



# 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

## SIMULAČNÍ MODELOVÁNÍ POHYBU VOLNÉHO TĚLESA V MOŘSKÉ BÓJI

SIMULATION AND MODELING OF FREE BODY DYNAMIC INSIDE SEA DRIFTER

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jakub Moravec

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.

BRNO 2022

## Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky  
Student: **Jakub Moravec**  
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství  
Studijní obor: Mechatronika  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.**  
Akademický rok: 2021/22

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

### Simulační modelování pohybu volného tělesa v mořské bójí

#### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Monitorování stavu moří a oceánů je hlavní cíl mnoha výzkumných týmů po celém světě. Důležitým aspektem pro tuto úlohu je vhodný zdroj elektrické energie pro autonomní provoz měřicích prvků rozprostřených po hladině. Cílem práce je analyzovat a navrhnout konstrukci autonomní energie pro mořské bóje. Jedná se především o návrh mechanické konstrukce, která je založená na volném pohybu tělesa uvnitř bóje. Toto těleso pro maximální efektivnost elektromechanické přeměny koná obecný rovinný pohyb, který je omezen navrženou konstrukcí. Díky komplexnosti dynamiky tohoto pohybu je tento model vytvořen a simulován v prostředí MSC.ADAMS.

#### Cíle bakalářské práce:

- rešerše konstrukcí tzv. energy harvesting zdrojů energie pro mořské bóje,
- vytvořené modelu zvolené konstrukce v prostředí MSC.ADAMS,
- analýza výsledků pro zvolený pohyb mořských vln a predikce generovaného výkonu,
- analýza možného ovlivnění dynamiky bóje vzniklým relativním pohybem energy harvesteru.

#### Seznam doporučené literatury:

CARANDELL, Matias, Daniel MIHAI TOMA, Manel GASULLA a Joaquín DEL RÍO, 2019. Experimental Validation of a Kinetic Energy Harvester Device for Oceanic Drifter Applications. In: OCEANS - Marseille. s. 17.

CARANDELL, Matias, Daniel Mihai TOMA, Montserrat CARBONELL, Joaquín DEL RÍO a Manel GASULLA, 2020. Design and Testing of a Kinetic Energy Harvester Embedded into an Oceanic Drifter. IEEE Sensors Journal.

SMILEK, Jan, Zdenek HADAS, Jan VETISKA a Steve BEEBY, 2019. Rolling mass energy harvester for very low frequency of input vibrations. Mechanical Systems and Signal Processing. 125, 215–228. ISSN 08883270.

BREPTA, Rudolf, Ladislav PŮST a František TUREK, 1994. Mechanické kmitání. Technický. Praha: Sobotáles.

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

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

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 simulačního modelu energy harvesteru na principu elektromagnetického rezonátoru. V úvodu práce je vytvořena rešerše dosud vytvořených zařízení pro přeměnu kinetické energie moře na energii elektrickou. Dále je vytvořen model konstrukce rezonátoru laděného na frekvenci 1,6 Hz v programu pro dynamické soustavy těles MSC Adams. V tomto programu jsou provedeny simulace, pomocí kterých jsou analyzovány vlastnosti rezonátoru. Na závěr je model testován buzením reálného moře. Z těchto simulací je následně predikován elektrický výkon získaný pomocí tohoto zařízení. Při buzení klidným mořem výkon harvesteru dosahoval okamžitých špičkových hodnot 5  $\mu\text{W}$  a v případě buzení neklidným mořem dosahoval špičkové hodnoty až 16 mW.

## **Klíčová slova**

Energy harvesting, elektromechanický rezonátor, elektromagnetická indukce, mořská bóje, monitoring moře, multi-body simulace, MSC Adams

## **Summary**

This thesis deals with the development of a simulation model of an energy harvester based on the electromagnetic resonator principle. The introduction focuses on a search of the devices created so far for the conversion of kinetic energy of the sea into electrical energy. Furthermore, a model of the resonator design tuned to a frequency of 1.6 Hz is created in the body dynamics program MSC Adams. Simulations are performed in this program to analyze the resonator properties. Finally, the model is tested by real sea excitation. From these simulations, the electrical power obtained by this device is then predicted. Under regular sea excitation, the harvester power reached instantaneous peak values of 5  $\mu\text{W}$  and in case of irregular sea excitation the peak power values reached up to 16 mW.

## **Keywords**

Energy harvesting, electromechanical resonator, electromagnetic induction, sea buoy, sea monitoring, multi-body simulation, MSC Adams



## **Bibliografická citace**

MORAVEC, Jakub. *Simulační modelování pohybu volného tělesa v mořské bójí*. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/139969>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Zdeněk Hadaš.

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Simulační modelování pohybu volného tělesa v mořské bójí“ vypracoval samostatně bez cizí pomoci, na základě rad a pokynů vedoucího bakalářské práce doc. Ing. Zdeňka Hadaše, Ph.D. Vycházel jsem přitom ze svých znalostí a odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu použité literatury.

V Brně dne 19.5.2022

Jakub Moravec

## **Poděkování**

Tímto děkuji všem, kteří mi při vypracování bakalářské práce pomohli. Především bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Zdeňku Hadašovi, Ph.D. za cenné připomínky, pomoc, odborné vedení a trpělivost při vypracování této práce.

## Obsah

<b>1.</b>	<b>Úvod</b> .....	<b>2</b>
<b>2.</b>	<b>Formulace problému a stanovení cílů práce</b> .....	<b>3</b>
<b>3.</b>	<b>Konstrukce energy harvesting zdrojů energie pro mořské bóje</b> .....	<b>4</b>
3.1.	Harvestery na principu elektromagnetické indukce.....	4
3.1.1.	Harvestery s lineárními elektrickými generátory .....	4
3.1.2.	Harvestery s rotačními elektrickými generátory .....	6
3.2.	Harvestery na principu piezoelektrického jevu.....	8
3.3.	Použití harvesteru představeném v této práci .....	10
<b>4.</b>	<b>Model pohybu valčího tělesa v mořské bóji</b> .....	<b>12</b>
4.1.	Volba geometrických parametrů harvesteru .....	15
4.1.1.	Jednokavitový model harvesteru .....	18
4.1.2.	Dvoukavitový model harvesteru.....	18
<b>5.</b>	<b>Model harvesteru v prostředí MSC Adams</b> .....	<b>20</b>
5.1.	Simulace odezvy generátoru ve frekvenční oblasti .....	21
5.2.	Analýza smýkání v závislosti na rychlosti buzení .....	24
5.3.	Vliv rozměrových parametrů na elektrický výkon .....	26
<b>6.</b>	<b>Chování na moři a predikce generovaného výkonu</b> .....	<b>29</b>
6.1.	Sinusové buzení .....	29
6.2.	Buzení mořem.....	30
6.2.1.	Klidné moře .....	31
6.2.2.	Neklidné moře .....	32
<b>7.</b>	<b>Vliv relativního pohybu energy harvesteru na dynamiku bóje</b> .....	<b>35</b>
<b>8.</b>	<b>Závěr</b> .....	<b>36</b>
	<b>Literatura</b> .....	<b>38</b>
	<b>Seznam příloh</b> .....	<b>40</b>

# 1. Úvod

S vysokým zájmem o ekologii a stav moří a oceánů, které je zapotřebí monitorovat, se začal zvyšovat zájem o přístroje pro hlídání a sledování jejich biologické rozmanitosti a možnost předvídat jejich další vývoj. Z tohoto důvodu je potřeba získávat širokou škálu dat z nejrůznějších senzorů a tyto data co nejrychleji sdílet a vyhodnocovat. Měření pomocí senzorů z lodi je velmi nákladné a pracovně náročné. Proto je zapotřebí vyvíjet různé plováky a pozorovací stanice, které pracují z velké části autonomně. Tyto zařízení poskytují naměřená data v reálném čase nebo s lehkým zpožděním pomocí bezdrátového spojení. Rozměrově jsou poměrně malá a také cenově méně nákladná. Nejčastěji se tyto zařízení používají pro sledování oceánských proudů a měření teploty okolního vzduchu a vody. Se zvyšujícím se zájmem vědců jsou vyvíjeny i zařízení osazená například akustickým dopplerovským profilovačem proudu, senzory salinity či meteorologickými stanicemi.

Velkou výzvou při vývoji plovoucích měřicích zařízení je zajištění napájení. Napájení je závislé na přístrojích a senzorech uvnitř bóje a na jejich náročnosti na elektrickou energii. Alternativní zdroje energie získávají energii přeměnou z jiného druhu energie, například z tepla, slunečního svitu nebo mechanického pohybu. Díky těmto zdrojům lze v konstrukci úplně vynechat baterie anebo alespoň zvýšit jejich životnost, což vede k tomu, že není potřeba častá údržba zařízení a také v případě potopení nebo destrukce nevzniká tak velká zátěž pro ekosystém moře v porovnání s potopením baterie. Další výhodou zajišťování alternativních zdrojů energie je fakt, že pro některé výzkumy a měření by výpadek elektrické energie měl fatální následky. Z těchto důvodů je zapotřebí hledat zdroje, které získávají elektrickou energii. Tento způsob získávání energie se nazývá energy harvesting (EH). Pro aplikace, kde dochází k dynamickým dějům, je nejlepší získávat energii právě z mechanického pohybu, respektive kmitání soustavy, například generováním elektrické energie konáním obecného rovinného pohybu pomocí odvalování válcovitého elementu uvnitř válcové kavity. Zde dochází k relativnímu pohybu permanentních magnetů okolo cívek. K přeměně kinetické energie na elektrickou energii dochází pomocí elektromagnetické indukce.

## 2. Formulace problému a stanovení cílů práce

Pro drobnou sensoriku a přístroje uvnitř autonomních mořských bójí je zapotřebí hledat zdroje elektrické energie, které není potřeba často opravovat, či vyměňovat nebo se alespoň servisní interval prodlouží, aby byl zajištěn neustálý chod drobných zařízení pro měření uvnitř bóje. V mořském vlnění se nachází velké množství energie rozložené v jiné formě, například v energii kinetické, kterou lze právě pomocí harvesteru na principu elektromechanického rezonátoru převádět na elektrickou energii. U takového zdroje energie jsou dvě neznámé:

- a) jaké množství elektrické energie je možno získat provozem ve standartních podmínkách
- b) zda má aplikace v mořské bóji vůbec smysl z hlediska míry zisku energie v poměru k nákladům na zařízení, jelikož mořské vlnění má malou frekvenci, a tedy i rezonátor musí pracovat na nízkých frekvencích.

Z tohoto důvodu je cílem této práce vytvoření výpočtového modelu nízkofrekvenčního rezonátoru založeném na obecném rovinném pohybu válce uvnitř válcovité kavity. Na základě modelu lze predikovat množství získané elektrické energie. Hlavním úkolem práce je zjistit chování multidisciplinární odezvy rezonátoru na buzení pomocí mořských vln a obzvláště dynamické vlastnosti této soustavy. Z důvodu komplikovanosti soustavy z hlediska mechanické odezvy jsou simulace provedeny v MSC Adams.

Cílem této práce je vyvinutí zdroje elektrické energie pro mořskou bóji. Konkrétně návrh konstrukce elektromechanického rezonátoru založeném na obecném rovinném pohybu a vytvoření simulačního multidisciplinárního modelu pro analýzu chování harvesteru při buzení mořskými vlnami. Součástí simulačního modelu je mechanická a elektrická část navrhnutého energy harvesteru pro aplikaci v mořské bóji. Dále bylo cílem zjistit na základě výsledků simulací, zda tento návrh konstrukce je vhodný pro tuto aplikaci a ním vygenerovaný výkon je dostačující pro napájení drobné sensoriky a elektroniky uvnitř bóje.

### **3. Konstrukce energy harvesting zdrojů energie pro mořské bóje**

Z důvodu menší náročnosti na obsluhu a také menších dopadů na životní prostředí se začaly hledat alternativní zdroje elektrické energie pro mořské bóje, které slouží například k sledování koncentrace znečišťujících látek ve vodě, detekci mikroplastů anebo k detekci nestandardních průběhů mořských vln jako je například tsunami [1]. A právě jednou z variant, jak získávat energii s menším dopadem na životní prostředí a menšími náklady je energy harvesting, založený na přeměně mechanické energie na energii elektrickou, například elektromagnetická indukce, elektrostatická indukce, nebo piezoelektrický jev [2]. Další výhodou je, že v poslední době došlo k rozmachu levných senzorů a komunikačních prostředků s nízkou spotřebou energie, u některých aplikací plně postačí energie získaná pomocí energy harvestingu a není zapotřebí do bójí umisťovat přebytečné množství baterií, které mohou představovat nebezpečí pro ekosystém oceánu. Stačí menší množství baterií, které jsou dobíjeny harvesterem.

Na výkon harvesteru mají vliv, kromě samotného typu přeměny energie a geometrických rozměrů, také amplituda a frekvence mořských vln, což představuje značnou nevýhodu, protože frekvence mořských je poměrně nízká (okolo 0,1 až 0,3 Hz) [3] - [4] a v čase proměnlivá v závislosti na meteorologických podmínkách. Amplituda vln závisí rovněž na meteorologických podmínkách, ale také na hloubce moře v daném místě a na strmosti klesání mořského dna a jeho profilu pro malé hloubky.

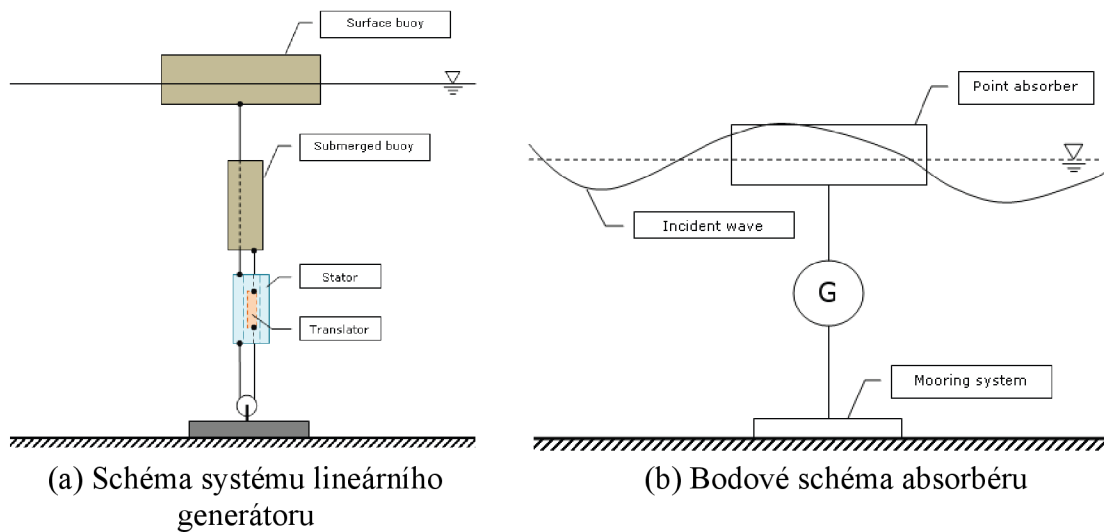
#### **3.1. Harvestery na principu elektromagnetické indukce**

Jednou z možností, jak získávat elektrickou energii pro mořské bóje, je pomocí elektromechanických generátoru, což představuje přímou cestu, jak převést kinetickou energii na energii elektrickou.

##### **3.1.1. Harvestery s lineárními elektrickými generátory**

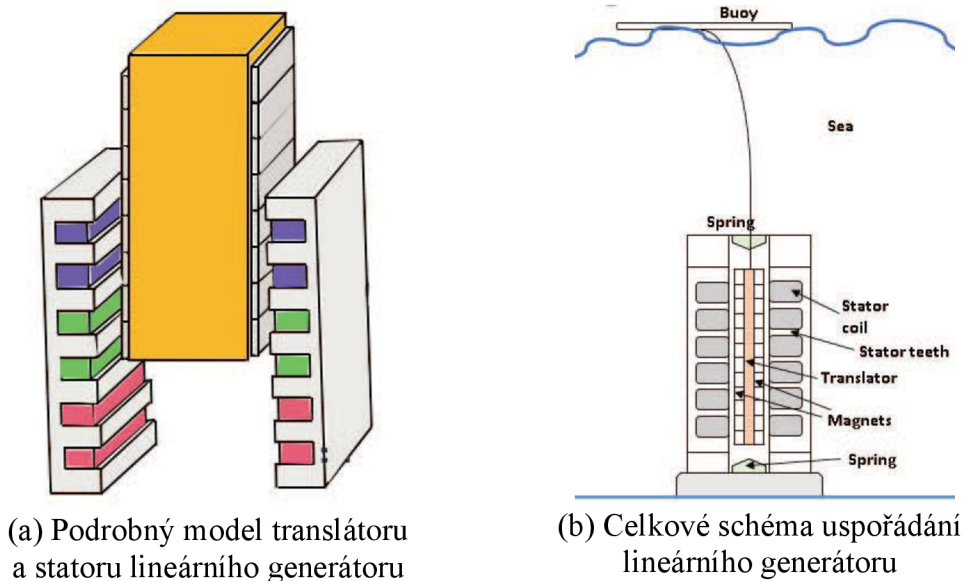
Tento typ harvesterů pracuje na principu, že pohyb bóje je pomocí lineárního generátoru, založeném na translačním pohybu, přeměňován na elektrickou energii. Nevýhodou těchto harvesterů je to, že povětšinou je nutnost fixace k mořskému dnu, proto jsou nevhodné pro aplikace v mořích s větší hloubkou.

