

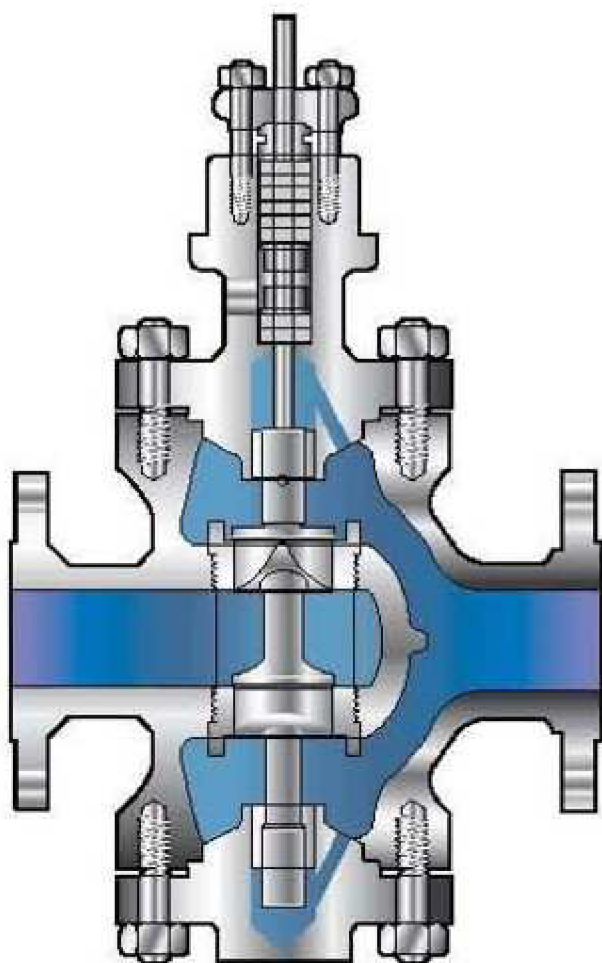
Obsah

| | |
|--|-----------|
| Obsah | 8 |
| 1.Úvod | 10 |
| 2.Kavitace | 11 |
| 2.1 Kavitace jako pojem..... | 11 |
| 2.2 Kavitační jevy..... | 12 |
| 2.2.1 Podstata kavitačního jevu..... | 13 |
| 2.2.2 Kavitační jádro a kavitační bublina[1]..... | 13 |
| 2.3 Kavitační působení..... | 15 |
| 2.3.1 Etapy kavitace..... | 15 |
| 2.3.2 Vývoj a typy kavitací..... | 15 |
| 2.3.3 Vliv fyzikálních vlastností kapaliny na kavitaci..... | 16 |
| 2.3.4 Kavitační opotřebení..... | 16 |
| 3. Kavitace v armaturách | 16 |
| 3.1 Kavitace v průmyslovém provozu [6]..... | 16 |
| 3.2 Působení kavitace v armaturách [1]..... | 17 |
| 4. Kavitace na ventilu [7] | 19 |
| 5. Měření na trati se zakomponovanou tryskou | 21 |
| 5.1 Popis měření..... | 21 |
| 5.1.1 Zkušební vzorek [2]..... | 22 |
| 5.1.2 Zkušební úsek [2]..... | 22 |
| 5.1.3 Nastavovací armatury [2]..... | 22 |
| 5.2 Trať a zapojení jednotlivých členů..... | 23 |
| 5.2.1 Schéma měřící tratě..... | 24 |
| 5.2.2 Použitá tryska..... | 24 |
| 5.2.3 Měřené veličiny [2]..... | 26 |
| 5.3 Výpočetní vztahy..... | 28 |
| 5.3.1 Průtokový součinitel..... | 28 |
| 5.3.2 Thomův kavitační součinitel..... | 28 |
| 5.3.3 Směrodatné odchylky [5]..... | 29 |
| 5.3.4 Použitá měřící technika..... | 31 |
| 5.4 Grafické závislosti..... | 32 |
| 5.4.1 Naměřené hodnoty na trati..... | 32 |
| 5.4.2 Přepočtené hodnoty na trati..... | 33 |
| 5.4.3 Vykreslení závislostí..... | 34 |
| 5.5 Vyhodnocení měření a stanovení vysokofrekvenčních pulsací..... | 35 |
| 6. Fourierova transformace [3] | 35 |
| 6.1 Podstata metody..... | 35 |
| 6.2 Fourierovy řady..... | 35 |
| 6.3 Fourierova transformace obecného signálu..... | 36 |
| 6.4 Diskrétní Fourierova transformace..... | 36 |
| 7. Měření vysokofrekvenčních pulsací na trati s tryskou | 37 |
| 7.1 Popis měření..... | 37 |
| 7.2 Trať a zapojení jednotlivých členů..... | 39 |
| 7.2.1 Schéma měřící tratě..... | 45 |
| 7.2.2 Použitá tryska..... | 39 |

| | |
|--|-----------|
| 7.2.3 Měřené veličiny | 40 |
| 7.2.4 Použitá měřicí technika | 43 |
| 7.3 Fourierova transformace amplitud tlaku | 44 |
| 7.3.1 Převedené hodnoty pomocí Fourierovy transformace | 44 |
| 7.3.2 Vyhodnocení měření a stanovení vysokofrekvenčních pulsací..... | 44 |
| 7.4 Statické měření..... | 45 |
| 7.4.1 Naměřené statické hodnoty | 45 |
| 7.4.2 Přepočtené statické hodnoty | 46 |
| 7.4.3 Vykreslení závislostí | 46 |
| 8. Měření č.2 vysokofrekvenčních pulsací na trati s tryskou | 47 |
| 8.1 Fourierova transformace amplitud tlaku | 48 |
| 8.1.1 Převedené hodnoty pomocí Fourierovy transformace..... | 48 |
| 8.1.2 Vyhodnocení měření a stanovení vysokofrekvenčních pulsací..... | 48 |
| 8.2 Statické měření..... | 49 |
| 8.2.1 Naměřené statické hodnoty | 49 |
| 8.2.2 Přepočtené statické hodnoty | 49 |
| 8.2.3 Vykreslení závislostí | 50 |
| 9. Měření na ventilu..... | 51 |
| 9.1 Trať a zapojení jednotlivých členů..... | 51 |
| 9.1.1 Popis měření | 51 |
| 9.1.2 Schéma měřící tratě s ventilem..... | 52 |
| 9.1.3 Měřený ventil..... | 53 |
| 9.1.4 Použitá měřicí technika | 54 |
| 9.2 Fourierova transformace amplitud tlaku | 54 |
| 9.2.1 Převedené hodnoty pomocí Fourierovy transformace..... | 54 |
| 9.2.2 Vyhodnocení měření a stanovení vysokofrekvenčních pulsací..... | 55 |
| 9.3 Statické měření..... | 55 |
| 9.3.1 Naměřené statické hodnoty | 55 |
| 9.3.2 Přepočtené statické hodnoty | 56 |
| 9.3.3 Vykreslení závislostí | 56 |
| 10. Závěr | 57 |
| 11. Seznam použitých zdrojů..... | 58 |
| 12. Seznam použitých symbolů..... | 59 |
| 13. Seznam příloh..... | 61 |

1. Úvod

Cílem této diplomové práce je stanovení závislosti mezi změnou průtočnosti kavitujícího ventilu a vysokofrekvenčními pulzacemi tlaku. Pro objasnění dané problematiky je nutno navrhnout postup měření kavitace na ventilu z těchto dvou závislostí, po sléze porovnat tyto dvě metody. V této práci se vychází již z naměřených hodnot, které byly naměřeny v laboratořích na speciálně upravené trysce. V laboratořích bude provedeno ještě jedno měření, kdy do tratě bude zakomponován i ventil, v tomto uspořádání bude provedeno měření a z těchto hodnot se určí závislost mezi průtočností a vysokofrekvenčními pulzacemi tlaku při postupném uzavírání a otevírání ventilu.



Obr. 1.1 - Proudění tekutiny ve ventilu [6]

Pro pochopení dané problematiky je potřeba si definovat řadu pojmů, jako jsou pulzace, kavitace, její vznik, průběh či ochranné opatření proti jejímu vzniku, i když v některých případech se jejímu působení nevyhneme. Umělé vyvolání kavitace a její sekundární projevy v podobě pulzací je možno využít v praxi např. v lékařství, vodohospodářství atd.

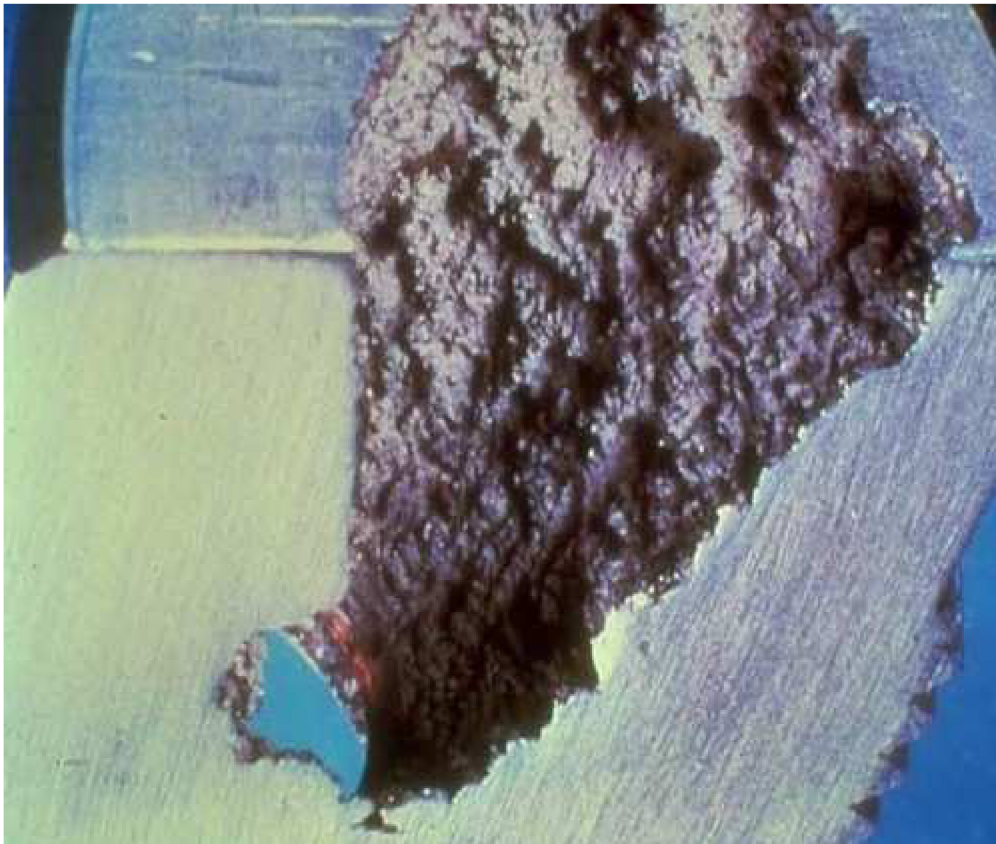
2.Kavitace

2.1 Kavítace jako pojem

Slovo kavítace pochází z latinského *cavitas* což znamená dutina, tento jev se popisuje jako vznik dutin v kapalině při lokálním poklesu tlaku, následovaný jejich implozí. Pokles tlaku může být důsledkem lokálního zvýšení rychlosti (tzv. hydrodynamická kavítace), případně průchodu intenzivní akustické vlny v periodách zředění (akustická kavítace). Kavítace je zpočátku vyplněna nasycenými párami, později do ní mohou difundovat plyny z okolní kapaliny. Při vymizení podtlaku, který kavítaci vytvořil její bublina kolabuje za vzniku rázové vlny s destruktivním účinkem na okolní materiál. Kavítace vzniká například na lopatkách lodních šroubů, turbín, na čerpadlech a dalších zařízeních, která se velkou rychlostí pohybují v kapalině. Negativní vliv má i na stacionární prvky (ventily, trysky, potrubí apod.).[4]

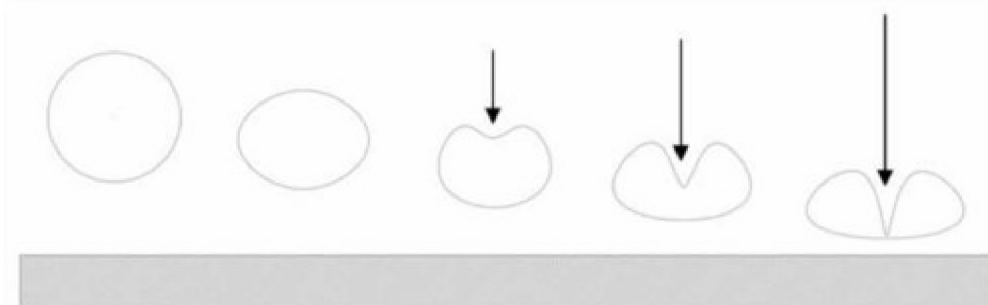
Kavítací působení způsobuje hluk, což v některých provozech způsobuje nemalý problém, daleko větší potíží je, že snižuje účinnost strojů a může způsobit i jejich mechanické poškození, které může vést ke zničení stroje.

Na vznik kavítace má vliv především velikost podtlaku, soudržnost kapaliny (povrchové napětí) kapaliny a teplota. Teplota ovlivňuje vznik kavítace, jelikož tlak nasycených par je svázán s teplotou, čím je nižší, tím menší je kavítace.[4]



Obr. 2.1.1 - Typický vhléd povrchu, na který působí kavítace.[4]

Kavitace je jev vyznačující se vznikem, vývojem a zánikem kavitačních dutin v kapalině. Dochází k němu v okamžiku, kdy tlak v některém místě kapaliny poklesne pod určitou úroveň, danou zejména tlakem nasycených par čerpané kapaliny, obsahem plynů a pevných částic v kapalině (ty tvoří tzv. kavitační jádra) a dalšími vlivy. V takovém místě vznikají dutiny naplněné párou čerpané kapaliny (u odstředivých čerpadel je to většinou na některých místech náběžných hran lopatek oběžného kola). Ty jsou unášeny proudem kapaliny a dostávají se do oblastí s větším tlakem. Tam zanikají tzv. implozí (kavitačním kolapsem). Při implozi jsou vyvinuty tlakové vlny velkých amplitud a rychlostí, které jsou schopny narušit vnitřní povrch čerpadla, ventilu či potrubí. Tento jev je označován jako kavitační eroze a je hlavním nepříznivým projevem kavitace. Mezi další následky kavitace patří pokles účinnosti práce čerpadla a jeho větší celkové opotřebení v důsledku nárůstu vibrací a v některých případech i nepříznivý vliv na kvalitu čerpaného produktu. Typickou příčinou vzniku kavitace v čerpadle je nedostatečný statický tlak ve vstupním profilu čerpadla či pokles tlaku vstupu do ventilu a jeho postupné otevírání či zavírání.[4]



Obr. 2.1.2 - Asymetricky kolabující parní bubliny[4].

2.2 Kavitační jevy

Při obtékání pevných těles kapalinou vznikají za určitého stavu kapaliny, např. tlaku a teplotě, malé prostory naplněné parami kapaliny nebo plynem (vznik parních nebo plynových bublin). Obdobný jev vzniká též ve stojící kapalině, v níž se pohybuje pevné těleso (kmitá). Právě tento jev nazýváme kavitace.

Kavitace je dlouhodobý problém technické praxe. První problémy s tímto jevem nastaly už u lodí, konkrétně u lodních šroubů. Kavitace jednak způsobovala snížení výkonu (nedosažení návrhových hodnot), jednak značné a rychlé poškozování obtékaných částí. Tomuto závažnému problému se věnuje značná pozornost. S rostoucími poznatky o kavitaci se rozšiřovala oblast strojů a zařízení, v níž docházelo ke kavitačnímu působení. V současné době je výskyt kavitace zaznamenáván zejména na u vodních turbín, hydrodynamických i hydrostatických čerpadel, v hydrodynamických převodech, v armaturách, v proudových přístrojích, v hydrodynamických ložiscích, u vodou chlazených spalovacích motorů, v ozubených převodech, u lodních šroubů a torpéd.

Samotný jev byl poprvé popsán roce 1885 S.W.Barnabym, který jej vysvětluje jako tvoření parních bublin, od této doby bylo publikováno značné množství literatury zabývající se tímto často negativním a škodlivým jevem.

2.2.1 Podstata kavitačního jevu

Kavitace v kapalině představuje narušení její spojitosti. Vzniká při dosažení určitého stavu kapaliny v daném místě. Tento stav je zejména určen tlakem teplotou kapaliny. Tedy poklesne-li v daném místě tlak na hodnotu tzv. kavitační tlak, při dané teplotě kapaliny dochází k porušení.

