

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Stavba energetických strojů a zařízení

BAKLÁŘSKÁ PRÁCE

Vyrovnání trubkové řady při měření v proudícím vzduchu

Autor: Jaroslav Vejvoda
Vedoucí práce: Prof. Ing. Jiří Linhart, CSc

Akademický rok: 2011/2012

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/diplomové práce.

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování

- Prof. Ing. Jiřímu Linhartovi, CSc za odborné vedení bakalářské práce.
- Ing. Jiřímu Hruškovi za odborné konzultace a za pomoc s měřením bakalářské práce.
- Panu Zajícovi za pomoc s konstrukcí modelu experimentálního zařízení.
- Mým rodičům a blízkým za podporu během studií.

Upozornění

Využití a společenské uplatnění výsledků bakalářské práce, včetně uváděných vědeckých a výrobně-technických poznatků nebo jakékoliv nakládání nimi je možné pouze na základě autorské smlouvy a se souhlasem Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni.

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Vejvoda	Jméno Jaroslav	
STUDIJNÍ OBOR	2301R016-13 „Stavba energetických strojů a zařízení“		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Prof. Ing. Linhart, CSc	Jméno Jiří	
PRACOVÍŠTĚ	ZČU - FST - KKE		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící škrtněte se
NÁZEV PRÁCE	Vyrovnaní trubkové řady při měření v proudícím vzduchu		

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

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	48	TEXTOVÁ ČÁST	31	GRAFICKÁ ČÁST	17
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Tento výzkum bakalářské práce se zabývá tokem vzduchu, který pohybuje se dvěma trubkami, zatímco zbytek trubek je pevně uložen. Všechny trubky jsou ve výchozí poloze v řadě. Cílem této bakalářské práce je eliminace statické výchylky pohybující se trubek od pevně uložených trubek, která je zapříčiněna proudem vzduchu. Pro tento účel je výzkumné zařízení vybaveno krokovými motory.
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	Vyrovnaní trubkové řady, tok vzduchu, statická výchylka, krokový motor, vibrouzel, vyhodnocení hodnot

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Vejvoda	Name Jaroslav	
FIELD OF STUDY	2301R016-13 „Power System Engineering“		
SUPERVISOR	Surname Prof. Ing. Linhart,CSc	Name Jiří	
INSTITUTION	ZČU - FST - KKE		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Aligning pipe series in the flowing air during measurement		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Power System Engineering	SUBMITTED IN	2012
----------------	------------------------	-------------------	--------------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	48	TEXT PART	31	GRAPHICAL PART	17
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The bachelor experimental study deals with the cross flown tube cascade with two tubes movable whereas the other are stiff. The goal of the experimental work is elimination of static displacements of the movable tubes in order to secure basic position of all tubes in row during their vibration caused by the flowing air. The experimental rig is equipped with stepping motors for this purpose.
KEY WORDS	cascade of tube dummies, air flow, static displacement elimination, stepping motor, vibro-knot, reference value

Obsah

Přehled použitých značek, symbolů a značení	6
veličiny.....	6
Bezrozměrné číslo	7
1. Úvod	8
2. Základní pojmy a definice.....	11
2.1. Používané vztahy	11
2.1.1. Rychlost	11
2.1.2. hustota media.....	12
3. Možnosti měření rychlosti.....	13
3.1. Průtokový způsob	13
3.2. Bodový způsob	13
3.3. Laserova metoda	13
3.4. Průtokové měření.....	14
3.4.1. Clona.....	14
3.4.2. Venturiho trubice	14
3.4.3. Vrtulkový průtokoměr	15
3.5. Bodové měření	16
3.5.1. Pitotova trubice	16
3.5.2. Prandtlova trubice.....	17
3.5.3. Drátková sonda.....	17
3.6. Laserové měření	19
4. Změna rychlosti	20
4.1. Rychlostní profil.....	20
4.2. Reynoldsovo číslo	22
5. Možnosti vyrovnání řady	22
5.1. Mechanický šroub	23
5.2. Krokové motory.....	23
5.3. Systém vibrouzlu	25
6. Metodika měření aerodynamických sil	25
7. Popis experimentálního zařízení	27
8. Použité zařízení pro experiment.....	29

8.1.	Měření rychlosti	29
8.2.	Rychlostní profil.....	31
8.3.	Hustota vzduchu.....	32
8.4.	Manipulace s pohyblivými trubkami	32
8.5.	Vibrace.....	34
8.6.	Snímání polohy	34
8.7.	Vyhodnocování.....	35
9.	Měření	35
9.1.	Postup měření	35
9.2.	Průběh měření.....	36
9.3.	Popis grafu.....	37
10.	Vynesení hodnot do grafů	40
11.	Vyhodnocení grafu	43
13.	Závěr	45
14.	Zdroje informací.....	45
14.1.	Literatura.....	45
14.2.	Internetové zdroje.....	46
15	Seznam příloh.....	46
	Ovlivnění tlumící gumou.....	48

Přehled použitých značek, symbolů a značení

veličiny	Rozměr	název
a_1	-	Opravná funkce
a_2	-	Opravná funkce
c_p	J / kg K	Měrná tepel. kapacita při stálém tlaku
d	mm	Charakteristický rozměr
m	kg/s	Hmotnostní průtok
n	-	Některé z přirozených čísel uvedený v tab
P_{atm}	Pa	Atmosférický tlak

P_{stat}	Pa	Statický tlak
P_{cel}	Pa	Celkový tlak
R	mm	Poloměr trubice
r	J / kg K	Univerzální plynová konstanta
S	m ²	Průřez potrubí
T	K	Termodynamická teplota
T_p	K	Teplota proudícího vzduchu
T_{konst}	K	Teplota konstrukce
ν	m ² /s	Kinetická viskozita
v	m ³ /Kg	Měrný objem
W	m/s	Rychlost proudění
W_{max}	m/s	Rychlost ve středu trubice

Bezrozměrné číslo

$$Re = \frac{w \cdot d}{\nu}$$

Reynoldsovo číslo

1. Úvod

Ve své práci se zabývám vyrovnáváním trubkové řady v proudícím vzduchu. Vlastní využití tohoto projektu nepřímo slouží ke zlepšení návrhu výměníku tepla pro energetiku. Tento projekt je jeden z dílčích projektů, které vedou ke zjišťování přenosu sil mezi pohybujícími se trubkami v modelu výměníku tepla.

Práce je rozdělena na dvě části. Teoretická část slouží k nastudování potřebných znalostí k uskutečnění experimentálního měření výchylky vibrující trubky v aerodynamickém tulenu za proudění proudu vzduchu. V teoretické části jsou dále zmíněny informace, které ovlivňují průběh samotného měření a nalézá se zde i vysvětlení potřebných vzorců pro výpočet. Dále je zde uveden přehled měřících zařízení, které je možno také využít pro měření.

V druhé, praktické části, se zabýváme popisem výzkumného zařízení, zdůvodnění použitých měřících a vyhodnocujících pomůcek. Dále v této práci naleznete informace pro pochopení řešené problematiky pro tento konkrétní řešený experiment, bude zde vysvětlen princip měření výchylky pohyblivé trubky vibrující v trubkové řadě v proudícím vzduchu. Doposud tato disciplína nebyla plnohodnotně zpracována. Nalezneme pouze podobné výzkumy, kterých se ve světě také nenachází příliš mnoho. Tyto výzkumy se zabývají fyzikálními zákony, ze kterých se můžeme poučit nebo i vycházet.

Nabízí se zde experiment An unsteady flow theory for vortex – induced vibration¹ Tento výzkum se zabýval matematickým modelem pro určení vibrací trubek, které jsou vybuzené víry (turbulencí), založené na teorii nestacionárního proudění. Ve vodním kanálu byl měřen vliv tekutinových sil na pohyb trubky, z kterých jsou vypočítávány koeficienty tekutinové tuhosti a útlumu jako funkce redukované rychlosti a amplitudy kmitání. Jsou-li známy tyto koeficienty, matematický model může být použit k předpovědi chování svazku na který působí víry včetně změny amplitudy fázového posunu frekvence a stability svazku. Dále z vibrace trubky byly zjištěny vazební koeficienty a díky nim byly zjištěny hydrodynamické síly.

Jako další příklad uvádím experiment Fluid dampige and fluid stiffnes of a tube row in crossflow² . Tento experiment zjišťoval síly působící na trubkovou řadu způsobené proudící tekutinou. Tyto síly byly měřeny jako funkce budící frekvence, která způsobuje oscilaci rychlosti proudění. Koeficienty tekutinové tuhosti útlumu byly získávány měřením pohybu

¹ Tento výzkum byl vyvíjen S. S. Chen, S.Zhu and Y. Gai Energy technology division, argonne National Laboratory, argonne ,Illinois 60439, U.S.A

² Tento výzkum byl vyvíjen S. S. Chen, S.Zhu and J.A. Jendrzejczyk v Argone National Laboratory, Illionis

trubky vybuzeného tekutinou jako funkcí redukované rychlosti proudění a amplitudy kmitání. Experiment probíhající ve vodním kanálu poskytuje data, která jsou nutná pro získávání koeficientů potřebných pro určení nestability trubkového svazku příčně obtékaného tekutinou.

Když už pro řešení problému nepomáhají informace z projektů a jiných výzkumů, musí se vycházet z dílčích teoretických znalostí o proudění a pokusit se mezi nimi najít souvislost a promítnout tyto znalosti do experimentu. Není možné, aby každá úvaha byla správná nebo použita v ten vhodný okamžik. To zapříčiňuje mnoho problémů, chyby v měření, poruchy zařízení, poruchy vyhodnocovací aparatury a jiné. Problémy a následná řešení těchto problémů, které tento experiment provázely, se dozvíte v příloze na konci této bakalářské práce.

Měření trubkové řady v proudícím vzduchu zahrnuje mnoho nevyřešených úloh, které čekají na jejich uskutečnění. Je to ovlivněno i tím, že tyto úlohy jsou velice náročné na přesnost měření a kladení vysokých nároků na vyhodnocovací aparatury. Samozřejmě je vhodné uvést, že díky nové, neustále se zdokonalující technologii, by se daly používat lepší a modernější měřicí zařízení, ale jako skoro každý experiment je i tento omezen financemi. Kromě tohoto velice důležitého faktoru, existuje i další omezující faktor, opakující se instalace nových technologií, která vede k nekonečnému vyhodnocování dat s takřka zanedbatelným rozdílem. S každou novou instalací nového prvku se musí provést přeladění ostatních zařízení s následným vzájemným vyladěním prvků, což by bylo velice a dlouhodobě náročné a tento postup by šel na úkor celého experimentu. Proto neustálá reinstalace dokonalejších zařízení by byla zbytečná.

Tento experiment se stává základem pro úlohy, které budou využívat získané informace (výchylku trubek a její přesné vyrovnání do výchozí polohy za proudění vzduchu) k dalšímu zpracování, například výpočet sil, které jsou přenášeny z jedné kmitající trubky na druhou trubku. Systém, nebo-li průběh tohoto výpočtu je vysvětlen na konci teoretické části. Samozřejmě tímto výzkumem, který bude používat informace o výchylce, to zdaleka nekončí. Mohou získaná data použít i jiné výzkumy s podobnou tematikou.

Jako posledním bodem je samotné zpracování naměřených hodnot, vynesení bodů do grafů, vyhodnocení grafů a popis dosažených výsledků.

Cílem této práce je zjistit závislost výchylky vibrujících pohyblivých trubek v proudu vzduchu na rychlosti proudění vzduchu v aerodynamickém tunelu.

Teoretická část

2. Základní pojmy a definice

Důležitou podmínkou pro úspěšné měření a následné vyhodnocení hodnot je nalézt přesnou rychlost proudícího vzduchu v měřeném úseku (v blízkosti před trubkovou řadou), kterou lze naměřit mnoha různými způsoby.

Musí se také vhodně zvolit frekvence kmitání pohyblivé trubky a velikost protékajícího proudu cívkami, které jsou umístěné ve vibrouzlu. To znamená nastavení vlastností buzení vibrouzlu, který nám rozkmitávájí danou trubku o přesně danou a námi požadovanou vzdálenost 0,4 mm.

Při přivedení proudu vzduchu kolmo na trubkovou řadu dojde k vychýlení pohyblivě uložených trubek. Takto vzniklá odchylka od referenčních hodnot³ se musí regulovat systémem, který dostatečně přesně vrátí pohyblivé trubky do referenčních hodnot. Pokud jsou tyto zmíněné úkony dobře zvládnuté, může se postoupit k samotnému měření.

2.1. Používané vztahy

2.1.1. Rychlost

Pro určení rychlosti je k nalezení mnoho vztahů a teorií. Musí se dbát na vhodné zvolení vzorce (vztahu, teorie). Vychází se ze znalosti, že medium (v tomto případě vzduch) je látka bez specifického tvaru, vyznačující se tendencí při pohybu (toku) sledovat obrysy nádoby a je zapotřebí znát i další vlastnosti. Stav proudícího vzduchu určují veličiny tlak, teplota, hustota a rychlost. Přesnější výsledek je dosažen při detailnějších znalostech o chování proudění vzduchu.

Za předpokladu, že měrná tepelná kapacita vzduchu $C_{p_{\text{vzduchu}}}$ nezávisí na tlaku a teplotě, platí zde jednoduchá stavová rovnice.

$$p = \rho * r * T \quad 1.1$$

Dále počítáme s podmínkou continuity proudu.

