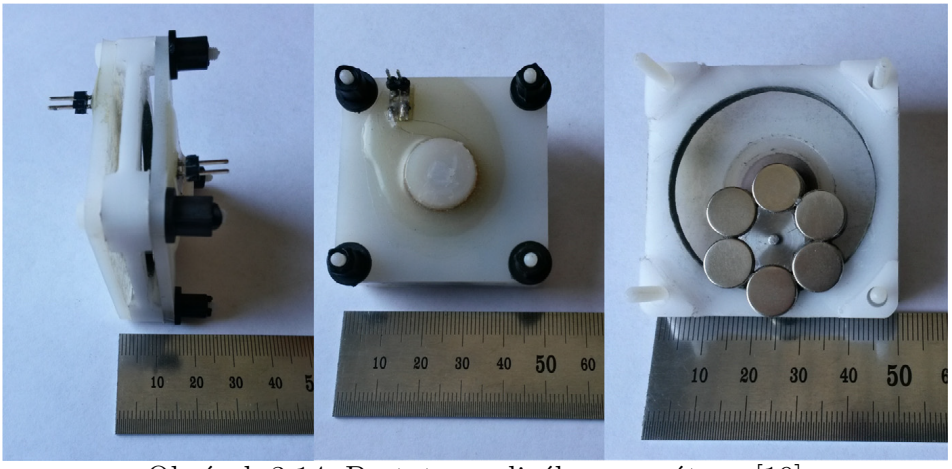
Další možností aplikace elektromagnetického rezonátoru je princip kyvadla. Použití takového rezonátoru na železniční trati navrhuje článek [18], ve kterém je tento princip kombinován s principem excentrického setrvačníku. Prezentovaný rezonátor je schopen přecházet mezi módem kyvadla a setrvačníku, podle toho, jaké je vnější buzení. Při slabém buzení se chová jako kyvadlo a v případě intenzivního buzení se chová jako setrvačník. Při buzení s amplitudou 15 mm a frekvencí 10 Hz je tento rezonátor schopen maximálního výkonu $16,3$ mW.



(a) Schéma (b) Prototyp

Obrázek 3.13: Elektromechanický rezonátor kombinující kyvadlo a setrvačník [18]

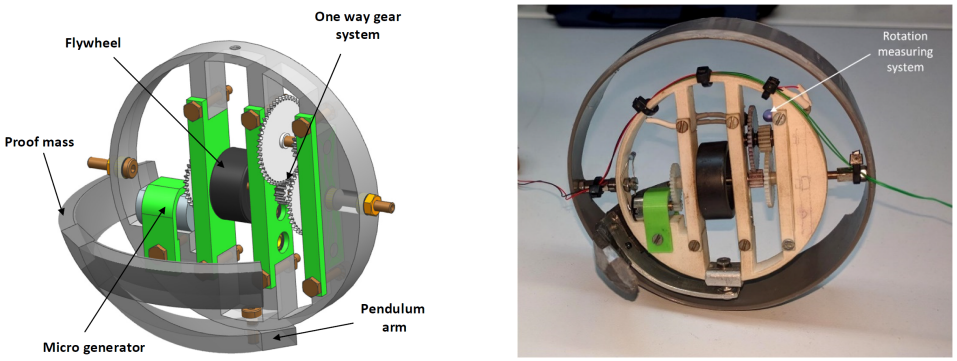
Na podobném principu je založený valivý elektromechanický rezonátor představený v článku [19]. Principem je odvalování malého válečku uvnitř většího válce. Tento typ generátoru je určený pro buzení frekvencemi v rozsahu $2 \div 10$ Hz. Konkrétní naladění generátoru v článku bylo na vlastní frekvenci $2,9$ Hz. Tento rezonátor byl vyvinut pro získávání elektrické energie z lidského pohybu. V rámci porovnání s jinými nízkofrekvenčními rezonátory autor uvádí maximální dosažený výkon $1,4$ mW při buzení zrychlením s amplitudou $0,4$ g o frekvenci $3,45$ Hz.



Obrázek 3.14: Prototyp valivého generátoru [19]

Rezonátor využívající princip kyvadla byl v článku [20] navržen i pro použití v bóji. Tento teoretický návrh byl autory následně rozpracován do podoby prototypu a experimentálně ověřen [21]. Tento rezonátor byl koncipován tak, aby bylo možné jej použít v bóji volně unášené mořem. Při experimentu se s tímto rezonátorem, navrženým na vlastní frekvenci $1,5$ Hz, podařilo dosáhnout výstupního výkonu $1,6$ mW. Na základě experi-

mentu také autoři konstatují, že pohyb kyvadla uvnitř bóje nezávisí na parametrech vln, které působí na bóji, ale na parametrech bóje samotné.



(a) 3D model (b) Prototyp

Obrázek 3.15: Rezonátor založený na principu kyvadla určený pro použití v nekotvené bóji [21]

3.3. Aplikace rezonátorů představených v této práci

V rámci této práce bude řešen multidisciplinární výpočtový model multi-body systému, který bude simulovat elektromechanický rezonátor. Tento výpočtový model bude simulovat mechanické chování takovéhoto rezonátoru i jeho elektrické chování, tedy elektromechanickou přeměnu, která v něm probíhá. Elektromechanická přeměna zpětně ovlivňuje mechanické chování rezonátoru. Toto zpětné ovlivnění se projevuje jako další tlumení.

V prostřední MSC Adams je možné implementovat další rovnice, které rozšíří řešení rovnic dynamiky, které probíhá v tomto programu. Implementace těchto rovnic je možná tak, že jejich řešení zpětně ovlivní mechanické chování, čímž vzniká vázaný model. Tímto způsobem je možné snadno simulovat vázané chování soustavy.

Vzhledem k tomu, že řešení probíhá pomocí zobecněných souřadnic, je jeho matematický tvar, jak je ukázáno v kapitole 4, shodný pro rezonátor konající translační pohyb (klasický oscilátor) i rotační pohyb (kyvadlo). Tento výpočtový model je tedy aplikovatelný na jakýkoliv rezonátor, který funguje na principu relativních pohybů.

Díky univerzálnosti použitých matematických vztahů je snadné s jejich pomocí vytvořit simulaci různých rezonátorů určených pro odlišné aplikace. Aby byla tato univerzálnost v této práci ukázána, bude vytvořen model elektromechanického rezonátoru, určeného pro aplikaci v železniční dopravě i model určený pro využití v rámci monitoringu moře.

Rezonátor pro použití v železniční dopravě, založený na klasickém oscilátoru, je navrhován pro vyšší frekvence buzení - řádově desítky Hz. Oproti tomu rezonátor pro mořské aplikace musí mít budící frekvenci v nižších jednotkách Hz a je založen na principu kyvadla kombinovaného s valením menšího válce uvnitř většího válce. Tento přístup byl zvolen proto, že buzení mořskou hladinou, na rozdíl od buzení při průjezdu vlaku, probíhá ve všech osách současně. Proto by bylo použití rezonátoru, jehož pohyb je omezen na translaci v jedné ose, značně neefektivní.

4. Výpočtový model elekromechanického rezonátoru

Tato práce se zabývá výpočtovým modelováním dynamických soustav, které obsahují elektromechanické rezonátory. Modelované soustavy jsou tvořeny více tělesy. Toto modelování je založené na základní rovnici mechanického kmitání, která má při použití zobecněných souřadnic tvar:

$$m \cdot \ddot{q} + b \cdot \dot{q} + k \cdot q = Q(t) \tag{4.1}$$

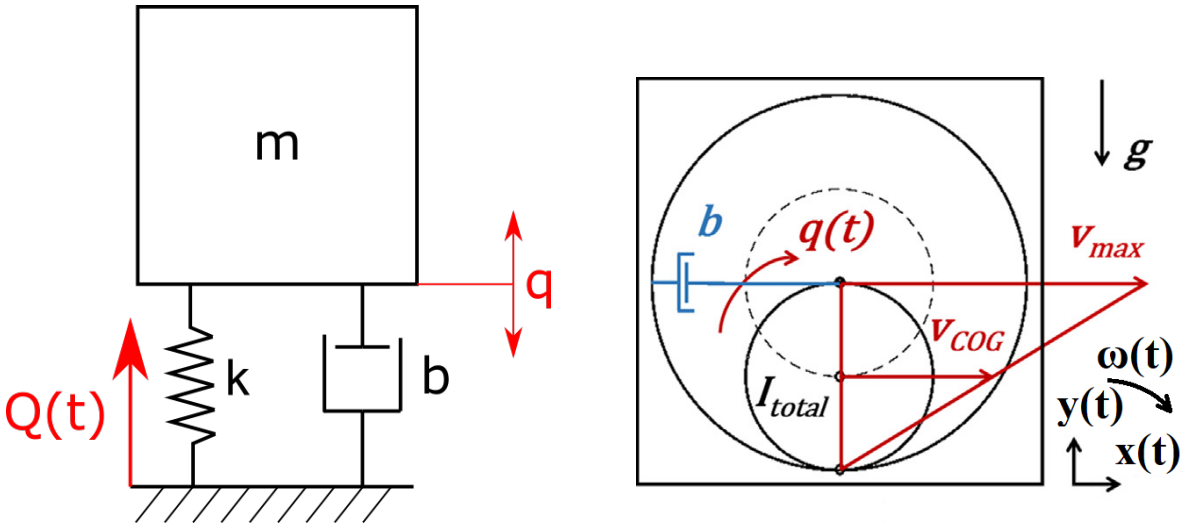
Kde m je zobecněná hmotnost, b zobecněné tlumení, k zobecněná tuhost, $Q(t)$ je zobecněná síla a q, $\dot{q}$, $\ddot{q}$ jsou zobecněná souřadnice, rychlost a zrychlení.

Zobecněné tlumení je v případě elektromechanického rezonátoru dáno vztahem:

$$b = b_{eEH} + b_m \qquad [Ns/m] \tag{4.2}$$

Kde b_{eEH} představuje elektrické tlumení a b_m mechanické tlumení.

V případě rezonátoru určeného pro trať je zobecněnou souřadnicí relativní výchylka magnetu vůči pražci. V případě rezonátoru pro bóji je zobecněnou souřadnicí relativní úhlová výchylka těžiště pohybujícího se válečku oproti středu kavity. Tato volba a schémata rezonátorů jsou na obrázku 4.1. Na obrázku 4.1(a) je znázorněno buzení klasického oscilátoru pohybem základny ve vertikálním směru. Toto buzení odpovídá zobecněnému buzení, proto je označené jako $Q(t)$. Rezonátor založený na obecném rovinném pohybu, znázorněný na obrázku 4.1(b) je buzen pohybem základny ve vertikálním ($x(t)$) i horizontálním ($y(t)$) směru a rotací základny $\omega(t)$. Tyto pohyby dohromady tvoří zobecněné buzení $Q(t)$.

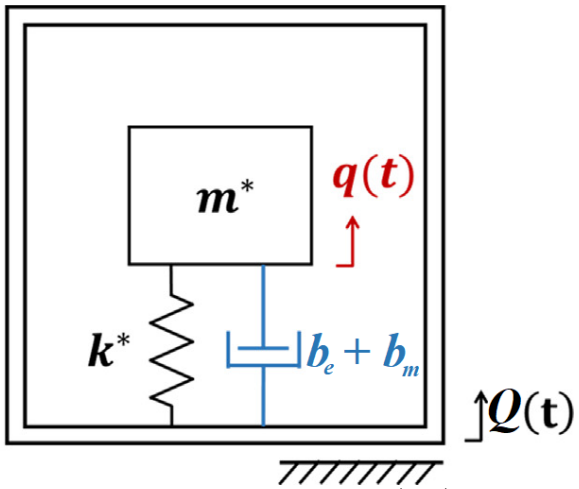


(a) Translační rezonátor

(b) Rezonátor založený na obecném rovinném pohybu [19]; upraveno autorem

Obrázek 4.1: Schémata rezonátorů s volbou zobecněné souřadnice q

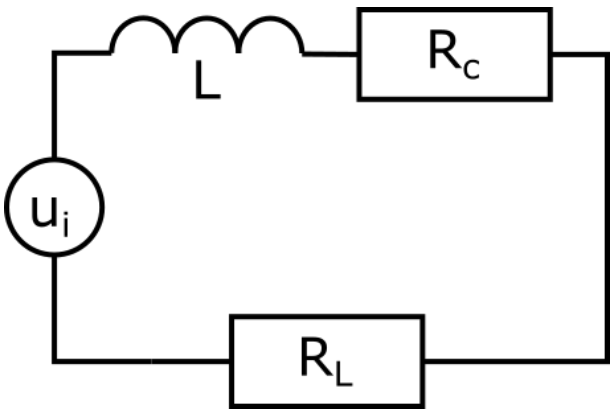
Na základě použití zobecněných souřadnic lze translační rezonátor i rezonátor založený na obecném rovinném pohybu (ORP) převést na rezonátor na obrázku 4.2.



Obrázek 4.2: Schéma oscilátoru popsaného rovnicí (4.1), m^* je zobecněná hmotnost, b^* je zobecněné tlumení, které je tvořeno mechanickou a elektrickou složkou dle rovnice (4.2) a k^* je zobecněná tuhost; obrázek převzat z [19]; upraveno autorem

Základní rovnici (4.1) je pro systémy s více tělesy obtížné řešit přímým výpočtem. Proto bylo pro vyhodnocení dynamického chování soustav zvoleno modelování v programu MSC Adams, který byl vyvinut k řešení rovnic dynamiky. Tento program je schopen řešit mechanické chování soustav s více tělesy v časové oblasti velmi rychle a efektivně. MCS Adams navíc umožňuje řešení rovnic dynamiky velmi efektivně propojit s dalšími rovnicemi. Této jeho schopnosti bylo využito pro řešení rovnic popisujících elektromechanickou přeměnu v rezonátoru.

Pro vyhodnocení modelu, respektive výpočet chování elektrické části rezonátoru, na základě chování části mechanické, jsou potřeba vztahy pro výpočet napětí indukovaného rezonátorem u_i $[V]$, proudu indukovaného rezonátorem i $[A]$, napětí na zátěži u_L $[V]$ a elektrického výkonu P_{el} $[W]$ - rovnice (4.5), (4.6), (4.7) a (4.8). Schéma elektrického odvodu rezonátoru je na obrázku 4.3.



Obrázek 4.3: Schéma elektrického obvodu rezonátoru - u_i je napětí indukované na cívce, L je indukčnost cívky, R_c je odpor cívky a R_L je odpor zátěže

Obecný vztah pro výpočet napětí indukovaného na cívce je:

$$u_i = N \cdot B \cdot L_c \cdot \dot{q} \qquad [V] \quad (4.3)$$

Kde N $[-]$ je počet závitů cívky, B $[T]$ je intenzita magnetického pole cívky a L_c $[m]$ je celková aktivní délka vinutí cívky. Místo parametrů cívky lze do rovnice (4.3) dosadit vazebný koeficient systému c $[T \cdot m]$, který je určený vztahem:

$$c = B \cdot N \cdot L_c \qquad [T \cdot m] \quad (4.4)$$

Výsledný tvar této rovnice po dosazení pak je:

$$u_i = c \cdot \dot{q} \qquad [V] \quad (4.5)$$

Indukovaný proud se počítá pomocí vztahu:

$$i = \frac{u_i}{R_c + R_L} \qquad [A] \quad (4.6)$$

Kde R_c $[\Omega]$ je odpor cívky a R_L $[\Omega]$ je odpor zátěže.

Napětí na zátěži se vypočítá rovnicí:

$$u_L = u_i \frac{R_L}{R_c + R_L} \qquad [V] \quad (4.7)$$

Elektrický výkon je počítán dle vztahu:

$$P_{el} = u_i^2 \frac{R_L}{R_c + R_L} \qquad [W] \quad (4.8)$$

Rovnice (4.5), (4.6), (4.7) a (4.8) byly do modelů rezonátorů v MSC Adams integrovány jako parametry měřících prvků "measure", jejichž výstupem pak byly tyto veličiny v jednotkách uvedených u příslušných rovnic.

Pro určení toho, jak zpětně ovlivní elektromagnetická indukce mechanické chování rezonátoru, je potřeba určit elektrické tlumení. To se na základě veličin charakterizujících elektrický obvod rezonátoru, počítá dle vztahu (4.9).

$$b_{eEH} = \frac{(B \cdot N \cdot L_c)^2}{R_c + R_L} \qquad [Ns/m] \quad (4.9)$$

Do této rovnice opět může místo parametrů cívky dosadit vazebný koeficient c a indukovaný proud i. Tím dostaneme výslednou rovnici ve tvaru:

$$b_{eEH} \cdot \dot{q} = c \cdot i \qquad [Ns/m] \quad (4.10)$$

Pro elektrický obvod na obrázku 4.3 musí platit 2. Kirchhoffův zákon:

$$u_i + u_L + u_c = 0 \qquad [V] \quad (4.11)$$

Kde u_c je napětí na cívce. Po dosazení za příslušné veličiny dostaneme z rovnice (4.11) výsledný tvar:

$$u_i = L \cdot \frac{di}{dt} + R_c \cdot i + R_L \cdot i \qquad [V] \quad (4.12)$$

V tomto vztahu vystupuje indukčnost cívky L $[H]$. Indukčnost je však v řádu mH, tedy 10^{-3} a proto ji můžeme vůči ostatním veličinám prohlásit za nulovou, čímž z této rovnice vypadne diferenciální člen.

Když rovnici (4.10) dosadíme do rovnice (4.1), obdržíme výsledný tvar pohybové rovnice, který je řešený ve výpočtových modelech vytvořených v MSC Adams:

$$m \cdot \ddot{q} + c \cdot i + b_m \cdot \dot{q} + k \cdot q = Q(t) \quad (4.13)$$

Z rovnic (4.4) a (4.12) lze odvodit rovnici popisující rychlost zobecněného pohybu oscilátoru pomocí indukovaného proudu:

$$c \cdot \dot{q} = R_c \cdot i + R_L \cdot i \quad (4.14)$$

Rovnice (4.13) a (4.14) tvoří systém vázaných rovnic popisujících chování elektromechanického oscilátoru. Řešení této soustavy rovnic popisuje chování mechanického oscilátoru ovlivněného generováním elektrického proudu v jeho elektromagnetickém obvodu.

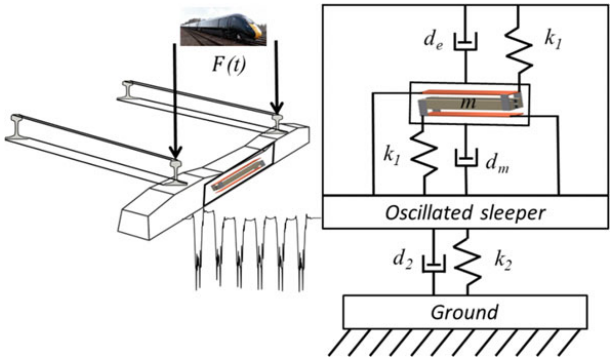
5. Elektromechanický rezonátor na železniční trati

Jedním z odvětví, které má velký potenciál pro uplatnění energy harvestingu, je železniční doprava, kde může rezonátor sloužit přímo jako snímač vibrací trati. V této kapitole budou prezentovány výsledky výpočtových modelů rezonátoru a trati vytvořených pomocí MSC Adams. Nejdříve bude představen výpočtový model a simulace chování rezonátoru při buzení zrychlením se sinovým průběhem a amplitudou $0,1\ m/s^2$.