Harvester na tomto principu je přestaven v článku [5]. U této soustavy dochází k transformaci kinetické energie povrchové bóje na energii elektrickou. Povrchová bóje plove na hladině a její pohyb obstarávají vlny. Další součástí je kladka, která je ukotvena ke dnu, přes kterou je napnuto lano, jehož napnutí obstarává ponořená bóje. Na laně je upevněn translátor skládající se z permanentních magnetů, který se pohybuje okolo statoru tvořeného cívkami. Díky tomuto pohybu dochází ke změnám magnetického toku na cívkách, což má za následek indukování elektrického napětí. Díky ponořené bóji rychlost vzájemného pohybu translátoru a statoru dvojnásobná oproti rychlosti pohybu povrchové bóje. V článku autoři uvádějí, že při aplikaci soustavy 12 těchto zařízení je generovaný výkon 4063 W, což lze využít jako elektrárnu pro dodávání energie do sítě.



Obrázek 1: Schéma lineárního generátoru s permanentními magnety [5]

V článku [6] se pokusili autoři modifikovat konstrukci generátoru fungujícího na stejném principu jako předešlý generátor. Optimalizovaný generátor měl generovaný výkon 1425 W, což je přibližně 4krát větší výkon oproti předešlé konstrukci.

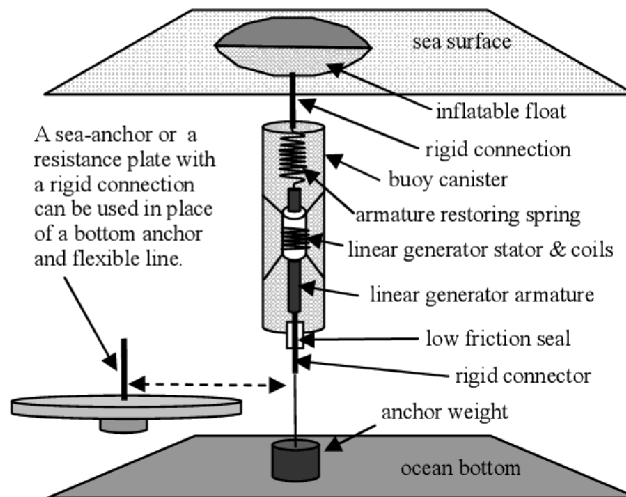


Obrázek 2: Optimalizovaný lineární elektromechanický generátor s permanentními magnety [6]

Další varianta aplikace lineárního generátoru pro získávání energie z mořských vln je popsán v článku [7], který je oproti předešlým návrhům koncipován jako zdroj energie pro mořské bóje v jednotkách wattů. Tato soustava je buď pevně ukotvena k velmi těžké odporové desce na mořském dně pomocí pevného lana, tak aby systém byl fixován ke dnu anebo pomocí pružného lana a závaží. Další částí je vodotěsný válec, vyplněný vzduchem z důvodu menšího tření, uvnitř kterého se nachází stator lineárního generátoru z cívek. Generátor je pevně vázaný k válci. Středem satoru se pohybuje translátor permanentních magnetů se sinusově rozloženým magnetickým polem, jehož



pohyb závisí na pohybu bóje plovoucí na hladině a na zpětné pružině, která působí proti vztlačkové síle vody a napomáhá k plynulejšímu pohybu translátoru. Mechanismus pro reagování na změnu výšky hladiny je realizován pomocí navijáku s pomalou zpětnou vazbou, tak aby se střed rozsahu pohybu bóje nacházel v úrovni hladiny

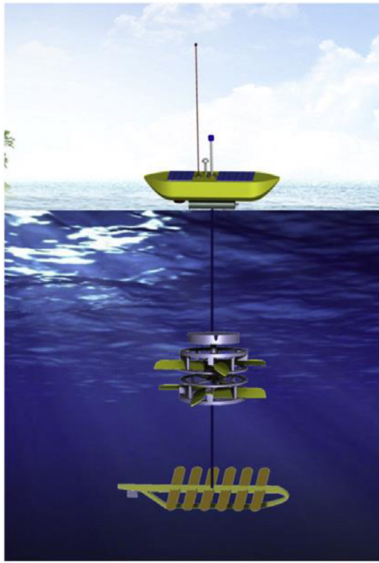


Obrázek 3: Schéma hlavních částí návrhu lineárního generátoru pro mořské bóje [7]

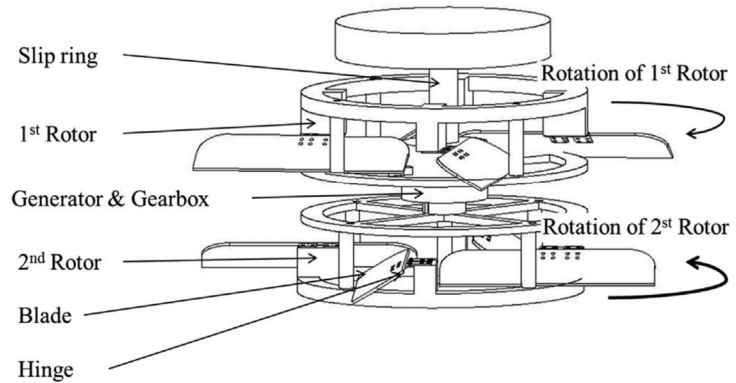
### 3.1.2. Harvestery s rotačními elektrickými generátory

U tohoto typu harvesteru dochází k přeměně kinetické energie plováku, způsobené vlněním mořské hladiny, na rotační pohyb rotoru turbíny, která pak generuje elektrickou energii.

Jeden z návrhů, jak přeměnit vertikální translační pohyb bóje na rotační pohyb turbíny je popsán v článku [8]. Celá sestava bóje s harvesterem se skládá ze třech částí, a to ze samotné bóje v níž jsou umístěny senzory a další elektronika, z ponořeného tělesa, které je složeno ze dvou čtyřlopatkových turbín a poslední částí je stabilizační systém, který napomáhá ke stabilizaci soustavy v prostoru, jelikož soustava je volně plovoucí. Bóje je propojena s turbínami pomocí drátů a lana. Plovoucí část sestavy kopíruje svým pohybem vlnění vodní hladiny a tím při vertikálním pohybu nahoru posouvá s turbínami vzhůru. Při pohybu nahoru dochází k rotaci turbín. Při pohybu bóje směrem dolů začne i ponořená část klesat dolů z důvodu působení tíhové síly a opět dochází k roztáčení turbín způsobené odporem a vztlačovou silou na lopatkách. Lopatky turbín jsou umístěny protichůdně z důvodu, aby docházelo k vyrovnávání rotačního momentu, a tedy nedocházelo k rotaci ponořené části jako celku. Pomocí hřídele je pak rotační pohyb přenášen do generátoru, kde díky rotoru s cívkami a statoru s permanentními magnety dochází k transformaci mechanické energie na energii elektrickou. Autoři v článku dále popisují a hledají optimální návrhové parametry jako například tvar lopatek turbíny, úhel natočení lopatek anebo velikost náboje rotoru. Například příliš velký úhel způsobuje velký horizontální odpor a velký točivý moment.



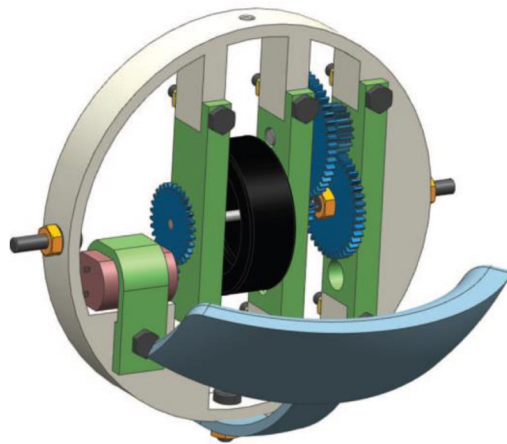
(a) Nákres celé soustavy



(b) Detailní nákres bočního pohledu vlnové turbíny

Obrázek 4: Volná bóje s energy harvesterem na principu lopatkové turbíny [8]

Harvester na principu kyvadla a gyroskopu pro použití v neukotvené mořské bóji byl navržen a popsán v článku [3]. Konstrukce se skládá z kloubového kyvadlového ramene, které se pohybuje díky pohybu bóje unášené vlnami. Jejich pohyb se pomocí ozubených převodů přenáší a akumuluje do rotačního kola, které pohání stejnosměrný elektrický generátor. Díky tomuto mechanismu je veškerá energie z kyvadla přetransformována na rotační pohyb a následně na energii elektrickou. Následně byl vytvořen a experimentálně otestován prototyp tohoto zařízení o celkové hmotnosti 220 g, průměru 10 cm a s převodovým poměrem 35. Pro návrh tohoto harvesteru s vlastní frekvencí 1,5 Hz bylo dosaženo generovaného výkonu 1,6 mW [9]. Dle autorů na základě experimentu závisí pohyb harvesteru pouze na zvolené parametrech bóje, nikoliv na vlastnostech vln s bójí pohybujících.



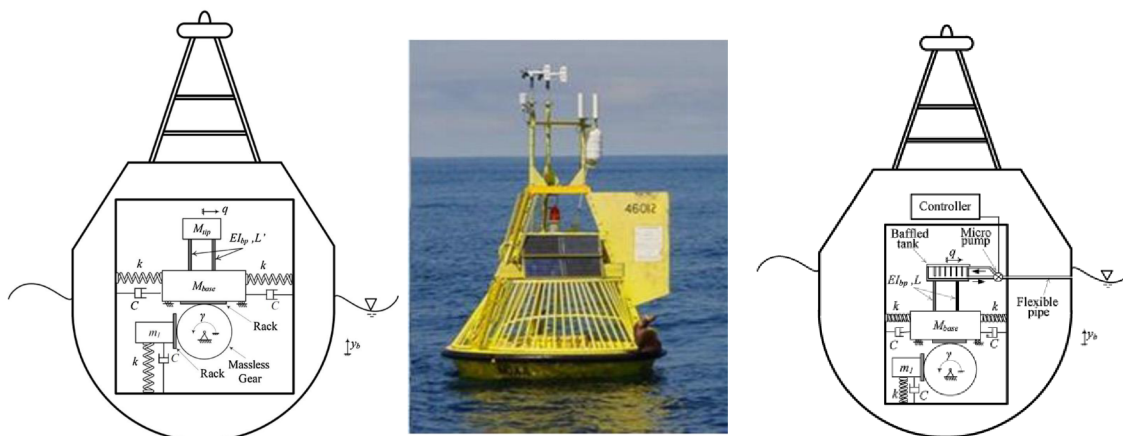
Obrázek 5: Harvester ve volné bóji fungující na principu kyvadla [3]

### 3.2. Harvestery na principu piezoelektrického jevu

Tento typ harvesterů funguje na principu piezoelektrického jevu, což znamená, že při pohybu bóje, způsobeném vlněním vodní hladiny, dochází k deformaci částí vyrobených z piezoelektrického materiálu a tím je generováno elektrické napětí. Typickým materiálem pro tyto aplikace jsou látky na bázi sloučenin titaničitanu zirkoničitého (PZT) [10].

Harvester získávající energii z deformace piezoelektrického materiálu je popsán v článku [11]. Tato bóje získává energii z deformace piezoelektrických nosníků-stojen, které jsou umístěny na pohybujícím se závaží  $M_{base}$ , které kmitá v horizontálním směru uvnitř bóje za pomoci pružin. Dále uvnitř také kmitá závaží  $m_1$ , které koná pohyb způsobený vlnami ve vertikálním směru a pomocí nízkohmotnostní převodovky je jeho pohyb přenášen do směru pohybu hlavního závaží. Obě tělesa mají v důsledku toho stejnou frekvenci kmitání. Na vrchní straně nosníků se nachází závaží  $M_{tip}$ , díky kterému dochází k deformaci samotných nosníků a ke generování elektrického napětí.

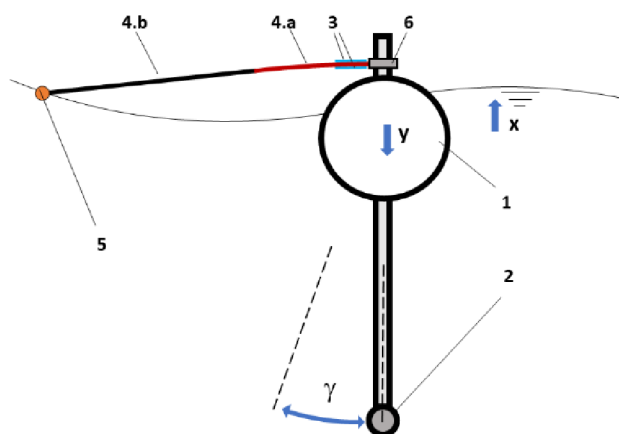
Pro dosažení co největšího výkonu harvesteru, je zapotřebí, aby se vlastní frekvence systému, co nejvíce blížila frekvenci mořských vln. Průměrná amplituda a frekvence mořských vln je proměnlivá během roku. Z tohoto důvodu je nutné vhodně měnit rozložení hmoty v soustavě. K tomuto účelu je v bóji umístěno čerpadlo, které do tělesa  $M_{tip}$  dočerpává a naopak odčerpává vodu, čímž ovlivňuje vlastní frekvenci bóje, tak aby se co nejvíce blížila frekvenci mořských vln. Hmotnost  $M_{tip}$  se mění v rozmezí 500 g až 1,2 kg. V některých měsících se vygenerovaný výkon pro samoladící bóji zvýší až dvacetinásobně oproti soustavě s konstantní hmotností  $M_{tip}$ . Průměrný vygenerovaný výkon se během roku pohybuje v rozmezí 6 až 20 mW pro umístění na moři v blízkosti San Francisca.



(a) Schéma konstrukce mořské bóje s konstantní  $M_{tip}$  (b) Stanice Half moon bay 46,012, San Francisco (c) Schéma konstrukce samoladícího harvesteru v mořské bóji

Obrázek 6: Volná mořská bóje s piezoelektrickým harvesterem [11]

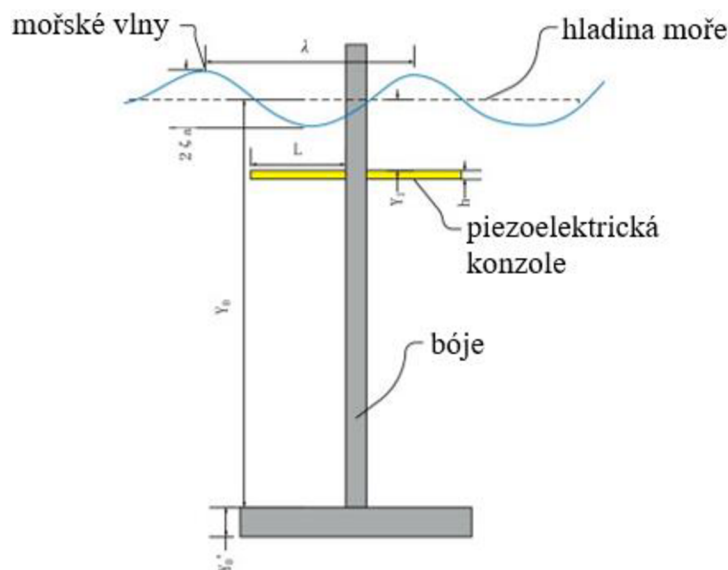
Další z konstrukčních návrhů využívající piezoelektrický jev ze získávání energie z vlnění hladiny je design popsáný v článku [1]. Toto zařízení se skládá z hlavní středové bóje, jejíž pohyb je ovlivňován pomocí zátěže umístěné na tyči. K boční straně bóje je připevněn plát z uhlíkových vláken skládající se z pevné části a z pružné části. Okolo pružné části v blízkosti hlavní bóje se nachází piezoelektrický plošný snímač, jehož deformací dochází ke generování elektrického napětí. Na konci uhlíkového plátu je připevněna malá bóje s nízkou hmotností a malým vztlakem, aby docházelo k přenosu vysokofrekvenčního pohybu z vln. Délka plátu musí být alespoň třikrát delší oproti průměru bóje, aby nedocházelo k destruktivní interferenci vlnění v plátku. Zařízení efektivně pracuje na frekvencích okolo 2 – 3 Hz, což je dle autorů maximální frekvence, kterou lze získat z moře. Získaná energie z tohoto harvesteru se pohybuje v desítkách  $\mu\text{W}$ , což není vysoká hodnota, ale stále dostačující pro napájení některých senzorů.



Obrázek 7: Bóje s piezoelektrickými plošnými snímači [1]:

- (1) – bóje, (2) – zátěž, (3) - piezoelektrický plošný snímač (PPT),
- (4) – uhlíkový plát (a) – pružný, (b) – pevný, (5) – externí plovák

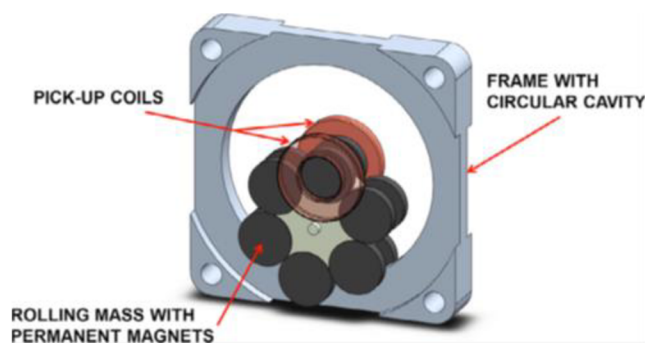
Další konstrukcí fungující na piezoelektrickém jevu je harvester navržený v článku [2]. Výhodou je, že není zapotřebí kotvení ke dnu, a tedy lze využít i v hlubokých vodách, kde je amplituda vln větší oproti vlnám v mělkých částech moří a oceánů. Zařízení se skládá z dlouhého tenkého válcovitého plováku, na jehož spodní podstavu je umístěno závaží ve tvaru disku. Závaží způsobuje vertikální postavení válce a také snižuje amplitudu pohybu ve vertikálním směru, což má za důsledek větší efektivitu získávání elektrické energie. Celá soustava plove v oblasti, kde dochází k průběhu vln i pod hladinou. Na válci jsou umístěny konzole z piezoelektrického materiálu, na niž je při vyvolání relativního pohybu mezi plovákem a příčnou vlnou generováno elektrické napětí. Autoři v článku uvádí, že při aplikaci zařízení s délkou plováku 20 m, ploše závaží  $9\text{ m}^2$  a další tomu úměrné parametry lze docílit vygenerovaného elektrického výkonu 24 W.