³ Referenční hodnota je výchozí stav pohyblivé trubky za nulového proudění vzduchu, která nejvíce odpovídala stavu vyrovnaných trubek v řadě.

$$M = \rho * w * S$$

2.1.2. hustota media

Hustota proudícího media se dá snadno odvodit ze stavové rovnice ideálního plynu rov1.1. Jak už vyplývá z názvu, musí jít v tomto případě o ideální plyn, který se vyznačuje vlastnostmi stlačitelností a nevazkostí. Pokud bude navíc proudění nestlačitelné, tj. hustota bude rovna konstantě, poté není potřeba ani stavová rovnice.

Existuje i rovnice pro reálný plyn, rovnice 1.6. V této rovnici (stavová rovnice pro reálná plyny) se objevují opravné funkce, které závisejí na teplotě, dávají rovnici ideálního plynu do souladu se skutečností.

Vzorec stavové rovnice pro ideální plyn:

$$p * v = r * T \quad 1.3$$

Obrácená hodnota měrného objemu se rovná hustotě daného plynu, proto lze přepsat rovnici na tento tvar:

$$\frac{P}{\rho} = r * T \quad 1.4$$

Poté už je velice snadné vyjádřit hustotu:

$$\rho = \frac{p}{r * T} \quad 1.5$$

Vzorec stavové rovnice pro reálný plyn:

$$\frac{P}{\rho} = r * T * [1 + \rho * a_1(T) + \rho^2 * a_2(T) + \dots] \quad 1.6$$

3. Možnosti měření rychlosti

Měření rychlosti závisí na měřené veličině, prostředí, kde se bude měření provádět, druhu proudění, dostupnosti měřícího úseku pro měřidla a na kvalitě měřícího přístroje. Kvalitou je míněna přesnost vyhodnocování výsledků, malá chybovost a další výhody. Základní rozdělení měřidel je podle použité metody. Třídít lze dále také podle použitého fyzikálního principu, konstrukce měřidla a také podle druhu měřeného media.

Tři základní způsoby pro měření rychlosti proudění plynů jsou způsoby průtokový a bodový. Existuje i velice odlišná metoda měření rychlosti a to metoda P. I. V.

3.1. Průtokový způsob

Měří se průtočné množství media, jsou to průtokoměry, jejichž funkce vyžaduje ke zpracování výsledků Bernoulliovu rovnici. Jedná se o clony, dýzy, Venturiho trubice, vrtulkové průtokoměry a jiné. Je zřejmé, že vývoj měřících technologií jde pořád kupředu, proto jsou již vyvinuty dokonalejší a přesnější systémy měření založeny na principech: laserových, ultrazvukových, Coriolisových a jiných. Nevýhodou těchto metod je většinou jejich příliš vysoká cena. Obecnou nevýhodou průtokoměrů, mimo naposledy zmíněné metody, je jejich robustní konstrukce, která vždy nevyhovuje pro měření v daných podmínkách.

3.2. Bodový způsob

Tímto způsobem se měří rychlost pouze v jenom místě (bodu), kde proudí měřené medium. Výhoda tohoto způsobu se nachází v možnosti manipulace s měřidlem a následné měření rychlosti v různých místech proudu vzduchu. Lze vyhodnocovat rychlost proudění takřka kdekoliv. Na rozdíl od průtokových měřidel se dá za pomoci těchto měřidel přibližně určit tvar rychlostního profilu.

3.3. Laserova metoda

Tato metoda využívá pro měření laserový paprsek, který prosvítí měřené medium. Další část systému tento paprsek zaznamená a následně vyhodnotí. Výhody tohoto zařízení jsou v přesnosti naměřených hodnot a možnosti využití této metody k měření jiných fyzikálních

jevů. Nevýhody jsou ve finanční náročnosti, ve velkých prostorových požadavcích a ve složitě konstrukci.

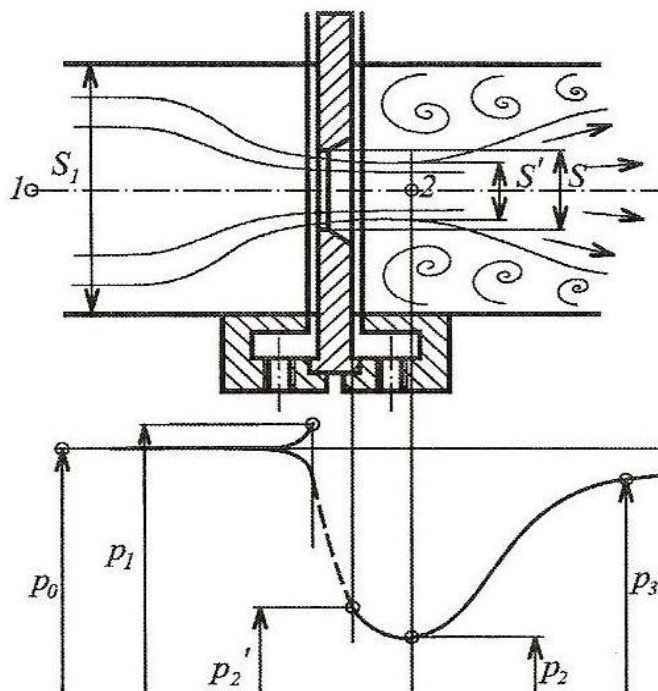
Příklady měřidel - bodové

- průtokové
- laserové

3.4. Průtokové měření

3.4.1. Clona

Princip zjištění průtokového množství tekutiny clonou nebo dýzou probíhá tak, že proud tekutiny se vložemí desky s průtokovým otvorem menším než je světlost potrubí stáhne do úzkého paprsku s vysokou rychlostí, změří se pokles tlaku v tomto místě P_1 - P_2 viz obr.1.1, a z něho se vypočte rychlost a protékající objem nebo hmotnost.“[1, str.92]



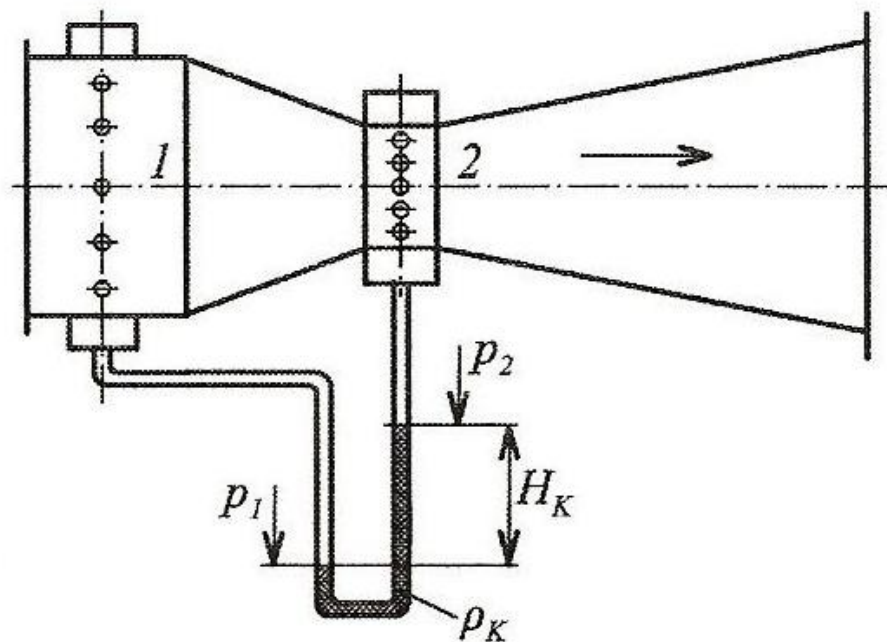
Obr. 1.1 clona

3.4.2. Venturiho trubice

Ve společné trubici se nachází průtočná část rozdělena do dvou kuželů, z nich první mezi body 1,2 je konfuzor, a druhý difuzor. V nejužším místě je největší rychlost a maximální podtlak oproti statickému tlaku P_1 . Rozdíl tlaků P_1 - P_2 se měří buď elektronickým nebo kapalinovým diferenciálním manometrem. Kuželový difuzor za nejužším místem zlepšuje

účinnost venturiho trubice tím, že snižuje ztrátu rozšířením proudu, zamezuje odtržení proudu od stěn.“[1, str.91]

Hlavní nevýhodou tohoto způsobu je ta, že vyžaduje velký prostor pro měření v daném useku.



Obr. 1.2 Venturiho trubice

3.4.3. Vrtulkový průtokoměr

Rychlost se určuje na základě otáčení vrtulky, která je úměrná průtokové rychlosti. Pro přesné měření musí být zajištěno, aby přívod media byl kolmý na vrtulku. Jedině tak lze dosáhnout požadovaných výsledků. Takto získaná hodnota rychlosti není závislá na hustotě, tlaku a teplotě tekutiny.

Snímání otáček vrtulky je prováděno induktivními snímači. Induktivní snímače zde nebrzdí vrtulku.

Pro určení směru proudění media jsou použity dva induktivní snímače, které reagují pokud vrtulka změní směr.

Vlastnosti

Měřený rozsah rychlosti je závislý na velikosti vrtulky umístěné aparatuře.

Rozsah měřené rychlosti: 0.2-120 m/s v plynech

0,01-10 m/s v kapalinách

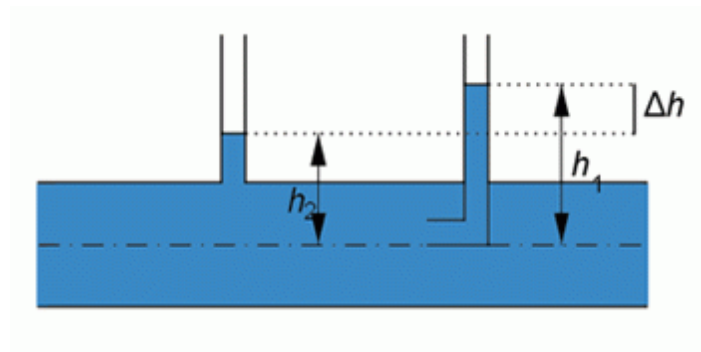


Obr. 1.3 Vrtulkový průtokoměr

3.5. Bodové měření

3.5.1. Pitotova trubice

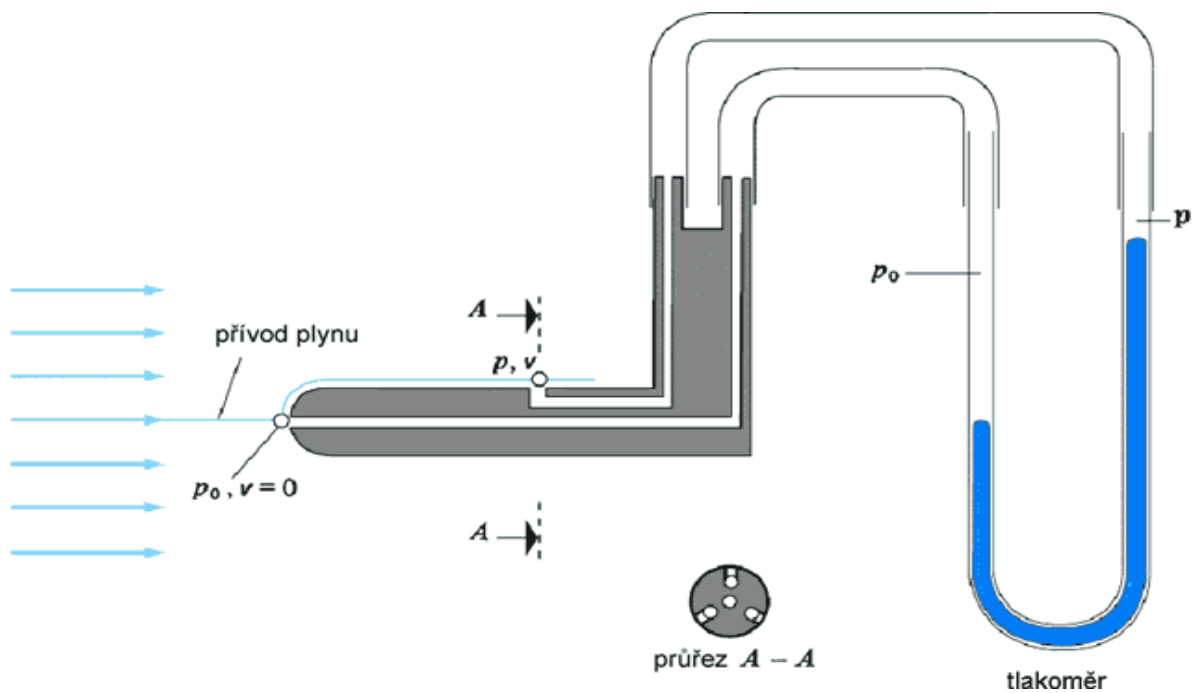
Pitotova trubice patří k nejstarším a nejjednodušším rychlostním sondám pro měření průtoku tekutiny. Primárním prvkem Pitotovy trubice je tenká trubička otočená ústím proti směru proudění tekutiny. Pitotovy trubice se používají především pro měření průtoku plynů nebo velmi čistých kapalin z důvodu možného zanesení otvorů trubice, kterými se tlak snímá. Na výstupu Pitotovy trubice je velmi malý rozdíl tlaků, který už ale v současné době není tak problematické změřit. Navíc přesnost měření závisí na rychlostním profilu proudění a při opatrném zacházení, tato přesnost se pohybuje kolem hodnoty 1%. Není-li trubice rovnoběžná s osou proudu, snímá se jen složka celkového tlaku. Pracovní konec trubice však bývá upraven tak, aby Pitotova trubice byla na menší vychýlení (15%) necitlivá. Z principu Pitotovy trubice byly odvozeny další typy sond, například víceotvorová rychlostní sonda (známá také pod obchodním Annubar).