2.2.2 Kavitační jádro a kavitační bublina[1]

Kavitační bubliny se objevují v místech porušení soudržnosti kapaliny. Aby se porušila tato soudržnost, musí být překonány kohezní síly molekul, jejichž projevem je pevnost kapaliny. Molekuly musí být na některém místě odtrženy od sebe. Pevnost kapaliny se liší podle stupně čistoty. Pro absolutně čistou vodu činí pevnost vody 1013 MPa, podle Bogačeva (1), zatím co pro kapalinu, která obsahuje různé příměsi, jako bubliny nerozpuštěného plynu či mechanické nečistoty činí asi 202 MPa, podle Zeldoviče (2). Experimentální zjištění pro pevnost kapaliny se však pohybuje ve výši 10^2 až 10^4 Pa, z toho vyplývá, že je podstatně nižší než u čisté kapaliny.

a) podmínky rovnováhy pro tlak v bublině

$$p_b = p_v + p_w = p_k + \frac{2 \cdot \sigma}{r_B} \quad (2.2.2.1)$$

$$p_k = p_w + \left(p_{k0} - p_w + \frac{2 \cdot \sigma}{r_{B0}} \right) + \left(\frac{r_{B0}}{r_B} \right)^3 - \quad (2.2.2.2)$$

| | | |
|----------------|-------------------------------------|------|
| r_B | poloměr kulové bubliny | [m] |
| p_v | tlak plynu | [Pa] |
| p_w | tlak nasycených par | [Pa] |
| p_k | tlak v kapalině obklopující bublinu | [Pa] |
| σ | povrchové napětí | [Pa] |

- index 0 značí výchozí hodnoty pro p_k a r_B

Lze usuzovat, že největší vliv na snížení pevnosti kapaliny mají zejména volné plyny, které jsou nerozpuštěné, které tvoří tzv. kavitační jádra. Mechanické částičky dobře skučivé kapalinou nesnižují mez pevnosti kapaliny, pokud fázové rozhraní mezi kapalinou a pevnou částičkou je schopné přenášet napětí větší než kohezní síly. Podobné plyny rozpuštěné v kapalině také nesnižují pevnost.

Předpokládá se, že kavitační jádra tvořená volnými nerozpuštěnými plyny jsou v mikroskopických štěrbinách nebo trhlinách na povrchu obtékaných stěn nebo na makroskopických částičkách obsažených v kapalině. Kavitační bubliny vznikají z kavitačního jádra. Za určitých podmínek kapaliny dosáhne kavitační jádro kritické velikosti, po níž začne růst, až se stává viditelné pouhým okem jako kavitační bublina.

b) kritický poloměr bubliny

$$r_{kr} = r_{B0} \cdot \left(\frac{3 \cdot r_{B0}}{2 \cdot \sigma} \cdot p_{v0} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.2.2.3)$$

$$p_{v0} = p_{k0} - p_w + \frac{2 \cdot \sigma}{r_{B0}} \quad (2.2.2.4)$$

Kritický poloměr bubliny r_{kr} , kdy tato začíná expanzivně růst, je řízen vztahem (2.2.2.3), při podmínce $\frac{\partial p_k}{\partial r_{B0}} = 0$.

c) rychlost na rozhraní dutiny s kapalinou

$$v_B^2 = \frac{2}{3} \cdot \frac{p_\infty}{\rho_K} \cdot \left[\left(\frac{r_\infty}{r_B} \right)^3 - 1 \right] \quad (2.2.2.5)$$

p_∞ konstantní tlak [Pa]
 ρ_K hustota kapaliny [kg.m⁻³]
 r_∞ konstantní poloměr bubliny [m]

- vychází z rovnosti kinetické energie kapaliny a práce vykonané při změně objemu dutiny

d) celková implozí doba bubliny

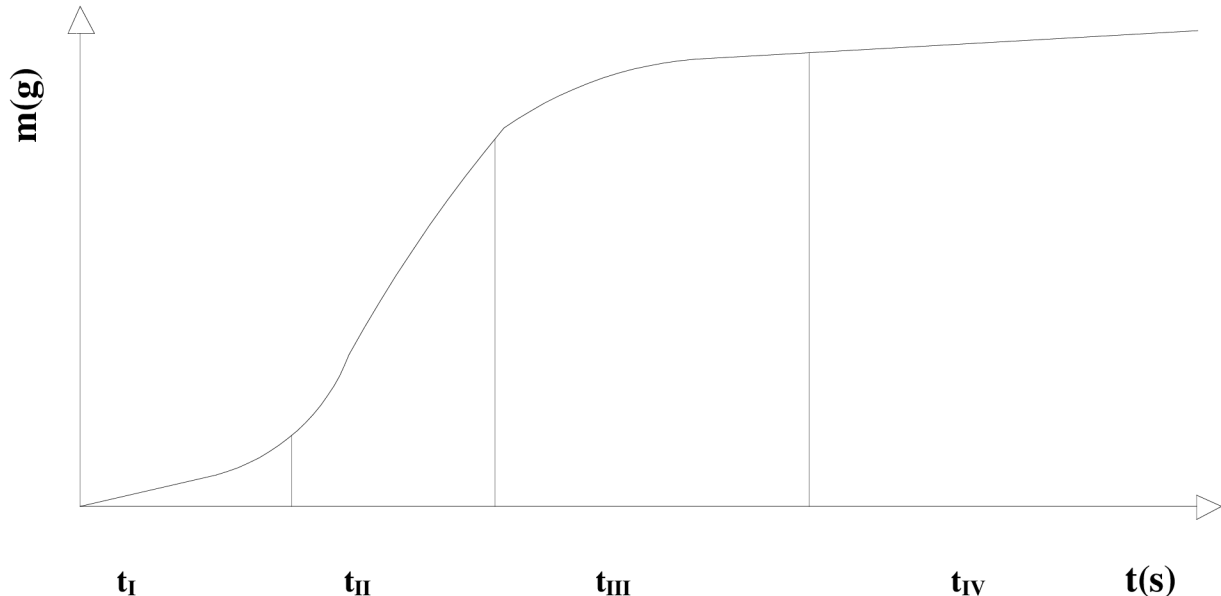
$$\tau = 0,9146 \cdot r_{B0} \cdot \left(\frac{\rho_k}{p_\infty} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.2.2.6)$$

e) tlak vyvinutý na konci imploze

$$p_{max} = 0,157 \cdot \left(\frac{r_{B0}}{r_B} \right)^3 \cdot p_\infty \quad (2.2.2.7)$$

2.3 Kavitační působení

2.3.1 Etapy kavitace



t_I-inkubační doba, počáteční stádium, při tomto stavu dochází ke vzniku mikrotrhlin, díky vzniku implozí dochází ke zpevnění materiálu

t_{II}-akumulační doba, rozšíření kavitace na celou postiženou oblast

t_{III}-útlumová doba, rychlost kavitačního opotřebení klesá

t_{IV}-stav ustálení

Toto kavitační působení může vést až k závažnému nevratnému poškození jednotlivých částí či k jejich odtržení, např. lopatky nebo jiného elementu. Existují různé zásahy, které mohou zmírnit a to podstatně účinek kavitačního působení.

2.3.2 Vývoj a typy kavitací

V kapalině se nachází velké množství kavitačních jader o různé počáteční velikosti. Při dosažení určitého kavitačního tlaku budou jádra stejné velikosti explodovat současně. Aby kavitační jádro dorostlo do kritické velikosti, potřebuje určitý čas (v řadě případech je rozmezí od μs do ms). Znamená to, že při určité délce oblasti s kavitačním tlakem proběhnou některá kavitační jádra aniž by dorostla do kritické velikosti a explodovala. Přitom menší jádra k tomu potřebují delší čas. V blízkosti obtékané stěny vzniká kavitace asi uprostřed mezní vrstvy, a to při tlaku vyšším než je příslušné napětí par.

Shluk kavitačních bublin tvoří v kapalině kavitační oblast (zóna či mrak), která je ohraničena buď úplně kapalinou, nebo kapalinou a pevnou stěnou. Kavitace vyvinutá do takového stupně, že kavitační oblast ovlivňuje proudové poměry v hydraulickém stroji či zařízení do té míry, že jsou ovlivněny též jejich energetické parametry, jako průtok,

účinnost apod., se nazývá plně vyvinutou kavitací. Kavítace, jejíž stupeň vývoje je mezi počátkem kavítace a vyvinutou kavitací, se označuje částečně vyvinutou kavitací.

2.3.3 Vliv fyzikálních vlastností kapaliny na kavítaci

Mezi nejdůležitější fyzikální vlastnosti ovlivňující kavítací proces lze zahrnout povrchové napětí, viskozitu, obsah plynu v kapalině, termodynamické vlivy, stlačitelnost vzniklé směsi aj.

2.3.4 Kavítací opotřebení

Přemísťuje-li se kavítací bublina do oblasti vyššího tlaku, než-li je kavítací tlak, páry v ní prudce kondenzují a plyny částečně difundují do okolní kapaliny, přičemž dochází k rázům, vyzařování tlakových vln, což spolu s dalšími doprovodnými jevy působí na povrch obtékaného tělesa a narušuje ho kavítací erozí. Povrch materiálu se v závislosti na časovém působení kavítace nejdříve zdrsňuje a pak se začínají tvořit ostře ohraničené jamky, uvolněný materiál je odplavován proudem.

Vznikem, růstem, pulsacemi kavítacích bublin a jejich zánikem vzniká kavítací hluk. Zejména při zániku bubliny nabývá rychlost a tlak kapaliny v okolí bubliny velkých hodnot, které v důsledku stlačitelnosti kapaliny vyvolávají kulové tlakové vlny, vzniklé vlny se šíří radiálním směrem od středu bubliny do okolní kapaliny. Jednotlivé tlakové vlny se navzájem ovlivňují. U běžných hydraulických strojů či částí zařízení je vyvolaný provozní hluk (bez kavítace) zpravidla v oboru slyšitelných zvukových frekvencí, kdežto kavítací hluk spadá většinou do ultrazvukové frekvence. Malé kavítací bubliny mají frekvenci až 3 MHz, kdežto velké pulzující bubliny (tj. u vyvinuté kavítace) mohou mít frekvenci nízkou, až 10 Hz. Toto zjištění se využívá ke zjišťování kavítace ve stroji bez vizuálního sledování. Vhodným umístěním snímačů ve stroji se určí poloha kavítací oblasti.

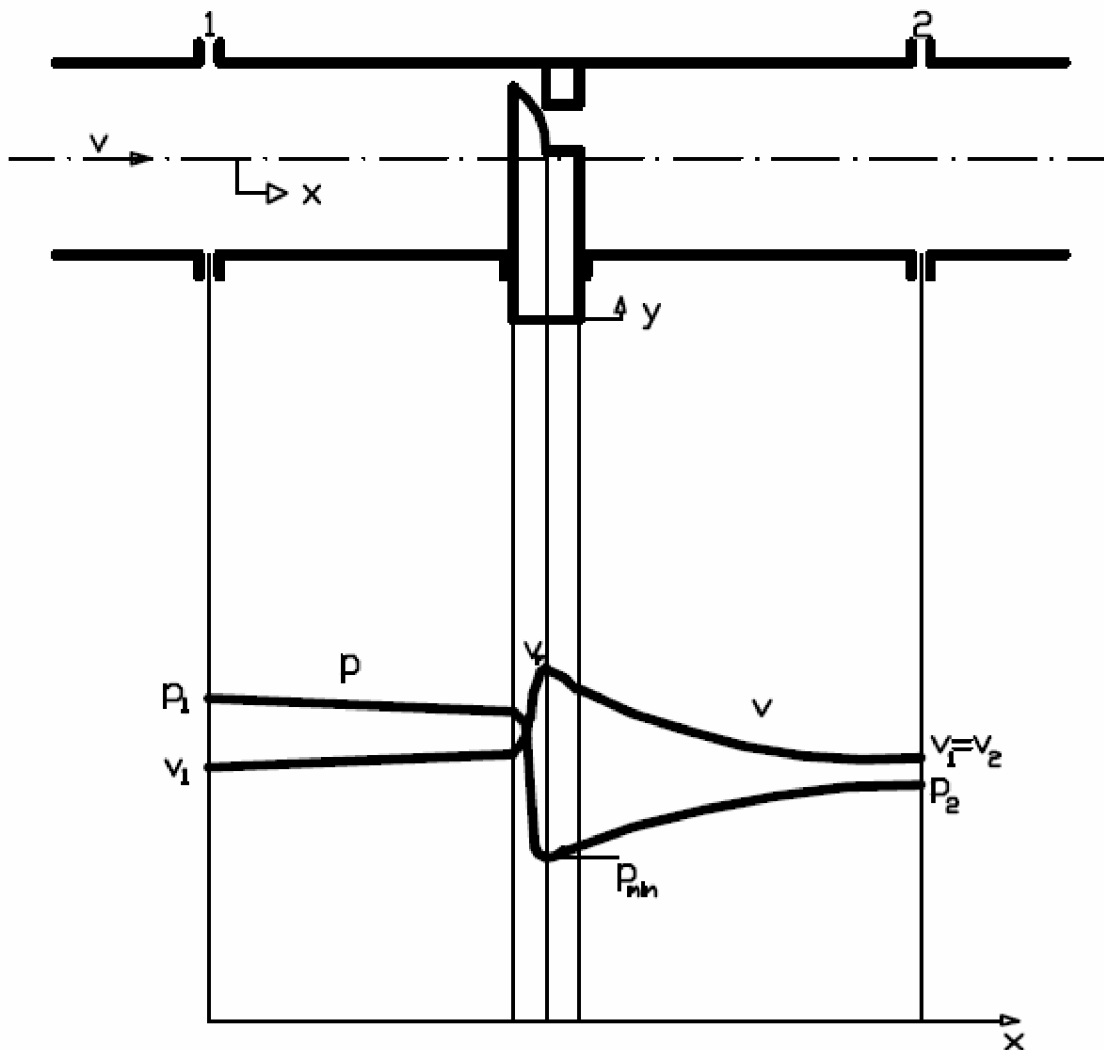
3. Kavítace v armaturách

3.1 Kavítace v průmyslovém provozu [6]

V typickém průmyslovém provozu jsou stovky procesních regulačních smyček. Většina z těchto obvodů používá jako regulační orgán ventil. Proto je výkonost systému přímo závislá na provozní spolehlivosti regulačních ventilů. Ve srovnání s ostatními složkami systému, může být škrtící proces v regulačním ventilu předmětem mnoha nepříznivých podmínek. V těchto náročných aplikacích plní regulační ventil stěžejní roli v bezpečné regulaci při vysokých procesních úrovních energií, a to k zabránění poškození ventilů a potrubí od akustického hluku, vibrací, kavítace a eroze. Konstrukce ventilu odolná proti nežádoucím vlivům při škrtícím procesu kapalin je jen tak efektivní, jak je efektivní vlastní návrh a výběr ventilu. Regulační ventil navržený s trimem z tvrzených materiálů může vydržet téměř neomezeně v podmínkách nízkého diferenčního tlaku. Stejný ventil v aplikaci vysoké tlakové difference kapaliny může selhat i za několik hodin. Tyto metody používají čelní výrobci, kteří využívají několik metod k posuzování a k zabránění působení škodlivých vlivů kavítace na regulační schopnost a spolehlivost regulačního ventilu. Ventil při postupném otevírání a zavírání za určitého průtoku kavítuje.

3.2 Působení kavitace v armaturách [1]

Poklesne-li tlak v určitém místě při průtoku armaturou nebo potrubím pod hodnotu tlaku nasycených par kapaliny, odpovídající její teplotě, vznikne kavitace. Kavitační bubliny náhle zanikají, dostanou-li se s proudem kapaliny do oblasti s vyšším tlakem, a vyvolá se kavitační opotřebení materiálu.



Obr. 3.2.2 – Schéma regulační armatury s průběhy tlaků a rychlostí.