Obrázek 8: Bóje pro získáváním elektrické energie z piezoelektrických konzolí [2]

### 3.3. Použití harvesteru představeném v této práci

Předlohou konstrukce harvesteru pro aplikaci uvnitř mořské bóje byl rezonátor vytvořený na VUT v Brně, který je popsán v článku [12]. Tento rezonátor založený na odvalování malého válce uvnitř kulaté válcovité kavity je buzen pohybem ve více osách pro větší efektivitu elektromechanické přeměny energie. Valící se válec je na okrajích osazen magnety, které svým průchodem okolo cívek ve středu kavity generují elektrický proud a napětí. Rezonátor byl vytvořen pro získávání elektrické energie z lidského pohybu s frekvencí od 2 do 10 Hz.

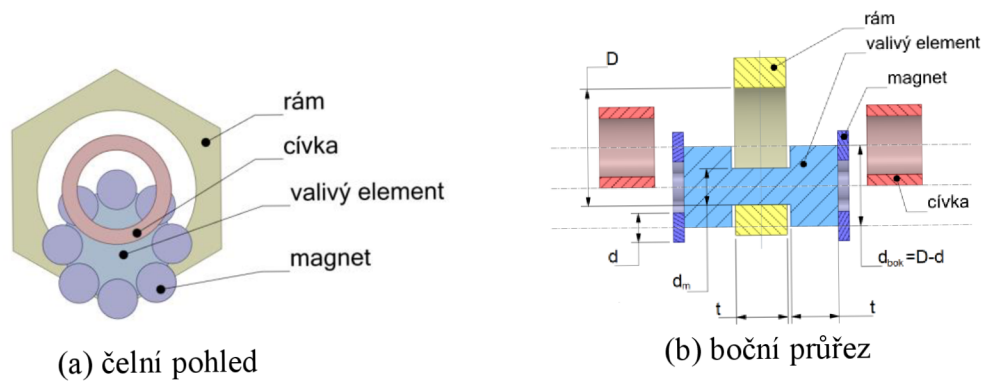


Obrázek 9: Harvester pro získávání elektrické energie z lidského pohybu [12]

Návrh tohoto typu konstrukce umístěné v nekotvené bóji pro získávání energie z mořských vln je zpracován v diplomové práci [13]. Vzhledem k tomu, že frekvence vlnění se pohybuje okolo 1,6 Hz, bylo zapotřebí konstrukci rezonátoru poupravit a co nejlépe naladit na hodnotu vlastní frekvence, která je stejná jako frekvence mořských vln. Tím je docíleno největší efektivity pro aplikaci uvnitř mořské bóje. Konstrukce byla modifikována o bočnice, která zvyšují celkový moment setrvačnosti valivého elementu a



pro umístění magnetu z důvodu průchodu magnetů středem kavity i pro menší průměry valivé části. Autor navrhl konstrukci s kavitou o průměru 46 mm a s hmotností valivé části 166 g. Generovaná elektrická energie pro tuto konstrukci byla při pohybu na rozbouřeném moři přibližně 23 mJ za minutu.



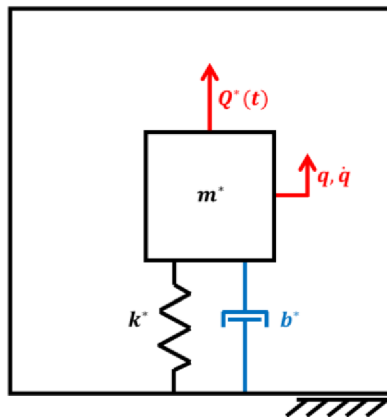
Obrázek 10: Schéma harvesteru na principu ORP [13]

## 4. Model pohybu valčího tělesa v mořské bóji

Tato práce se zabývá návrhem a simulací pohybu volného tělesa uvnitř mořské bóje, které slouží jako zařízení pro elektromechanickou přeměnu energie z pohybu mořských vln. Těleso koná uvnitř bóje obecný rovinný pohyb. Modelování pohybu tělesa je založeno na obecné rovnici pro mechanické kmitání, která je ve zobecněném souřadném systému definována jako:

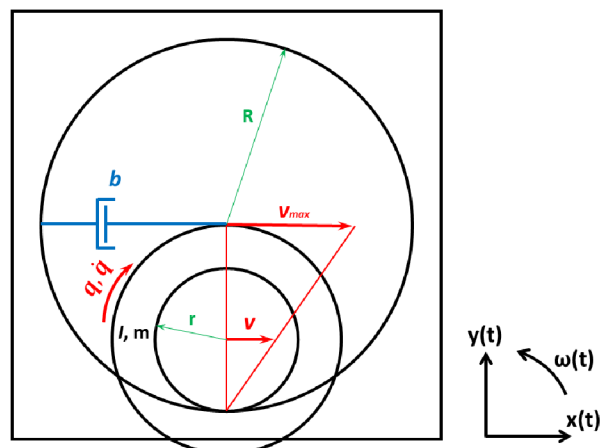
$$m^* \cdot \ddot{q} + b^* \cdot \dot{q} + k^* \cdot q = Q^*(t) \quad (1)$$

Kde  $m^*$  reprezentuje zobecněnou hmotnost,  $b^*$  zobecněné tlumení soustavy a  $k^*$  představuje zobecněnou tuhost.  $q, \dot{q}, \ddot{q}$  jsou zobecněná souřadnice, rychlost a zrychlení soustavy.  $Q^*$  představuje zobecněnou hodnotu vnějšího buzení. Tato rovnice prezentuje náhradní zobecněné schéma, které je prezentováno na obrázku 11.



Obrázek 11: Zobecněného schéma oscilátoru

Pro případ, kdy tělesem je válec konající obecný rovinný pohyb (ORP) uvnitř bóje, je zobecněnou souřadnicí  $q$  relativní úhlová výchylka těžiště valcí se částí vůči středu kavity, uvnitř které se odvaluje. Schéma je znázorněno na obrázku 12.



Obrázek 12: Schéma mechanického kmitání harvesteru založeném na ORP

Valivý pohyb lze chápat jako rotaci okolo kolmé osy na rovinu pohybu procházející okamžitým bodem dotyku valivého elementu a kavity. V redukci k sestavení Lagrangeovy rovnice II. druhu pro popsání soustavy je zobecněnou souřadnicí  $q$  úhel natočení valivého elementu okolo pólu valení. Kinetická energie pohybu je pak definována vztahem:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m^* \cdot \dot{q}^2 = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \dot{q}^2 + \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2 \cdot \dot{q}^2 = \frac{1}{2} \cdot (I + m \cdot r^2) \cdot \dot{q}^2 \quad (2)$$

Potencionální energie soustavy závisí pouze na její globální poloze, jelikož v ní nejsou žádné dodatečné pružiny. Potencionální energie soustavy závisí na globální poloze těžiště valivého elementu ve svislé rovině oproti rovnovážné poloze. Potencionální energie je pak definována:

$$E_p = m \cdot g \cdot r \cdot \sin(\varphi) \quad (3)$$

Kde úhel  $\varphi$  je úhel natočení těžiště valivého elementu vůči středu kavity v globálních souřadnicích. Závislost mezi úhlem  $\varphi$  a zobecněnou souřadnicí  $q$  je:

$$\varphi = \frac{r}{R - r} \cdot q \quad (4)$$

Vzhledem k tomu, že pro malé výchylky  $\varphi < 5^\circ$  lze považovat  $\sin(\varphi) = \varphi$ , lze pak rovnici (3) přepsat do tvaru:

$$E_p = m \cdot g \cdot \frac{r^2}{R - r} \cdot q = k^* \cdot q \quad (5)$$

Vlastní frekvence soustavy  $\Omega_0$  je pro malé výchylky dána vztahem:

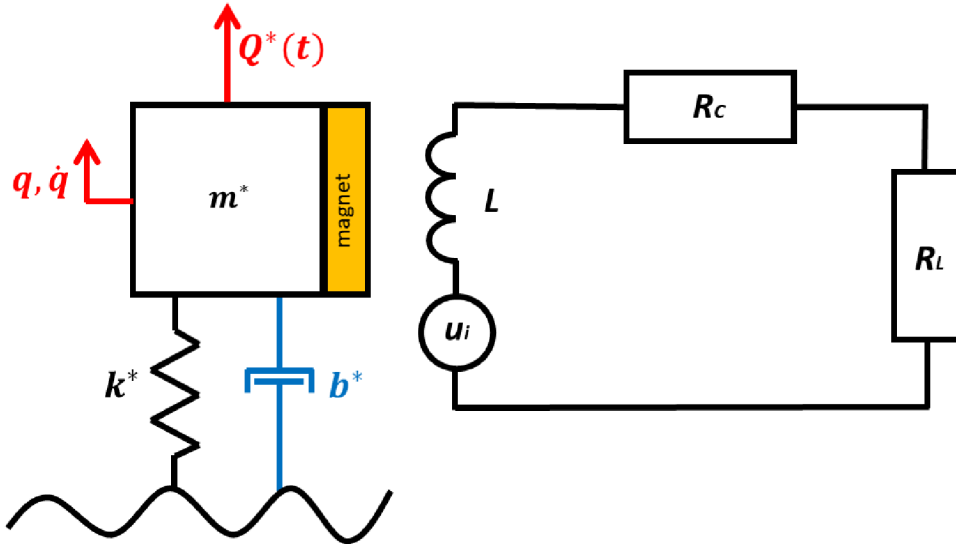
$$\Omega_0 = \sqrt{\frac{k^*}{m^*}} = \sqrt{\frac{m \cdot g \cdot r^2}{(I + m \cdot r^2) \cdot (R - r)}} \quad (6)$$

Zobecněné tlumení pro navrhovaný harvester  $b^*$  se v tomto případě skládá z tlumení mechanického  $b_m^*$  a tlumení elektrického  $b_e^*$

$$b^* = b_m + b_e \quad (7)$$



Převodem za pomoci zobecněných souřadnic lze tuto soustavu konající obecný rovinný pohyb pro snazší výpočet vyjádřit jako jednoduchý rezonátor konající translační pohyb. Schéma rezonátoru včetně jeho elektrické části je zobrazeno v levé části na obrázku 13.



Obrázek 13: Společné schéma rezonátoru a elektromagnetického generátoru

Další částí, pro kterou je zapotřebí sestavit výpočtový model, je část elektrická. Schéma elektrického obvodu rezonátoru je znázorněno v pravé části na obrázku 13, kde  $L$  je indukčnost cívky,  $R_C$  je impedance cívky a  $R_L$  vyjadřuje odpor zátěže. Chování harvesteru popisují indukované napětí  $u_i$  a proud  $i$  a také napětí na zátěži  $u_L$  a elektrický výkon  $p_z$  na zátěži. Vztahy pro výpočet jednotlivých veličin jsou uvedeny v rovnicích.

Vazebný koeficient systému  $c_\Phi$  udává změnu magnetického toku, kde  $\Phi$  je celkový magnetický tok procházející cívkou:

$$c_\Phi = \frac{d\Phi}{dq} \quad (8)$$

Celkové indukované napětí:

$$u_i = c_\Phi \cdot \dot{q} \quad (9)$$

Indukovaný proud:

$$i = \frac{u_i}{R_L + R_C} \quad (10)$$

Napětí na zátěži:

$$u_L = u_i \cdot \frac{R_L}{R_L + R_C} \quad (11)$$

Elektrický výkon na zátěži:

$$p_z = \frac{u_L^2}{R_L} \quad (12)$$

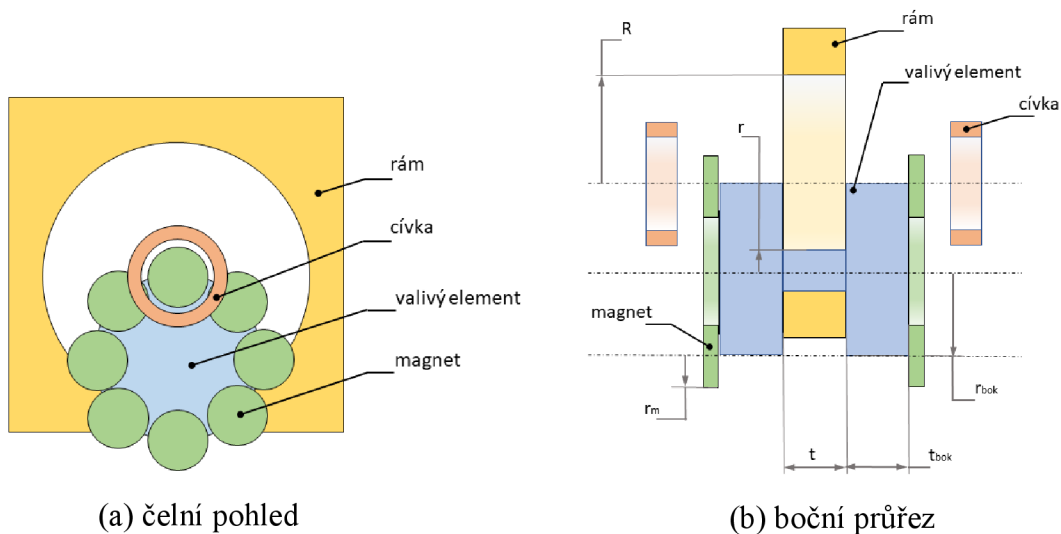
Dále díky znalosti vazebného koeficientu systému lze dopočítat velikost elektrického tlumení mechanického pohybu volného tělesa uvnitř bóje. Vztah pro výpočet elektrického tlumení je uveden v rovnici (13).

$$b_e = \frac{c_\phi^2}{R_L + R_C} \quad (13)$$

Mechanické tlumení je velmi obtížné analyticky vyjádřit, proto byl zvolen jako výpočtový program MSC Adams pro numerickou simulaci chování harvesteru při vnějším buzení. Další motivací k zvolení numerických simulací, je fakt, že pro větší výchylky už je soustava nelineární a nelze ji řešit analyticky.

#### 4.1. Volba geometrických parametrů harvesteru

Důležitým faktorem pro volbu parametrů v této práci je celková velikost harvesteru, proto snahou pro optimalizaci je volit rozměr kavity a hmotnost valivé části, co nejmenší, a zároveň musí být docílen co nejlepší poměr mezi generovaným elektrickým výkonem generátoru a celkovou velikostí a hmotností harvesteru. Pro prvotní návrh byla zvolena konstrukce prezentovaná v práci [13], na níž tato práce navazuje



Obrázek 14: Schéma konstrukce harvesteru na principu elektromagnetické indukce

Pro hledání co nejlepšího návrhu konstrukce byl vytvořen script v programu Matlab, kde byli jako proměnné zvoleny poloměry kavity  $R$  a poloměr valivé části  $r$ , která přichází do kontaktu s vnitřní stranou kavity a odvaluje se po ní. Valivá část se skládá z vnitřního válce o poloměru  $r$  a tloušťce  $t$ , na němž je z boku na každé straně umístěn disk o poloměru  $r_{bok}$  a o tloušťce  $t_{bok}$ . Tloušťky válců byly také laděny pro co nejoptimálnější vlastnosti. Na obrázku 14 (a) a (b) je zobrazeno schéma konstrukce harvesteru.

Výpočtový script byl sepsán tak, že nejdříve byl vygenerován vektor hodnot poloměru kavity  $R$  od 5 mm po 50 mm s krokem 0,25 mm, následně byl vytvořen vektor poloměrů středního válce valivé části  $r$  s polovičními hodnotami oproti vektoru poloměrů  $R$ . Další parametry návrhů byly zapisovány do čtvercových matic o velikosti délky vektoru  $R$ . Každý člen matice měl svou pozici charakterizovanou pořadovým číslem  $i$  vektoru  $R$  a pořadovým číslem  $j$  vektoru  $r$ . Tloušťka středového válce i bočnic byla zvolena 5 mm, aby měl valivý element, co nejmenší hmotnost, ale stále bylo zachováno dobré valení a nedocházelo k příliš velkým výkyvům pohybu do stran ve směru kolmém na čelní plochy válce.