Obr.1.4 Pitotova trubice

3.5.2. Prandtlůva trubice

Prandtlůva trubice je spojením Pitotovy a statické trubice v jeden celek. K měření statického a totálního tlaku dochází zároveň na jednom měřicím zařízení. Toto uspořádání má vyhodu a to takovou, že naměřené hodnoty jsou skoro ze stejného místa, kde proudí medium. Tudiž nedochází k ovlivnění výsledků. Uspořádání na (Obr. 8) Pitotova trubice je vložena do osy statické trubice. Statický tlak přiváděn do diferenčního senzoru tlaku (nanometru) bočním otvorem orientovaným kolmo na směr proudění. Je vhodné, aby na místě měření statického tlaku byly turbulence minimální. Celkový tlak je měřen v místě náporu (stagnace) otvorem s osou rovnoběžnou se směrem proudění. Manometry mohou být kapalinový, del obr:XX nebo elektrický.



Obr. 1.5 Prandtlůva trubice

3.5.3. Drátková sonda

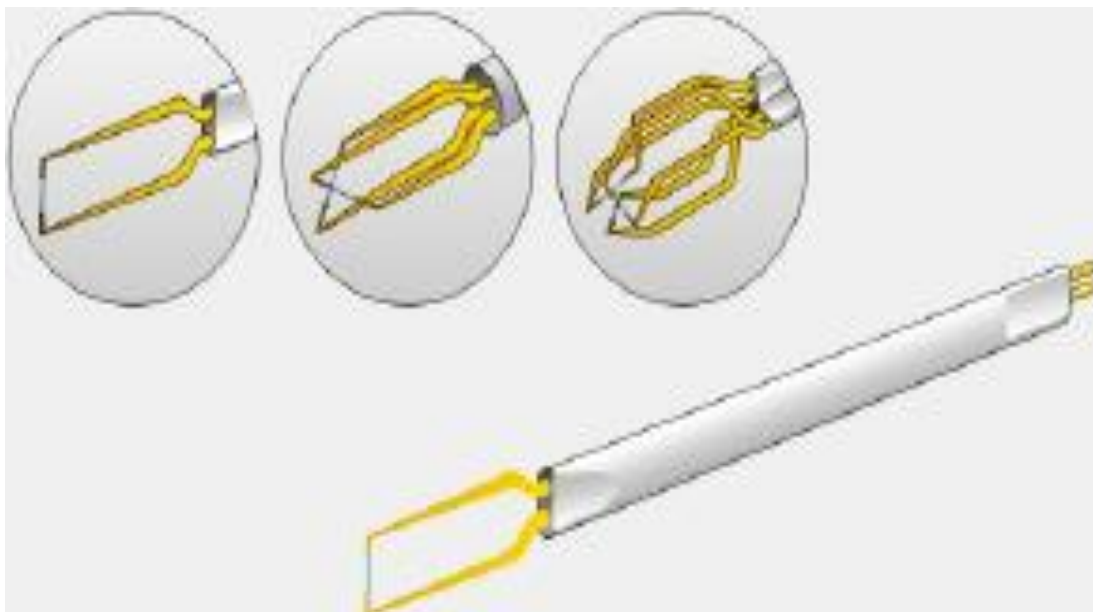
Měření rychlosti žárovým anemometrem je založeno na poznatku, že protékající

kapalinou dochází z elektricky ohřívaného čidla (žhavený drátek nebo fólie) k odvodu tepla, jehož velikost je měřítkem rychlosti. čidlo anemometru je tvořeno kovovým drátkem nebo fólií – obr. 2.1 žhavený drátek má délku cca 1 mm, průměr 2-10 μm a je zhotoven z platiny, wolframu nebo tungstenu, což je název pro drátek, jehož střed je z wolframu, který je na povrchu potažen platinou. Nejčastěji se používá drátek průměru 5 μm , je-li vyžadována větší mechanická pevnost, bývá průměr větší, naopak požaduje-li se zvětšení horní mezní frekvence použije se průměr drátku menší. Provozní teplota wolframových drátků nemá přesáhnout 300°C, pro vyšší teploty se používají drátky ze slitiny, platiny a india. Žhavené fólie se zhotovují z niklu a jsou nanášeny na sondu ve tvaru klínu.

Uvažujme tenký drátek napnutý mezi podpěrami a obtékáný rychlostí u . Když drátkem prochází elektrický proud, je generováno teplo. V rovnovážném stavu musí generace tepla být vyvážena ztrátou tepla (převážně konvekcí) do okolí. Jestliže se změní rychlost, změní se koeficient konvekčního přenosu tepla, změní se teplota drátku a systém dosáhne nové rovnováhy.“[v, str 12]

Výhod u této metody se nalézá mnoho. Například odstraňuje nedostatky od jiných metod měření rychlosti, směrovou necitlivost, necitlivost při měření náhlých změn rychlosti, necitlivost oproti malým rychlostem a jiné. Hlavní výhodou je rozsah měřené rychlosti od rychlosti řádově v cm/s až po rychlost zvuku s přesností $\pm 0,02$ m/s

Drátková sonda se také používá pro měření turbulence.



Obr .1.6 Druhy drátkových sond

3.6. Laserové měření

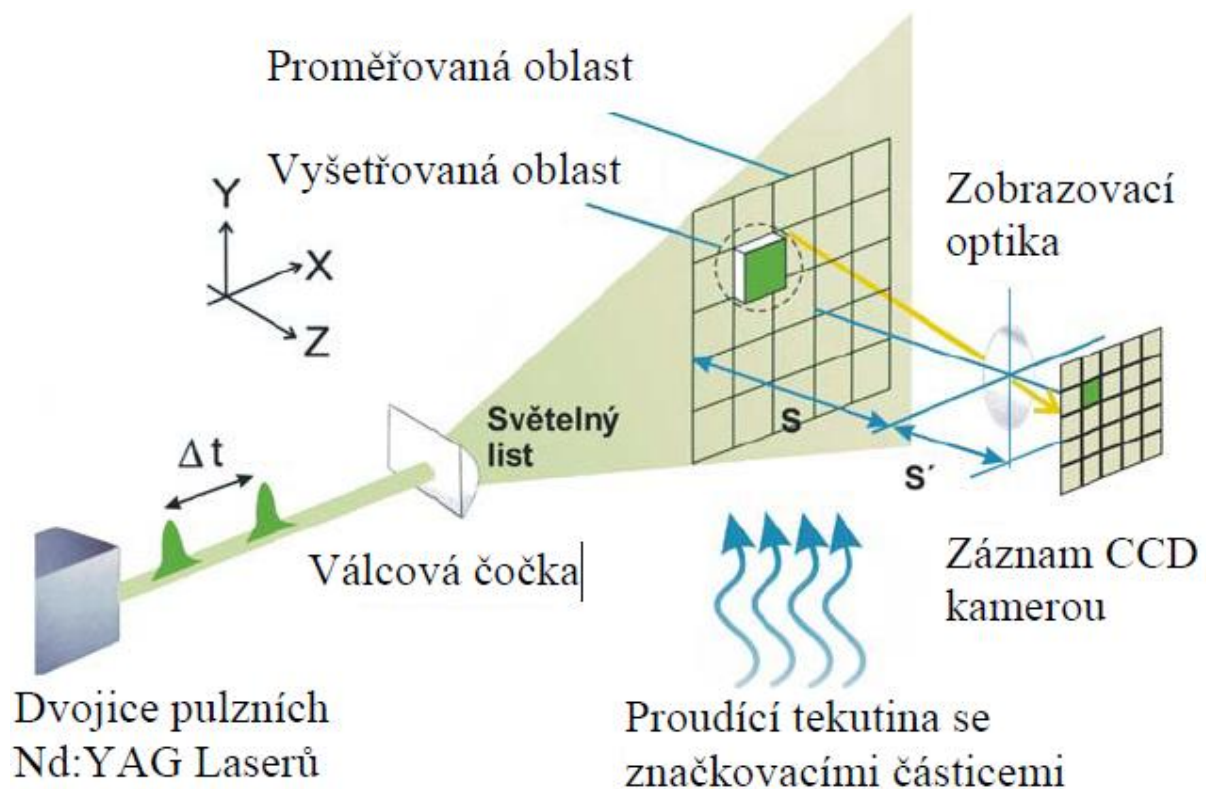
Základní princip PIV

Particle image velocity – PIV je měřicí technologie, která slouží k získání okamžitého pole vektorů rychlosti. Principem metody PIV je zaznamenání polohy značkovacích částic unášených proudící tekutinou na začátku a na konci známého časového intervalu. Ze známého časového intervalu a známé počáteční a koncové polohy značkovací částice vypočteme nejdříve posunutí značkovací částice a poté i rychlost proudění. Skutečnou měřenou veličinou je tedy posunutí značkovací částice. Moderní softwary využívají k výpočtu posunutí vzájemné korelace.

Měření metodou PIV schématicky znázorňuje Obr. 1.7. Skupina značkovacích částic, která je unášena proudící tekutinou, je v části proudového pole osvětlena a „zmrazena“ pulsem světelného listu. Pulzní Nd:YAG LASER generuje světelný paprsek, který se průchodem válcovou čočkou změní ve světelný list se stroboskopickým efektem „zmrazení“ pohybu značkovacích částic. Takto „zmrazená“ skupina částic je zachycena CCD kamerou, která je umístěna kolmo k laserovému listu. Poloha detekovaných částic se při použití filtru propouštějícího pouze světlo o generovaného LASERem jeví jako jasná světlá skvrna na tmavším pozadí. Pulzující světelný list a kamera jsou synchronizovány tak, aby částice, která byla osvětlená („zmrazená“) prvním světelným pulsem byla zachycena na první snímek kamery a ta samá částice byla osvětlená („zmrazená“) druhým světelným pulsem a zachycena na druhý snímek kamery.

Sestava měření, kdy je CCD kamera umístěná kolmo k LASERovému noži, umožňuje měřit vektory rychlosti v rovině LASERového listu a je tedy vhodná pro rovinné případy proudění nebo pro měření v rovině symetrie.

To, co z metody PIV udělalo tak silný nástroj pro měření proudového pole, je nástup výpočetní techniky spojený s digitalizací obrazu a s možností přejít od ručního vyhodnocení vizualizované stavové veličiny k statistickému zpracování digitálního obrazu.“ [3, str. 4]



Obr.1.7 Schéma měření metodou PIV

4. Změna rychlosti

Výše uvedené stavy proudění jsou řešeny za určitých ideálních podmínek, které se běžně neobjevují. Řešíme-li úlohy v praxi (potrubí klimatizace, plynové potrubí), zahrnujeme do vzorců ideálních případů další znalosti pro výpočty proudění.

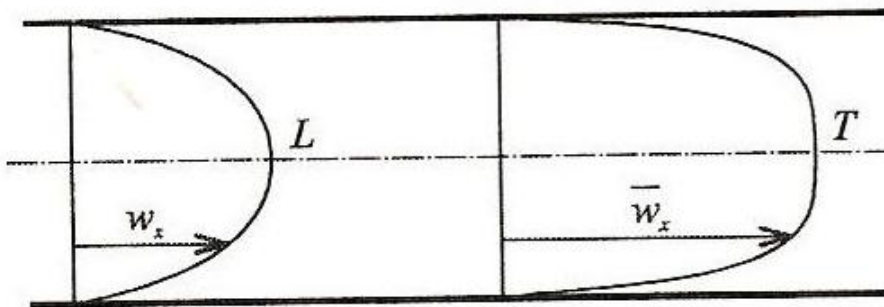
4.1. Rychlostní profil

Při proudění media dosahují částice v průřezu v jednom místě trubice různé rychlosti. To závisí na tření mezi částicemi, stěnou trubice a na vnitřním tření v mediu. Tento jev popisuje rychlostní profil.

Definice: Jestliže v jednotlivých bodech průtokového průřezu vyneseme grafický vektor rychlostí, koncové plochy vektorů vytvoří plochu zvaný rychlostní profil.

Vlivem vazkosti⁴ je rychlost na stěnách potrubí nulová. Se vzdáleností od stěny rychlost zpočátku prudce stoupá, gradient rychlosti pak směrem ke středu potrubí klesá. Rychlostní profil lze vyjádřit mocninným zákonem.“ [III, str.8]

$$w = w_{max} \left(\frac{y}{R}\right)^{\frac{1}{n}} \quad 1.7$$



Obr.1.8 Rychlostní profil

⁴ Vazkost neboli viskozita udává poměr mezi tečným napětím a změnou rychlosti v závislosti na vzdálenosti mezi sousedními vrstvami při proudění media.

4.2. Reynoldsovo číslo

U proudění potrubím je potřeba odpovědět na otázku, jestli se nachází v daném potrubí proudění laminární nebo turbulentní. Zodpovědět tuto otázku pomáhají naměřené veličiny: rychlost proudění vzduchu, charakteristický rozměr potrubí, vazkost. Z teorie podobnosti⁵ je získáno bezrozměrné číslo Reynolds Re . Kritická hodnota tohoto čísla Re_{krit} rozděluje proudění na laminární a turbulentní. Je důležité zmínit, že toto číslo je číslem podobnostním, tudíž bezrozměrné. Bylo odvozeno z Navier – Stokesovy rovnice.

$$Re = \frac{w \cdot d}{\nu} \quad 1.8$$

Bude-li hodnota Re vyšší, než kritická hodnota Re_{krit} , je proudění turbulentní. Bude-li pro kruhový průřez $Re \leq 2300$, proudění bude vždy laminární, je-li $Re \geq 3000$, bude vždy turbulentní. Ve větracích zařízeních bude charakter proudění vzduchu převážně turbulentní.“ [III, str. 8] Hodnota turbulentního proudění se pohybuje kolem hodnoty 100 000 Re .

