



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ENERGETICKÝ ÚSTAV**

ENERGY INSTITUTE

**VLIV PROSTŘEDÍ NA DYNAMICKÉ VLASTNOSTI  
JEDNODUCHÝCH SOUČÁSTÍ**

EFFECT OF THE ENVIRONMENT ON THE DYNAMIC PROPERTIES OF SIMPLE PARTS

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Soňa Nováková

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

doc. Ing. Vladimír Habán, Ph.D.

BRNO 2020



# Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav  
Studentka: **Soňa Nováková**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Vladimír Habán, Ph.D.**  
Akademický rok: 2019/20

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:

## Vliv prostředí na dynamické vlastnosti jednoduchých součástí

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Součásti ponořené do kapaliny mění své dynamické vlastnosti. Vliv stojící kapaliny lze většinou popsat přidavnou hmotností a přidavným tlumením. Úkolem bakalářské práce bude experimentální prokázání tohoto jevu na jednoduché součásti. Z provedených experimentů budou stanoveny vhodné závislosti přidavných účinků tekutiny. Experimenty budou prováděny na vzduchu i na součástech ponořených v kapalině. V práci bude provedena i modální analýza pomocí komerčního softwaru „ANSYS“ v modulu „MODAL“.

### Cíle bakalářské práce:

Experimentální stanovení vlastní frekvence pro zvolené součásti pro případ na vzduchu a součásti ponořené ve vodě.

Stanovení vlivu ponoření na vlastní frekvence.

Výpočetní stanovení vlastní frekvence a porovnání s experimentem.

### Seznam doporučené literatury:

JULIŠ, K., BREPTA, R.: Mechanika II. díl - Dynamika; Technický průvodce, SNTL Praha, 1987.

GREŠAKOVÁ, K.: Experimentální stanovení vlivu kapaliny na kmitající těleso. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 81 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Vladimír Habán, Ph.D.

ČERNÝ, T.: Ověření vlivu geometrie na dynamické vlastnosti ponořeného tělesa. Brno, 2019. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Vladimír Habán.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.  
ředitel ústavu

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

## **ABSTRAKT**

Vplyvom prostredia sa menia dynamické vlastnosti telesa. Táto práca sa zapodieva experimentálnym preukázaním tohto javu. Cieľom je určenie vlastných frekvencií voľne visiaceho telesa budeného rázom na vzduchu a vo vode a ich vzájomné porovnanie. Skúmané teleso je rúra, ktorá bola v rámci experimentu skracovaná. V práci je tiež pozorovaný vplyv zmeny geometrie na vlastné frekvencie a vlastné tvary telesa. Výsledky experimentálnej modálnej analýzy sú porovnané s výpočtom vykonaným v softvéri ANSYS.

## **Kľúčové slová**

modálna analýza, vlastná frekvencia, vlastný tvar, škrupinový tvar

## **ABSTRACT**

The dynamic characteristics of the object are influenced by the changes of the environment. The objective of this report is to examine how the changes of the environment influence the dynamic characteristics of the object. The main aim is to compare the natural frequencies of the object when suspended and then actuated when being surrounded by air and submerged in water. The object in question is a cylindrical pipe, which was gradually shortened during the experiment. These changes in size also affected the natural frequencies and the mode shape, which is discussed as well. The results of the experimental modal analysis are compared to calculations run in ANSYS software.

## **Keywords**

modal analysis, natural frequency, mode shape, circumferential mode

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA**

NOVÁKOVÁ, Soňa. *Vliv prostředí na dynamické vlastnosti jednoduchých součástí*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/121652>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Vladimír Habán.

## PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som bakalársku prácu na tému *Vliv prostředí na dynamické vlastnosti jednoduchých součástí* vypracovala samostatne s použitím odbornej literatúry a prameňov, uvedených v zozname, ktorý tvorí prílohu tejto práce.

26.6.2020

---

Datum

---

Soňa Nováková

## **POĎAKOVANIE**

Ďakujem týmto doc. Ing. Vladimíru Habánovi PhD. za cenné pripomienky a rady, ktoré mi poskytol pri vypracovaní záverečnej práce. Ďalej by som chcela poďakovať mojej rodine a priateľovi za podporu a starostlivosť počas celej doby štúdia.



## OBSAH

ÚVOD.....	11
1 Vplyv kvapaliny na kmitajúce teleso.....	12
2 Numerická modálna analýza .....	13
2.1 Model.....	13
2.2 Vlastné frekvencie a vlastné tvary .....	14
2.3 Vplyv dĺžky rúry na hodnoty vlastných frekvencií.....	18
2.4 Vplyv hrúbky steny rúry na hodnoty vlastných frekvencií.....	19
3 Experimentálna modálna analýza.....	20
3.1 Geometria.....	20
3.2 Uloženie telesa a prostredie .....	20
3.3 Budenie .....	21
3.4 Záznam.....	21
3.5 Spracovanie dát.....	23
4 Vyhodnotenie .....	25
4.1 Porovnanie numerickej a experimentálnej modálnej analýzy .....	25
4.1.1 Premennivá hrúbka steny rúrky .....	25
4.1.2 Premennivá dĺžka telesa.....	26
4.2 Odhad vlastných tvarov vo vode.....	28
4.3 Vplyv zmeny prostredia na hodnoty vlastnej frekvencie.....	29
ZÁVER.....	32
ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV .....	33
ZOZNAM OBRÁZKOV .....	34
ZOZNAM TABULIEK .....	35



## ÚVOD

Vlastná frekvencia je vlastnosť určená návrhom telesa. Modálna analýza používa možnosť rozkladu zložitého kmitavého procesu na čiastkové príspevky. Každý príspevok je charakterizovaný vlastnou frekvenciou a vlastným tvarom kmitu [1]. Znalosť hodnoty vlastnej frekvencie navrhovanej súčiastky je dôležitá pre bezpečný návrh systému. V prípade zhody budiacej a vlastnej frekvencie dochádza k nárastu amplitúdy (rezonancia) a tým k zníženiu životnosti a spoľahlivosti konštrukcie. Určenie vlastnej frekvencie telesa ponoreného v kvapaline je zložitejšie kvôli prídavným účinkom kvapaliny.

Rúry sú hojne používané súčiastky v mnohých odvetviach. Bývajú využívané napríklad na ochranu nejakého predmetu pred okolím alebo na prepravu média pričom sa môžu nachádzať aj v inom prostredí než je vzduch. Skúmaným telesom v tejto práci je oceľová tenkostenná rúra. Tá je postupne skracovaná.

Pomocou softvéru ANSYS sú numericky určené vlastné frekvencie a vlastné tvary pre rôzne modifikácie geometrie. Porovnávané sú vlastné frekvencie a tvary pre rôzne dĺžky a hrúbky steny rúry. Táto práca sa zapodieva experimentálnym stanovením vlastných frekvencií telesa kmitajúceho na vzduchu a vo vode. Pozorované teleso je voľne zavesené a budené rázom. Porovnávané sú vlastné frekvencie stanovené numericky a experimentálne pre prípad na vzduchu. Porovnané sú tiež vlastné frekvencie telesa na vzduchu a vo vode. Vyšetrované sú tri ohybové a prvý škrupinový tvar kmitu.

## 1 Vplyv kvapaliny na kmitajúce teleso

V tejto kapitole sú uvedené zistenia výskumov zaoberajúcich sa vplyvom prostredia na dynamické vlastnosti tuhých telies:

- Vlastná frekvencia telesa pri kontakte s vodou klesá [2], pomerný útlm rastie [3].
- Pri prvej vlastnej frekvencii telesa je pokles frekvencie najvýraznejší [4].
- Vplyv kvapaliny na ohybové tvary kmitu sa mení [4].
- Veľkosť nádrže ovplyvňuje prídavné účinky, teleso v rozmernejšej nádrži má nižšiu vlastnú frekvenciu [3].
- Teleso ponorené vo vode má posunuté uzlové body [2].
- Dynamické vlastnosti telesa sa menia s hĺbkou ponoru. S rastúcou hĺbkou klesá vlastná frekvencia [5].
- Blízkosť steny znižuje vlastnú frekvenciu ponoreného telesa [6].

## 2 Numerická modální analýza

Pre experiment bola vybraná oceľová rúra. Pomocou softvéru ANSYS bol uskutočnený numerický výpočet vlastných frekvencií. Ten vychádzal z pôvodnej dĺžky skutočnej súčiastky. Následne boli vypočítané vlastné frekvencie rúr rôznych dĺžok a hrúbok steny.

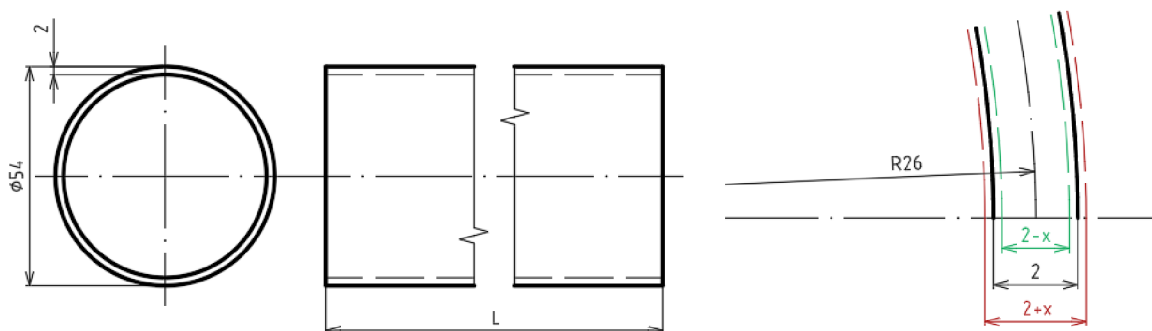
### 2.1 Model

Modálna analýza bola vykonaná pomocou softvéru ANSYS v module Modal Analysis. pre teplotu 22°C. Riešič bol ponechaný na „Program Controlled“. Neboli použité žiadne väzby. Teleso má teda 6 stupňov voľnosti. Geometria súčiastky je jednoduchá. Sieť nebolo nutné zjemňovať. Pre všetky výpočty bola použitá rovnaká veľkosť prvku. Výpočet bol spravený len pre prípad na vzduchu.

Tab. 2.1 Vlastnosti materiálu

Youngov modul pružnosti	200 GPa
Poissonov pomer	0,3
Hustota	7850 kg/m <sup>3</sup>

Teleso bolo vymodelované pomocou DesignModeler v softvéri ANSYS podľa Obr. 2.1. Prvá skupina výpočtov bola realizovaná pre hrúbku steny 2 mm. Prvý výpočet vlastných frekvencií bol vykonaný pre pôvodnú dĺžku skutočnej rúry 958 mm. Následne boli vypočítané vlastné frekvencie rúr s dĺžkami 900, 800, 700, 600, 500, 400, 300, 200 mm. Materiálové vlastnosti a podstava telesa ostali nemenné.