Hodnota konkrétního poloměru  $r_{bok}$  pro dané hodnoty poloměru  $R$  a  $r$  je dána rovnicí (14), tak aby se okraj bočních disků během valení nacházel právě na ose kavity, jelikož na okrajích bočnic leží středy magnetů a ty se musí během valení pohybovat okolo cívek umístěných na ose kavity. Toto umístění, kdy se osy magnetů a cívek shodují jsou nejefektivnější pro generování elektrického napětí.

$$r_{bok} = R - r \quad (14)$$

Magnety byly zvolené neodymové magnety o průměru 7 mm a výšce 2 mm, jejichž hmotnost je 6 g a magnetická síla 830 g. Počet magnetů umístěných na každé straně valivé části harvesteru byl dopočítán pomocí rovnice (15), tak aby se na okraj každé bočnice vešlo co největší množství magnetů. Hodnota, která byla výsledkem rovnice, byla následně zaokrouhlena na celá čísla směrem dolů. Celkově se tedy na valivé části nachází  $2 \cdot n$  magnetů.

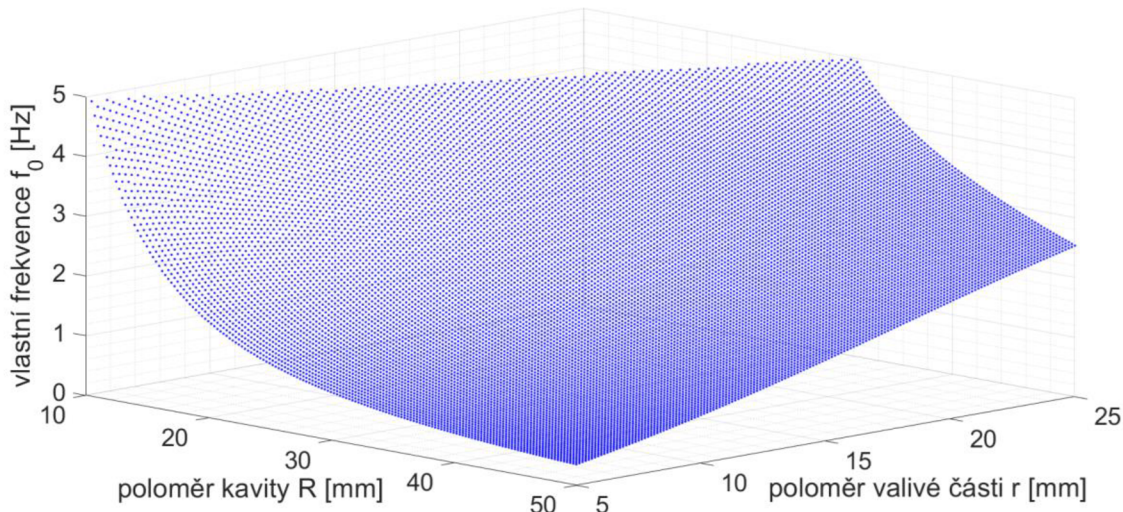
$$n = \pi \cdot \frac{r_{bok}}{r_m} \quad (15)$$

V dalších krocích byla díky známé hodnotě hustoty oceli dopočítána celková hmotnost  $m$  valivé části včetně magnetů a také její moment setrvačnosti  $I$  vzhledem k ose symetrie procházející těžištěm valivé části harvesteru.

Na závěr byla vypočítána za pomoci rovnice (16) hodnota vlastní frekvence harvesteru  $f_0$  v jednotkách hertz. Hodnota gravitačního zrychlení  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ . Vztah pro vlastní úhlovou frekvenci byl odvozen výše a je dán rovnicí (6).

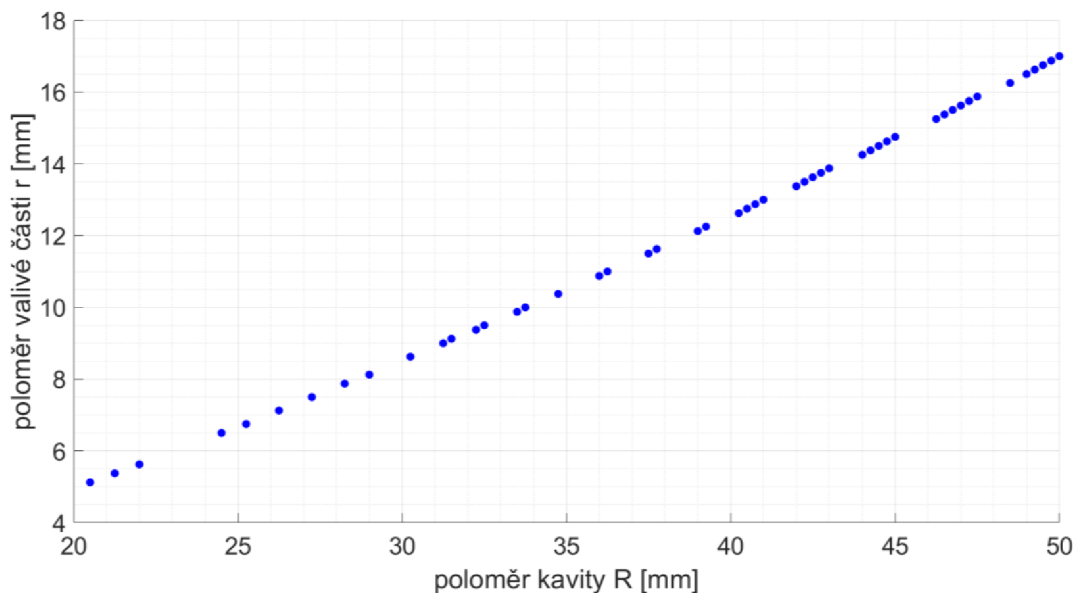
$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{m \cdot g \cdot r^2}{(I + m \cdot r^2) \cdot (R - r)}} \quad (16)$$

Výstupem hledání optimální konstrukce byla matice hodnot vlastní frekvence soustavy. Tato matice byla vynesena do prostorového grafu v závislosti na poloměru kavity  $R$  a poloměru válečku valivé části  $r$ . Graf je zobrazen na obrázku 15, kde jsou vyneseny hodnoty pro návrhy s vlastní frekvencí do 5 Hz.



Obrázek 15: Hodnoty vypočítaných vlastních frekvencí v závislosti na poloměrech kavity a valivého elementu

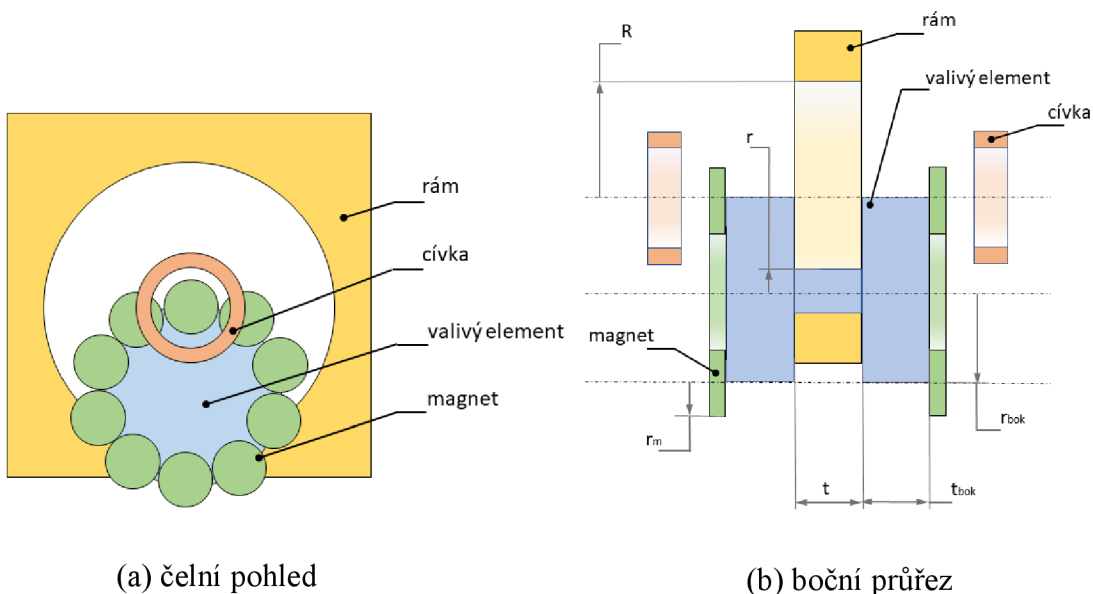
V grafu lze pozorovat, že požadované frekvence bylo určitě docíleno mnohokrát. Proto byly do dalšího grafu na obrázku 16 vykresleny pouze body s vlastními frekvencí pohybující se blízko 1,6 Hz.



Obrázek 16: Hodnoty návrhů rozměrových parametrů harvesterů s vypočítanou vlastní frekvencí 1,6 Hz

#### 4.1.1. Jednokavitový model harvesteru

Z návrhů, které byly vypočítány v předešlé části byl vybrán jeden s nejnižší hmotností a s nejmenšími rozměry. Schéma tohoto návrhu je zobrazeno na obrázku 17. Rozměry a parametry vybraného návrhu pro jednokavitový harvesteru jsou uvedeny v tabulce 1.



Obrázek 17: Schéma konstrukce jednokavitového harvesteru

Tabulka 1: Parametry jednokavitového harvesteru

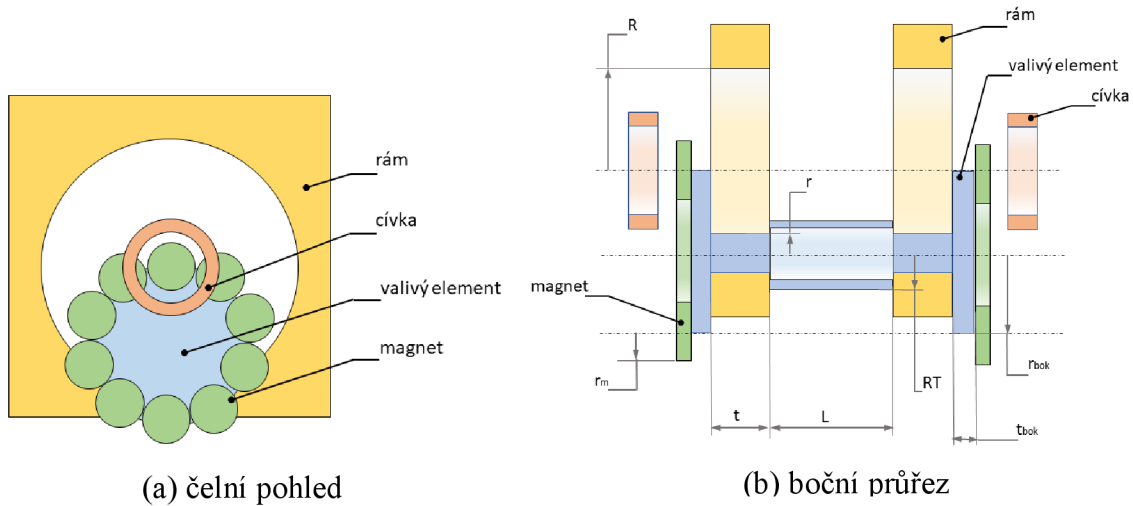
Parametr	Značka	Jednotka	Hodnota
Průměr kavity	$R$	[mm]	15
Průměr valivé části	$R$	[mm]	3,25
Tloušťka valivé části a kavity	$T$	[mm]	10
Tloušťka bočnic	$t_{bok}$	[mm]	12
Počet magnetů na harvesteru	$N$	[-]	10 + 10
Celková hmotnost	$M$	[g]	96,3
Celkový moment setrvačnosti	$I$	[kg/m <sup>2</sup> ]	$7,38 \cdot 10^{-6}$
Vlastní frekvence	$f_0$	[Hz]	1,6002

Tento typ konstrukce nejevil úplně optimální výsledky při testování sinusovým buzením, jelikož část valivého elementu, která se valí po vnitřní straně kavity, musela mít dostatečnou tloušťku z důvodu dostatečné vztyčné plochy pro zamezení pohybu do stran, a to navyšovalo hmotnost. Z tohoto důvodu bylo zapotřebí změnit konstrukci.

#### 4.1.2. Dvoukavitový model harvesteru

Konstrukce byla modifikována na konstrukci skládající se ze dvou kavít a ze dvou válců odvalujících se uvnitř nich. Válců byly propojeny pomocí duté trubky, z důvodu snížení vlastní frekvence soustavy. Na vnějších bocích odvalujících se částí byly umístěny tenké disky z důvodu umístění magnetů, které musí procházet při pohybu

valivého elementu středem kavity. Tyto disky byly zúženy z důvodu menší hmotnosti na 2 mm oproti 12 mm v původním návrhu. Také tloušťka valivých částí byla snížena na polovinu původního rozměru. Výpočtový model pro hledání optimálních parametrů harvesteru z předešlého návrhu byl doplněn o rozměry a vlastnosti trubky. Schéma nového návrhu je na obrázku 18.



Obrázek 18: Schéma konstrukce dvoukavitového harvesteru

Proměnnou byl zvolen vnější poloměr trubky  $R_T$  s tím, že tloušťka stěn trubky je 2 mm a druhou proměnnou byla zvolena délka trubky  $L$ . Ostatní parametry konstrukce byly zachovány z vybraného nejmenšího a nejlehčího návrhu jednokavitového harvesteru. Rozsah hodnot vstupujících do výpočtu rozměrových parametrů byl pro poloměr trubky i její délku od 5 mm do 50 mm s krokem 0,5 mm. Z návrhů s vlastní frekvencí blízkou hodnotě 1,6 Hz byl vybrán návrh s parametry uvedenými v tabulce 2. V tabulce jsou uvedeny i hodnoty pro parametry z elektrické části  $R_C$ ,  $R_L$  a  $c_\phi$ . Tyto hodnoty byly převzaty z článku [12], kde byla hodnota  $c_\phi$  vypočtena pomocí FEM softwaru.

Tabulka 2: Parametry dvoukavitového harvesteru

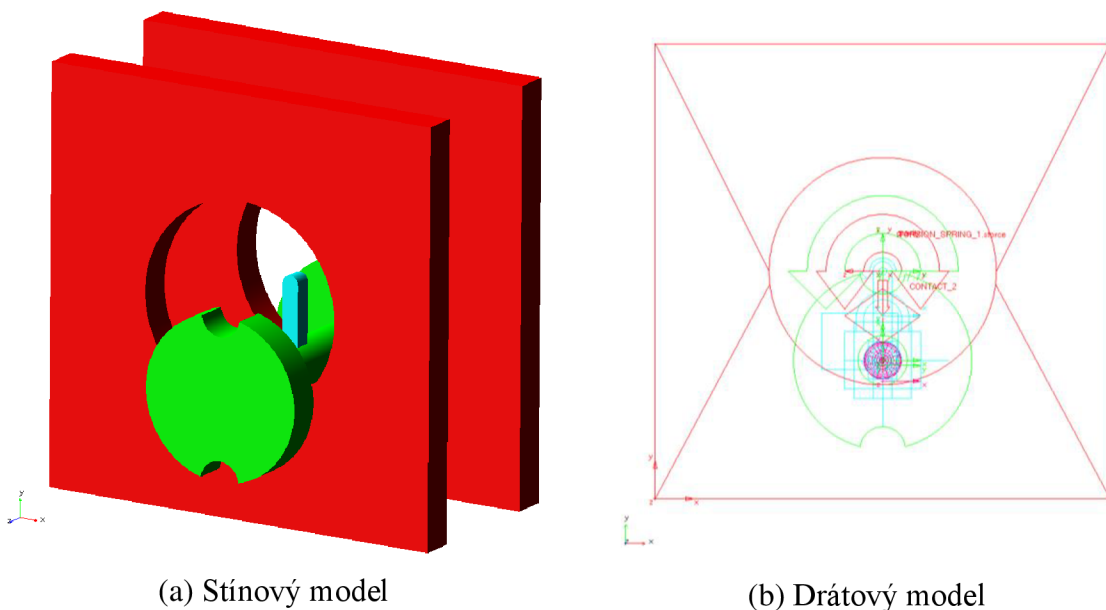
Parametr	Značka	Jednotka	Hodnota
Průměr kavity	$R$	[mm]	15
Průměr valivé části	$r$	[mm]	3,25
Tloušťka valivé části a kavity	$t$	[mm]	5
Tloušťka bočnic	$t_{bok}$	[mm]	2
Vnější poloměr trubky	$R_T$	[mm]	8
Délka trubky	$L$	[mm]	12
Počet magnetů na harvesteru	$n$	[-]	20
Celková hmotnost	$m$	[g]	36,5
Celkový moment setrvačnosti	$I$	[kg/m <sup>2</sup> ]	$2,80 \cdot 10^{-6}$
Vlastní frekvence	$f_0$	[Hz]	1,5999
Odpor cívky	$R_C$	[Ω]	2000
Odpor zátěže	$R_L$	[Ω]	2000
Vazebný koeficient systému	$c_\phi$	[Wb/rad]	0,2



## 5. Model harvesteru v prostředí MSC Adams

Program MSC Adams je nástroj pro simulaci multi-body dynamiky těles. Tento nástroj byl zvolen z důvodu zkoumání navzájem se ovlivňující dynamiky více těles, z kterého se harvester skládá. Soustava harvesteru je nelineární, z důvodu velkých výchylek a nedodržení podmínky ideálního valení. Tato soustava by se tedy těžko řešila pouze pomocí analytických rovnic, a proto bylo zvoleno řešení soustavy v prostředí MSC Adams.

Po navržnutí rozměrových parametrů a dopočítání teoretické vlastní frekvence harvester bylo zapotřebí ověřit jeho reálné chování a vlastní frekvenci při pohybu na moři. K tomuto účelu byl vytvořen model harvester v prostředí programu MSC Adams, který je na obrázku 19. V tomto modelu byl vytvořen zjednodušený model valící se části, která se skládá z dlouhého středového válce a dvou bočních disků. V modelu byly zanedbány magnety na vnějších hranách disků a středová trubka mezi kontaktními válci. Do bočnic byly udělány kružnicové díry pro lepší pozorování pohybu valivé části. Se zanedbanými částmi bylo ale počítáno u momentu setrvačnosti a u celkové hmotnosti valivého elementu, tak aby mechanické chování modelu odpovídalo navrhované konstrukci harvesteru.



