

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B 2341 Strojírenství
Studijní zaměření: Stavba energetických strojů a zařízení

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Aerodynamické vazební síly na příčně obtékanou trubkovou řadu

Autor: **Jan ZAJÍC**

Vedoucí práce: **prof. Ing. Jiří LINHART, CSc.**

Akademický rok 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan ZAJÍC**
Osobní číslo: **S11B0073P**
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Stavba energetických strojů a zařízení**
Název tématu: **Aerodynamické vazební síly na příčně obtékanou
trubkovou řadu**
Zadávací katedra: **Katedra energetických strojů a zařízení**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :


Máte za úkol:

1. Provést metodiku měření aerodynamických sil - rešerše.
2. Nakreslit výkres sestavy měřícího úseku experimentálního zařízení.
3. Provést přípravná měření - cejchování a frekvenční charakteristiky.
4. Realizovat měření při jednodimenzionálním buzení.
5. Vyhodnotit, popř. zobecnit výsledky.

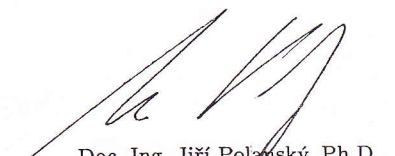
Rozsah grafických prací: 1 výkres
Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

- Horejší I., Lašová V.: Metodika měření aerodynamických sil působících na trubky ve svazku při jejich aeroelastickém buzení. Výzk. zpr. KKE-08-97
- Chen S. S., Zhu S., Jendrzejczyk J. A.: Fluid damping and fluid stiffness of a tube row in crossflow. Flow Induced Vibration PVP-Vol. 273, ASME 1994
- Kokeisl M., Linhart J.: Displacement mechanism forces in tube bundle. Sborník: 16. Světový kongres IMEKO 2000, Austrian Society for Measurement and Automation Wien, 9/2000, str. 119 - 125

Vedoucí bakalářské práce: **Prof. Ing. Jiří Linhart, CSc.**
Katedra energetických strojů a zařízení
Konzultant bakalářské práce: **Ing. Jiří Hruška**
Katedra energetických strojů a zařízení
Datum zadání bakalářské práce: **3. listopadu 2011**
Termín odevzdání bakalářské práce: **25. května 2012**


Doc. Ing. Jiří Staněk, CSc.
děkan




Doc. Ing. Jiří Polanský, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 3. října 2011

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne:

.....
podpis autora

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat prof. Ing. Jiřímu Linhartovi, Csc. za odborné vedení této bakalářské práce a Ing. Jiřímu Hruškovi za pomoc při práci na experimentálním zařízení.

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Zajíc	Jméno Jan	
STUDIJNÍ OBOR	2301R06-13 „Stavba energetických strojů a zařízení“		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) prof. Ing. Linhart, CSc.	Jméno Jiří	
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KKE		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Aerodynamické vazební síly na příčně obtékanou trubkovou řadu		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKE	ROK ODEVZD.	2012
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	55	TEXTOVÁ ČÁST	53	GRAFICKÁ ČÁST	2
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Tato práce se zabývá problematikou aerodynamických vazebních sil na příčně obtékanou trubkovou řadu, která simuluje trubkový kondenzátor. Zahrnuje jednak popis experimentálního zařízení, ale také teoretickou část, v které se pojednává o přípravných měřeních. Cílem je zprovoznit experimentální zařízení a realizovat měření při jednodimenzionálním buzení.</p>
<p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p style="text-align: center;">ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p style="text-align: center;">vibrační uzel, trubková řada, kalibrace, vazební koeficienty, jednodimenzionální buzení</p>

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Zajíc	Name Jan	
FIELD OF STUDY	2301R06-13 „Stavba energetických strojů a zařízení“		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) prof. Ing. Linhart, CSc.	Name Jiří	
INSTITUTION	ZČU - FST - KKE		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Aerodynamic couple forces acting on the transversely overflowed row of tubes		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Design of Power Machines and Equipment	SUBMITTED IN	2012
----------------	------------------------	-------------------	--	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	55	TEXT PART	53	GRAPHICAL PART	2
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	This thesis focuses on the problematic of aerodynamic binding forces on pipe line with a transverse airflow, which simulates pipe condenser. The thesis includes the experimental device description and theoretical part, which clarifies the preparatory experiments. The experimental part and the goal of the thesis, is to make the device functional and realize one-dimensional excitation measurements.
KEY WORDS	vibration node, pipe line, calibration, binding coefficients, one-dimensional excitation

Obsah

1. Úvod	7
2. Aerodynamický tunel	8
2.1. Vibrační uzel.....	9
2.1.1. Krokový motor	9
2.1.2. Paralelogram.....	10
2.1.3. Elektrodynamický vibrátor.....	10
2.1.4. Držák trubky a destičky.....	11
2.1.5. Bezdotykový měřič výchylky.....	12
2.1.6. Maketa - trubka	12
2.1.7. Závaží.....	13
2.2. Rám.....	13
2.3. Vstup proudu vzduchu.....	13
2.4. Měřicí prostor	13
2.5. Výstup proudu vzduchu.....	14
2.6. Příslušenství.....	14
2.6.1. Prandtlova trubice	15
2.6.2. Generátor sinusového signálu	16
2.6.3. Napájecí zdroj magnetizačních cívek.....	16
3. Metodika měření.....	16
3.1. Přípravná měření.....	16
3.1.1. Rezonanční frekvence	16
3.1.2. Frekvenční charakteristika	17
3.1.3. Kalibrace	18
3.2. Stanovení vazebních koeficientů	20
3.2.1. Měření při jednodimenzionálním buzení	26
3.2.2. Výpočet aerodynamických vazebních koeficientů.....	27
4. Závěr.....	32
5. Seznam použité literatury	33
6. Seznam příloh	34
6.1. Záznam frekvenční charakteristiky – číslo 1	34
6.2. Záznam z kalibrace – číslo 2	35
6.3. Měření při jednodimenzionálním buzení – číslo 3	36
6.4. Výpočty – číslo 4.....	50

1. Úvod

V dnešní době, kdy je potřeba stále většího množství energie, jsou kladeny vysoké nároky na vlastnosti zařízení, která energii vytváří. Jedním z velice tepelně a mechanicky namáhaných, ale nezbytných zařízení, jsou trubkové kondenzátory u parních turbín. U trubkových kondenzátorů se často potýkáme s mnoha závažnými problémy. Jedním z nich je, že dochází k nežádoucímu poškozování kondenzačních trubek, které praskají a poškozují se vlivem vibrací.

Tyto vibrace vznikají silovým působením trubek na ostatní ve svazku, ale i na sebe samu. Rozlišujeme dva hlavní aerodynamické mechanismy způsobující vibrace ve svazku trubek výměníků. První z nich je aeroelastický mechanismus a druhé jsou turbulentní poryvy. Základem aeroelastického mechanismu je to, že pokud je trubka odkloněna ze své normální pozice ve svazku, pak se tok proudu vzduchu v jejím okolí změní. Tím vzrůstá na jedné straně tlak a rychlost. Důsledkem je doplňková síla, která může zlepšit anebo naopak zhoršit původní výchylku zkoumané trubky, ale stejně tak dobře to platí i pro sousední trubky. To znamená, že malé vibrační výchylky jsou zesílené nebo zeslabené. První případ je nebezpečný, protože způsobí sinovou vibraci velkých amplitud, což může zakrátko poškodit strukturu. Naopak poryvy jsou vyvolány náhodným kolísáním rychlosti a tlaku, což je dáno turbulentními víry, které vznikají průtokem mezi trubkami ve svazku. Příslušné vibrace trubek jsou také obvykle náhodné s různou amplitudou a frekvencí. Díky tomu jsou slabé. Pokud bychom chtěli rozlišit aeroelastický mechanismus a poryvy, vezmeme v úvahu fakt, že první druh vibrace je určen, zatímco poryvy jsou náhodné. V mé práci se budeme zabývat pouze aeroelastickým mechanismem aerodynamických sil.

V teoretické části práce se pokusím seznámit s jednotlivými částmi aerodynamického zařízení a s jejich důležitými funkcemi pro vlastní měření. Následně se budu zabývat metodikou měření aerodynamických vazebních sil na příčně obtékanou trubkovou řadu. V praktické části se pokusím využít znalostí z teoretické části pro vlastní měření. Text bude doplněn o mé vlastní poznámky, které by mohly být nápomocné všem, kteří se budou touto problematikou na experimentálním zařízení v budoucnu zabývat.

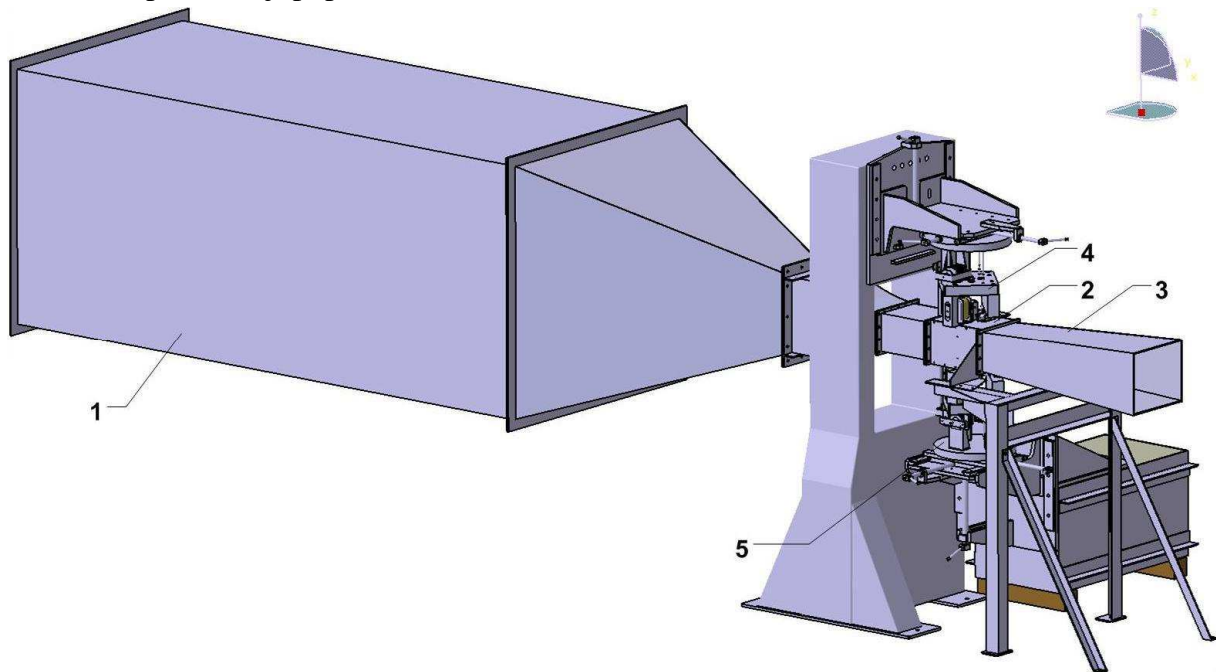
Hlavním cílem práce je uvést tento aerodynamický tunel do provozuschopného stavu, provést přípravná měření a poté realizovat měření při jednodimenzionálním buzení. Závěrem práce se budu zabývat zpracováním, vyhodnocením a popřípadě zobecněním výsledků.

2. Aerodynamický tunel

Aerodynamický tunel umožňuje vytvořit a ovládat proud vzduchu, který se pohybuje kolem předmětů (překážek). Ovládním aerodynamického tunelu lze regulovat parametry vzduchu. U předmětů se naskýtá možnost změn vstupních parametrů (drsnost povrchu, ostrost hran, sklon a velikost ploch, atd.). Tím se dokáže simulovat jakákoliv situace, které může nastat v praxi. Skutečná zařízení a části strojů, u kterých chceme zjistit jejich aerodynamické vlastnosti, se nahrazují ve většině případů jejich zmenšenými modely. Použitím modelů se snižuje možnost finančních ztrát na strojích a zařízeních a zvyšuje se bezpečnost provozu a obsluhy. Tato zařízení slouží ve většině případů pro experimentální zjišťování aerodynamických vlastností těles.

Aerodynamický tunel, na kterém je prováděno mé měření, vznikl v laboratoři Katedry energetických strojů a zařízení Západočeské univerzity v Plzni před několika lety. Toto zařízení slouží pro výzkum kmitání trubek na modelu kondenzačních trubek, které jsou součástí zařízení. Aerodynamický tunel má otevřený okruh. To znamená, že nasává vzduch z vnějšku a po průchodu tunelem se nevrací zpět do tunelu, ale je vyfukován ven.

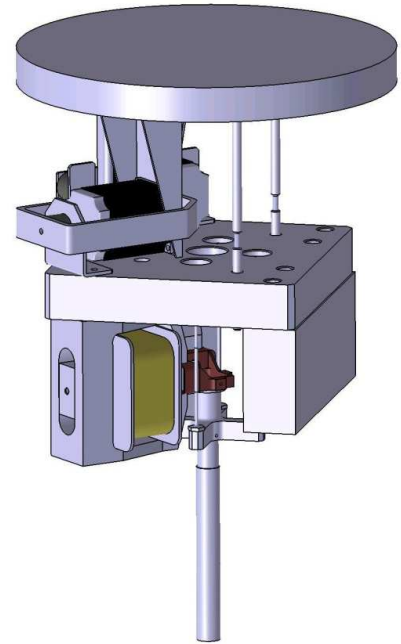
Celé zařízení (Obr. 2-1) se skládá z několika důležitých částí, bez kterých by nepracovalo správně. První z nich je vstup pro proud vzduchu (1), kde dochází k ustálení a zrychlení proudícího vzduchu a zároveň tím dojde k vyrovnání profilu. Další částí, kam se dostává proud vzduchu, je měřicí prostor (2) se 7 trubkovými maketami, z nichž 2 jsou pohyblivé. Dalších 5 je přichycených napevno. Nakonec se vzduch vyfukuje ven výstupem pro proud vzduchu (3). Ke každé pohyblivé maketě je přichycen jeden vibrační uzel, který umožňuje jejich pohyb. Horní vibrační uzel (5) je přichycen k masivnímu rámu, kterým vede celý tunel. Dolní vibrační uzel (4) je přichycen k betonové kostce umístěné vpravo dole. Tyto základní části budu podrobněji popisovat v textu níže.



Obr. 2 - 1 Experimentální zařízení

2.1. Vibrační uzel

Jednou z nejdůležitějších částí celého zařízení je vibrační uzel připevněný k masivnímu rámu. Na celém zařízení jsou umístěny takovéto dva vibrační uzly (Obr. 2-2). Každá pohyblivá maketa trubky je pevně přichycena k jednomu z vibračních uzlů.



Obr. 2 - 2 Vibrační uzel

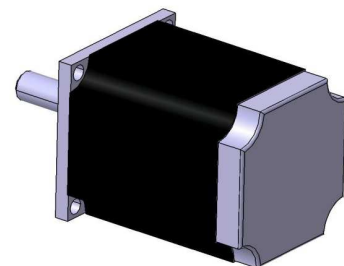
Vibrační uzel vykonává několik důležitých funkcí:

- První z nich je, že umožňuje rozkmitat trubku při téže frekvenci o stejné amplitudě výchylek ve dvou vzájemně kolmých směrech, to zaručuje pohyb trubky po kružnici.
- Pokud se nastaví různá amplituda výchylek, pak se trubka může pohybovat po trajektorii ve tvaru elipsy.
- Dalším pohybem, který lze simulovat vibračním uzlem, je pohyb po přímkové trajektorii. Toho se docílí tak, že v jednom směru probíhá pohyb a v druhém směru je pohyb nulový, brzděný příslušným vibrátorem.
- Na spodní straně nosné hlavice trubky je závitová tyč, na kterou lze namontovat přídatná závaží, kterými se ladí vlastní frekvence příslušného vibračního uzlu, ale také nám umožňuje změřit dynamické cejchovní síly vibrátoru v závislosti na cívkovém proudu.

Celý vibrační uzel se skládá z několika částí. Jsou to 2 krokové motory, 4 paralelogramy, 2 elektrodynamické vibrátory, 2 bezdotykové měřiče výchylek, držák trubky a destičky, trubky a závaží.

2.1.1. Krokový motor

Statickou výchylku pružně uložené trubky, oproti pevným trubkám v řadě nebo svazku, která je způsobena proudícím vzduchem, odstraňují dva krokové motory, které posouvají masivní základnu vibračního uzlu zpět proti směru proudění nebo napříč. První krokový motor je určen pro směr x a druhý pro směr y . Každý krokový motor (Obr. 2-3) má svoji řídicí jednotku, která se ovládá z počítače umístěného u měřícího zařízení. To platí i pro druhý vibrační uzel.



Obr. 2 - 3 Krokový motor

Bohužel zdroj, kterým se napájí tyto jednotky, je příliš slabý,

proto musíme napájet vždy jen dva krokové motory současně, jinak hrozí zničení pojistek u zdroje. Jedním z nejlepších řešení je napájet krokový motor pro stejný směr u obou pohyblivých maket současně, tím se zjednoduší regulace pohyblivých maket při proudění. Měření ukázalo, že proud vzduchu nejvíce vychyluje pohyblivé trubky ve směru proudění, z toho vyplývá, že se musí obě trubky vracet ve stejném směru, proto je výhodné mít takto zapojené krokové motory. Touto problematikou, týkající se odstranění statické výchytky při proudění, se zabývá podrobně jiná bakalářská práce.