Dále bude představen model trati, který je realizován jako poloviční. Na tomto modelu trati budou simulovány přejezdy vlakové soupravy o lokomotivě a dvou vagonech. Přejezdy budou simulovány třemi různými rychlostmi. Dále bude simulována imperfekce kola jednoho z vagónů a vůle pod jedním z pražců.

Tento model trati bude sloužit pro simulaci odezvy zvolených rezonátorů na skutečné trati při různých rychlostech přejezdů vlaků i při obou simulovaných imperfekcích.

5.1. Výpočtový model rezonátoru



Obrázek 5.1: Schéma umístění a rezonátoru na železnici [8]

Pro použití na železniční trati byl zvolen elektromechanický rezonátor využívající elektromagnetické indukce. V tomto rezonátoru dochází při jeho vibracích k pohybu magnetu vůči cívce, čímž dochází ke změně magnetického pole na cívce, důsledkem čehož je indukován elektrický proud.

Pro návrh tohoto rezonátoru je potřeba určit jeho elektrické i mechanické parametry tak, aby měl požadovanou vlastní frekvenci a dokázal při ní zajistit získání co nejvíce elektrické energie. Toto ladění bylo realizováno pomocí výpočtového modelu v Matlabu a Simulinku (příloha A) na základě požadované vlastní frekvence mechanické části rezonátoru (20 Hz) a následné maximalizace výstupního elektrického výkonu pro tuto frekvenci. Vlastní frekvence rezonátoru byla zvolena na základě zdroje [1]. Použité buzení rezonátoru odpovídalo pohybu pražce při průjezdu vlakové soupravy rychlostí 72 km/h získaného z modelu trati.

Celkově byly realizovány 3 varianty rezonátorů. Jeden o vlastní frekvenci 10 Hz, druhý o vlastní frekvenci 20 Hz a třetí o vlastní frekvenci 30 Hz. Parametry těchto modelů jsou uvedeny v tabulce 5.1.

Tabulka 5.1: Parametry elektromechanických rezonátorů pro použití na trati s vlastními frekvencemi 10 Hz, 20 Hz a 30 Hz

Parametr rezonátoru	**Značka**	**Jednotka**	**f_0 = 10 Hz**	**f_0 = 20 Hz**	**f_0 = 30 Hz**
Kvalita	Q	$-$	100	100	100
Hmotnost	m	kg	$0,5$	$0,5$	$0,5$
Tuhost	k_{mEH}	N/m	$1\,973,92$	$7\,895,68$	$17\,765,29$
Počet závitů cívky	N	$-$	16 934	16 934	16 934
Celková délka vinutí cívky	L_c	m	$0,1$	$0,1$	$0,1$
Průměr drátu cívky	d	mm	$0,1$	$0,1$	$0,1$
Intenzita magnetického pole	B	T	$0,3$	$0,3$	$0,3$
Odpor cívky	R_c	Ω	6 636	6 636	6 636
Odpor zátěže	R_L	Ω	8 050	8 050	8 050

Nejdříve byl vytvořen model rezonátoru o vlastní frekvenci 20 Hz. Následně byly vytvořeny modely mechanické části rezonátoru pro zbylé vlastní frekvence. Pro tyto upravené mechanické vlastní frekvence se již neměnila elektrická část rezonátoru. Upravené rezonátory slouží jen k posouzení vlivu mechanické vlastní frekvence na elektrickou část rezonátoru, respektive na výkon v ní získaného elektrického proudu.

Pro popis mechanické části modelu v MSC Adams dostačují parametry: kvalita Q $[-]$, hmotnost m $[kg]$ a tuhost k_{mEH} $[N/m]$. Pro popis elektrické části jsou zapotřebí parametry cívky (počet závitů N $[-]$, celková délka vinutí cívky L_c $[m]$, intenzita magnetického pole B $[T]$, odpor cívky R_c $[\Omega]$) a odpor zátěže R_L $[\Omega]$. Proto byly tyto parametry, získané z modelu v Matlabu, použity jako parametry pro model rezonátoru v MSC Adams.

Na základě zadaných parametrů rezonátoru bylo dopočítáváno elektrické a mechanické tlumení b_{eEH} a b_{mEH} - rovnice (4.9) a (5.2). Ta jsou potřeba pro chod modelu - tvoří součásti parametrů silové vazby mezi rezonátorem a pražcem.

$$b_{eEH} = \frac{(B \cdot N \cdot L_c)^2}{R_c + R_L} \qquad [Ns/m] \quad (5.1)$$

$$b_{mEH} = \frac{1}{2Q}\sqrt{k_{mEH} \cdot m} \qquad [Ns/m] \quad (5.2)$$

Tyto rovnice byly do výpočtu integrovány jako parametry příslušných vazeb. MSC Adams tedy tlumení příslušných silových vazeb počítal na základě zadaných vstupů. V případě silové vazby simulující mechanické chování byla kromě vztahu pro výpočet tlumení zadána i tuhost k_{mEH}. Vazba simulující elektrické chování obsahuje pouze tlumení.

Nakonec je potřeba vypočítat odpor cívky, který se počítá dle vztahu:

$$R_c = \frac{N \cdot \rho_{Cu} \cdot 2 \cdot L_c}{\pi \cdot \frac{d^2}{4}} \qquad [Ns/m] \quad (5.3)$$

Kde $\rho_{Cu} = 17,1 \cdot 10^{-9}\ \Omega m$ je měrný odpor mědi.

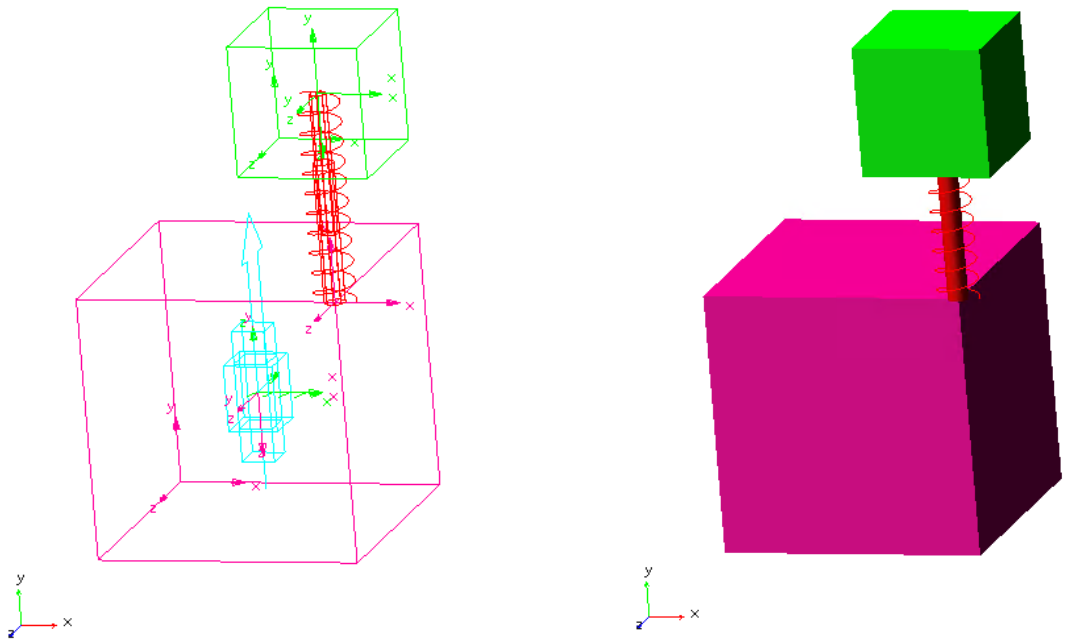
Do vázaných rovnic (4.12) a (4.13), popisujících elektromechanický oscilátor, můžeme dosadit rovnice (5.1), (5.2) a (5.3) a dostaneme výsledné tvary:

$$c \cdot \dot{q} = \frac{N \cdot \rho_{Cu} \cdot 2 \cdot L_c}{\pi \cdot \frac{d^2}{4}} \cdot i + R_L \cdot i \tag{5.4}$$

$$m \cdot \ddot{q} + \left(\frac{1}{2Q} \sqrt{k_{mEH} \cdot m} + \frac{(B \cdot N \cdot L_c)^2}{R_c + R_L} \right) \cdot \dot{q} + k \cdot q = Q(t) \tag{5.5}$$

Pro účely simulování odezvy rezonátorů na sinové buzení byly vytvořeny zjednodušené modely v MSC Adams. Tyto modely obsahovaly pouze mechanickou část rezonátoru připojenou k tělesu pražce ze simulace trati doplněnou o rovnice elektrické části rezonátoru. Buzení bylo realizováno zadáním zrychlení o amplitudě $0,1\ m/s^{-2}$ a frekvenci odpovídající vlastní frekvenci simulovaného rezonátoru.

Toto zrychlení bylo aplikováno na těleso pražce, jehož posuv byl omezen posuvnou vazbou. Vzhledem k tomu, jaké bylo výsledné chování pražce, stačilo k zajištění správného pohybu rezonátoru pouze jeho připojení k pražci pomocí dvou silových vazeb. Jedna z nich simulovala tuhost a tlumení mechanické části, druhá tlumení elektrické části rezonátoru. Náhled modelu je na obrázku 5.2.

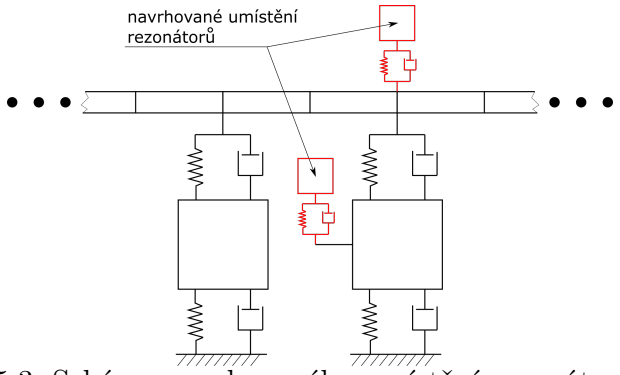


(a) Drátový model (b) Stínované zobrazení

Obrázek 5.2: Model rezonátoru v MSC Adams

Na obrázku 5.2(a) je drátový model, na kterém je patrné znázornění vazby aplikované na rám rezonátoru. Vazba, která je na tomto obrázku znázorněna, omezuje pohyb rámu na posuv ve směru globální osy y (globální souřadný systém je v levém dolním rohu). Vzhledem k tomuto omezení již nebylo potřeba na hmotu rezonátoru aplikovat jiné vazební podmínky, než silové působení mezi oscilujícím tělesem a rámem rezonátoru.

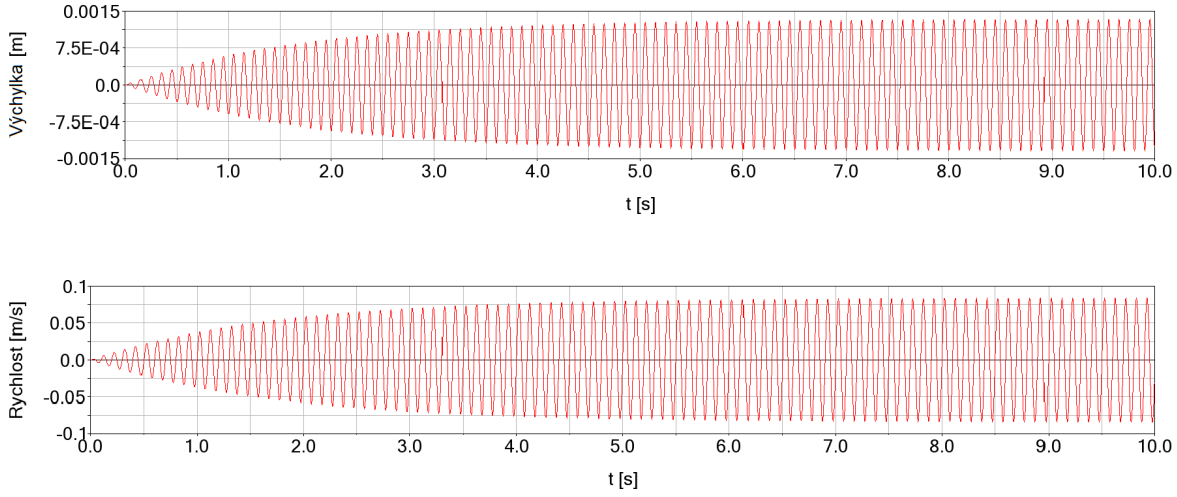
Navržené rezonátory jsou použité jako snímače vibrací trati. Schéma zvoleného umístění navrhovaných rezonátorů na železniční trati je na obrázku 5.3. Popis modelu trati je dále v této kapitole.



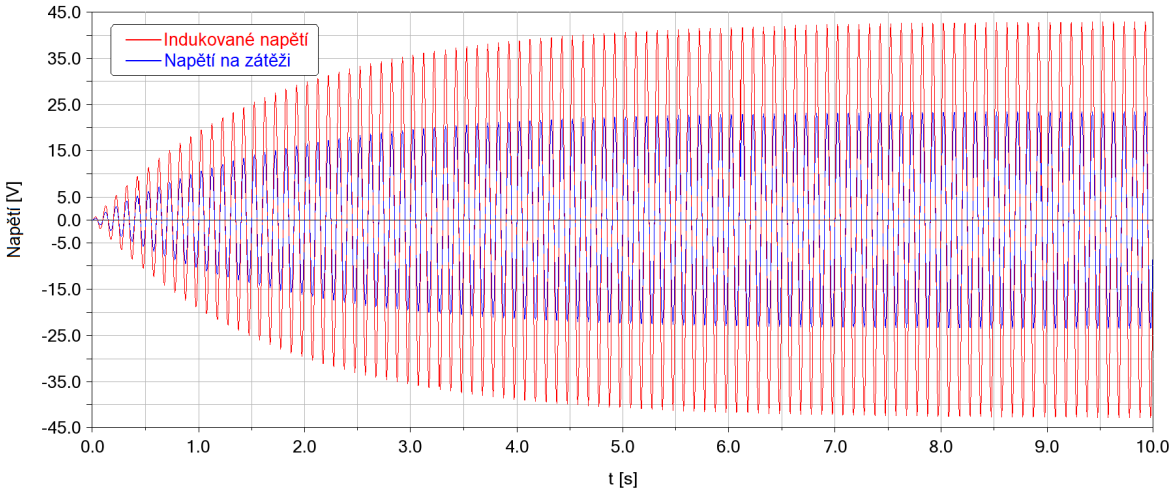
Obrázek 5.3: Schéma navrhovaného umístění rezonátorů na trati

5.1.1. Chování výpočtových modelů rezonátorů při sinovém buzení

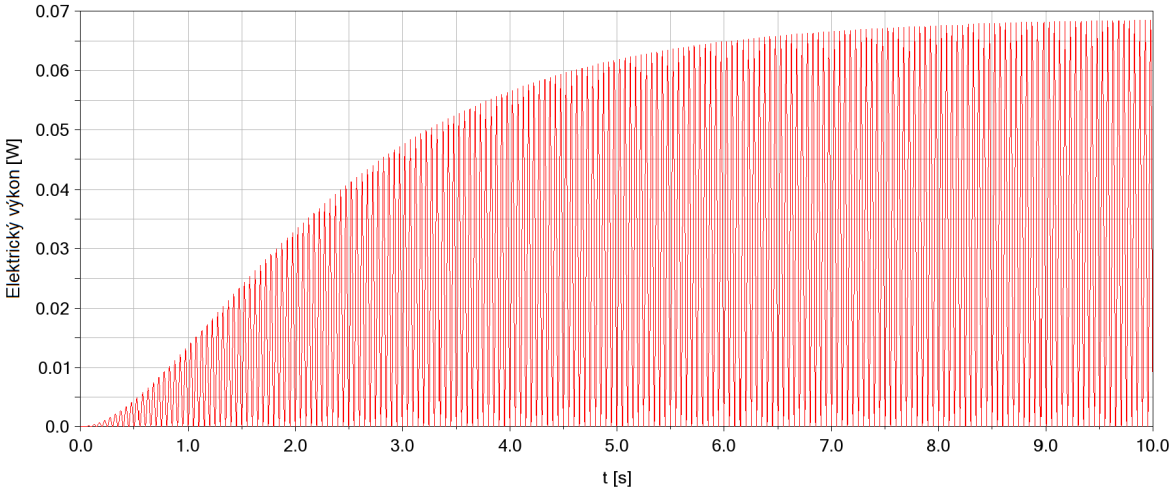
Buzení probíhalo zrychlením pražce s amplitudou $0,1\ m/s^2$ a periodou odpovídající vlastní frekvenci daného rezonátoru. Na obrázcích 5.4, 5.5 a 5.6 je odezva, elektrické napětí a elektrický výkon rezonátoru o vlastní frekvenci 10 Hz. Parametry rezonátoru jsou uvedené v tabulce 5.1, sloupci $f_0 = 10\ Hz$. Vzhledem ke způsobu zadávání buzení nejsou pro tuto simulaci podstatné vlastnosti tělesa, ke kterému je rezonátor připojen.



Obrázek 5.4: Relativní výchylka a rychlost rezonátoru o vlastní frekvenci 10 Hz



Obrázek 5.5: Indukované napětí u_i a napětí na zátěži u_L rezonátoru o vlastní frekvenci 10 Hz



Obrázek 5.6: Elektrický výkon na zátěži rezonátoru o vlastní frekvenci 10 Hz

Protože chování rezonátorů se všemi vlastními frekvencemi bylo v zásadě stejné a lišilo se jen ustálenými (maximálními) hodnotami, kterých rezonátory dosáhly, a časem, za který k tomuto ustálení došlo, jsou výsledné ustálené hodnoty všech realizovaných rezonátorů uvedené v tabulce 5.2.

Tabulka 5.2: Ustálené výstupní hodnoty elektromechanických rezonátorů trati při sinovém buzení vlastní frekvencí

Parametr rezonátoru	**Značka**	**Jednotka**	$\mathbf{f_0 = 10\ Hz}$	$\mathbf{f_0 = 20\ Hz}$	$\mathbf{f_0 = 30\ Hz}$
Přibližná doba do ustálení	t	s	$8,5$	$1,5$	$0,5$
Relativní rychlost po ustálení	v_{max}	m/s	$0,080$	$0,023$	$0,013$
Relativní výchylka po ustálení	d_{max}	mm	$1,125$	$0,200$	$0,060$
Indukované napětí po ustálení	u_i	V	36	13	$6,25$
Napětí na zátěži po ustálení	u_{load}	V	18	7	3
Indukovaný proud po ustálení	i	A	$3,8$	$0,92$	$0,48$
Elektrický výkon po ustálení	P	mW	$68,50$	$6,45$	$1,45$

5.1.2. Porovnání jednotlivých vlastních frekvencí elektromechanických rezonátorů

Vzhledem k tomu, že buzení je realizováno prostřednictvím zrychlení, dochází s nárůstem frekvence k poklesu relativní rychlosti rezonátoru. To vede nejen k poklesu výchylky, ale i indukovaného napětí, které je přímo úměrné relativní rychlosti dle vztahu (4.5). Při buzení sinovým zrychlením, jehož vlastní frekvence odpovídá vlastní frekvenci mechanické části, si tedy nejlépe vede rezonátor s nejnižší vlastní frekvencí.

Výsledky zcela jasně ukazují, že při buzení periodickým signálem má vlastní frekvence mechanické části, při zachování parametrů elektrické části, zásadní vliv na elektrický výkon rezonátoru. Tato závislost je však silně nelineární - při zvýšení vlastní frekvence z 10 Hz na 20 Hz dojde k poklesu ustáleného výkonu na 10 %. Při zvýšení vlastní frekvence o dalších 10 Hz, tedy z 20 Hz na 30 Hz, dojde k poklesu výkonu na zhruba 23 %.