Na schématu je znázorněn průtok regulační armaturou s průběhem tlaku a rychlosti. Pro vznik kavitace je rozhodující, zda tlak kapaliny poklesne pod kritickou hodnotu kavitačního tlaku, která přibližně odpovídá tlaku nasycených par kapaliny.

$$p_{\min} \leq p_w < p_2 \quad (3.2.1)$$

p_wtlak nasycených par [Pa]

p_2tlak za armaturou [Pa]

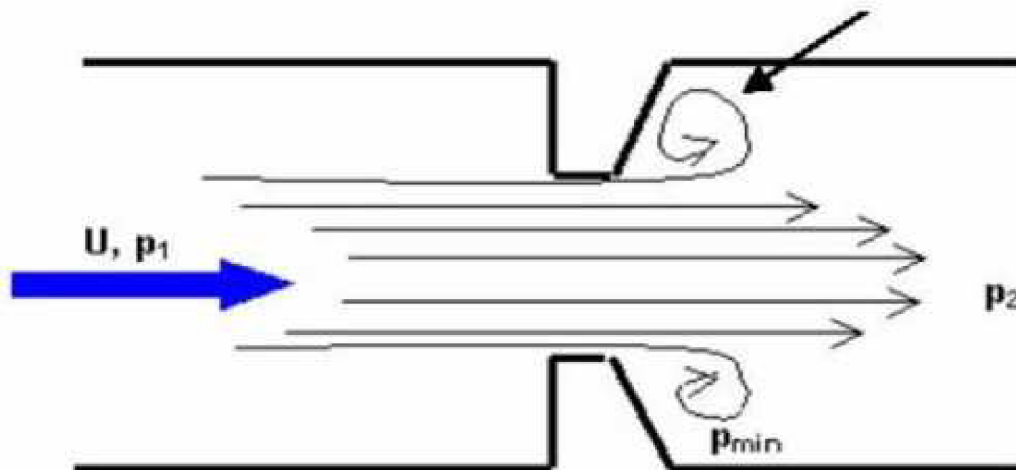
Jestliže tlak p_w leží v rozmezí minimálního tlaku p_{\min} a tlakem p_2 , v tomto případě vznikne kavitace a lze očekávat po určité době kavitační opotřebení. Bude-li p_{\min} větší než p_w , parní kavitace nenastane.

Pro málo otevřené ventily, hlavně s parabolickou kuželkou, je nebezpečí kavitace větší. Vedle kavitace vyvolané přeměnou tlakové energie na kinetickou vyskytuje se další příčina, a to kmitání součástí v kapalině. Pokud kapalina nemůže sledovat v důsledku setrvačnosti rychlý pohyb povrchu kmitající součást, dochází k odtržení proudu a poklesu tlaku pod kritickou hodnotu, vztahuje přímo na tlakovou diferenci na regulační armatuře.

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \chi \cdot (p_1 - p_{\min}) \quad (3.2.2)$$

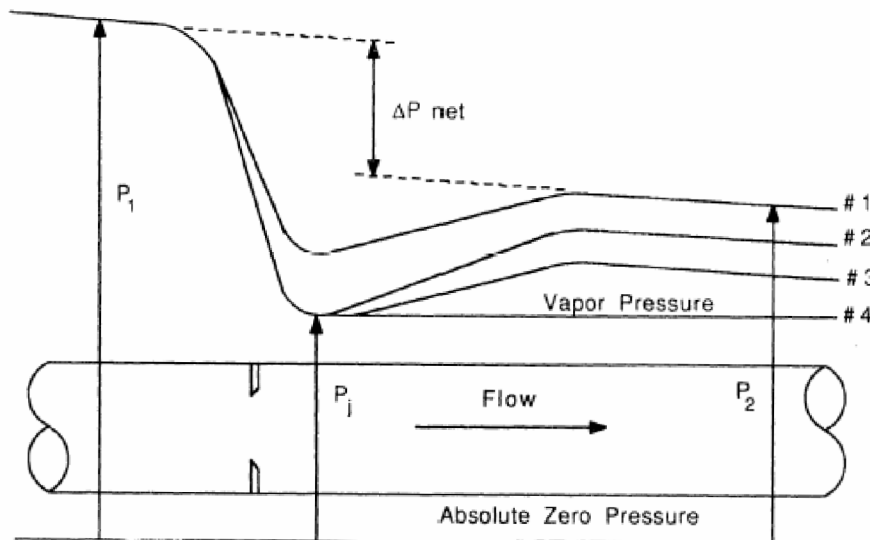
χsoučinitel, určený experimentálně [-]

- χ se pohybuje v rozmezí 0,36 až 0,50



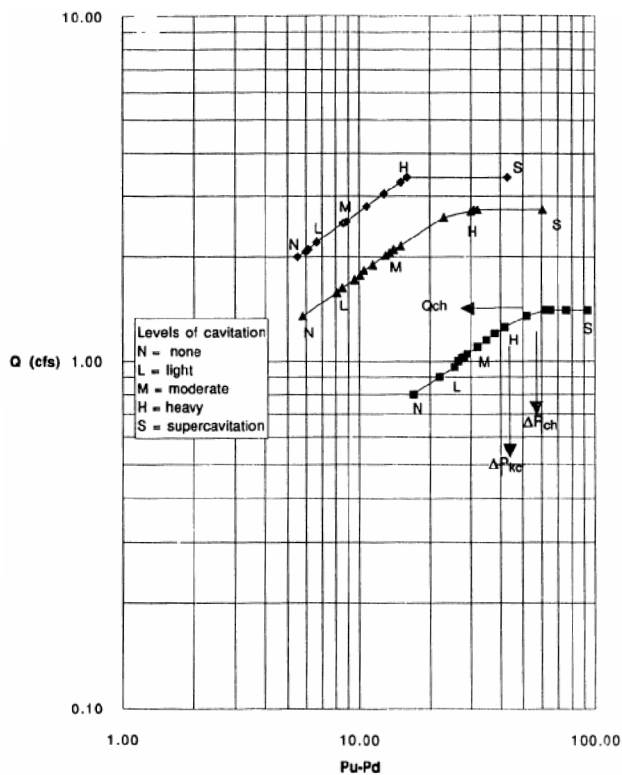
Obr. 3.2.3 – Ukázka proudění a vznik kavitace.

4. Kavitace na ventilu [7]

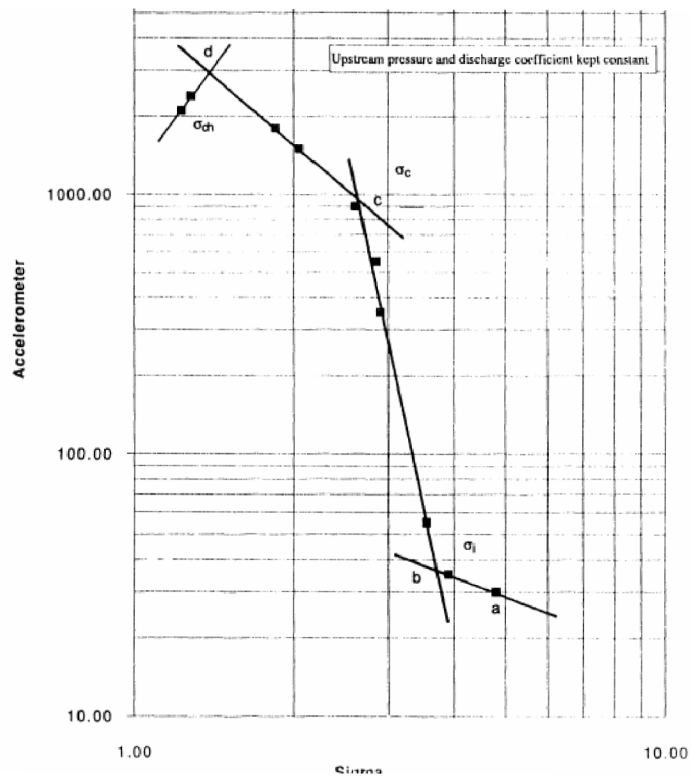


8.1.1 – Závislost tlaku na poloze ventilu.

Na obrázku je znázorněn průběh tlaku v závislosti na poloze v blízkosti armatury, která je v tomto případě zobrazena jako clona.



8.1.2 – Závislost rozdílu tlaku na kavitačním součiniteli.



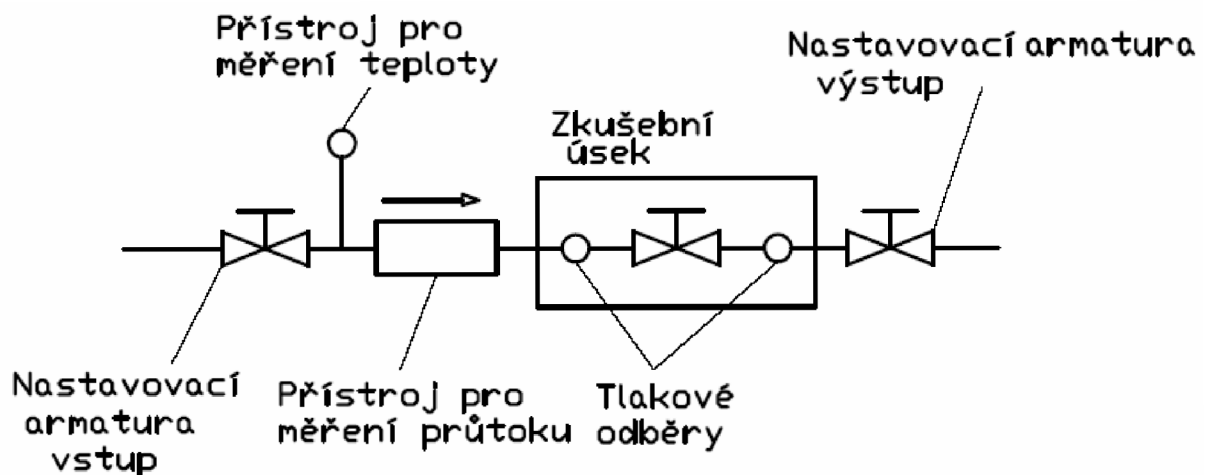
8.1.3 – Závislost akcelometru na kavitačním součiniteli.

5. Měření na trati se zakomponovanou tryskou

První měření proběhlo v laboratořích Vysokého učení technického a to Odboru fluidního inženýrství. Byly poskytnuty pouze data, které byly zpracovány a vyhodnoceny. Měření provedl Ing. Martin Hudec a to 30. 9 2008.

5.1 Popis měření

Základní uspořádání průtokového zkušebního systému je znázorněn na schématu. Při tomto rozvržení se odběry tlaků umísťují před a za zkušební vzorek. Zkušební vzorek může být zakomponován různě ve zkušebním úseku. Zkušební komponent jako hydraulická součást může být různorodá. Samotné měření se řídí normou ČSN EN 60534-2-3.



Obr. 5.1.1 – Základní schéma uspořádání průtokového systému[2].

5.1.1 Zkušební vzorek [2]

Zkušební vzorek je jakákoliv armatura nebo kombinace armatur s konfuzory, difuzory, nebo dalšími zařízeními, pro které se požadují výsledky zkoušek.

Modelování zkušebních vzorků v menším měřítku je v tomto oddílu povoleno, i když se dává přednost zkoušení vzorků nebo modelů ve skutečné velikosti. Pro správné modelování je nutno dbát na dodržení významných vztahů, jako je Reynoldsovo číslo při průtoku tekutiny zcela zaplněným potrubím, Machovo číslo, kde je významný vliv stlačitelnosti a geometrické podobnosti.

5.1.2 Zkušební úsek [2]

Zkušební úsek se skládá ze dvou přímých trubek. Jmenovitá světlost trubek na vstupu a na výstupu zkušebního úseku musí odpovídat jmenovité světlosti připojení zkušebního vzorku.

Vnitřní průměr připojené trubky musí být v rozmezí mezní úchytky $\pm 2\%$ skutečného vnitřního průměru na koncích zkušebního vzorku pro jmenovitou světlost do DN 250 a do jmenovitého tlaku PN 100. Pro armatury jmenovité světlosti větší než DN 250 nebo armatury s jmenovitým tlakem vyšším než PN 100 musí vnitřní průměr na vstupu a výstupu odpovídat vnitřnímu průměru příslušného potrubí.

5.1.3 Nastavovací armatury [2]

Nastavovací armatura na vstupu se používá pro nastavení vstupního tlaku do zkušebního úseku. Nastavovací armatura na výstupu slouží k nastavení během zkoušky. Společně se obě armatury používají pro nastavování tlakového spádu mezi vstupním a výstupním tlakovým odběrem a k udržení požadovaného výstupního tlaku. Typy těchto armatur nejsou nijak omezeny. Nicméně nastavovací armatura na vstupu musí být vybrána a umístěna tak, aby neovlivnila přesnost měření. Nastavovací armatura na výstupu smí být větší než jmenovitá světlost zkušebního vzorku, aby se zajistilo dostatečné škrcení ve zkušebním vzorku. Při použití tekutiny jako zkušební látky musí být zabráněno odpařování v armatuře na vstupu.

5.2 Trať a zapojení jednotlivých členů

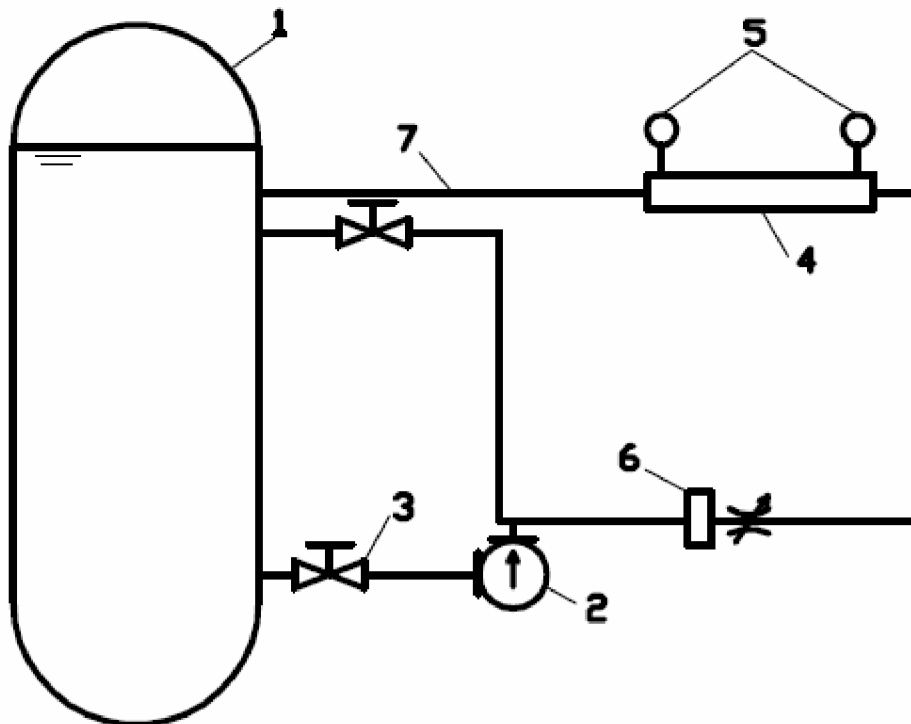
Trať pro toto měření, která byla sestavena v laboratořích VUT vychází ze základního uspořádání průtokového systému, jako zkušební vzorek byla pojata tryska (Lavalova dýza).



Obr. 5.2.1 – Fotografie z laboratoří se zapojenou tryskou ve standu.

V tomto uspořádání není uvažováno měření teploty a teplota vody je vedena jako konstantní 20° Celsia. Snímače, které měří sledované veličiny jsou vyvedeny do počítačové jednotky, kde se uloží do textového souboru.

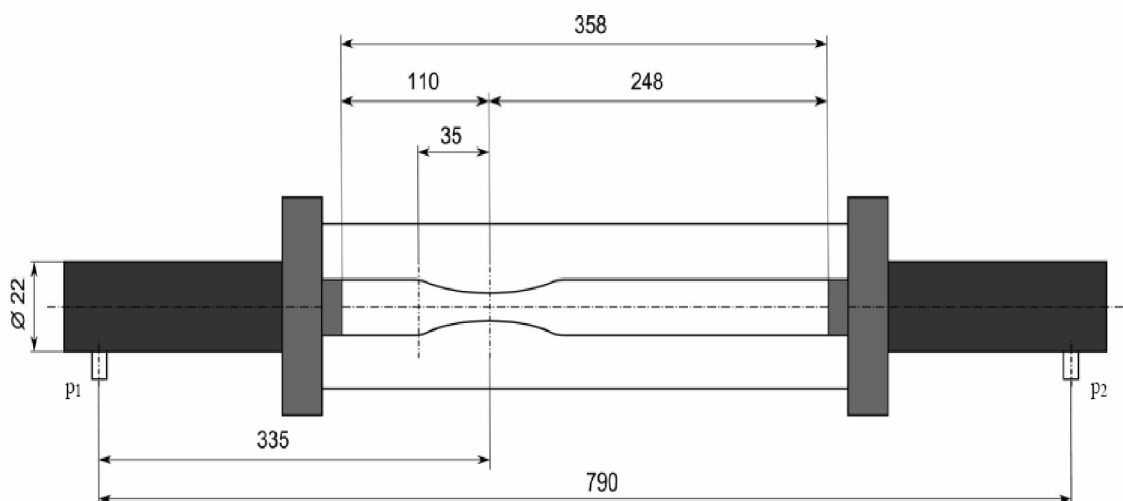
5.2.1 Schéma měřící tratě



- 1- nádrž s vodou
- 2- čerpadlo
- 3- ventil
- 4- zkušební vzorek (tryska)
- 5- odběry tlaku
- 6- průtokoměr
- 7- potrubí

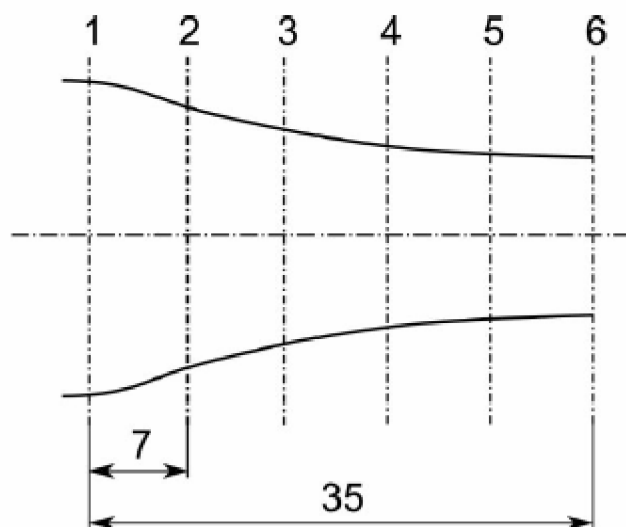
5.2.2 Použitá tryska

Použitý zkušební vzorek vložen do zkušebního úseku, v tomto případě speciální tryska, Lavalova dýza (tryska) byla původně vyrobena ze skla, ale po nehodě při průběhu měření, tryska praskla. Bylo zvolen jiný materiál a to plexisklo, které je houževnatější. Průhledný materiál byl volen proto, že se sleduje průběh kavitace vzniklé prouděním skrz trysku. Po délce trysky byly provedeny řezy a celá tryska je uložena v ochranné tubě z plexiskla.