Obrázek 19: Model harvesteru v prostředí MSC Adams

Z důvodu, aby model v MSC Adams splňoval podmínky správného chování valivého elementu uvnitř kavity, bylo zapotřebí doplnit model o náhradní kinematický mechanismus, který se skládal z prutu (v obrázku modré těleso) propojující osu kavit se středem valivé části a z koule (v síťovém modelu růžové těleso), která se nachází uprostřed valivé části. Celému kinematickému mechanismu byla udělena hmotnost  $0,01 \text{ kg/m}^3$  z důvodu toho, aby jeho vliv na výslednou dynamiku soustavy byl zanedbatelný. Tyto dvě součásti byly k sobě vázány pomocí posuvné vazby. Propojení s ostatními částmi konstrukce bylo zajištěno pomocí rotační vazby, která spojovala prut

se středem kavit a rotační vazbou spojující kouli s valivým elementem. Tyto vazby zajišťují správný pohyb valivé části uvnitř kavit.

Pro zajištění valení je mezi valivou částí a kavitami definován kontakt pro každou kavitu zvlášť, se stejnými parametry. Kontakt je ve schématu modelu na obrázku 19 (b) značen červeným čtyřúhelníkem se šipkou. Tuhost kontaktu byla dopočítána pomocí Hertzovy kontaktní teorie, jako kontakt dvou válců, v tomto případě válce uvnitř válce s rozměry  $R$  pro poloměr kavity a  $r$  pro poloměr části valivého elementu, která se valí uvnitř kavity. Pro výpočet bylo zapotřebí zjistit parametry materiálů, kterými jsou modul pružnosti v tahu  $E$  a Poissonův poměr  $\mu$ . Nejdříve je potřeba dopočítat průnikové konstanty  $u$  pro valivou část a  $U$  pro kavitu:

$$U = \frac{4 \cdot (1 - \mu^2)}{E} \quad (17)$$

Následně jsou tyto hodnoty dosazeny do rovnice pro výpočet samotné tuhosti kontaktu:

$$k = \frac{16}{3 \cdot (U - u)} \cdot \sqrt{\frac{R \cdot r}{R + r}} \quad (18)$$

Výsledná tuhost kontaktu  $k$  je  $6,41 \cdot 10^7 \text{ kg/m}^{1/2}\text{s}^2$

Exponent síly pro Hertzovu teorii kontaktu byl zvolen 1,5. Mechanické tlumení soustavy bylo definováno hodnotou  $10^4 \text{ Ns/m}$ . Hloubka kontaktu byla zvolena 0,1 mm.

Samotný pohyb modelu byl zajišťován pomocí příkazu motion, který charakterizoval pohyb rámu s kavitami. Ve schématu drátěného modelu je pohyb znázorněn zelenou šipkou okolo středu kavity. Modré obdélníky ve schématu představují vazbu, která neumožňovala pohyb valivého elementu mimo zobrazenou rovinu.

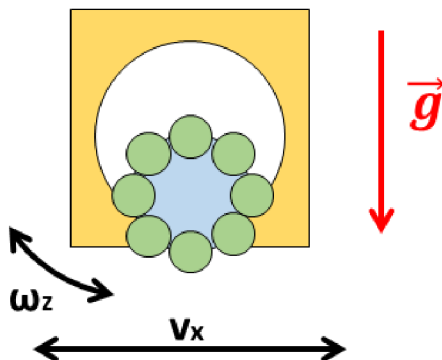
Elektromagnetické tlumení bylo v modelu prezentováno pomocí torzní pružiny s tuhostí  $10^{-4} \text{ Nm/rad}$  a s koeficientem tlumení  $b_e$ , závislým na vazebném koeficientu systému  $c_\Phi$  a na odporech  $R_L$  a  $R_C$ . Koeficient tlumení je dán vztahem (13). Torzní pružina je v síťovém modelu představována pomocí červené oboustranné šipky. Posledním parametrem, který bylo potřeba zadat do nastavení vlastností kontaktu byl součinitel tření v kontaktu valivé části a kavity. V simulaci bylo uvažováno pouze dynamické tření. Velikost tření mezi kavitou a valivým elementem bylo nastaveno o velikosti  $f_d = 0,1$ .

## 5.1. Simulace odezvy generátoru ve frekvenční oblasti

Potom co byl navrhnut harvester s teoretickou vlastní frekvencí 1,6 Hz bylo zapotřebí zjistit, zdali se tato frekvence bude shodovat s frekvencí experimentálně ověřenou, jelikož vypočtená vlastní frekvence platí při splnění podmínky dokonalého valení. Vlnění mořské hladiny má prakticky sinusový průběh a nastává pohyb ve vertikálním a



horizontálním směru a rotace ve směru kolmém na ně. Jelikož vertikální posuv nemá prakticky žádný vliv na posuv a valení pohyblivé části uvnitř mořské bóje, tak při hledání reálné vlastní frekvence není třeba tento pohyb simulovat. Proto probíhaly simulace pouze pro buzení rotací okolo osy  $z$  a translaci ve směru osy  $x$ . Ostatní pohyby budou mít zanedbatelný vliv na pohyb valivé části oproti simulovaným.



Obrázek 20: Nákres harvesteru se zaznačenými směry rychlostí buzení

První zvolenou budící veličinou byla translační rychlost kavity ve směru osy  $x$ , což znamená pohyb v horizontálním směru. Buzení probíhalo pomocí funkce definované rovnicí (19), kde frekvence  $f(t)$  lineárně zvětšuje svou velikost v závislosti na čase o 0,02 rad/s za sekundu z počáteční nulové hodnoty. Simulace byla provedena pro různé hodnoty amplitudy rychlostí  $v_a$  v rozmezí 0,1 ÷ 0,3 m/s.

$$v_x(t) = v_a \cdot \sin(2\pi \cdot f(t) \cdot t) \quad (19)$$

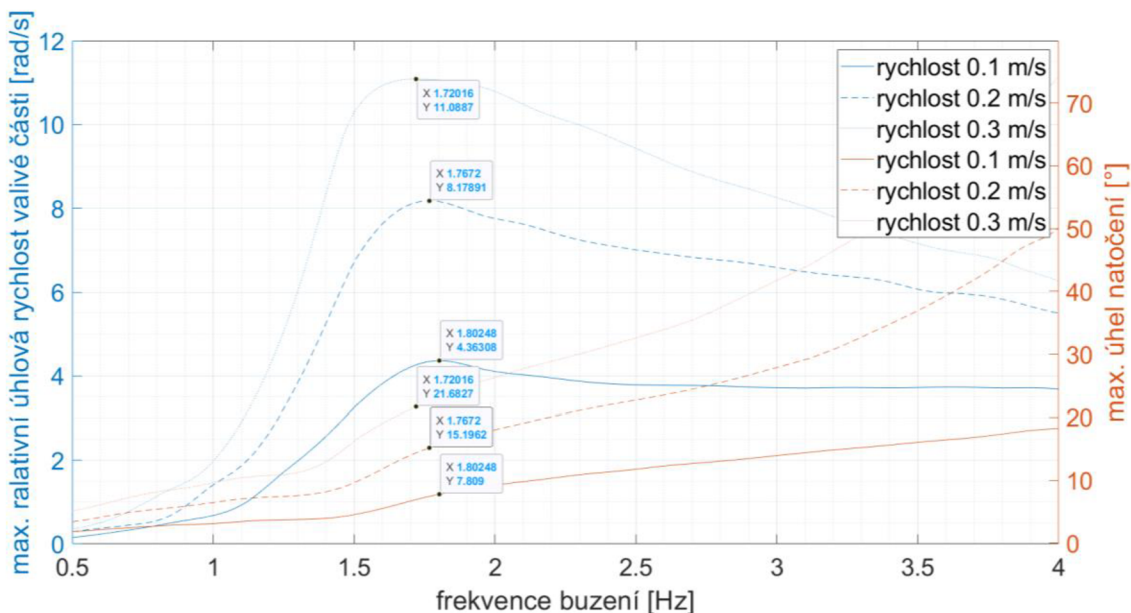
Další budící veličinou byla úhlová rychlost v ose  $z$ , kolmou na bok kavity procházející jejím středem. Buzení pohybu harvesteru bylo definováno rovnicí (20), kde frekvence buzení  $f(t)$  se opět z nulové hodnoty lineárně zvětšuje o 0,02 rad/s za sekundu až do hodnoty 10 rad/s. Amplituda buzení je v rozmezí 1 ÷ 5 rad/s.

$$\omega_z(t) = \omega_a \cdot \sin(2\pi \cdot f(t) \cdot t) \quad (20)$$

Pozorovanými veličinami, které byly sledovány na výstupu simulace, byla úhlová rychlost valivé části  $\omega_r$  a také úhel natočení  $\varphi_r$  středu valivé části vůči středu kavity oproti poloze, kdy je celá soustava v klidu a nepůsobí na ní žádné budící síly. Úhel natočení byl v modelu prezentován jako natočení prutu z náhradního kinematického mechanismu vůči své rovnovážné poloze. Výsledky simulací byly zpracovány v programu Matlab a pomocí funkce envelope byly proloženy křivkami vrcholy křivek průběhů úhlové rychlosti a natočení.

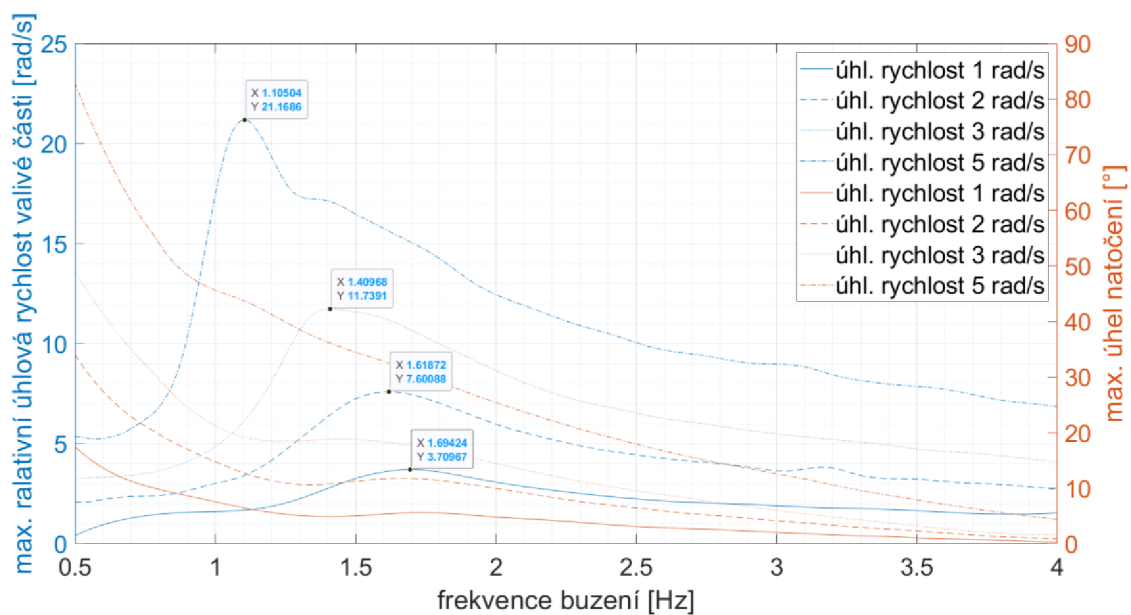
Výsledné chování valivé části pro translační pohyb bóje je znázorněno v grafu na obrázku 21. Z křivek závislosti lze pozorovat, že dochází k lehkému naklonění rezonančních vrcholů směrem k nižší frekvenci. Jedná se tedy o charakteristiku měknoucí (degresivní). Největších hodnot úhlové rychlosti  $\omega_r$  nabývá harvester při frekvenci 1,7 ÷ 1,8 Hz v závislosti na velikosti amplitudy budící rychlosti. K největším výchylkám  $\varphi_r$  dochází při frekvencích nad 4 Hz, při těchto frekvencích se však už jedná o silně

nelineární kmitání a na pohybu valivého elementu hraje velkou roly smýkání. Z tohoto důvodu už je úhlová rychlost podstatně menší, jelikož nedochází k odvalování uvnitř kavity. U křivky pro úhlovou rychlost při buzení rychlostí s amplitudou 0,3 m/s lze při vyšších frekvencích pozorovat nárůst křivky, který je způsoben chaotickým pohybem elementu uvnitř kavity, kde jsou vrcholy kmitů nepravidelné a méně časté v časovém průběhu pohybu.



Obrázek 21: Odezva na buzení translačním pohybem ve frekvenční oblasti 0 ÷ 10 Hz.

V grafu na obrázku 22 je vyneseny křivky závislosti amplitudy úhlové rychlosti a úhlu natočení na frekvenci buzení úhlovou rychlostí okolo osy z pro různé amplitudy budící rychlosti.



Obrázek 22: Odezva na buzení rotačním pohybem ve frekvenční oblasti 0 ÷ 10 Hz.

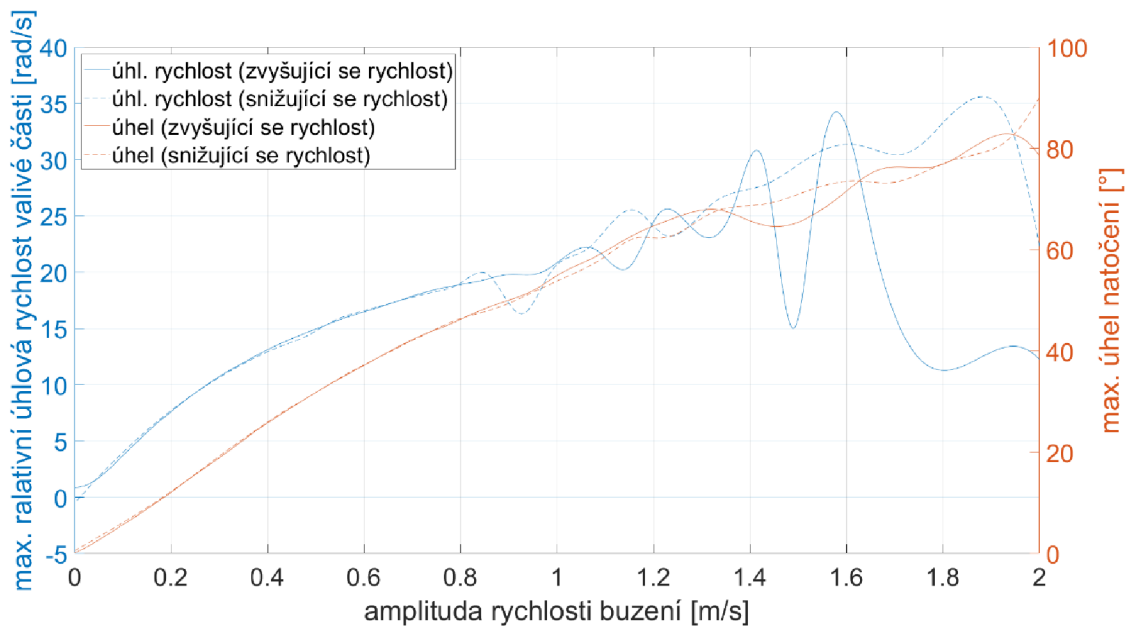
U této závislosti dochází k většímu naklonění rezonančních vrcholů směrem k nižší frekvenci a je patrnější, že se jedná o měknoucí křivku. K rezonanci úhlové rychlosti valivé části dochází pro různé budící rychlosti v rozmezí 1,1 ÷ 1,7 Hz. Křivky natočení nabývají pro malé frekvence velkých hodnot z důvodu toho, že úhel je měřen k bodu ležícímu na rámu s kavitou a samotný rám při malých frekvencích rotuje ve velkém rozsahu úhlu natočení. Rozsah se s zvyšující frekvencí snižuje a rám se pak už nevrátí do původní polohy a jeho úhel začne oscilovat okolo nové střední hodnoty. Tato hodnota je v grafu od výsledků simulace odečtena.

## 5.2. Analýza smýkání v závislosti na rychlosti buzení

Dalším důležitým parametrem charakterizující chování harvesteru je velikost amplitudy budícího pohybu, při kterém dochází k chaotickému pohybu uvnitř kavity. To znamená, že průběh relativní úhlové rychlosti valícího se elementu vůči kavitě už nemá průběh blízký se sinusovému průběhu. Tato hodnota byla hledána opět pro translační pohyb v horizontálním směru  $x$  a pro pohyb rotační okolo osy  $z$ . Testování probíhalo pomocí sinusového buzení s proměnlivou amplitudou v čase. Frekvence buzení měla konstantní hodnotu 1,6 Hz, což dle autorů článku [3] a [9] by měla být frekvence vlnění klidného moře. Rychlost harvesteru byla pro translační pohyb definována rovnicí (21).