Sinové buzení má jen malou vypovídající hodnotu o skutečném chování rezonátorů na trati. Buzení trati projíždějícím vlakem totiž nemá ani přibližně sinový průběh. Proto budou pro simulaci energy harvestingu trati použity rezonátory o všech vlastních frekvencích. To umožní jejich porovnání a vyhodnocení jejich chování při buzení odpovídajícím zamýšlené aplikaci.

5.2. Výpočtový model železniční trati

Pro namodelování trati byl zvolen poloviční model, vytvořený na základě již vytvořených modelů, publikovaných v pracích [16, 9]. Buzení bylo realizováno silou odpovídající síle, kterou působí vlak při průjezdu daným úsekem trati. Tato síla byla převzata z bakalářské práce [22].

Poloviční model trati označuje model, který řeší jen polovinu zvoleného úseku kolejiště - tedy jednu kolej a poloviční délku pražce. Tento typ modelu je realizován jako přijatelné zjednodušení pro rovný úsek trati, kde buzení vnášené prostřednictvím druhé kolejnice má, při zanedbání imperfekcí, totožný průběh, jako buzení přenášené modelovanou kolejnicí. Tento typ modelu je pro simulování energy harvestingu trati obvyklý, jak dokazuje jeho aplikace v jiných pracích.

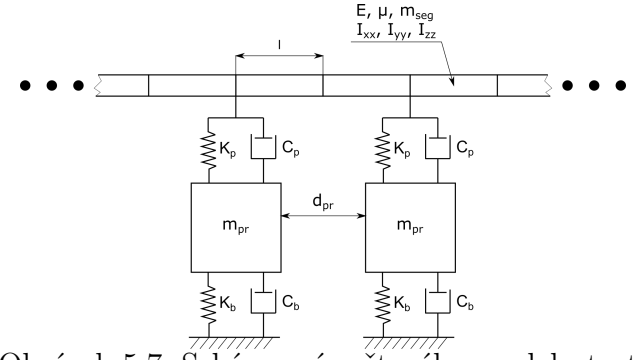
V použitém modelu trati byly zohledněny: tuhost kolejnice, tuhost spojení kolejnice a pražce, tuhost spojení pražce a náspu a tlumení náležející ke všem uvedeným tuhostem.

Tuhost a tlumení náspu, respektive spojení náspu a podloží, byla zanedbána. Toto zjednodušení odpovídá předpokladu, že násep je dokonale tuhý. V tabulce 5.3 jsou uvedeny parametry modelu trati, včetně zdrojů ze kterých byly přebrány. Youngův modul pružnosti E a Poissonův poměr μ byly ponechány na výchozích hodnotách oceli programu MSC Adams.

Tabulka 5.3: Parametry modelu trati

Parametr trati	**Značka**	**Jednotka**	**Hodnota**
Youngův modul kolejnice	E	MPa	207 000
Poissonův poměr kolejnice	μ	–	$0,29$
Délka segmentu kolejnice	l	m	$0,3$
Hmotnost segmentu kolejnice [22]	m_{seg}	kg	$16,474$
Moment setrvačnosti segmentu kolejnice [22]	I_{xx}	mm^5	$8,310 \cdot 10^9$
Moment setrvačnosti segmentu kolejnice [22]	I_{yy}	mm^5	$1,700 \cdot 10^{10}$
Moment setrvačnosti segmentu kolejnice [22]	I_{zz}	mm^5	$2,279 \cdot 10^{10}$
Vzdálenost mezi pražci [16]	d_{pr}	m	$0,6$
Hmotnost poloviny pražce [16]	m_{pr}	kg	170
Tuhost spojení kolejnice s pražcem [16]	K_p	N/m	$6 \cdot 10^7$
Tlumení spojení kolejnice s pražcem [16]	C_p	Ns/m	$7,5 \cdot 10^4$
Tuhost spojení pražce s náspem [16]	K_b	N/m	$1,6 \cdot 10^7$
Tlumení spojení kolejnice s pražcem [16]	C_b	Ns/m	$6 \cdot 10^4$
Počet pražců	n_{pr}	–	15
Počet úseků kolejnice	n_{seg}	–	30

Model trati byl realizován jako přímý úsek o 15 pražcích a délce kolejnice 9 m. Vzdálenost mezi dvěma pražci je $0,6$ m, segment kolejnice má poloviční délku. Před první a za poslední pražec je přidán jeden segment kolejnice. Model tedy celkem obsahuje 30 segmentů kolejnice. Schéma tohoto modelu trati je na obrázku 5.7.



Obrázek 5.7: Schéma výpočtového modelu trati

Kolejnice je modelována jako ”discrete flexible link”, což je způsob modelování pružných těles v MSC Adams. Tento model je analogický MKP modelu kolejnice jakožto prutu s 31 uzly. Délka segmentů byla zvolena tak, aby uzly tohoto modelu byly vždy v místě spojení kolejnice s pražcem a uprostřed mezery mezi pražci.

Přejezd vlakové soupravy, převzatý z práce [22], simuluje sílu vyvolanou přejezdem soupravy složené z lokomotivy a dvou vagónů. Parametry použité pro výpočet této síly neodpovídají žádným konkrétním typům železničních vozidel.

Pro výpočet zatížení byl použit soubor, který je přílohou práce [22], jediným upravovaným parametrem byla rychlost projíždějící soupravy. Toto zatížení pak bylo aplikováno

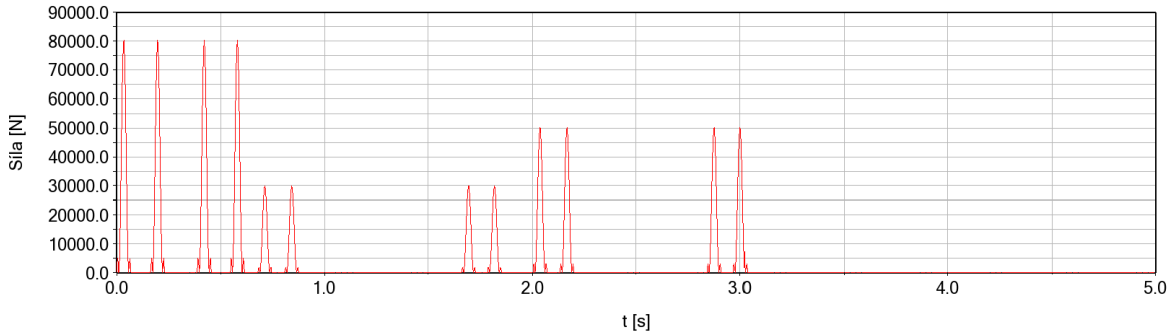
na všechny uzly kolejnice. Podle příslušné rychlosti průjezdu bylo přepočítáno zpoždění oproti průjezdu prvním uzlem kolejnice. Aplikace tohoto zatížení do MSC Adams pak byla realizována pomocí fitovací metody Akima spline.

Byly simulovány průjezdy vlaků o 3 rychlostech - 40 km/h, 72 km/h a 120 km/h. Při rychlosti 72 km/h byly dále simulovány imperfekce trati a vlaku, konkrétně přejezd vagónu s defektní ploškou na kole a uvolněný pražec.

Při všech těchto simulacích byla měřena výchylka a rychlost výchylky pražce a uzlu kolejnice v místě spojení kolejnice s měřeným pražcem.

Protože výsledné chování trati úzce souvisí s chováním rezonátorů na ní umístěných, budou v následujících podkapitolách prezentovány výsledky chování trati zároveň s chováním rezonátorů.

5.3. Ideální trať

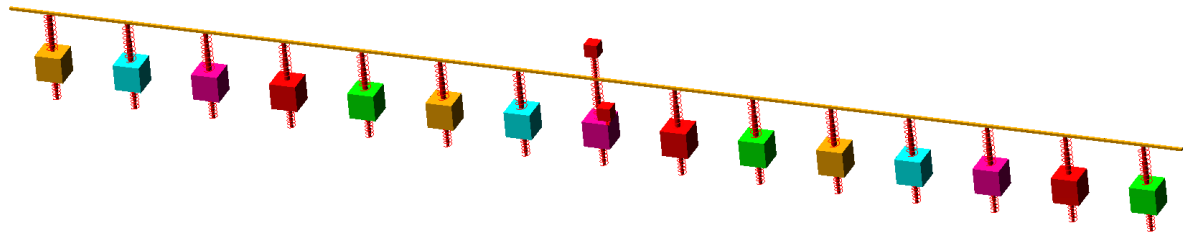


Obrázek 5.8: Průběh síly, kterou působí projíždějící souprava na kolejnici při průjezdu rychlostí 72 km/h

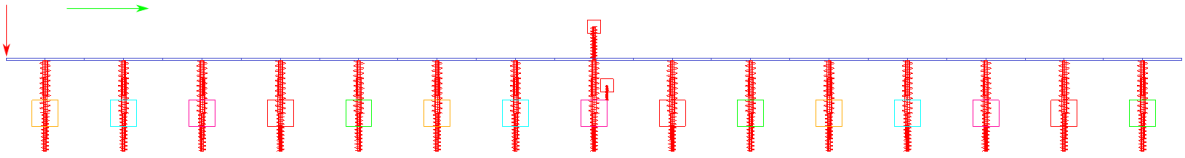
Na obrázku 5.8 je průběh síly, kterou působí projíždějící vlaková souprava na trať. Obrázek odpovídá přejezdu soupravy rychlostí 72 km/h. Pro jiné rychlosti se liší pouze časový průběh. Charakter i maximální hodnoty zůstávají stejné.

Na modely trati představené v kapitole 5.2 byly aplikovány rezonátory navržené v kapitole 5.1. To umožnilo simulovat chování těchto rezonátorů při reálném průjezdu vlakové soupravy. Tato simulace má za cíl zhodnotit, který z nich je v praxi nejvhodnější pro aplikaci v železniční dopravě.

Krom různých vlastních frekvencí rezonátorů bylo testováno i jejich umístění - rezonátor byl umístěn na kolejnici a na pražec.



(a) Trať - stínované zobrazení



(b) Trať - drátový model

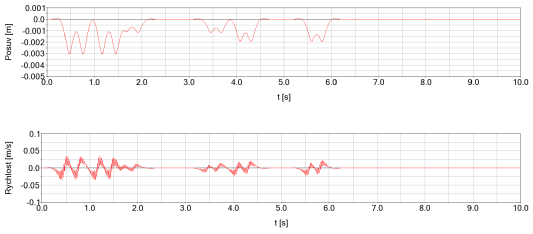
Obrázek 5.9: Reprezentace trati v MSC Adams - souprava projíždí zleva doprava, jak na obrázku (b) znázorňuje zelená šipka, sílu působící od vlaku znázorňuje červená šipka

Reprezentace trati v MSC Adams je na obrázku 5.9. Při pohledu, který je na obrázku, je simulován průjezd soupravy zleva doprava. Z toho obrázku je také patrné umístění rezonátorů - jeden je na prostředním pražci a druhý je kolejnici nad tímto pražcem, respektive na spojnici dvou segmentů kolejnice, což je vidět na obrázku 5.9(b). Simulace chování trati s oběma rezonátory vnáší do dynamického chování trati velmi malou změnu, protože hmotnost rezonátorů je oproti hmotnostem pražců a segmentů kolejnic prakticky zanedbatelná. Použité modely tratí v MSC Adams jsou obsahem přílohy B této práce.

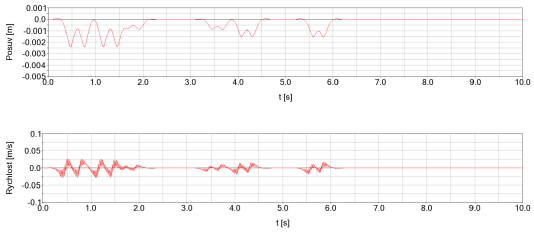
Pro každé buzení byly použity všechny elektromechanické rezonátory a obě umístění. Vyhodnocovány byly tyto parametry rezonátorů: relativní rychlost a posuv rezonátoru vůči tělesu, ke kterému byl připojen, napětí na zátěži rezonátoru, elektrický výkon na zátěži rezonátoru.

Prezentovány jsou vždy výsledky pro danou rychlost a rezonátor s nejoptimálnější vlastní frekvencí umístěný na kolejnici i na pražci.

5.3.1. Průjezd soupravy rychlostí 40 km/h



(a) Kolejnice

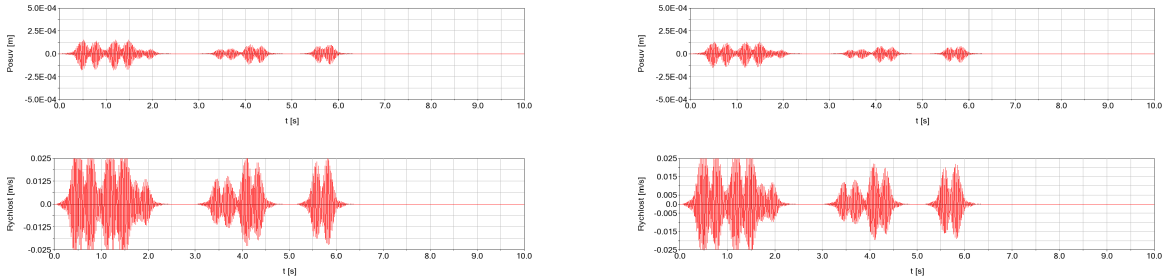


(b) Pražec

Obrázek 5.10: Posuv a rychlost posuvu trati při průjezdu soupravy rychlostí 40 km/h

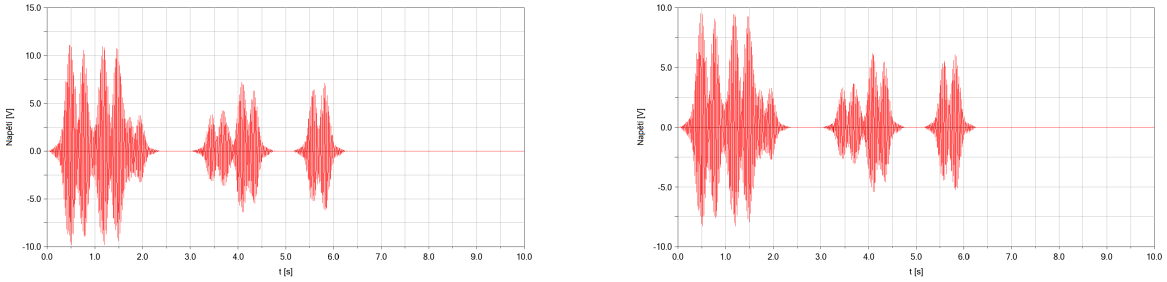
Při průjezdu vlaku rychlostí 40 km/h dochází k výchylce kolejnice zhruba o 3 mm. Pražec se za těchto podmínek vychýlí přibližně o $2,5$ mm. Působení kola na uzel kolejnice trvá zhruba $0,5$ s. Toto působení trvá tak dlouho, že při průjezdu jednoho podvozkového vozíku nestačí odeznít zatížení od prvního kola, předtím, než začne působit druhé kolo.

Při průjezdu soupravy rychlostí 40 km/h se jako nejvhodnější jeví rezonátor o vlastní frekvenci 30 Hz. Jeho elektrický výkon při umístění na pražci dosahoval maximálních hodnot přes $0,01$ W. Zatímco rezonátor o vlastní frekvenci 10 Hz, respektive 20 Hz, při stejném umístění a stejné rychlosti průjezdu vlakové soupravy dosahoval maximálního výkonu jen něco málo přes $0,003$ W, respektive $0,0035$ W.



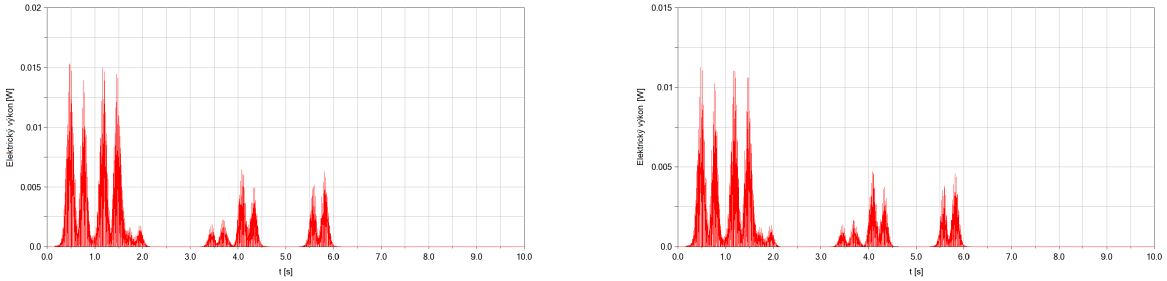
(a) Rezonátor na kolejnici (b) Rezonátor na pražci

Obrázek 5.11: Posuv a rychlost posuvu rezonátoru o vlastní frekvenci 30 Hz při průjezdu soupravy rychlostí 40 km/h



(a) Rezonátor na kolejnici (b) Rezonátor na pražci

Obrázek 5.12: Napětí na zátěži rezonátoru o vlastní frekvenci 30 Hz při průjezdu soupravy rychlostí 40 km/h

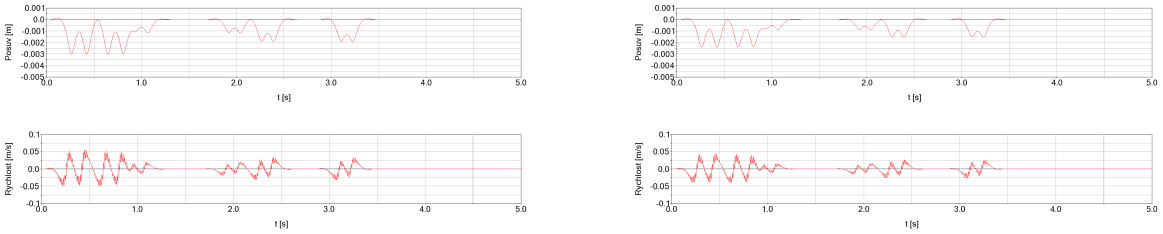


(a) Rezonátor na kolejnici (b) Rezonátor na pražci

Obrázek 5.13: Výkon na zátěži rezonátoru o vlastní frekvenci 30 Hz při průjezdu soupravy rychlostí 40 km/h

Relativní posuv rezonátoru je více než o řád menší než posuv tělesa, na kterém je umístěn. Na kolejnici je maximální výchylka o něco větší než $0,125mm$, na pražci je o něco menší. Výkon rezonátoru umístěného na kolejnici pak byl v maximu zhruba 15 mW a na pražci kolem 11 mW.