Obr. 5.2.2.1 – Rozměry trysky a její ochrany z plexiskla.

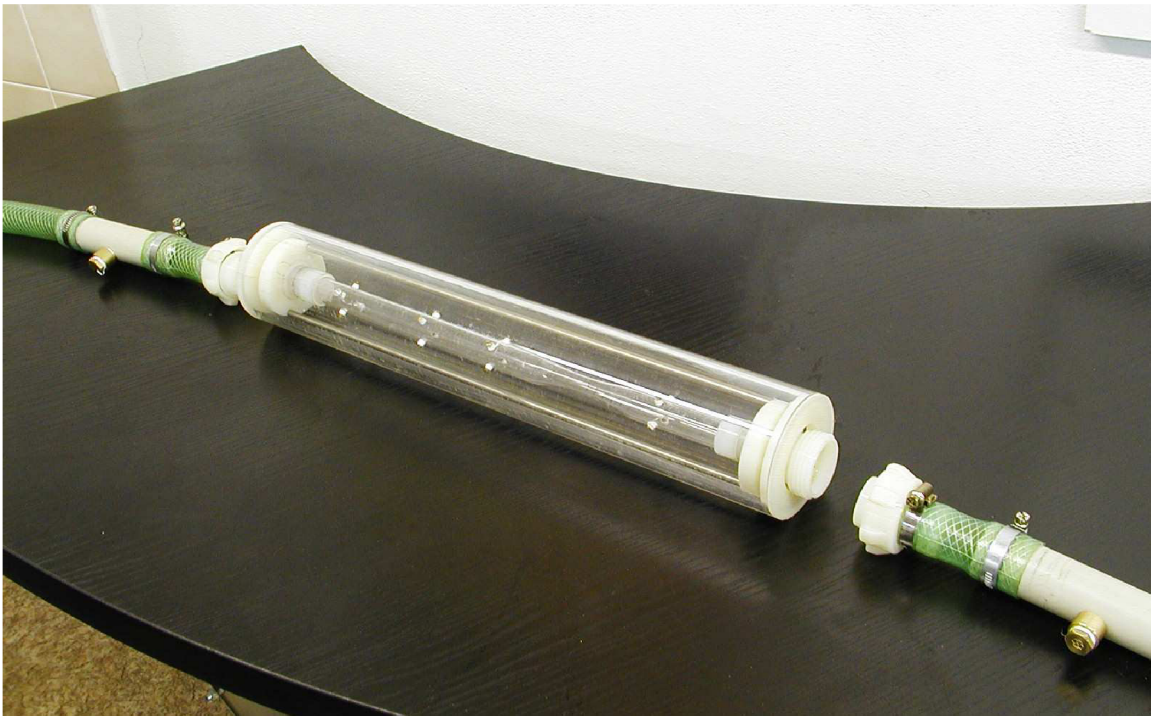
Tryska byla od počátku zúžení po její nejužší část rozdělena šesti řezy na pět částí o délce 7 mm. V těchto řezech byly odměřeny vnitřní průměry. Průměry jsou uvedeny v tabulce. Odběry tlaků se provádějí před a za tryskou.



Obr. 5.2.2.2 – Znáornění řezů na zúžení trysky.

| | Průměr [mm] |
|---|-------------|
| 1 | 16 |
| 2 | 14,1 |
| 3 | 11,4 |
| 4 | 10,2 |
| 5 | 9,3 |
| 6 | 9 |

Tabulka č.1



Obr. 5.2.2.3 – Fotografie trysky(její konstrukční řešení).

5.2.3 Měřené veličiny [2]

Měření průtoku

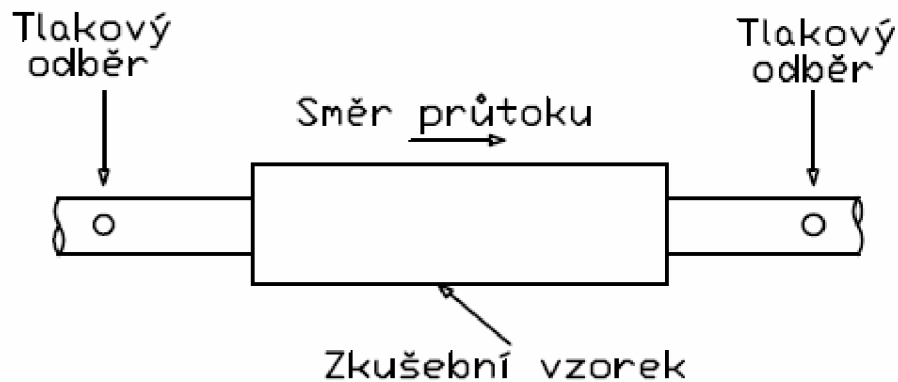
Zařízení na měření průtoku může být umístěno před nebo za zkušebním úsekem může být jakéhokoliv druhu, pokud dociluje předepsanou přesnost. Měřicí zařízení musí být cejchováno tak často, jak je potřeba, aby tato přesnost byla zachována. Toto zařízení se užívá pro stanovení okamžitého středního průtoku s přípustnou mezní úchylkou $\pm 2\%$ od skutečné hodnoty.

Tlakové odběry

Tlakové odběry musí být umístěny v potrubním zkušebním úseku v souladu s požadavky, které určuje norma ČSN EN 60534-2-3 a musí se přizpůsobit znázorněné na obr.4.2.3.1. Jestliže rozložení rychlosti proudění v trubce není rovnoměrné, je dovoleno pro dosažení potřebné přesnosti měření užití více tlakových odběrů.

Průměr tlakového odběru musí být nejméně 3 mm a nesmí být větší než menší z hodnot 12 mm nebo jedna desetina jmenovité světlosti trubky. Průměry tlakových odběrů na vstupu a na výstupu musí být stejné, kvůli korektnosti měření.

Otvor tlakového odběru musí být kruhový a vstupní hrana musí být čistá a ostrá nebo lehce zaoblená, zbavená ořepů, jehel nebo jiných nepravidelností. Není striktně určená metoda připojení jeli v souladu s normou. V žádném případě nesmí žádná část vyčnívat dovnitř trubky



Obr. 5.2.3.1 – Tlakové odběry na zkušebním vzorku.

Uvažuje se nestlačitelná kapalina a proto musí být odběry umístěny vodorovně, aby se zmenšila možnost vnikání vzduchu nebo hromadění nečistot v odběrech a musí protínat osu trubky pod pravým úhlem.

Zaznamenávají se následující údaje:

- a) zdvih uzávěru armatury;
- b) vstupní tlak p_1 ;
- c) tlakový spád (p_1-p_2) mezi tlakovými odběry;
- d) vstupní teplota T_1 ;
- e) objemový průtok;
- f) atmosférický tlak p_a ;
- g) fyzikální popis zkušebního vzorku (typ armatury, jmenovitá světlost, jmenovitý tlak, směr průtoku).

5.3 Výpočetní vztahy

5.3.1 Průtokový součinitel

$$K_v = \frac{Q}{N_1} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\rho_0} \frac{1}{\Delta p}} \quad (4.3.1)$$

| | | |
|------------------|-------------------------------------|-----------------------|
| K_v | průtokový součinitel | [m ³ /hod] |
| Q | měřený průtok | [m ³ /hod] |
| N_1 | konstanta $1 \cdot 10^{-1}$ | [-] |
| Δp | měřená tlaková diference | [kPa] |
| ρ | hustota kapalin | [kg/m ³] |
| ρ_0 | hustota vody 1000 kg/m ³ | [kg/m ³] |

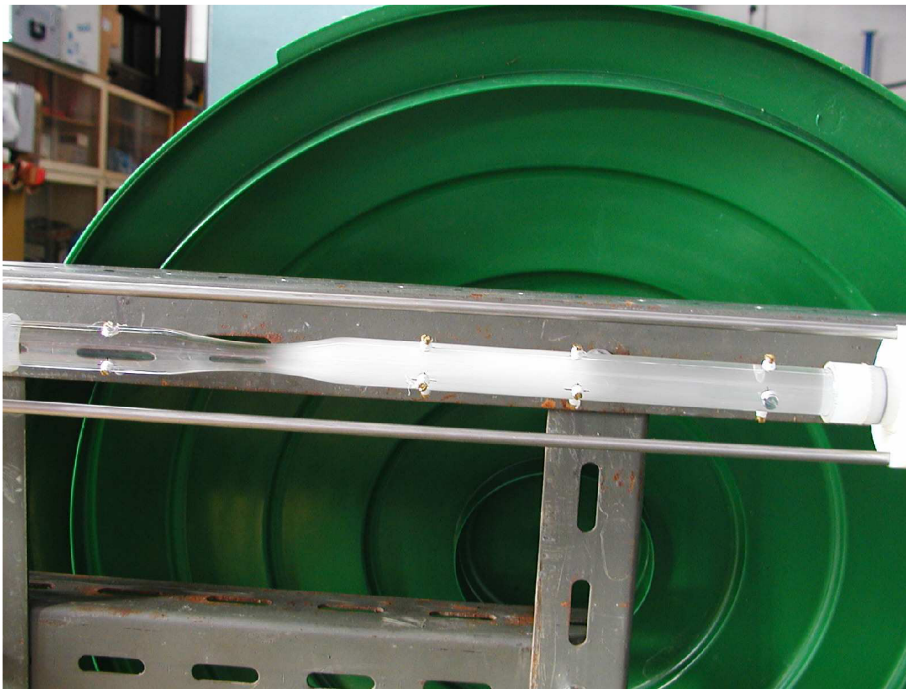
- Hustota čerpané kapaliny je rovna hustotě vody $\Rightarrow \rho = \rho_0$

5.3.2 Thomův kavitační součinitel

$$\sigma_p = \frac{p_2 - p_v}{\Delta p} \quad (4.3.2)$$

| | | |
|------------------|----------------------------------|-------|
| σ_p | Thomův kavitační součinitel | [-] |
| Δp | měřená tlaková diference | [kPa] |
| p_2 | výstupní tlak | [kPa] |
| p_v | tlak syté páry viz. příloha č. 1 | [kPa] |

- Tlak syté páry je přímo závislí na teplotě čerpaného média, v tomto případě vody o teplotě $T=20^\circ\text{C}$.



Obr. 5.3.2.1 – Ukázka kavitující trysky.

5.3.3 Směrodatné odchylky [5]

Směrodatná odchylka je v teorii pravděpodobnosti a statistice často používanou mírou statistické disperze. Jedná se o kvadratický průměr odchylek hodnot znaku od jejich aritmetického průměru.

Zhruba řečeno vypovídá o tom, jak moc se od sebe navzájem liší typické případy v souboru zkoumaných čísel. Je-li malá, jsou si prvky souboru většinou navzájem podobné, a naopak velká směrodatná odchylka signalizuje velké vzájemné odlišnosti. Pomocí pravidel 1σ a 2σ (viz níže) lze přibližně určit, jak daleko jsou čísla v souboru vzdálená od průměru, resp. hodnoty náhodné veličiny vzdálené od střední hodnoty. Směrodatná odchylka je nejužívanější míra variability.

Směrodatná odchylka, značená řeckým písmenem σ , se obvykle definuje jako odmocnina z rozptylu náhodné veličiny X .

$$\sigma = \sqrt{D(X)} = \sqrt{\text{var}(X)} \quad (4.3.3.1)$$

Xnáhodná veličina

$D(X)$rozptyl náhodné veličiny X

Směrodatnou odchylku lze vypočítat pomocí střední hodnoty $E(X)$ a případně i $E(X^2)$.

$$\sigma = \sqrt{E((X - E(X))^2)} = \sqrt{E(X^2) - (E(X))^2} \quad (4.3.3.2)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \quad (4.3.3.3)$$

Pro skutečný výpočet odhadu směrodatné odchylky na empiricky zjištěné řadě čísel (tento odhad se nazývá výběrová směrodatná odchylka a jedná se o odmocninu z výběrového rozptylu) lze použít následující postup:

Mějme soubor reálných čísel x_1, \dots, x_N . Aritmetický průměr souboru lze vypočítat jako:

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i, \quad (4.3.3.4)$$

Potom výběrová směrodatná odchylka těchto dat může být vypočítána jako:

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}, \quad (4.3.3.5)$$

Pro praktické výpočty se častěji používá ekvivalentní vzorec:

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \left(\sum_{i=1}^N X_i^2 - N \bar{X}^2 \right)} \quad (4.3.3.6)$$

který nevyžaduje předběžný výpočet průměru. Druhý sčítanec pod odmocninou totiž lze počítat průběžně zároveň s výpočtem sumy čtverců x_i během jediného programového cyklu procházejícího vstupní data. Pokud je N velké, redukuje se tím doba výpočtu zhruba na polovinu. Za určitých okolností však tato metoda zároveň může zvýšit vliv zaokrouhlovacích chyb na přesnost výsledku.

V případě tohoto měření se směrodatná odchylka počítá pro vstupní tlak p_1 , výstupní tlak p_2 , atmosférický tlak p_a a průtok Q . Vychází se z naměřených dat, tyto odchylky byly přepočítány v Excelu. Jednotky směrodatné odchylky jsou stejné jako u měřených hodnot, u kterých se odchylky počítají. Pro výpočty se použil vztah (4.3.3.5).