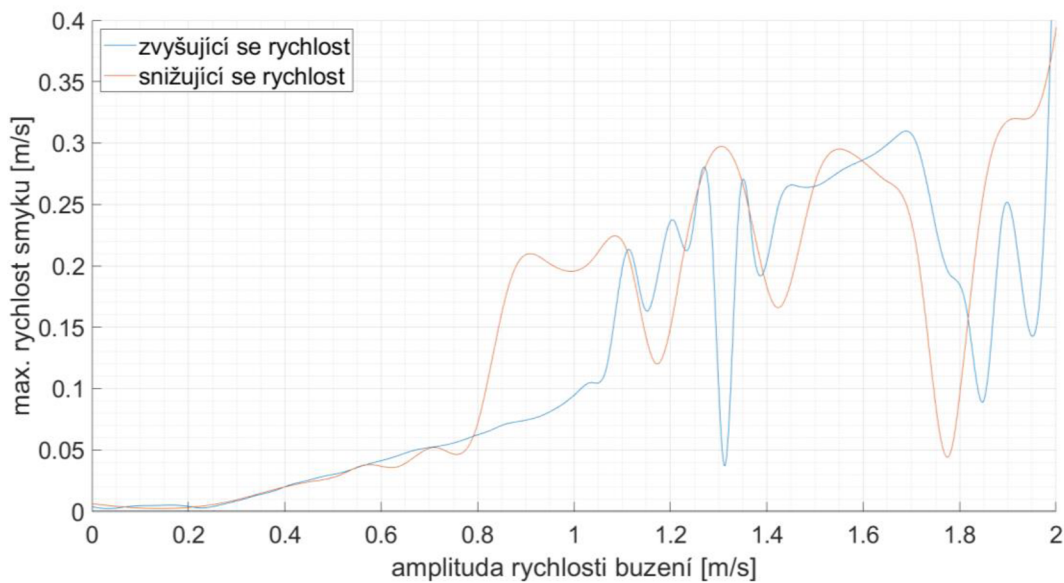
$$v_z(t) = v_a(t) \cdot \sin(2\pi \cdot 1,6 \cdot t) \quad (21)$$

Kde rychlost  $v_a(t)$  je amplituda budící rychlosti, která se v čase mění v poměru 0,01 m/s za sekundu simulace od nulové hodnoty až po hodnotu 2 m/s. Následně byla ještě otestována varianta se snižující se amplitudou o stejném kroku i rozsahu hodnot. Výsledný graf hodnot ze simulace je na obrázku 23.



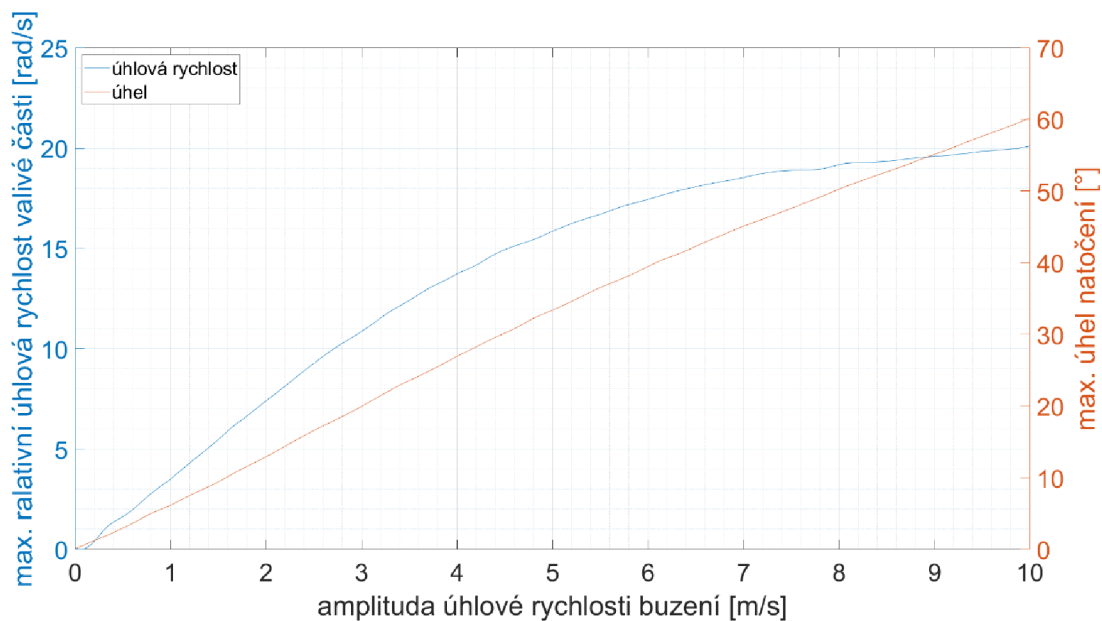
Obrázek 23: Velikosti úhlové rychlosti a natočení pro měnící se amplitudu rychlosti horizontálního buzení

Plnou čarou je znázorněna obálka maximálních hodnot pro relativní úhlovou rychlost valivého elementu a úhel natočení při zvyšující se rychlosti. Přerušovanou čarou jsou pak znázorněny hodnoty pro simulaci se snižující se rychlostí. Z grafu průběhu je patrné, že při snižující se rychlosti dojde k zániku valení dříve než při zvyšující se rychlosti, a to při amplitudě rychlosti okolo 0,8 m/s. Od této hodnoty už dochází k silným prokluzům valivého elementu uvnitř kavity a valivá část se začíná chaoticky pohybovat uvnitř rámu. Tuto skutečnost ověřuje i průběh maximální rychlosti, kterou se smývá váleček uvnitř kavity v závislosti na budící rychlosti. Graf této závislosti je na obrázku 24. Pro simulaci se snižující se amplitudou budící rychlosti nastává okolo hodnoty amplitudy rychlosti 0,8 m/s prudký nárůst maximální smykové rychlosti. Pro vyšší rychlosti už je průběh chaotický, což znamená, že dochází v některých chvílích k zániku kontaktu.



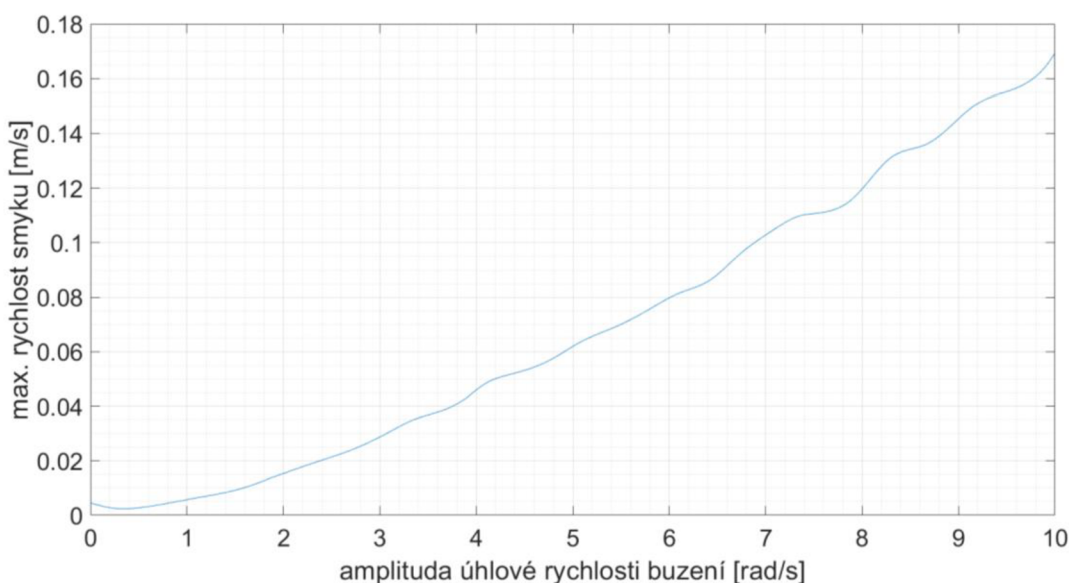
Obrázek 24: Velikost maximální smykové rychlosti v závislosti na měnící se rychlosti horizontálního buzení

Dále byla provedena simulace se vstupním buzením s obdobným průběhem jako je popsán v rovnici (21), akorát oproti amplitudě rychlosti  $v_a(t)$  byla amplituda úhlové rychlosti  $\omega_a(t)$  proměnlivá v závislosti na čase v poměru 0,05 rad/s za sekundu simulace v rozmezí od nulové hodnoty až po 10 rad/s. Průběhy úhlové rychlosti i úhlu natočení valivého elementu byly prakticky totožné, jak pro zvyšující se amplitudy budící úhlové rychlosti, tak i pro snižující se úhlovou rychlost. V grafu na obrázku 25 jsou tedy vyneseny pouze hodnoty průběhu pro zvyšující se rychlost. V tomto rozmezí amplitudy budící úhlové rychlosti docházelo stále k valení uvnitř kavity. Maximální úhel natočení má lineární průběh v závislosti na zvyšujícím se buzení, kdežto úhlová rychlost má závislost logaritmickou.



Obrázek 25: Velikost úhlové rychlosti a natočení pro měnící se amplitudu úhlové rychlosti buzení

Z grafu na obrázku 26 je patrné, že i pro závislost maximální smykové rychlosti na velikosti budící úhlové rychlosti platí, že nedochází k žádným chaotickým průběhům a tato závislost je exponenciální.



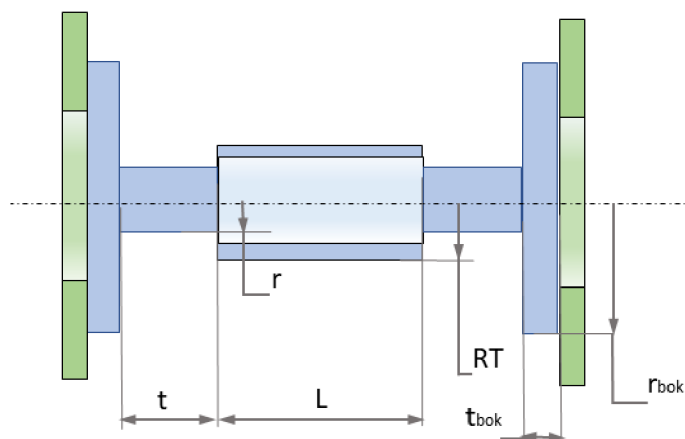
Obrázek 26: Velikost maximální smykové rychlosti v závislosti na měnící se úhlové rychlosti buzení harvesteru

### 5.3. Vliv rozměrových parametrů na elektrický výkon

Dalším faktorem, který má vliv na relativní úhlovou rychlost valivé části, a tedy i na generovaný výkon harvesteru, jsou jeho rozměrové parametry. Proto byly provedeny simulace s harvesterem, u kterého docházelo k měnění daných parametrů valivého



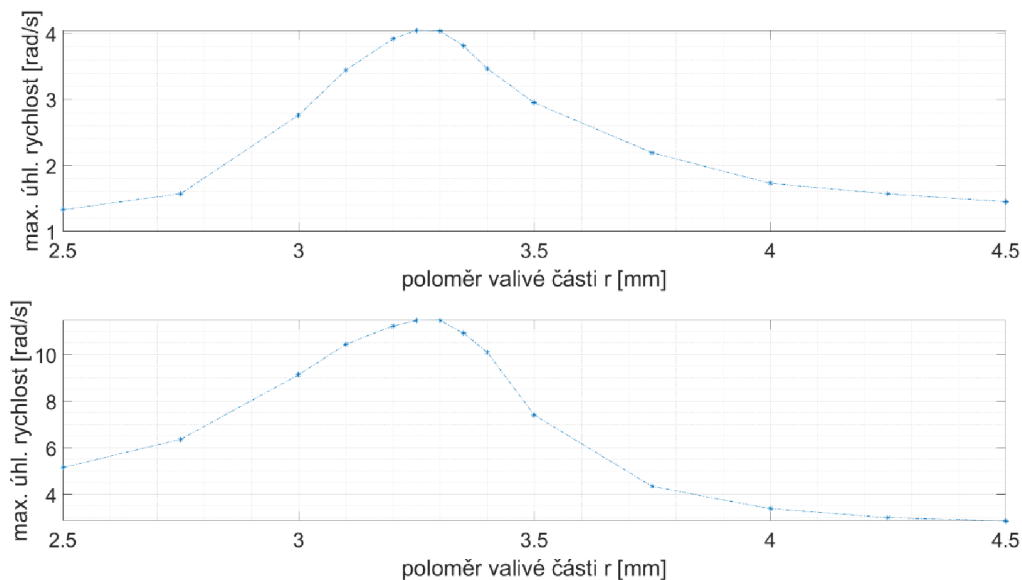
elementu. Jako první byla zvolena změna poloměru  $r$  části elementu, která se odvaluje uvnitř kavity.



Obrázek 27: Schéma valivého elementu

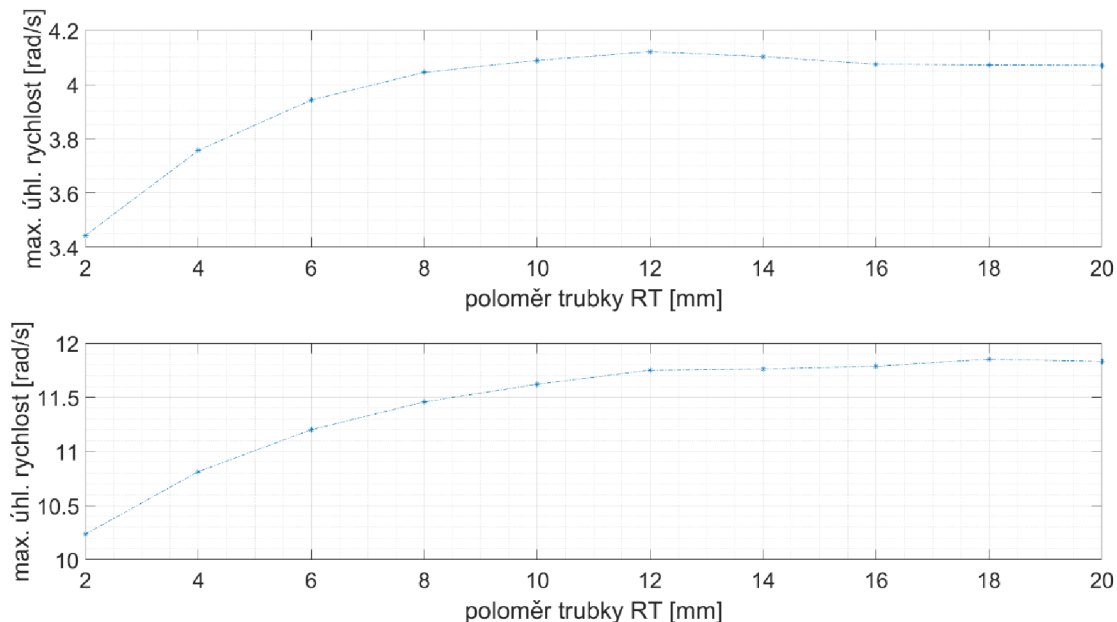
Pro změněný harvester byly dopočítány příslušné hodnoty hmotnosti a momentu setrvačnosti, které byly vloženy do parametrů modelu v MSC Adams. Simulace byla provedena pro poloměry v rozsahu od 2,5 mm do 4,5 mm. Soustava byla buzena pomocí rychlosti o sinusovém průběhu s frekvencí 1,6 Hz a o amplitudě 0,1 m/s pro translační pohyb v ose  $x$  a o amplitudě 3 rad/s pro rotační pohyb okolo osy  $z$ .

Do grafů na obrázku 28 byly vyneseny hodnoty amplitudy úhlové rychlosti valivé části v ustáleném stavu, kdy docházelo ke konstantnímu kmitání. V horním grafu jsou vyneseny hodnoty maximální amplitudy odezvy na buzení pomocí translačního pohybu pro jednotlivé hodnoty poloměru  $r$ . Ve spodním grafu jsou vyneseny hodnoty amplitudy pro buzení pohybem rotačním. Z hodnot vynesných do grafů je patrné, že neoptimálnější vlastnosti má konstrukce pro poloměr  $r = 3,25$  mm, což je rozměr, který byl zvolen v originálním návrhu.



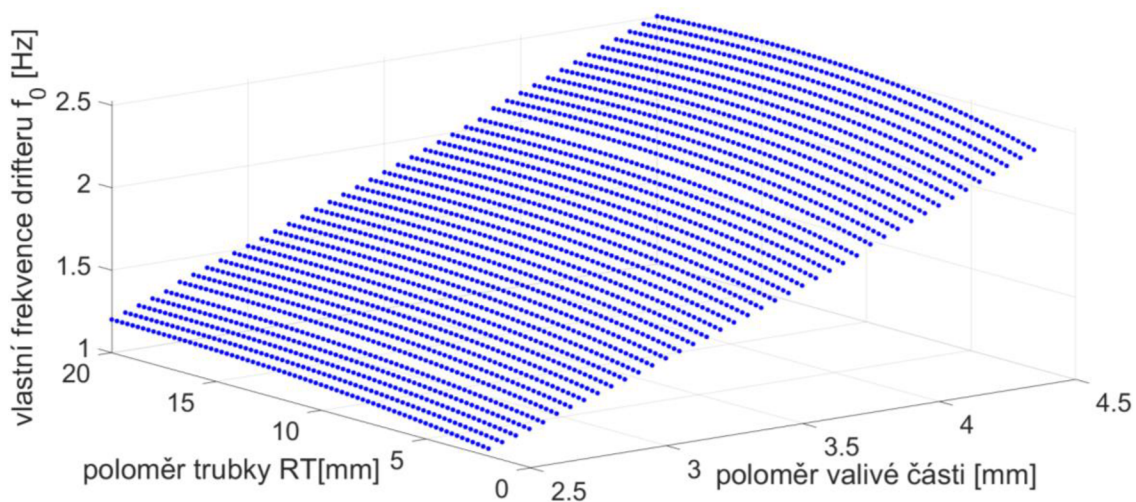
Obrázek 28: Závislost relativní maximální úhlové frekvence valivého elementu na jeho poloměru  $r$

Dalším rozměrem, který byl měněn v simulaci, byl vnější poloměr trubky  $RT$  spojující válečky odvalující se uvnitř kavit. Simulace byly provedeny pro poloměry v rozmezí od 2 mm do 20 mm. V grafech na obrázku 29 jsou vyneseny hodnoty amplitud relativní úhlové rychlosti v ustáleném stavu kmitání. Budící veličinou byla sinusová rychlost, stejná jako u simulací pro měnění se poloměr  $r$ . V horním grafu jsou hodnoty pro translační pohyb a v dolním pro pohyb rotační.