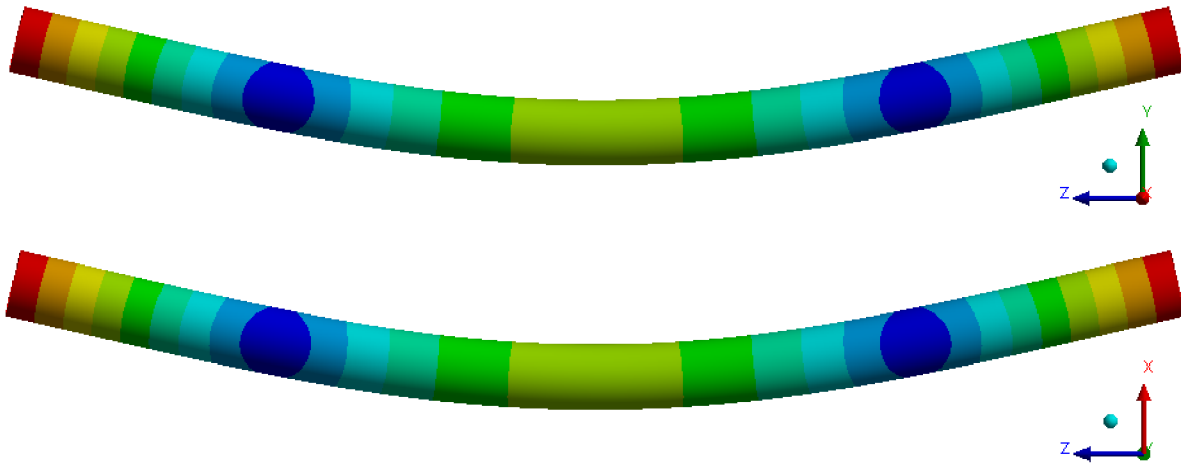


Obr. 2.1 Geometria skúmanej súčiastky

V druhej skupine výpočtov bola dĺžka rúry 958 mm a hrúbka steny bola menená. Spôsob úpravy hrúbky steny je znázornený na Obr. 2.1. Volené zmeny hrúbky sú  $x = \{0,1; 0,2\}$  mm.

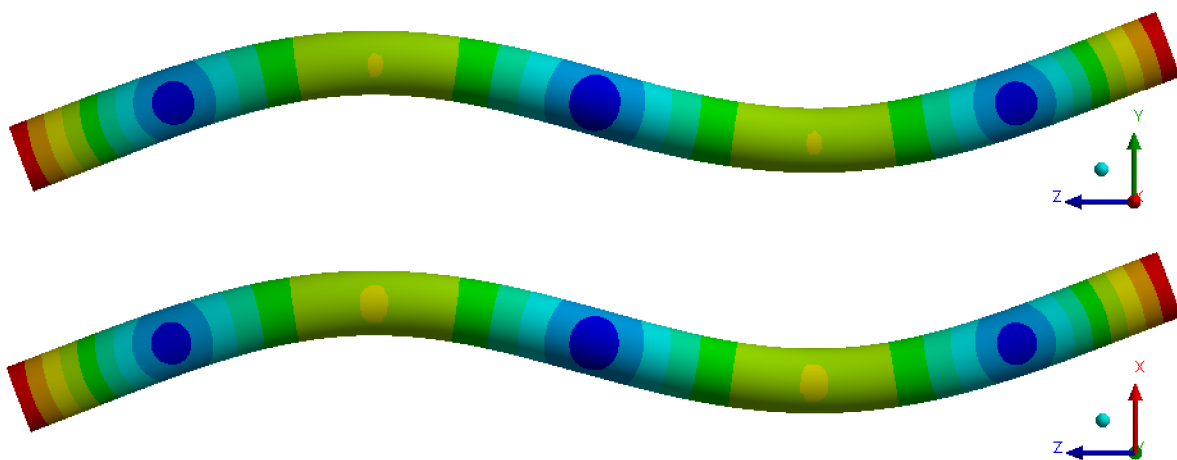
## 2.2 Vlastné frekvencie a vlastné tvary

Z výpočtu sú badateľné dva druhy tvaru kmitu. V prípade ohybového tvaru kmitu sa rúra deformuje v rovinách prechádzajúcich osou rúry. Pri škrupinovom tvare sa teleso deformuje v rovinách kolmých na os rúry. Nasledujúce ilustrácie zobrazujú vlastné tvary súčiastky pôvodnej dĺžky a hrúbky steny 2 mm.



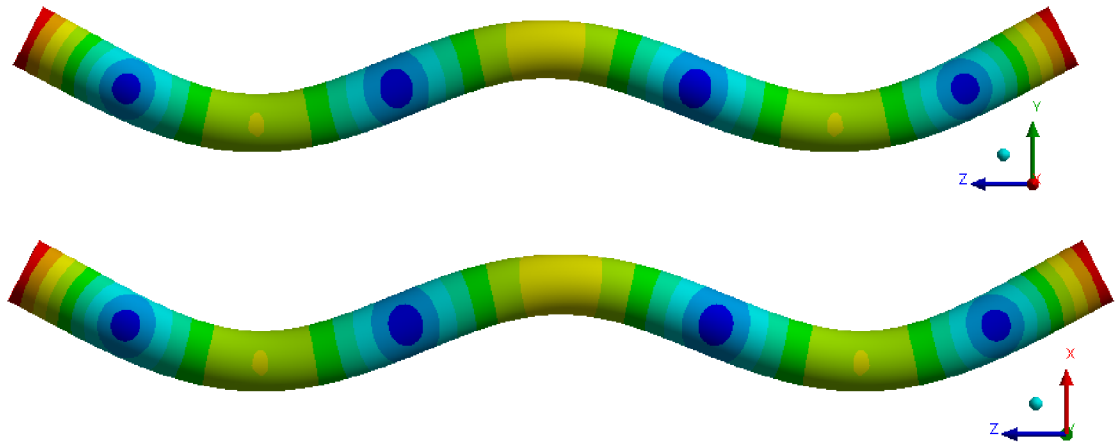
dĺžka súčiastky	[mm]	300	400	600	800	958
frekvencia	[Hz]	3134,4	1874,8	876,74	502,95	353,52

Obr. 2.2 Prvý ohybový tvar



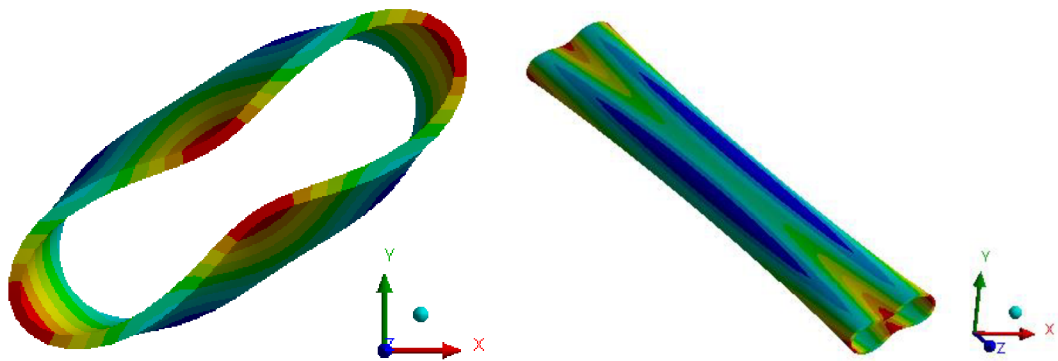
dĺžka súčiastky	[mm]	300	400	600	800	958
frekvencia	[Hz]	-	4443,7	2228	1319,1	940,04

Obr. 2.3 Druhý ohybový tvar



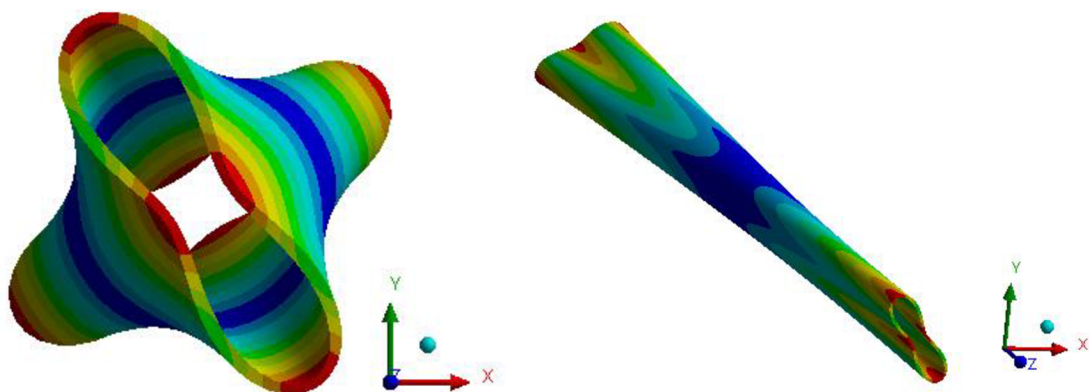
délka sůčiasťky	[mm]	300	400	600	800	958
frekvencia	[Hz]	-	-	3957,8	2423,7	1755,6

Obr. 2.4 Tretí ohybový tvar



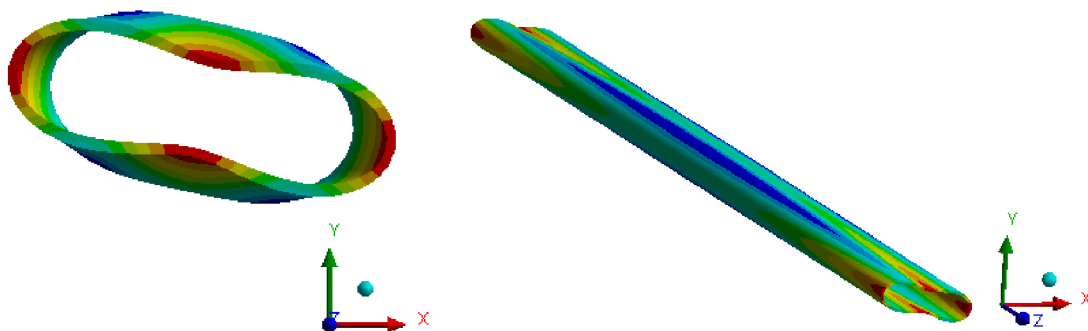
délka sůčiasťky	[mm]	300	400	600	800	958
frekvencia	[Hz]	1921,1	1921,8	1922,5	1924,9	1926,8

Obr. 2.5 Prvý škrupinový tvar



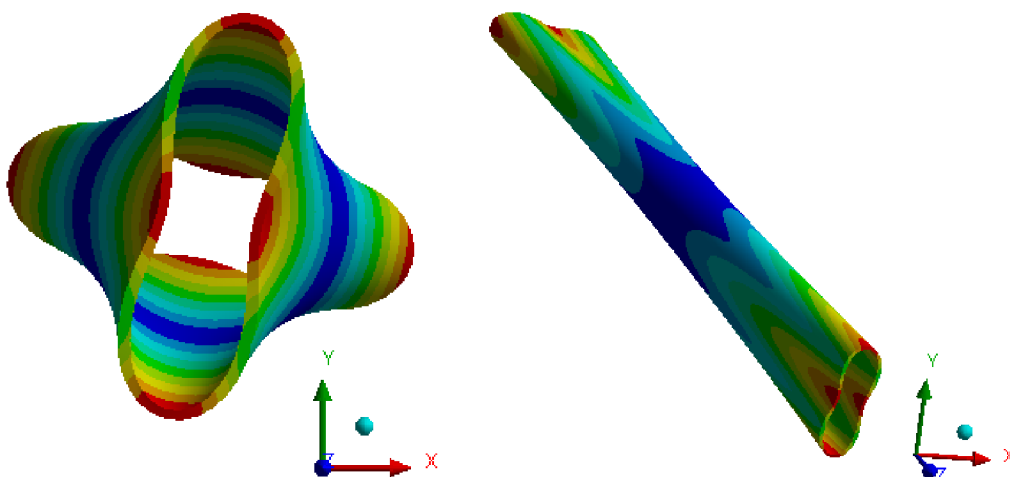
délka sůčiasťky	[mm]	300	400	600	800	958
frekvencia	[Hz]	1942,2	1932,8	1926,7	1926,9	1928