5. Možnosti vyrovnání řady

K vyrovnání trubkové řady lze dospět několika možnostmi, ale ne vždy ten daný systém vyhovuje vnitřním požadavkům a problematice, která je pro řešený problém stěžejní.

⁵ Teorie podobnosti seskupuje hlavně geometrické, kinematické fyzikálních veličiny do zlomku, který je bezrozměrný a skrývá hlubší fyzikální význam.

5.1. Mechanický šroub

Vyrovnání řady lze dosáhnout mechanicky a to tak, že potřebná výchylka, která nastane díky působení proudu vzduchu, se bude vyrovnávat na referenční hodnotu⁶ pomocí posuvného šroubu. Tento způsob je sice řešením, ale v lidských silách není možné přesně otáčet klíčem a zajistit tedy přesné vysunutí posuvného šroubu a tím i následně posun celého paralelogramu požadovaným směrem na požadovanou hodnotu. Další faktor je i ten, že na výzkumných zařízeních není snadná manipulace s klíčem nebo s jakýmkoliv nářadím, prostor pro manipulaci je zde velice omezen a také se nemůže zanedbat nedostatečná přesnost této metody.

5.2. Krokové motory

Další možnost vyrovnání trubkové řady je za pomoci krokových motorů. Tento systém pracuje na podobné metodě vyrovnávání, jak už bylo zmíněno výše, a to za pomoci pohybového šroubu.

Složení

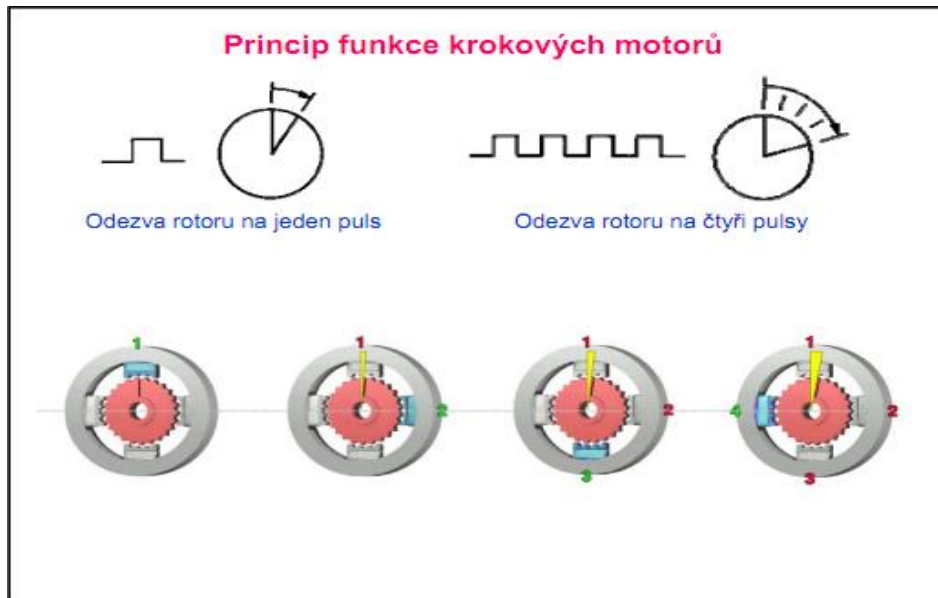
Na obr. 1.9 je krokový motor s 200 kroky na otáčku (1.8 stupně na krok). Stator krokového motoru je tvořen sadou cívek. Pólové nástavce statoru jsou vroubkovány se stejnou roztečí jako je rozteč magnetů na rotoru. Toto je jedna z částí zvyšující přesnost motoru při stejném počtu cívek. Rotor je tvořen hřídelí usazenou na kuličkových ložiskách a prstencem permanentních magnetů.“[1v]



Obr.1.9 Hlavní části krokového motoru

⁶ Referenční hodnota – stav vyrovnaných trubek do řady takřka s nulovou odchylkou od sebe, tedy pro nás výchozí stav.

Základní princip krokového motoru je úplně jednoduchý. Proud procházející cívkou statoru vytvoří magnetické pole, které přitáhne opačný pól magnetu rotoru. Vhodným zapojováním cívek je vytvořeno rotující magnetické pole, které otáčí rotorem.“ [1v]



Obr.1.10 Princip krokového motoru

Podle požadovaného kroutícího momentu, přesnosti nastavení polohy a přípustného odběru se volí některá z variant řízení. Kvůli přechodovým magnetickým jevům je omezena rychlost otáčení motoru, a to na několik stovek kroků za sekundu (závisí na typu motoru a zatížení). Při překročení této maximální rychlosti (nebo při příliš velké zátěži) motory začínají ztrácet kroky.“[1v]

Výhoda tohoto systému od předešlého je ta, že krokové motory jsou propojeny s počítačem a jsou plně automatizované. Nachází se zde mnohem pohodlnější možnost si danou vzdálenost zadat přímo v počítači a čekat na automatické provedení požadavku. Další výhodou krokových motorů je, že umí přesně nastavit svoji polohu a tuto polohu i přes působící síly udržet. V neposlední řadě musí být zmíněna i dobrá cenová dostupnost této metody. Díky poslední zmíněné výhodě se tento systém často volí nejen do nekomerčních experimentálních zařízení.

5.3. System vibrouzlu

Další způsob pro vyrovnání trubkové řady umožňuje použití vibračního uzlu. Zavedením stejnosměrného proudu do pohyblivé cívky se může vychýlit trubka požadovaným směrem. Nachází se zde problém, zesilovač, ze kterého je cívka napájena, neumožňuje přenášet stejnosměrný proud. Tento způsob v tomto experimentálním zařízení není možno nyní využít.

6. Metodika měření aerodynamických sil

Stěžejní výzkum, který navazuje na tuto práci a další výzkumy, které se prováděly na experimentálním zařízení, se jmenuje metodika měření aerodynamických sil. Výzkum spočívá v tom, že za pomoci střídavého proudu rozkmitáme vibrouzel, který je připevněn k pohyblivé trubce a ta se začne vychylovat danými směry. Vedle kmitající trubky se nachází v její těsné blízkosti trubka druhá, která je také uložena volně (může se pohybovat). Vlivem kmitání první trubky se přenáší energie na trubku druhou a ta se rozkmitá na určitou úroveň. S pomocí druhého vibrouzlu, který je jako v prvním případě také součástí pohyblivé trubky, se uvádí druhá trubka do klidu a měří se, jak velký střídavý proud se musí do druhého vibrouzlu vyslat, aby se trubka uvedla do klidu.

Vzhledem k tomu, že druhá trubka kmitá díky proudícímu vzduchu samovolně, je potřeba rozlišit, jaká energie je potřeba na utlumení těchto samovolných kmitů, a jaká energie je třeba na utlumení kmitů přenášených aerodynamickými silami z první trubky.

Tento problém se řeší pomocí Fourierovy transformace změřeného proudu potřebného k ustálení druhé trubky. Pomocí této transformace je možné vybrat frekvenční složku se stejnou frekvencí jakou má budící síla první trubky. Z toho plyne, že je třeba volit budící frekvenci dostatečně vzdálenou od vlastních frekvencí obou trubek.

Praktická část

7. Popis experimentálního zařízení

Experimentální zařízení bylo postaveno pro několik experimentů a do budoucna je možné toto výzkumné zařízení dále upravovat pro případné další experimentální měření. Svými multifunkčními prvky lze sledovat i jiné fyzikální děje a jejich vlastnosti než je právě v této práci řešen.

V této práci jsou popsány pouze části, které se týkají nebo ovlivňují výchylku trubkové řady.

Zařízení je navrženo tak, že vzduch, který je nasáván z venku pomocí vzduchového kompresoru, je urychlován dýzou a směřován do útrobu potrubí, kde jsou umístěna síta. Síta různé jemnosti bylo umístěno hned několik za sebou na zkvalitnění jejich úkolu (vytvořit nevířivé proudění). V části potrubí za dýzou se nachází proud vzduchu, který je nepotenciální (vířivý) a právě za pomoci již zmíněných sít se tento nepotenciální proud vzduchu uvádí do stavu potenciálního.

Tato část potrubí je velice důležitá, jelikož ustálený proud toku vzduchu stabilizuje rychlost proudění. Pokud by rychlost proudění v aerodynamickém tunelu nebyla ustálená a kolísala by. To by mělo za následek chybné vyhodnocení výchylky v závislosti na rychlosti vzduchu.

Po proniknutí proudu vzduchu do části, kde jsou umístěna síta, směřuje tok vzduchu do další vložené dýzy, která navazuje na aerodynamický tunel, kde je zabudován měřicí úsek. Proud vzduchu je zde naváděn kolmo na umístěnou trubkovou řadu. V této trubkové řadě se nachází 7 trubek, z toho jsou dvě pohyblivé a zbytek trubek je napevno připevněn. Obr.2.0

Trubky jsou uloženy pohyblivě, protože podstatou této práce je měření výchylky za působení proudu vzduchu.

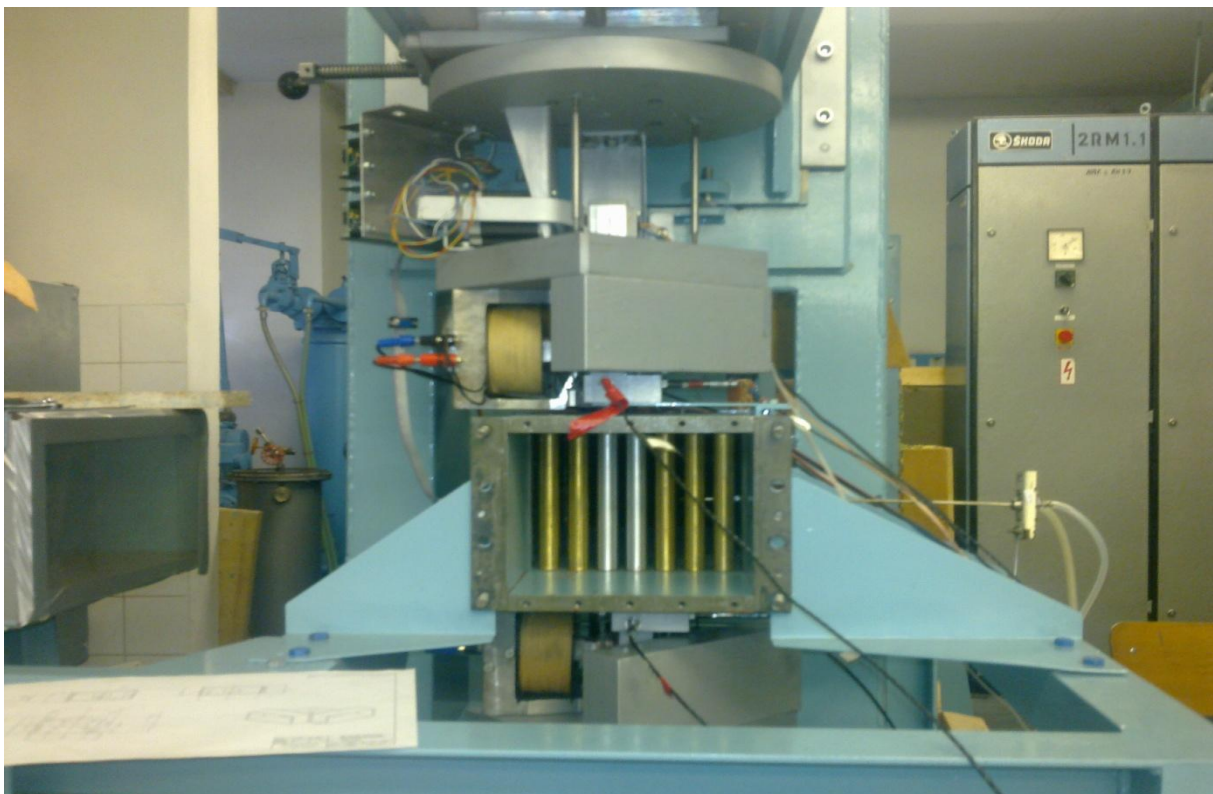
Pohyblivé trubky jsou umístěny do vibračních uzlů, ty jsou dále připevněny k rozdělené konstrukci stroje tak, že každý vibrouzel je přimontován k jiné části konstrukce.

Horní část konstrukce je díky mohutnosti a upevnění k zemi relativně odolná vůči jakýmkoliv vibracím. Ke spodní části je nainstalována betonová deska, také kvůli odolnosti vůči vibracím. Vibračním uzlem jsou vybaveny obě dvě pohyblivé trubky, jedna shora nad kanálem aerodynamického tunelu, druhá pod tunelem. Vibrační uzel byl použit proto, že tento prvek dokáže rozvibrovat dané trubky na požadovanou frekvenci a to za pomoci dvou cívek u každého vibrouzlu. Tato frekvence je regulována za pomoci standardního generátoru.