5.3.4 Použitá měřicí technika

Venturiho trubice:

skleněná trubice, která je zhruba v první třetině zúžená a z bezpečnostních důvodů byla vložena do plexi trubice

Nádrž

Cirkulační čerpadlo:

CALPEDA, typ MXH 805, $H_{\max} = 54$ m, při $Q = 5$ m³/hod, otáčky $n = 2800$ min⁻¹

Snímač p_1 - vstup:

Typ DMP 331, výrobce BD SENSORS s.r.o., měřicí rozsah (0 - 4) bar A, přesnost $\pm 0,25\%$, výstupní signál (0 - 20) mA, výr. č. 36969

Snímač p_2 - výstup:

Typ DMP 331, výrobce BD SENSORS s.r.o., měřicí rozsah (0 - 2,5) bar A, přesnost $\pm 0,25\%$, výstupní signál (0 - 20) mA, výr. č. 320839

Snímač p_a - atmosféra:

Typ DMP 331, výrobce BD SENSORS s.r.o., měřicí rozsah (0 - 1,6) bar A, přesnost $\pm 0,25\%$, výstupní signál (0 - 20) mA, výr. č. 322631

Uzavírací ventil:

Regulační ventil DN25, tlaková třída PN10

Průtokoměr:

IFM4080K, DN32, výrobce KROHNE, měřicí rozsah (0 - 4) l·s⁻¹, přesnost měření $\pm 0,5\%$ z měřené hodnoty, výstupní signál (4 - 20) mA, výr. č. A9512222

Zdroj napětí k napájení snímačů:

Typ BK 123, výrobce TESLA Brno, rozsah výstupního napětí (0 - 20) V/ 1A, výr. č. 92 1916

Hadice:

Vodovodní hadice, pracovní tlak 1 MPa, průměr 25/32 mm

Měřicí počítač:

Měřicí počítač pro záznam a zpracování dat s měřicí kartou PCL 812 - PG, max. chyba A/D převodníku $\pm 0,015\%$ z měř. h. + 1 digit

Měřicí software:

INMES 812, verze 911127, č. licence pro VUT Brno FSI - OFI V. K.: 1A0039, vzorkovací frekvence 10 Hz, doba měření: 30s

Fyzikální vlastnosti vody:

Hustota $\rho = 1000$ kg·m⁻³

5.4 Grafické závislosti

5.4.1 Naměřené hodnoty na trati

| měření | p_1 | p_2 | p_a | Q | Q | dp |
|--------|--------|--------|-------|----------------------|--------------------------------------|-------|
| [-] | [kPa] | [kPa] | [kPa] | [l.s ⁻¹] | [m ³ .hod ⁻¹] | [bar] |
| 1 | 100,27 | 93,75 | 98,08 | 0,532 | 1,91 | 0,065 |
| 2 | 107,18 | 95,73 | 98,15 | 0,718 | 2,58 | 0,114 |
| 3 | 120,15 | 98,85 | 98,15 | 0,951 | 3,42 | 0,213 |
| 4 | 126,98 | 100,57 | 98,15 | 1,061 | 3,82 | 0,264 |
| 5 | 128,93 | 100,99 | 98,16 | 1,085 | 3,90 | 0,279 |
| 6 | 131,20 | 101,51 | 98,19 | 1,116 | 4,01 | 0,296 |
| 7 | 133,88 | 102,08 | 98,21 | 1,148 | 4,13 | 0,318 |
| 8 | 135,17 | 102,42 | 98,23 | 1,166 | 4,19 | 0,327 |
| 9 | 138,58 | 103,20 | 98,23 | 1,209 | 4,35 | 0,353 |
| 10 | 143,55 | 103,73 | 98,23 | 1,238 | 4,45 | 0,398 |
| 11 | 153,55 | 104,56 | 98,23 | 1,281 | 4,61 | 0,489 |
| 12 | 166,38 | 105,60 | 98,24 | 1,336 | 4,81 | 0,607 |
| 13 | 179,34 | 106,62 | 98,24 | 1,387 | 4,99 | 0,727 |
| 14 | 189,86 | 107,33 | 98,29 | 1,425 | 5,13 | 0,825 |
| 15 | 210,23 | 109,02 | 98,31 | 1,503 | 5,41 | 1,012 |
| 16 | 230,99 | 110,63 | 98,32 | 1,576 | 5,67 | 1,203 |
| 17 | 252,00 | 112,14 | 98,31 | 1,647 | 5,93 | 1,398 |
| 18 | 272,37 | 113,84 | 98,31 | 1,715 | 6,17 | 1,585 |
| 19 | 292,84 | 115,43 | 98,32 | 1,784 | 6,42 | 1,774 |
| 20 | 315,25 | 117,51 | 98,31 | 1,860 | 6,69 | 1,977 |
| 21 | 342,12 | 119,59 | 98,32 | 1,939 | 6,98 | 2,225 |

Tabulka č.2

Po odměření nastává odstavení čerpadla a dochází k zavodnění tratě.

5.4.2 Přepočtené hodnoty na trati

| $s p_1$ | $s p_2$ | $s p_a$ | $s Q$ | KV | σ |
|---------|---------|----------|----------------------|--------------------------------------|----------|
| [kPa] | [kPa] | [kPa] | [l.s ⁻¹] | [m ³ .hod ⁻¹] | [-] |
| 0,320 | 0,250 | 0,024 | 0,0039 | 7,51 | 14,023 |
| 0,479 | 0,303 | 0,012 | 0,0030 | 7,64 | 8,156 |
| 0,724 | 0,426 | 3,82E-16 | 0,0027 | 7,41 | 4,530 |
| 1,050 | 0,593 | 0,008 | 0,0035 | 7,43 | 3,720 |
| 1,112 | 0,581 | 0,026 | 0,0027 | 7,39 | 3,530 |
| 1,138 | 0,590 | 0,040 | 0,0028 | 7,37 | 3,341 |
| 1,282 | 0,649 | 0,034 | 0,0027 | 7,33 | 3,136 |
| 1,165 | 0,639 | 8,67E-16 | 0,0033 | 7,33 | 3,055 |
| 1,009 | 0,557 | 0,002 | 0,0031 | 7,32 | 2,850 |
| 0,876 | 0,593 | 0,005 | 0,0032 | 7,06 | 2,546 |
| 0,868 | 0,687 | 0,015 | 0,0031 | 6,58 | 2,086 |
| 0,926 | 0,696 | 0,022 | 0,0031 | 6,17 | 1,699 |
| 1,103 | 0,706 | 0,027 | 0,0043 | 5,85 | 1,433 |
| 0,853 | 0,660 | 0,033 | 0,0033 | 5,64 | 1,272 |
| 0,891 | 0,691 | 0,020 | 0,0030 | 5,38 | 1,054 |
| 1,099 | 0,934 | 0,013 | 0,0032 | 5,17 | 0,899 |
| 1,422 | 1,128 | 0,002 | 0,0033 | 5,01 | 0,785 |
| 1,326 | 2,446 | 0,002 | 0,0037 | 4,90 | 0,703 |
| 1,158 | 3,914 | 2,78E-16 | 0,0034 | 4,82 | 0,637 |
| 1,270 | 5,517 | 2,78E-16 | 0,0035 | 4,76 | 0,582 |
| 1,658 | 6,455 | 0,002 | 0,0033 | 4,68 | 0,526 |

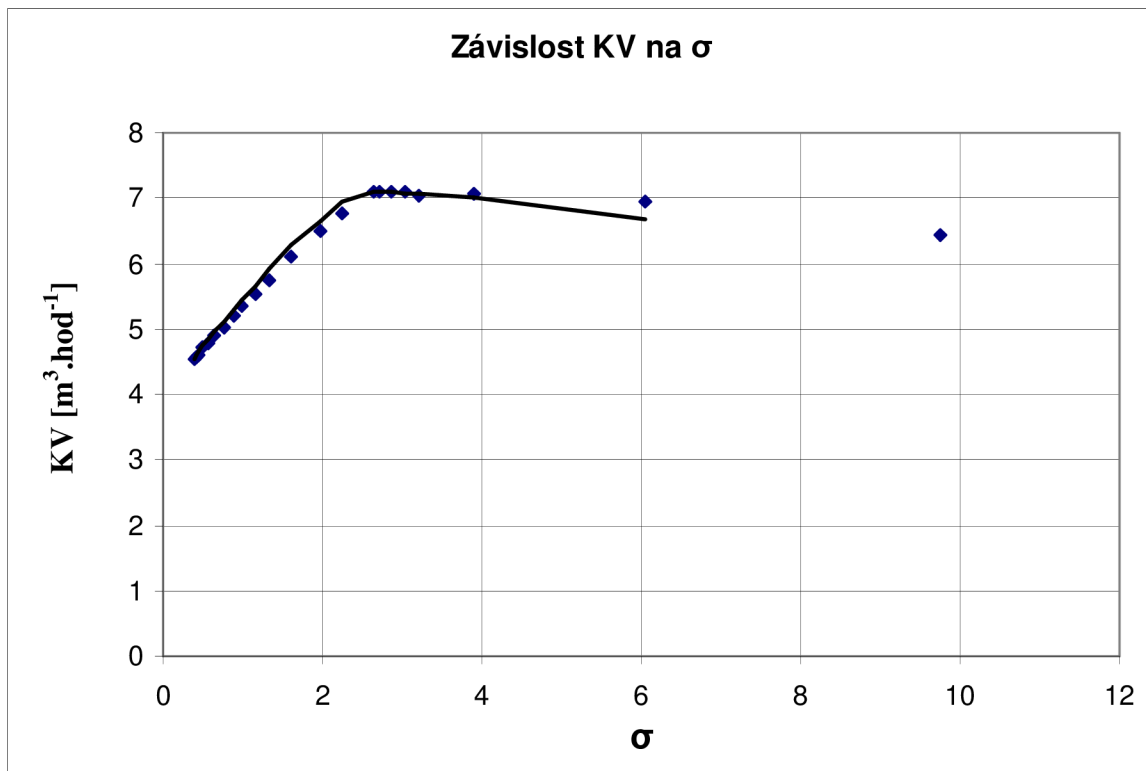
Tabulka č.3

Měření proběhlo 30.9 2008 v laboratořích VUT, z těchto naměřených a vypočtených hodnot se vykreslily závislosti. Byl proveden výpočet středních hodnot jednotlivých veličin, a směrodatných odchylek. Vstupní data pro výpočet byla dodána v textovém souboru.

5.4.3 Vykreslení závislostí



Obr. 5.4.3.1 – Závislost směrodatné odchylky tlaku p_2 na kavitačním součiniteli.



Obr. 5.4.3.2 – Závislost průtokového součinitele na kavitačním součiniteli.

5.5 Vyhodnocení měření a stanovení vysokofrekvenčních pulsací

Z tohoto měření nelze vyhodnotit vysokofrekvenční pulsace, jelikož do tratě nebyl zakomponován snímač pro měření vysokých frekvencí, při postupném zvyšování průtoku lze sledovat vznik kavitace a její průběh. Vlastní frekvence použitých snímačů byla 1kHz. Naměřené hodnoty a to statické hodnoty, které sloužily pro přepočítání kavitace součinitele a průtokového součinitele. S grafických závislostí lze vyčíst, kdy bude médium v trysce kavitovat a při jakém průtoku.

6. Fourierova transformace [3]

Fourierova transformace je vyjádření časově závislého signálu pomocí harmonických signálů, tj. funkcí sin a cos, obecně tedy funkce komplexní exponenciály. Slouží pro převod signálů z časové oblasti do oblasti frekvenční. Signál může být buď ve spojitým či diskrétním čase.

6.1 Podstata metody

Průběh signálu se obvykle znázorňuje závislost na čase, jinak řečeno v časové oblasti-doméně. Posuzování časového průběhu signálu vhodně doplňují i jeho vlastnosti prezentované rozkladem na soubor elementárních funkcí. Nejpřirozenější pro technické aplikace nejen v oboru kmitání mechanických systémů je rozklad na soubor harmonických funkcí, které se liší amplitudou, úhlovou frekvencí a svou počáteční fází. Jestliže se u souboru harmonických signálů znázorní závislost amplitudy a počáteční fáze na frekvenci, pak je signál znázorněn ve frekvenční oblasti-doméně. Rozklad periodické funkce se spojitým časem na kombinaci harmonických signálů se nazývá Fourierova (nekonečná) řada. Pro obecné neperiodické funkce se používá Fourierova transformace.

V této kapitole začíná popis vlastností signálů s důrazem na frekvenční oblast, která je zvláště vhodná pro analýzu periodických nebo kvasiperiodických diagnostických signálů. Složení tohoto typu signálu se analyzuje ve frekvenční oblasti mnohem přehledněji než v časové oblasti. Časová oblast je preferována pro znázornění signálu v případě, že v jeho spektru zůstanou složky jen užitečné pro posouzení jeho časového průběhu. K vytvoření takového časového průběhu jsou potřebné úpravy, které se provádějí ve frekvenční oblasti. Nástrojem k analýze signálů je Fourierova integrální transformace.

6.2 Fourierovy řady

Periodická funkce je charakterizována rovností vzájemně posunutých funkčních hodnot $x(t) = x(t + iT)$, kde je perioda a $i = \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$ je její násobek. Do tvaru (bodově) konvergentní Fourierovy nekonečné řady lze rozvinout tuto funkci, $x(t)$, za podmínky, že je po úsecích hladká, což znamená, že tato funkce a její první derivace má konečný počet bodů nespojitosti a konečné jednostranné limity. Definiční vzorce jsou následující:

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} F_k \exp\left(j \frac{2\pi}{T} kt\right), \quad (5.2.1)$$

$$F_k = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \exp\left(-j \frac{2\pi}{T} kt\right) dt, \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (5.2.2)$$

kde $F_k, k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ jsou koeficienty Fourierovy řady. Součet Fourierovy řady je v bodech nespojitosti roven aritmetickému průměru jednostranných limit. Fourierovu řadu s harmonickými funkcemi v exponenciálním tvaru lze převést na řadu, která obsahuje funkce sinus a cosinus. Protože vše je směřováno k interpretaci signálů jen pomocí rotujících vektorů, tento rozklad nebude dále rozvíjen. Fourierova řada tedy představuje rozklad signálu na nekonečný počet dvojic vektorů, které rotují proti sobě. K definici Fourierovy řady je třeba dodat, že signál $x(t)$ nemusí být jen reálná funkce času, ale také komplexní funkce času, která je vhodná pro záznam orbitů.

6.3 Fourierova transformace obecného signálu

Rozklad na Fourierovu řadu se týká jen periodických signálů. Přestože počet složek rozkladu je obecně nekonečný, obsahuje tento rozklad jen složky s frekvencemi, které jsou násobky, tzv. harmonické, základní frekvence opakování signálu. To znamená, že spektrum obsahuje jen izolované složky.

Rozklad obecného, tj. nejen periodického signálu, ale také neperiodického signálu na harmonické složky, lze vypočítat s pomocí Fourierovy transformace. Příkladem neperiodického signálu je osamocený obdélníkový impuls nebo také jakákoliv jiná neperiodická funkce. Tento rozklad obsahuje obecně složky o všech frekvencích s infinitesimální (nekonečně malou) amplitudou. Spektrum je spojitá funkce frekvence. Definiční vzorce přímé a zpětné (inverzní) Fourierovy transformace pro signál, tj. funkci $x(t)$ ve významu vzoru nebo originálu, jsou následující:

$$X(\omega) = F\{x(t)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \exp(-j\omega t) dt, \quad (5.3.1)$$

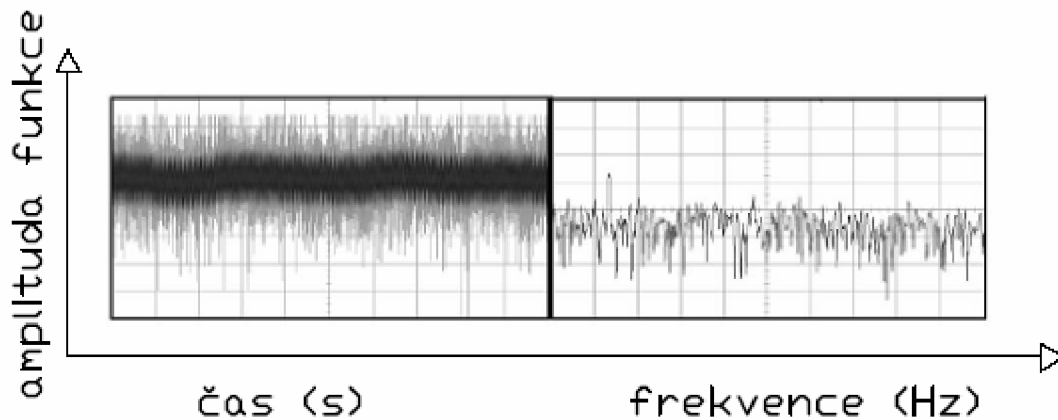
$$x(t) = F^{-1}\{X(\omega)\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} X(\omega) \exp(j\omega t) d\omega \quad (5.3.2)$$

6.4 Diskrétní Fourierova transformace

Definiční vztahy Fourierovy transformace vyžadují znalost matematického vyjádření signálu či spektra. Pokud však zpracováváme naměřené hodnoty, tj. známe vzorky signálu či spektra z konečného intervalu, stojíme před problémem, jak určit spektrum z vzorků signálu či signál ze vzorků spektra. K tomu účelu používáme numerické metody, která je známa jako diskrétní Fourierova transformace (DFT). Výsledkem výpočtu Fourierovi transformace ze vstupních dat, $x_i, i=0, 1, \dots, N-1$, jsou koeficienty, $F_k, k=0, 1, \dots, N-1$. Z definičních vztahů plyne vzájemná zastupitelnost přímé a zpětné DFT, tzv. symetrie, tj.:

$$x_i = \left(\sum_{k=0}^{N-1} \frac{1}{N} F_k^* \exp\left(-j \frac{2\pi}{N} ki\right) \right)^* = \left(F \left\{ \frac{1}{N} F^* \right\} \right)^*, \quad (5.4.1)$$

$$F_k = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} N x_i^* \exp\left(j \frac{2\pi}{N} k i\right) \right)^* = (F^{-1}\{N x_i^*\})^*, \quad (5.4.2)$$

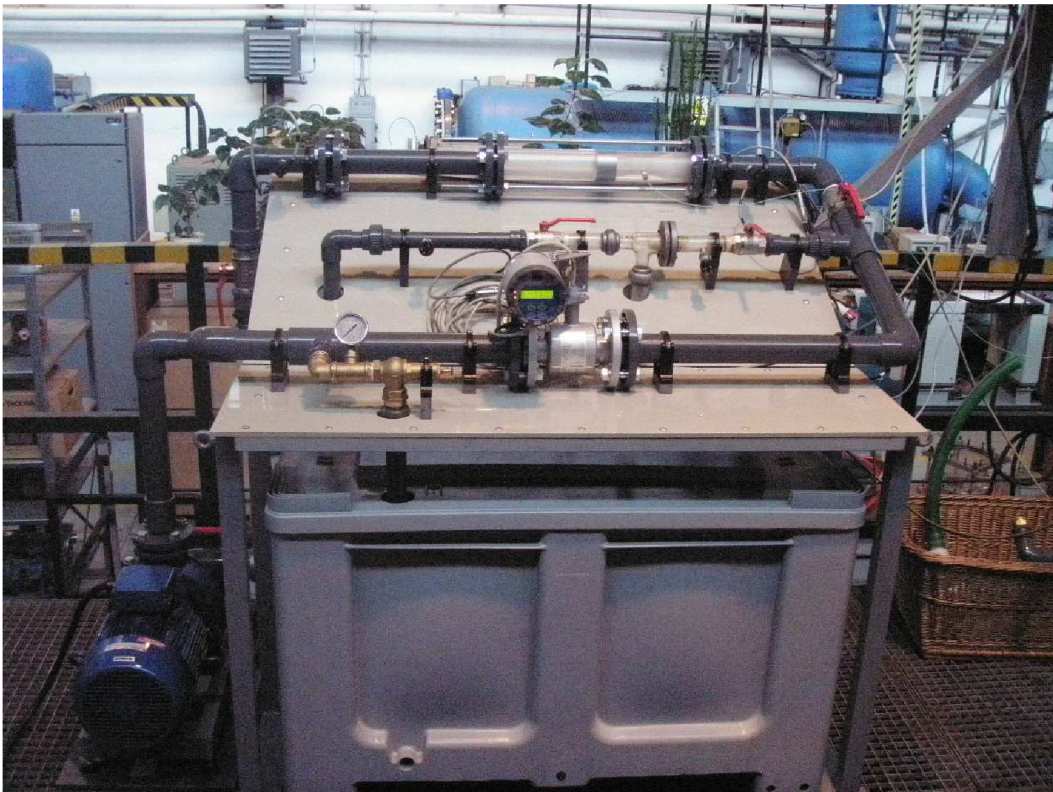


Obr. 6.4.1 – Ukázka chvění a její fourierova transformace.