Obr. 2.6 Druhý škrupinový tvar



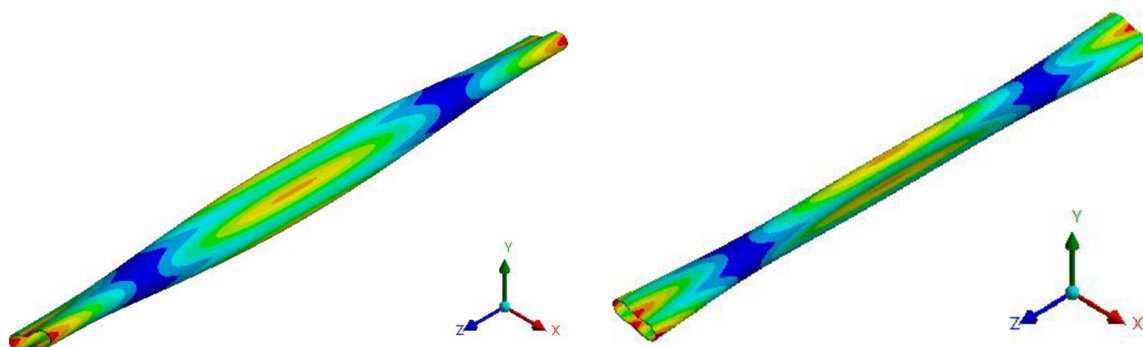
délka součástky	[mm]	300	400	600	800	958
frekvencia	[Hz]	1923	1923,7	1924,4	1928,6	1928,6

Obr. 2.7 Třetí škrupinový tvar



délka součástky	[mm]	300	400	600	800	958
frekvencia	[Hz]	1944,1	1934,7	1928,6	1930,6	1929,8

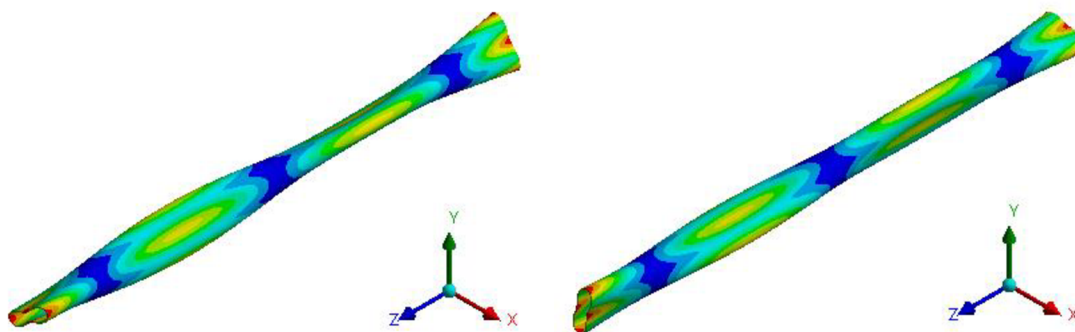
Obr. 2.8 Štvrtý škrupinový tvar



délka součástky	[mm]	300	400	600	800	958
frekvencia (5.)	[Hz]	2323,6	2084,9	1970,3	1946,4	1940,2
frekvencia (6.)	[Hz]	2325,1	2086,6	1972,1	1950	1942

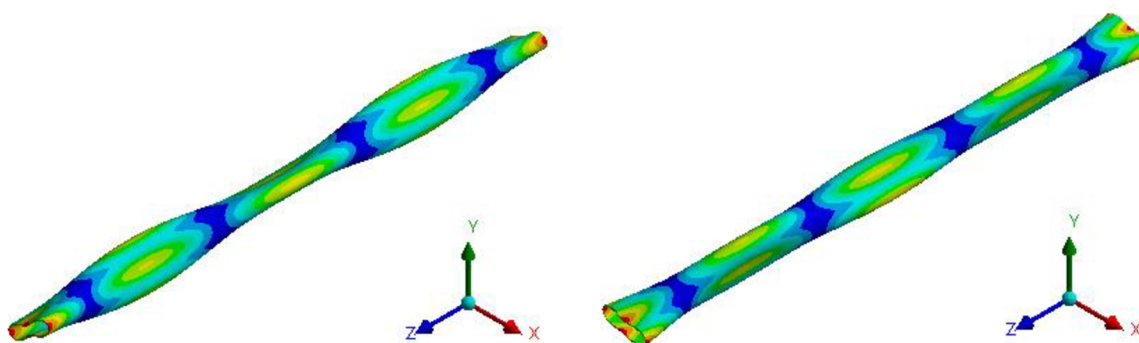
Obr. 2.9 Piatý a šiesty škrupinový tvar





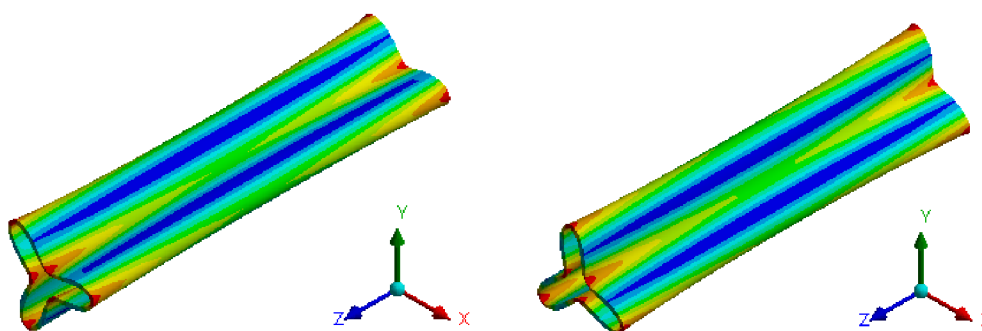
délka súčiastky	[mm]	300	400	600	800	958
frekvencia (7.)	[Hz]	3634,6	2681,7	2136,3	2011,2	1976,6
frekvencia (8.)	[Hz]	3635,6	2683	2138	2014,6	1978,4

Obr. 2.10 Siedmy a ôsmy škrupinový tvar



délka súčiastky	[mm]	300	400	600	800	958
frekvencia (9.)	[Hz]	-	3842,3	2528,9	2168,9	2063,4
frekvencia (10.)	[Hz]	-	3843,2	2530,3	2172,1	2065,1

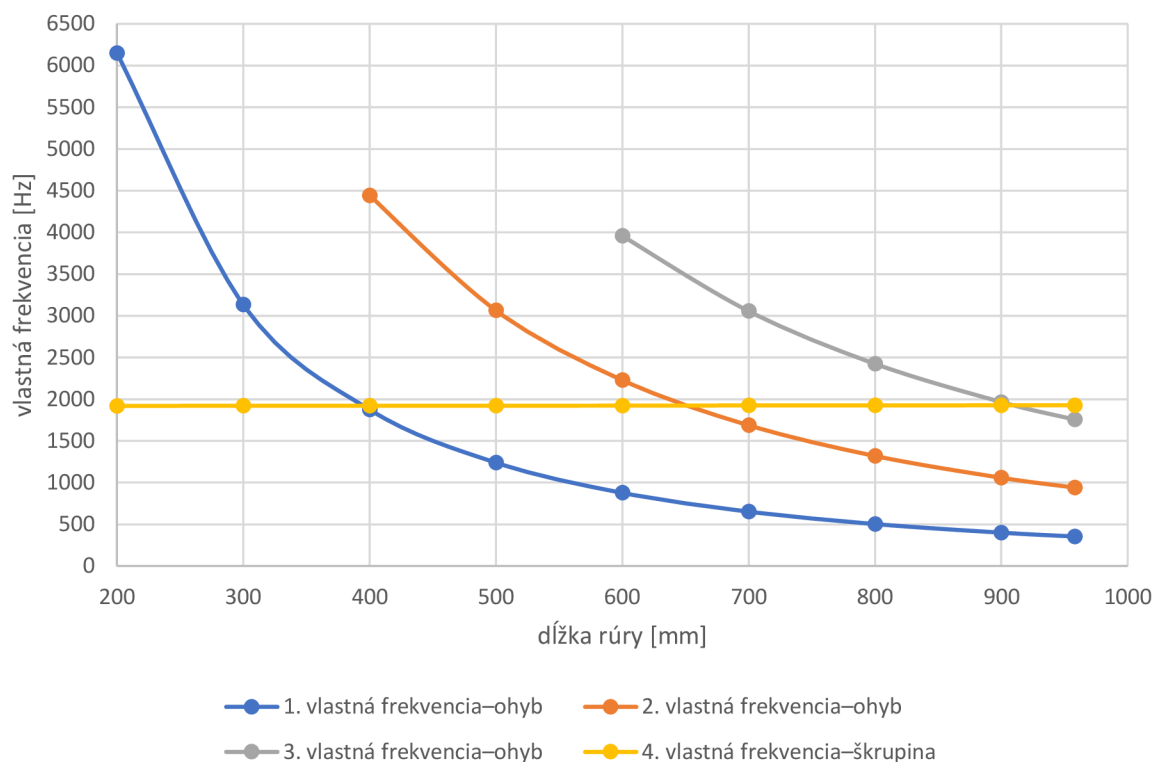
Obr. 2.11 Deviaty a desiaty škrupinový tvar



Obr. 2.12 Deviaty a desiaty škrupinový tvar súčiastky dĺžky 300 mm  
(zľava: 5407,5 Hz, 5409,3 Hz)

Tvary sú radené podľa hodnoty vlastných frekvencií telesa dĺžky 958 mm. Pri kratších rúrach niektoré tvary úplne chýbajú a rúra kmitá iným spôsobom. Pre všetky dĺžky telesa bol vypočítaný rovnaký počet módov. Tvar na Obr. 2.12 bol vypočítaný len pre dĺžku 300 mm. V tejto práci bude venovaná najväčšia pozornosť prvému škrupinovému tvaru a trom ohybovým tvarom.

### 2.3 Vplyv dĺžky rúry na hodnoty vlastných frekvencií

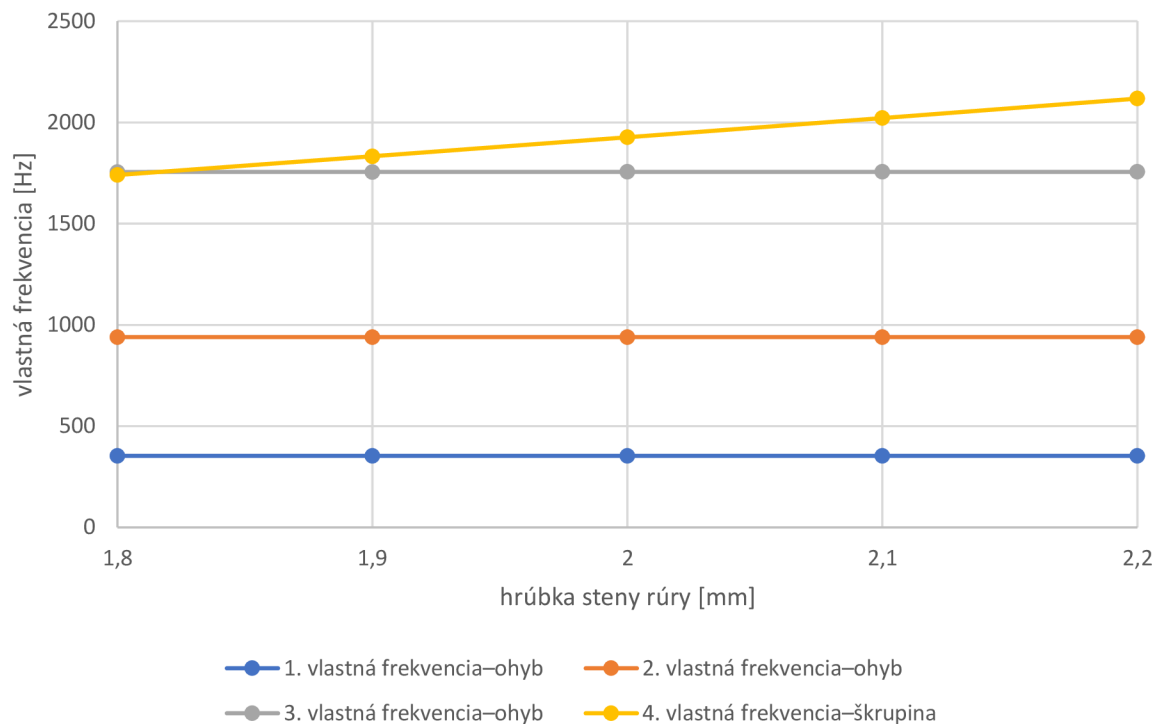


Obr. 2.13 Vplyv dĺžky rúry na vlastné frekvencie

Graf na Obr. 2.13 bol vytvorený pre nemennú hrúbku steny 2 mm. Z grafu vyplýva, že hodnoty vlastných frekvencií ohybových tvarov klesajú pri rastúcej dĺžke rúry. Vlastné frekvencie odpovedajúce prvému škrupinovému tvaru sa v závislosti na dĺžke súčiastky takmer nemenia. Na základe tohto zistenia boli volené dĺžky rúry vhodné pre experiment. Výber bol ovplyvnený snahou vyhnúť sa podobnosti frekvencií ohybového a škrupinového tvaru. Podobnosť vlastných frekvencií by mohla viesť k nesprávnemu odhadu tvarov na vzduchu alebo vo vode.