2.1.2. Paralelogram

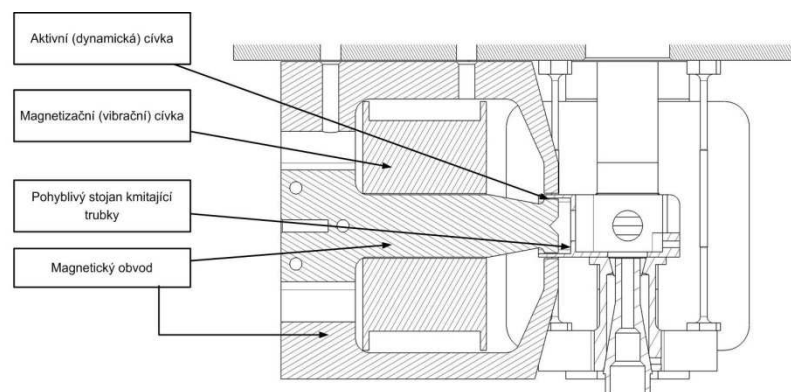
Na každém vibračním uzlu jsou namontovány 4 paralelogramy. Ty zajišťují, že trubka kmitá v obou směrech planoparalelně, což je dáno konstrukcí složenou ze dvou paralelogramů pro každý ze směrů. (1) Paralelogramy (Obr. 2-4) jsou vyrobeny z kvalitní pružné oceli. Před každým měřením by se mělo zkontrolovat, zda nejsou paralelogramy poškozené nebo dokonce prasklé. Důležité je dbát při montáži na to, aby byly namontovány pro každý vibrační uzel stejné paralelogramy. Ty nám ovlivňují vlastní frekvenci makety v jednotlivých směrech. Dříve měla střední část čtvercový průřez, dnes má již kruhový průřez. To je výhodnější pro nastavení vlastní frekvence makety, které se provádí mírným zabrušováním kolmo na směr pohybu.



Obr. 2 - 4 Paralelogram

2.1.3. Elektrodynamický vibrátor

Vlastním výkonovým členem je převodník. Ten převádí proud, který přichází z výkonového zesilovače na sílu způsobující vlastní pohyb trubky. Na obr. 2-5 je schematicky znázorněn v řezu. Skládá se z magnetického obvodu, který je označen šrafováním, a ze dvou cívek, které tvoří vlastní část měniče. Ten funguje následovně.

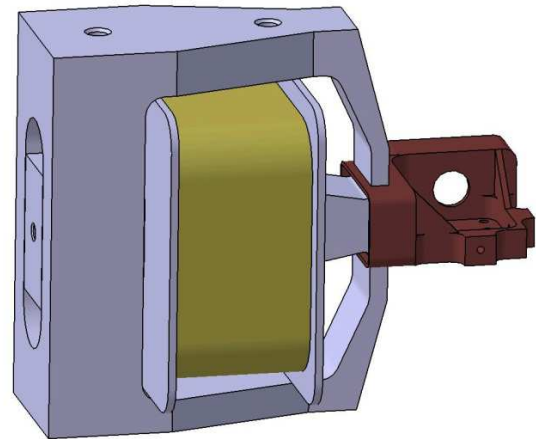


Obr. 2 - 5 Převodník

Na pohyblivém stojanu kmitající trubky je připevněna aktivní cívka, která je umístěna v homogenním magnetickém poli s magnetickou indukcí B . Stabilní magnetizační cívka vsazená do magnetického obvodu vybudí tuto magnetickou indukci B . Na aktivní cívku působí síla, která je rovna součinu magnetické indukce, proudu protékajícího aktivní cívkou a délky vodiče navinutého na aktivní cívce. Pro představu - měnič pracuje na stejném principu jako reproduktor v audiotechnice.

Vibrační cívky u obou vibračních uzlů mají obdélníkový tvar (Obr. 2-6), čímž není magnetické pole narušeno příčnými pohyby, tak jako je tomu u válcových cívek. Tímto konstrukčním řešením se zamezuje ovlivnění jednoho elektrodynamického vibrátoru druhým v rámci jednoho vibračního uzlu.

Vibračními cívkami prochází elektrické proudy. Ty jsou ocejchované na síly buzené dynamickými vibrátory. Při měření aerodynamických sil se vychází z rovnosti aerodynamické síly a síly vibrátoru, přičemž sílu vibrátoru měříme. Aby se tyto síly rovnaly, musí se pohyblivá trubka svým vibrátorem uvést do klidu, což je znakem této rovnosti. K tomu musíme být schopni nastavit a měnit frekvenci, amplitudu a fázi budícího elektrického proudu.



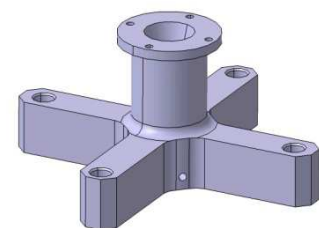
Obr. 2 - 6 Vibrační cívky

Zajištění konstantní předepsané vibrace v průběhu i poměrně dlouhého času, který proběhne mezi měřením s proudícím a neproudícím vzduchem, popř. s kapalnou vodou, se docílí regulací proudu pohyblivé cívky. Oteplování všech 4 stejnosměrných cívek způsobuje změnu odporů vinutí, tím proudů, intenzit magnetických polí a nakonec dynamických sil v průběhu času, proto je nutné regulovat i proudy, které je napájí. Při vlastním měření je vhodné po zapnutí počkat na prohřátí cívek přibližně 20 minut, jinak hrozí chybné měření.

Eliminace nežádoucích nahodilých turbulentních sil se provádí regulací odezvového proudu v cívkách, jimiž se ale tato práce nezabývá.

2.1.4. Držák trubky a destičky

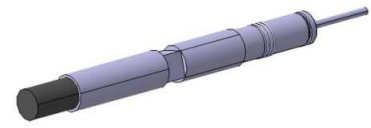
Další částí je držák trubky a podložky (Obr. 2-7), do níž se kotví trubka. Ten slouží k měření výchylek vibrací v obou směrech pomocí bezdotykového čidla výchylek. Na držáku jsou přišroubované ocelové destičky s potřebnou účinnou plochou. Držák trubky zajišťuje spojení se základnou vibrátoru paralelogramy a také s aktivními cívkami pro vlastní pohyb trubky.



Obr. 2 - 7 Držák trubky a podložky

2.1.5. Bezdotykový měřič výchylky

Pro kontrolu rozměrů a dalších veličin, které lze na měření vzdálenosti převést, avšak zejména tam, kde je potřeba zjišťovat rychlé, dynamické změny vzdálenosti nebo kde nesmí na měřený objekt působit žádné síly, tam se používají senzory pro bezdotykové měření vzdálenosti (Obr. 2-8).



Obr. 2 - 8 Bezdotykový měřič výchylky

Ke klasickým metodám pro bezdotykové měření vzdálenosti patří elektromagnetické systémy pracující na bázi vířivých proudů, které v našem případě vznikají v destičce připevněné k držáku. Nastavení senzoru na správnou vzdálenost od destičky probíhá tak, že se nastaví na určitou vzdálenost od podložky a měří se napětí. Pro správné nastavení výchozí polohy se na voltmetru naměří nulové napětí. To opakujeme pro zbylé bezdotykové měřiče výchylek. Tím dostaneme přesnou polohu pro všechny bezdotykové měřiče výchylek.

2.1.6. Maketa - trubka

Trubky slouží jako makety kondenzačních trubek v kondenzátoru. Do celého měřicího prostoru zařízení je umístěno 7 trubek, z nichž 5 je namontováno napevno (obr. 2-9). Zbylé 2 trubky jsou umístěny do řady, ale zároveň jsou připevněny k vibračnímu uzlu. Ten jim umožňuje pohyb, jak jsem již zmínil u vlastností vibračního uzlu. Aby se maketa trubky při výchylkách neohýbala, je vyrobena z duralu. Navíc se tloušťka stěny směrem k volnému konci zmenšuje, jak je patrné z řezu trubky na obr. 2-10. Všechny trubky vytvářejí trubkovou řadu, která je příčně obtékána proudem plynu, v našem případě vzduchem.

Při montáži se musí dbát na několik zásadních věcí, které mohou ovlivnit celý průběh měření. První z nich je nastavení všech 7 maket do jedné řady se stejně velikými roztečemi mezi jednotlivými trubkovými maketami. Pro zjištění těchto vzdáleností se nachází u měřicího zařízení měřka s parametry, kdy se jeden dílek rovná 0,5 mm. Další věc, na kterou je třeba dát pozor, je kolmost pohyblivých maket vzhledem k měřicímu úseku a vzdálenost volného konce pohyblivé makety od stěny, která by měla být v řádech desetin milimetru. Pokud se vše zkontroluje a neshledá se, že se v nějakém kroku pochybilo, zvolí se tato poloha jako referenční. Té se využije v pozdější době při měření s proudem vzduchu k odstranění statické výchylky.



Obr. 2 - 9 Pevná trubka



Obr. 2 - 10 Pohyblivá trubka

2.1.7. Závaží

Ke spodní straně nosné hlavice trubky, na které je závitová tyč, se přidává závaží. Tím se způsobuje změna vlastní frekvence. Zvýšení hmotnosti snižuje vlastní frekvenci. Pro tento případ se vyberou 3 matice o stejné hmotnosti 2,13 g, které se před začátkem zkontrolují, abychom zjistili, zda mají stejnou hmotnost. Pro našroubování matic na závitovou tyč doporučuji vypnout zdroj pro budící cívky. Ten vytváří v blízkém okolí silné magnetické pole a tím znesnadňuje jejich montáž a demontáž.

2.2. Rám

Přenos energie konstrukcí z jednoho vibračního uzlu na druhý je zamezen jednak naprosto oddělenými základnami, tak také frekvenčně nízko laděnými podporami. Frekvence podpor je okolo 1 Hz, zatímco pracovní frekvence vibračního uzlu je okolo 45 Hz. K betonové kostce umístěné vpravo dole je připevněn dolní vibrační uzel, zatímco horní je připevněn k masivnímu rámu vylitému betonem.

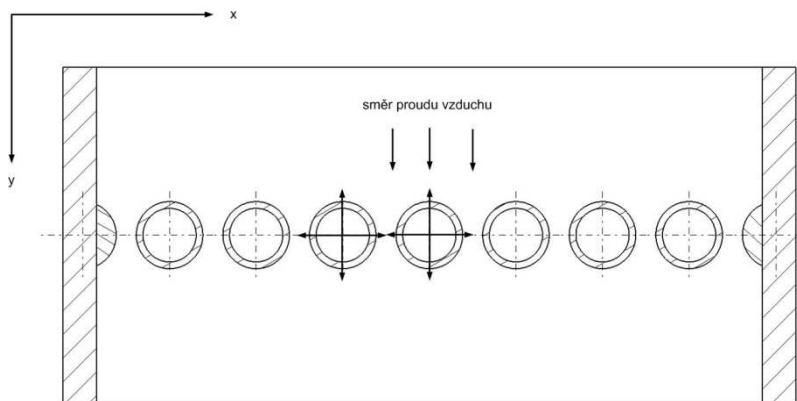
2.3. Vstup proudu vzduchu

Vstup proudu vzduchu je tvořen rozměrným prostorem. V první části se nachází desky ve směru proudu vzduchu, naproti tomu v druhé části jsou do prostoru vložena síta s různými velikostmi ok seřazených od největších po nejmenější, jež jsou umístěna kolmo na směr proudění. Tím dochází k ustálení nasátého rozvířeného proudu vzduchu. Tento vzduch prochází zužující dýzou a následně konfuzorem, ve kterých dochází ke zrychlení proudu vzduchu před vstupem do měřicího prostoru. U vstupu se nachází páka pro ovládání klapky pro regulaci množství vzduchu. Funguje na principu bypassu, kdy dochází k odklonění části proudu vzduchu ven z tunelu. Velkým problémem při měření je možnost dostat se na nízké rychlosti. Při otevřené klapce a minimální hodnotě otáček motoru se dostaneme na rychlost okolo 40 m/s v trubkové mezeře. Při pokusech o snížení rychlosti klapkou při minimálních otáčkách docházelo k velkému kolísání rychlosti, což je pro naše měření nepřijatelné. Rád bych se ještě zmínil o ovládání vlastního zařízení, které nasává vzduch. Prvním krokem je otočení spínacího klíče o 90°, poté musíme zapnout olejové čerpadlo a vyčkat do doby, dokud ve skleněné trubici olej nevystoupá nad určenou rysku. Pak lze spustit motor. Samotné ovládání rychlosti je jednoduché, stačí jen přidávat či ubírat otáčky podle požadavků obsluhy.

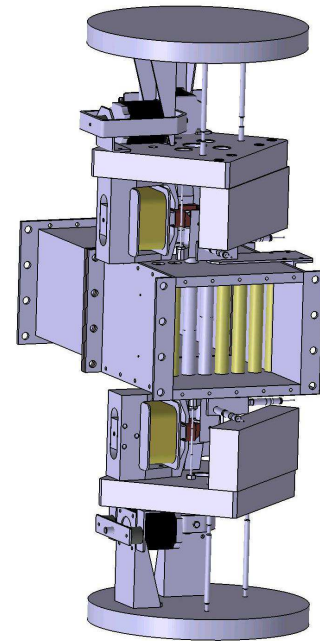
2.4. Měřicí prostor

V měřicím prostoru dochází k prudkému nárazu proudu vzduchu do řady trubek. Tento proud vzduchu staticky vychyluje pohyblivé trubky z trubkové řady, proto je potřeba vrátit je krokovými motory zpět. Před trubkovou řadou ve vzdálenosti 20mm je ze strany vyvrtaný otvor pro Prandtlovu trubici, na které se měří statický a celkový tlak. Kromě 7 trubkových maket jsou na stěnách měřicího prostoru přišroubovány ještě 2 fragmenty trubek, aby proud vzduchu na stěnách nestráhal proud vzduchu od trubek.

Celý měřicí prostor (Obr. 2-11) je uchycen na samostatné konstrukci, která není nijak spojena s žádnou jinou částí, respektive s žádným ze dvou rámu vibračních uzlů. Tím se docílí co nejmenšího přenosu vibrací na měřicí úsek, ke kterému jsou držáky pro bezdotykové měřiče vzdálenosti připojeny. Orientace os v měřicím prostoru je nastíněna na obr. 2-12.



Obr. 2 - 11 Řez měřicím prostorem s orientací os



Obr. 2 - 12 Měřicí prostor

2.5. Výstup proudu vzduchu

Výstup proudu vzduchu je tvořen difuzorem, kde dochází ke snížení rychlosti a zároveň k částečné stabilitě proudu vzduchu po průchodu měřicím prostorem. U prvních pokusů měření nebyl tento díl namontován a docházelo k velikým vzduchovým propadům za trubkovou řadou, což způsobovalo chyby při měření. Tyto propady si vysvětlují jednak mírnými změnami v roztečích mezi trubkami, které nejsme schopni přesně nastavit, ale hlavně rychlým roztržením proudu vzduchu hned za měřicím úsekem. Po montáži této části na zařízení došlo k mírnému zlepšení. Nevýhodou této namontované části je téměř nemožná kontrola trubkové řady, proto doporučuji pečlivé změřením a nastavení všech trubek do jedné řady se stejnými roztečemi a pak až následnou montáž.

2.6. Příslušenství

K celému zařízení se musí připojit několik důležitých přístrojů pro sběr, zpracování a vyhodnocení naměřených dat. Jsou to Prandtlova trubice, generátor sinusového signálu, regulátor amplitudy kmitání, měřicí ústředna Hewlett Packard, napájecí zdroj magnetizačních cívek, napájecí zdroj ostatních částí systému a řídicí počítač. O některých podstatných částech se dále zmíním.

2.6.1. Prandtlůva trubice

Slouží jednak k měření celkového tlaku p_c , jednak k měření statického tlaku p_s , jak je patrné z obr. 2-13. Prandtlůva trubice je trubice, která je na konci zahnutá o 90° . Na jejím konci je otvor, který směřuje proti proudu vzduchu. Po obvodu trubice, na straně, kde je i otvor pro statický tlak, jsou vyvrtané otvory kolmo na stěnu. Tím se měří statický tlak. Druhý konec je připojený na elektronická čidla. Jednoduchými výpočty lze dosáhnout z těchto parametrů rychlosti proudu vzduchu 20mm před trubkovou řadou, která se použije pro výpočty rychlosti v trubkové mezeře.

Vychází se ze znalosti celkového tlaku, který se rovná součtu dynamického tlaku a statického tlaku.

$$p_c = p_d + p_s \quad (1)$$

Kde: p_s ... statický tlak [Pa]
 p_c ... celkový tlak [Pa]
 p_d ... dynamický tlak [Pa]

Pokud se do stavové rovnice dosadí za měrný objem měrná hustota, dostane se vztah ve tvaru:

$$\rho = \frac{p_s}{r \cdot T} \quad (2)$$

Kde: r ... plynová konstanta vzduchu [J/kgK] ($r = 287,04$ J/kgK)
 T ... absolutní teplota vzduchu [K]

Nyní se rozepíše dynamický tlak na součin měrné hustoty a poloviny kvadrátu rychlosti, pak se dostane rovnice ve tvaru:

$$p_d = \rho \cdot \frac{w^2}{2} + p_s \quad (3)$$

Kde: ρ ... hustota vzduchu [kg/m^3]

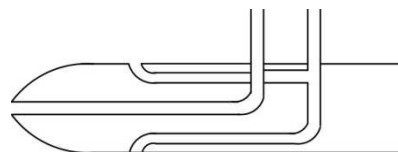
Po matematické úpravě se na levé straně nachází pouze tlaky a na pravé straně rychlosti.

$$p_d = p_c - p_s = \rho \cdot \frac{w^2}{2} \quad (4)$$

Nyní se vyjádří rychlost a za hustotu se dosadí rovnice (2), pak se dostane konečný vzorec pro výpočet rychlosti proudu vzduchu.

$$w = \sqrt{\frac{2 \cdot (p_c - p_s)}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot p_d}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot p_d \cdot r \cdot T}{p_s}} \quad (5)$$

Kde: w ... rychlost [m/s^{-1}]



Obr. 2 - 13 Schéma Prandtlovy trubice

2.6.2. Generátor sinusového signálu

Je to digitální zařízení, které generuje pravidelné signály. Pro naše měření použijeme možnost generace sinusového signálu. Velkou výhodou je možnost nastavení budící frekvence na 3 desetinná místa.