Obrázek 29: Závislost maximální úhlové frekvence valivého elementu na poloměru trubky RT

V grafu na obrázku 30 je jasně patrné, že na změnu vlastní frekvence harvesteru, a tedy i na relativní úhlovou rychlost valivého elementu má mnohem větší vliv změna poloměru valivé části  $r$  než změna poloměru spojující trubky  $RT$ . Což potvrzují i grafy na obrázcích 28 a 29, kdy byly měněny jednotlivé parametry zvlášť. Pro poloměr  $r$  byly rozdíly výraznější už při malé změně poloměru trubky.



Obrázek 30: Vliv poloměrů  $r$  a  $RT$  na teoretickou vlastní frekvenci harvesteru

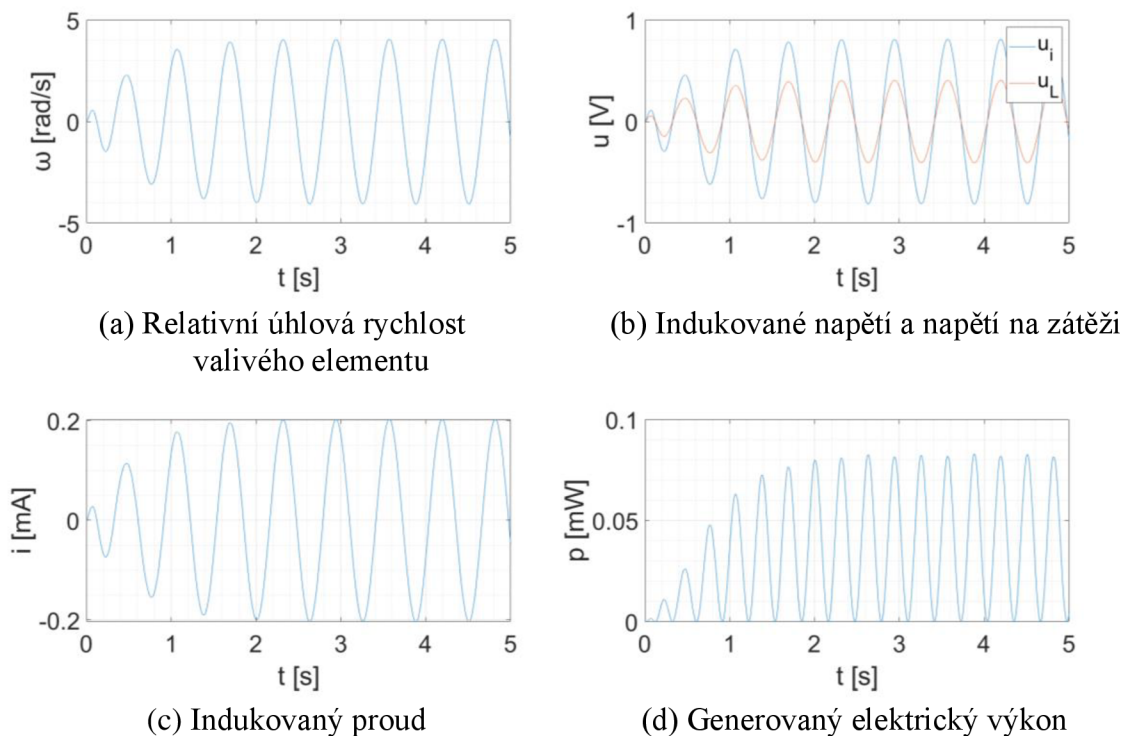
## 6. Chování na moři a predikce generovaného výkonu

Hlavním parametrem, který udává velikost generovaného výkonu pomocí harvesteru, kromě konstrukčních parametrů (konstanta  $c_\phi$ , odpor zátěže  $Z_L$ , ...), je relativní úhlová rychlost valivého elementu s magnety vůči rámu s kavitou, na kterém se nachází cívka. Velikost generovaného výkonu celým zařízením lze zjistit výpočtem z rovnic (9) - (12).

### 6.1. Sinusové buzení

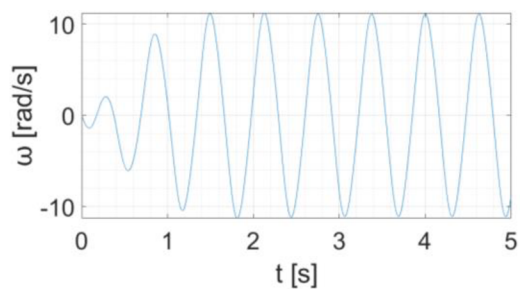
Jelikož má pohyb mořských vln prakticky sinusový průběh, byl nejdříve harvester testován pro konstantní sinusové buzení o frekvenci 1,6 Hz. Simulace byla provedena pro každý směr pohybu zvlášť, konkrétně pro posuvný pohyb ve směru  $x$ , tedy v horizontálním směru a pro rotaci okolo osy  $z$ . Ještě by připadal v úvahu posuvný pohyb v horizontálním směru, ale tento pohyb nemá prakticky žádný vliv na pohyb valivého elementu, proto pro tento pohyb nebyla simulace provedena.

Budící veličinou byla zvolena rychlost rámu zařízení o frekvenci rovné vypočtené teoretické vlastní frekvenci harvesteru. Pro posuvný pohyb byla zvolena amplituda 0,1 m/s a pro pohyb rotační amplituda o velikosti 3 rad/s. Na obrázcích 31 a 32 jsou znázorněny výsledné průběhy veličin z rovnic (9) až (12) pro sinusové buzení s konstantní amplitudou.

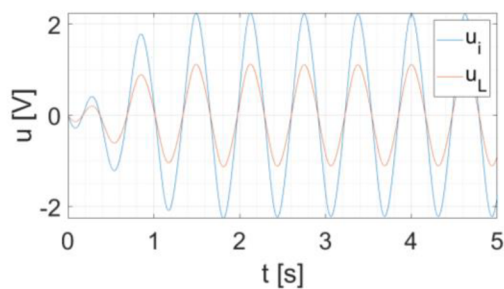


Obrázek 31: Průběhy veličin pro sinusové buzení translací ve směru osy  $x$

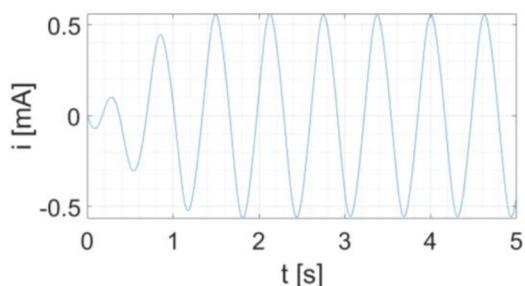




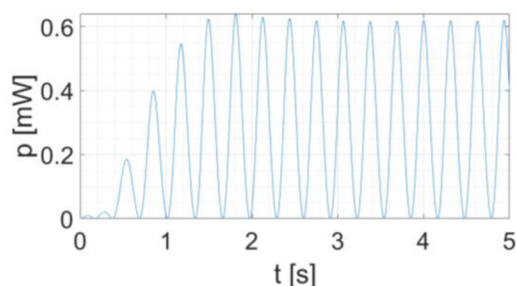
(a) Relativní úhlová rychlost valivého elementu



(b) Indukované napětí a napětí na zátěži



(c) Indukovaný proud

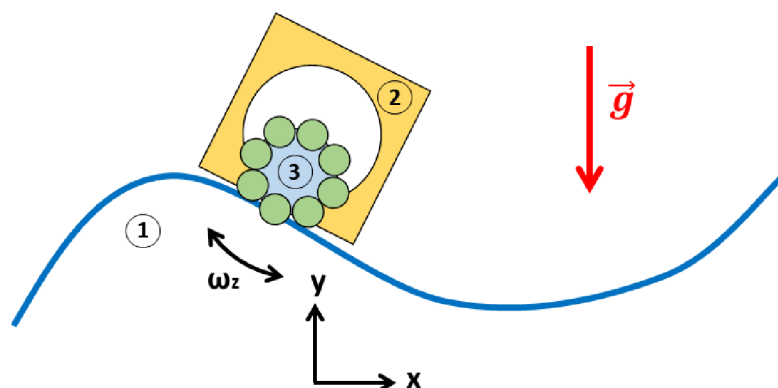


(d) Generovaný elektrický výkon

Obrázek 32: Průběhy veličin pro sinusové buzení rotací okolo osy z

## 6.2. Buzení mořem

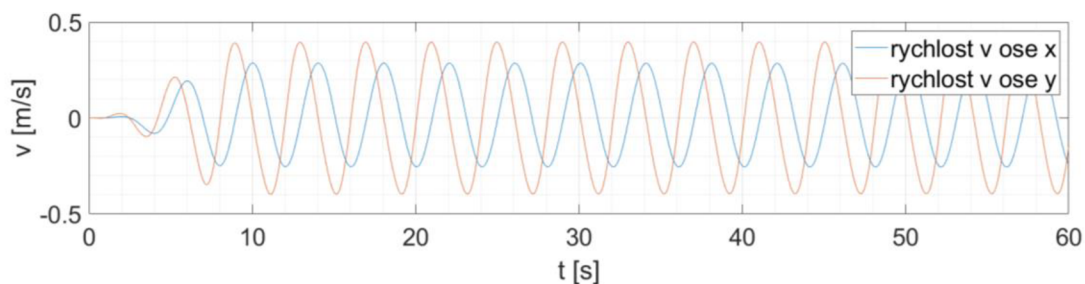
Simulace pohybu harvesteru umístěného uvnitř bóje plovoucí na mořské hladině bylo provedeno s pomocí dat naměřených na reálném moři. Data byla publikována autory článku [14]. Buzení od mořských vln se skládá z translace ve všech třech osách a rotace okolo nich. Pro buzení harvesteru byly použity pouze translační rychlosti ve směru osy  $x$  a  $y$  a úhlová rychlost okolo osy  $z$ , jelikož v ostatních směrech je pohyb valivé části z důvodu konání obecného rovinného pohybu nemožný, lze pohyby v těchto směrech zanedbat, jelikož nemají vliv na celkový výkon harvesteru.



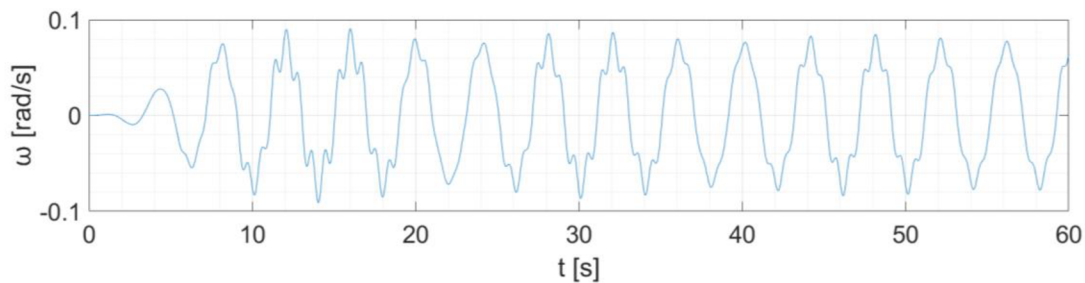
Obrázek 33: Nákres harvesteru na mořské hladině, (1) – mořská hladina, (2) – rám harvesteru, (3) – valivý element

### 6.2.1. Klidné moře

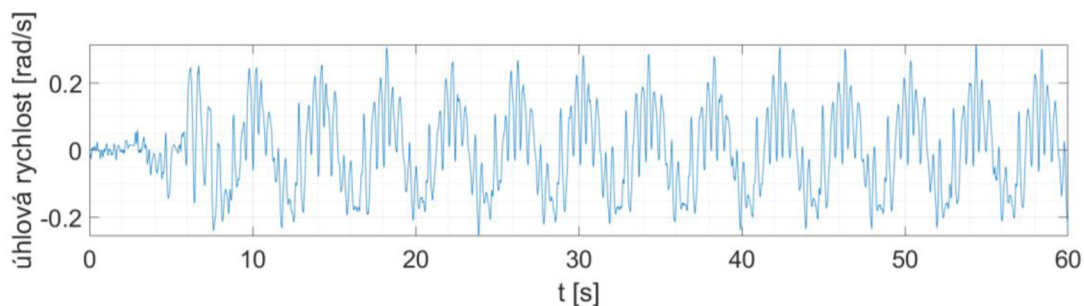
První testovací data, na kterých byl harvester otestován, byla data nazvaná jako „regular sea“ [14]. Tato data pro budící pohyb ve všech směrech a rotaci okolo všech os, prezentují data chování bóje na klidném moři s frekvencí přibližně 1,6 Hz. Pro samotnou simulaci byly vybrány pouze translační rychlosti ve směru osy  $x$  a  $y$  a úhlová rychlost okolo osy  $z$ , jelikož ostatní pohyby by neměly vliv na chování harvesteru. V grafu na obrázku 34 je vynesena průběh translačních rychlostí bóje na klidném moři a v grafu na obrázku 35 je vynesena průběh její úhlové rychlosti okolo osy  $z$ . Na obrázcích 36 - 38 jsou vyneseny hodnoty charakteristických veličin chování harvesteru. V grafu na obrázku 38 je kromě elektrického výkonu znázorněna i energie získaná z buzení mořem pomocí harvesteru. V grafu je vykreslen součet generované energie do konkrétního času od začátku simulace.



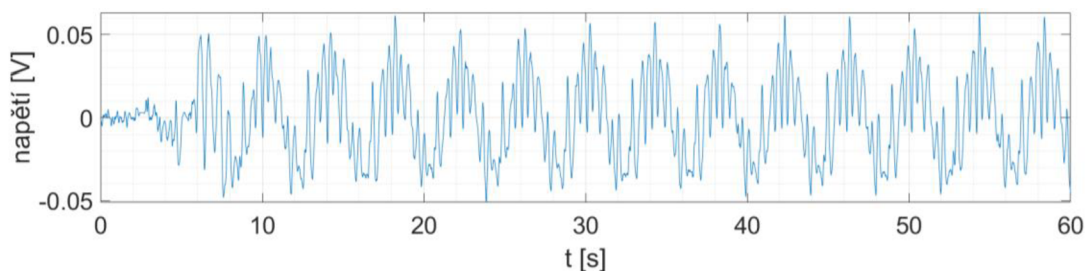
Obrázek 34: Translační rychlosti pohybu bóje na klidném moři



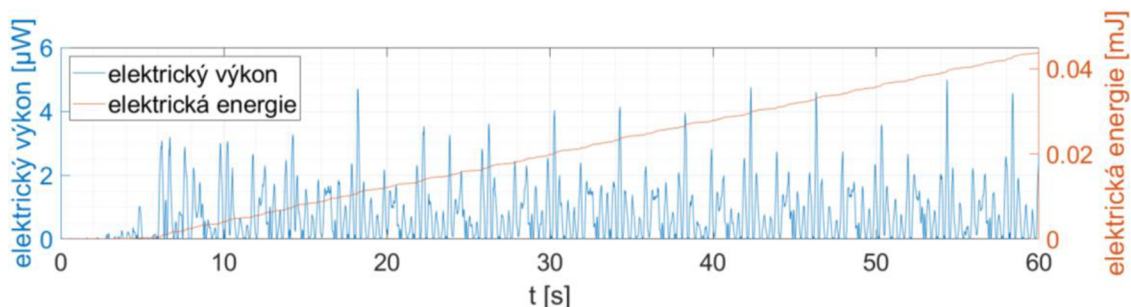
Obrázek 35: Úhlová rychlost pohybu bóje na klidném moři



Obrázek 36: Relativní úhlová rychlosti valivého elementu pro klidné moře



Obrázek 37: Napětí na zátěži pro klidné moře

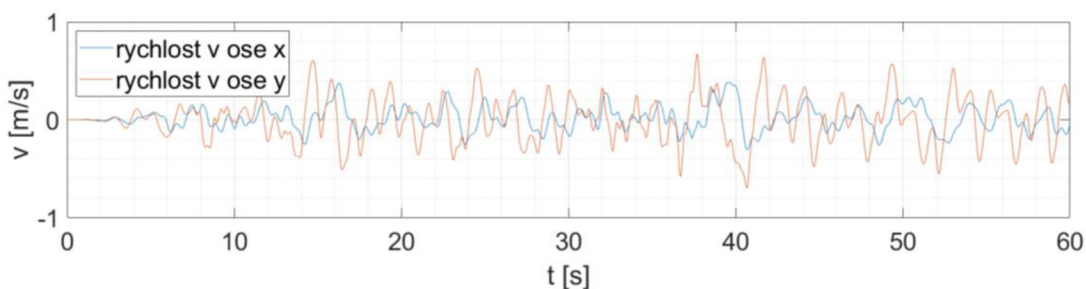


Obrázek 38: Elektrický výkon a energie pro klidné moře

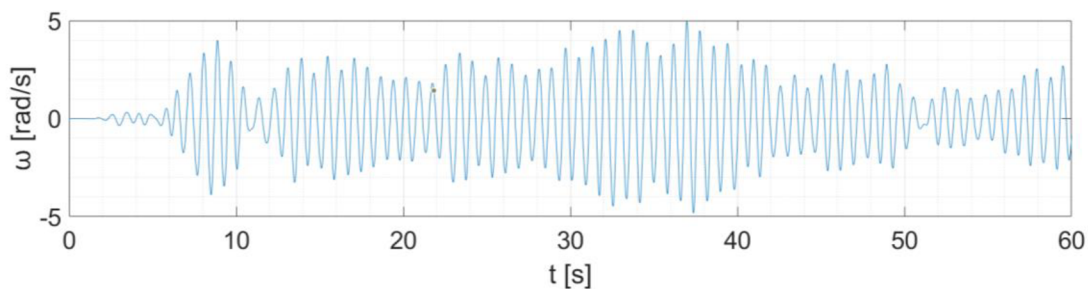
Úhlová rychlost pro klidné moře dosahovala ve svých maximech hodnot okolo 0,3 rad/s, maximální napětí na zátěži byly 40 mV a během minutové simulace došlo pomocí energy harvesteru k získání 44  $\mu\text{J}$  elektrické energie.