## 2.4 Vplyv hrúbky steny rúry na hodnoty vlastných frekvencií

Z dát vypočítaných pre dĺžku 958 mm a rôzne hrúbky steny súčiastky bol zostrojený graf na Obr. 2.14. Z grafu možno súdiť, že vlastná frekvencia prvého škrupinového tvaru výrazne rastie s väčšou hrúbkou steny. Vlastná frekvencia ohybových tvarov rastie v rádoch stotín.



Obr. 2.14 Vplyv hrúbky steny rúry na vlastné frekvencie

Vlastné tvary sú pri tomto spôsobe zmeny geometrie pre volené zúženia rovnaké ako v kapitole 2.2.

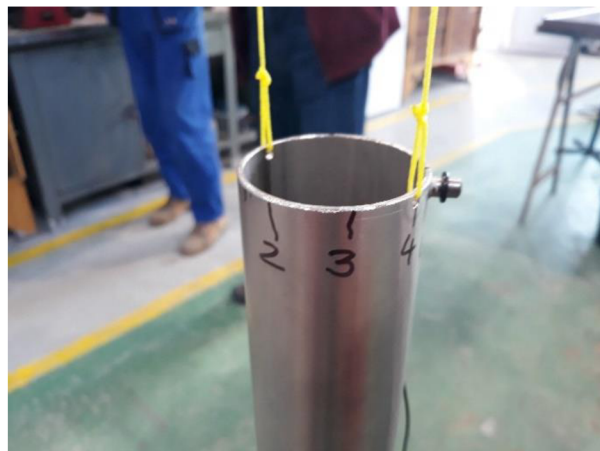
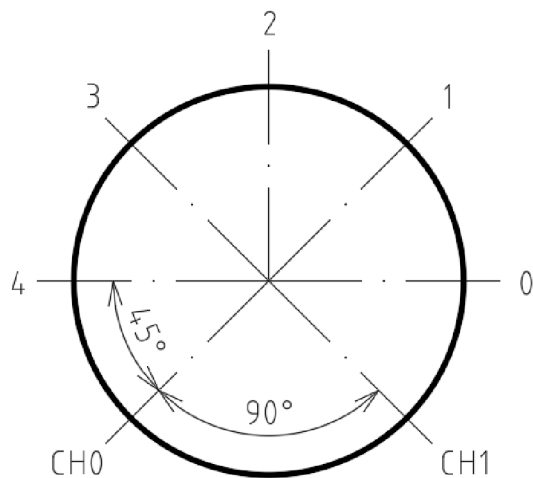
### 3 Experimentálna modálna analýza

#### 3.1 Geometria

Ako prvá bola zmeraná rúra pôvodnej dĺžky 958 mm. Po každom meraní bola rúra skrátaná a meranie prebehlo znova. Dĺžky skrátaných rúr sú 800, 600, 400 a 300 mm. Na jednom konci rúry boli vyvrtané dve diery pre zavesenie.

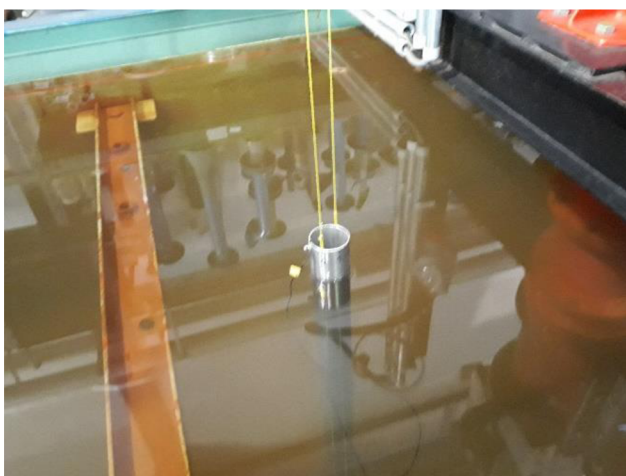
#### 3.2 Uloženie telesa a prostredie

Pre porovnanie experimentu s výpočtom je vhodné voľné uloženie [7]. Takéto uloženie bolo simulované vertikálnym zavesením telesa v bodoch 0 a 4 podľa schémy na Obr. 3.1. Zavesenie obmedzilo posuv v jednom smere.

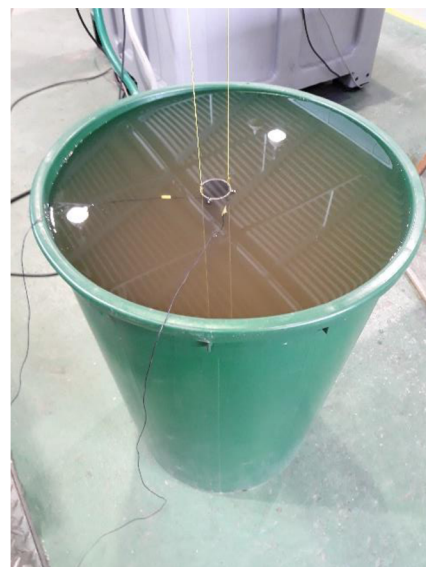


Obr. 3.1 Polohy úderov a umiestnenia snímačov

Teleso bolo budené na vzduchu a úplne ponorené vo vode. Prvé meranie vo vode prebehlo v stanici vírovej turbíny podľa Obr. 3.2. Po skrátaní rúry meranie prebiehalo v záhradnej nádrži. Rúra bola v nádržiach umiestnená čo najďalej od stien. Ich blízkosť by mohla ovplyvniť výsledky.



a)



b)

Obr. 3.2 Meranie ponoreného telesa: a) stanica vírovej turbíny b) záhradná nádrž

### 3.3 Budenie

Teleso bolo na vzduchu budené úderom kladiva. Pri meraní vo vode v stanici vírovej turbíny bolo teleso ponorené len čiastočne. Nad hladinou ostalo 53 mm. Vzhľadom na veľkosť nádrže by boli body určené pre budenie ťažšie dostupné. Vo zvyšných prípadoch merania vo vode bola rúra úplne ponorená. Pri meraní pod vodou bola pomocná tyč sčasti ponorená a koniec pod vodou bol v blízkosti bodu v ktorom bolo plánované vybudenie. Po ustálení systému bolo teleso vybudené úderom kladiva do tyče. Týmto spôsobom bol zmiernený šum vzniknutý pri vnáraní budiaceho nástroja pod hladinu. Teleso bolo budené na zavesenom konci telesa. Po obvode rúrky bolo zvolených 5 bodov vhodných pre úderu podľa Obr. 3.1.



Obr. 3.3 Budiace nástroje

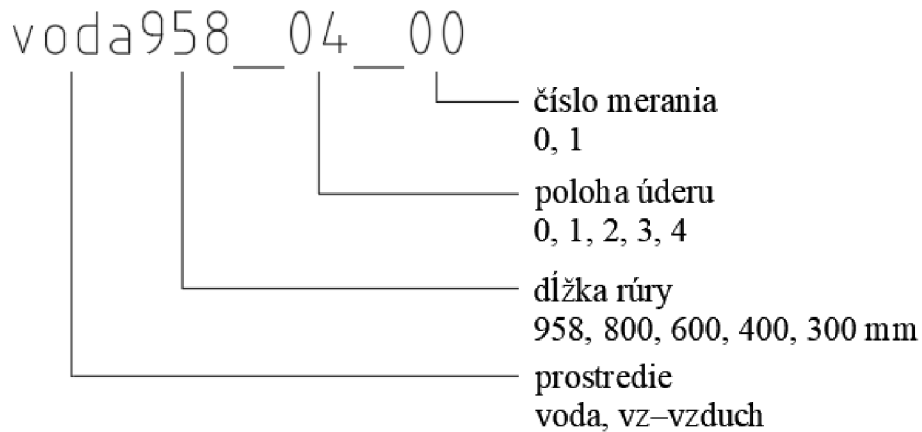
### 3.4 Záznam

Odozva telesa na budiacu silu bola zaznamenaná dvoma snímačmi zrýchlenia, ktoré sú vhodné aj pre meranie pod vodou. Budiaca sila nebola zaznamenávaná. V tejto práci bude posúdený len pomer amplitúd jednotlivých snímačov, rozdiel fáz medzi snímačmi a vlastná frekvencia. Snímače boli pripevnené na hornom konci rúry v polohách CH0 a CH1 podľa Obr. 3.1 pomocou vosku.

Tab. 3.1 Použité snímače zrýchlenia

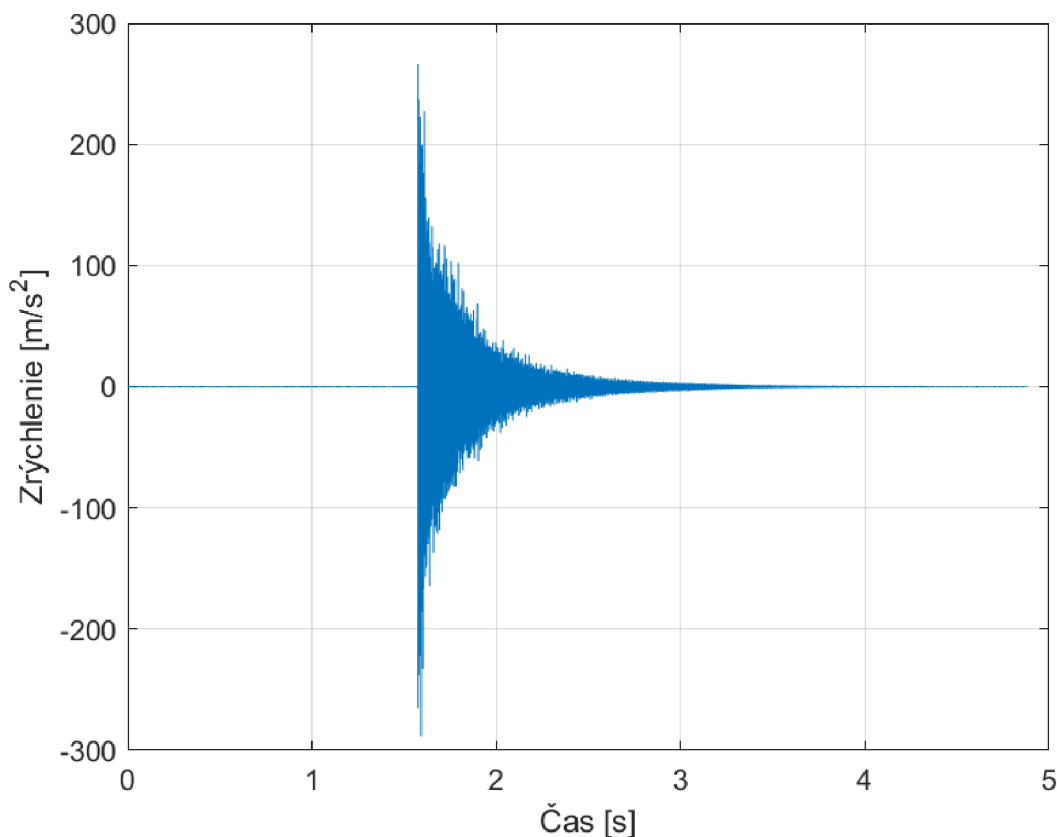
značenie snímača	model	sériové číslo
CH0	PCB Piezotronics W352B10	197507
CH1	PCB Piezotronics W352B10	309080

Teleso bolo v každej polohe vybudené dva krát v prípade na vzduchu aj vo vode. Každé vybudenie bolo uložené zvlášť. Z experimentu bolo teda získaných 100 záznamov vybudenia a dokmitania telesa. Pre dobrú orientáciu v jednotlivých záznamoch bol zavedený systém značenia vysvetlený na Obr. 3.4.