2.6.3. Napájecí zdroj magnetizačních cívek

U zdroje stejnosměrného proudu, který napájí magnetizační cívky, se proud nastavuje jednotlivě pro každou cívku zvlášť na hodnotu 0,5 A. V průběhu času může dojít k mírnému poklesu, stačí jen vyrovnat zpět na určenou hodnotu.

3. Metodika měření

Před samotným měřením při jednodimenzionálním buzení se musí udělat několik důležitých přípravných měření. První věcí, která se provede na měřicím zařízení, je zjištění rezonanční frekvence pro všechny čtyři směry a jejich následné srovnání na stejnou rezonanční frekvenci. Poté následuje změření frekvenční charakteristiky pro oba vibrační uzly v obou směrech. Následuje kalibrace, z které se dostanou cejchovní konstanty a fáze. Pro zjištění vazebních koeficientů se musí provést měření při proudění a bez proudění při jednodimenzionálním buzení.

3.1. Přípravná měření

3.1.1. Rezonanční frekvence

Předpokládá se, že makety pohyblivých trubek v jednotlivých směrech mají různou rezonanční frekvenci. Pro měření je důležité, aby měly všechny čtyři směry stejnou rezonanční frekvenci. Toho se docílí, pokud se změří frekvence při fázi 90° a výchylce 0,4mm. Pak se zaznamenají jednotlivé hodnoty. Po zjištění, že rezonanční frekvence nemají stejné hodnoty, musí dojít k jejich srovnání na stejnou úroveň. Za referenční hodnotu se zvolí nejnižší hodnota. Frekvence pro ostatní směry se snižuje jemným zabroušením paralelogramů. Po prvotním změření a následném zbroušení byly naměřeny tyto hodnoty:

proud [A]	frekvence proudu f_I [Hz]	výchylka y [mm]	frekvence výchylky F_y [Hz]	fáze f_i [°]	poměr y/I [m/A]
0,07254	45,2587	0,4001	45,2562	89,9594	5,515
0,07007	45,2553	0,4006	45,2531	90,022	5,718
0,07905	45,2529	0,4003	45,2563	90,049	5,064
0,07283	45,2539	0,3997	45,2557	90,0701	5,488

Je patrné, že srovnání rezonančních frekvencí proběhlo v pořádku, proto se může pokračovat v dalších přípravných měřeních.

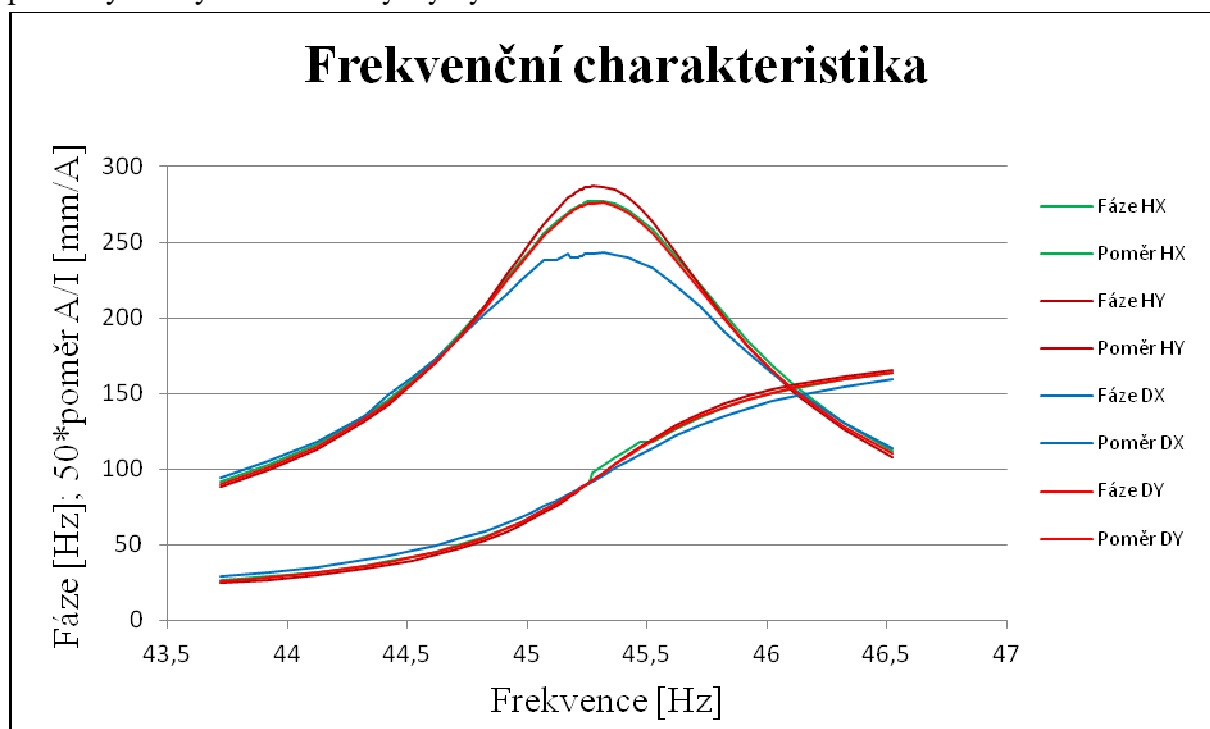
3.1.2. Frekvenční charakteristika

Cílem dalšího provedeného kroku bylo zjistit frekvenční charakteristiku obou pohyblivých maket pro směr x a y . Toto měření pobíhalo následovně:

- Nastavení frekvence buzení pro horní trubku ve směru x na hodnotu 43,720 Hz (pohyb v ostatních směrech zastavován příslušnými vibrátory)
- Nastavení výchylky na 0,4 mm (výchylka větší než 0,5mm způsobuje nevratné změny paralelogramů)
- Zaznamenání: fáze a proud potřebný k vytvoření výchylky
- Opakovat do hodnoty 46,520 Hz s následujícími kroky:

Od frekvence [Hz]	Do frekvence [Hz]	S krokem [Hz]
43,72	44,32	0,2
44,32	44,92	0,1
44,92	45,17	0,05
45,17	45,27	0,01
45,27	45,52	0,05
45,52	46,12	0,1
46,12	46,52	0,2

Celý postup byl opakován pro všechny čtyři směry. Výsledkem byla data, která jsou pro přehlednost zpracována do grafu. Samotná data jsou v příloze číslo 1. V grafu je vidět na ose x frekvence a na ose y hodnota fáze a zároveň 50x zvětšený poměr mezi výchylkou a proudem potřebným k vytvoření této výchylky.



Graf 1 Frekvenční charakteristika

Z grafu vyplývá, že vlastní (rezonanční) frekvence se srovnaly na téměř stejné hodnoty u všech čtyř směrů, to nám zjednoduší měření. Frekvenční charakteristika se dělala z důvodu pozdějšího snazšího zvolení frekvence při kalibraci a při jednodimenzionálním buzení.

3.1.3. Kalibrace

Hlavním cílem kalibrace je stanovit cejchovní konstanty K a fáze φ pro směr x a y pro horní a dolní vibrační uzel. Toho se docílí, když se rozkmitá trubková maketa v klidném prostředí bez závaží o hmotnosti m a posléze s přídatným závažím o hmotnosti Δm . V našem případě byla zvolena hned trojice závaží. Při všech měřeních udržuje regulátor stejnou frekvenci, fázi a amplitudu.

Na následujících řádcích se uvádí systém výpočtů pro zjištění cejchovních konstant a fází.

Rovnice (7) udává zvýšenou hmotnost. Pohybové rovnice obou případů jsou (8) a (9). Jestliže se od sebe odečtou rovnice (8) a (9), dostane se rovnice (10). Následným dosazením rovnice (7) do rovnice (10) se dojde k rovnici (11).

$$m_{\Delta} = m + \Delta m \quad (7)$$

$$(m_{\Delta} + \rho S m_{00}^{yy}) \ddot{y} + b \dot{y} + k y = F_{\Delta} \quad (8)$$

$$(m + \rho S m_{00}^{yy}) \ddot{y} + b \dot{y} + k y = F \quad (9)$$

$$(m_{\Delta} - m) \ddot{y} = F_{\Delta} - F \quad (10)$$

$$\Delta m \cdot \ddot{y} = F_{\Delta} - F \quad (11)$$

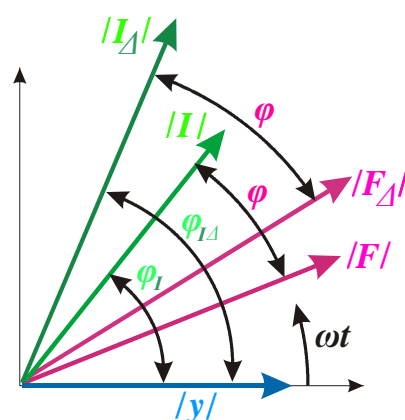
Předpokládá se, že při provozním stavu proud I ve střídavé cívce předchází sílu vibrátoru F a ta výchylku makety y dle schematického fázového diagramu na obr. 3-1.

Při matematickém vyjádření se bere za základ výchylka podle vyjádření rovnic (12) až (14).

$$y = |y| e^{i\omega t} \quad (12)$$

$$I = |I| e^{i(\omega t + \varphi_I)} \quad (13)$$

$$F = |F| e^{i(\omega t + \varphi_I - \varphi)} = K |I| e^{i(\omega t + \varphi_I - \varphi)} \quad (14)$$



Obr. 3 - 1 Schéma fázového diagramu

Přidáním Δm se změní tento stav vibrací, což při nezměněném proudu $|I|$ a tedy i síle vibrátoru $|F|$ způsobí změnu výchylky $|y|$ na $|y_{\Delta}|$, fáze φ_I na $\varphi_{I\Delta}$, zatímco zdrojem střídavého napětí se podrží ω a také φ se nezmění.

Aby se $|y_{\nabla}|$ vrátilo na původní velikost $|y|$, musí se dosavadní $|I|$ přestavit na $|I_{\Delta}|$, tím se $|F|$ změní na $|F_{\Delta}|$, $\varphi_{I\nabla}$ na $\varphi_{I\Delta}$, ω a φ se předpokládá stejné.

Nový stav vibrací je popsán následujícími rovnicemi:

$$y = |y|e^{i\omega t} \quad (15)$$

$$I_{\Delta} = |I_{\Delta}|e^{i(\omega t + \varphi_{I\Delta})} \quad (16)$$

$$F_{\Delta} = K|I_{\Delta}|e^{i(\omega t + \varphi_{I\Delta} - \varphi)} \quad (17)$$

Požadované konstanty K a fáze φ , se dostanou, když se do výchozí rovnice (11) dosadí rovnice (12), (14) a (16). Tím se obdrží rovnice (18), respektive (19).

$$\Delta m|y|e^{i\omega t}(-\omega^2) = K|I_{\Delta}|e^{i(\omega t + \varphi_{I\Delta} - \varphi)} - K|I|e^{i(\omega t + \varphi_I - \varphi)} \quad (18)$$

$$\Delta m|y|(-\omega^2) = K e^{-i\varphi} \left[|I_{\Delta}|e^{i\varphi_{I\Delta}} - |I|e^{i\varphi_I} \right] \left[\frac{I}{K} e^{i\varphi} \frac{1}{\Delta m|y|(-\omega^2)} \right] \quad (19)$$

Nyní se tyto rovnice upraví, tím dostaneme rovnice (20) respektive (21).

$$\frac{I}{K} e^{i\varphi} = -\frac{|I_{\Delta}|e^{i\varphi_{I\Delta}} - |I|e^{i\varphi_I}}{\Delta m|y|\omega^2} = \frac{|I|e^{i\varphi_I} - |I_{\Delta}|e^{i\varphi_{I\Delta}}}{\Delta m|y|\omega^2} \quad (20)$$

$$\frac{I}{K}(\cos \varphi + i \sin \varphi) = \frac{I}{\Delta m|y|\omega^2} \left[|I|(\cos \varphi_I + i \sin \varphi_I) - |I_{\Delta}|(\cos \varphi_{I\Delta} + i \sin \varphi_{I\Delta}) \right] \quad (21)$$

Když se porovnájí reálné části a imaginární části v rovnici (21) a zavede se za ně substituce A a B , vypočte se ze součtu jejich kvadrátů konstanta K podle rovnice (24) a z podílu B/A fáze φ , viz rovnice (24) a (25).

$$\text{Reálné části: } \frac{I}{K} \cos \varphi = \frac{I}{\Delta m|y|\omega^2} \left[|I| \cos \varphi_I - |I_{\Delta}| \cos \varphi_{I\Delta} \right] = A \quad (22)$$

$$\text{Imagin. části: } \frac{I}{K} \sin \varphi = \frac{I}{\Delta m|y|\omega^2} \left[|I| \sin \varphi_I - |I_{\Delta}| \sin \varphi_{I\Delta} \right] = B \quad (23)$$

$$\frac{I}{K^2} = A^2 + B^2 \quad \Rightarrow \quad K = \pm \frac{I}{\sqrt{A^2 + B^2}} \quad (24)$$

$$\text{tg } \varphi = \frac{B}{A} \quad \Rightarrow \quad \varphi = \text{arctg } \frac{B}{A} \quad (25)$$

Po kalibraci byla zaznamenána data, která se zpracovala pro přehlednost do tabulek. Zbylé hodnoty jsou součástí přílohy číslo 2.

Cejchovní konstanty při různých přídavných hmotnostech K_x pro směr x a K_y pro směr y

	Kx		Ky	
Horní trubková maketa	2,13g	5,063	2,13g	3,830
	4,26g	4,491	4,26g	3,826
	6,39g	4,227	6,39g	3,976
Dolní trubková maketa	2,13g	3,757	2,13g	3,810
	4,26g	4,125	4,26g	3,790
	6,39g	4,066	6,39g	3,716

Z nich je patrné, že cejchovní konstanty pro horní i dolní trubku ve směru y se téměř nemění. Naopak ve směru x u obou trubek došlo k mírným změnám. Proto jsme pro jejich další použití vypočítali aritmetický průměr jednotlivých směrů a následně zvolili jednu z nejbližších hodnot, které jsem označil červenou barvou. Po konzultaci s vedoucím bakalářské práce jsme dospěli k závěru, že by bylo vhodnější udělat více měření s menšími přídavnými hmotnostmi, poté vynést do grafu závislost přídavné hmotnosti na hodnotě cejchovní konstanty a použít hodnotu, která vznikne protnutím této křivky a nulové hmotnosti. Tento systém měření, bohužel, nebyl kvůli časovým možnostem realizován.

Fáze při různých přídavných hmotnostech fix pro směr x a fiy pro směr y

	fix(°)		fiy(°)	
Horní trubková maketa	2,13g	8,679	2,13g	8,747
	4,26g	7,896	4,26g	8,622
	6,39g	8,725	6,39g	7,764
Dolní trubková maketa	2,13g	7,991	2,13g	8,407
	4,26g	7,945	4,26g	7,406
	6,39g	7,440	6,39g	8,058

U fází se naskýtá podobný problém jako u cejchovních konstant, jen s tím rozdílem, že pro směr x u dolní trubky došlo jen k mírnému kolísání hodnot, zatímco u ostatních směrů jsou změny většího charakteru. Proto by se mělo měřit takovým systémem, který jsem naznačil u cejchovních konstant.

3.2. Stanovení vazebních koeficientů

Při příčném obtékání svazku trubek proudem tekutiny na trubky působí proměnné síly, které jsou způsobeny dvěma hlavními aerodynamickými mechanismy. Jednak to jsou turbulentní poryvy, způsobené rozvířením proudu od odtržení, ale i od vstupní turbulence. Jako další působí na trubky aeroelastický mechanismus, jenž je způsoben pohybem trubek. Celý systém výpočtů je převzat z práce, která je volně přístupná veřejnosti. Nachází se na webu Katedry energetických strojů a zařízení v sekci Funkční vzorky pod názvem Zařízení pro experimentální vyšetření vazebních aerodynamických sil mezi trubkovými maketami v proudu vzduchu.

K analýze aeroelastického buzení trubek je nutno znát jednotlivé složky síly, které závisí na:

- zrychlení trubek
- rychlosti pohybu trubek
- posuvu ve svazku

Výpočet vychází z principu superpozice, kde aerodynamické síly vstupují do pohybové rovnice jako sumační členy:

$$m_j \ddot{z} + b_j \dot{z} + k_j z + \frac{1}{4} \rho \pi D_j^2 \sum_{k=0}^N (m_{jk}^{zx} \ddot{x}_k + m_{jk}^{zy} \ddot{y}_k) + \frac{1}{2} \rho D_j w \sum_{k=0}^N (b_{jk}^{zx} \dot{x}_k + b_{jk}^{zy} \dot{y}_k) + \frac{1}{2} \rho w^2 \sum_{k=0}^N (k_{jk}^{zx} x + k_{jk}^{zy} y) + M F_j^z = T F_j^z + F_j^z \quad (6)$$

Tato rovnice vyjadřuje síly, které působí na j-tou trubku kmitající ve směru z (směr x a y) od všech ostatních trubek $k = 1, 2, \dots, N$, včetně j-té označené $k = 0$ a vyjadřující vliv na sebe samu.