### 6.2.2. Neklidné moře

Druhými testovacími daty byl soubor hodnot nazvaný „irregular sea“ [14], což jsou data charakterizující pohyb bóje na neklidné mořské hladině. Opět byly použity translační rychlosti ve směru os  $x$  a  $y$  a rotace okolo  $z$ . Při buzení pohybu těmito daty nebyla amplituda ani frekvence pohybu pravidelná. Do grafů na obrázcích 39 a 40 jsou vyneseny průběhy rychlostí pohybu bóje.

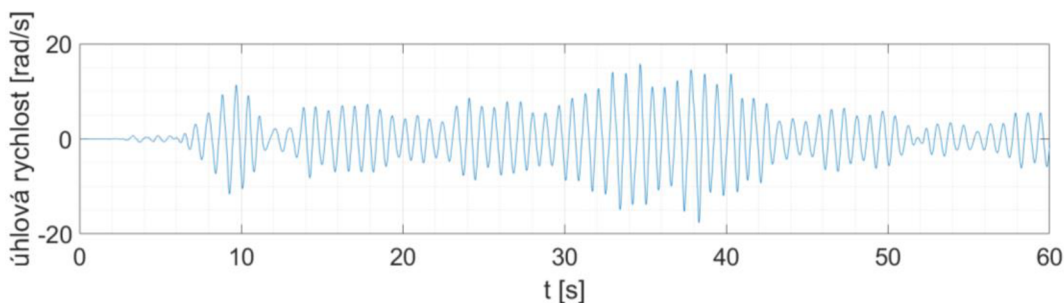


Obrázek 39: Translační rychlosti pohybu bóje na neklidném moři

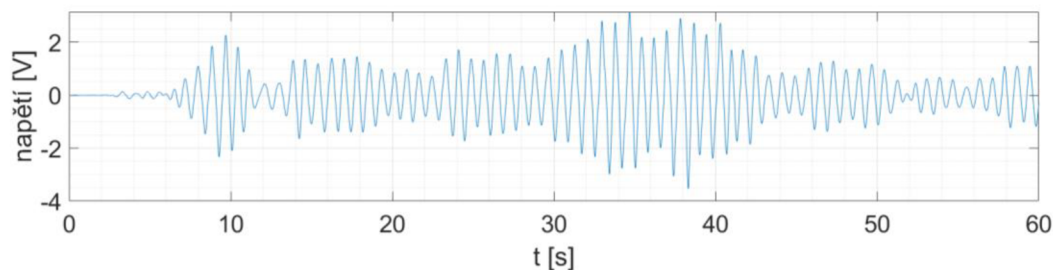


Obrázek 40: Úhlová rychlost pohybu bóje na neklidném moři

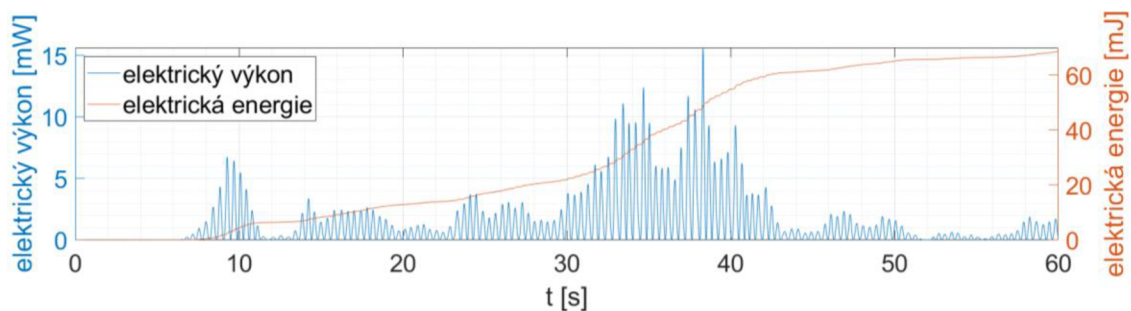
V grafech na obrázcích 41 - 43 jsou vyneseny hodnoty charakteristické veličiny chování harvesteru popisující průběhy relativní úhlové rychlosti valivého elementu, napětí na zátěži, elektrickému výkonu a elektrické energie získané během jedné minuty pohybu bóje na neklidném moři.



Obrázek 41: Relativní úhlová rychlost valivého elementu pro neklidné moře



Obrázek 42: Napětí na zátěži pro neklidné moře



Obrázek 43: Elektrický výkon a energie pro neklidné moře

Úhlová rychlost pro neklidné moře dosahovala ve svých maximech hodnot okolo 15 rad/s, maximální napětí na zátěži bylo 3 V a během minutové simulace došlo pomocí energy harvesteru k získání 69 mJ elektrické energie. Z hlediska získané energie harvester na neklidném moři vyprodukoval více jak 1000krát více energie oproti harvesteru na klidném moři, což je nejvíce způsobeno velikostí úhlové budící rychlosti, která nabývá ve svých maximech hodnot okolo 5 rad/s oproti necelým 0,1 rad/s pro buzení klidným mořem.

## 7. Vliv relativního pohybu energy harvesteru na dynamiku bóje

Velikost kontaktní síly mezi rámem a valivým elementem byla v čase proměnná v závislosti na chování odezvy harvesteru. Průměrná hodnota kontaktní síly pro každou z kavit při pohybu bóje na klidném, tak i na neklidném moři byla stejná a to 0,19 N. V některých chvílích docházelo ke špičkovým hodnotám o velikosti síly 1,34 N pro klidné moře a 1,21 N pro neklidné moře. Hodnoty průměrných a špičkových kontaktních sil pro jednotlivé druhy buzení jsou uvedeny v tabulce 3. Při uvážení špičkových hodnot by velikost síly působící na bóji z důvodu relativního pohybu valivého elementu uvnitř kavit v maximech dosahovala hodnoty 2,68 N. Z toho lze usuzovat, že pohyb energy harvesteru nemá prakticky žádný vliv na chování bóje na moři a nebude tedy ovlivňovat její dynamiku.

Tabulka 3: Hodnoty kontaktních sil v kontaktu valivého elementu s kavitou

Typ buzení	Průměrná kontaktní síla [N]	Špičková amplituda síly [N]
Klidné moře	0,19	1,34
Neklidné moře	0,19	1,21

## 8. Závěr

V této práci se podařilo vyvinout zdroj elektrické energie pro mořskou bóji, který získává elektrickou energii přeměnou kinetické energie mořských vln na elektrickou energii pomocí elektromagnetické indukce. Na základě návrhu byl vytvořen simulační model v prostředí MSC Adams z důvodu komplexnosti problému tlumení. Na modelu byly provedeny simulace pro zjištění odezvy na buzení mořskými vlnami.

Prvním bodem práce byla rešerše dosud použitých konstrukcí energy harvestingu zdrojů energie v mořských bójích a jiných tělesech plovoucích na mořské hladině. Z ní je patrné, že již existuje mnoho zařízení, která slouží k získávání elektrické energie z kinetické energie mořských vln. Tato zařízení pracují na různých principech. S vysokým zájmem o ekologii a stav moří a oceánů, se začal zvyšovat zájem o přístroje pro hlídání a sledování jejich biologické rozmanitosti a také pro předvídaní jejich dalšího vývoje. Z tohoto důvodu je potřeba získávat širokou škálu dat z nejrůznějších senzorů a tyto data co nejdříve sdílet a vyhodnocovat. Většina z uvedených aplikací neslouží k získávání energie v malém množství pro jiná zařízení, ale spíše jako zdroje energie pro elektrickou síť. Proto má význam se zabývat vývojem alternativních zdrojů energie pro drobné aplikace v mořských bójích.

Další body práce se zaměřovaly právě na vývoj konstrukce energy harvesteru na principu elektromechanického rezonátoru. Jednalo se o inovaci harvesteru, který byl navržen na VUT pro získávání energie z lidského pohybu a jeho modifikace pro použití právě v mořské bóji. Nejdříve byly navrženy rozměrové parametry harvesteru tak, aby celkové rozměry soustavy byly co nejmenší, včetně hmotnosti.

V dalším bodě byl vytvořen model konstrukce o zvolených rozměrech v simulačním programu pro dynamické soustavy MSC Adams. Nejdříve byly provedeny simulace, kde pomocí měnicích se budících parametrů byly sledovány změny chování rezonátoru. Na základě změny frekvence buzení byla vytvořena amplitudo-frekvenční charakteristika. Dále byla pozorována závislost odezvy rezonátoru na velikosti budící rychlosti.

Následně byla provedena simulace chování harvesteru buzeného pohybem mořských vln. Vstupem do simulací byla data naměřená na skutečném moři. Z této simulace bylo určeno množství získané elektrické energie přeměnou z kinetické energie mořských vln. Z hodnot generovaného výkonu pro bóji na neklidném moři je vidět, že získaná elektrická energie by postačovala na napájení drobné senzorky. Na závěr ještě bylo ověřeno, že relativní pohyb volného tělesa uvnitř bóje bude mít zanedbatelný vliv na její výslednou dynamiku. Tato skutečnost byla zjištěna pomocí průběhu velikosti kontaktní síly mezi valivým elementem a kavitou.

Výstupem práce je tedy simulační model elektromechanického harvesteru uvnitř mořské bóje, který je možné využít pro simulaci odezvy rezonátoru na budící síly. Správnost teoretického návrhu harvesteru byla ověřena pomocí simulačního modelu, kde budícími veličinami byly převzaté hodnoty rychlosti skutečné bóje pohybující se na mořské hladině. Harvester během simulace pohybu na hladině klidného moře vyprodukoval za minutu 44  $\mu\text{J}$  elektrické energie a během stejně dlouhé simulace pro neklidné moře 69 mJ. Z výsledků je tedy patrné, že během fungování na neklidném moři

dochází k mnohonásobně většímu zisku vygenerované elektrické energie než na klidném moři. Tato konstrukce má svou výhodu, že je jak rozměrově, tak i hmotnostně malá a lze ji využít pro aplikace v malých bójích. Relativní pohyb harvesteru uvnitř bóje má zanedbatelný vliv na výslednou dynamiku bóje, a tedy nedochází k ovlivňování jejího pohybu.

Vzhledem k tomu, že celá elektrická část harvesteru byla převzata z jiného návrhu, bylo by v dalším vývoji zapotřebí upravit i tuto část. Pozměnit elektrický obvod a také pozměnit konstrukci tak, aby došlo ke zvýšení vazebného koeficientu soustavy  $c_\phi$  z důvodu větší efektivity přeměny kinetické energie mořských vln na elektrickou energii. Dalším parametrem, který by mohl zvýšit efektivitu energetické přeměny je odpor zátěže. Pro takto upravenou konstrukci by byl následně vytvořen simulační model a v případě dobrých výsledků chování odezvy na buzení by mohla být provedena fyzická výroba zařízení a test na reálném moři pro ověření skutečného chování a generovaného elektrického výkonu.



## Literatura

- [1] ALIZZIO, Damiano, Marco BONFANTI, Nicola DONATO, Carla FARACI, Giovanni Maria GRASSO, Fabio Lo SAVIO, Roberto MONTANINI a Antonino QUATTROCCHI. Design and performance evaluation of a “fixed-point” spar buoy equipped with a piezoelectric energy harvesting unit for floating near-shore applications. *Sensors (Basel, Switzerland)* [online]. Switzerland: MDPI AG, 2021, **21**(5), 1-18 [cit. 2022-02-17]. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s21051912
- [2] WU, Nan, Quan WANG a Xiangdong XIE. Ocean wave energy harvesting with a piezoelectric coupled buoy structure. *Applied ocean research* [online]. OXFORD: Elsevier Ltd, 2015, **50**, 110-118 [cit. 2022-02-17]. ISSN 0141-1187. Dostupné z: doi:10.1016/j.apor.2015.01.004
- [3] CARANDELL, Matias, Daniel Mihai TOMA, Montserrat CARBONELL, Joaquin DEL RIO a Manel GASULLA. Design and Testing of a Kinetic Energy Harvester Embedded Into an Oceanic Drifter. *IEEE sensors journal* [online]. IEEE, 2020, **20**(23), 13930-13939 [cit. 2022-02-17]. ISSN 1530-437X. Dostupné z: doi:10.1109/JSEN.2020.2976517
- [4] LIN, Zheng a Yongliang ZHANG. Dynamics of a mechanical frequency up-converted device for wave energy harvesting. *Journal of sound and vibration* [online]. LONDON: Elsevier Ltd, 2016, **367**, 170-184 [cit. 2022-02-17]. ISSN 0022-460X. Dostupné z: doi:10.1016/j.jsv.2015.12.048
- [5] 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. 2022-02-17]. ISBN 1467301604.
- [6] DANANG WIJAYA, Fransisco a Budi AZHARI. Analytical design and optimization of flat-quasi linear generator for sea wave power plant in South Java Ocean. *2016 8th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE)* [online]. IEEE, 2016, 1-6 [cit. 2022-02-22]. ISBN 978-1-5090-4139-8. Dostupné z: doi:10.1109/ICITEED.2016.7863276
- [7] BASTIEN, S.P, R.B SEPE, A.R GRILLI, S.T GRILLI a M.L SPAULDING. Ocean wave energy harvesting buoy for sensors. In: *2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition* [online]. IEEE, 2009, s. 3718-3725 [cit. 2022-02-22]. ISSN 2329-3721. Dostupné z: doi:10.1109/ECCE.2009.5316189
- [8] JOE, Hangil, Hyunwoo ROH, Hyeonwoo CHO a Son-cheol YU. Development of a flap-type mooring-less wave energy harvesting system for sensor buoy. *Energy (Oxford)* [online]. Oxford: Elsevier Ltd, 2017, **133**, 851-863 [cit. 2022-02-22]. ISSN 0360-5442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2017.05.143
- [9] CARANDELL, Matias, Daniel Mihai TOMA, Manel GASULLA a Joaquin del RIO. Experimental Validation of a Kinetic Energy Harvester Device for Oceanic Drifter Applications. *OCEANS 2019 - Marseille* [online]. IEEE, 2019, 1-7 [cit. 2022-02-22]. ISBN 978-1-7281-1450-7. Dostupné z: doi:10.1109/OCEANSE.2019.8867143

- [10] PZT material. In: *Zibo Yuhai Electronic Ceramic Co., Ltd.* [online]. [cit. 2022-02-22]. Dostupné z: <http://www.yuhaipiezo.com/intro/PZT-material-11.html>
- [11] NABAVI, Seyedeh Fatemeh, Anooshiravan FARSHIDIANFAR a Aref AFSHARFARD. Novel piezoelectric-based ocean wave energy harvesting from offshore buoys. *Applied ocean research* [online]. OXFORD: Elsevier Ltd, 2018, **76**, 174-183 [cit. 2022-02-22]. ISSN 0141-1187. Dostupné z: doi:10.1016/j.apor.2018.05.005
- [12] 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]. LONDON: Elsevier Ltd, 2019, **125**, 215-228 [cit. 2022-03-12]. ISSN 0888-3270. Dostupné z: doi:10.1016/j.ymsp.2018.05.062
- [13] 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.
- [14] CARANDELL, Matias, Daniel Mihai TOMA, J.P. PINTO, Manel GASULLA a Joaquin DEL RIO. Impact on the Wave Parameters Estimation of a Kinetic Energy Harvester Embedded into a Drifter. *Global Oceans 2020: Singapore – U.S. Gulf Coast* [online]. IEEE, 2020, 1-6 [cit. 2022-04-16]. ISBN 978-1-7281-5446-6. Dostupné z: doi:10.1109/IEEECONF38699.2020.9389127
- [15] BREPTA, Rudolf, Ladislav PŮST a František TUREK. *Mechanické kmitání*. 1. vyd. Praha: Sobotáles, 1994, 589 s. : il. ISBN 80-901684-8-5.

## Seznam příloh

### Elektronické přílohy:

- **MODEL\_boje\_RegularSea**  
Simulační model elektromechanického energy harvesteru pro aplikaci v mořské bójí buzené daty pohybu vln klidného moře
- **MODEL\_boje\_IrregularSea**  
Simulační model elektromechanického energy harvesteru pro aplikaci v mořské bójí buzené daty pohybu vln neklidného moře