Obr. 3.4 Značenie meraní

Vzorkovacia frekvencia signálu bola 25,6 kHz. Dĺžka záznamu pri meraní pôvodnej dĺžky bola len 5 s. Jedna osoba vybudila rúru a druhá kontrolovala kvalitu záznamu a ukladala súbor pre následné vyhodnotenie. Pri ostatných meraniach všetko robila jedna osoba, preto bol čas záznamu predĺžený na 20 s. Takto bolo možné stihnúť teleso vybudit', skontrolovať záznam či meranie nebolo znehodnotené napríklad prekročením rozsahu snímačov a uložiť záznam. Celý záznam v časovej oblasti získaný z merania je na Obr. 3.5. Táto ukážka záznamu je pre rúru pôvodnej dĺžky na vzduchu vybudenu v polohe 1 zaznamenanú snímačom CH0.

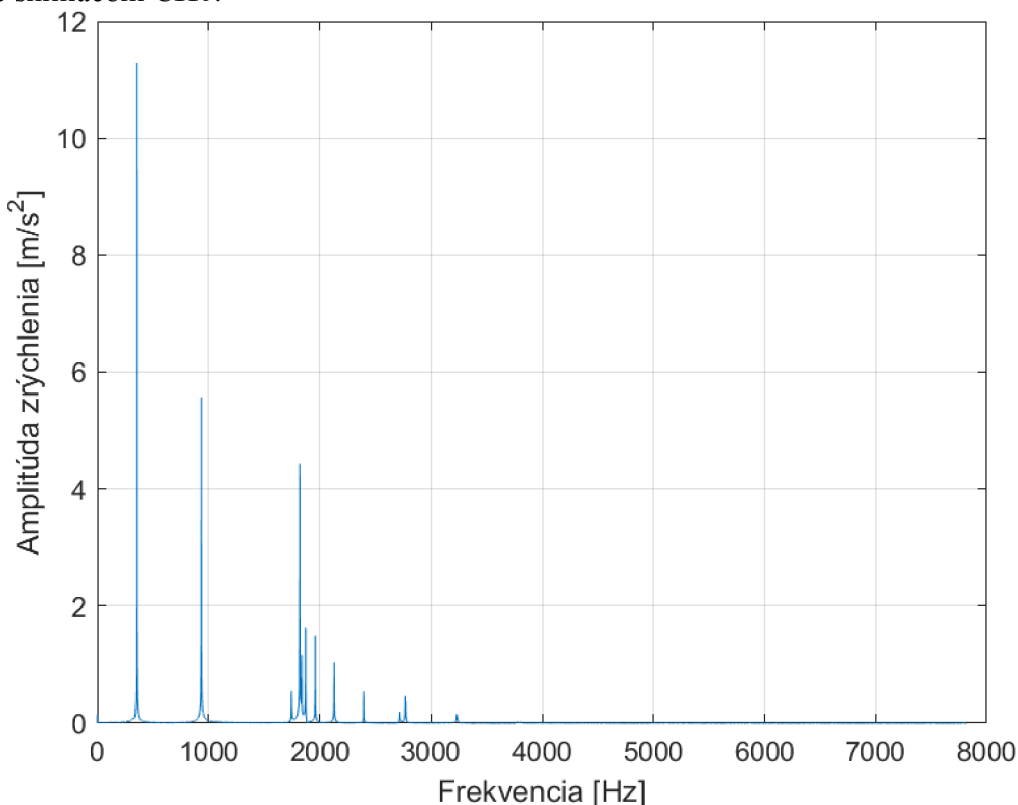


Obr. 3.5 Ukážka záznamu vstupného signálu

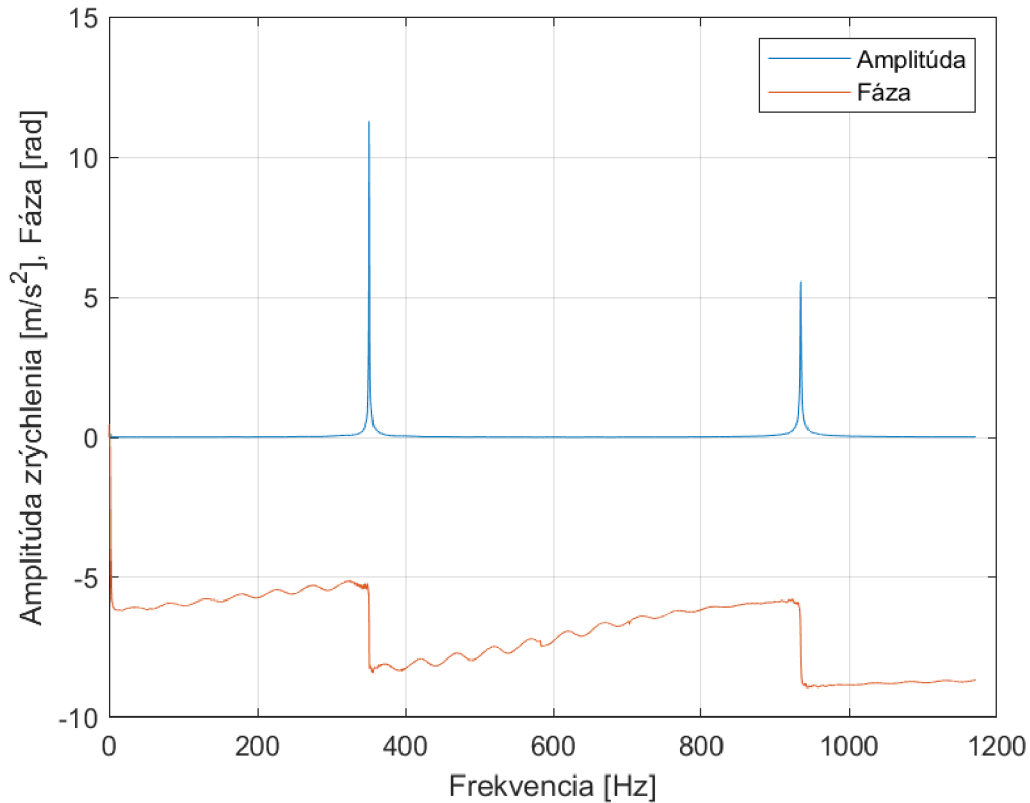
### 3.5 Spracovanie dát

Pre každé meranie bol zvolený časový úsek vhodný pre spracovanie. Záznamy sa líšia dobou dokmitania, preto bol časový úsek volený pre každé meranie zvlášť. Odsadenie od počiatku zaznamenaného pohybu vylúčilo vplyv budiaceho úderu. Dĺžka vyhodnocovaného úseku bola skrátaná tak, aby sa vylúčil šum na konci záznamu. Pri určovaní hraníc časového úseku bol volený kompromis medzi vylúčením rušivých vplyvov v prípade prídlhého úseku a neúplnosti informácií v prípade príkrátkeho úseku.

Na spracovanie nameraných dát bola použitá Fourierova transformácia. Pre tento účel bol vytvorený skript v prostredí MATLAB. Týmto spôsobom boli záznamy zrýchlenia v časovej oblasti prevedené do frekvenčnej oblasti. Výstup tohto prevodu sú informácie o frekvenčnej oblasti kmitavého pohybu. Ukážky frekvenčnej oblasti sú na Obr. 3.6 a Obr. 3.7. Tieto grafy sú pre meranie rúry dĺžky 958 mm vybudenej na vzduchu v polohe 1 zaznamenané snímačom CH0.



Obr. 3.6 Frekvenčná charakteristika



Obr. 3.7 Ukážka frekvenčnej charakteristiky pre prvé dve vlastné frekvencie

Pre vyhodnotenie boli volené záznamy získané vybudením telesa v polohe 1. Vo vykreslenej amplitúdovo frekvenčnej charakteristike boli hľadané lokálne maximá. Pre tieto body boli zaznamenané hodnoty frekvencií, amplitúd a fáz z obidvoch snímačov. Ukážka získaných informácií v Tab. 3.2 je pre rúru pôvodnej dĺžky meranej na vzduchu.

Tab. 3.2 Ukážka súboru hodnôt získaných po Fourierovej transformácii

frekvencia [Hz]	CH0		CH1	
	amplitúda zrýchlenia [m.s <sup>-2</sup> ]	fáza [rad]	amplitúda zrýchlenia [m.s <sup>-2</sup> ]	fáza [rad]
351,6	11,2810	0,1919	3,6744	0,3114
353,1	1,6448	-1,9573	0,3615	-1,5762
933,2	1,4702	0,2056	0,1130	-0,0434
935,2	5,5694	-1,3722	0,7821	-1,2861
1742,2	0,2296	0,9665	0,0676	-2,9683
1744,5	0,5526	-0,2201	0,0559	1,1054
1816,0	0,4324	-2,7262	0,5898	0,3508
1820,3	4,4288	2,3530	4,1169	-0,7895
1831,6	0,4123	0,5982	0,3947	-2,2688
1839,5	1,1282	-0,1591	1,0479	3,0048
1868,4	0,3037	0,0137	0,1918	-2,9164
1873,8	1,6248	-1,2301	1,4714	1,9157
1956,6	0,1491	0,4747	0,2110	-2,8975
1960,9	1,4952	-1,1275	1,3829	2,0126
2128,5	1,0441	-2,6308	0,9763	0,5120



## 4 Vyhodnotenie

Pri porovnaní experimentu na vzduchu a výpočtu boli priradené vlastné tvary frekvenciám získaným po Fourierovej transformácii. Toto priradenie je len predpoklad. Niektoré frekvencie pri výstupe z Fourierovej transformácie chýbajú. To mohlo byť spôsobené napríklad vybudením súčiastky alebo umiestnenia snímačov v uzlovom bode. Celkové vyhodnotenie experimentu je teda závislé na tom, či sa jednotlivé tvary podarilo vybudit' a zaznamenať. Vyhodnotené sú tri ohybové a jeden škrupinový tvar kmitu.

### 4.1 Porovnanie numerickej a experimentálnej modálnej analýzy

#### 4.1.1 Premennivá hrúbka steny rúrky

Numerická modálna analýza pre rôzne hrúbky steny bola vykonaná pre pôvodnú dĺžku telesa. Tab. 4.1 obsahuje pomer frekvencií získaných z experimentu a výpočtu pre tri ohybové a prvý škrupinový tvar kmitu.