Kde: D_j ... průměr j-té trubky
 w ... rychlost v minimální štěrbině mezi trubkami
 ρ ... hustota tekutiny
 m_j ... mechanická hmotnost
 b_j ... útlum
 k_j ... tuhost běžného metru j-té trubky
 $m_{jk}^{zx}, m_{jk}^{zy}, b_{jk}^{zx}, b_{jk}^{zy}, k_{jk}^{zx}, k_{jk}^{zy}$... aerodynamické vazební koeficienty

Levá strana rovnice (6):

První tři členy v rovnici jsou mechanické síly setrvačná, útlumová a pružná. Další tři členy v této rovnici jsou vazební aerodynamické síly setrvačná, útlumová a pružná. Sedmá síla je vazební mechanická. Ta je u našeho měření odstraněna odizolováním budících trubkových maket od odezvodových.

Pravá strana rovnice (6):

První síla na pravé straně je stochastická síla od turbulence, ta je eliminována mechatricky, vibrátorem generovanou protisilou na stochastické buzení. Druhá síla je vnější, v našem případě od elektrodynamického vibrátoru.

V trubkové řadě je teoreticky $12N^2$ vazebních koeficientů. Pokud by se bral vliv každé trubky na všechny ostatní, včetně těch vzdálených, pak se k jejich určení potřebuje stejný počet rovnic. Jestliže tento systém rozdělíme na menší podsystémy po dvou trubkách, pak vzájemných vazebních sil a koeficientů od jedné buzené trubky je 12. Při započtení vlivu na sebe samu se počet rovnic zvýší na 24 vazebních koeficientů.

Pro určení proměnných aerodynamických sil se vychází buď z numerické simulace, nebo z měření. Pro měření se používá několik možných způsobů, jak se tyto síly dají určit. První z nich je stanovit síly z okamžitého rozdělení tlaku na povrchu obtékaných trubek pomocí tlakových snímačů o malé setrvačnosti. Druhým možným způsobem je změřit síly aerodynamickými váhami, jejichž vlastní frekvence je několikrát vyšší než frekvence měřených sil. Třetím možným způsobem, jak tyto síly změřit, je pomocí elektromagnetických vibrátorů. Poslední z uvedených způsobů byl použit při našem měření a je podrobně popsán na několika následujících stránkách.

Pro výpočet vazebních koeficientů se vychází z předpokladu dvou trubek 0-té a k-té, obě jsou připevněné ke svému vibrátoru.

Pokud se rozepíše rovnice (6) pro obě trubky i s již zmiňovanými podmínkami, pak se dostanou pohybové rovnice (26) pro 0-tou a rovnice (27) pro k-tou trubku.

$$m_0\ddot{z}_0 + b_0\dot{z}_0 + kz_0 + \rho Sm_{0k}\ddot{z}_k + \rho Dwb_{0k}\dot{z}_k + 1/2 \rho w^2 k_{0k}z_k + \rho Sm_{00}\ddot{z}_0 + \rho Dwb_{00}\dot{z}_0 + 1/2 \rho w^2 k_{00}z_0 = F_0 \quad (26)$$

$$m_k\ddot{z}_k + b_k\dot{z}_k + k_kz_k + \rho Sm_{k0}\ddot{z}_0 + \rho Dwb_{k0}\dot{z}_0 + 1/2 \rho w^2 k_{k0}z_0 + \rho Sm_{kk}\ddot{z}_k + \rho Dwb_{kk}\dot{z}_k + 1/2 \rho w^2 k_{kk}z_k = F_k \quad (27)$$

Při vlastním jednodimenzionálním buzení se rozvibruje 0-tá trubka v jednom směru, v druhém se drží v klidu vibrátorem, tak jako sousední k-tá se jejím vibrátorem drží v klidu. To znamená, že její vibrátor dává sílu v protifázi. To je případ **A**. Když se za tohoto stavu napíše pohybová rovnice pro 0-tou trubku, dostane se rovnice (28). Poté se pohybová rovnice rozepíše pro k-tou trubku, tím se dostane rovnice (29). Pak se naopak uvede do pohybu k-tá trubka a analogickým postupem vzniknou rovnice (30) a (31). To je případ **B**.

$$m_0\ddot{z}_0 + b_0\dot{z}_0 + k_0z_0 + \rho Sm_{00}\ddot{z}_0 + \rho Dwb_{00}\dot{z}_0 + 1/2 \rho w^2 k_{00}z_0 = F_{00} \quad (28)$$

$$\rho Sm_{k0}\ddot{z}_0 + \rho Dwb_{k0}\dot{z}_0 + 1/2 \rho w^2 k_{k0}z_0 = F_{k0} \quad (29)$$

$$\rho Sm_{0k}\ddot{z}_k + \rho Dwb_{0k}\dot{z}_k + 1/2 \rho w^2 k_{0k}z_k = F_{0k} \quad (30)$$

$$m_k\ddot{z}_k + b_k\dot{z}_k + k_kz_k + \rho Sm_{kk}\ddot{z}_k + \rho Dwb_{kk}\dot{z}_k + 1/2 \rho w^2 k_{kk}z_k = F_{kk} \quad (31)$$

Pro oba případy **A** a **B** se výchylky a síly vyjádří v komplexním tvaru. Základem pro případ **A** je výchylka 0-té trubky. Výchylka k-té trubky je fázově zpožděná o ϕ_k . Pokud 0-tá trubka kmitá, síla na 0- trubku je zpožděná o Φ_{00} a síla na k-tou trubku o Φ_{k0} . To je patrné z rovnice (32). Obdobné vztahy platí pro případ **B**, jak je vidět z rovnice (33).

$$\mathbf{A:} \quad z_0 = |z_0|e^{i\omega t}, \quad z_k = |z_k|e^{i(\omega t - \phi_k)} = 0, \quad F_{00} = |F_{00}|e^{i(\omega t - \Phi_{00})}, \quad F_{k0} = |F_{k0}|e^{i(\omega t - \Phi_{k0})} \quad (32)$$

$$\mathbf{B}: z_k = |z_k| e^{i\omega t}, z_0 = |z_0| e^{i(\omega t - \phi_0)} = 0, F_{0k} = |F_{0k}| e^{i(\omega t - \Phi_{0k})}, F_{kk} = |F_{kk}| e^{i(\omega t - \Phi_{kk})} \quad (33)$$

Po jejich dosazení do předchozích rovnic vzniknou rovnice (34) až (37).

$$-|MS_0| + i|MU_0| + |MP_0| - |AS_{00}| + i|AU_{00}| + |AP_{00}| = |F_{00}| e^{-i\Phi_{00}} \quad (34)$$

$$-|AS_{k0}| + i|AU_{k0}| + |AP_{k0}| = |F_{k0}| e^{-i\Phi_{k0}} \quad (35)$$

$$-|AS_{0k}| + i|AU_{0k}| + |AP_{0k}| = |F_{0k}| e^{-i\Phi_{0k}} \quad (36)$$

$$-|MS_k| + i|MU_k| + |MP_k| - |AS_{kk}| + i|AU_{kk}| + |AP_{kk}| = |F_{kk}| e^{-i\Phi_{kk}} \quad (37)$$

Kde v řádcích (38) a (39) jsou moduly mechanických sil setrvačných (|MS|), útlumových (|MU|) a pružných (|MP|).

$$|MS_0| = \omega^2 m_0 |z_0| \quad |MU_0| = \omega b_0 |z_0| \quad |MP_0| = k_0 |z_0| \quad (38)$$

$$|MS_k| = \omega^2 m_k |z_k| \quad |MU_k| = \omega b_k |z_k| \quad |MP_k| = k_k |z_k| \quad (39)$$

Obdobně je tomu na řádcích (40) až (43), kde jsou moduly aerodynamických sil setrvačných (|AS|), útlumových (|AU|) a pružných (|AP|).

$$|AS_{00}| = \omega^2 \rho S m_{00} |z_0| \quad |AU_{00}| = \omega \rho D w b_{00} |z_0| \quad |AP_{00}| = 1/2 \rho w^2 k_{00} |z_0| \quad (40)$$

$$|AS_{k0}| = \omega^2 \rho S m_{k0} |z_0| \quad |AU_{k0}| = \omega \rho D w b_{k0} |z_0| \quad |AP_{k0}| = 1/2 \rho w^2 k_{k0} |z_0| \quad (41)$$

$$|AS_{0k}| = \omega^2 \rho S m_{0k} |z_k| \quad |AU_{0k}| = \omega \rho D w b_{0k} |z_k| \quad |AP_{0k}| = 1/2 \rho w^2 k_{0k} |z_k| \quad (42)$$

$$|AS_{kk}| = \omega^2 \rho S m_{kk} |z_k| \quad |AU_{kk}| = \omega \rho D w b_{kk} |z_k| \quad |AP_{kk}| = 1/2 \rho w^2 k_{kk} |z_k| \quad (43)$$

Jelikož se nezajímáme o mechanické síly, je naším cílem tyto síly eliminovat. To se provede následujícím způsobem. Nejdříve se provede měření v neproudící tekutině. Poté se provede stejné měření v proudící tekutině. Při obou měřeních je důležité dbát na stejné frekvence a stejné amplitudy výchylek. Tím se zaručí, že mechanické síly jsou stejně veliké. Po odečtení odpovídajících rovnic od sebe se mechanické síly odečtou a tím již zůstanou pouze aerodynamické síly. Při proudění jsou síly vibrátorů a jejich fáze označeny indexem w . Pro síly a fáze při nulovém proudění jsou označeny indexem 0 :

Soustava při proudění ($w \neq 0$):

$$|{}^w F_{00}| e^{-i {}^w \Phi_{00}} + |MS_0| + |AS_{00}| - i(|MU_0| + |AU_{00}|) - (|MP_0| + |AP_{00}|) = 0 \quad (44)$$

$$|{}^w F_{k0}| e^{-i {}^w \Phi_{k0}} + |AS_{k0}| - i|AU_{k0}| - |AP_{k0}| = 0 \quad (45)$$

$$\left| {}^w F_{0k} \right| e^{-i {}^w \Phi_{0k}} + \left| AS_{0k} \right| - i \left| AU_{0k} \right| - \left| AP_{0k} \right| = 0 \quad (46)$$

$$\left| {}^w F_{kk} \right| e^{-i {}^w \Phi_{kk}} + \left| MS_k \right| + \left| AS_{kk} \right| - i \left(\left| MU_k \right| + \left| AU_{kk} \right| \right) - \left(\left| MP_k \right| + \left| AP_{kk} \right| \right) = 0 \quad (47)$$

Soustava bez proudění ($w = 0$):

$$\left| {}^0 F_{00} \right| e^{-i {}^0 \Phi_{00}} + \left| MS_0 \right| + \left| AS_{00} \right| - i \left| MU_0 \right| - \left| MP_0 \right| = 0 \quad (48)$$

$$\left| {}^0 F_{k0} \right| e^{-i {}^0 \Phi_{k0}} + \left| AS_{k0} \right| = 0 \quad (49)$$

$$\left| {}^0 F_{0k} \right| e^{-i {}^0 \Phi_{0k}} + \left| AS_{0k} \right| = 0 \quad (50)$$

$$\left| {}^0 F_{kk} \right| e^{-i {}^0 \Phi_{kk}} + \left| MS_k \right| + \left| AS_{kk} \right| - i \left| MU_k \right| - \left| MP_k \right| = 0 \quad (51)$$

Z rovnic (49) a (50) se můžou rovnou vypočítat moduly vazebních setrvačných sil $\left| AS_{k0} \right|$ a $\left| AS_{0k} \right|$, a to z reálných složek těchto rovnic. Pro získání dalších modulů se odečtou tyto rovnice:

$$(44) - (48): \quad \left| {}^w F_{00} \right| e^{-i {}^w \Phi_{00}} - \left| {}^0 F_{00} \right| e^{-i {}^0 \Phi_{00}} - i \left| AU_{00} \right| - \left| AP_{00} \right| = 0 \quad (52)$$

$$(45) - (49): \quad \left| {}^w F_{k0} \right| e^{-i {}^w \Phi_{k0}} - \left| {}^0 F_{k0} \right| e^{-i {}^0 \Phi_{k0}} - i \left| AU_{k0} \right| - \left| AP_{k0} \right| = 0 \quad (53)$$

$$(46) - (50): \quad \left| {}^w F_{0k} \right| e^{-i {}^w \Phi_{0k}} - \left| {}^0 F_{0k} \right| e^{-i {}^0 \Phi_{0k}} - i \left| AU_{0k} \right| - \left| AP_{0k} \right| = 0 \quad (54)$$

$$(47) - (51): \quad \left| {}^w F_{kk} \right| e^{-i {}^w \Phi_{kk}} - \left| {}^0 F_{kk} \right| e^{-i {}^0 \Phi_{kk}} - i \left| AU_{kk} \right| - \left| AP_{kk} \right| = 0 \quad (55)$$

Z poslední soustavy vypočítáme moduly aerodynamických útlumových a pružných sil:

$$\text{z reálné části (52):} \quad \left| AP_{00} \right| = \left| {}^w F_{00} \right| \cos {}^w \Phi_{00} - \left| {}^0 F_{00} \right| \cos {}^0 \Phi_{00} \quad (56)$$

$$\text{z imaginární části (52):} \quad \left| AU_{00} \right| = - \left| {}^k F_{00} \right| \sin {}^w \Phi_{00} + \left| {}^0 F_{00} \right| \sin {}^0 \Phi_{00} \quad (57)$$

$$\text{z reálné části (49):} \quad \left| AS_{k0} \right| = - \left| {}^0 F_{k0} \right| \cos {}^0 \Phi_{k0} \quad (58)$$

Analogickým postupem se z rovnice (50) dostane aerodynamický modul $\left| AS_{0k} \right|$. Z reálných částí rovnic (53) až (55) se dostanou další aerodynamické moduly, a to $\left| AP_{k0} \right|$, $\left| AP_{0k} \right|$, $\left| AP_{kk} \right|$. A z imaginárních částí rovnic (53) až (55) se dostanou $\left| AU_{k0} \right|$, $\left| AU_{0k} \right|$, $\left| AU_{kk} \right|$. Z nich každý má 4 varianty pro kombinace směrů xx , xy , yx , yy . Chybí jen určit moduly $\left| AS_{00} \right|$, $\left| AS_{kk} \right|$, které jsou u kmitání trubek v kapalinách dost velké a důležité. Jejich zjištění je níže uvedené.

Z modulů sil (40) až (42) se zpětně určí tekutinové vazební koeficienty.

$$m_{k0} = |AS_{k0}|/(\omega^2 \rho S|z_0|), \quad m_{0k} = |AS_{0k}|/(\omega^2 \rho S|z_k|) \quad (59)$$

Ostatní koeficienty jsou uvedeny níže:

$$b_{00}, b_{k0}, b_{0k}, b_{kk} = |AU|/(\omega \rho D w|z|), \quad k_{00}, k_{k0}, k_{0k}, k_{kk} = 2|AP|/(\rho w^2|z|) \quad (60)$$

Zbývající aerodynamické hmotnostní koeficienty m_{00}, m_{kk} potřebují ke svému určení ještě doplňkové měření, které by mělo proběhnout v klidném prostředí s výrazně odlišnou hustotou tekutiny. Pro náš případ by byla vhodná kapalná voda, bohužel na toto měření není experimentální zařízení koncipováno. Proto je dopočet těchto koeficientů naznačen pouze teoreticky. Za předpokladu použití vody se budou v rovnicích vyskytovat indexy H. Pro rovnice (48) a (51) se napíšou alternativy pro vodu. Tyto rovnice přejdou na tvar (61) a (62).

$$\left| {}^H F_{00} \right| e^{-i {}^H \Phi_{00}} + |MS_0| + |HS_{00}| - i|MU_0| - |MP_0| = 0 \quad (61)$$

$$\left| {}^H F_{kk} \right| e^{-i {}^H \Phi_{kk}} + |MS_k| + |HS_{kk}| - i|MU_k| - |MP_k| = 0 \quad (62)$$

Jestliže se rovnice pro vzduch a vodu o $w=0$ odečtou, pak se určí hledané koeficienty.

$$(48) - (61): \quad \left| {}^0 F_{00} \right| e^{-i {}^0 \Phi_{00}} - \left| {}^H F_{00} \right| e^{-i {}^H \Phi_{00}} + |AS_{00}| - |HS_{00}| = 0 \quad (63)$$

$$(51) - (62): \quad \left| {}^0 F_{kk} \right| e^{-i {}^0 \Phi_{kk}} - \left| {}^H F_{kk} \right| e^{-i {}^H \Phi_{kk}} + |AS_{kk}| - |HS_{kk}| = 0 \quad (64)$$

Nyní se za $|AS_{00}|, |AS_{kk}|$ doplní již určené vzorce. Pak rovnice (63) a (64) přejdou na tvar (65) a (66).

$$\left| {}^0 F_{00} \right| e^{-i {}^0 \Phi_{00}} - \left| {}^H F_{00} \right| e^{-i {}^H \Phi_{00}} + \omega^2 \rho S m_{00}|z_0| - \omega^2 \rho_H S m_{00}|z_0| = 0 \quad (65)$$

$$\left| {}^0 F_{kk} \right| e^{-i {}^0 \Phi_{kk}} - \left| {}^H F_{kk} \right| e^{-i {}^H \Phi_{kk}} + \omega^2 \rho S m_{kk}|z_k| - \omega^2 \rho_H S m_{kk}|z_k| = 0 \quad (66)$$

Nakonec se vytknou tekutinové koeficienty.

$$m_{00} = \frac{\left| {}^0 F_{00} \right| \cos {}^0 \Phi_{00} - \left| {}^H F_{00} \right| \cos {}^H \Phi_{00}}{\omega^2 S|z_0|(\rho_H - \rho)} \Rightarrow |AS_{00}| = \omega^2 \rho S m_{00}|z_0| \quad (67)$$

$$m_{kk} = \frac{\left| {}^0 F_{kk} \right| \cos {}^0 \Phi_{kk} - \left| {}^H F_{kk} \right| \cos {}^H \Phi_{kk}}{\omega^2 S|z_k|(\rho_H - \rho)} \Rightarrow |AS_{kk}| = \omega^2 \rho S m_{kk}|z_k| \quad (68)$$

Tímto jsou určeny všechny potřebné výpočty pro stanovení všech aerodynamických vazebních koeficientů. Nyní se přejde k samotnému měření při jednodimenzionálním buzení, bez kterého by nebylo možné číselně vyjádřit jednotlivé vazební koeficienty $b_{00}, b_{k0}, b_{0k}, b_{kk}, k_{00}, k_{k0}, k_{0k}, k_{kk}, m_{00}, m_{kk}$ pro kombinace směrů xx, xy, yx, yy.