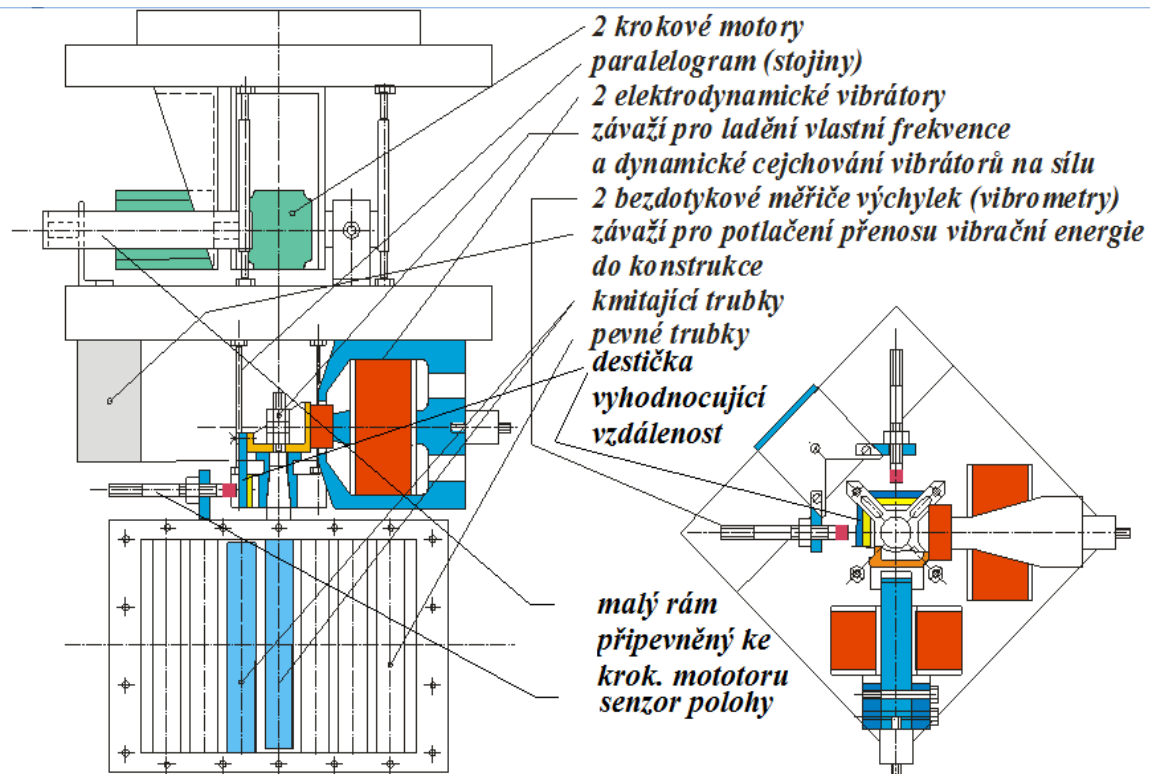
Díky vibrouzlu trubka kmitá v obou směrech planparalelně, což je dáno konstrukcí složenou ze dvou paralelogramů. Aby se maketa trubky při výchylkách neohýbala, je vyrobena z duralu jako tenkostěnná a navíc s ubývající tloušťkou stěny směrem k volnému konci.“[2, str.1]

Ke statickému vyrovnání trubkové řady slouží 4 krokové motory, které jsou po dvou tělem krokového motoru, upevněny ke každému paralelogramu. Konec pohybového šroubu je upevněn k malému rámu připevněnému ke konstrukci experimentálního zařízení viz obr.schéma, aby byl zajištěn přesný přenos sil ve správný směr. Tyto krokové motory zajišťují pohyby ve dvou vzájemně kolmých osách. Krokové motory jsou řízeny kontrolery a ty jsou spojeny se zdrojem, který napájí elektřinou jak kontrolory, tak krokové motory. Dále jsou propojeny s počítačem, který obsahuje program na ovládání krokových motorů, kde s jeho pomocí můžeme snadno nastavit výchylku, o kterou je třeba posunout krokový motor v potřebném směru.

Střední část vibrouzlu, do níž se kotví trubka, slouží k měření výchylek vibrací v obou směrech pomocí bezdotykového čidla výchylek. Pro účel tohoto měření jsou zde přišroubované ocelové destičky s potřebnou účinnou plochou. Tato čidla jsou opět spojena s počítačem, kde jsou hodnoty vyhodnocovány.“[2. str.1]



Obr.2.0 Pohled na trubkovou řadu



Obr. 2.0 Schéma umístěných součástí

8. Použité zařízení pro experiment

8.1. Měření rychlosti

V první řadě, než se započne samotné měření rychlosti, je nutné určit vlastnosti chování proudícího vzduchu. Tyto vlastnosti jsou určeny na základě způsobu pohybu částic za proudění v aerodynamickém tunelu. V tomto případě jde o stacionární⁷ proudění. Dále je proudění nevířivé⁸ nebo se spíš snažíme docílit co nejbližší tomuto stavu. Je potřeba uvést fakt, že nevířivé proudění nevzniká samo od sebe. Pomocí vhodně umístěných sít v tunelu před měřicím úsekem, se vířivé proudění uvede do stavu nevířivého. Tento krok se provádí proto, že vířivé (turbulentní) proudění se velice obtížně měří a navíc by mohlo docházet k nestálému vychylování pohyblivých trubek. Tento jev je pro měření nežádoucí.

Nejpřesnější měření rychlosti a celkové určení chování proudění vzduchu by se určilo metodou P.I.V. Výhod této metody je celá řada, jak už bylo zmíněno v teoretický části. Bohužel, jako každá metoda měření i tato skrývá pár nedostatků. Jako první je třeba

⁷ Stacionární proudění- Proudění, které se nemění s časem.

⁸ je proudění nevířivé⁸ -částice se neotáčejí kolem vlastních středů, konají jen translační pohyb

zmínit problém ze sycením proudícího vzduchu značkovacími částicemi, které lze v tomto experimentu pouze těžko uskutečnit z důvodu konstrukce zařízení. Další důležitý problém by byl s přesným nastavením světelného listu na průřez aerodynamického tunelu a také s jeho samotnou realizací by nastal problém, jelikož potrubí neobsahuje prosklenou část nutnou pro vyhodnocování dat. Toto jsou pouze ty nejdůležitější překážky tohoto měřicího systému.

Proto byla pro změření rychlosti u experimentálního zařízení využita Prandtlova trubice a to z důvodu ekonomických, konstrukčních a vzhledem k minimálnímu narušení proudu vzduchu. Dalšími důvody jsou snadná manipulace a možnost měření v různých místech potrubí. Tyto vlastnosti splňuje také sonda drátkového anemometru. Tento způsob nebyl použit díky ne příliš vysoké životnosti měřidla za působení turbulencí.

Při měření Prandtlovou trubicí se měří rychlost v určitém bodě potrubí před trubkovou řadou. Umístění měřidla před trubkovou řadu má svůj význam. Měřidlo se nenachází za trubkovou řadou nebo v těsné blízkosti před trubkovou řadou z toho důvodu, že by docházelo k ovlivnění výsledku vlivem víření proudícího vzduchu nebo změny průtoku vlivem obtékání trubek. Těchto a jim podobné vlivy, které ovlivňující naměřené hodnoty by se našla celá řada, ale nebyly v tomto případě nějak potvrzeny. Jsou to tedy pouze domněnky na rozdíl od těch zmíněných.

Touto trubicí se v aerodynamickém tunelu měří statický tlak P_{STAT} a celkový tlak P_{CEL} . Z těchto tlaků a hustoty proudícího media lze spočítat rychlost. Vzorec vychází z Bernoulliho rovnice ve formě tlaků.

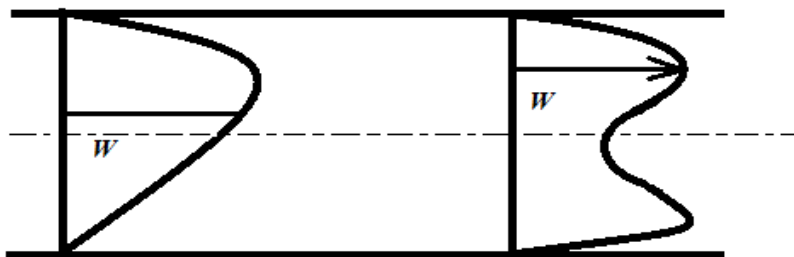
$$w = \sqrt{2 \cdot \frac{P_{cel} - P_{stat}}{\rho}} \quad 2.0$$

8.2. Rychlostní profil

Rychlostní profil byl určen za pomoci Prandtlovy trubice. Tento systém byl dostačující a to z důvodů, které byly již zmíněny v teoretické části. Tyto důvody jsou - snadná manipulace s tímto zařízením a možnost změření rychlostí takřka kdekoli v aerodynamickém tunelu, s výjimkou bezprostřední blízkosti stěn. To bylo způsobeno tvarem Prandtlovy trubice.

Prandtlova trubice byla dostačující i z odlišného důvodu. Rychlostní profil byl měřen z důvodů potřeby zjištění dat o stavu proudění vzduchu před trubkovou řadou, zdali proudění, které se nachází před trubkovou řadou, popisuje křivka viz Obr. 1.8

Pokud by se tyto křivky neshodovaly, viz obr. 2.1, nastal by problém, protože proudění v aerodynamickém tunelu by nebylo rovnoměrně rozprostřené a to by způsobilo znehodnocení dosažených výsledků. Následovalo by upravení části stroje, kde se nachází síta tak, aby proudění bylo rovnoměrně rozprostřeno po šířce tunelu. Naštěstí se zmíněný problém nepotvrdil a křivka vypovídala o rovnoměrném rozprostření proudícího vzduchu v aerodynamickém tunelu.



Obr. 2.1 Nerovnoměrný rychlostní profil

8.3.Hustota vzduchu

Hustotu vzduchu je zapotřebí znát, neboť to je jedna z neznámých ve vzorci pro výpočet rychlosti, který je uveden výše. Při různých rychlostech je různý statický tlak vzduchu a zároveň se mění teplota vzduchu. Proto se při výpočtu rychlosti nepoužívá ρ jako konstanta, ale počítá se ze stavové rovnice plynu.

Teplota se mění díky stlačování vzduchu v kompresoru a zároveň je závislá na vstupní teplotě vzduchu. Tento vzduch je nasáván zvenčí, a proto hustota proudícího vzduchu v aerodynamickém tunelu se často mění dle počasí (dle intenzity foukajícího větru). Teplotu nepatrně ovlivňuje i tření proudícího vzduchu potrubím. Velký faktor ovlivňující teplotu vzduchu je teplo vydávané elektromotorem, který pohání kompresor. Jeho teplota po uplynulém měření několikrát převyšuje teplotu, na které se motor rozebíhal.

Vzorec vychází z Bernoulliiovy rovnice

$$\rho = \frac{(P_{cel})}{r \cdot (T_p + 273.15)} \quad 2.1$$

$$P_{stat} + P_{atm} = P_{cel} \quad 2.2$$

8.4.Manipulace s pohyblivými trubkami

Jak již bylo zmíněno v teoretické části, mnoho způsobů pro vyrovnání trubkové řady do výchozí takřka nulové polohy nejsou pro tento experiment dostupné. Zvolený systém krokových motorů obr.1.9, který využívá vlastnosti pohybového šroubu, je zcela dostačující, protože tento systém dokáže dostatečně jemně a přesně posunout vychýlenou trubku zpět do výchozí polohy. Tyto krokové motory dokážou pohybovat trubkou nejméně na jednu tisícinu milimetru, přitom se

v tomto experimentu požaduje přesnost pouze na setiny milimetrů. Jedna z příčin dosažení velké přesnosti tohoto systému způsobuje jemné stoupání závitu na pohybovém šroubu.

Krokový motor nalezneme koncem pohybového šroubu krokového motoru uchycený k malému rámu a ten je dále připevněn k paralelogramu. Tělo krokového motoru je připevněno k malému rámu a ten se dále připevňuje ke konstrukci experimentálního zařízení.

Rozmístění krokových motůrků zajišťuje, aby byl pohyb dané pohyblivé trubky v požadovaném směru.

Krokové motory jsou poháněny elektřinou, vyžadují určité napětí, které je regulováno připojeným zdrojem.

Součástí systému u krokových motorů je zařízení, které převádí námi vyslaný signál z počítače na určité otočení pohybovým šroubem krokového motoru o potřebný úhel. Vlivem otočení pohybového šroubu o určitý úhel, se paralelogram posune o požadovanou vzdálenost daným směrem. Zařízení, které tento signál převádí se jmenuje kontroler.



Obr.2.2 Kontroler pro krokový motor M1485

8.5. Vibrace

Jsou vyvolávány ve vibrouzlu pomocí dvou navzájem kolmých cívek, které se pohybují v magnetickém poli. Cívky spolu s trúbkou jsou umístěny na stojinách dynamického paralelogramu, které umožňují pohyb cívek a trubky. Pokud se zavede do cívek střídavý proud, cívky spolu s trúbkou se rozkmitají.

Vibrouzly jsou umístěny na základové desce s velkou hmotností, aby se kmitání nemohlo přenést do okolní konstrukce, viz. obr. 2.0. Přístroj na ladění a na vyhodnocování frekvence.

Je použit standardní generátor, který umožňuje nastavit frekvenci a amplitudu el. napětí potřebného pro buzení cívek. Tento generátor je součástí vyhodnocovací aparatury, viz obr. 2.4

8.6. Snímání polohy

Čidlo polohy pracuje na indukčním principu a měří vzdálenost mezi kovovou deskou a čidlem. Je napájeno zdrojem o napětí 15 W. Tento snímač převádí vzdálenost na napětí. Konstanta čidla je 8W na 1mm. Vzdálenost kovové destičky od čidla je 2 mm. Při snížení této vzdálenosti je výstupní napětí záporný. Při opačné směru je výstupní napětí kladné.