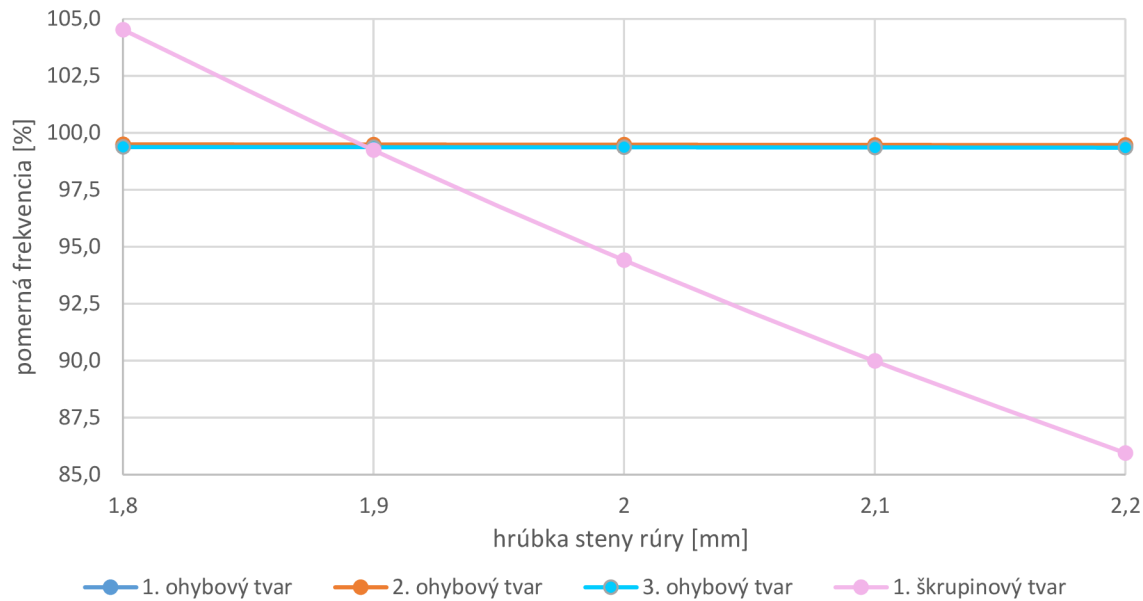
Tab. 4.1 Porovnanie merania a výpočtu pre rôzne hrúbky steny

	Experiment	MKP					
	Frekvencia [Hz]	hrúbka 2,2 mm		hrúbka 2,1 mm		hrúbka 2 mm	
		Frekvencia [Hz]	Pomer [%]	Frekvencia [Hz]	Pomer [%]	Frekvencia [Hz]	Pomer [%]
1. ohybový tvar	351,6	353,6	99,4	353,6	99,4	353,5	99,4
2. ohybový tvar	935,2	940,2	99,5	940,1	99,5	940,0	99,5
3. ohybový tvar	1744,5	1755,9	99,4	1755,7	99,4	1755,6	99,4
1. škrupinový tvar	1820,3	2117,9	85,9	2022,9	90,0	1928,0	94,4

	Experiment	MKP			
	Frekvencia [Hz]	hrúbka 1,9 mm		hrúbka 1,8 mm	
		Frekvencia [Hz]	Pomer [%]	Frekvencia [Hz]	Pomer [%]
1. ohybový tvar	351,6	353,5	99,5	353,5	99,5
2. ohybový tvar	935,2	940,0	99,5	939,9	99,5
3. ohybový tvar	1744,5	1755,5	99,4	1755,4	99,4
1. škrupinový tvar	1820,3	1834,2	99,2	1741,4	104,5

Zúženie steny rúry na hodnotu 1,8 mm ovplyvnilo frekvenciu škrupinového tvaru natoľko, že sa zmenilo poradie tvarov. Škrupinový tvar má nižšiu frekvenciu než tretí ohybový.

Na Obr. 4.1 je graficky znázornený pomer frekvencií z závislosti na zmene hrúbky steny telesa. Pomer frekvencií všetkých ohybových tvarov je takmer 100% pri všetkých hrúbkach. Pomer frekvencií škrupinových tvarov lineárne klesá.



Obr. 4.1 Závislosť vlastnej frekvencie na zmene hrúbky steny

#### 4.1.2 Premennivá dĺžka telesa

Tab. 4.2 obsahuje pomer frekvencií získaných z experimentu a výpočtu pre tri ohybové a prvý škrupinový tvar kmitu.

Tab. 4.2 Porovnanie vlastných frekvencií pre rôzne dĺžky

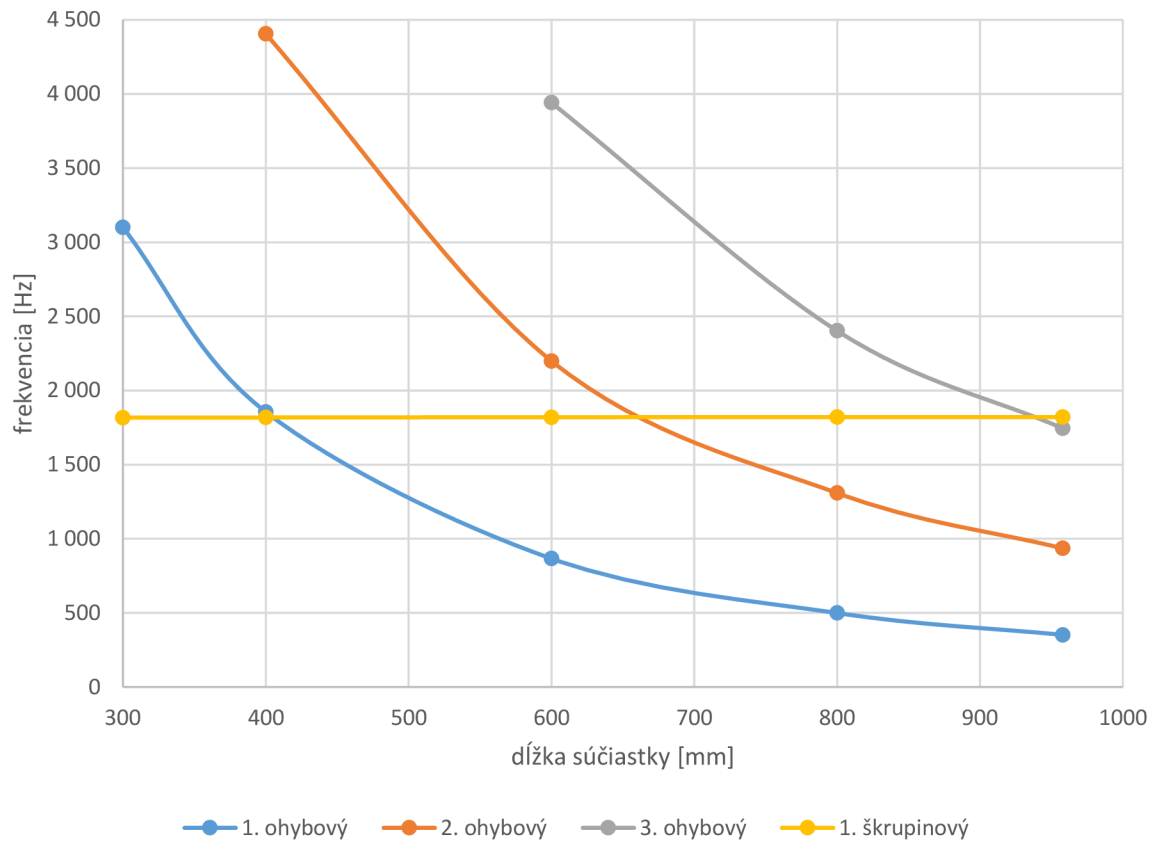
Tvar	958			800			600		
	Frekvencia		Pomer [%]	Frekvencia		Pomer [%]	Frekvencia		Pomer [%]
	Meranie [Hz]	MKP [Hz]		Meranie [Hz]	MKP [Hz]		Meranie [Hz]	MKP [Hz]	
1. ohybový	351,6	353,5	99,4	498,8	503,0	99,2	866,0	876,7	98,8
2. ohybový	935,2	940,0	99,5	1308,2	1319,1	99,2	2198,8	2228,0	98,7
3. ohybový	1744,5	1755,6	99,4	2402,3	2423,7	99,1	3941,0	3957,8	99,6
1. škrupinový	1820,3	1928,0	94,4	1820,3	1924,9	94,6	1819,5	1922,5	94,6

Tvar	400,0			300,0		
	Frekvencia		Pomer [%]	Frekvencia		Pomer [%]
	Meranie [Hz]	MKP [Hz]		Meranie [Hz]	MKP [Hz]	
1. ohybový	1855,1	1874,8	98,9	3100,8	3134,4	98,9
2. ohybový	4405,9	4443,7	99,1	-	-	-
3. ohybový	-	-	-	-	-	-
1. škrupinový	1817,6	1921,8	94,6	1816,8	1921,1	94,6

Ohybové tvary chýbajú pri dĺžkach 300 a 400 mm. Telesá týchto dĺžok podľa výpočtu kmitajú zložitejšími škrupinovými tvarmi opísanými v kapitole 2.2. Z grafu na Obr. 4.2 vyplýva, že ďalšie ohybové tvary kmitajú s veľmi vysokou frekvenciou. Pomer vlastných frekvencií ohybových tvarov je vyšší než u škrupinového tvaru. Vlastné frekvencie škrupinového tvaru majú pre rôzne dĺžky podobné hodnoty a je možné nájsť ich pri všetkých meraných dĺžkach. Pomer frekvencií škrupinového tvaru značí podobný pokles vlastnej frekvencie pri

všetkých meraniach na vzduchu. Zmena geometrie vplýva na vlastné frekvencie skutočného telesa tak, ako bolo opísané v kapitole 2.



Obr. 4.2 Závislost' vlastnej frekvencie na dĺžke skutočnej súččástky

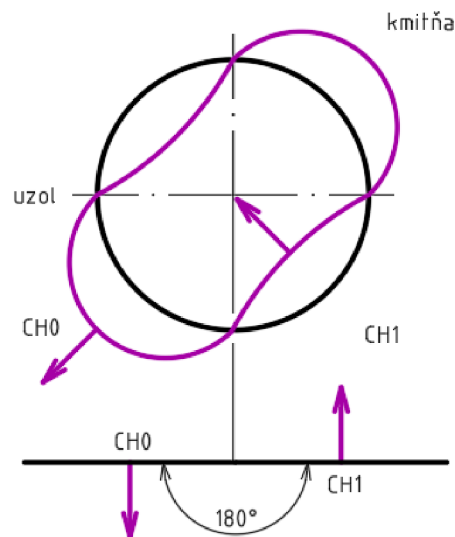
## 4.2 Odhad vlastných tvarov vo vode

Dynamické vlastnosti telesa sa vplyvom prostredia menia. Jedným z cieľov tejto práce je dokázanie tohto javu a ozrejmienie miery účinkov prostredia na kmitanie telesa. Pri vyhodnotení merania pod vodou nie je možné vychádzať z numerického výpočtu. V tejto podkapitole je opísaný spôsob odhadu vlastných tvarov pre vlastné frekvencie získané z merania vo vode.

K vlastným frekvenciám z merania na vzduchu boli priradené vlastné tvary kmitu pomocou zobrazenia tvarov v numerickom výpočte v ANSYS. Prvý odhad tvarov kmitu pre frekvencie namerané vo vode bol podľa poradia tvarov na vzduchu. Podľa Obr. 2.13 frekvencia ohybových tvarov stúpa so znižujúcou sa dĺžkou rúry. Prvá vlastná frekvencia škrapinového tvaru sa s premennou dĺžkou skoro nemení. Prvým škrapinovým tvarom bola označená frekvencia nachádzajúca sa pri všetkých dĺžkach. Vlastné frekvencie zložitejších škrapinových tvarov boli využité pre orientáciu medzi dátami. Z výpočtu v ANSYS je známe koľko škrapinových vlastných tvarov sa medzi ohybovými nachádza. Pri meraní a následnom vyhodnotení kmitavého pohybu reálneho telesa nie je isté či sa podarilo vybudit' a nájsť všetky vlastné frekvencie. V kapitole 4.1.1 bol stanovený vplyv odchýlky geometrie reálneho telesa od modelu na hodnotu vlastných frekvencií. Tie sa môžu hlavne v prípade škrapinových tvarov kmitu meniť. To môže mať za následok zámenu tvaru kmitu alebo nemožnosť jednoznačne určiť tvar. Tento spôsob odhadu tvaru kmitu vo vode je nepresný a slúži len ako základ.