7. Měření vysokofrekvenčních pulsací na trati s tryskou

7.1 Popis měření

Měření proběhlo v laboratořích VUT a to 29.4 2010. Základní uspořádání tratě bylo vyvedeno do PC, kde se v programu Labview 2009 nastaví postup pro měřené veličiny. Na této sestavené trati se měří průtok, snímá se tlak před a za zkušebním úsekem, dále teplota a vysokofrekvenční pulsace přímo v zkušebním vzorku a to v nejužším místě trysky. V podstatě se měří statické a dynamické hodnoty.



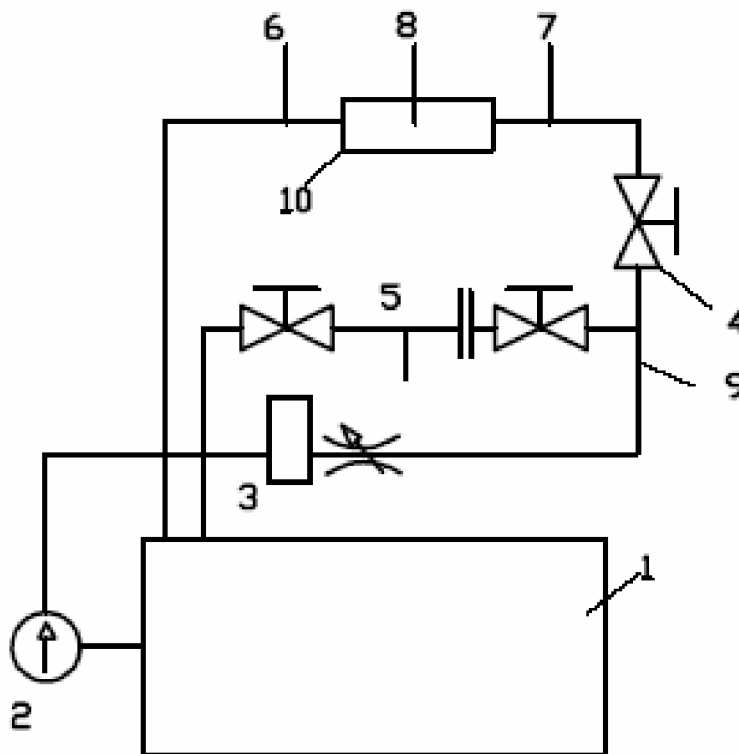
Obr. 7.1.1 – Sestavená trať.



Obr. 7.1.2 – Použité čerpadlo.

7.2 Trať a zapojení jednotlivých členů

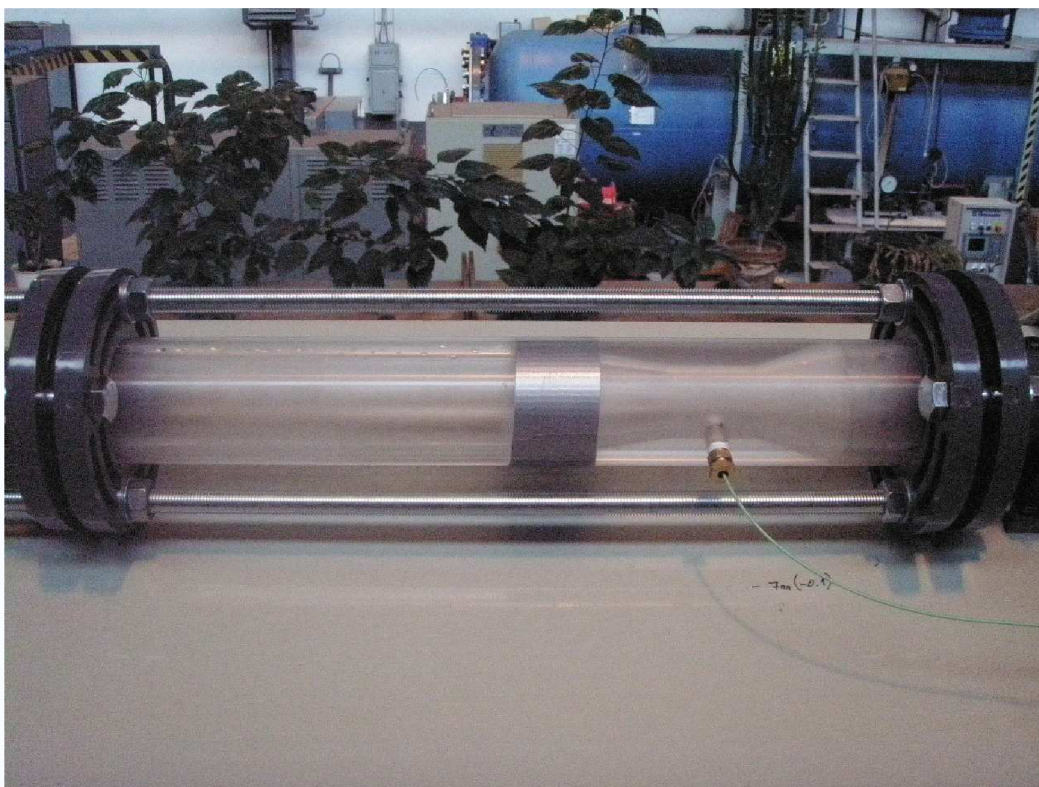
7.2.1 Schéma měřicí trati



- 1- nádrž s vodou
- 2- čerpadlo
- 3- měřič průtoku
- 4- ventil
- 5- obtok
- 6- odběr tlaku za zkušebním vzorkem
- 7- odběr tlaku před zkušebním vzorkem
- 8- vysokofrekvenční snímač
- 9- potrubí
- 10- zkušební vzorek

7.2.2 Použitá tryska

V tomto měření byla také použita tryska, která byla umístěna v trati. Tato tryska je rozměrově a tvarově odlišná a v tomto případě i navrtaná, aby se mohla tímto vrtem vyvést sonda na snímání vysokofrekvenčních pulsací. Tato tryska byla vyrobena ze dvou kusů a posléze spojena. Dvojdílný set byl nucen být zvolen, protože výrobně je tento komponent náročný. Tryska je umístěna v ochranné tubě.



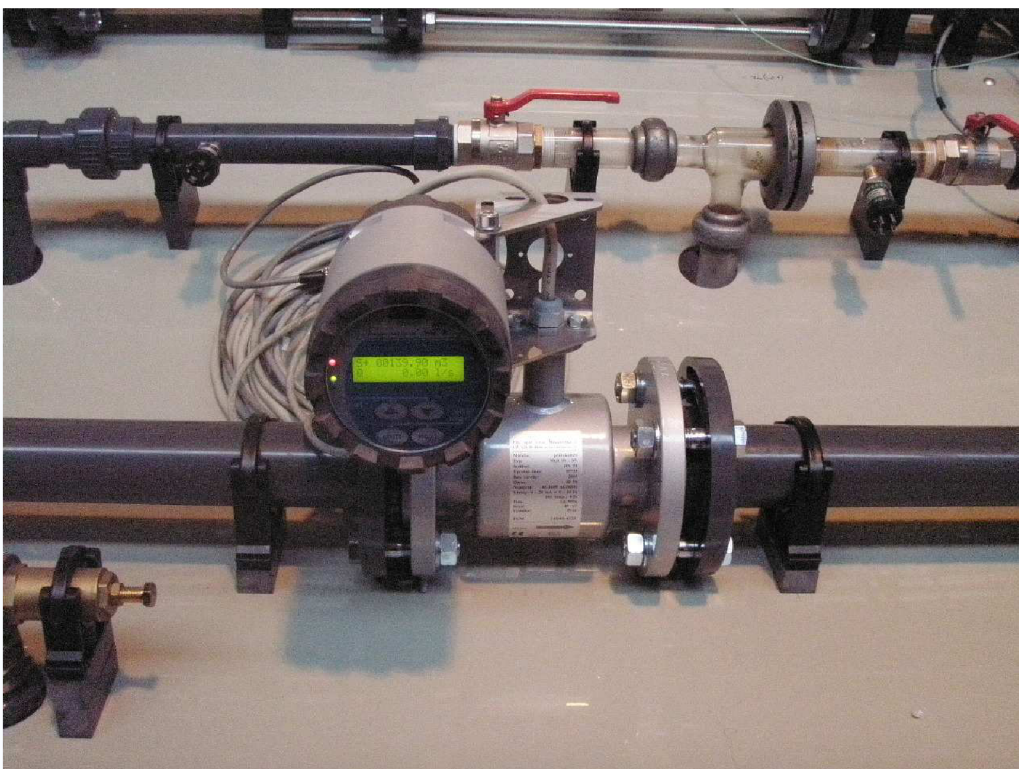
Obr. 7.2.2.1 – Zakomponovaná tryska.

7.2.3 Měřené veličiny

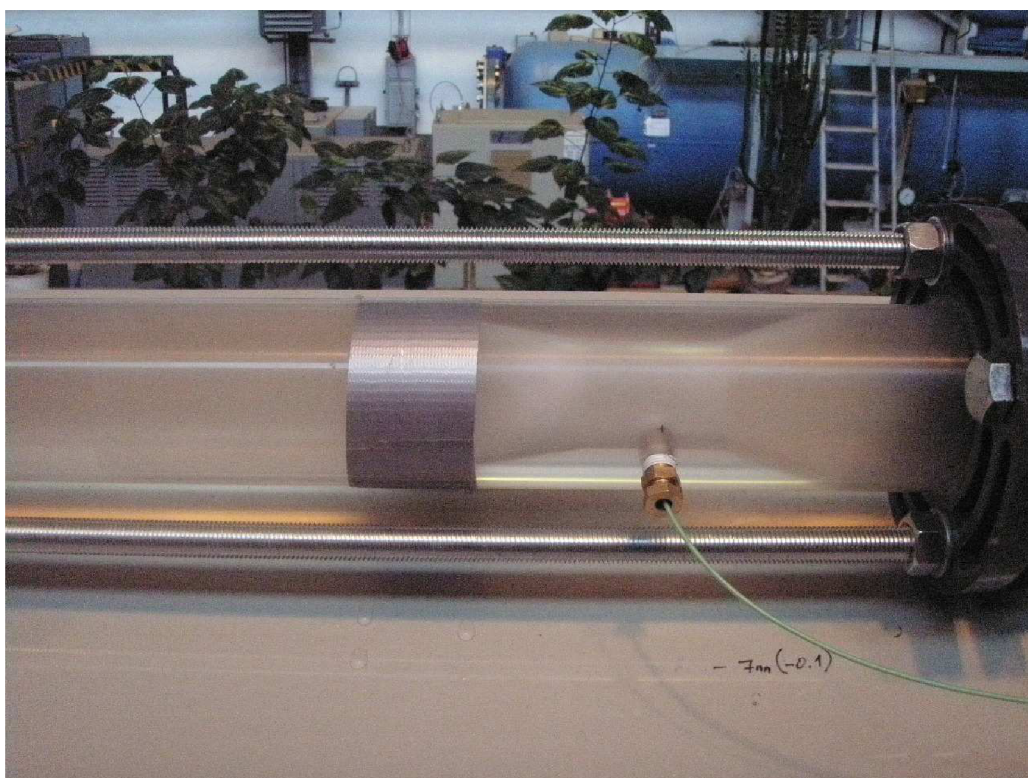
Při postupném měření na této trati se měřily statické veličiny a dynamické veličiny. Postupovalo se při postupném zvyšování průtoku až do maximální hodnoty, která je limitována možností čerpadla, respektive otáčkami. Začátek byl uveden na 5 l.s^{-1} a další krok byl odstupňován po litru. Po každém nastavení čerpadla na danou hodnotu průtoku a ustálení se data uložila. Maximum průtoku bylo 14.5 l.s^{-1} . Tryska začala kavitovat zhruba u průtoku 8 l.s^{-1} . Ovládání otáček čerpadla bylo regulováno dálkovým ovládáním, které vedlo k frekvenčnímu měniči.

- a) vstupní tlak p_1 ;
- b) výstupní tlak p_2 ;
- c) vstupní teplota T_1 ;
- d) objemový průtok;
- e) atmosférický tlak p_a ;

Při dynamickém měření se měřila tlaková amplituda v závislosti na čase, před samotným měřením se zvolil časový krok, v tomto případě je volen krok po 1 sekundě, kdy při tomto kroku se uloží 100000 hodnot. Po ustálení průtoku se uložily data. Průtok byl odstupňován po 1 l.s^{-1} .

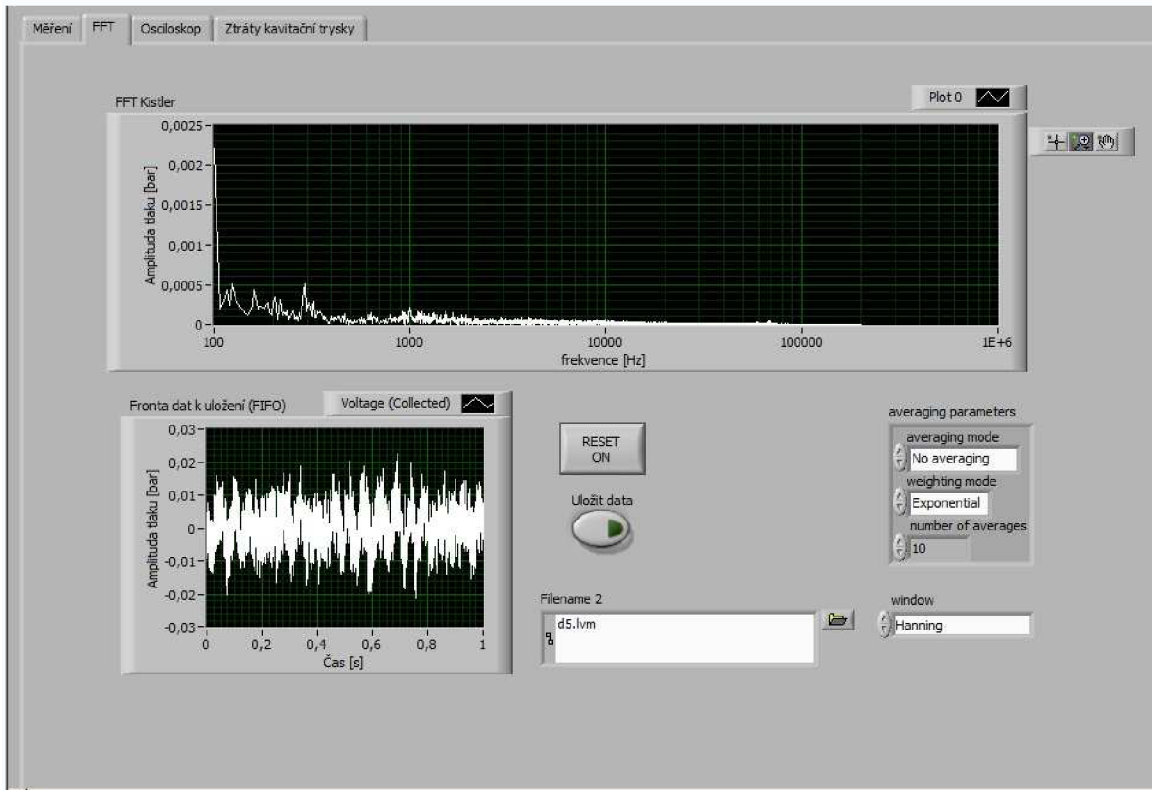


Obr. 7.2.3.1 – Zakomponovaný průtokoměr.