Kovová destička je připevněna k vibrouzlu, viz obr. 2.0



Obr. 2.3 Čidlo pro snímání polohy

8.7. Vyhodnocování

Vyhodnocování dat probíhá ve vyhodnocovací aparatuře. Dané výsledky jsou z měřících zařízení posílány do počítače, který hodnoty za pomoci programu zpracuje do tabulkových hodnot a některé z nich vynese do grafu např: teplotu konstrukce, teplotu proudu vzduchu, výchylka určité pohyblivé trubky v daném směru os a jiné obr – popis



Obr. 2.4 Vyhodnocovací aparatura experimentálního zařízení

9. Měření

9.1. Postup měření

Měření probíhá při různě zvolených rychlostech proudu vzduchu, který je veden kolmo na vibrující trubku. To má vliv na naměřenou výchylku, protože díky síle proudění se pohyblivá trubka vychyluje ze své výchozí polohy. Závislost výchylky na rychlosti proudícího vzduchu je takřka lineární, čím větší proud vzduchu se přivede na trubkovou řadu, tím větší bude výchylka pohyblivé trubky.

Trubka umístěná ve vibrouzlu kmitá ve dvou osách X a Y. To vytváří zdánlivě tvar elipsy. Je nutné nastavit hodnotu frekvence, která trubku za pomoci cívek umístěných ve virouzlu, rozvibrovává na určitou vzdálenost v osách X a Y. Experimentálním zkoušením bylo zjištěno, že na hodnotě napětí 1,214 V, které je posíláno do cívek, se trubka vychyluje o námi požadovanou výchylku 0,4 mm na obě strany v obou osách.

Pokud jsou zmíněné znalosti dostatečně zvládnuté a aparatura nastavena, může se začít měřit. Nastavenou aparaturou se rozumí: nastavení příslušné frekvence pro vibraci trubek, zapnut přívod vzduchu, zapnuty kontrolery pro ovládání krokových motorů, zapnut program pro měření v počítači a trubková řada se nachází ve výchozí poloze.

9.2. Průběh měření

První statické měření výchylek vyrovnané řady musí proběhnout bez proudění, hodnoty z tohoto měření jsou výchozí pro následující měření. Za pomoci regulace ventilátoru umístěném v potrubí před měřicím úsekem se nastaví požadovaná minimální hodnota proudu vzduchu, která dosahuje hodnoty 39,6 km/hod (1300 ot/min) na trubkovou řadu, kde vibruje jedna z pohybových trubek. Změří se střední hodnota výchylek (odchylka od referenční hodnoty) obou pohyblivých trubek. Musí se ověřit, zda rozměr výchylky při kmitání je 0,4 mm.

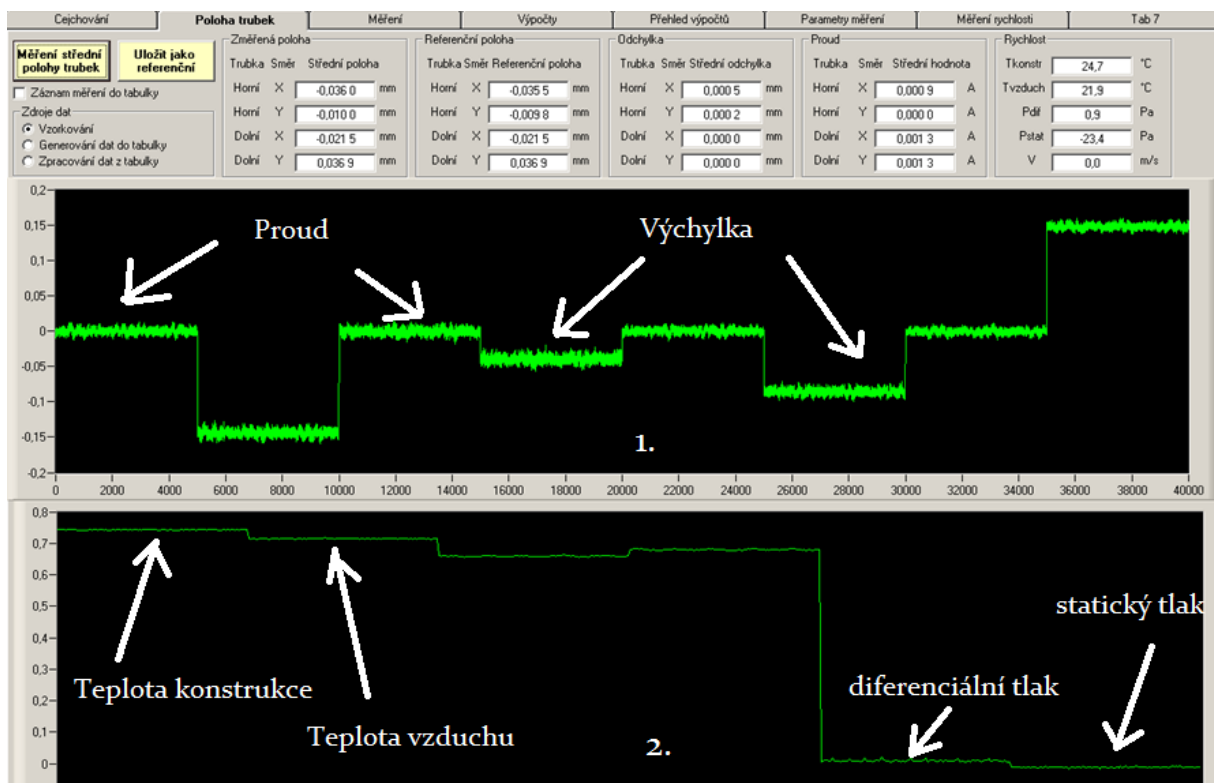
Pokud tyto hodnoty máme zaznamenány plus rychlost při jaké měříme, dalším krokem je vypnutí přívodu vzduchu. Opět se musí zaznamenat ty samé hodnoty daných veličin. Vypnutí, neboli použití bi-passu na odvedení proudu vzduchu pryč z aerodynamického tunelu. Tento krok je prováděný proto, aby šla rozpoznat úroveň přenášené energie na druhou pohyblivou trubku a následný její přesný výpočet, který rozpohybovává druhou trubku. Když jsou zaznamenány i tyto hodnoty opět se přivede proud vzduchu na trubkovou řadu a pohyblivé trubky se vyrovnají na referenční hodnoty (referenční hodnota je hodnota vyrovnané trubkové řady-nulová hodnota, nebo-li výchozí stav trubkové řady pro naše měření). Po vyrovnání a zaznamenání hodnot následuje zvýšení rychlosti a proces, postup zaznamenávání hodnot se opakuje. Zvýšení rychlosti se provádí ještě 4x na hodnotu 2400 ot/min, to je rychlost 99,6 km/hod. Rychlost se mění proto, že se zjišťuje závislost hustoty proudu vzduchu na přenosu energie na druhou pohyblivou trubku. 5 různých rychlostí bylo zvoleno experimentální cestou, kde bylo zřejmé, že pokud zvyšování rychlosti bylo jemnější, dané hodnoty byly velice malé a snadno se dají zaměnit s nepřesností měření, která se musí brát na vědomí.

Bylo provedeno i měření bez vyrovnávání trubek, což je vlastně totožné měření, jako je uvedeno výše, ale s tím rozdílem, že se trubky nechaly neustále volně vychylovat proudem vzduchu až na hodnotu rychlosti 2400 ot/ min. Výsledky tohoto měření jsou uvedeny v příloze na konci bakalářské práce.

9.3. Popis grafu

S grafem, který je níže podrobně popsán a vysvětlen na obr. 2.5, pracuje obsluha stroje při měření. Výsledky zobrazené v tomto grafu jsou zapisovány a dále zpracovávány. Bez správného pochopení grafu nelze dosáhnout korektních výsledků.

V první části grafu jsou vyneseny veličiny, které pro měření jsou naprosto nezbytné. Horní křivka grafu nám schodkově roste a klesá. Tento pokles nebo naopak skokový nárůst vypovídají o stavu proudu a výchylky pohyblivých trubek, které se odchyly od jejich původní polohy (referenční polohy) viz Obr. 2.5, 1. horní část



Obr. 2.5 popis grafu

Proud dané trubky je znázorněn na první, třetí, páté a sedmé poloze křivky. Zbylé úseky ukazují výchylku příslušné pohyblivé trubky v daném směru os. Umístění výchylek v grafu v příslušných osách (druhá, čtvrtá, šestá a osmá změna v grafu) jde postupně X1,X2,X3,X4. Toto značení bylo použito z důvodu programu, který byl vyvinut s ovládáním v tomto značení. Značení zahrnuje nejen směrovou výchylku, ale i příslušnou vychýlenou trubku. X1 a X2 značí trubku, která je umístěna v horním vibrouzlu. Označení X3 a X4 popisuje dolní trubku. První značka u každé trubky popisuje výchylku ve směru X a druhá značka výchylku ve směru Y.

Další důležitý poznatek o horním grafu se nachází na osových souřadnicích grafu. Program, než vyhodnotí příčnou střední výchylku, provede nejdřív 5000 měření dané pohyblivé trubky z jedné z os. Tento jev lze pozorovat na horizontální ose, kde křivka ukazuje fluktuace mezi prvním a pětitisícím měřením dané výchylky v určitém směru kmitání pohyblivé trubky. Přesně po pětitisících měření, kde hodnoty fluktovaly, nastane vždy skok na hodnoty jiné osy. Takto vysoký počet měření se vyhodnotí u každé osy jednotlivých pohyblivých trubek. Poté se stanoví střední hodnota z tohoto počtu měření, která se zapíše do tabulky umístěné nad grafy. Dále se pracuje pouze se středními hodnotami.

Pod tímto grafem se nachází druhý graf, kde se vyhodnocují veličiny potřebné pro výpočet rychlosti a veličiny, které ovlivňují chod měření. Pro výpočet rychlosti proudícího vzduchu je zapotřebí určit diferenciální tlak a tlak statický. Tyto tlaky, nebo-li křivky popisující jejich hodnoty lze pozorovat na pravém konci grafu.

Další veličinou je teplota. Teplota ovlivňuje průběh měření, protože ze stoupající teplotou se mění hustota proudícího vzduchu, která následně působí na rychlost proudícího vzduchu v aerodynamickém tunelu. Teplota konstrukce a teplota proudu vzduchu se vynáší do grafu v levé části.

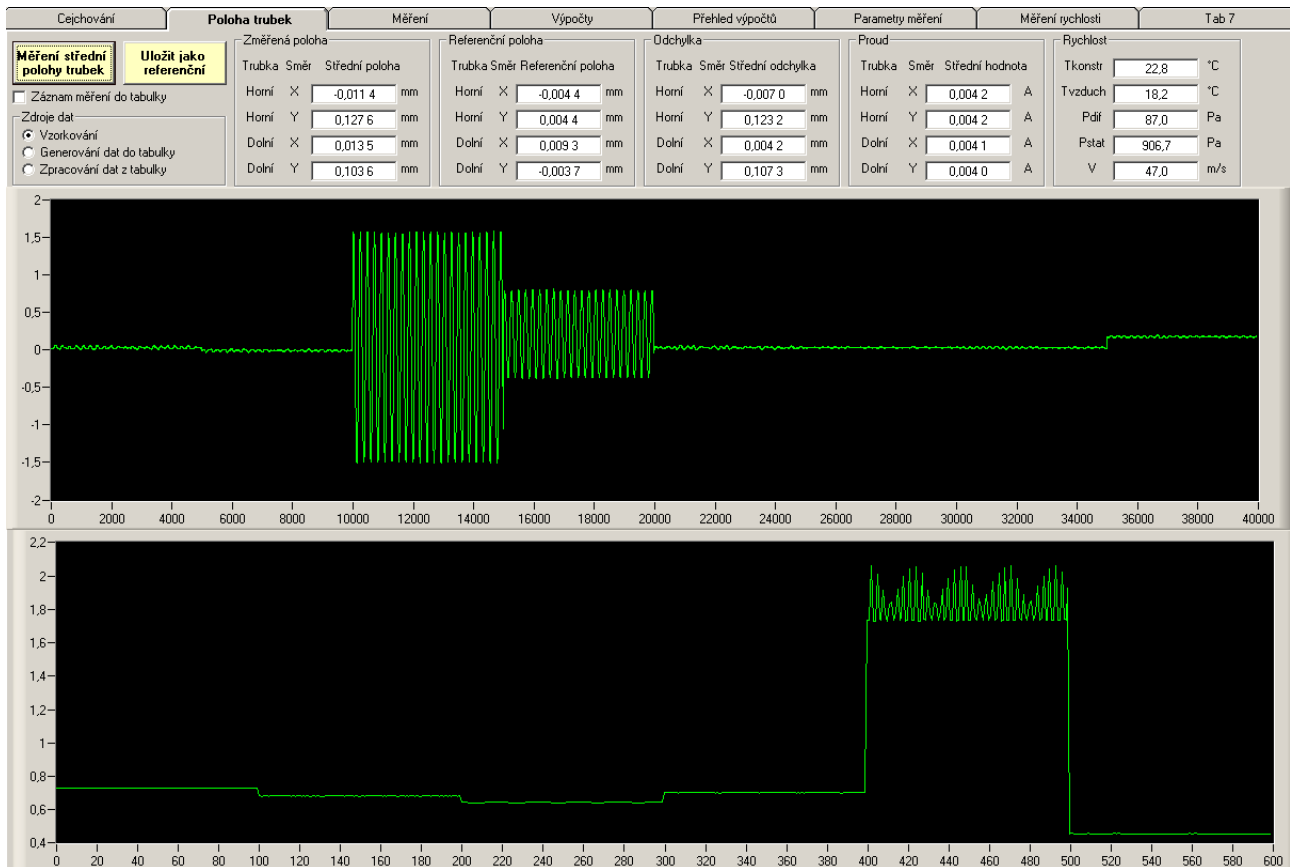
Na grafu jsou vidět ještě další dvě změny, které nejsou nějak popsány nebo přiřazeny k další měřené veličině. Důvod je ten, že v programu jsou naprogramovány ještě další řádky, které se mohou v případě nutnosti využít k měření dalších případných veličin.