Výstup z Fourierovej transformácie zahŕňa informácie o kmitavom pohybe. Pre každú vlastnú frekvenciu bol vypočítaný pomer amplitúd a rozdiel fáz medzi jednotlivými snímačmi. Pre vlastné frekvencie z merania na vzduchu boli pozorované vlastnosti typov tvarov.

Pri ohybových tvaroch býva pomer amplitúd rôzny. Väčšinou sa ale výrazne líši od hodnoty 1. Rozdiel fáz býva nepravidelný. Vlastnosti ohybových tvarov sú teda pomerne nepravidelné a pri vyhodnotení môžu byť zamenené so škrapinovými.



Obr. 4.3 Schéma prvého škrapinového tvaru kmitu a predpokladaný pohyb snímačov

U frekvencií pre ktoré je odhadovaný škrapinový tvar sa vo väčšine prípadov rozdiel fáz blíži  $180^\circ$  a pomer amplitúd sa blíži 1. Na Obr. 4.3 je naznačená pôvodná a deformovaná súčiastka pri prvom škrapinovom tvare. Teleso bolo vybudené v polohe 1. Táto poloha sa nachádza oproti snímaču CH0 a kolmo na snímač CH1. Vybudenie v tejto polohe spôsobí rozkmitanie súčiastky v miestach snímačov.

Pre odhad vlastných tvarov bola použitá kombinácia metód popísaných vyššie.

**4.3 Vplyv zmeny prostredia na hodnoty vlastnej frekvencie**

Tab. 4.3 Porovnanie vlastných frekvencií telesa v rôznych prostrediach

1. škrupinový tvar							
dĺžka rúrky [mm]	vzduch			voda			pomer frekvencií [%]
	frekvencia [Hz]	rozdiel fáz [°]	pomer amplitúd [-]	frekvencia [Hz]	rozdiel fáz [°]	pomer amplitúd [-]	
300	1816,8	179,85	1,02	1198,0	179,83	1,02	65,9
400	1817,6	179,63	1,08	1193,8	179,86	1,03	65,7
600	1819,5	178,67	0,99	1191,8	177,76	0,98	65,5
800	1820,3	175,87	0,98	1180,1	182,01	0,89	64,8
958	1820,3	180,05	0,93	1278,1	159,85	0,93	70,2

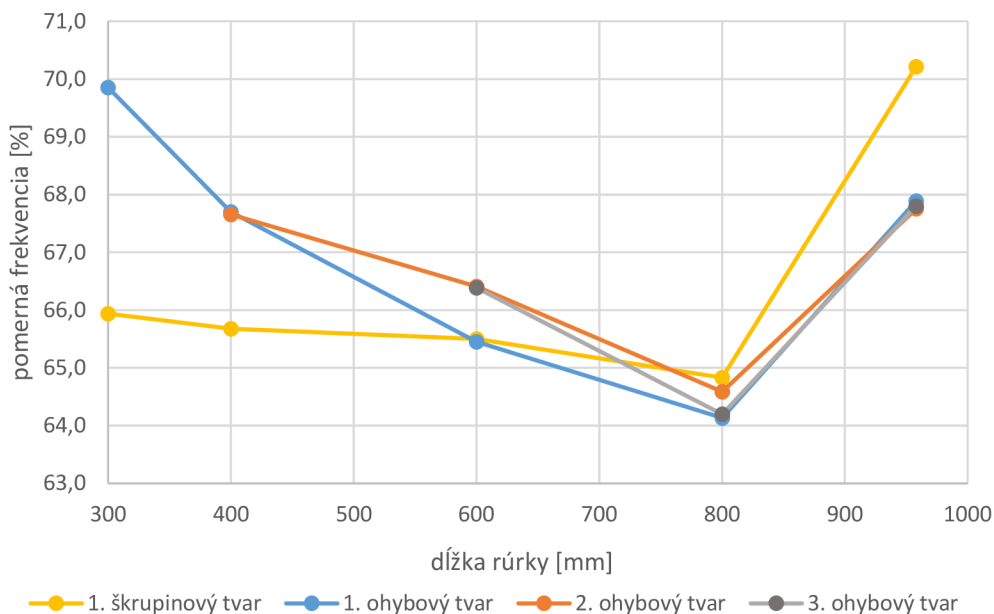
1. ohybový tvar							
dĺžka rúrky [mm]	vzduch			voda			pomer frekvencií [%]
	frekvencia [Hz]	rozdiel fáz [°]	pomer amplitúd [-]	frekvencia [Hz]	rozdiel fáz [°]	pomer amplitúd [-]	
300	3100,8	208,31	0,29	2166,0	55,60	0,26	69,9
400	1855,1	182,30	0,35	1255,9	126,30	0,37	67,7
600	866,0	24,88	0,02	566,8	38,60	0,23	65,4
800	498,8	20,79	0,22	319,9	270,73	0,14	64,1
958	351,6	6,85	0,33	238,7	5,43	0,24	67,9

2. ohybový tvar							
dĺžka rúrky [mm]	vzduch			voda			pomer frekvencií [%]
	frekvencia [Hz]	rozdiel fáz [°]	pomer amplitúd [-]	frekvencia [Hz]	rozdiel fáz [°]	pomer amplitúd [-]	
300	-	-	-	-	-	-	-
400	4405,9	197,70	0,56	2980,9	30,68	0,69	67,7
600	2198,8	156,18	0,44	1460,2	47,61	0,42	66,4
800	1308,2	184,23	0,19	844,9	152,64	0,31	64,6
958	935,2	4,93	0,14	633,6	31,53	0,09	67,8

3. ohybový tvar							
dĺžka rúrky [mm]	vzduch			voda			pomer frekvencií [%]
	frekvencia [Hz]	rozdiel fáz [°]	pomer amplitúd [-]	frekvencia [Hz]	rozdiel fáz [°]	pomer amplitúd [-]	
300	-	-	-	-	-	-	-
400	-	-	-	-	-	-	-
600	3941	193,12	0,92	2616,4	243,97	0,82	66,4
800	2402,3	165,33	0,55	1542,2	119,90	0,42	64,2
958	1744,5	75,94	0,10	1182,8	47,25	0,07	67,8

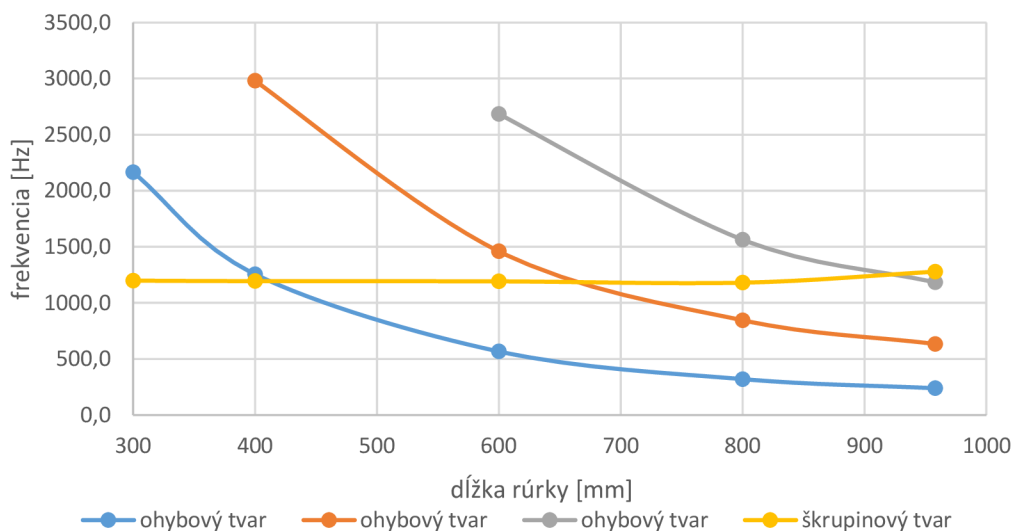
V Tab. 4.3 sa nachádzajú pomery amplitúd a rozdiely fáz medzi snímačmi zrýchlenia pre obidva prostredia v ktorých bola súčiastka buzená. Tieto informácie boli využité k odhadu charakteru kmitania pri frekvenciách získaných z merania pod vodou. Tabuľka obsahuje pomer vlastných frekvencií z merania vo vode a na vzduchu.

Pri rúre dĺžky 300 mm boli sledované len dve frekvencie. Ďalšie ohybové tvary prislúchajú vysokým frekvenciám. Tretí ohybový tvar nebol nájdený ani pre dĺžku 400 mm.



Obr. 4.4 Pomer vlastných frekvencií v závislosti na dĺžke rúry

Na Obr. 4.4 je zobrazená závislosť pomernej vlastnej frekvencie na dĺžke súčiastky pre jednotlivé vlastné tvary. Pomer vlastných frekvencií klesá až po dĺžku 800 mm. Následne je vidieť prudký nárast. Najmiernejšie klesá pomerná vlastná frekvencia škrapinového tvaru.



Obr. 4.5 Vlastné frekvencie v závislosti na dĺžke rúry ponorenej vo vode

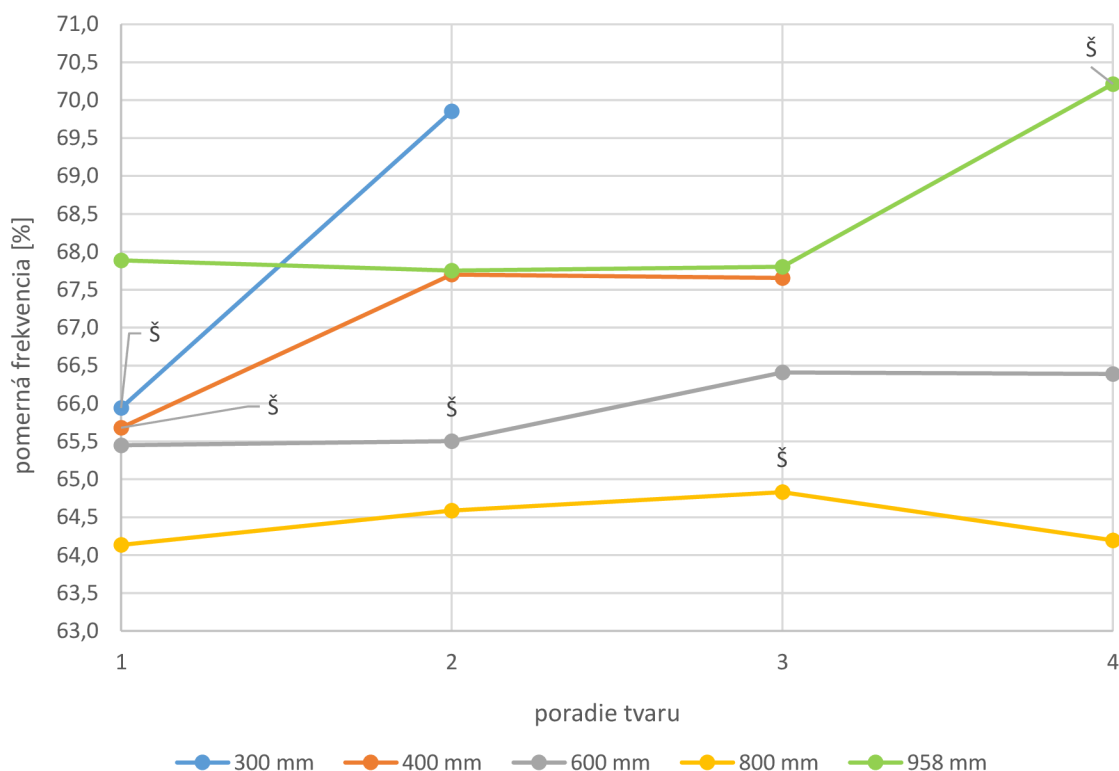
Na Obr. 4.4 je badateľný nárast pomerných vlastných frekvencií pri dĺžke 958 mm. Meranie tejto súčiastky vo vode prebehlo vo väčšej nádrži. Veľkosť nádrže má ale podľa [3] na hodnoty vlastných frekvencií opačný vplyv a vlastná frekvencia by mala byť vo väčšej nádrži nižšia. Teleso však pri meraní nebolo ponorené úplne. Nad hladinou vytŕčalo 53 mm

čo činí približne 5,5 % celej dĺžky telesa. Teleso tiež bolo budené iným nástrojom. Bod určný pre úder bol nad vodou, preto nebolo nutné použiť kombináciu tyče a kladiva.