5.3.2. Průjezd soupravy rychlostí 72 km/h

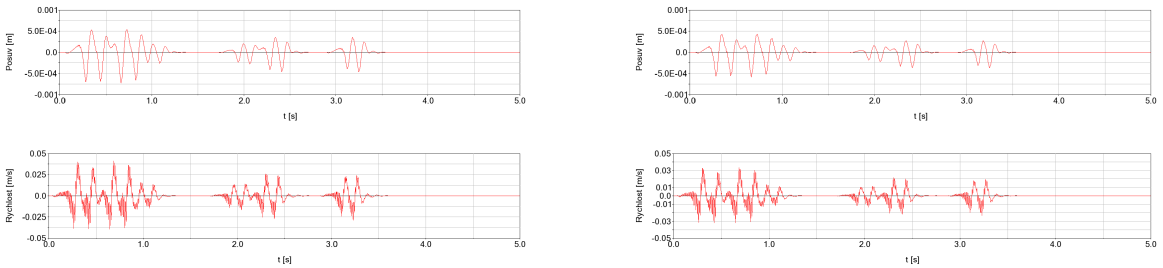


(a) Kolejnice (b) Pražec

Obrázek 5.14: Posuv a rychlost posuvu trati při průjezdu soupravy rychlostí 72 km/h

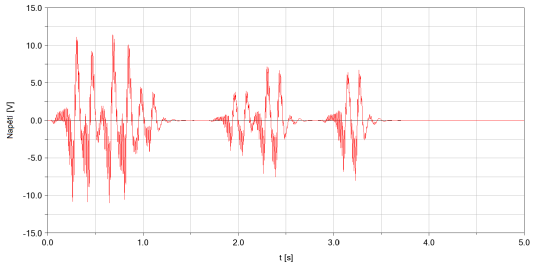
Velikosti výchylek se oproti přejezdu vlaku rychlostí 40 km/h neliší. Liší se však délka pulzu od jednotlivých kol. Ta se zkrátila na méně než $0,25$ s.

Při průjezdu soupravy rychlostí 72 km/h se jako nejvhodnější jeví rezonátor o vlastní frekvenci 10 Hz. Jeho elektrický výkon při umístění na pražci dosahoval maximálních hodnot přes $0,0125$ W. Zatímco rezonátory o vlastních frekvencích 20 Hz, respektive 30 Hz, při stejném umístění a stejné rychlosti průjezdu vlakové soupravy dosahovaly maximálního výkonu jen kolem $0,006$ W, respektive $0,0035$ W.

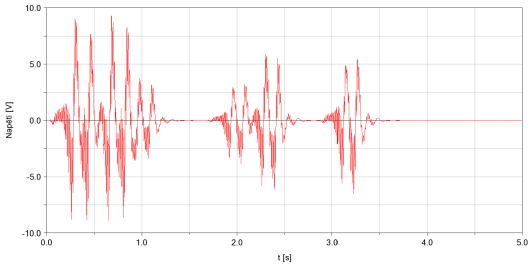


(a) Rezonátor na kolejnici (b) Rezonátor na pražci

Obrázek 5.15: Posuv a rychlost posuvu rezonátoru o vlastní frekvenci 10 Hz při průjezdu soupravy rychlostí 72 km/h

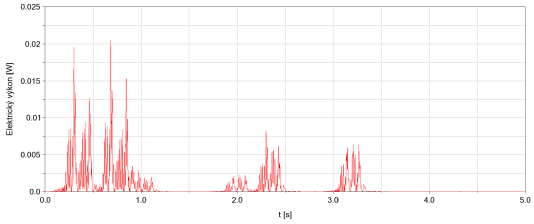


(a) Rezonátor na kolejnici

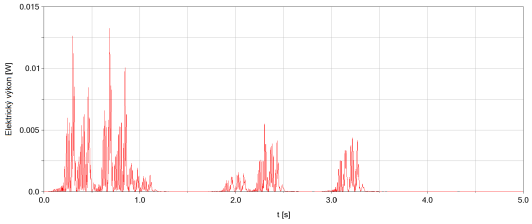


(b) Rezonátor na pražci

Obrázek 5.16: Napětí na zátěži rezonátoru o vlastní frekvenci 10 Hz při průjezdu soupravy rychlostí 72 km/h



(a) Rezonátor na kolejnici

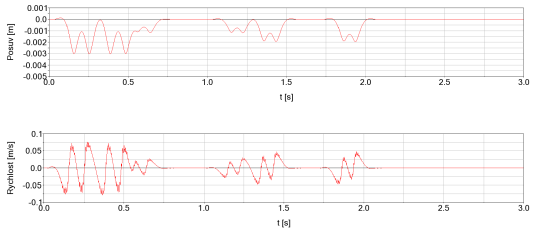


(b) Rezonátor na pražci

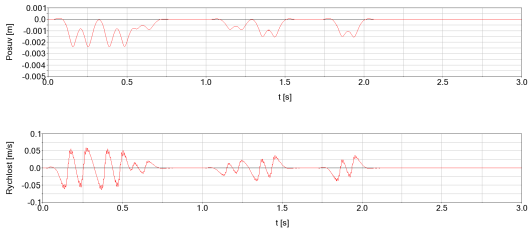
Obrázek 5.17: Výkon na zátěži rezonátoru o vlastní frekvenci 10 Hz při průjezdu soupravy rychlostí 72 km/h

Maximální posuv rezonátoru byl při průjezdu soupravy rychlostí 72 km/h při umístění na kolejnici i na pražci zhruba $0,5$ mm. Maximální výkon rezonátoru umístěného na kolejnici byl 20 mW. Na pražci byl maximální výkon kolem 13 mW.

5.3.3. Průjezd soupravy rychlostí 120 km/h



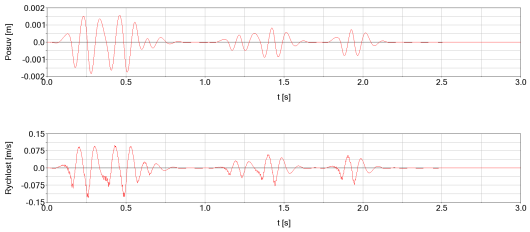
(a) Kolejnice



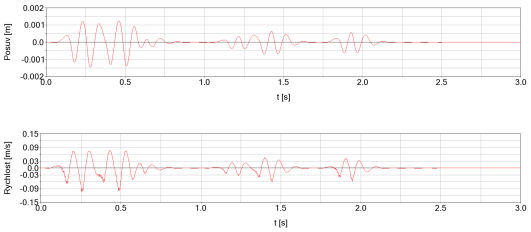
(b) Pražec

Obrázek 5.18: Posuv a rychlost posuvu trati při průjezdu soupravy rychlostí 120 km/h

Při průjezdu soupravy rychlostí 120 km/h se jako nejvhodnější opět jeví rezonátor s vlastní frekvencí 10 Hz. Jeho elektrický výkon při umístění na pražci dosahoval maximálních hodnot téměř $0,1$ W. Zatímco rezonátory o vlastních frekvencích 20 Hz, respektive 30 Hz, při stejném umístění a stejné rychlosti průjezdu vlakové soupravy dosahovaly maximálního výkonu jen asi $0,025 \div 0,030$ W, respektive mírně přes $0,01$ W.

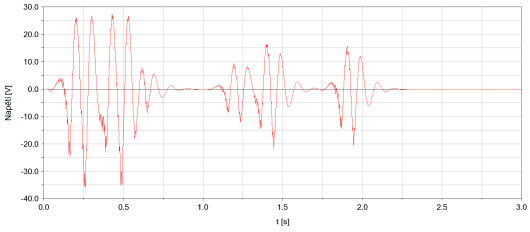


(a) Rezonátor na kolejnici

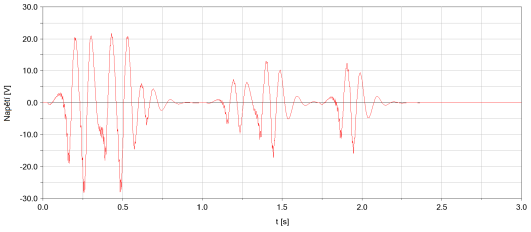


(b) Rezonátor na pražci

Obrázek 5.19: Posuv a rychlost posuvu rezonátoru o vlastní frekvenci 10 Hz při průjezdu soupravy rychlostí 120 km/h

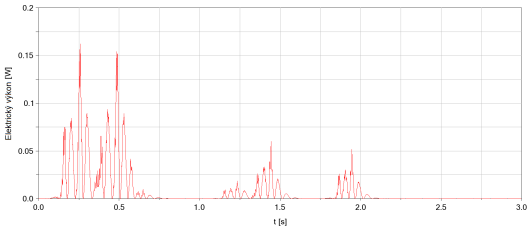


(a) Rezonátor na kolejnici

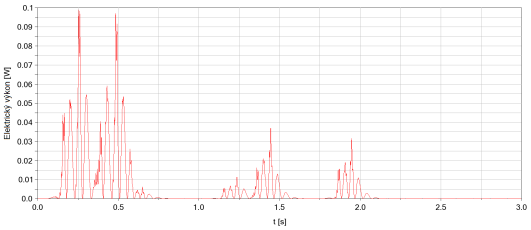


(b) Rezonátor na pražci

Obrázek 5.20: Napětí na zátěži rezonátoru o vlastní frekvenci 10 Hz při průjezdu soupravy rychlostí 120 km/h



(a) Rezonátor na kolejnici

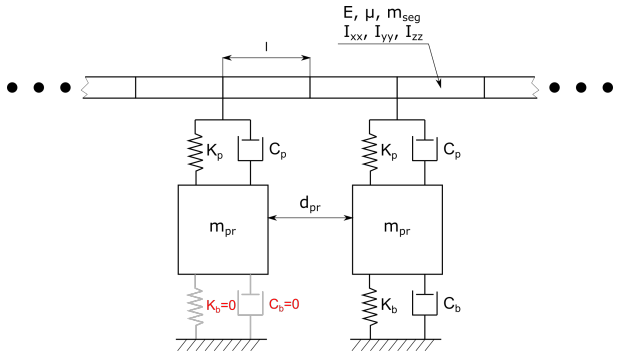


(b) Rezonátor na pražci

Obrázek 5.21: Výkon na zátěži rezonátoru o vlastní frekvenci 10 Hz při průjezdu soupravy rychlostí 120 km/h

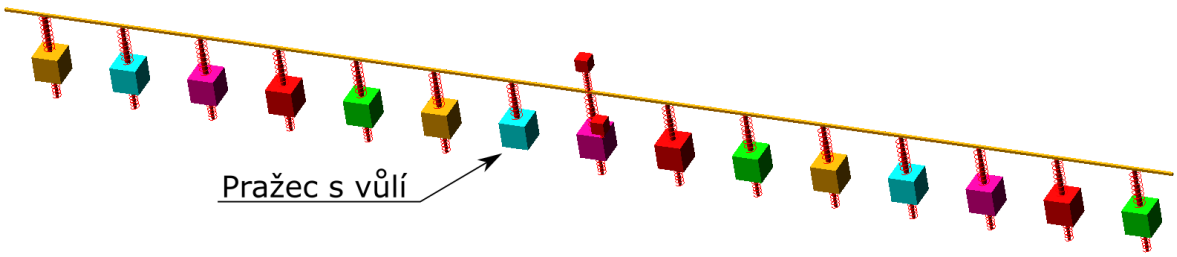
Při průjezdu soupravy rychlostí 120 km/h je maximální výchylka rezonátoru kolem $1,5$ mm v obou umístěních. Elektrický výkon rezonátoru při umístění na kolejnici dosahuje špičkové hodnoty přes 150 mW a při umístění na pražci dosahuje hodnoty téměř 100 mW.

5.4. Vůle pod pražcem

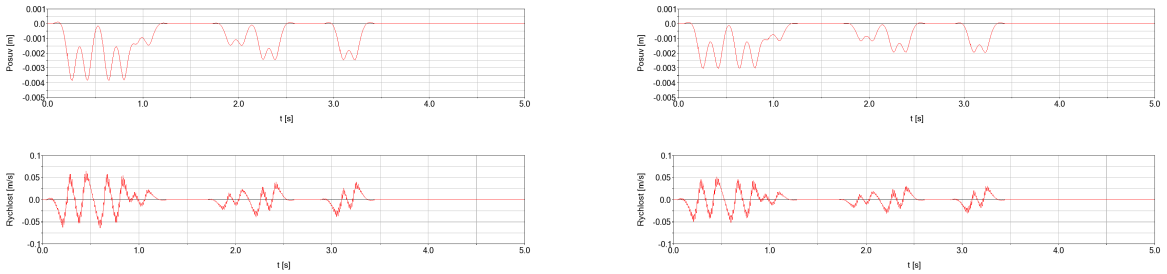


Obrázek 5.22: Schéma výpočtového modelu trati s vůlí pod pražcem

Obě imperfekce byly simulovány při průjezdu soupravy rychlostí 72 km/h. Jako první byla simulována vůle pod pražcem. Ta byla simulována tím, že byla odebrána silová vazba mezi pražcem a železničním náspem, jak je znázorněno na obrázku 5.22. Tato imperfekce byla simulována na pražci, který, vzhledem ke směru průjezdu soupravy, předcházel pražci, na kterém probíhala měření. Uspořádání je patrné z obrázku 5.23.



Obrázek 5.23: Reprezentace trati s vůlí pod pražcem - směr průjezdu soupravy je zleva doprava

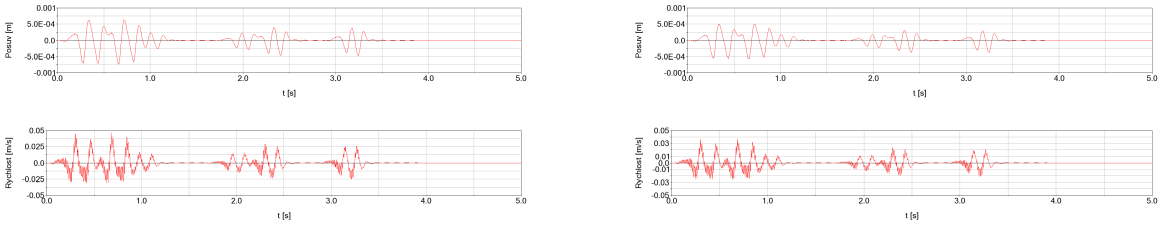


(a) Kolejnice (b) Pražec

Obrázek 5.24: Posuv a rychlost posuvu trati při průjezdu soupravy rychlostí 72 km/h, trať s vůlí pod pražcem

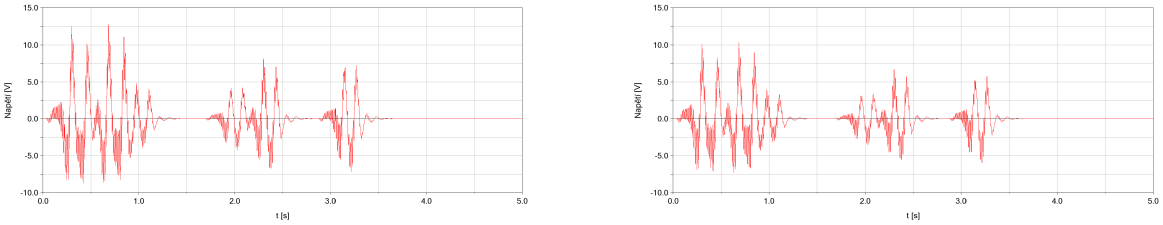
Při průjezdu soupravy rychlostí 72 km/h po trati s uvolněným pražcem se jako nejvhodnější jeví opět rezonátor o vlastní frekvenci 10 Hz. Jeho elektrický výkon při umístění na pražci dosahoval maximálních hodnot téměř $0,0125$ W. Zatímco rezonátory o vlastních

frekvencí 20 Hz, respektive 30 Hz, při stejném umístění a stejné rychlosti průjezdu vlakové soupravy dosahovaly maximálního výkonu jen kolem $0,004\ W$, respektive $0,0025\ W$. U rezonátoru s vlastní frekvencí 10 Hz tedy došlo při této poruše k nárůstu výkonu zhruba o 25 % oproti ideálnímu stavu, zatímco u ostatních rezonátorů došlo ke snížení výkonu o srovnatelnou procentuální hodnotu (přibližně $25 \div 33$ %).



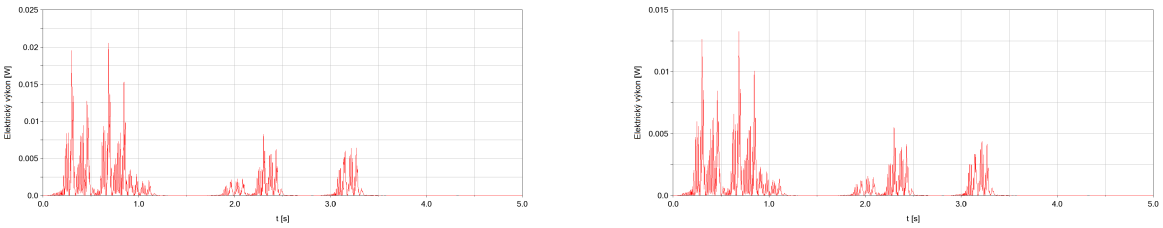
(a) Rezonátor na kolejnici (b) Rezonátor na pražci

Obrázek 5.25: Posuv a rychlost posuvu rezonátoru o vlastní frekvenci 10 Hz při průjezdu soupravy rychlostí 72 km/h, trať s vůlí pod pražcem



(a) Rezonátor na kolejnici (b) Rezonátor na pražci

Obrázek 5.26: Napětí na zátěži rezonátoru o vlastní frekvenci 10 Hz při průjezdu soupravy rychlostí 72 km/h, trať s vůlí pod pražcem

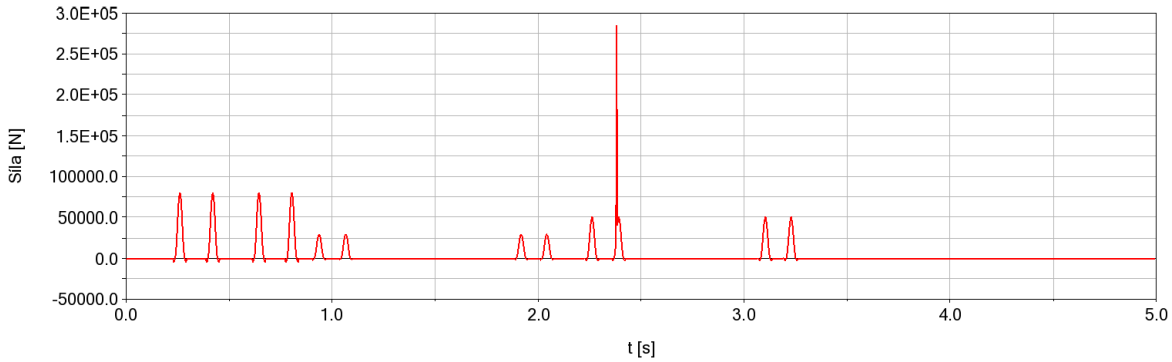


(a) Rezonátor na kolejnici (b) Rezonátor na pražci

Obrázek 5.27: Výkon na zátěži rezonátoru o vlastní frekvenci 10 Hz při průjezdu soupravy rychlostí 72 km/h, trať s vůlí pod pražcem

Uvolnění pražce se oproti průjezdu soupravy po ideální trati projevilo nárůstem výchylky. V případě rezonátoru umístěného na kolejnici byla výchylka přibližně $0,6\ mm$, při umístění na pražci je maximální výchylka $0,5\ mm$. Dosažený špičkový výkon je kolem 20 mW při umístění rezonátoru na kolejnici. Při umístění rezonátoru na pražec je špičkový výkon kolem 13 mW.