3.2.1. Měření při jednodimenzionálním buzení

Měření při jednodimenzionálním buzení se dělá z důvodu eliminace mechanických sil pro snadnější určení jednotlivých vazebních koeficientů. Jak již bylo uvedeno, celý systém měření sestává z několika důležitých kroků.

Na počátku je potřeba zkontrolovat trubkovou řadu. To znamená změřit rozteče mezi trubkami a následně zkontrolovat srovnání trubek do řady. Tato poloha je následně zaznamenána v programu v počítači jako referenční poloha, z které se v celém měření vychází. Tento postup se dělá jen jednou před celým měřením pro všechny rychlosti.

Následuje zapnutí aerodynamického tunelu a tím vpuštění proudu vzduchu do měřícího prostoru. Proud vzduchu způsobuje statickou výchylku pohyblivých trubek. Následně se musí srovnat trubková řada krokovými motory přes ovládání v počítači na referenční polohu, která je již zaznamenána z předešlého úkonu.

Pak se změří rychlost, která by se neměla v průběhu několika desítek vteřin měnit. Doporučuji několikrát přeměřit, zda je rychlost stabilní a nemá příliš velké odchylky, jinak by nebylo měření průkazné, poté je teprve vhodné zahájit měření.

Vlastní měření probíhá následovně:

1) $w \neq 0$: Musí se nastavit buzení ve směru x u horního vibračního uzlu na předem určenou frekvenci, v našem případě 43,000Hz. Dále nastavit amplitudu výchylky na hodnotu 0,4mm. V ostatních směrech jsou amplitudy výchylek brzděny příslušnými vibrátory. Při proudění dochází k narušení budící frekvence i jinými frekvencemi, které vznikají právě prouděním. Z tohoto důvodu je v programu použita rychlá Fourierova transformace, která dokáže vybrat ze spektra frekvencí právě tu naši budící frekvenci. Následně se zaznamenávají hodnoty. Rychlá Fourierova transformace jednoho kroku měření při dané rychlosti v jednom směru trvá počítači zpracovat přibližně 20 vteřin. Celý tento krok se opakuje v ostatních směrech jak pro horní, tak i pro dolní vibrační uzel při jedné rychlosti.

2) $w = 0$: Po změření hodnot při proudění se vypne proud vzduchu, tím dojde k opětovnému statickému vychýlení pohyblivých trubek z trubkové řady. Celá řada trubek se opět srovná na referenční polohu pomocí krokových motorů. Následně se celý krok 1 provede stejným způsobem jen bez proudění ve všech směrech.

3) $w \neq 0$: Posledním krokem měření pro jednu rychlost je zopakovat měření pro oba směry horního i dolního vibračního uzlu opět s proudem vzduchu, před kterým se musí opět trubková řada srovnat na referenční polohu.

Tímto je ukončen cyklus měření pro jednu konkrétní rychlost. V našem případě jsou zvoleny tyto rychlosti: 40m/s, 50m/s, 60m/s, 70m/s, 80m/s, 90m/s a 100m/s. Tyto hodnoty jsou součástí přílohy číslo 3.

3.2.2. Výpočet aerodynamických vazebních koeficientů

Další věcí, kterou je potřeba pro zjištění pružných (AP) a útlumových sil (AU) provést, je dosažení jednotlivých hodnot z přípravných měření a z jednodimenzionálního buzení do výpočtového programu - viz obr. 3-2. Postup plnění programu je následovný. V rámečku 1 se vyberou z přípravných měření cejchovní konstanty pro horní a dolní vibrační uzel, každý vibrační uzel má svůj předem stanovený řádek. Ty jsou pro výpočty jednotlivých sil v závislosti na rychlosti neměnné. Do rámečku 2 se dosadí hodnoty z měření při dané rychlosti bez proudění, naproti tomu do rámečku 3 se dosadí hodnoty naměřené s prouděním. Samotný výpočet se provede po stisknutí tlačítka „Výpočet“ (rámeček 4). Následně se objeví v rámečku 5 vypočtené pružné síly (AP) a v rámečku 6 vypočtené útlumové síly (AU) pro jednotlivé varianty směrů. V rámečku 7 jsou naznačeny setrvačné síly (AS), které jsou bohužel velice malé a téměř nezměřitelné. Proto se zbytek měření zaměří pouze na pružné a útlumové síly a z nich vypočtené koeficienty.

Obr. 3 - 2 Uživatelské rozhraní výpočtového programu

Takto se dopočítají síly pro všechny námi určené rychlosti. Ty jsou zpracované pro přehlednost v následujících tabulkách. Pro nás jsou zajímavé pružné síly APXX00, APXX11, APYY00, APYY11 a zároveň útlumové síly AUXX00, AUXX11, AUYY00, AUYY11. Zbylé hodnoty jsou uvedeny v příloze číslo 4.

Dále jsou rychlosti v trubkové mezeře vypočteny z aritmetického průměru rychlostí při jednom měření při proudění ve všech směrech. Každá rychlost byla měřena 2krát. Následně je přepočtena na redukovanou rychlost.

Tento vzorec naznačuje přepočtení rychlosti v trubkové mezeře na redukovanou rychlost, která je potřebná pro konečný výpočet.

$$w = \frac{w_m}{f_v \cdot D} \quad (69)$$

Kde w_m ... rychlost v trubkové mezeře [m/s^{-1}]

rychlost [m/s^{-1}]	průměrná rychlost [m/s^{-1}]	redukovaná rychlost [m/s^{-1}]
38,75 37,525	38,1375	42,13529698
51,8 50,8	51,3	56,67756762
62,575 61,65	62,1125	68,62349744
71,2 71,1	71,15	78,60836132
81,425 82,05	81,7375	90,30570532
91,225 88,925	90,075	99,51719109
100,6 100,9	100,75	111,3112074

Pro dopočet vazebních koeficientů je ještě nutné pružné a útlumové síly přepočítat na aritmetický průměr z hodnot zaznamenaných při dvou stejných měřeních.

Přepočtení pružných sil na průměrné hodnoty

APXX00 [N]	APXX11 [N]	APYY00 [N]	APYY11 [N]	průměrná APXX00 [N]	průměrná APXX11 [N]	průměrná APYY00 [N]	průměrná APYY11 [N]
-0,45 -0,396	0,453 0,621	0,032 -0,001	0,05 -0,044	-0,423	0,537	0,0155	0,003
-0,867 -1,008	0,974 0,934	-0,016 -0,021	-0,518 -0,511	-0,9375	0,954	-0,0185	-0,5145
-1,599 -1,561	1,428 1,475	-0,051 -0,089	-0,857 -0,955	-1,58	1,4515	-0,07	-0,906
-1,986 -1,989	1,654 1,67	-0,135 -0,123	-1,427 -1,475	-1,9875	1,662	-0,129	-1,451
-2,97 -2,925	1,872 1,872	-0,065 2,131	-1,842 -0,431	-2,9475	1,872	-0,065	-1,842
-3,03 -3,009	1,864 1,894	-0,317 2,117	-2,275 -2,219	-3,0195	1,879	-0,317	-2,247
-2,351 -2,305	1,335 1,276	-0,011 -0,748	-1,542 -1,09	-2,328	1,3055	-0,3795	-1,316

Červeně označené hodnoty se vymykají číselné posloupnosti, proto se do výpočtů nezahrnují.

Přepočtení útlumových sil na průměrné hodnoty

AUXX00 [N]	AUXX11 [N]	AUYY00 [N]	AUYY11 [N]	průměrná AUXX00 [N]	průměrná AUXX11 [N]	průměrná AUYY00 [N]	průměrná AUYY11 [N]
0,497 0,458	-0,177 -0,175	0,17 0,058	-0,049 0,027	0,4775	-0,176	0,114	-0,011
0,703 0,726	-0,069 -0,082	0,051 0,04	0,253 0,255	0,7145	-0,0755	0,0455	0,254
0,781 0,772	0,221 0,256	0,016 -0,094	0,281 0,268	0,7765	0,2385	-0,039	0,2745
0,647 0,641	0,313 0,354	-0,196 -0,179	0,195 0,165	0,644	0,3335	-0,1875	0,18
-0,356 -0,058	0,983 1,147	-0,908 -1,425	-0,153 0,301	-0,207	1,065	-0,908	0,074
-0,645 -1,078	1,46 1,398	-0,751 0,211	-0,442 -1,276	-0,8615	1,429	-0,751	-0,859
-2,208 -2,195	2,429 2,422	0,17 -0,516	-1,899 -1,926	-2,2015	2,4255	-0,516	-1,9125

Pro červeně označená pole platí stejná podmínka jako u předchozích pružných sil. Zeleně označená pole znamenají značné výchylky mezi měřeními, avšak nelze určit, která z hodnot je chybná, proto se ponechají obě pro výpočet aritmetického průměru.

Pro konečný dopočet jednotlivých koeficientů se použijí vzorce ve tvaru:

$$k = \frac{2|AP|}{\rho w^2 |z|} \quad (70)$$

$$b = \frac{|AV|}{\omega \rho D w |z|} \quad (71)$$

Kde $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f_v$... úhlová frekvence [284,3518 Hz]

ρ ... hustota vzduchu [1,2759 kg/m³]

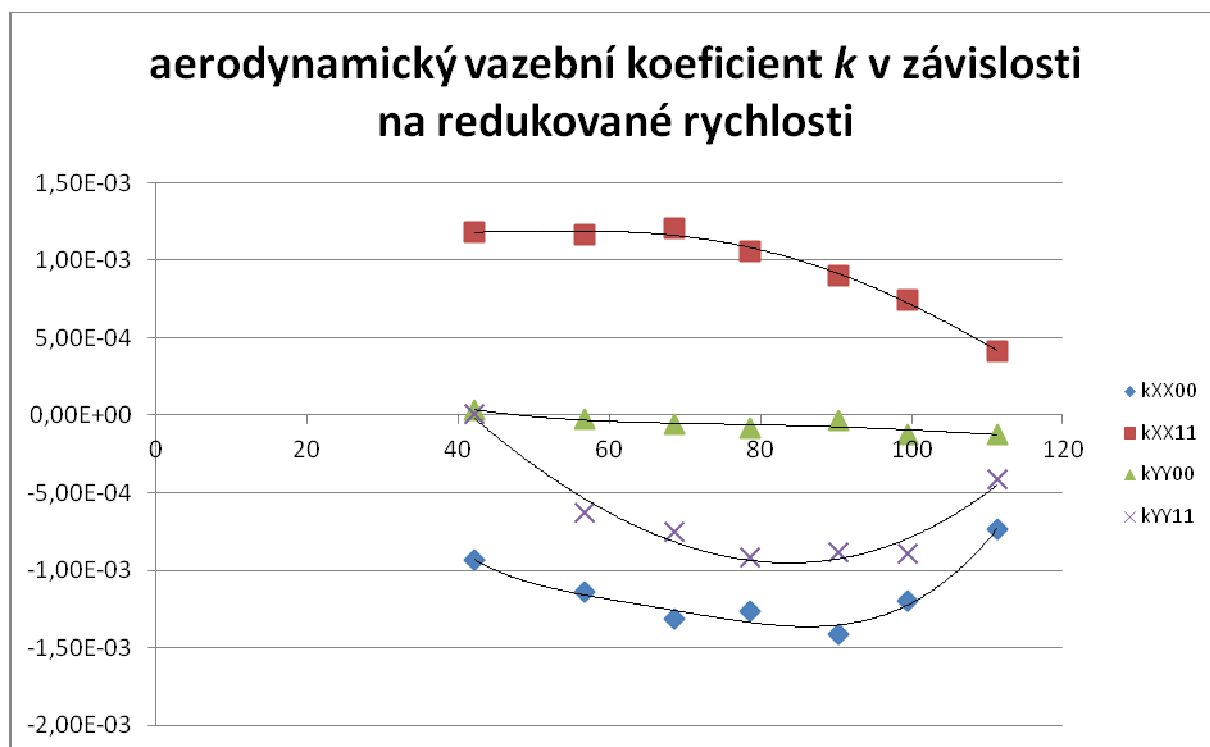
D ... jmenovitý průměr trubky [0,02 m]

w ... redukovaná rychlost [m/s⁻¹]

z ... amplituda výchylky [0,0004 m]

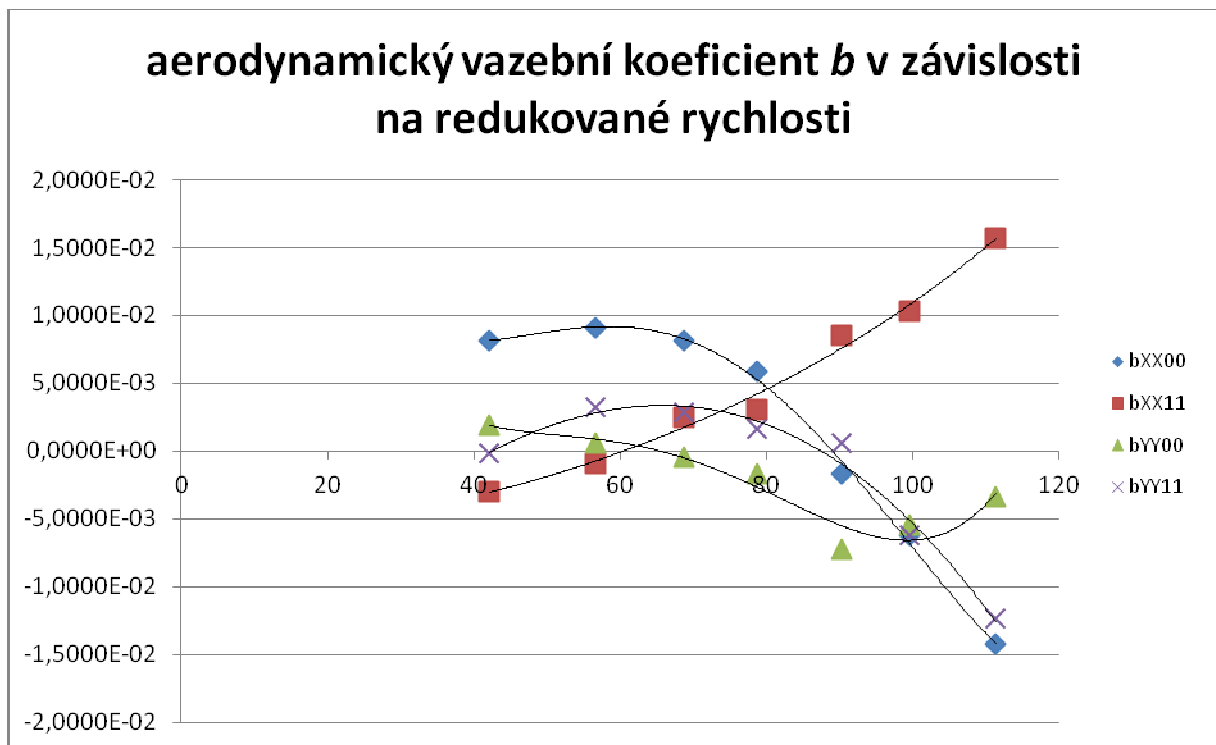
Nyní se dostáváme k poslednímu a konečnému výpočtu jednotlivých aerodynamických vazebních koeficientů podle vztahů (70) a (71).

Vypočtené koeficienty při různých rychlostech se zaznamenávají do dvou grafů, v kterých je naznačen jejich průběh v závislosti na redukované rychlosti spolu se spojnicí trendu jednotlivých hodnot.



Graf 2 Aerodynamický vazební koeficient pružných sil

Z tohoto grafu je patrné, že vypočtené hodnoty se nijak radikálně neodlišují od spojnice trendu.



Graf 2 Aerodynamický vazební koeficient útlumových sil

U tohoto grafu jsou patrnější větší odchylky od spojnice trendu, který ale nemusí být určující.

4. Závěr

Cílem bakalářské práce bylo uvést dané experimentální zařízení do provozuschopného stavu a provést měření při jednodimenzionálním buzení. Po dlouhé a zároveň pečlivé práci se podařilo experimentální zařízení zprovoznit, nicméně vyhovující měření při jednodimenzionálním buzení proběhlo pouze jednou. Hlavním důvodem byly stále se upravující hodnoty v nastavení na celém experimentálním zařízení, které následovaly po provedení téměř každého zkušebního měření. V přípravných měřeních, kdy byl jeden z hlavních úkolů srovnat rezonanční frekvence ve všech směrech na stejné hodnoty, nebyly zaznamenány téměř žádné větší problémy. Naopak u zjištění cejchovních konstant a fází se po vyhodnocení celého měření dospělo k názoru, že by bylo vhodné mít možnost doplňovat cejchovní konstanty a fáze, a to pro každý ze směrů a zároveň vibračních uzlů samostatně. Doposud se vycházelo z předpokladu, že cejchovní konstanty nejsou závislé na přídatné hmotnosti. Bohužel po přípravných měřeních se ukázalo, že u některých směrů se tyto koeficienty značně odlišují s měnění se přídatnou hmotností. Po konzultaci s vedoucím mojí bakalářské práce jsme dospěli k závěru, že by se měla provést řada měření při menších změnách závaží. Následně by se provedla extrapolace cejchovních konstant a fází na nulovou hmotnost.

Na celém experimentálním zařízení pracovala již řada odborníků i studentů přede mnou. Bohužel v české ani zahraniční literatuře není mnoho ucelených odborných prací a výzkumných zpráv, které popisují, jak se pracuje se zařízením a čeho je důležité se vyvarovat.