Na Obr. 4.5 je viditeľný nárast vlastnej frekvencie škrupinového tvaru len pri tejto dĺžke. Podľa zistení v kapitole 2.3 hodnota vlastnej frekvencie škrupinového tvaru nezávisí na zmene dĺžky súčiastky. Škrupinové tvary ostatných dĺžok kmitajú na nižšej frekvencii. Podobná frekvencia odpovedá tretiemu ohybovému tvaru. V Tab. 4.4 sú uvedené vlastné frekvencie vyšších škrupinových tvarov nameraných pri iných dĺžkach. Tieto frekvencie majú podobnú hodnotu ako má prvý škrupinový tvar pri dĺžke 958 mm. V numerickom výpočte aj v meraní na vzduchu bolo nájdené väčšie množstvo škrupinových tvarov pri podobných hodnotách frekvencií (napríklad pre dĺžku 800 mm je 1257,8 až štvrtá vlastná frekvencia). V tomto prípade sa mohlo stať to, že sa vlastné frekvencie tvarov prekrývajú a frekvencia použitá pri vyhodnotení prináleží inému škrupinovému tvaru.

Tab. 4.4 Porovnanie umiestnenia tvarov odpovedajúcich podobnej hodnote

dĺžka súčiastky	[mm]	300	400	600	800	958
vlastná frekvencia	[Hz]	1239,1	1221,5	1245,3	1257,8	1278,1
poradie škrupinového tvaru		2.	2.	3.	4.	1.



Obr. 4.6 Pomer vlastnej frekvencie v závislosti na poradí tvaru

Na Obr. 4.6 je znázornený pomer vlastnej frekvencie v závislosti na poradí vlastných tvarov pre jednotlivé rúry. Škrupinové tvary sú vyznačené. Ostatné tvary sú ohybové. Najväčší pokles je u prvého tvaru. Výnimkou je súčiastky dĺžky 958 mm. Pri nej je pomer frekvencií trochu vyšší než pri nasledujúcom tvare. V prípade 300 a 400 mm nasledujú ohybové tvary. Je viditeľný prudký nárast pomeru frekvencií. Pomer vlastných frekvencií za sebou idúcich ohybových tvarov sa veľmi nemení. V prítomnosti škrupinového tvaru je zmena smernice výraznejšia.

## ZÁVER

Cieľom práce bolo numerické a experimentálne určenie vlastných frekvencií a porovnanie výsledkov experimentálnej modálnej analýzy telesa na vzduchu a vo vode.

V numerickom výpočte bol skúmaný vplyv zmeny geometrie na vlastné frekvencie a vlastné tvary. Menené veličiny boli dĺžka a hrúbka steny súčiastky. Pre zvolenú geometriu bolo zistené, že s rastúcou dĺžkou valcovej škrupiny výrazne klesá vlastná frekvencia ohybových tvarov a vlastná frekvencia prvého škrupinového tvaru sa mení v rádoch jednotiek. S rastúcou hrúbkou steny valcovej škrupiny výrazne rastie vlastná frekvencia prvého škrupinového tvaru a vlastná frekvencia ohybových tvarov rastie v rádoch stotín. Výpočet bol vykonaný pre 9 rôznych dĺžok a 5 hrúbok steny telesa. Hrúbka steny bola menená v rádoch desiatín mm. Tieto výpočty by bolo vhodné rozšíriť o výraznejšiu zmenu geometrie.

V rámci experimentu bolo teleso buď na vzduchu a úplne ponorené vo vode. Signál bol zaznamenaný snímačmi zrýchlenia a následne prevedený do frekvenčnej oblasti pomocou Fourierovej transformácie. Boli určené vlastné frekvencie telies rôznych dĺžok. Pomocou výsledkov merania na vzduchu bol overený vplyv dĺžky telesa na hodnotu vlastných frekvencií.

Experimentálne určené vlastné frekvencie ohybových tvarov sú blízke výpočtu. Vlastná frekvencia škrupinového tvaru je nižšia. Kmitaniu skutočného telesa sa najviac priblížil výpočet rúry s hrúbkou steny 1,9 mm. Reálna rúra je vyrobená z pásovej ocele a je pozdĺžne zvarená. Zvar prechádza bodom 4 podľa značenia súčiastky v tejto práci. Tuhosť vo zware nie je známa. V polohe 0 a 4 sú vyvrtané diery pre zavesenie telesa. V hornej časti telesa boli pripravené snímače zrýchlenia. Nie je známa tolerancia rozmerov a geometrie rúry. Reálne teleso bolo zavesené. Numerický výpočet tieto skutočnosti nezahŕňa. Rozdelenie skúmaného telesa na konečné prvky má vplyv na presnosť numerickej metódy [8]. Pre účely tejto práce bola používaná študentská verzia softvéru ANSYS, ktorá je obmedzená počtom prvkov. Teleso síce nemá zložitú geometriu, ale zjemnením siete by sa výsledky i tak mohli spresniť.

Z výstupu Fourierovej transformácie boli určené vlastné frekvencie pre vyhodnotenie vplyvu prostredia. Boli vytvorené závislosti vplyvu ponorenia telesa na pomer vlastných frekvencií súčiastky kmitajúcej na vzduchu a vo vode. Pomerná vlastná frekvencia s rastúcou dĺžkou súčiastky klesá. Najvýraznejší pokles vlastnej frekvencie je u prvého tvaru. Vlastná frekvencia prvého tvaru ponorených telies sa pohybuje v rozmedzí 64,1–67,9 % vlastnej frekvencie zmeranej na vzduchu.

Teleso bolo buď rázom vyvolaným človekom. Budiaca sila bola pre každé meranie iná. Skúmané teleso je rotačne symetrické. Ohybové aj škrupinové tvary majú kmitne na koncoch súčiastky. Pri experimente nebolo odlišené ktorý tvar kmitu je buď. Experiment by sa dal rozšíriť napríklad o ďalšie polohy budenia súčiastky alebo odlišným umiestnením snímačov po obvode alebo po dĺžke súčiastky.



## ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- MILÁČEK, Stanislav. *Modální analýza mechanických kmitů*. Vyd. 2. Praha: 1] Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02333-8.
- LINDHOLM, Ulric S, Daniel D KANA, Wen-Hwa CHU a H. Norman 2] ABRAMSON. SOUTHWEST RESEARCH INST SAN ANTONIO TEX DEPT OF MECHANICAL SCIENCES. *ELASTIC VIBRATION CHARACTERISTICS OF CANTILEVER PLATES IN WATER*. 1962. Dostupné také z: <http://www.dtic.mil/docs/citations/AD0643240>
- SEDLAR, Damir, Zeljan LOZINA a Damir VUČINA. Experimental investigation of 3] the added mass of the cantilever beam partially submerged in water [Eksperimentalno istraživanje dodane mase na gredi djelomično uronjenoj u vodu]. *Tehnicki Vjesnik*. 2011, **18**, 589-594.
- VU, Viet Hung, Marc THOMAS, A. LAKIS a L. MARCOUILLER. *EFFECT OF* 4] *ADDED MASS ON SUBMERGED VIBRATED PLATES*. 2007.
- ERGIN, A. a B. UğURLU. *Linear vibration analysis of cantilever plates partially* 5] *submerged in fluid*. *Journal of Fluids and Structures*. 2003, 17(7), 927-939. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0889-9746\(03\)00050-1](https://doi.org/10.1016/S0889-9746(03)00050-1). ISSN 0889-9746. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0889974603000501>
- HENGSTLER, Johannes A. N. *Influence of the Fluid-Structure Interaction on the* 6] *Vibrations of Structures*. ETH Zürich, 2013. DOI: 10.3929/ethz-a-010039229. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/20.500.11850/76519>
- BILOŠOVÁ, Alena. *Aplikovaný mechanik jako součást týmů konstruktérů a* 7] *vývojářů*. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2012. ISBN 978-80-248-2758-2.
- KUTIŠ, Vladimír, Justín MURÍN, Juraj PAULECH a Vladimír GOGA. *Metóda* 8] *konečných prvků v mechatronice I: Úvod do programu ANSYS*. 1. vydanie. Bratislava: Nakladateľstvo STU v Bratislave, 2013, 160 s.

## ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 2.1 Geometria skúmanej súčiastky .....	13
Obr. 2.2 Prvý ohybový tvar .....	14
Obr. 2.3 Druhý ohybový tvar.....	14
Obr. 2.4 Tretí ohybový tvar .....	15
Obr. 2.5 Prvý škrupinový tvar .....	15
Obr. 2.6 Druhý škrupinový tvar.....	15
Obr. 2.7 Tretí škrupinový tvar .....	16
Obr. 2.8 Štvrtý škrupinový tvar .....	16
Obr. 2.9 Piaty a šiesty škrupinový tvar.....	16
Obr. 2.10 Siedmy a ôsmy škrupinový tvar .....	17
Obr. 2.11 Deviaty a desiaty škrupinový tvar .....	17
Obr. 2.12 Deviaty a desiaty škrupinový tvar súčiastky dĺžky 300 mm (zľava: 5407,5 Hz, 5409,3 Hz) .....	17
Obr. 2.13 Vplyv dĺžky rúry na vlastné frekvencie .....	18
Obr. 2.14 Vplyv hrúbky steny rúry na vlastné frekvencie.....	19
Obr. 3.1 Polohy úderov a umiestnenia snímačov .....	20
Obr. 3.2 Meranie ponoreného telesa: a) stanica vírovej turbíny b) záhradná nádrž.....	20
Obr. 3.3 Budiace nástroje .....	21
Obr. 3.4 Značenie meraní .....	22
Obr. 3.5 Ukážka záznamu vstupného signálu.....	22
Obr. 3.6 Frekvenčná charakteristika.....	23
Obr. 3.7 Ukážka frekvenčnej charakteristiky pre prvé dve vlastné frekvencie .....	24
Obr. 4.1 Závislosť vlastnej frekvencie na zmene hrúbky steny .....	26
Obr. 4.2 Závislosť vlastnej frekvencie na dĺžke skutočnej súčiastky.....	27
Obr. 4.3 Schéma prvého škrupinového tvaru kmitu a predpokladaný pohyb snímačov	28
Obr. 4.4 Pomer vlastných frekvencií v závislosti na dĺžke rúry .....	30
Obr. 4.5 Vlastné frekvencie v závislosti na dĺžke rúry ponorenej vo vode.....	30
Obr. 4.6 Pomer vlastnej frekvencie v závislosti na poradí tvaru .....	31

## ZOZNAM TABULIEK

Tab. 2.1 Vlastnosti materiálu .....	13
Tab. 3.1 Použité snímače zrýchlenia.....	21
Tab. 3.2 Ukážka súboru hodnôt získaných po Fourierovej transformácii .....	24
Tab. 4.1 Porovnanie merania a výpočtu pre rôzne hrúbky steny .....	25
Tab. 4.2 Porovnanie vlastných frekvencií pre rôzne dĺžky .....	26
Tab. 4.3 Porovnanie vlastných frekvencií telesa v rôznych prostrediach .....	29
Tab. 4.4 Porovnanie umiestnenia tvarov odpovedajúcich podobnej hodnote.....	31