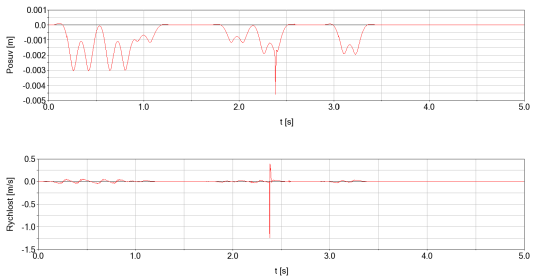
5.5. Vozidlo s defektní ploškou na kole



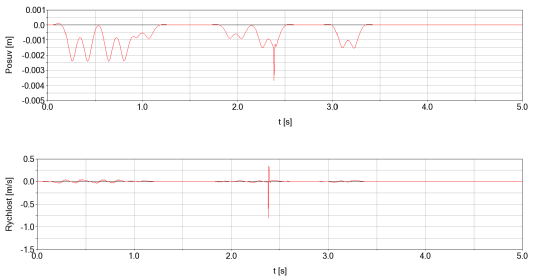
Obrázek 5.28: Průběh síly, kterou působí projíždějící souprava s ploškou na kole na kolejnici při průjezdu rychlostí 72 km/h

Druhou simulovanou imperfekcí je průjezd soupravy s defektní ploškou na kole. Simulace průjezdu vagónu s defektní ploškou na kole (plochým kolem) byla provedena podle disertační práce [23]. Z této práce je patrné, že délka rázu, který je způsoben ploškou na kole, je při rychlosti vlaku 72 km/h zhruba $0,005$ s a maximální síla při rázu je přibližně pětinásobkem nominální síly. Výsledná síla, kterou souprava působí na kolejnici je na obrázku 5.28.

Jak se tato úprava budící síly projevila na modelu trati je znázorněno na obrázku 5.29.



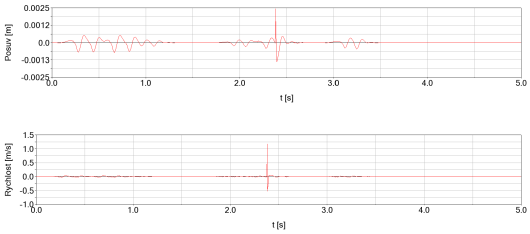
(a) Kolejnice



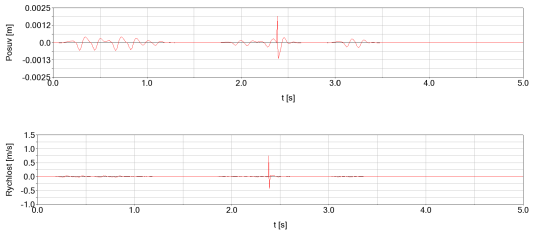
(b) Pražec

Obrázek 5.29: Posuv a rychlost posuvu trati při průjezdu soupravy s ploškou na kole rychlostí 72 km/h

Při průjezdu soupravy s plochým kolem rychlostí 72 km/h se, vzhledem ke stejným parametrům základního buzení, opět jako nejvhodnější jeví rezonátor o vlastní frekvenci 10 Hz. Ráz způsobený defektem kola byl tak velký, že u všech rezonátorů vyvolal okamžitý špičkový výkon přes 5 W. Tento děj byl nejrychleji utlumen rezonátorem o vlastní frekvenci 10 Hz, naopak nejdéle doznával u rezonátoru s vlastní frekvencí 30 Hz. Z hlediska okamžitého zisku energie by se tedy rezonátor o vlastní frekvenci 30 Hz mohl jevit jako výhodnější, avšak z hlediska průjezdu celé soupravy byl jeho výkon podstatně nižší.

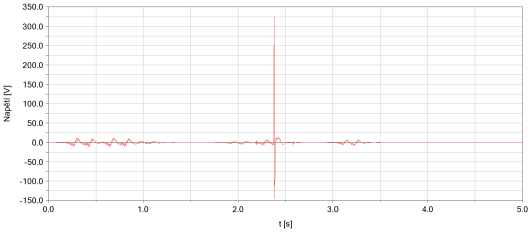


(a) Rezonátor na kolejnici

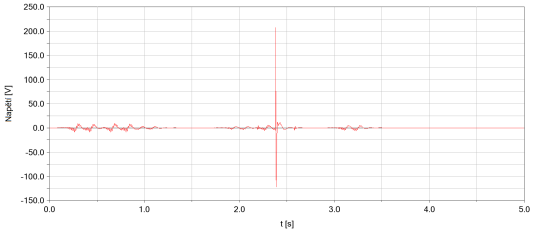


(b) Rezonátor na pražci

Obrázek 5.30: Posuv a rychlost posuvu rezonátoru o vlastní frekvenci 10 Hz při průjezdu soupravy s ploškou na kole rychlostí 72 km/h

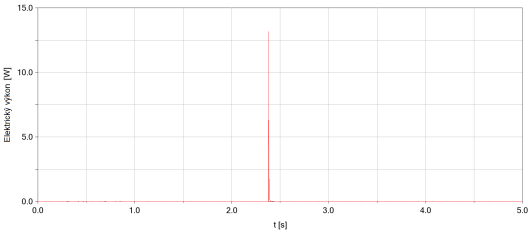


(a) Rezonátor na kolejnici

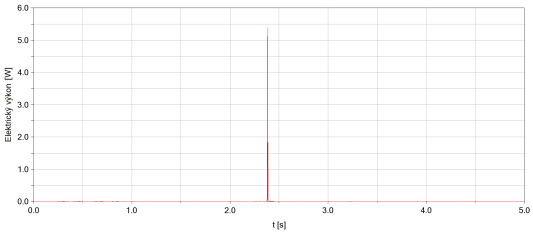


(b) Rezonátor na pražci

Obrázek 5.31: Napětí na zátěži rezonátoru o vlastní frekvenci 10 Hz při průjezdu soupravy s ploškou na kole rychlostí 72 km/h



(a) Rezonátor na kolejnici



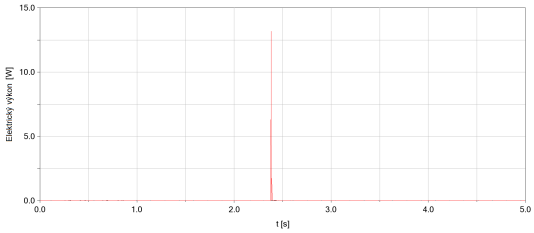
(b) Rezonátor na pražci

Obrázek 5.32: Výkon na zátěži rezonátoru o vlastní frekvenci 10 Hz při průjezdu soupravy s ploškou na kole rychlostí 72 km/h

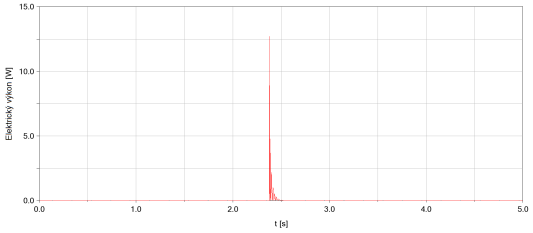
Jak již bylo zmíněno, ploška na kole má velmi zásadní vliv na chování trati, respektive rezonátorů. Vzhledem k tomu, jak se lišila doba potřebná pro utlumení tohoto pulzu mezi jednotlivými rezonátory, jsou na obrázku 5.33 pro porovnání zobrazeny výkony rezonátorů o vlastní frekvenci 10 Hz a 30 Hz. Tento obrázek zobrazuje chování rezonátorů umístěných na kolejnici i na pražci. Nejdříve jsou ukázány celkové grafy elektrického výkonu. Následně jsou uvedeny výřezy, které umožňují detailnější porovnání chování rezonátorů po celou dobu simulace.

Rezonátor s vlastní frekvencí 10 Hz dosáhne špičkového výkonu kolem 13 W při umístění na kolejnici a kolem $5,4$ W při umístění na pražci. Oproti tomu dosahuje rezonátor o vlastní frekvenci 30 Hz při umístění na kolejnici kolem $12,5$ W a při umístění na pražci $5,1$ W. Z hlediska dosaženého špičkového výkonu se od sebe tedy jednotlivé rezonátory vzájemně příliš neliší.

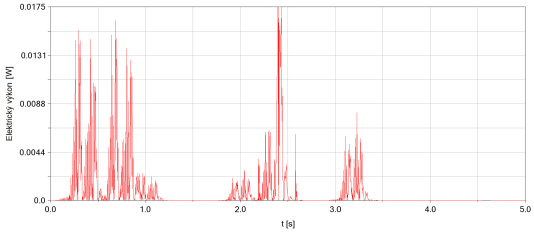
V čem se podstatně liší je doba, za kterou dojde k utlumení tohoto pulzu. Rezonátoru o $f_0 = 10\ Hz$ to trvá přibližně $0,25\ s$. Oproti tomu rezonátoru s $f_0 = 30\ Hz$ zatlumení pulzu trvá zhruba $0,5\ s$, tedy přibližně dvakrát déle.



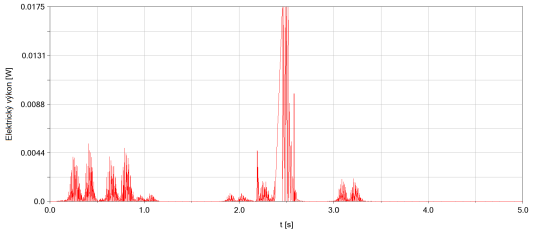
(a) Rezonátor s $f_0 = 10\ Hz$ na kolejnici



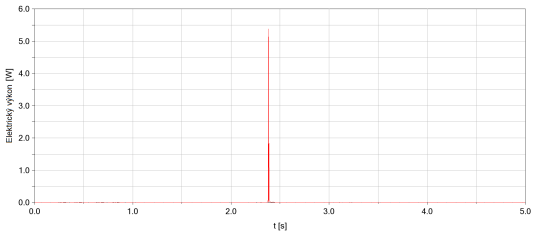
(b) Rezonátor s $f_0 = 30\ Hz$ na kolejnici



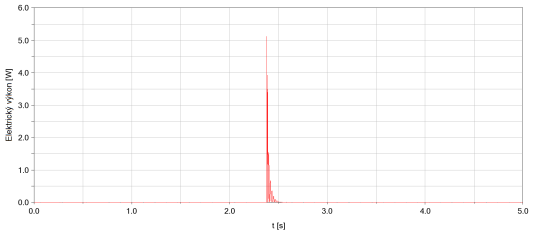
(c) Rezonátor s $f_0 = 10\ Hz$ na kolejnici - detail



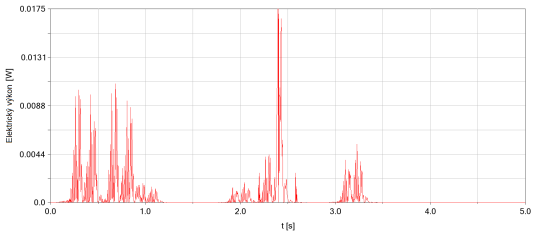
(d) Rezonátor s $f_0 = 30\ Hz$ na kolejnici - detail



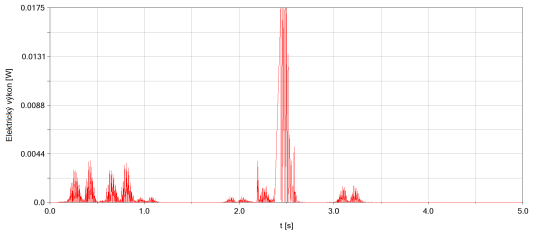
(e) Rezonátor s $f_0 = 10\ Hz$ na pražci



(f) Rezonátor s $f_0 = 30\ Hz$ na pražci



(g) Rezonátor s $f_0 = 10\ Hz$ na pražci - detail



(h) Rezonátor s $f_0 = 30\ Hz$ na pražci - detail

Obrázek 5.33: Porovnání výkonu na zátěži rezonátorů s vlastními frekvencemi $f_0 = 10\ Hz$ a $f_0 = 30\ Hz$ při průjezdu soupravy s ploškou na kole rychlostí 72 km/h

Je patrné, že ráz způsobený ploškou na kole je skutečně extrémní a získané hodnoty velmi výrazně přesahují hodnoty způsobené průjezdem při ideálním stavu a při uvolněném pražci. Výchylka rezonátoru dosahovala maxima kolem $2,5\ mm$ na kolejnici, na pražci kolem $1,9\ mm$. Maximum výkonu na kolejnici dosahovalo ke $13\ W$, na pražci se blížilo $5,5\ W$. Tyto hodnoty jsou oproti běžným hodnotám řádově vyšší.

5.6. Zhodnocení výpočtového modelu trati a chování rezonátorů umístěných na trati

Z provedených simulací je patrné, že velikost posuvu trati je nezávislá na rychlosti průjezdu soupravy. Rychlost průjezdu ovlivňuje pouze rychlost posuvu.

Posuv kolejnice je zhruba 3 mm a posuv pražce je přibližně $2,5$ mm. Je tedy patrné, že pražec se posouvá méně než kolejnice.

Při vůli pod pražcem, který byl před měřeným pražcem, byla výchylka větší. Místo 3 mm byl posuv kolejnice při průjezdu lokomotivy zhruba $3,75$ mm, tedy zhruba o 25 % větší. To je způsobeno tím, že síla, kterou normálně přenáší uvolněný pražec, je rozložena mezi sousední pražce.

Důsledek přejezdu soupravy s defektní ploškou na kole je ještě markantnější. Maximální posuv kolejnice při průjezdu druhého vagónu byl za normálních okolností zhruba 2 mm, při rázu způsobeném ploškou na kole byl posuv přes $4,5$ mm. Tento rozdíl představuje nárůst o 125 %.

Je tedy zřejmé, že každá imperfekce se při průjezdu vlaku na výsledných posuvech prvků trati výrazně projeví, a že vytvořený model trati je schopen tyto změny simulovat a zajistit jejich přenesení na rezonátor.

Zhodnocení rezonátorů jasně ukazuje, že pro drážní aplikace se ze simulovaných rezonátorů nejvíce hodí ten s vlastní frekvencí 10 Hz. Při všech přejezdech, krom přejezdu soupravy rychlostí 40 km/h, dosahoval největšího získaného elektrického výkonu.

Pro aplikace na traťové úseky s přejezdy vlakových souprav nízkými rychlostmi by se, na základě simulace přejezdu soupravy rychlostí 40 km/h, hodil rezonátor s vlastní frekvencí 30 Hz.

6. Elektromechanický rezonátor pro nekotvenou bóji na moři

Výzkum publikovaný v článcích [20] a [21] ukazuje potřebu vyvinout spolehlivý zdroj energie pro volně plovoucí bóje sloužící k monitoringu moří a mořskému výzkumu. Pro zvolený typ aplikace je potřeba rezonátor s velmi nízkou vlastní frekvencí. Vzhledem k frekvenci, kterou má mořské vlnobití, autoři doporučují vlastní frekvenci rezonátoru přibližně $1,5\ Hz$.

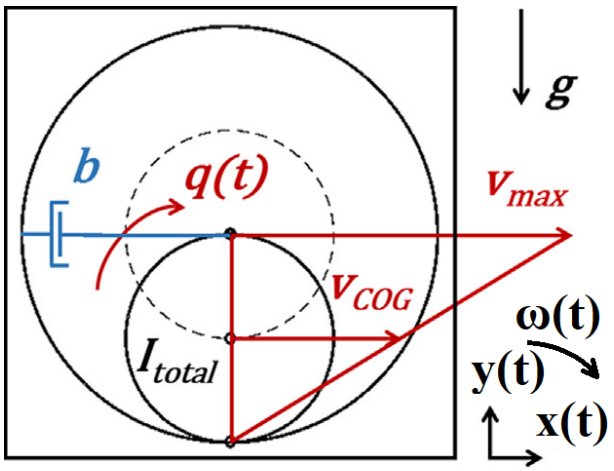
Rezonátor pro využití na moři potřebuje, kromě nízké vlastní frekvence, i možnost buzení ve více osách. Klasický rezonátor s jedním translačním stupněm volnosti by byl velmi neefektivní.

Rezonátor, který odpovídá těmto požadavkům, tedy je možné jej budit pohybem ve více osách a má nízkou vlastní frekvenci, už byl na VUT vyvinut [19]. Cílem následující části této práce je naladit tento rezonátor pro nižší vlastní frekvenci a ověřit, jestli by pro takovou aplikaci byl vhodný.

V tomto rezonátoru je elektrická energie generována na základě odvalování vnitřního válečku v kavitě kruhového průřezu. Elektrické napětí je generováno na základě vztahu 4.5, ve kterém je zobecněným pohybem relativní rotační pohyb vnitřního válečku vůči kavitě. Jeho návrh tedy vychází z výpočtu vlastní frekvence za předpokladu splnění podmínky valení.

V této kapitole bude prezentováno naladění tohoto rezonátoru pro nižší vlastní frekvenci a následně simulace jeho chování. Nejdříve bude simulována jeho odezva při sinovém buzení, dále při buzení odpovídajícím reálnému chování bóje na moři. Data odpovídající buzení skutečným mořem byla získána na základě článku [24].

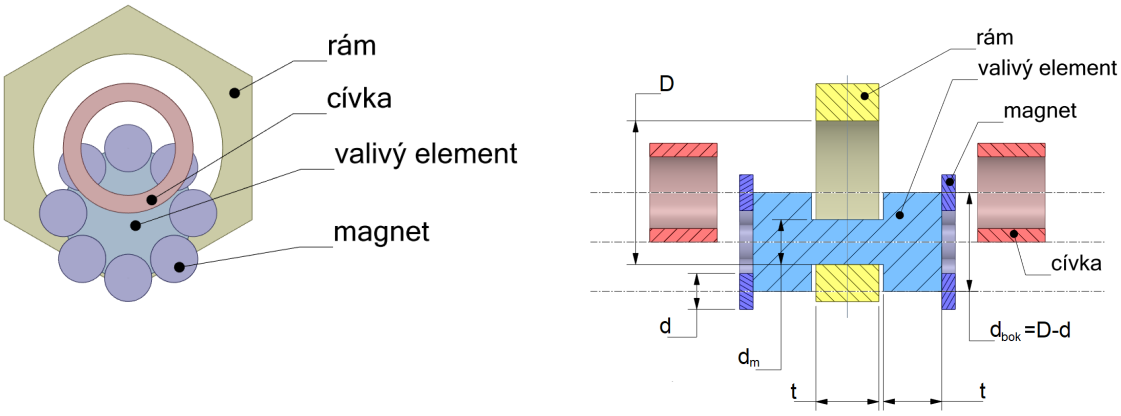
6.1. Volba parametrů rezonátoru



Obrázek 6.1: Schéma rezonátoru založeného na obecném rovinném pohybu [19]; upraveno autorem

Rezonátor, který je použit jako základ pro získávání elektrické energie z pohybu bóje je původně navržen na vlastní frekvenci blízkou 3 Hz. Proto bylo potřeba jej upravit tak, aby se jeho vlastní frekvence přiblížila frekvenci buzení. Na základě dat, která slouží k simulaci vnějšího buzení způsobeného mořskými vlnami, byla tato frekvence určena jako $1,6$ Hz.

Toto ladění bylo realizováno pomocí skriptu v programu Matlab. Pro ladění byla zvolena úprava tvaru vnitřního válce. Schéma upraveného tvaru je na obrázku 6.2. Na obrázku 6.2(b) je řez tímto schématem a popis geometrických parametrů.



(a) Čelní pohled (b) Řez

Obrázek 6.2: Schéma rezonátoru určeného pro bóji

Ladění bylo provedeno se dvěma nezávislými parametry. Těmito parametry byly průměr kavity D $[mm]$ a průměr valivého elementu d $[mm]$.

Parametry, které sloužily jako vstupy pro ladění byly: minimální průměr kavity D_{min} $[m]$, maximální průměr kavity D_{MAX} $[m]$ a krok, s kterým průměr kavity rostl od minima do maxima D_{step} $[m]$. Tloušťka válečků t $[m]$ byla považována za konstantní, stejně jako průměry magnetů d_m $[m]$ a jejich hmotnosti m_m $[kg]$. Zvolené hodnoty těchto parametrů jsou v tabulce 6.1.