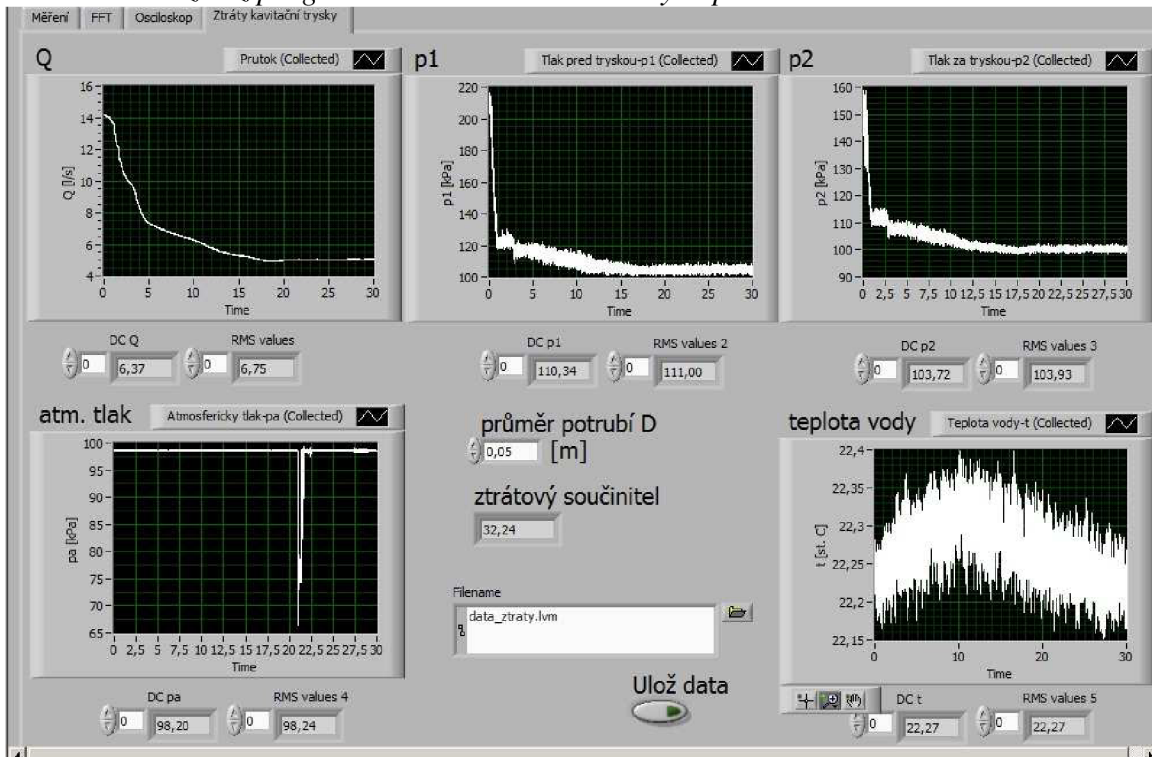


Obr. 7.2.3.2 – Zapojení snímače na vysokofrekvenční pulsace.

V průběhu měření byly vyvedeny měřidla do počítačové jednotky, ve které byl nainstalován program Labview 2009, po nastavení tohoto programu byly data uloženy.



7.2.3.3 – Ukázka z programu Labview 2009 tlakových pulsací.



7.2.3.3 – Ukázka z programu Labview 2009 statických hodnot.

7.2.4 Použitá měřicí technika

Venturiho trubice:

plastová trubice, která se skládá ze dvou částí a je zhruba v první třetině zúžená

Nádrž

Čerpadlo:

LOWARA, FHE – 40 – 200/75P, inv. Č. 1000185253

Snímač tlaku p_1 před tryskou - vstup:

Typ DMP 331, výrobce BD SENSORS s.r.o. Uh. Hradiště, měřicí rozsah 600 kPa (A), přesnost $\pm 0,25 \%$, proudový výstup 0 - 20 mA, výr. č. 114271197

Snímač tlaku p_2 za tryskou - výstup:

Typ DMP 331, výrobce BD SENSORS s.r.o. Uh. Hradiště, měřicí rozsah 250 kPa (A), přesnost $\pm 0,25 \%$, proudový výstup 0 - 20 mA, výr. č. 114271196

Snímač tlaku p_a – atmosféra:

Typ DMP 331, výrobce BD SENSORS s.r.o. Uh. Hradiště, měřicí rozsah 160 kPa (A), přesnost $\pm 0,25 \%$, proudový rozsah 0 – 20 mA, výr. č. 114961197

Indukční průtokoměr:

ELA Brno, typ MQCI 99 – C, DN50, měřicí rozsah 0 - 20 l·s⁻¹, přesnost $\pm 0,5\%$ z rozsahu, proudový výstup 4 – 20 mA, výr. č. A951222

Zdroj napětí:

Stejnoseměrný stabilizovaný zdroj TESLA BK 123, rozsah výstupního napětí 0 - 20 V, in. č. 3340202767

Měřicí počítač:

Měřicí počítač pro záznam a zpracování dat Intel Pentium DualCore E6300, 4GB RAM s měřicí kartou NI USB – 6216 a NI PCIe - 6351

Měřicí software:

Měření bylo prováděno s využitím vlastního měřicího programu podporovaného v prostředí LabVIEW 2009, licencovaného na VUT v Brně.

Frekvence vzorkování 400 kHz a 1 kHz, doba měření 0,4 a 30 sekund

Fyzikální vlastnosti vody:

Hustota $\rho = 1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

Kinematická viskozita $\nu = 1\cdot 10^{-6} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$

Vysokofrekvenční snímač:

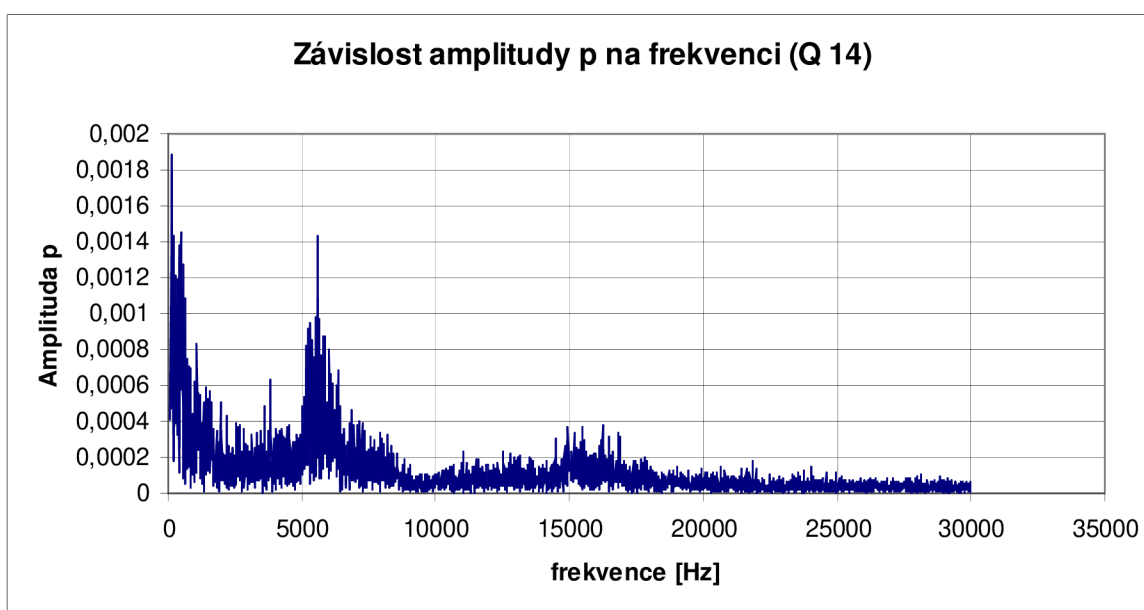
Kistler, výrobce Kistler s.r.o

7.3 Fourierova transformace amplitud tlaku

Amplitudy tlaku, které naměřil snímač byly v závislosti na čase. Cílem bylo, aby se tyto amplitudy transformovaly v závislost na frekvenci. Bylo využito programu Parametr, který hodnoty převedl, převedené hodnoty byly uloženy do textového souboru, se kterým se dále pracovalo. Pro každý průtok byl proveden tento přepočet.

7.3.1 Převedené hodnoty pomocí Fourierovy transformace

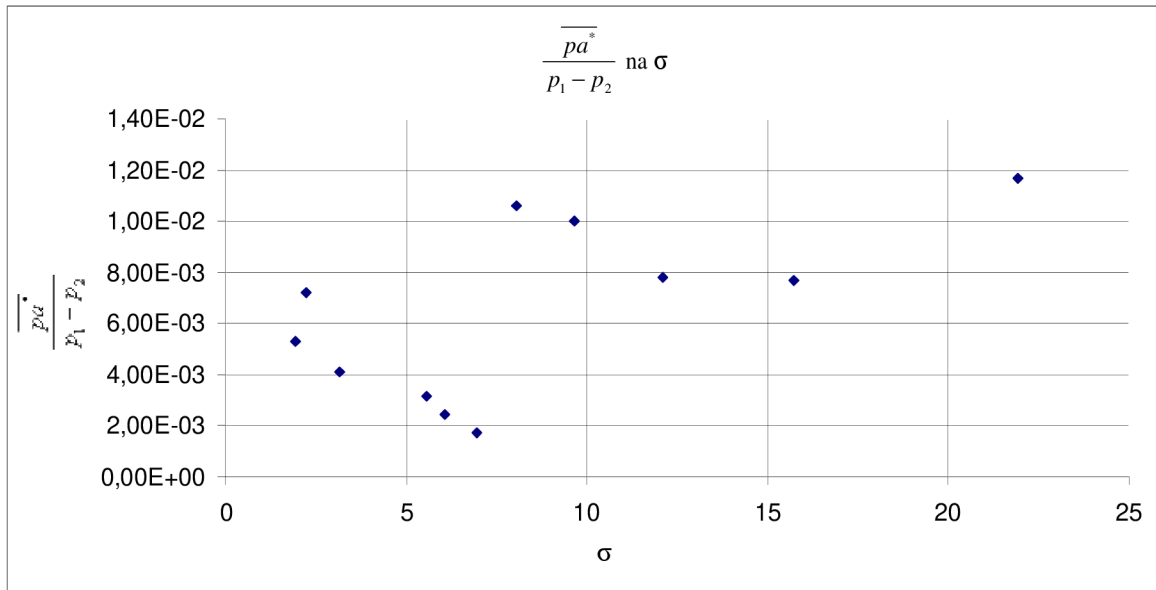
Měření je provedeno pro každý průtok, který je odstupňován po 1 litru. Z jednotlivých grafických závislostí lze vyhodnotit, kdy dojde ke kavitaci a jejímu nárůstu. Výchylka z grafu znázorňuje, kdy dochází k největšímu nárůstu tlaku a tudíž, kdy dojde ke kavitačnímu působení a to při jaké frekvenci.



7.3.1.1 – Dynamická charakteristika amplitud tlaku pro měření 1.

7.3.2 Vyhodnocení měření a stanovení vysokofrekvenčních pulsací

Byla provedena suma přes amplitudy tlaku a to v rozmezí od 5000 Hz do 18 000 Hz. Tato suma byla podělena rozdílem tlaků před a za tryskou. Tato hodnota byla uvedena v závislost na kavitačním součiniteli. Při tomto měření byla tato závislost ovlivněna vnějšími vlivy, proto z grafu není zcela jasné, kdy dochází k nárůstu tlaku a při jaké frekvenci.



7.3.2.1 – Závislost dynamické složky tlaku na kavitačním souč. pro měření 1.

7.4 Statické měření

7.4.1 Naměřené statické hodnoty

Statické vyvedené hodnoty, které byly naměřeny na trati je nutno vystředit, provést tzv. střední hodnotu a to pomocí programu Parametr. S těmito hodnotami se dále počítá. Zejména pro grafické závislosti jsou důležité kavitační součinitel a průtokový součinitel.

| teplota | pa | p ₁ | Q | p ₂ | ρ | Q | dp |
|---------|-------|----------------|----------------------|----------------|-----------------------|--------------------------------------|-------|
| [°C] | [kPa] | [kPa] | [l.s ⁻¹] | [kPa] | [kg.m ⁻³] | [m ³ .hod ⁻¹] | [bar] |
| 23,50 | 98,58 | 122,65 | 10,01 | 139,96 | 997,88 | 36,06 | 0,173 |
| 23,82 | 98,57 | 128,63 | 11,00 | 149,48 | 997,80 | 39,62 | 0,208 |
| 24,19 | 98,57 | 135,38 | 12,02 | 159,30 | 997,71 | 43,29 | 0,239 |
| 24,73 | 98,57 | 142,79 | 13,06 | 187,34 | 997,56 | 47,03 | 0,445 |
| 25,68 | 98,57 | 154,53 | 14,55 | 233,49 | 997,32 | 52,39 | 0,789 |
| 25,19 | 98,57 | 149,94 | 13,99 | 215,48 | 997,43 | 50,37 | 0,655 |
| 21,98 | 98,60 | 100,38 | 5,05 | 104,85 | 998,21 | 18,19 | 0,044 |
| 22,16 | 98,56 | 103,68 | 6,01 | 110,14 | 998,17 | 21,65 | 0,064 |
| 22,29 | 98,60 | 107,68 | 7,02 | 116,39 | 998,14 | 25,28 | 0,087 |
| 22,64 | 98,59 | 112,27 | 8,04 | 123,65 | 998,07 | 28,94 | 0,113 |
| 23,29 | 98,59 | 117,37 | 9,06 | 131,62 | 997,93 | 32,63 | 0,142 |

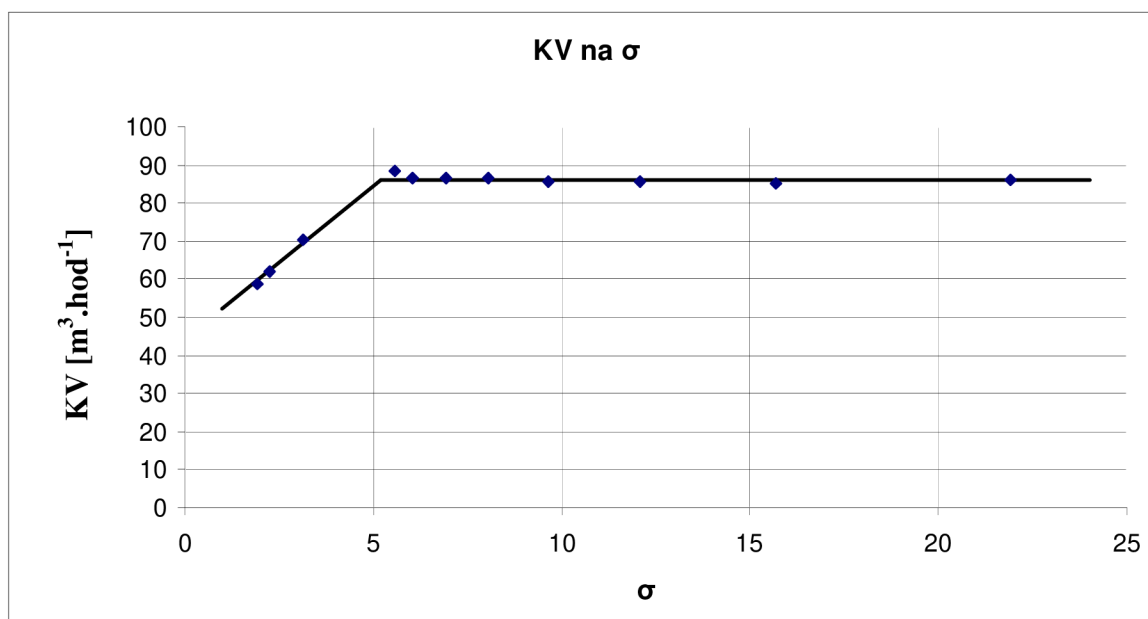
Tabulka č.4

7.4.2 Přepočtené statické hodnoty

| spa | sp ₂ | sQ | sp ₁ | σ | KV |
|-------|-----------------|----------------------|-----------------|-------|--------------------------------------|
| [kPa] | [kPa] | [l.s ⁻¹] | [kPa] | [-] | [m ³ .hod ⁻¹] |
| 0,013 | 1,809 | 0,010 | 3,21 | 6,95 | 86,70 |
| 0,013 | 2,141 | 0,013 | 3,43 | 6,05 | 86,78 |
| 0,013 | 3,336 | 0,028 | 3,25 | 5,56 | 88,51 |
| 0,013 | 5,895 | 0,028 | 3,80 | 3,15 | 70,46 |
| 0,013 | 10,542 | 0,027 | 5,05 | 1,92 | 58,96 |
| 0,013 | 9,217 | 0,641 | 4,66 | 2,25 | 62,22 |
| 0,013 | 0,585 | 0,003 | 1,19 | 21,90 | 85,99 |
| 0,734 | 0,928 | 0,009 | 2,47 | 15,70 | 85,24 |
| 0,013 | 1,128 | 0,007 | 1,99 | 12,09 | 85,69 |
| 0,089 | 1,273 | 0,009 | 2,17 | 9,65 | 85,78 |
| 0,013 | 1,586 | 0,009 | 2,62 | 8,07 | 86,43 |