S tím je spojen další problém, a to nemožnost srovnání mých výsledků s jinými naměřenými hodnotami na tomto zařízení, jelikož je to poprvé, co se podařilo provést měření při jednodimenzionálním buzení. Původně bylo zamýšleno, že naše výsledky budou porovnány s výsledky v publikaci [2]. Bohužel ani s touto prací se nedaly mé hodnoty porovnat. Důvodem byla redukovaná rychlost v trubkové mezeře. U mého experimentu byla nejnižší rychlost těsně nad 40m/s. U již zmiňované práce byla horní hranice redukované rychlosti právě na 40m/s. Tím nedošlo k pomyslnému protnutí výsledků.

Poslední věcí, kterou bych rád zmínil, je počítač určený pro výpočet rychlé Fourierovy transformace. Při použití výkonnějšího počítače by se zkrátila doba, kterou chceme mít stabilní rychlost proudu vzduchu, jak je již uvedeno v mé práci. Tím by došlo k přesnějším měřením.

Celá problematika týkající se zjištění aerodynamických vazebních sil na příčně obtékanou řadu je zajímavá, nicméně velice úzce zaměřená. Proto doufám, že se tento text stane budoucím zájemcům o danou problematiku oporou a dobrým základem při dalším pokračování na tomto experimentu.

5. Seznam použité literatury

- [1] HLÁVKA M.: *Elektronický řídicí a vyhodnocovací systém pro zjišťování tekutinových vazeb v trubkovém svazku*
- [2] CHEN S.S., ZHU S., JENDRZEJCZYK J. A.: *Fluid damping and fluid stiffness of a tube row in crossflow. Flow Induced Vibration PVP-Vol.273, ASME 1994*
- [3] KOKEISL M., LINHART J.: *Displacement mechanism forces in tube bundle. Sborník: 16. Světový kongres IMEKO 2000, Austrian Society for Measurement and Automation Wien, 9/2000, str. 119-125*
- [4] LINHART J.: *Zařízení pro experimentální vyšetření vazebních aerodynamických sil mezi trubkovými maketami v proudu vzduchu*
- [5] TECHNICKÝ TÝDENÍK: *Bezdotykové měření vzdálenosti na bázi vířivého proudu*
(<http://www.techtydenik.cz/detail.php?action=show&id=1395&mark=>)

6. Seznam příloh

6.1. Záznam frekvenční charakteristiky – číslo 1

FrA	Horní X		Horní Y		Dolní X		Dolní Y	
	Fáze HX	Poměr HX	Fáze HY	Poměr HY	Fáze DX	Poměr DX	Fáze DY	Poměr DY
43,72	26,0919	1,825	24,4362	1,76	28,8983	1,889	25,6671	1,795
43,92	28,59	2,049	26,7717	1,98	31,6822	2,1	28,1445	2,017
44,12	31,8042	2,331	29,789	2,262	35,192	2,363	31,2939	2,296
44,32	36,0353	2,694	33,826	2,629	39,7308	2,697	35,4825	2,658
44,42	38,679	2,917	36,4249	2,855	42,7713	2,982	38,1235	2,879
44,52	41,7967	3,168	39,3925	3,115	45,9459	3,21	41,2141	3,133
44,62	45,3952	3,46	43,0079	3,415	49,6088	3,466	44,9215	3,424
44,72	49,7166	3,791	47,3267	3,763	54,0519	3,741	49,2835	3,751
44,82	54,9851	4,151	52,5536	4,159	58,9723	4,043	54,5424	4,115
44,92	61,1458	4,538	58,9688	4,588	64,8887	4,32	60,8058	4,513
44,97	64,6823	4,744	62,6557	4,817	68,0052	4,494	64,3797	4,709
45,02	68,4684	4,92	66,6523	5,041	71,4659	4,627	68,3165	4,905
45,07	72,6563	5,112	71,1346	5,242	75,1468	4,756	72,5506	5,079
45,12	77,0899	5,27	75,9153	5,427	78,9954	4,762	77,0963	5,244
45,17	81,8917	5,39	80,938	5,593	83,0283	4,849	81,8877	5,376
45,18	82,7764	5,421	82,0817	5,614	83,9026	4,792	82,8814	5,397
45,19	83,8029	5,448	83,1585	5,633	84,7012	4,798	83,9358	5,416
45,2	84,7336	5,454	84,2214	5,655	85,5761	4,791	84,9629	5,435
45,21	85,757	5,479	85,406	5,671	86,3075	4,795	86,0237	5,45
45,22	86,8839	5,486	86,4349	5,692	87,3113	4,82	87,0357	5,466
45,23	87,8527	5,498	87,5597	5,701	88,1053	4,816	88,077	5,481
45,24	88,9184	5,519	88,7089	5,723	88,9208	4,844	89,0769	5,488
45,25	89,8954	5,534	89,728	5,728	89,8407	4,841	90,1337	5,506
45,26	91,9724	5,545	90,9042	5,737	90,7462	4,844	91,1837	5,51
45,27	97,2158	5,537	92,0766	5,749	91,6991	4,856	92,3126	5,515
45,32	102,592	5,547	97,8917	5,737	96,1028	4,86	97,6384	5,523
45,37	107,7768	5,504	103,6273	5,702	100,6848	4,837	103,0634	5,478
45,42	113,0038	5,431	109,1684	5,601	105,1798	4,805	108,3516	5,384
45,47	117,8694	5,306	114,7529	5,449	109,555	4,728	113,5078	5,266
45,52	117,8587	5,166	119,8814	5,278	113,7965	4,665	118,4152	5,12
45,62	126,6721	4,82	128,9983	4,862	121,8211	4,422	127,2202	4,759
45,72	134,1959	4,433	136,6882	4,423	128,9538	4,153	134,7765	4,366
45,82	140,5173	4,05	143,0111	4,001	135,0387	3,82	141,0058	3,978
45,92	145,7736	3,694	148,1181	3,62	140,2811	3,537	146,1517	3,624

6.2. Záznam z kalibrace – číslo 2

FrA	Horní X		Horní Y		Dolní X		Dolní Y	
	Fáze HX	Poměr HX	Fáze HY	Poměr HY	Fáze DX	Poměr DX	Fáze DY	Poměr DY
43,72	26,0919	1,825	24,4362	1,76	28,8983	1,889	25,6671	1,795
43,92	28,59	2,049	26,7717	1,98	31,6822	2,1	28,1445	2,017
44,12	31,8042	2,331	29,789	2,262	35,192	2,363	31,2939	2,296
44,32	36,0353	2,694	33,826	2,629	39,7308	2,697	35,4825	2,658
44,42	38,679	2,917	36,4249	2,855	42,7713	2,982	38,1235	2,879
44,52	41,7967	3,168	39,3925	3,115	45,9459	3,21	41,2141	3,133
44,62	45,3952	3,46	43,0079	3,415	49,6088	3,466	44,9215	3,424
44,72	49,7166	3,791	47,3267	3,763	54,0519	3,741	49,2835	3,751
44,82	54,9851	4,151	52,5536	4,159	58,9723	4,043	54,5424	4,115
44,92	61,1458	4,538	58,9688	4,588	64,8887	4,32	60,8058	4,513
44,97	64,6823	4,744	62,6557	4,817	68,0052	4,494	64,3797	4,709
45,02	68,4684	4,92	66,6523	5,041	71,4659	4,627	68,3165	4,905
45,07	72,6563	5,112	71,1346	5,242	75,1468	4,756	72,5506	5,079
45,12	77,0899	5,27	75,9153	5,427	78,9954	4,762	77,0963	5,244
45,17	81,8917	5,39	80,938	5,593	83,0283	4,849	81,8877	5,376
45,18	82,7764	5,421	82,0817	5,614	83,9026	4,792	82,8814	5,397
45,19	83,8029	5,448	83,1585	5,633	84,7012	4,798	83,9358	5,416
45,2	84,7336	5,454	84,2214	5,655	85,5761	4,791	84,9629	5,435
45,21	85,757	5,479	85,406	5,671	86,3075	4,795	86,0237	5,45
45,22	86,8839	5,486	86,4349	5,692	87,3113	4,82	87,0357	5,466
45,23	87,8527	5,498	87,5597	5,701	88,1053	4,816	88,077	5,481
45,24	88,9184	5,519	88,7089	5,723	88,9208	4,844	89,0769	5,488
45,25	89,8954	5,534	89,728	5,728	89,8407	4,841	90,1337	5,506
45,26	91,9724	5,545	90,9042	5,737	90,7462	4,844	91,1837	5,51
45,27	97,2158	5,537	92,0766	5,749	91,6991	4,856	92,3126	5,515
45,32	102,592	5,547	97,8917	5,737	96,1028	4,86	97,6384	5,523
45,37	107,7768	5,504	103,6273	5,702	100,6848	4,837	103,0634	5,478
45,42	113,0038	5,431	109,1684	5,601	105,1798	4,805	108,3516	5,384
45,47	117,8694	5,306	114,7529	5,449	109,555	4,728	113,5078	5,266
45,52	117,8587	5,166	119,8814	5,278	113,7965	4,665	118,4152	5,12
45,62	126,6721	4,82	128,9983	4,862	121,8211	4,422	127,2202	4,759
45,72	134,1959	4,433	136,6882	4,423	128,9538	4,153	134,7765	4,366
45,82	140,5173	4,05	143,0111	4,001	135,0387	3,82	141,0058	3,978
45,92	145,7736	3,694	148,1181	3,62	140,2811	3,537	146,1517	3,624

6.3. Měření při jednodimenzionálním buzení – číslo 3

$w = 40\text{m/s}$ (1. část)

Název	Buzení X1, 0,4 mm horní, 43 Hz, V=40 m/s	Buzení Y1, 0,4 mm horní, 43 Hz, V=40 m/s	Buzení X1, 0,4 mm dolní, 43 Hz, V=40 m/s	Buzení Y1, 0,4 mm dolní, 43 Hz, V=40 m/s	Buzení X0, 0,4 mm horní, 43 Hz, V=0 m/s	Buzení Y0, 0,4 mm horní, 43 Hz, V=0 m/s
FI1X	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
I1X	0,333	0,003	0,001	0,001	0,314	0,003
FA1X	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
A1X	0,402	0,007	0,003	0,002	0,397	0,007
FI1Y	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
I1Y	0,003	0,346	0,001	0,001	0,003	0,338
FA1Y	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
A1Y	0,007	0,404	0,003	0,002	0,007	0,402
FI2X	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
I2X	0,002	0,002	0,302	0,008	0,000	0,000
FA2X	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
A2X	0,002	0,001	0,400	0,010	0,001	0,001
FI2Y	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
I2Y	0,000	0,001	0,006	0,331	0,000	0,000
FA2Y	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
A2Y	0,002	0,002	0,018	0,401	0,001	0,000
Fáze1X	19,372	-172,828	-178,445	-17,547	19,834	-170,297
Fáze1Y	-170,041	18,474	25,853	130,697	-171,627	18,344
Fáze2X	-169,796	168,410	22,138	-171,965	-178,178	-179,357
Fáze2Y	-62,764	122,600	170,612	19,094	-175,923	172,871
Poměr1X	1,207	2,111	1,836	4,132	1,265	2,168
Poměr1Y	2,290	1,169	3,839	2,130	2,305	1,189
Poměr2X	0,941	0,750	1,325	1,265	3,573	2,666
Poměr2Y	5,195	2,865	3,104	1,212	2,310	1,647
Teplota	24,4	24,5	24,5	24,6	24,8	24,7
Rychlost	37,1	40,1	41,5	36,3	0,0	0,0
Frek_buz	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
Teplota_vz	20,5	20,5	20,5	20,6	22,4	22,5

w = 40m/s (2. část)

Název	Buzení X0, 0,4 mm dolní, 43 Hz, V=0 m/s	Buzení Y0, 0,4 mm dolní, 43 Hz, V=0 m/s	Buzení X2, 0,4 mm horní, 43 Hz, V=40 m/s	Buzení Y2, 0,4 mm horní, 43 Hz, V=40 m/s	Buzení X2, 0,4 mm dolní, 43 Hz, V=40 m/s	Buzení Y2, 0,4 mm dolní, 43 Hz, V=40 m/s
F11X	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
I1X	0,000	0,000	0,331	0,003	0,002	0,000
FA1X	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
A1X	0,001	0,000	0,401	0,007	0,003	0,002
F11Y	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
I1Y	0,000	0,000	0,003	0,343	0,001	0,001
FA1Y	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
A1Y	0,000	0,000	0,007	0,401	0,003	0,002
F12X	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
I2X	0,288	0,008	0,002	0,002	0,302	0,008
FA2X	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
A2X	0,401	0,011	0,002	0,001	0,399	0,010
F12Y	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
I2Y	0,004	0,333	0,001	0,001	0,006	0,332
FA2Y	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
A2Y	0,013	0,403	0,002	0,002	0,018	0,402
Fáze1X	179,691	-173,914	19,416	-172,378	-178,599	-15,991
Fáze1Y	-178,351	166,896	-169,520	18,386	28,227	133,114
Fáze2X	22,538	-176,237	-170,095	166,819	22,003	-171,441
Fáze2Y	177,769	19,039	-55,965	119,209	170,070	18,998
Poměr1X	4,162	2,695	1,210	2,149	1,894	4,241
Poměr1Y	3,087	1,174	2,311	1,167	3,691	2,130
Poměr2X	1,390	1,279	0,993	0,857	1,321	1,265
Poměr2Y	3,053	1,213	4,866	2,953	3,116	1,212
Teplota	24,8	24,9	25,2	25,4	25,3	25,3
Rychlost	0,0	0,0	38,0	36,9	38,6	36,6
Frek_buz	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
Teplota_vz	22,6	22,8	20,8	20,8	20,8	20,7

w = 50m/s (1. část)

Název	Buzení X1, 0,4 mm horní, 43 Hz, V=50 m/s	Buzení Y1, 0,4 mm horní, 43 Hz, V=50 m/s	Buzení X1, 0,4 mm dolní, 43 Hz, V=50 m/s	Buzení Y1, 0,4 mm dolní, 43 Hz, V=50 m/s	Buzení X0, 0,4 mm horní, 43 Hz, V=0 m/s	Buzení Y0, 0,4 mm horní, 43 Hz, V=0 m/s
F11X	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
I1X	0,345	0,003	0,002	0,001	0,313	0,003
FA1X	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
A1X	0,403	0,007	0,005	0,003	0,398	0,007
F11Y	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
I1Y	0,003	0,348	0,001	0,001	0,003	0,339
FA1Y	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
A1Y	0,006	0,403	0,005	0,003	0,007	0,403
F12X	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
I2X	0,003	0,003	0,312	0,007	0,000	0,000
FA2X	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
A2X	0,004	0,003	0,400	0,008	0,000	0,001
F12Y	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
I2Y	0,001	0,001	0,007	0,334	0,000	0,000
FA2Y	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
A2Y	0,003	0,004	0,024	0,401	0,000	0,001
Fáze1X	19,069	-175,258	-179,862	-14,182	19,838	-170,391
Fáze1Y	-168,370	18,452	19,055	139,099	-172,112	18,421
Fáze2X	-176,102	171,152	21,656	-169,893	165,280	-98,133
Fáze2Y	-44,028	123,826	169,754	18,626	-166,651	155,697
Poměr1X	1,170	2,145	2,120	3,310	1,273	2,174
Poměr1Y	2,241	1,157	3,200	2,225	2,364	1,188
Poměr2X	1,106	1,027	1,279	1,266	1,214	5,889
Poměr2Y	4,965	2,873	3,145	1,201	1,757	2,873
Teplota	25,5	25,5	25,6	25,7	25,7	25,7
Rychlost	53,6	50,7	52,3	50,6	8,8	0,0
Frek_buz	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
Teplota_vz	21,0	21,2	21,4	21,5	21,9	22,2

w = 50m/s (2. část)

Název	Buzení X0, 0,4 mm dolní, 43 Hz, V=0 m/s	Buzení Y0, 0,4 mm dolní, 43 Hz, V=0 m/s	Buzení X2, 0,4 mm horní, 43 Hz, V=50 m/s	Buzení Y2, 0,4 mm horní, 43 Hz, V=50 m/s	Buzení X2, 0,4 mm dolní, 43 Hz, V=50 m/s	Buzení Y2, 0,4 mm dolní, 43 Hz, V=50 m/s
F11X	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
I1X	0,000	0,000	0,346	0,003	0,003	0,001
FA1X	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
A1X	0,001	0,000	0,403	0,007	0,005	0,003
F11Y	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
I1Y	0,000	0,000	0,002	0,348	0,001	0,001
FA1Y	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
A1Y	0,001	0,000	0,005	0,402	0,004	0,003
F12X	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
I2X	0,288	0,008	0,003	0,003	0,311	0,007
FA2X	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
A2X	0,400	0,011	0,004	0,003	0,398	0,008
F12Y	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
I2Y	0,004	0,334	0,001	0,001	0,008	0,335
FA2Y	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
A2Y	0,012	0,402	0,003	0,004	0,024	0,404
Fáze1X	165,563	175,130	18,977	-174,429	179,029	-17,318
Fáze1Y	165,526	154,336	-167,067	18,443	16,686	139,716
Fáze2X	22,463	-175,888	-175,307	170,878	21,688	-170,882
Fáze2Y	177,537	19,085	-51,739	120,406	170,300	18,631
Poměr1X	3,074	1,995	1,164	2,175	2,150	3,312
Poměr1Y	4,223	1,974	2,214	1,156	3,262	2,197
Poměr2X	1,390	1,280	1,115	1,061	1,282	1,263
Poměr2Y	3,044	1,204	4,902	2,946	3,147	1,204
Teplota	25,7	25,8	26,1	26,1	26,0	26,1
Rychlost	0,0	0,0	52,4	50,7	50,4	49,7
Frek_buz	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
Teplota_vz	22,3	22,5	21,7	21,7	21,8	21,9

w = 60m/s (1. část)