Tabulka 6.1: Parametry pro ladění rezonátoru bóje

Parametr	**Značka**	**Jednotka**	**Hodnota**
Minimální průměr kavity	D_{min}	mm	10
Maximální průměr kavity	D_{MAX}	mm	90
Krok přírůstku	D_{step}	mm	2
Tloušťka válečku a bočnic	t	mm	10
Průměr magnetu	d_m	mm	10
Hmotnost magnetu	m_m	g	$1,1$
Hustota oceli	ρ	kg/m^3	7 850

Na základě těchto vstupních parametrů probíhalo ladění tak, že se nejdříve vygenerovaly průměry valivých elementů podle rovnice (6.1), kde i označuje pořadové číslo průměru kavity a j pořadové číslo průměru valivého elementu. Dále ve výpočtu se parametr d chová

jako nezávislá proměnná, nicméně pro určení jeho hodnot bylo zvoleno jeho odvození od hodnot řady průměrů kavity.

$$d(j) = \frac{D(i)}{2} \qquad [m] \quad (6.1)$$

Následně byly vypočítány průměry bočních disků pro jednotlivé kombinace parametrů D a d:

$$d_{bok}(i,j) = D(i) - d(j) \qquad [m] \quad (6.2)$$

Tento způsob výpočtu d_{bok} byl zvolen proto, aby se při valení nacházely středy magnetů vždy uprostřed kavity. Tím bude valení valivého elementu efektivněji generovat elektrický proud, neboť při relativním rotačním pohybu valivého elementu bude docházet k větší změně magnetického pole na cívce, jejíž osa je shodná s osou kavity, než by tomu bylo, kdyby osy magnetů neprocházely přes osu cívky.

Pro určení počtu magnetů, umístitelných při daném d_{bok} na obvod bočního disku, slouží vztah (6.3). Výsledná hodnota byla vždy zaokrouhlena na celé číslo směrem dolů.

$$n(i,j) = 2\frac{\pi \cdot d_{bok}(i,j)}{d_m} \qquad [m] \quad (6.3)$$

Následně byla na základě hustoty oceli, což je materiál valivého elementu, spočítána jeho hmotnost, ke které byly přičteny hmotnosti magnetů, čímž byla získána celková hmotnost m $[kg]$. Z dílčích hmotností a geometrie byl následně vypočítán výsledný moment setrvačnosti valivého elementu s magnety vůči jeho ose symetrie I $[kg \cdot m^2]$.

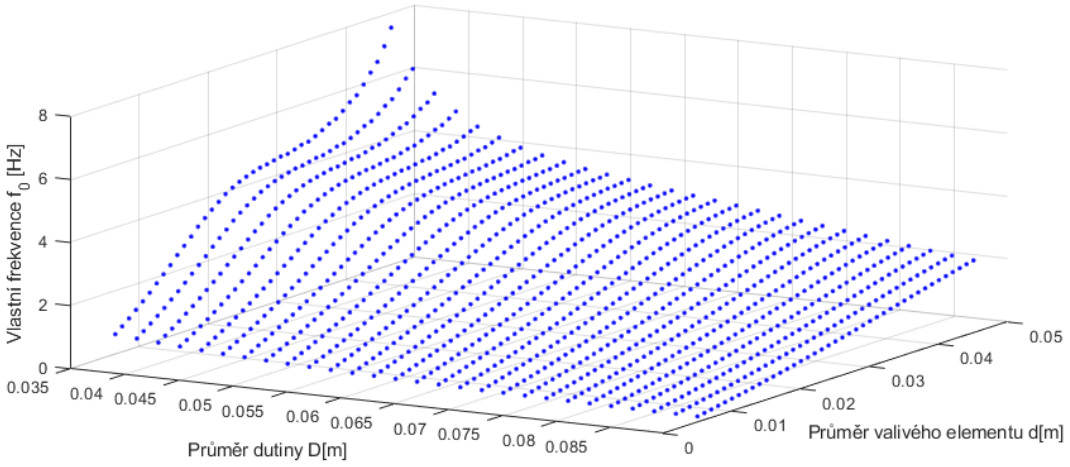
Z těchto hodnot byla následně spočítána vlastní úhlová rychlost podle vztahu:

$$\Omega_0(i,j) = \sqrt{\frac{\frac{\frac{d}{2}m \cdot g}{I}}{\frac{\frac{D}{2}}{\frac{d}{2}} + \frac{\frac{d}{2}m}{I} \cdot \left(\frac{D}{2} - \frac{d}{2}\right)}} \qquad [rad/s] \quad (6.4)$$

Kde $g = 9,81\ m/s^2$ je gravitační zrychlení. Takto úhlová rychlost byla následně převedena na frekvenci pomocí vztahu:

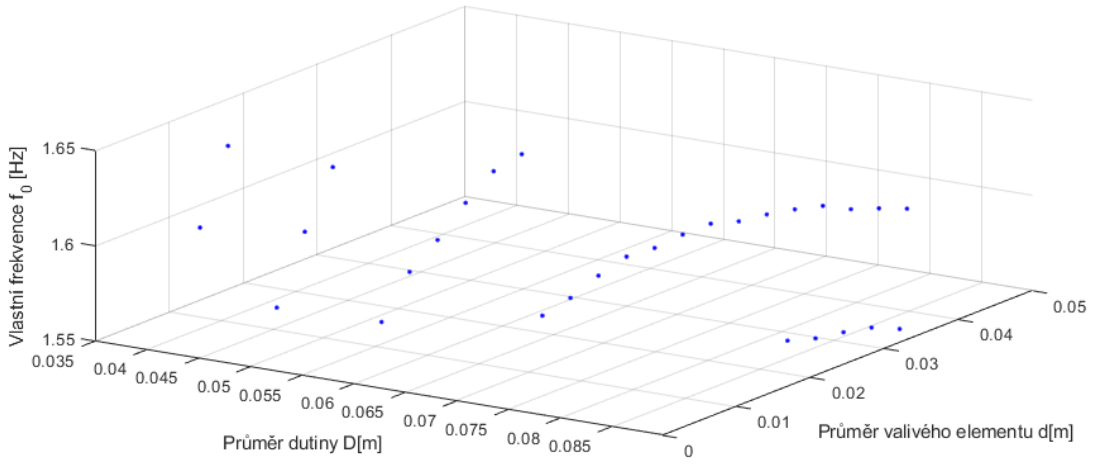
$$f_0(i,j) = \frac{\Omega_0(i,j)}{2\pi} \qquad [Hz] \quad (6.5)$$

Výstupem tohoto ladění byl prostorový graf, který měl na jedné ose průměr kavity D, na druhé průměr válečku valivého elementu d a na poslední ose byly vlastní frekvence f_0. Tento graf je na obrázku 6.3.



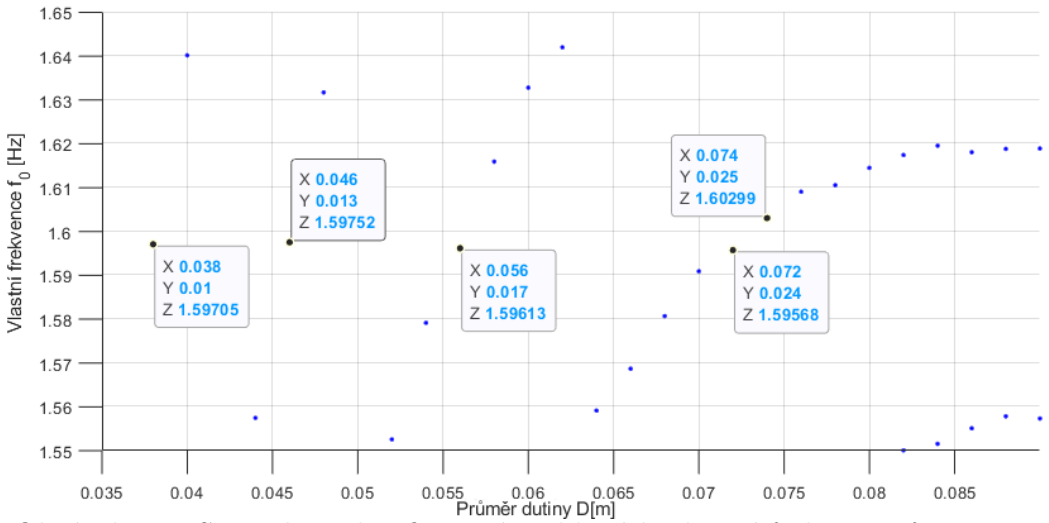
Obrázek 6.3: Průměry kavit, válečků valivých elementů a vlastní frekvence rezonátoru pro jejich kombinace

Z tohoto obrázku je jasně patrné, že frekvence blízké požadované hodnotě se podařilo získat hned několikrát. Proto byl tento graf vykreslen s omezením vlastních frekvencí na rozsah $1,55 \div 1,65\ Hz$. Takto upravený graf je na obrázku 6.4.



Obrázek 6.4: Průměry kavit, válečků valivých elementů a vlastní frekvence rezonátoru pro jejich kombinace omezené na rozsah $1,55 \div 1,65\ Hz$

Z takto upraveného grafu bylo snadné, po vhodném natočení náhledu, zvolit body, které byly požadované vlastní frekvenci nejbližší. Výsledek je na obrázku 6.5. Zde je pohled omezen na rovinu $D - f_0$ a jsou zvýrazněny souřadnice bodů nejbližších požadované vlastní frekvenci. Hodnotě X odpovídá D, hodnotě Y odpovídá d a Z označuje vlastní frekvenci f_0.



Obrázek 6.5: Souřadnice konfigurací nejbližších vlastní frekvenci $f_0 = 1,6\ Hz$

Z bodů, které se blížily požadované vlastní frekvenci byl zvolen bod s průměrem kavity 46 mm a průměrem valivého elementu 13 mm, při této kombinaci parametrů je vlastní frekvence při splnění podmínky valení $1,597\ Hz$. Parametry výsledného rezonátoru jsou v tabulce 6.2. Parametry elektrického obvodu tohoto rezonátoru byly zachovány tak, jak je navrhoval původní autor.

Tabulka 6.2: Výsledné parametry rezonátoru pro bóji

Parametr rezonátoru	**Značka**	**Jednotka**	**Hodnota**
Tloušťka válečku a bočnic	t	mm	10
Průměr kavity	D	mm	46
Průměr válečku valivého elementu	d	mm	13
Průměr magnetu	d_m	mm	10
Hmotnost magnetu	m_m	g	$1,1$
Počet magnetů (na obou discích)	n	–	20
Celková hmotnost valivého elementu	m	g	$166,7$
Celkový moment setrvačnosti valivého elementu	I	$kg \cdot m^2$	$2,476 \cdot 10^{-5}$
Vlastní frekvence	f_0	Hz	$1,597$
Odpor cívky [19]	R_c	Ω	2 000
Odpor zátěže [19]	R_L	Ω	2 000
Vazebný koeficient systému [19]	c	Wb/rad	$0,2$

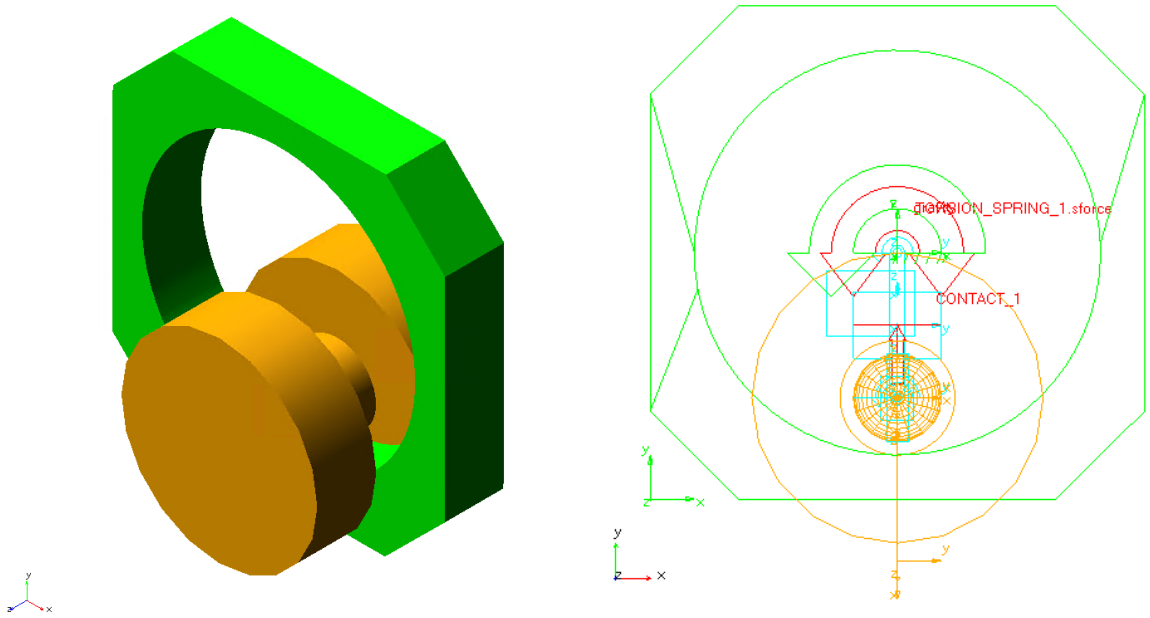
Na základě těchto vstupních dat byly vytvořeny modely rezonátoru v MSC Adams, které jsou přílohou této práce (příloha C). Tyto modely byly následně buzeny způsoby popsanými v následujících podkapitolách.

6.2. Chování rezonátoru při sinovém buzení

Po navržení teoretické vlastní frekvence rezonátoru bylo potřeba ověřit, zda jeho chování bude odpovídat i při buzení, které se bude blížit jeho buzení na moři. Za tímto účelem byla vytvořena jeho reprezentace v MSC Adams, která je na obrázku 6.6. V rámci této reprezentace nebyly zahrnuty magnety jako prvky zobrazované geometrie. Jejich hmotnost

a moment setrvačnosti však byly zahrnuty pomocí příslušných rovnic, aby výsledné mechanické chování odpovídalo navrhovanému rezonátoru.

Aby bylo možné zajistit správné chování valivého elementu v MSC Adams, byl model doplněn o náhradní kinematický mechanismus, který je na obrázku 6.6(b). Tento mechanismus se skládá z prutu (světle modré svislé těleso) a koule (síťované oranžové těleso uprostřed valivého elementu). Prut byl spojen rotační vazbou s rámem rezonátoru (zelené těleso) a posuvnou vazbou s koulí. Koule pak byla rotační vazbou připojena k valivému elementu (oranžové těleso). Oběma tělesům tvořícím náhradní kinematický mechanismus byla nastavena hustota $0,1\ kg/m^3$, což zajistilo, že jejich vliv na výsledné dynamické chování mechanismu byl zanedbatelný. Toto uspořádání, zajistilo správný pohyb valivého elementu uvnitř kavity. Oranžová čára je přímka umístěná na valivý element, aby bylo možné ze záznamu simulace poznat, zda dochází k valení, nebo smýkání.



(a) Stínovaný model

(b) Drátový model s náhradním kinematickým mechanismem

Obrázek 6.6: Reprezentace rezonátoru určeného pro bóje v MSC Adams

Na obrázku 6.6(b) jsou také vidět všechny vazby použité v mechanismu. Zelená šipka okolo středu kavity představuje vazbu bóje na okolí. Touto vazbou je na rezonátor přenášen pohyb bóje. Červená šipka okolo těžiště kavity představuje elektromagnetickou složku tlumení. Modré obdélníky představují vazbu omezující pohyb valivého elementu na pohyb ve zobrazené rovinně.

Valení elementu po stěně kavity zajišťuje vazba simulující kontakt válečku s kavitou. Parametry tohoto kontaktu byly dopočítány podle Hertzovy kontaktní teorie. Parametry materiálů, které jsou pro výpočet dle této teorie potřeba, jsou v tabulce 6.3. Kromě těchto parametrů jsou k výpočtu potřeba poloměry válců v kontaktu, které odpovídají poloměrům kavity R a válečku valivého elementu r. Hloubka penetrace těles byla zvolena jako $x = 10^{-5}\ m$.

Tabulka 6.3: Parametry materiálů pro Hertzovu teorii

Parametr	**Značka**	**Jednotka**	**Ocel**	**PE 1000**
Poissonův poměr	μ	–	$0,3$	$0,5$
Youngův modul pružnosti	E	Mpa	210 000	700 [25]

Nejdříve je potřeba spočítat průnikové konstanty tělesa s kavitou U a válečku u. Výpočtový vztah je pro obě tělesa stejný, liší se pouze dosazované hodnoty:

$$U = \frac{4\,(1-\mu^2)}{E} \qquad [1/MPa] \quad (6.6)$$

Z těchto konstant pak můžeme dopočítat tuhost kontaktu:

$$k = \frac{16}{3\,(U+u)} \cdot \sqrt{\frac{R \cdot r}{R+r}} \qquad \left[kg/m^{1/2}s^2\right] \quad (6.7)$$

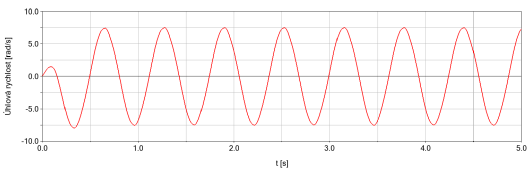
Výsledná tuhost kontaktu k je podle těchto vztahů $9 \cdot 10^7\ kg/m^{1/2}s^2$. Exponent síly je pro Hertzovu teorii $3/2$. Tlumení v kontaktu bylo nastaveno na hodnotu 50 000 Ns/m.

Kromě tuhosti vazby a silového exponentu bylo do kontaktu potřeba zadat součinitele tření mezi oběma tělesy. V simulaci bylo nastaveno použití pouze dynamického součinitele tření, jehož hodnota byla nastavena na $f_d = 0,1$ [26].

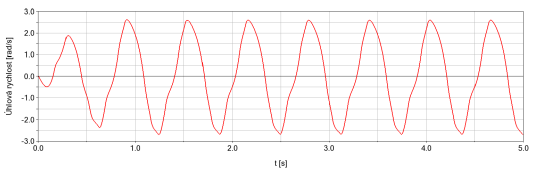
Při těchto parametrech kontaktu vychází mechanická kvalita oscilátoru $Q = 4,37$.

Buzení rezonátoru mořským vlnobitím má prakticky sinový průběh a na bóji působí zároveň natáčení a posuv v horizontálním i vertikálním směru. Proto byly pro ověření použitelnosti rezonátoru použity sinové průběhy natáčení kolem globální osy z a posuvu ve směru globální osy x. Posuv ve směru osy y by sám o sobě nebyl schopen vyvolat prakticky žádnou rotaci valivého elementu, proto nebyl simulován. Pokud jde o posuv ve směru osy z a rotace kolem os x a y, dá se předpokládat, že jejich vliv na model bude řádově menší, než vliv posuvů v rovině kavity a rotace kolem její osy. Proto budou v rámci simulací zanedbány.

Při simulacích se sinovým buzením byla jako budící veličina zvolena rychlost bóje. Její frekvence byla v obou případech rovna vlastní frekvenci rezonátoru, tedy $1,6\ Hz$. Při buzení rotací byla amplituda 3 rad/s, při buzení translačním pohybem byla amplituda $0,1\ m/s$. Všechny ostatní pohyby byly v těchto simulacích nastaveny jako nulové. Výsledné chování rezonátoru popisují grafy na obrázcích 6.7-6.9.