Nad grafy je umístěna tabulka viz Obr. 2.6. V této tabulce jsou vypsaná data obsahující informace ohledně proudícího vzduchu a momentálním stavu (tj. výchylky trubek od referenční hodnoty) pohyblivých trubek. V dolním rohu tabulky se zobrazí velikost rychlosti proudu vzduchu v tunelu. Nad touto kolonkou se nachází hodnota statického tlaku, dále hodnoty diferenciálního tlaku, teplota vzduchu, teplota konstrukce.

Měření střední polohy trubek		Uložit jako referenční		Změřená poloha		Referenční poloha		Odchylka		Proud		Rychlost	
Trubka	Směr	Střední poloha	Trubka	Směr	Referenční poloha	Trubka	Směr	Střední odchylka	Trubka	Směr	Střední hodnota	Tkonstr	Tvzduch
Horní	X	-0,0097 mm	Horní	X	-0,0074 mm	Horní	X	-0,0023 mm	Horní	X	0,0032 A	28,3	20,5
Horní	Y	0,1101 mm	Horní	Y	0,0152 mm	Horní	Y	0,0949 mm	Horní	Y	0,0034 A		60,7
Dolní	X	-0,0018 mm	Dolní	X	0,0022 mm	Dolní	X	-0,0040 mm	Dolní	X	0,0031 A		505,8
Dolní	Y	0,1071 mm	Dolní	Y	0,0071 mm	Dolní	Y	0,1000 mm	Dolní	Y	0,0032 A		10,1

Obr.2.6 Tabulka hodnot

O dva sloupce vlevo se nachází střední hodnoty odchylek od příslušných osových směrů. Tyto hodnoty ukazují, o kolik se pohyblivá trubka posunula a tudíž, o kolik je třeba trubku při dané rychlosti vrátit, aby se trubky nacházely opět v řadě. Další sloupec, ve kterém se nalézají referenční hodnoty v daných směrech určité pohyblivé trubky vysoce ovlivňující vlastní měření, se nachází vlevo od sloupce odchylek. Zde v tomto sloupci byly zaznamenány hodnoty, které byly určeny nebo spíše nejvíce odpovídaly výchozímu stavu pro měření experimentu. Se zbylými sloupci se nepracuje. Slouží spíše k orientačním informacím o stavu měření.

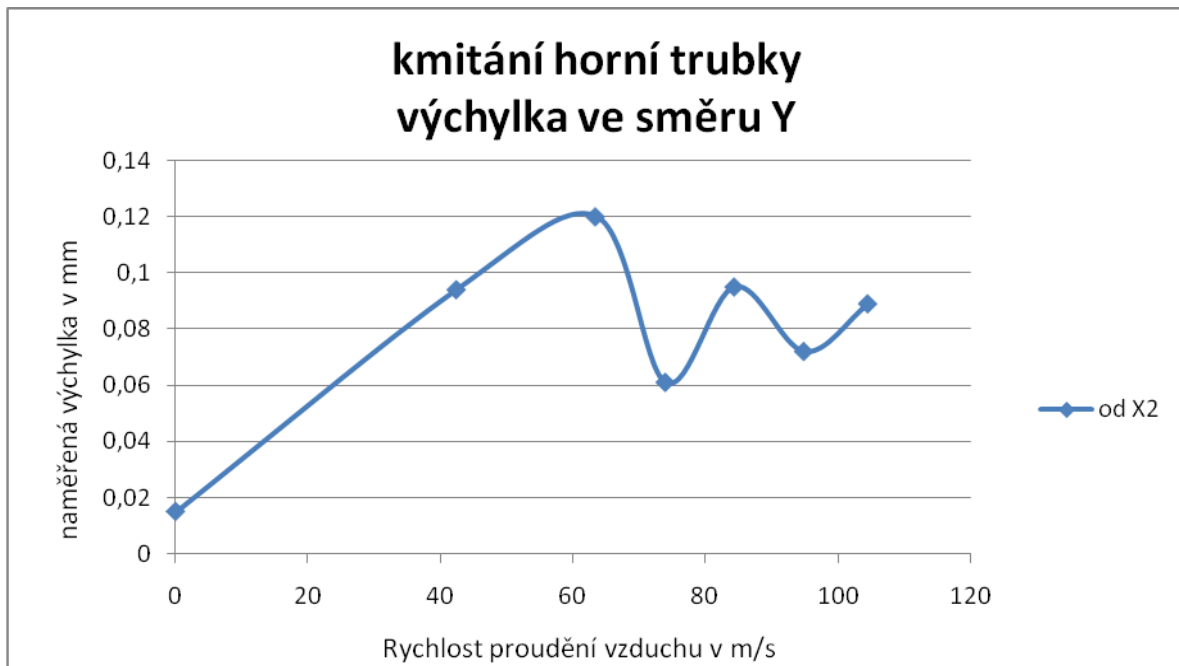


Obr. 2.7 ukázka grafu za proudění vzduchu a za kmitání horní trubky ve směru Y

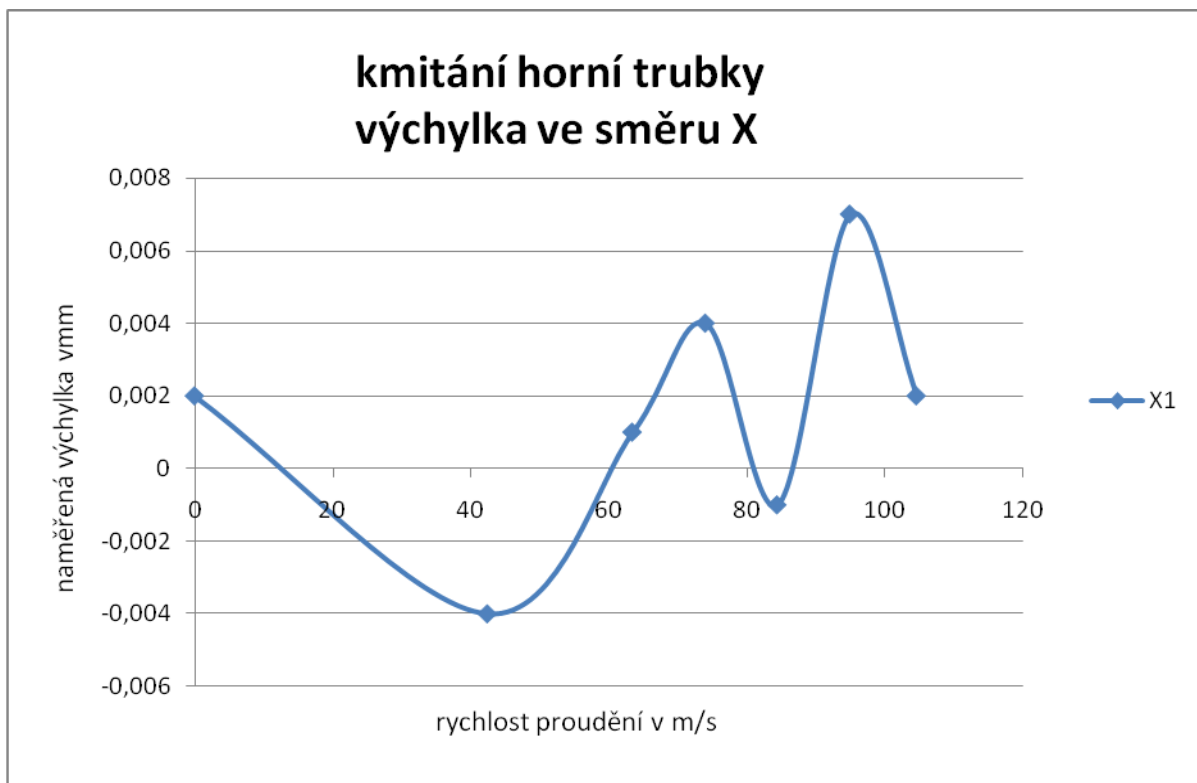
10. Vynesení hodnot do grafů



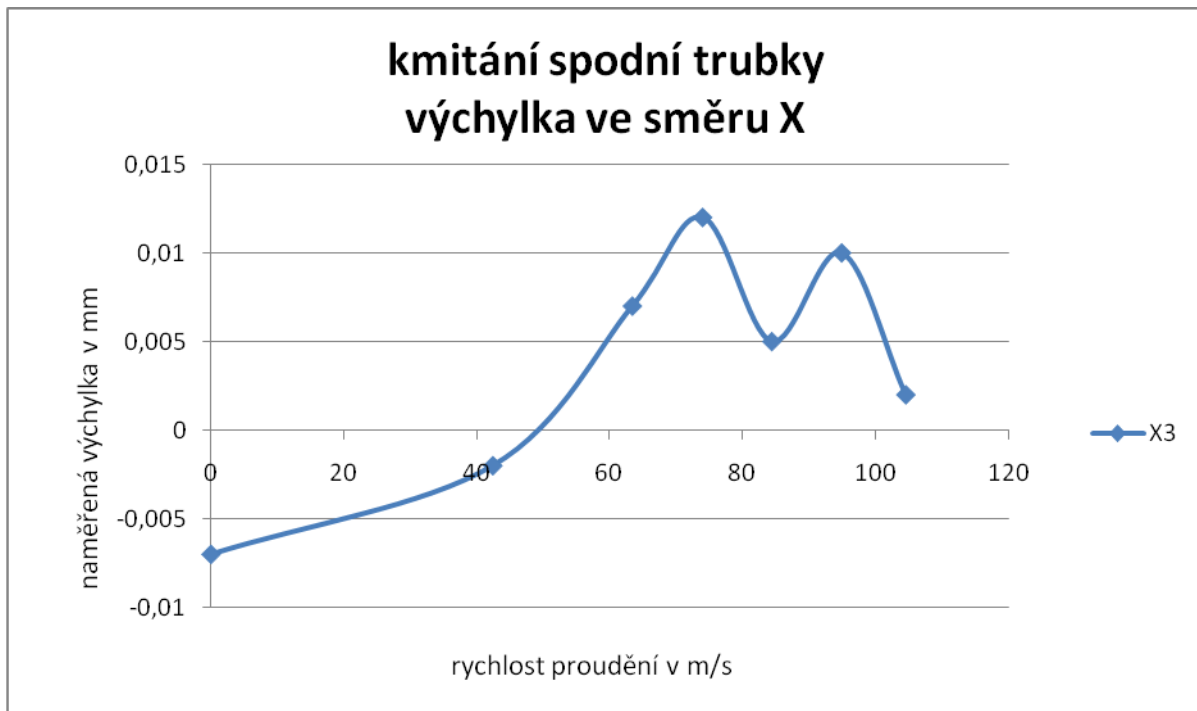
Obr. 2.8. Závislost výchylky ve směru Y na rychlosti proudění vzduchu při kmitání spodní trubky



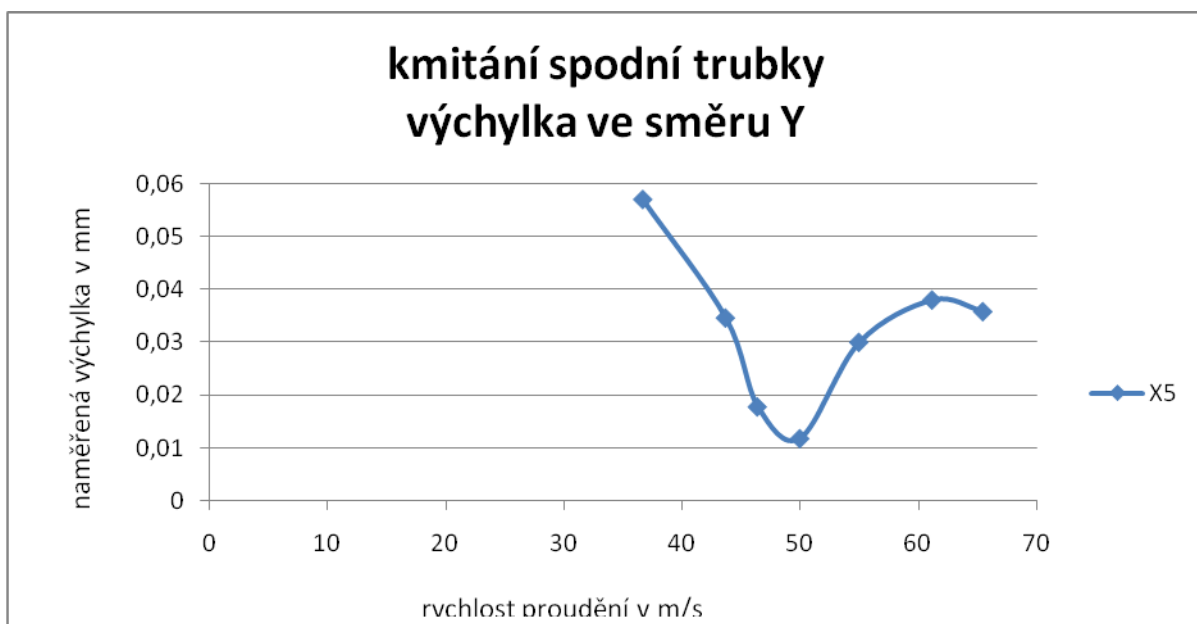
Obr. 2.9. Závislost výchylky ve směru Y na rychlosti proudění vzduchu při kmitání horní trubky



Obr. 2.10. Závislost výchylky ve směru X na rychlosti proudění vzduchu při kmitání horní trubky



Obr. 2.11. Závislost výchylky ve směru X na rychlosti proudění vzduchu při kmitání spodní trubky



Obr. 2.12. Závislost výchylky ve směru Y na rychlosti proudění vzduchu při kmitání spodní trubky (jemné navyšování rychlosti)

11. Vyhodnocení grafu

První dva grafy Obr. 2.8, 2.9. ukazují závislost výchylky na rychlosti proudění dané kmitající trubky. Tato závislost je vynesena do bodového grafu, kde jsou tyto body spojeny křivkou pro lepší vyhodnocování grafu. Nejprve byla změřena výchylka v ose y. Lze pozorovat, že se u křivek v obou grafech se vzrůstající rychlostí proudění vzduchu jejich rozkmit zmenšuje a ustaluje se na hodnotě pohybující se kolem 0,08 mm. Tento výsledek nelze nyní více zpřesnit a to z důvodů, které jsou již zmíněny v příloze a to sice z důvodu konstrukčních.