Název	Buzení X1, 0,4 mm horní, 43 Hz, V=60 m/s	Buzení Y1, 0,4 mm horní, 43 Hz, V=60 m/s	Buzení X1, 0,4 mm dolní, 43 Hz, V=60 m/s	Buzení Y1, 0,4 mm dolní, 43 Hz, V=60 m/s	Buzení X0, 0,4 mm horní, 43 Hz, V=0 m/s	Buzení Y0, 0,4 mm horní, 43 Hz, V=0 m/s
F11X	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
I1X	0,359	0,003	0,003	0,002	0,315	0,003
FA1X	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
A1X	0,404	0,007	0,008	0,005	0,402	0,007
F11Y	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
I1Y	0,002	0,351	0,002	0,002	0,003	0,337
FA1Y	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
A1Y	0,005	0,402	0,006	0,004	0,007	0,402
F12X	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
I2X	0,005	0,004	0,319	0,006	0,000	0,000
FA2X	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
A2X	0,006	0,005	0,396	0,008	0,001	0,001
F12Y	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
I2Y	0,001	0,002	0,009	0,336	0,000	0,000
FA2Y	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
A2Y	0,003	0,005	0,028	0,403	0,001	0,000
Fáze1X	18,630	-177,495	178,957	-13,346	19,881	-170,266
Fáze1Y	-167,351	18,391	11,100	139,950	-171,934	18,393
Fáze2X	-177,254	172,942	21,246	-174,296	-168,181	-179,616
Fáze2Y	-42,182	123,640	172,142	18,348	-173,718	171,370
Poměr1X	1,126	2,194	2,234	3,053	1,276	2,211
Poměr1Y	2,221	1,146	3,036	2,279	2,314	1,192
Poměr2X	1,190	1,152	1,239	1,259	3,933	2,837
Poměr2Y	4,689	2,965	3,160	1,198	2,881	1,727
Teplota	26,4	26,3	26,2	26,5	26,4	26,5
Rychlost	61,4	64,2	62,5	62,2	0,0	0,0
Frek_buz	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
Teplota_vz	22,7	22,6	22,6	22,8	23,0	23,5

w = 60m/s (2. část)

Název	Buzení X0, 0,4 mm dolní, 43 Hz, V=0 m/s	Buzení Y0, 0,4 mm dolní, 43 Hz, V=0 m/s	Buzení X2, 0,4 mm horní, 43 Hz, V=60 m/s	Buzení Y2, 0,4 mm horní, 43 Hz, V=60 m/s	Buzení X2, 0,4 mm dolní, 43 Hz, V=60 m/s	Buzení Y2, 0,4 mm dolní, 43 Hz, V=60 m/s
FI1X	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
I1X	0,000	0,000	0,355	0,003	0,003	0,002
FA1X	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
A1X	0,001	0,000	0,402	0,007	0,008	0,005
FI1Y	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
I1Y	0,000	0,000	0,002	0,352	0,002	0,002
FA1Y	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
A1Y	0,000	0,000	0,005	0,402	0,006	0,004
FI2X	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
I2X	0,289	0,008	0,005	0,004	0,322	0,006
FA2X	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
A2X	0,402	0,011	0,006	0,004	0,399	0,008
FI2Y	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
I2Y	0,004	0,334	0,001	0,002	0,009	0,335
FA2Y	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
A2Y	0,012	0,402	0,004	0,005	0,029	0,401
Fáze1X	-178,918	-175,854	18,652	-175,824	178,321	-15,836
Fáze1Y	-177,056	165,514	-168,172	18,305	9,253	140,999
Fáze2X	22,471	-176,356	-177,301	173,472	21,203	-174,392
Fáze2Y	177,148	19,074	-38,526	128,021	171,901	18,270
Poměr1X	4,342	2,560	1,132	2,149	2,250	3,053
Poměr1Y	2,642	1,365	2,224	1,144	3,039	2,284
Poměr2X	1,392	1,283	1,190	1,136	1,241	1,258
Poměr2Y	3,041	1,205	4,687	2,895	3,169	1,198
Teplota	26,4	26,6	26,8	26,8	26,7	26,8
Rychlost	0,0	0,0	61,9	62,1	60,8	61,8
Frek_buz	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
Teplota_vz	23,7	24,1	23,2	23,2	23,1	23,4

w = 70m/s (1. část)

Název	Buzení X1, 0,4 mm horní, 43 Hz, V=70 m/s	Buzení Y1, 0,4 mm horní, 43 Hz, V=70 m/s	Buzení X1, 0,4 mm dolní, 43 Hz, V=70 m/s	Buzení Y1, 0,4 mm dolní, 43 Hz, V=70 m/s	Buzení X0, 0,4 mm horní, 43 Hz, V=0 m/s	Buzení Y0, 0,4 mm horní, 43 Hz, V=0 m/s
F11X	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
I1X	0,369	0,003	0,004	0,002	0,313	0,003
FA1X	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
A1X	0,404	0,007	0,010	0,006	0,400	0,008
F11Y	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
I1Y	0,002	0,356	0,003	0,002	0,003	0,337
FA1Y	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
A1Y	0,005	0,404	0,008	0,005	0,007	0,401
F12X	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
I2X	0,006	0,005	0,334	0,007	0,000	0,000
FA2X	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
A2X	0,008	0,006	0,404	0,008	0,000	0,001
F12Y	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
I2Y	0,001	0,002	0,010	0,339	0,000	0,000
FA2Y	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
A2Y	0,004	0,006	0,032	0,403	0,000	0,001
Fáze1X	18,371	-176,916	-179,908	-12,976	19,865	-170,182
Fáze1Y	-165,639	18,254	5,414	147,753	-172,378	18,425
Fáze2X	-177,505	172,585	21,091	179,799	-163,508	-176,974
Fáze2Y	-47,124	126,139	173,464	17,930	-174,267	167,396
Poměr1X	1,096	2,164	2,308	2,951	1,278	2,217
Poměr1Y	2,210	1,136	2,892	2,291	2,365	1,193
Poměr2X	1,232	1,176	1,211	1,263	3,755	2,525
Poměr2Y	4,351	2,967	3,185	1,188	2,859	2,034
Teplota	27,0	27,0	27,0	27,0	27,1	27,2
Rychlost	70,2	71,8	70,4	72,4	0,0	0,0
Frek_buz	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
Teplota_vz	23,6	23,7	23,7	23,8	23,9	24,5

w = 70m/s (2. část)

Název	Buzení X0, 0,4 mm dolní, 43 Hz, V=0 m/s	Buzení Y0, 0,4 mm dolní, 43 Hz, V=0 m/s	Buzení X2, 0,4 mm horní, 43 Hz, V=70 m/s	Buzení Y2, 0,4 mm horní, 43 Hz, V=70 m/s	Buzení X2, 0,4 mm dolní, 43 Hz, V=70 m/s	Buzení Y2, 0,4 mm dolní, 43 Hz, V=70 m/s
F11X	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
I1X	0,000	0,000	0,368	0,003	0,004	0,002
FA1X	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
A1X	0,001	0,000	0,403	0,006	0,010	0,006
F11Y	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
I1Y	0,000	0,000	0,002	0,354	0,003	0,002
FA1Y	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
A1Y	0,000	0,000	0,004	0,402	0,008	0,005
F12X	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
I2X	0,286	0,009	0,006	0,005	0,332	0,007
FA2X	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
A2X	0,400	0,011	0,008	0,006	0,402	0,009
F12Y	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
I2Y	0,004	0,335	0,001	0,002	0,010	0,338
FA2Y	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
A2Y	0,012	0,402	0,004	0,006	0,032	0,402
Fáze1X	-179,013	-176,851	18,368	-175,919	179,466	-14,044
Fáze1Y	-176,984	167,695	-169,296	18,268	5,086	143,654
Fáze2X	22,521	-176,462	-178,578	173,818	21,060	-178,007
Fáze2Y	176,953	19,128	-35,835	128,195	173,772	17,886
Poměr1X	4,413	3,079	1,096	2,183	2,318	2,944
Poměr1Y	2,788	1,512	2,137	1,135	2,893	2,304
Poměr2X	1,398	1,285	1,236	1,197	1,211	1,254
Poměr2Y	3,060	1,201	4,497	2,971	3,182	1,187
Teplota	27,2	27,3	27,5	27,4	27,4	27,3
Rychlost	0,0	0,0	69,9	70,8	72,9	70,8
Frek_buz	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
Teplota_vz	24,8	25,1	24,2	24,4	24,5	24,6

w = 80m/s (1. část)

Název	Buzení X1, 0,4 mm horní, 43 Hz, V=80 m/s	Buzení Y1, 0,4 mm horní, 43 Hz, V=80 m/s	Buzení X1, 0,4 mm dolní, 43 Hz, V=80 m/s	Buzení Y1, 0,4 mm dolní, 43 Hz, V=80 m/s	Buzení X0, 0,4 mm horní, 43 Hz, V=0 m/s	Buzení Y0, 0,4 mm horní, 43 Hz, V=0 m/s
F11X	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
I1X	0,389	0,003	0,006	0,002	0,313	0,003
FA1X	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
A1X	0,399	0,006	0,014	0,007	0,401	0,007
F11Y	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
I1Y	0,002	0,356	0,004	0,002	0,003	0,336
FA1Y	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
A1Y	0,005	0,399	0,011	0,005	0,008	0,401
F12X	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
I2X	0,008	0,006	0,345	0,007	0,000	0,000
FA2X	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
A2X	0,010	0,008	0,402	0,009	0,000	0,000
F12Y	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
I2Y	0,000	0,003	0,011	0,339	0,000	0,000
FA2Y	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
A2Y	0,002	0,007	0,037	0,396	0,001	0,000
Fáze1X	17,489	157,183	175,257	-18,431	19,983	-173,125
Fáze1Y	-176,951	17,689	-3,044	139,873	-169,560	18,389
Fáze2X	-178,654	173,215	20,595	173,970	175,212	168,629
Fáze2Y	-92,443	151,896	176,174	17,510	-148,732	-173,564
Poměr1X	1,027	2,196	2,373	2,836	1,279	2,228
Poměr1Y	2,204	1,120	2,798	2,336	2,357	1,195
Poměr2X	1,238	1,218	1,164	1,266	2,948	2,213
Poměr2Y	4,113	2,870	3,196	1,169	2,245	1,140
Teplota	27,5	27,5	27,6	27,6	27,7	27,8
Rychlost	81,2	81,7	81,5	81,3	0,0	0,0
Frek_buz	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
Teplota_vz	25,4	25,4	25,5	25,5	25,7	25,9

w = 80m/s (2. část)

Název	Buzení X0, 0,4 mm dolní, 43 Hz, V=0 m/s	Buzení Y0, 0,4 mm dolní, 43 Hz, V=0 m/s	Buzení X2, 0,4 mm horní, 43 Hz, V=80 m/s	Buzení Y2, 0,4 mm horní, 43 Hz, V=80 m/s	Buzení X2, 0,4 mm dolní, 43 Hz, V=80 m/s	Buzení Y2, 0,4 mm dolní, 43 Hz, V=80 m/s
F11X	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
I1X	0,000	0,000	0,396	0,003	0,006	0,004
FA1X	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
A1X	0,001	0,001	0,402	0,006	0,013	0,012
F11Y	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
I1Y	0,000	0,000	0,001	0,354	0,001	0,003
FA1Y	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
A1Y	0,000	0,001	0,004	0,396	0,003	0,008
F12X	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
I2X	0,289	0,009	0,010	0,005	0,344	0,007
FA2X	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
A2X	0,403	0,011	0,013	0,006	0,400	0,009
F12Y	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
I2Y	0,004	0,337	0,005	0,002	0,004	0,350
FA2Y	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
A2Y	0,013	0,401	0,016	0,007	0,012	0,403
Fáze1X	55,281	85,988	17,659	-163,145	174,208	-10,781
Fáze1Y	-144,353	-131,985	-42,480	15,729	177,791	129,923
Fáze2X	22,473	-177,006	-178,226	171,102	20,480	-173,579
Fáze2Y	177,921	19,122	173,141	144,089	169,165	18,717
Poměr1X	5,044	3,835	1,016	2,189	2,386	2,713
Poměr1Y	1,378	2,131	3,022	1,117	2,111	2,461
Poměr2X	1,396	1,285	1,266	1,194	1,164	1,262
Poměr2Y	3,107	1,191	3,023	2,872	3,075	1,151
Teplota	27,9	27,9	28,0	28,1	28,0	28,0
Rychlost	0,0	0,0	82,0	81,8	82,0	82,4
Frek_buz	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
Teplota_vz	26,0	26,1	25,4	25,4	25,6	25,7

w = 90m/s (1. část)

Název	Buzení X1, 0,4 mm horní, 43 Hz, V=90 m/s	Buzení Y1, 0,4 mm horní, 43 Hz, V=90 m/s	Buzení X1, 0,4 mm dolní, 43 Hz, V=90 m/s	Buzení Y1, 0,4 mm dolní, 43 Hz, V=90 m/s	Buzení X0, 0,4 mm horní, 43 Hz, V=0 m/s	Buzení Y0, 0,4 mm horní, 43 Hz, V=0 m/s
F11X	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
I1X	0,405	0,003	0,006	0,003	0,309	0,003
FA1X	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
A1X	0,404	0,007	0,015	0,009	0,397	0,008
F11Y	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
I1Y	0,001	0,365	0,005	0,003	0,003	0,338
FA1Y	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
A1Y	0,002	0,402	0,012	0,006	0,007	0,404
F12X	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
I2X	0,010	0,008	0,360	0,008	0,000	0,000
FA2X	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
A2X	0,013	0,010	0,403	0,011	0,001	0,000
F12Y	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
I2Y	0,001	0,003	0,014	0,344	0,000	0,000
FA2Y	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
A2Y	0,006	0,010	0,043	0,398	0,000	0,000
Fáze1X	17,338	-174,719	179,232	-9,701	19,953	-171,512
Fáze1Y	-165,944	18,019	-5,246	152,887	-172,790	18,630
Fáze2X	-179,772	173,936	20,274	169,370	163,554	-173,512
Fáze2Y	-37,247	134,101	176,036	17,104	-171,278	172,330
Poměr1X	0,997	2,189	2,407	2,774	1,284	2,250
Poměr1Y	1,670	1,101	2,735	2,339	2,327	1,196
Poměr2X	1,261	1,253	1,121	1,279	4,179	2,424
Poměr2Y	4,068	3,013	3,195	1,157	2,486	2,025
Teplota	28,1	28,0	28,2	28,1	28,2	28,2
Rychlost	92,4	90,3	91,3	90,9	0,0	0,0
Frek_buz	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
Teplota_vz	26,8	27,1	27,2	27,0	26,7	26,8

w = 90m/s (2. část)

Název	Buzení X0, 0,4 mm dolní, 43 Hz, V=0 m/s	Buzení Y0, 0,4 mm dolní, 43 Hz, V=0 m/s	Buzení X2, 0,4 mm horní, 43 Hz, V=90 m/s	Buzení Y2, 0,4 mm horní, 43 Hz, V=90 m/s	Buzení X2, 0,4 mm dolní, 43 Hz, V=90 m/s	Buzení Y2, 0,4 mm dolní, 43 Hz, V=90 m/s
F11X	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
I1X	0,000	0,000	0,410	0,005	0,007	0,005
FA1X	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
A1X	0,001	0,000	0,398	0,012	0,018	0,014
F11Y	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
I1Y	0,000	0,000	0,003	0,363	0,005	0,008
FA1Y	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
A1Y	0,000	0,000	0,009	0,397	0,014	0,019
F12X	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
I2X	0,288	0,009	0,012	0,008	0,364	0,004
FA2X	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
A2X	0,402	0,012	0,016	0,010	0,400	0,005
F12Y	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
I2Y	0,004	0,341	0,007	0,005	0,005	0,341
FA2Y	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
A2Y	0,013	0,403	0,020	0,016	0,018	0,396
Fáze1X	-145,015	-164,417	17,101	-174,820	179,493	-11,126
Fáze1Y	-175,687	164,086	-32,996	14,178	23,419	108,628
Fáze2X	22,444	-176,667	-178,525	179,104	20,319	171,593
Fáze2Y	176,320	19,311	173,012	109,733	-21,353	16,448
Poměr1X	5,552	2,133	0,971	2,325	2,395	2,671
Poměr1Y	1,916	1,854	2,785	1,092	2,709	2,521
Poměr2X	1,399	1,286	1,276	1,251	1,097	1,216
Poměr2Y	3,075	1,180	3,029	3,177	3,415	1,162
Teplota	28,1	28,4	28,5	28,7	28,6	28,7
Rychlost	0,0	0,0	89,3	89,0	88,7	88,7
Frek_buz	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
Teplota_vz	26,7	26,9	26,8	27,1	27,3	27,5

w = 100m/s (1. část)