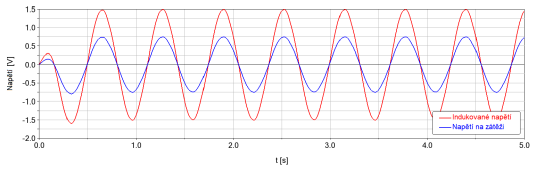


(a) úhlovou rychlostí kolem osy z

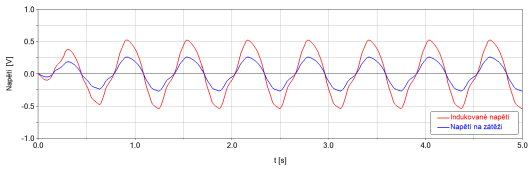


(b) translační rychlostí ve směru osy x

Obrázek 6.7: Relativní úhlová rychlost valivého elementu kolem osy z při sinovém buzení

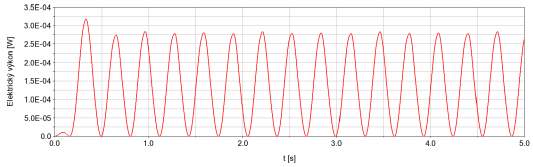


(a) úhlovou rychlostí kolem osy z

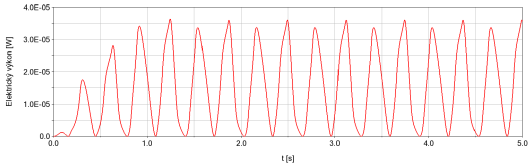


(b) translační rychlostí ve směru osy x

Obrázek 6.8: Indukované napětí a napětí na zátěži při sinovém buzení



(a) úhlovou rychlostí kolem osy z



(b) translační rychlostí ve směru osy x

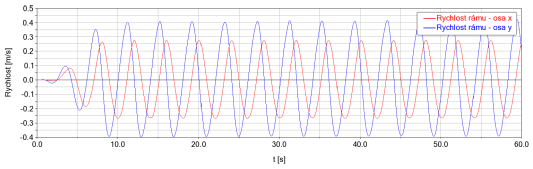
Obrázek 6.9: Elektrický výkon při při sinovém buzení

Síla v kontaktu mezi rámem rezonátoru a valivým elementem byla při obou způsobech buzení zhruba $1,6\ N$. Tím je ověřeno, že zanedbání jejího vlivu na chování bóje buzené mořem nezpůsobí významnou chybu. Předpoklad, že chování bóje na moři nebude zpětně ovlivněno rezonátorem je tedy nejspíše správný.

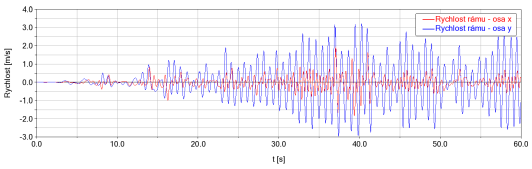
6.3. Buzení mořem

Další simulace byla provedena pro buzení, které je autorem vstupních dat označováno jako "regular sea"[24]. Buzení sestává z translace i rotace ve všech osách a reprezentuje klidné moře. Je v podstatě ustálené a má frekvenci zhruba $1,6\ Hz$. Vzhledem k tomu, že rezonátor je schopen konat pouze rovinný pohyb, byly jako buzení zvoleny rychlosti, které působí v rovině tohoto pohybu, tedy translace v osách x a y a rotace kolem osy z. Ostatní pohyby byly zanedbány, protože jejich vliv se dá pokládat za nulový.

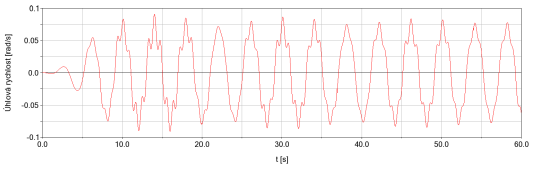
Dalším vstupem bylo "irregular sea"[24], tedy neklidné moře. Při tomto buzení nebyly amplitudy vstupů, ani jejich frekvence pravidelné. Rychlosti použité pro buzení byly analogické předchozímu případu.



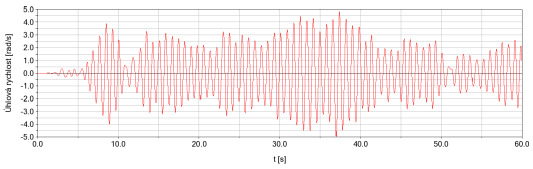
(a) Klidné moře - translace



(b) Neklidné moře - translace

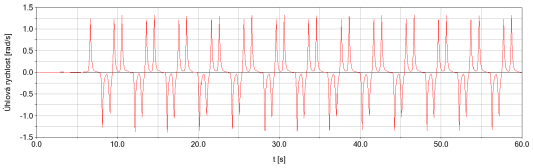


(c) Klidné moře - rotace

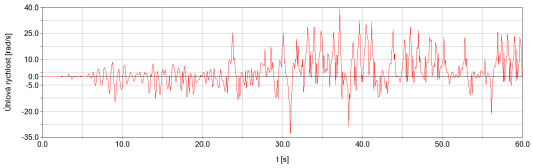


(d) Neklidné moře - rotace

Obrázek 6.10: Rychlost bóje při buzení mořem

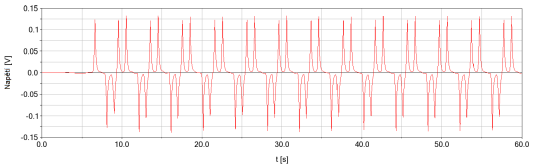


(a) Klidné moře

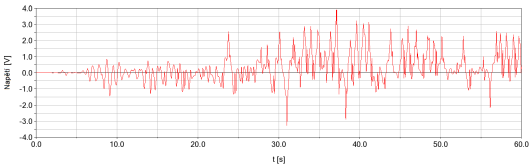


(b) Neklidné moře

Obrázek 6.11: Relativní úhlová rychlost rezonátoru při buzení mořem

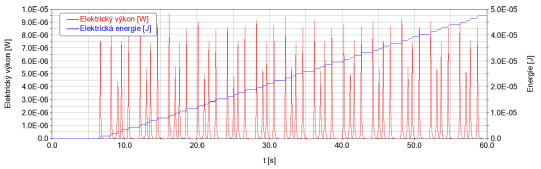


(a) Klidné moře

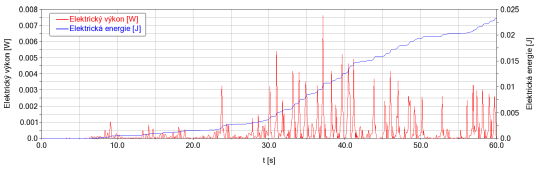


(b) Neklidné moře

Obrázek 6.12: Napětí na zátěži při buzení mořem



(a) Klidné moře



(b) Neklidné moře

Obrázek 6.13: Elektrický výkon a energie při buzení mořem

Při simulaci buzení klidným mořem byla opět vyhodnocena kontaktní síla mezi valivým elementem a rámem rezonátoru. Její velikost se pohybovala v rozmezí hodnot $1,5 \div 1,75\ N$. Tato hodnota koresponduje s hodnotami kontaktní síly získanými při buzení sinovým signálem. To odpovídá předpokladu, že chování rezonátoru nebude mít na pohyb bóje na moři, žádný významný vliv.

V rámci snahy o ladění elektrické části rezonátoru byl při buzení neklidným mořem měněn odpor na zátěži a sledován vliv na množství elektrické energie získané za dobu trvání simulace. Použité hodnoty zátěže byly původní odpor 2 000 Ω, odpory snížené na hodnoty 800 Ω, 1 200 Ω a 1 600 Ω a odpory zvednuté na hodnoty 2 400 Ω a 3 000 Ω. Kromě zátěže s odporem 2 400 Ω došlo vždy k poklesu získané energie. Při změně odporu zátěže na 2 400 Ω došlo k velmi malému nárůstu získané energie. Pokles u ostatních hodnot zátěže byl tím větší, čím více se použitý odpor vzdaloval od odporu zátěže odpovídajícímu odporu cívky.

6.4. Zhodnocení rezonátoru pro bóji

V rámci návrhu rezonátoru pro bóji byl úspěšně adaptován již vyvinutý rezonátor. Této adaptace bylo dosaženo úpravou geometrie, která umožnila snížit vlastní frekvenci rezonátoru na požadovaných $1,6\ Hz$.

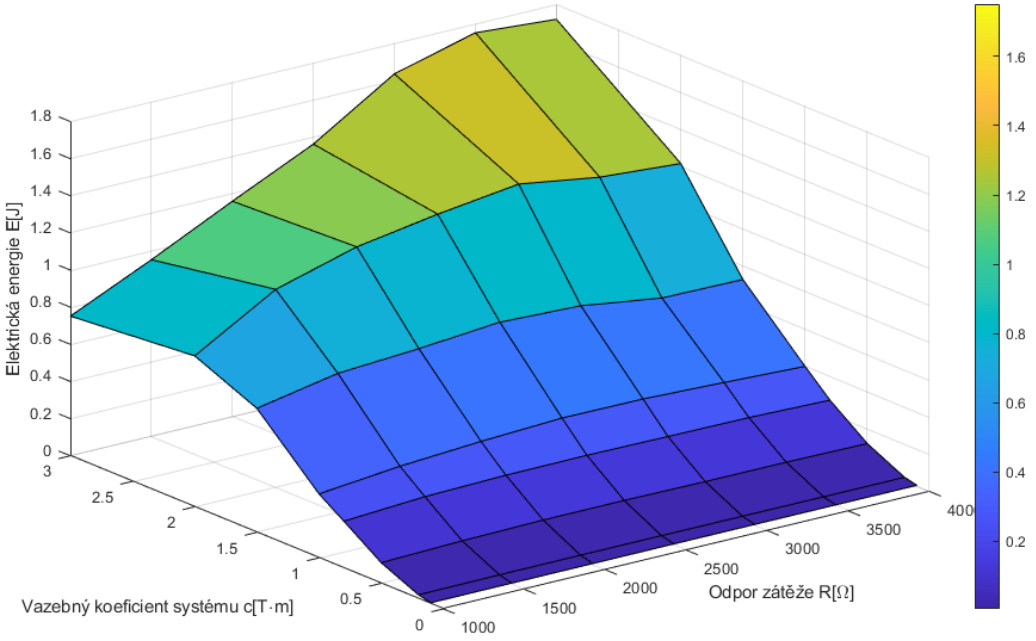
Správnost teoretického návrhu byla následně ověřena simulací jeho chování při sinovém buzení a to buď horizontálním posuvem rámu, nebo rotací kolem osy kavity, ve které se odvaluje valivý element rezonátoru. Při této simulaci se rezonátor jevil jako použitelný pro praktickou aplikaci.

Poslední fází ověření použitelnosti navrženého rezonátoru byla simulace jeho odezvy při vstupech odpovídajících skutečnému chování volně plující bóje. Tato simulace probíhala na základě převzatých vstupních dat.

Při klidném moři byla rezonátorem za minutu vyprodukována elektrická energie 45 μJ, při rozbouřeném moři dokonce 23 mJ. Maximální napětí na zátěži přitom bylo při klidném moři přibližně $0,125\ V$ a při rozbouřeném moři téměř $4\ V$.

Na základě experimentování s odporem na zátěži se prokázalo, že generování elektrického proudu nemá prakticky žádný vliv na mechanický pohyb oscilátoru. To je způsobeno tím, že velikost elektromagnetického tlumení je výrazně menší, než je velikost mechanického tlumení.

Vzhledem k tomu, že celá elektrická část rezonátoru byla převzata, by bylo vhodné upravit i elektrický obvod. Jako základ takové úpravy byl změněn vazebný koeficient a odpor zátěže. Zvýšení vazebného koeficientu by mohlo vést k zvýšení efektivity přeměny mechanické energie na elektrickou. Zvýšení odporu zátěže je schopno změnit efektivitu elektrické části. Jako zastavovací kritérium růstu vazebného koeficientu byl zvolen pokles relativní rychlosti rezonátoru pod 50 % hodnoty bez elektrického tlumení. Výsledek je na obrázku 6.14.



Obrázek 6.14: Změna získané elektrické energie v závislosti na změně vazebného koeficientu a odporu zátěže

Aby bylo možné dosáhnout hodnot zobrazených v tomto obrázku, bylo by potřeba detailně navrhnout konstrukci magnetů a cívky. Změna odporu cívky při těchto úpravách byla pro jednoduchost zanedbána. Z obrázku je patrné, že při vhodném návrhu elektrického obvodu by se z prezentovaného rezonátoru dalo získat daleko více energie.

7. Závěr

Zadanými cíli této práce bylo provedení rešerše na téma používání elektromagnetických rezonátorů pro sledování odezvy mechanických struktur a monitorování jejich provozu. Praktická část zadání obsahovala vytvoření výpočtových modelů vybraných mechanických soustav a implementování výpočtových modelů vhodných rezonátorů do těchto soustav. To směřovalo k provedení analýz vlivu umístění a parametrů rezonátorů na jejich odezvu při dynamickém buzení. Tato analýza měla za cíl určit, jaké budou parametry výstupního elektrického proudu ve zvolených aplikacích.

Toto zadání bylo rozvinuto do dílčích kroků tvorby simulace. Prvním krokem bylo vytvoření výpočtového modelu samotného rezonátoru. Druhým krokem bylo vytvoření výpočtového modelu samotné mechanické soustavy, na kterou bude tento rezonátor aplikován. Posledním krokem bylo složení těchto modelů a sledování odezvy rezonátoru na chování soustavy.

Všechny tyto cíle byly úspěšně splněny. Vzhledem k teoretickému charakteru práce, jejíž součástí nebyla tvorba prototypů navrhovaných rezonátorů, nebylo možné provádět experimentální ověřování získaných dat. V případě výpočtového modelu železnice to bylo navíc vyloučeno proto, že parametry trati nebyly zvoleny podle tuzemské železnice a buzení neodpovídalo žádným konkrétním železničním vozidlům. Nicméně při porovnání s jinými pracemi, z nichž některé byly experimentálně ověřeny, se chování vytvořených výpočtových modelů jeví jako věrohodné. Případné ověření by bylo zajímavým námětem na další práci, zejména v případě rezonátoru určeného pro volně plující bóji.

Z rešerše vyplynulo, že pro získávání elektrické energie z dynamických soustav se většinou používají buď lineární elektromechanické generátory, nebo elektromechanické rezonátory. Rezonátory jsou zpravidla konstrukčně jednodušší. Jejich fungování je odvozeno od mechanického oscilátoru, který je vybuzen pohybem mechanické soustavy, k níž je připojen.

V této práci byly realizovány výpočtové modely dvou rezonátorů pro dvě technické aplikace. První z nich je umístění rezonátoru na železniční trať. Pro tuto aplikaci byl zvolen translační rezonátor. Druhou realizovanou aplikací je získávání energie pro nekotvenou bóji na volném moři. Pro tu byl zvolen rezonátor založený na obecném rovinném pohybu. Pro obě aplikace byly vytvořeny výpočtové modely v MSC Adams. Tyto modely jsou založeny na popisu pohybu mechanické části rezonátoru pomocí zobecněných souřadnic, doplněných o rovnice popisující chování elektrického obvodu.

Nejdříve je prezentován model rezonátoru určený pro železniční trať. Chování trati a rezonátoru k ní připevněného bylo simulováno při průjezdu vlakové soupravy různými rychlostmi a s různými imperfekcemi. Bylo též zkoušeno umístění rezonátoru na pražec a na kolejnici.

Hodnoty elektrického výkonu a napětí získané z tohoto rezonátoru nejsou vhodné pro přímé porovnání s měřením, ani s jinými pracemi. Aby bylo dosaženo porovnatelnosti, musely by být simulace upraveny tak, aby parametry trati odpovídaly traťovému úseku, na kterém by probíhal experiment. Také by musely být upraveny parametry projíždějící vlakové soupravy tak, aby hmotnosti vozů a vzdálenosti mezi jejich koly odpovídaly skutečným drážním vozidlům.

Tato skutečnost nicméně nijak neovlivňuje věrohodnost chování výpočtového modelu trati, respektive rezonátoru. Průběhy posuvů na trati svým charakterem odpovídají průběhům publikovaným v jiných pracích a získané amplitudy výchylek přibližně sedí s prováděnými měřeními. Chování navrhovaných rezonátorů se jeví jako smysluplné a využitelné pro monitoring trati.

Při porovnání výsledků získaných rezonátory o stejných parametrech a různých umístěních (na kolejnici a na pražci), je patrné, že při umístění na kolejnici je buzení přenášené do rezonátoru silnější, a silnější je tedy i jeho odezva. To je způsobeno tím, že část energie, kterou je trať buzena, pohltí kolejnice ve formě deformační energie. Část je ztracena ve vazbě mezi kolejnicí a pražcem, neboť vazba není dokonale tuhá. Tento pokles je z části způsoben i tím, že pražec je tlumen intenzivněji než kolejnice.

Druhým prezentovaným rezonátorem je již dříve vyvinutý rezonátor založený na obecném rovinném pohybu, který je v této práci upraven pro aplikaci na moři. Úprava sestávala z naladění mechanické části na vlastní frekvenci co nejbližší frekvenci buzení rezonátoru klidným mořem. Předpokladem tohoto naladění je splnění podmínky valení.

Chování rezonátoru bylo následně ověřeno při sinovém buzení i při buzením daty změřenými na moři. Z těchto simulací vyplynulo, že v případě sinového buzení je podmínka valení splněna prakticky vždy. Při simulaci chování na moři byla podmínka valení splněna při klidném moři. Při rozbouřeném moři byla tato podmínka splněna jen po část trvání simulace.

Na základě experimentů s elektrickým obvodem rezonátoru lze konstatovat, že elektromechanická vazba tohoto rezonátoru je slabá. Elektrické tlumení je výrazně menší než tlumení mechanické, které je dáno parametry kontaktu. Elektromagnetická indukce má tedy jen malý vliv na mechanický pohyb rezonátoru. To způsobuje, že generování elektrické energie není příliš efektivní. Bylo by tedy vhodné se v dalším výzkumu zaměřit na optimalizaci, aby bylo možné dosáhnout větší efektivity.

8. Seznam příloh

Elektronické přílohy

- PŘÍLOHA A
  Výpočtový model v Matlabu/Simulinku pro výpočet parametrů elektromechanického rezonátoru určeného pro trať. Součástí je textový soubor obsahující zrychlení pražce při průjezdu vlakové soupravy rychlostí 72 km/h, které slouží jako vstup (buzení výpočtového modelu rezonátoru) pro naladění rezonátoru na vhodnou vlastní frekvenci.
- PŘÍLOHA B
  Modely tratí s rezonátory pro simulování různých rychlostí přejezdů vlakových souprav a imperfekcí trati v MSC Adams. Pro každou rychlost přejezdu jsou přiloženy modely se všemi rezonátory. Stejně tak pro obě simulované imperfekce.
- PŘÍLOHA C
  Modely elektromagnetických rezonátorů určených pro použití ve volně plujících bójích v MSC Adams.

Literatura

[1] SMILEK, Jan, Zdeněk HADAŠ, Pavel TOFEL, Cristian ULIANOV, Paul HYDE, Yao Dong WANG, Boru JIA a David VINCENT. *D 4.1 Trackside Energy harvester solutions report*. 2018.