Dále jsou zde uvedeny další dva grafy obr. 2.10, 2.11, které znázorňují hodnoty závislosti rychlosti proudění na výchylce v ose X. U těchto grafů je zřetelná nahodilost vzniklých bodů. Tyto získané hodnoty nedávají žádnou jasnou představu o tom, že je mezi prouděním vzduchu ve směru Y a vychylováním pohyblivé kmitající trubky v ose X nějaká závislost. Vychýlení, které se zde objevuje je způsobeno víry za trubkovou řadou nebo nedokonalým vyrovnáním trubkové řady do roviny. Proud vzduchu, jak bylo naměřeno, v potrubí kolísá v rozmezí kolem až 4 m/s a i tento poznatek může mít na získané výsledky vliv.

V prvních dvou grafech se objevil velký rozptyl v prvotních naměřených hodnotách. Tento jev byl přeměřen a to tak, že při navýšování rychlosti proudění nebyla použita stejná hodnota navýšení jako u předchozího měření (10 m/s), ale hodnota poloviční (5 m/s). Tyto výsledky jsou vyneseny v posledním grafu obr. 2.12. Z grafu je patrné, že naměřené hodnoty nemají zcela jasnou přímo úměrnou závislost. Až v posledních třech hodnotách lze mluvit o ustalování kolem hodnoty výchylky 0,03 mm při každém navýšení rychlosti.

12. Poznatky při měření

Bylo zjištěno, nebo-li několikanásobně naměřeno, že za trubkovou řadou za proudění vzduchu se objevuje neobvyklý rychlostní profil. Tento profil nebyl nyní ještě zcela přesně naměřen. Podle hodnot, kterých se dosáhlo při měření, připomíná tvar, jak je uveden v obr. 2.1 vlevo. Na tomto obrázku lze vidět, že křivka není rovnoměrně rozložená jako na obr. 1.8 v teoretické části. Dochází zde k náhlému propadu rychlosti ve střední části. Při určité rychlosti dokonce i k obrácenému proudění vzduchu. Viz tabulka obr. 2.13

Nejprve bylo myšleno, že tento jev je způsoben nějakými víry, které vznikají před trubkovou řadou. Tato domněnka byla vyvrácena tím, že se přeměřil rychlostní profil před trubkovou řadou za pomoci Prandtlovy trubice. Toto měření dokázalo, že je proudění rovnoměrně rozmístěno po průřezu aerodynamického tunelu.

Proto přišla na řadu další úvaha, že tento jev je vyvolán úplavovými víry. Tyto víry u tohoto měření, které způsobují změnu rychlosti za trubkovou řadou, vznikají na konci stěn aerodynamického tunelu. Náš experiment ovlivňují mnohem více úplavové víry od vertikálních stěn, jelikož pohyblivé trubky jsou umístěny také vertikálně. Tato úvaha byla ověřena za pomoci vrtulkového měřicího přístroje pro měření rychlosti proudění vzduchu.

Těchto úplavových vírů se lze částečně zbavit, když se na konec aerodynamického tunelu připevní difuzor. Přesto dochází k minimálnímu ovlivnění výchylky pohyblivé trubky.

Dále bylo zjištěno, že při vyšších rychlostech (rychlosti proudění vzduchu nad 65 m/s) se tento negativní jev, kdy je částečně vrácena pohyblivá trubka opačným proudem, vytrácí. Lze to pozorovat i na grafech, kdy u vyšších hodnot rychlosti se výchylka vyvolaná proudem vzduchu stává takřka pravidelnou.

Nastává zde další problém a to s konstrukcí. Jak bylo uvedeno výše, přesnost měření se zlepšuje se stoupajícím rychlostním prouděním. Tato konstrukce experimentálního zařízení prozatím není přizpůsobená většímu rozptylu vyšších rychlostí. Při rychlosti převyšující hodnotu 100 m/s začne stroj pískat v místě aerodynamického tunelu tak, že se vypne vyhodnocovací aparatura (počítač aj..). Z toho plyne, že výsledky, kterých se dosahuje, jsou přesné mezi hodnotami 65 – 100 m/s (1850 – 2500 ot/min elektromotoru). Výsledky dosažené u nižších rychlostí proudění slouží pouze pro orientaci.

Čejchování	Poloha trubek	Měření	Výpočty	Přehled výpočtů	Parametry měření	Měření rychlosti	Tab 7
<input type="checkbox"/> Měření střední polohy trubek <input type="checkbox"/> Uložit jako referenční <input checked="" type="checkbox"/> Záznam měření do tabulky Zdroje dat: <input checked="" type="radio"/> Vzorování <input type="radio"/> Generování dat do tabulky <input type="radio"/> Zpracování dat z tabulky	Změřená poloha Trubka Směr Střední poloha Horní X -0,0179 mm Horní Y 0,0275 mm Dolní X 0,0116 mm Dolní Y -0,0344 mm	Referenční poloha Trubka Směr Referenční poloha Horní X 0,0006 mm Horní Y -0,0027 mm Dolní X 0,0276 mm Dolní Y -0,0057 mm	Odchyška Trubka Směr Střední odchyška Horní X -0,0185 mm Horní Y 0,0302 mm Dolní X -0,0160 mm Dolní Y -0,0287 mm	Proud Trubka Směr Střední hodnota Horní X 0,0029 A Horní Y 0,0029 A Dolní X 0,0028 A Dolní Y 0,0031 A	Rychlost Tkonstr 25,7 °C Tvzduch 21,2 °C Pdif 118,3 Pa Pstat 1105,3 Pa V 55,1 m/s		

Obr. 2.13 Tabulka s hodnotami pořízenými za měření (opačné proudění)

13. Závěr

Podle dosažených výsledků a jejich následném zpracování docházím k závěru. Tyto výsledky ukazují na to, že jejich využití v praxi zatím není možné. Důvodů je hned několik.

První závažný důvod je ten, že chybovost měření prozatím dosahuje příliš velké úrovně. Příčiny chyb v měření jsou různé např: kolísáním proudu vzduchu způsobeným nárazovým prouděním vzduchu v okolí nasávání vzduchu zvenčí, nedostatečně přizpůsobená konstrukce potrubí, umístění Prandtlovy trubice není přesně kolmo na proudící vzduch a jiné příčiny již se zanedbatelnými účinky.

Další důvod je ten, že hodnoty výchylek při nízkých rychlostech proudění jsou velice různé a měření od měření se liší. Výchylky naměřené v nízkých hodnotách rychlosti proudění se tak výrazně liší, že hodnota vychýlení trubky je dokonce opačná vůči směru proudění vzduchu. Tento jev je podrobně popsán v části 12. Poznatky při měření.

Podle mého názoru je nezbytně nutné nejprve upravit konstrukci experimentálního zařízení tak, aby bylo možné dosahovat větších rychlostí. Jelikož rozptyl přesnějšího měření, které je dosaženo u větších rychlostí, je prozatím pouze necelých 35 m/s. Nelze mluvit o stanovení výsledků pro použití v praxi. Aby bylo možné s výsledky dále pracovat, je potřeba dosahovat rozptylu rychlostí proudění při měření alespoň 50 m/s počínaje od hodnoty proudění 65 m/s a více.

14. Zdroje informací

14.1.Literatura

- [1] LINHART, J., Mechanika tekutin I. Plzeň: ZČU, 2009. ISBN 978-80-7043-766-7
- [2] Linhart, j., Zařízení pro experimentální vyšetření vazebních aerodynamických sil mezi trubkovými maketami v proudu vzduchu.
- [3] Jiří Nožička, Jan Novotný., ÚVOD DO PROBLEMATIKY P. I. V.
- [4] Tomáš Konopáč., Vybrané snímače pro měření průtoků tekutiny

14.2. Internetové zdroje

- [I] Technická univerzita v Liberci., Krokové motory a jejich využití
<http://www.mti.tul.cz/files/ats/krok2.pdf>
- [II] Elektornické konstrukce., krokové motory
<http://www.zajacikm.wz.cz/KMotory/kmotory.html>
- [III] Vetrání., Ing. Jan Schwarzer., Vzduchovody pro rovnoměrný přívod vzduchu
http://users.fs.cvut.cz/~schwajan/schwarzer_soubory/Soubory/Vzduchovody/vzduchovody2.pdf
- [IV] Robotika., krokové motory
<http://robotika.cz/articles/steppers/en>
- [V] Vysoká škola Báňská- Technická univerzita ostrava., Měření turbulentních fluktuací rychlosti
www.388.vsb.cz/PDF/Janalik-Mereniturflukrychlosti.pdf

15. Seznam příloh

Přílohy vevázané

Název přílohy

Ovlivnění tlumící gumou

Přílohy volné

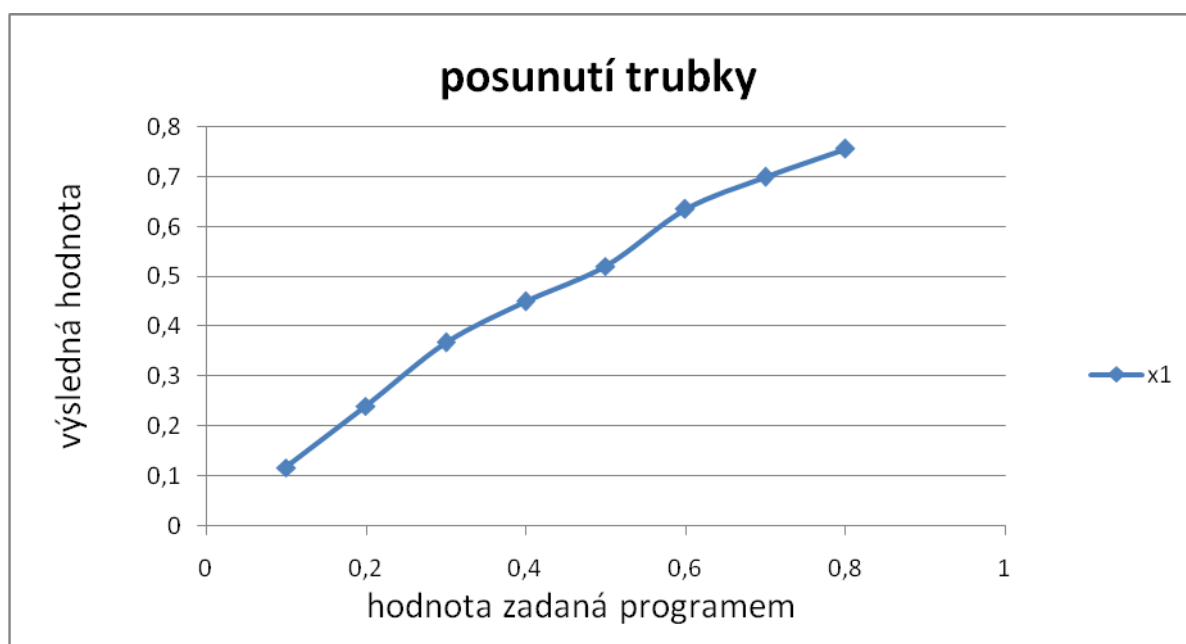
Výkres sestavy 001-01 Sestava experimentálního zařízení

Výkres sestavy 001-02 Vibrouzel

Příloha

Ovlivnění tlumící gumou

Velice zvláštní jev, který je nutné při měření brát v potaz, způsobuje těsnící guma umístěna mezi malým rámem, který vede okolo krokového motoru. Tento jev způsobuje nesoulad mezi zadanými hodnotami pro pohyb pohyblivými trubkami a jejich výsledným posunutím. Tyto hodnoty zadává operátor měřicího zařízení podle potřeb. Došlo tedy k měření, zda-li neexistuje závislost mezi zadanou hodnotou v programu a výsledným posunutím dané trubky. Závislost mezi zadanými hodnotami pro pohyb pohyblivými trubkami a jejich výsledným posunutím připomíná přímku. Vynesené hodnoty v grafu připomínají přímku, protože zobrazení v grafu viz obr. 2.14 není příliš přesné (zobrazení na desetiny milimetru), jak to požaduje měření experimentu (zobrazení na tisíce milimetru). Tento jev může způsobovat nepředepjatá tlumící guma, ale toto tvrzení není ověřeno neboť zařízení je už několik let staré a není o instalaci gumy žádný záznam. Docházíme k závěru, že posouváním trubek se neobejde bez následného přeměření programem na měření trubkové řady.



Obr. 2.14 Znázornění nesouladu mezi programem a skutečností pohybu trubky způsobeném tlumící gumou.

Tabulka hodnot změřené gumy

Hodnoty, které jsou zde vypsány, jsou v milimetrech.

zadané hodnoty

skutečné hodnoty posunutí

0,1		0,1171
0,2		0,2409
0,3		0,3674
0,4		0,4504
0,5		0,5212
0,6		0,6347
0,7		0,6997
0,8		0,7562

Tab. 1