Název	Buzení X1, 0,4 mm horní, 43 Hz, V=100 m/s	Buzení Y1, 0,4 mm horní, 43 Hz, V=100 m/s	Buzení X1, 0,4 mm dolní, 43 Hz, V=100 m/s	Buzení Y1, 0,4 mm dolní, 43 Hz, V=100 m/s	Buzení X0, 0,4 mm horní, 43 Hz, V=0 m/s	Buzení Y0, 0,4 mm horní, 43 Hz, V=0 m/s
F11X	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
I1X	0,443	0,004	0,009	0,007	0,307	0,004
FA1X	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
A1X	0,402	0,010	0,022	0,017	0,400	0,008
F11Y	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
I1Y	0,004	0,380	0,007	0,010	0,003	0,338
FA1Y	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
A1Y	0,010	0,396	0,018	0,025	0,007	0,404
F12X	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
I2X	0,015	0,009	0,389	0,004	0,000	0,000
FA2X	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
A2X	0,020	0,012	0,404	0,005	0,001	0,001
F12Y	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
I2Y	0,008	0,007	0,008	0,357	0,000	0,000
FA2Y	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
A2Y	0,026	0,022	0,027	0,403	0,000	0,001
Fáze1X	16,325	-172,518	-179,289	-9,828	20,061	-172,384
Fáze1Y	-27,500	12,942	26,189	116,935	-174,348	19,183
Fáze2X	-178,021	179,748	19,489	164,895	-175,319	178,811
Fáze2Y	171,207	125,367	-18,627	15,538	-175,681	173,055
Poměr1X	0,907	2,314	2,412	2,642	1,301	2,234
Poměr1Y	2,782	1,042	2,691	2,519	2,310	1,195
Poměr2X	1,284	1,265	1,038	1,213	4,328	2,558
Poměr2Y	3,060	3,144	3,379	1,130	2,542	2,560
Teplota	28,8	28,9	28,9	29,0	29,1	29,0
Rychlost	100,2	101,2	100,1	100,9	0,0	0,0
Frek_buz	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
Teplota_vz	29,1	29,3	29,4	29,8	29,4	29,2

w = 100m/s (2. část)

Název	Buzení X0, 0,4 mm dolní, 43 Hz, V=0 m/s	Buzení Y0, 0,4 mm dolní, 43 Hz, V=0 m/s	Buzení X2, 0,4 mm horní, 43 Hz, V=100 m/s	Buzení Y2, 0,4 mm horní, 43 Hz, V=100 m/s	Buzení X2, 0,4 mm dolní, 43 Hz, V=100 m/s	Buzení Y2, 0,4 mm dolní, 43 Hz, V=100 m/s
F11X	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
I1X	0,000	0,000	0,435	0,004	0,009	0,007
FA1X	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
A1X	0,000	0,000	0,396	0,010	0,022	0,018
F11Y	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
I1Y	0,000	0,000	0,004	0,379	0,008	0,009
FA1Y	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
A1Y	0,000	0,000	0,010	0,396	0,020	0,022
F12X	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
I2X	0,284	0,009	0,015	0,010	0,380	0,004
FA2X	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
A2X	0,399	0,012	0,019	0,012	0,396	0,005
F12Y	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
I2Y	0,004	0,347	0,008	0,006	0,008	0,351
FA2Y	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
A2Y	0,013	0,404	0,026	0,020	0,027	0,398
Fáze1X	-159,723	-172,801	16,309	-172,342	178,870	-10,915
Fáze1Y	-176,778	165,438	-25,776	12,234	20,880	116,346
Fáze2X	22,522	-177,105	-177,339	178,306	19,459	162,779
Fáze2Y	175,634	19,500	170,222	120,823	-15,208	15,199
Poměr1X	4,431	2,585	0,912	2,242	2,405	2,642
Poměr1Y	2,083	1,912	2,746	1,046	2,666	2,523
Poměr2X	1,409	1,281	1,283	1,240	1,043	1,216
Poměr2Y	3,052	1,165	3,080	3,124	3,378	1,134
Teplota	29,0	29,2	29,4	29,3	29,3	25,3
Rychlost	0,0	0,0	100,4	100,5	102,9	112,8
Frek_buz	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000	43,0000
Teplota_vz	29,2	29,0	29,7	29,9	30,0	29,5

6.4. Výpočty – číslo 4

Pružné síly (1. část)

APXX00	APXX01	APXX10	APXX11	APYX00	APYX01	APYX10	APYX11
2,046	0,005	-0,029	-2,025	-0,001	0,008	0,004	0,032
2,950	0,031	-0,016	-1,994	-0,001	-0,005	-0,001	-0,007
0,523	-0,008	-0,012	-0,562	-0,014	0,006	-0,003	-0,025
0,493	-0,004	-0,009	-0,531	-0,013	-0,005	0,002	-0,019
0,191	0,009	0,007	-0,756	-0,009	-0,002	-0,001	0,003
0,173	-0,005	0,004	0,093	-0,008	0,002	-0,003	-0,012
0,718	0,013	0,003	-1,606	0,007	0,007	0,001	0,008
0,641	0,013	-0,019	-1,559	0,008	0,002	-0,009	0,007
0,876	0,003	-0,020	-1,339	0,002	0,011	0,004	-0,030
0,896	0,012	-0,021	-1,312	-0,010	-0,010	0,003	-0,001
0,470	-0,002	0,012	-0,754	0,004	-0,001	0,008	-0,015
0,505	-0,009	0,012	-0,678	0,003	0,004	0,000	-0,014
0,675	-0,004	-0,006	-0,664	0,008	-0,003	0,000	-0,006
0,378	0,009	-0,006	0,350	0,009	0,003	0,000	-0,002
1,244	0,009	0,007	-1,602	0,003	0,007	-0,001	0,025
1,313	0,013	-0,015	-1,550	-0,005	0,000	0,003	0,026
1,013	0,006	0,015	-1,483	-0,006	-0,003	0,010	-0,003
1,005	-0,008	0,021	-1,539	0,005	0,008	-0,011	0,007
2,593	0,021	-0,032	-1,940	0,007	0,003	-0,004	0,016
2,459	0,022	-0,014	-1,948	0,004	0,009	0,001	-0,016
2,714	0,026	-0,024	-1,968	-0,003	0,010	-0,003	-0,013
2,694	0,005	-0,022	-1,971	-0,007	-0,006	0,004	-0,013
3,142	0,005	0,006	-1,837	0,004	0,019	-0,004	0,017
3,120	0,031	0,019	-1,768	0,005	-0,003	0,004	0,042
3,157	0,023	0,022	-1,785	0,003	-0,016	-0,003	0,002
3,157	0,016	-0,004	-1,828	0,006	-0,003	0,003	0,042
-0,450	-0,002	-0,002	0,453	-0,006	0,000	0,000	0,011
-0,396	-0,004	-0,004	0,621	-0,002	0,003	0,003	0,006
-0,867	0,007	-0,003	0,974	0,005	-0,002	0,001	0,001
-1,008	0,001	0,006	0,934	0,006	-0,001	-0,003	0,014
-1,599	0,002	-0,020	1,428	0,009	-0,006	0,003	-0,008
-1,561	0,010	-0,021	1,475	0,006	0,006	-0,001	-0,001
-1,986	0,014	-0,025	1,654	-0,005	-0,011	-0,002	-0,049
-1,989	-0,006	-0,010	1,670	-0,007	-0,011	0,003	-0,053
-2,970	-0,018	-0,011	1,872	0,000	0,010	0,000	0,017
-2,925	-0,026	-0,028	1,872	0,010	0,003	-0,014	-0,010
-3,030	-0,003	0,029	1,864	-0,007	0,005	0,003	0,017
-3,009	-0,012	-0,022	1,894	-0,016	-0,012	-0,017	-0,028
-2,351	0,010	-0,051	1,335	-0,008	0,008	0,027	0,017
-2,305	0,010	-0,062	1,276	-0,023	0,029	0,026	-0,027

Pružné síly (2. část)

APXY00	APXY01	APXY10	APXY11	APYY00	APYY01	APYY10	APYY11
-0,009	0,001	0,025	-0,030	0,540	0,007	-0,010	0,312
-0,001	-0,002	-0,036	-0,053	1,437	-0,009	0,012	-1,692
0,008	-0,001	-0,008	-0,046	-0,027	-0,001	0,004	-0,072
0,027	-0,003	-0,003	-0,045	0,044	0,000	0,004	-0,101
0,004	0,004	-0,004	-0,010	0,007	0,000	0,000	-0,367
0,017	-0,004	0,000	-0,019	0,075	0,003	0,003	-0,380
0,010	0,007	-0,001	-0,011	0,920	-0,007	-0,002	-1,736
0,002	0,006	0,009	-0,001	0,832	-0,005	0,001	-0,197
0,001	-0,004	-0,016	-0,056	0,167	-0,003	0,003	0,207
0,020	-0,004	-0,016	-0,057	-0,491	-0,002	0,007	0,272
-0,011	-0,004	-0,008	-0,001	0,158	0,003	-0,002	-0,443
0,002	0,004	-0,004	-0,004	0,301	0,004	0,001	-0,392
-0,022	-0,004	-0,008	-0,055	-0,073	-0,003	0,002	0,240
-0,023	0,000	-0,004	-0,058	-0,203	-0,004	-0,002	-0,002
0,000	0,002	0,012	-0,055	0,036	-0,007	0,003	0,760
-0,004	0,004	0,002	-0,058	0,099	0,004	-0,006	0,754
0,000	0,001	0,008	-0,058	1,638	0,004	-0,004	0,319
-0,019	-0,008	0,000	-0,025	1,635	0,007	-0,003	0,178
0,007	-0,011	0,019	-0,044	0,148	0,011	-0,009	0,867
0,003	-0,015	-0,027	-0,044	0,131	0,014	0,004	0,864
0,006	-0,013	0,021	-0,022	0,272	0,006	0,010	0,751
0,011	-0,003	-0,004	-0,024	0,119	0,006	-0,009	0,827
-0,001	0,017	-0,033	-0,051	0,363	-0,011	0,001	0,148
-0,004	-0,013	-0,030	-0,064	0,129	-0,006	0,003	-0,155
-0,002	-0,003	-0,008	0,001	0,256	-0,008	0,004	0,072
-0,022	0,012	-0,031	-0,040	0,330	0,011	-0,014	0,062
0,010	0,004	-0,008	-0,009	0,032	-0,003	-0,002	0,050
0,004	0,000	-0,002	-0,019	-0,001	0,001	0,001	-0,044
0,017	-0,004	0,012	-0,008	-0,016	0,000	-0,004	-0,518
0,023	0,004	0,011	-0,026	-0,021	0,003	0,004	-0,511
-0,005	-0,007	-0,001	0,041	-0,051	0,006	-0,008	-0,857
0,009	0,002	-0,009	0,041	-0,089	0,007	0,003	-0,955
-0,004	-0,004	0,006	0,005	-0,135	0,005	0,006	-1,427
0,007	-0,009	-0,017	-0,002	-0,123	-0,008	0,001	-1,475
-0,004	0,003	-0,008	0,009	-0,065	0,006	0,011	-1,842
-0,003	0,018	0,020	0,056	2,131	-0,004	0,000	-0,431
0,025	0,004	-0,029	0,016	-0,317	0,011	0,006	-2,275
0,032	0,022	0,002	0,043	2,117	0,026	-0,004	-2,219
0,002	0,014	-0,021	0,052	-0,011	0,003	0,004	-1,542
-0,001	0,031	0,031	0,025	-0,748	0,021	0,022	-1,090

Útlumové síly (1. část)

AUX00	AUX01	AUX10	AUX11	AUY00	AUY01	AUY10	AUY11
0,884	-0,022	-0,016	0,317	0,012	0,017	-0,001	-0,001
-0,033	-0,007	0,047	1,793	0,015	-0,026	0,008	0,070
0,738	-0,004	-0,002	-0,384	0,018	-0,005	0,002	0,011
0,714	-0,008	-0,008	-0,384	-0,002	-0,005	0,003	0,023
0,461	0,002	-0,005	-0,431	0,012	0,003	-0,004	0,003
0,447	0,008	-0,007	1,680	0,012	-0,003	-0,003	0,026
1,028	0,004	-0,020	-0,175	0,012	0,002	0,011	0,015
-1,887	0,004	0,007	-0,225	0,011	0,003	-0,006	0,019
1,082	-0,013	-0,004	-0,328	0,005	0,000	-0,001	0,033
1,093	-0,006	-0,001	-0,349	0,015	0,006	0,002	0,043
0,732	-0,009	0,005	-0,270	0,005	0,004	-0,001	0,012
0,772	0,003	0,000	-0,256	0,014	0,001	0,004	0,027
0,858	0,008	-0,005	-0,256	0,010	-0,002	0,000	-0,010
0,656	-0,001	0,005	1,771	0,018	0,002	0,000	-0,009
1,139	0,010	-0,019	0,105	0,004	-0,003	0,004	0,001
1,142	0,002	-0,014	0,048	0,007	0,008	-0,003	0,022
1,097	-0,012	0,014	0,015	0,011	0,007	0,005	-0,005
1,096	0,011	-0,002	0,065	0,005	0,001	0,002	0,001
-0,007	-0,012	-0,008	0,726	-0,008	0,011	0,001	-0,033
0,182	0,001	0,030	0,804	-0,018	0,007	-0,004	-0,026
-0,256	-0,011	0,023	0,917	-0,005	0,006	-0,002	-0,032
-0,162	-0,031	0,030	0,902	-0,012	-0,010	0,000	-0,032
-0,832	-0,031	0,045	1,945	0,008	0,001	0,001	-0,043
-0,952	-0,003	0,041	2,025	0,018	-0,019	0,001	-0,003
-0,795	-0,022	0,040	2,001	0,015	0,011	0,002	-0,050
-0,795	-0,027	0,045	1,943	0,010	-0,019	-0,002	-0,004
0,497	-0,004	0,008	-0,177	0,015	0,004	0,000	0,014
0,458	-0,008	0,007	-0,175	0,020	-0,003	0,002	0,025
0,703	-0,006	0,012	-0,069	0,021	0,003	0,003	0,030
0,726	-0,013	0,011	-0,082	0,010	-0,004	0,002	0,021
0,781	-0,013	0,003	0,221	0,012	-0,005	-0,002	-0,032
0,772	-0,009	0,002	0,256	0,017	-0,005	0,004	-0,029
0,647	-0,011	-0,002	0,313	0,003	-0,001	-0,003	-0,018
0,641	-0,017	-0,023	0,354	0,018	-0,004	-0,003	-0,007
-0,356	0,020	-0,031	0,983	-0,011	-0,012	0,000	0,044
-0,058	-0,005	-0,030	1,147	-0,006	0,002	-0,013	0,027
-0,645	-0,027	-0,029	1,460	0,004	0,018	0,002	0,035
-1,078	-0,029	-0,044	1,398	0,000	-0,015	-0,021	-0,019
-2,208	-0,039	-0,036	2,429	-0,023	0,026	-0,013	0,009
-2,195	-0,039	0,004	2,422	-0,005	0,009	0,016	-0,033

Útlumové síly (2. část)

AUXY00	AUXY01	AUXY10	AUXY11	AUYY00	AUYY01	AUYY10	AUYY11
0,016	0,009	-0,002	-0,016	0,017	0,002	0,004	-0,296
0,016	-0,013	-0,009	-0,009	-0,426	0,007	0,009	-2,054
-0,008	-0,004	-0,003	0,030	-0,020	-0,004	0,001	0,035
0,014	0,003	0,008	0,030	0,022	0,004	0,000	0,050
-0,007	0,000	0,000	0,023	0,020	0,004	0,004	0,170
-0,006	0,000	-0,004	0,029	0,041	0,002	-0,003	0,177
0,027	-0,005	0,012	0,035	-0,019	-0,003	0,003	-1,672
0,025	0,007	0,008	0,016	0,015	-0,006	-0,004	0,079
-0,001	-0,001	0,003	0,001	0,073	-0,007	0,007	-0,128
0,000	0,002	0,000	0,003	-2,224	-0,003	0,001	-0,190
-0,004	-0,002	-0,001	0,035	0,033	0,002	0,003	0,113
0,015	0,001	0,002	0,039	0,053	0,001	0,004	0,122
0,015	0,003	-0,002	0,005	-0,016	0,002	-0,003	-0,177
0,009	0,000	0,007	0,001	-0,067	0,000	0,003	-0,007
-0,001	0,004	-0,012	0,003	0,048	-0,002	0,007	-0,726
0,017	0,000	-0,016	0,015	0,064	0,006	-0,005	-0,731
0,012	0,009	-0,009	0,018	-1,229	0,001	0,001	-0,184
0,018	-0,004	0,012	0,048	-1,091	-0,002	-0,002	-0,098
-0,004	0,007	0,022	0,030	0,084	0,002	-0,007	-1,265
0,027	-0,001	0,009	0,027	0,092	-0,003	0,011	-1,250
0,001	0,013	0,020	0,062	0,078	0,009	-0,005	-1,665
0,003	0,017	0,029	0,061	0,093	-0,010	0,007	-1,438
-0,005	-0,006	0,018	0,034	0,109	0,002	-0,015	-2,341
0,009	0,012	-0,022	0,015	0,117	-0,010	-0,015	-2,473
0,007	0,013	-0,036	0,010	0,127	-0,008	0,014	-2,376
0,010	0,006	0,021	0,039	0,114	0,004	0,006	-2,380
-0,024	0,001	0,002	-0,055	0,170	-0,002	-0,003	-0,049
-0,023	0,000	-0,008	-0,041	0,058	0,004	0,004	0,027
0,001	0,000	0,002	-0,006	0,051	0,004	0,001	0,253
-0,008	0,000	0,005	-0,026	0,040	0,003	0,000	0,255
-0,011	0,006	-0,016	-0,028	0,016	0,004	0,000	0,281
0,003	-0,009	-0,014	-0,026	-0,094	-0,003	-0,007	0,268
-0,004	0,008	-0,020	-0,053	-0,196	-0,006	0,005	0,195
0,002	0,000	-0,012	-0,046	-0,179	0,000	-0,007	0,165
0,026	0,008	-0,023	-0,028	-0,908	0,005	0,000	-0,153
0,026	-0,003	0,004	-0,033	-1,425	-0,011	0,008	0,301
0,010	-0,013	-0,016	0,006	-0,751	0,003	-0,010	-0,442
0,015	0,004	-0,033	-0,030	0,211	0,015	-0,018	-1,276
-0,001	-0,028	-0,031	-0,009	0,170	-0,038	0,026	-1,899
0,000	-0,001	-0,027	0,002	-0,516	-0,027	-0,007	-1,926