[2] ZHANG, Zutao, Xingtian ZHANG, Yagubov RASIM, Chunbai WANG, Bing DU a Yanping YUAN. Design, modelling and practical tests on a high-voltage kinetic energy harvesting (EH) system for a renewable road tunnel based on linear alternators. *Applied Energy* [online]. 2016, **164**, 152-161 [cit. 2021-4-19]. ISSN 03062619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2015.11.096

[3] ZHANG, Xingtian, Zutao ZHANG, Hongye PAN, Waleed SALMAN, Yanping YUAN a Yujie LIU. A portable high-efficiency electromagnetic energy harvesting system using supercapacitors for renewable energy applications in railroads. *Energy Conversion and Management* [online]. 2016, **118**, 287-294 [cit. 2021-4-19]. ISSN 01968904. Dostupné z: doi:10.1016/j.enconman.2016.04.012

[4] ZHANG, Xingtian, Hongye PAN, Lingfei QI, Zutao ZHANG, Yanping YUAN a Yujie LIU. A renewable energy harvesting system using a mechanical vibration rectifier (MVR) for railroads. *Applied Energy* [online]. 2017, **204**, 1535-1543 [cit. 2021-4-25]. ISSN 03062619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2017.04.064

[5] WANG, John J., G. P. PENAMALLI a Lei ZUO. Electromagnetic energy harvesting from train induced railway track vibrations. In: *Proceedings of 2012 IEEE/ASME 8th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications* [online]. IEEE, 2012, 2012, s. 29-34 [cit. 2021-4-19]. ISBN 978-1-4673-2349-9. Dostupné z: doi:10.1109/MESA.2012.6275532

[6] LIN, Teng, Yu PAN, Shikui CHEN a Lei ZUO. Modeling and field testing of an electromagnetic energy harvester for rail tracks with anchorless mounting. *Applied Energy* [online]. 2018, **213**, 219-226 [cit. 2021-4-19]. ISSN 03062619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2018.01.032

[7] LIN, Teng, John J. WANG a Lei ZUO. Efficient electromagnetic energy harvester for railroad transportation. *Mechatronics* [online]. 2018, **53**, 277-286 [cit. 2021-4-25]. ISSN 09574158. Dostupné z: doi:10.1016/j.mechatronics.2018.06.019

[8] ULIANOV, Cristian, Zdeněk HADAŠ, Paul HYDE a Jan SMILEK. Novel Energy Harvesting Solutions for Powering Trackside Electronic Equipment. MARINOV, Marin a Janene PIIP, ed. *Sustainable Rail Transport* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2020, 2020-07-25, s. 229-255 [cit. 2021-4-29]. Lecture Notes in Mobility. ISBN 978-3-030-19518-2. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-030-19519-9_8

[9] TIANCHEN, Yuan, Yang JIAN, Song RUIGANG a Liu XIAOWEI. Vibration energy harvesting system for railroad safety based on running vehicles. *Smart Materials and Structures* [online]. 2014, **23**(12) [cit. 2021-4-19]. ISSN 0964-1726. Dostupné z: doi:10.1088/0964-1726/23/12/125046

[10] GARCIA-ALZORRIZ, J. A, J GRAU, R CORDOBA a J MUELA. A novel double--sided flat rectangular linear permanent magnets synchronous generator for sea wave energy application. In: *2011 7th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)* [online]. IEEE, 2011, I-248-I-252 [cit. 2021-4-29]. ISBN 9781467301602.

[11] DANANG WIJAYA, Fransisco a Budi AZHARI. Analytical design and optimization of flat-quasi linear generator for sea wave power plant in South Java Ocean. In: *2016 8th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE)* [online]. IEEE, 2016, s. 1-6 [cit. 2021-4-29]. Dostupné z: doi:10.1109/ICITEED.2016.7863276

[12] GAO, Mingyuan, Ping WANG, Yong CAO, Rong CHEN a Dunjin CAI. Design and Verification of a Rail-Borne Energy Harvester for Powering Wireless Sensor Networks in the Railway Industry. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* [online]. , 1-14 [cit. 2021-4-25]. ISSN 1524-9050. Dostupné z: doi:10.1109/TITS.2016.2611647

[13] GAO, Mingyuan, Jun LU, Yifeng WANG, Ping WANG a Li WANG. Smart monitoring of underground railway by local energy generation. *Underground Space* [online]. 2017, **2**(4), 210-219 [cit. 2021-4-25]. ISSN 24679674. Dostupné z: doi:10.1016/j.undsp.2017.10.002

[14] GAO, Mingyuan, Yunwu LI, Jun LU, Yifeng WANG, Ping WANG a Li WANG. Condition monitoring of urban rail transit by local energy harvesting. *International Journal of Distributed Sensor Networks* [online]. 2018, **14**(11) [cit. 2021-4-25]. ISSN 1550-1477. Dostupné z: doi:10.1177/1550147718814469

[15] GAO, Mingyuan, Ping WANG, Yifeng WANG a Lingkan YAO. Self-Powered ZigBee Wireless Sensor Nodes for Railway Condition Monitoring. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* [online]. 2018, **19**(3), 900-909 [cit. 2021-4-25]. ISSN 1524-9050. Dostupné z: doi:10.1109/TITS.2017.2709346

[16] GAO, M. Y., P. WANG, Y. CAO, R. CHEN a C. LIU. A rail-borne piezoelectric transducer for energy harvesting of railway vibration. *Journal of Vibroengineering.* 2016, **18**(7), 4647-4663. ISSN 1392-8716. Dostupné z: doi:10.21595/jve.2016.16938

[17] *ReVibe Energy* [online]. [cit. 2021-4-29]. Dostupné z: https://revibeenergy.com/

[18] WANG, Yifeng, Mingyuan GAO, Huajiang OUYANG, Shoutai LI, Qing HE a Ping WANG. Modelling, simulation, and experimental verification of a pendulum-flywheel vibrational energy harvester. *Smart Materials and Structures* [online]. 2020, **29**(11) [cit. 2021-4-25]. ISSN 0964-1726. Dostupné z: doi:10.1088/1361-665X/abacaf

[19] SMILEK, Jan, Zdenek HADAS, Jan VETISKA a Steve BEEBY. Rolling mass energy harvester for very low frequency of input vibrations. *Mechanical Systems and Signal Processing* [online]. 2019, **125**, 215-228 [cit. 2021-4-29]. ISSN 08883270. Dostupné z: doi:10.1016/j.ymssp.2018.05.062

[20] CARANDELL, M., D.M. TOMA, M. CARBONELL, M. GASULLA a J.D. RIO. Design and development of a kinetic energy harvester device for oceanic drifter applications. In: *Conference Record - IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference* [online]. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2019 [cit. 2021-4-29]. ISBN 9781538634608. ISSN 10915281. Dostupné z: doi:10.1109/I2MTC.2019.8826996

[21] CARANDELL, Matias, Daniel Mihai TOMA, Manel GASULLA a Joaquin Del RIO. Experimental Validation of a Kinetic Energy Harvester Device for Oceanic Drifter Applications. In: *OCEANS 2019 - Marseille* [online]. IEEE, 2019, s. 1-7 [cit. 2021-4-29]. Dostupné z: doi:10.1109/OCEANSE.2019.8867143

[22] KOSORÍN, Michal. *Model kmitání železniční trati*. Brno, 2018. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace?zp_id=108878. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Zdeněk Hadaš.

[23] JANDORA, Radek. *Výpočtové modelování dynamických projevů v kontaktu kola a kolejnice s obecnou geometrií kontaktních povrchů: Numerical simulations of dynamic loads in wheel-rail contact with shape irregularities*. Brno, 2012. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Přemysl Janíček.

[24] CARANDELL, Matias, Daniel Mihai TOMA, J. P. PINTO, Manel GASULLA a Joaquín del RÍO. Impact on the Wave Parameters Estimation of a Kinetic Energy Harvester Embedded into a Drifter. *Global Oceans 2020: Singapore — U.S. Gulf Coast* [online]. 2020, , 1-6 [cit. 2021-4-30]. Dostupné z: doi:10.1109/IEEECONF38699.2020.9389127

[25] TECAFINE PE1000 natural. *Ensinger* [online]. 2021 [cit. 2021-4-30]. Dostupné z: https://www.ensingerplastics.com/en-sg/shapes/products/polyethylene--tecafine-pe-1000-natural#/product-technical-detail-collapse-item-0-lvl-1

[26] Coefficient of friction, Rolling resistance, Air resistance, Aerodynamics. *TRIBOLOGY-ABC* [online]. [cit. 2021-4-30]. Dostupné z: https://www.tribology--abc.com/abc/cof.htm

[27] WANG, Yuan, Xin ZHU, Tingsheng ZHANG, Shehar BANO, Hongye PAN, Lingfei QI, Zutao ZHANG a Yanping YUAN. A renewable low-frequency acoustic energy harvesting noise barrier for high-speed railways using a Helmholtz resonator and a PVDF film. *Applied Energy* [online]. 2018, **230**, 52-61 [cit. 2021-4-25]. ISSN 03062619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2018.08.080

[28] GIEVA, Elitsa Emilova, Krasimir Ivanov NEDELCHEV, Ivan Mladenov KRALOV a Ivelina Nikolaeva RUSKOVA. Analyses of Energy Harvesting Methods and Devices for Use in Transport Noise Harvesting. In: *2019 X National Conference with International Participation (ELECTRONICA)* [online]. IEEE, 2019, 2019, s. 1-4 [cit. 2021-4-25]. ISBN 978-1-7281-3622-6. Dostupné z: doi:10.1109/ELECTRONICA.2019.8825649

[29] NEDELCHEV, Krasimir, Ivan KRALOV, Elitsa GIEVA, Ivelina RUSKOVA a Georgi NIKOLOV. Acoustic Barrier with Energy Harvesting. In: *2020 21st International Symposium on Electrical Apparatus & Technologies (SIELA)* [online].

IEEE, 2020, 2020, s. 1-5 [cit. 2021-4-25]. ISBN 978-1-7281-4346-0. Dostupné z: doi:10.1109/SIELA49118.2020.9167083

[30] ESPE, Asbjorn Engmark a Geir MATHISEN. Towards Magnetic Field Energy Harvesting near Electrified Railway Tracks. In: *2020 9th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO)* [online]. IEEE, 2020, 2020, s. 1-4 [cit. 2021-4-25]. ISBN 978-1-7281-6949-1. Dostupné z: doi:10.1109/MECO49872.2020.9134113

[31] ESPE, Asbjørn, Thomas HAUGAN a Geir MATHISEN. Magnetic Field Energy Harvesting in Railway. *ArXiv.org* [online]. Ithaca: Cornell University Library, arXiv.org, 2020 [cit. 2021-4-25]. Dostupné z: http://search.proquest.com/docview/2468819907/

[32] KALAAGI, Mohammed a Divitha SEETHARAMDOO. Multi-Band Metamaterial Absorbers to Efficient Energy Harvesters for Railway Applications. In: *2020 International Workshop on Antenna Technology (iWAT)* [online]. IEEE, 2020, 2020, s. 1-3 [cit. 2021-4-25]. ISBN 978-1-7281-2640-1. Dostupné z: doi:10.1109/iWAT48004.2020.1570609890

[33] WANG, Yongquan, Liangquan ZHU, Gong ZHANG, Lincheng ZHONG a Hualing CHEN. Capacitive energy harvesting using soft dielectric elastomers: Design, testing and impedance matching optimization. *AIP Advances* [online]. 2018, **8**(8) [cit. 2021-4-25]. ISSN 2158-3226. Dostupné z: doi:10.1063/1.5041490

Seznam obrázků

3.1 Lineární elektromechanický generátor pro použití pod zpomalovacím prahem [2] . . . 8
3.2 Lineární generátor využívající k převodu vibrací na rotační pohyb ozubený hřeben [3] . . . 9
3.3 Lineární generátor využívající usměrňovač k převodu vibrací trati na rotační pohyb [5] . . . 9
3.4 Lineární generátor bez kotvení . . . 10
3.5 Pákový lineární elektromechanický generátor: (1) - připojení generátoru ke kolejnici; (2) - řídící mechanismus; (3) - omezující mechanismus; (4) - vratná pružina; (5) - lineární elektrický generátor; (6) - rám [8] . . . 10
3.6 Bubnový piezo generátor [9] . . . 11
3.7 Schéma lineárního elektromagnetického generátoru využívajícího energii mořských vln [10] . . . 11
3.8 Schéma lineárního elektromagnetického generátoru využívajícího energii mořských vln [11] . . . 12
3.9 Energy harvestor založený na mechanickém oscilátoru - schéma bez mechanické pružiny [13] . . . 13
3.10 Elektromechanický rezonátor založený na piezoelektrickém jevu připevněný svorkou na kolejnici [16] . . . 13
3.11 Železniční aplikace rezonátoru firmy ReVibe [17] . . . 14
3.12 Elektromagnetický rezonátor vyvinutý na VUT [8] . . . 14
3.13 Elektromechanický rezonátor kombinující kyvadlo a setrvačník [18] . . . 15
3.14 Prototyp valivého generátoru [19] . . . 15
3.15 Rezonátor založený na principu kyvadla určený pro použití v nekotvené bóji [21] . . . 16
4.1 Schémata rezonátorů s volbou zobecněné souřadnice q . . . 17
4.2 Schéma oscilátoru popsaného rovnicí (4.1), m^* je zobecněná hmotnost, b^* je zobecněné tlumení, které je tvořeno mechanickou a elektrickou složkou dle rovnice (4.2) a k^* je zobecněná tuhost; obrázek převzat z [19]; upraveno autorem . . . 18
4.3 Schéma elektrického obvodu rezonátoru - u_i je napětí indukované na cívce, L je indukčnost cívky, R_c je odpor cívky a R_L je odpor zátěže . . . 18
5.1 Schéma umístění a rezonátoru na železnici [8] . . . 21
5.2 Model rezonátoru v MSC Adams . . . 23
5.3 Schéma navrhovaného umístění rezonátorů na trati . . . 24
5.4 Relativní výchylka a rychlost rezonátoru o vlastní frekvenci 10 Hz . . . 24
5.5 Indukované napětí u_i a napětí na zátěži u_L rezonátoru o vlastní frekvenci 10 Hz . . . 25
5.6 Elektrický výkon na zátěži rezonátoru o vlastní frekvenci 10 Hz . . . 25
5.7 Schéma výpočtového modelu trati . . . 27
5.8 Průběh síly, kterou působí projíždějící souprava na kolejnici při průjezdu rychlostí 72 km/h . . . 28
5.9 Reprezentace trati v MSC Adams - souprava projíždí zleva doprava, jak na obrázku (b) znázorňuje zelená šipka, sílu působící od vlaku znázorňuje červená šipka . . . 29

5.10 Posuv a rychlost posuvu trati při průjezdu soupravy rychlostí 40 km/h . . 29
5.11 Posuv a rychlost posuvu rezonátoru o vlastní frekvenci 30 Hz při průjezdu soupravy rychlostí 40 km/h 30
5.12 Napětí na zátěži rezonátoru o vlastní frekvenci 30 Hz při průjezdu soupravy rychlostí 40 km/h 30
5.13 Výkon na zátěži rezonátoru o vlastní frekvenci 30 Hz při průjezdu soupravy rychlostí 40 km/h 30
5.14 Posuv a rychlost posuvu trati při průjezdu soupravy rychlostí 72 km/h . . 31
5.15 Posuv a rychlost posuvu rezonátoru o vlastní frekvenci 10 Hz při průjezdu soupravy rychlostí 72 km/h 31
5.16 Napětí na zátěži rezonátoru o vlastní frekvenci 10 Hz při průjezdu soupravy rychlostí 72 km/h 32
5.17 Výkon na zátěži rezonátoru o vlastní frekvenci 10 Hz při průjezdu soupravy rychlostí 72 km/h 32
5.18 Posuv a rychlost posuvu trati při průjezdu soupravy rychlostí 120 km/h . 32
5.19 Posuv a rychlost posuvu rezonátoru o vlastní frekvenci 10 Hz při průjezdu soupravy rychlostí 120 km/h 33
5.20 Napětí na zátěži rezonátoru o vlastní frekvenci 10 Hz při průjezdu soupravy rychlostí 120 km/h 33
5.21 Výkon na zátěži rezonátoru o vlastní frekvenci 10 Hz při průjezdu soupravy rychlostí 120 km/h 33
5.22 Schéma výpočtového modelu trati s vůlí pod pražcem 34
5.23 Reprezentace trati s vůlí pod pražcem - směr průjezdu soupravy je zleva doprava 34
5.24 Posuv a rychlost posuvu trati při průjezdu soupravy rychlostí 72 km/h, trať s vůlí pod pražcem 34
5.25 Posuv a rychlost posuvu rezonátoru o vlastní frekvenci 10 Hz při průjezdu soupravy rychlostí 72 km/h, trať s vůlí pod pražcem 35
5.26 Napětí na zátěži rezonátoru o vlastní frekvenci 10 Hz při průjezdu soupravy rychlostí 72 km/h, trať s vůlí pod pražcem 35
5.27 Výkon na zátěži rezonátoru o vlastní frekvenci 10 Hz při průjezdu soupravy rychlostí 72 km/h, trať s vůlí pod pražcem 35
5.28 Průběh síly, kterou působí projíždějící souprava s ploškou na kole na kolejnici při průjezdu rychlostí 72 km/h 36
5.29 Posuv a rychlost posuvu trati při průjezdu soupravy s ploškou na kole rychlostí 72 km/h 36
5.30 Posuv a rychlost posuvu rezonátoru o vlastní frekvenci 10 Hz při průjezdu soupravy s ploškou na kole rychlostí 72 km/h 37
5.31 Napětí na zátěži rezonátoru o vlastní frekvenci 10 Hz při průjezdu soupravy s ploškou na kole rychlostí 72 km/h 37
5.32 Výkon na zátěži rezonátoru o vlastní frekvenci 10 Hz při průjezdu soupravy s ploškou na kole rychlostí 72 km/h 37
5.33 Porovnání výkonu na zátěži rezonátorů s vlastními frekvencemi $f_0 = 10\ Hz$ a $f_0 = 30\ Hz$ při průjezdu soupravy s ploškou na kole rychlostí 72 km/h . 38
6.1 Schéma rezonátoru založeného na obecném rovinném pohybu [19]; upraveno autorem 41
6.2 Schéma rezonátoru určeného pro bóji 42

6.3 Průměry kavit, válečků valivých elementů a vlastní frekvence rezonátoru pro jejich kombinace 44
6.4 Průměry kavit, válečků valivých elementů a vlastní frekvence rezonátoru pro jejich kombinace omezené na rozsah $1,55 \div 1,65\ Hz$ 44
6.5 Souřadnice konfigurací nejbližších vlastní frekvenci $f_0 = 1,6\ Hz$ 45
6.6 Reprezentace rezonátoru určeného pro bóje v MSC Adams 46
6.7 Relativní úhlová rychlost valivého elementu kolem osy z při sinovém buzení 47
6.8 Indukované napětí a napětí na zátěži při sinovém buzení 48
6.9 Elektrický výkon při při sinovém buzení 48
6.10 Rychlost bóje při buzení mořem 49
6.11 Relativní úhlová rychlost rezonátoru při buzení mořem 49
6.12 Napětí na zátěži při buzení mořem 49
6.13 Elektrický výkon a energie při buzení mořem 49
6.14 Změna získané elektrické energie v závislosti na změně vazebného koeficientu a odporu zátěže 51

Seznam tabulek

5.1 Parametry elektromechanických rezonátorů pro použití na trati s vlastními frekvencemi 10 Hz, 20 Hz a 30 Hz 22
5.2 Ustálené výstupní hodnoty elektromechanických rezonátorů trati při sinovém buzení vlastní frekvencí 26
5.3 Parametry modelu trati 27
6.1 Parametry pro ladění rezonátoru bóje 42
6.2 Výsledné parametry rezonátoru pro bóji 45
6.3 Parametry materiálů pro Hertzovu teorii 47