Tabulka č.5

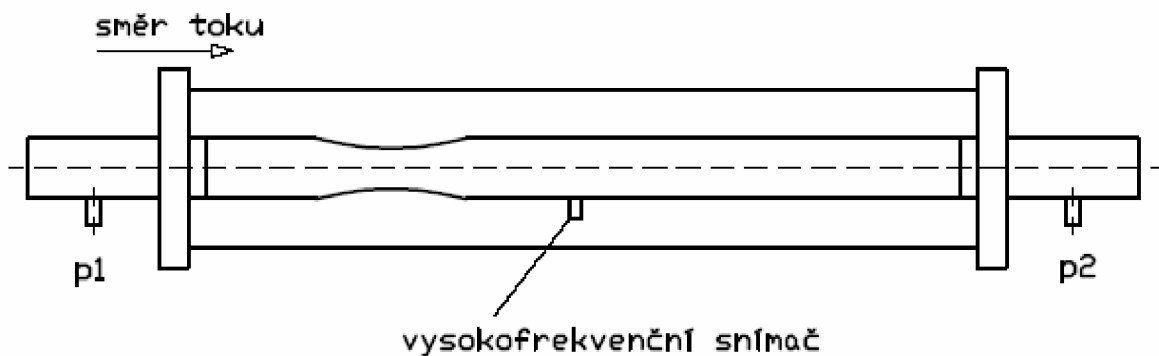
7.4.3 Vykreslení závislostí



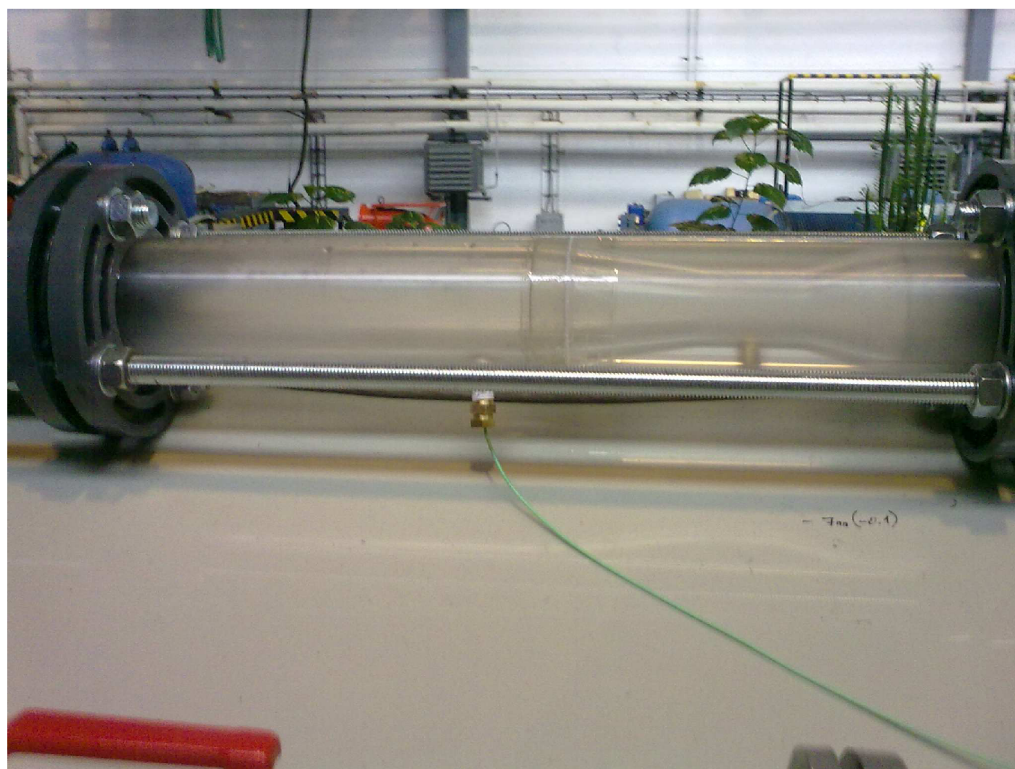
7.4.3.1 –Statická charakteristika na trysku pro měření 1.

8. Měření č.2 vysokofrekvenčních pulsací na trati s tryskou

U druhého měření, které se odehrálo na té samé trysce byl vysokofrekvenční snímač umístěn na trysce za nejužší místo. Měření proběhlo 5.5 2010, v laboratořích VUT. I v tomto případě se měřily statické i dynamické veličiny.



8.1-Schéma vysokofrekvenčního snímače.

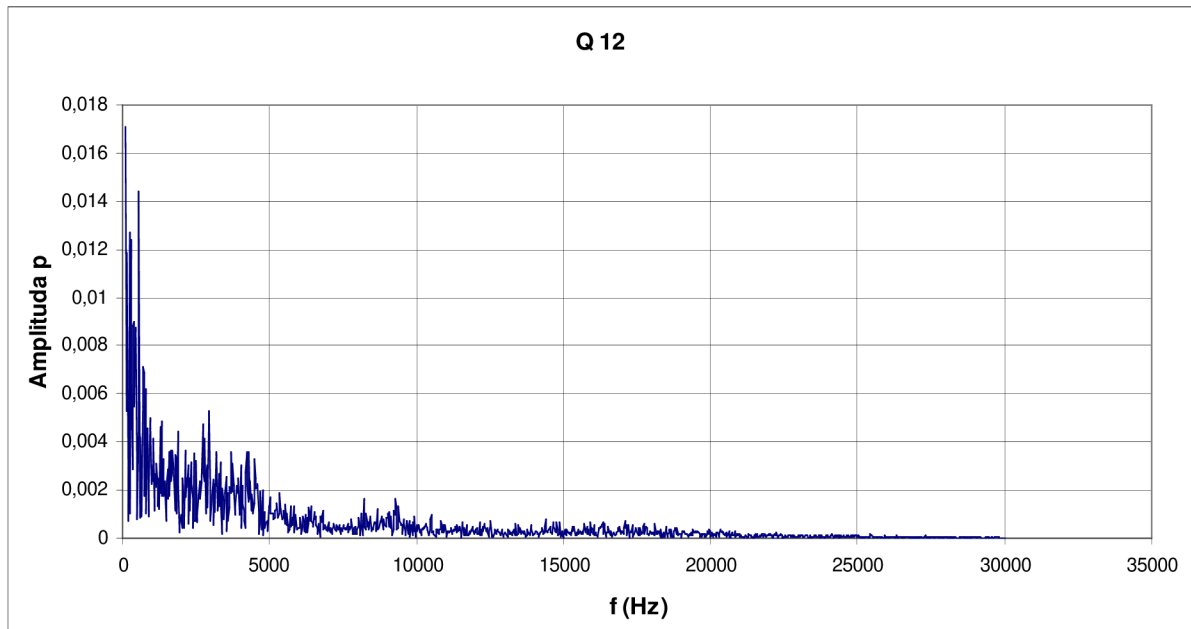


8.2-Zapojení a umístění vysokofrekvenčního snímače.

8.1 Fourierova transformace amplitud tlaku

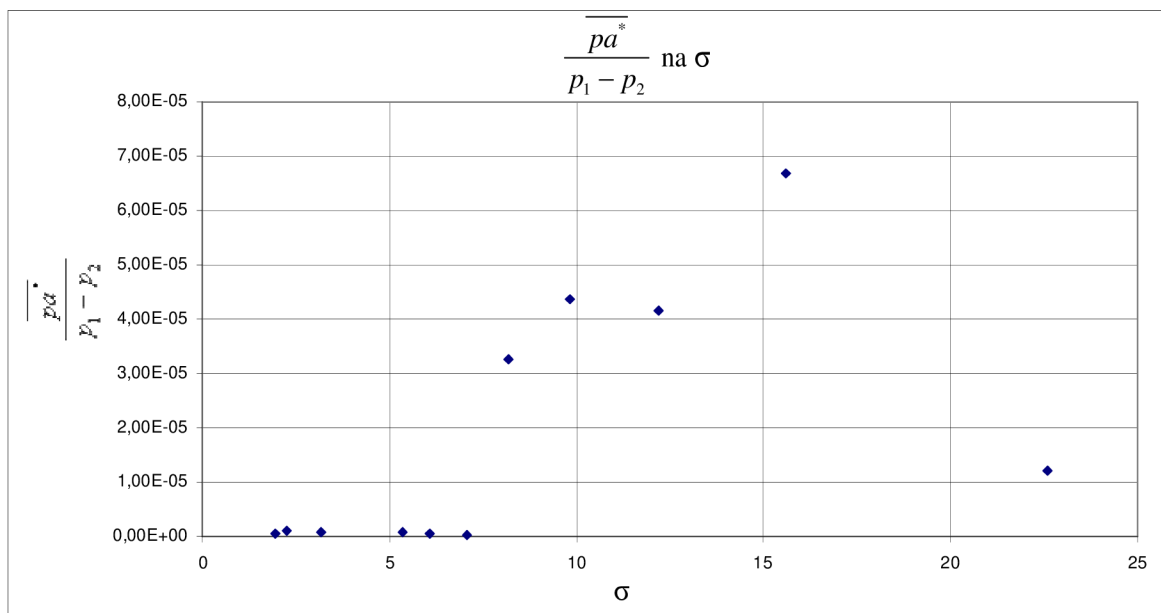
Měření proběhlo pro každý průtok, který byl odstupňován po litru. Přepočet se provedl přes program Parametr. Amplituda byla vyvedena v závislosti na frekvenci.

8.1.1 Převedené hodnoty pomocí Fourierovy transformace



8.1.1.1 – Dynamická charakteristika amplitud tlaku pro měření 2.

8.1.2 Vyhodnocení měření a stanovení vysokofrekvenčních pulsací



8.1.2.1 – Závislost dynamické složky tlaku na kavitačním souč. pro měření 2.

8.2 Statické měření

8.2.1 Naměřené statické hodnoty

| teplota | p_a | p_1 | Q | p_2 | ρ | Q | dp |
|---------|-------|--------|----------------------|--------|-----------------------|--------------------------------------|-------|
| [°C] | [kPa] | [kPa] | [l.s ⁻¹] | [kPa] | [kg.m ⁻³] | [m ³ .hod ⁻¹] | [bar] |
| 24,55 | 96,91 | 152,61 | 14,49 | 229,36 | 997,61 | 52,18 | 0,767 |
| 24,25 | 96,91 | 148,52 | 14,00 | 213,44 | 997,69 | 50,42 | 0,649 |
| 23,83 | 96,91 | 141,05 | 12,99 | 184,79 | 997,80 | 46,79 | 0,437 |
| 23,47 | 96,91 | 133,94 | 12,02 | 158,58 | 997,88 | 43,28 | 0,246 |
| 23,16 | 96,90 | 127,29 | 10,99 | 147,80 | 997,96 | 39,58 | 0,205 |
| 22,97 | 96,90 | 120,91 | 9,99 | 137,63 | 998,00 | 35,99 | 0,167 |
| 22,79 | 96,90 | 115,45 | 9,00 | 129,29 | 998,04 | 32,41 | 0,138 |
| 22,49 | 96,89 | 110,45 | 7,99 | 121,46 | 998,10 | 28,77 | 0,110 |
| 22,22 | 96,89 | 105,78 | 7,01 | 114,26 | 998,16 | 25,25 | 0,084 |
| 22,09 | 96,89 | 101,80 | 6,02 | 108,18 | 998,19 | 21,68 | 0,063 |
| 22,07 | 96,89 | 98,07 | 4,90 | 102,31 | 998,20 | 17,67 | 0,042 |

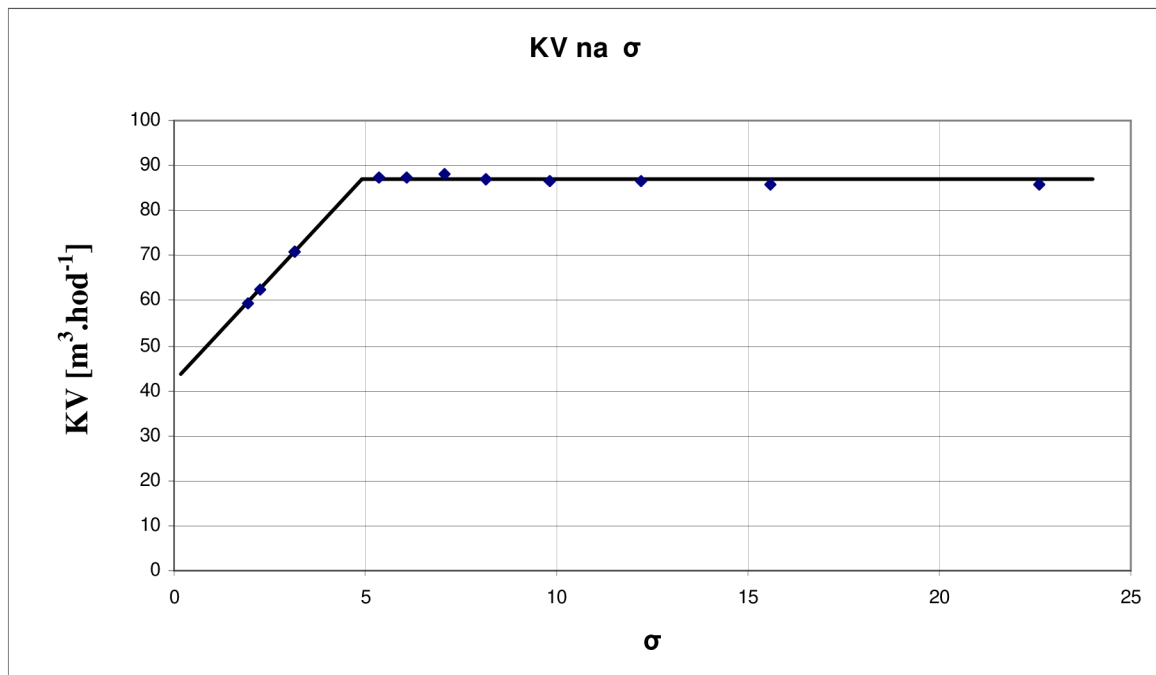
Tabulka č.6

8.2.2 Přepočtené statické hodnoty

| sp_a | sp_2 | sQ | sp_1 | σ | KV |
|--------|---------|----------------------|--------|----------|--------------------------------------|
| [kPa] | [kPa] | [l.s ⁻¹] | [kPa] | [-] | [m ³ .hod ⁻¹] |
| 0,0702 | 0,01352 | 7,809 | 0,065 | 1,95 | 59,56 |
| 0,0662 | 0,01356 | 7,328 | 0,065 | 2,25 | 62,58 |
| 0,0587 | 0,01353 | 6,668 | 0,064 | 3,17 | 70,74 |
| 0,0363 | 0,0135 | 4,179 | 0,050 | 5,34 | 87,19 |
| 0,0358 | 0,0134 | 5,369 | 0,111 | 6,09 | 87,40 |
| 0,0380 | 0,01351 | 4,054 | 0,045 | 7,08 | 88,02 |
| 0,0436 | 0,01357 | 2,413 | 0,056 | 8,16 | 87,09 |
| 0,0449 | 0,0136 | 2,109 | 0,037 | 9,81 | 86,67 |
| 0,037 | 0,01359 | 1,734 | 0,076 | 12,18 | 86,69 |
| 0,0235 | 0,01368 | 1,128 | 0,070 | 15,58 | 85,83 |
| 0,0229 | 0,01368 | 0,619 | 0,046 | 22,60 | 85,86 |

Tabulka č.7

8.2.3 Vykreslení závislosti



8.2.3.1 –*Statická charakteristika na trysku pro měření 2.*

9. Měření na ventilu

9.1 Trať a zapojení jednotlivých členů

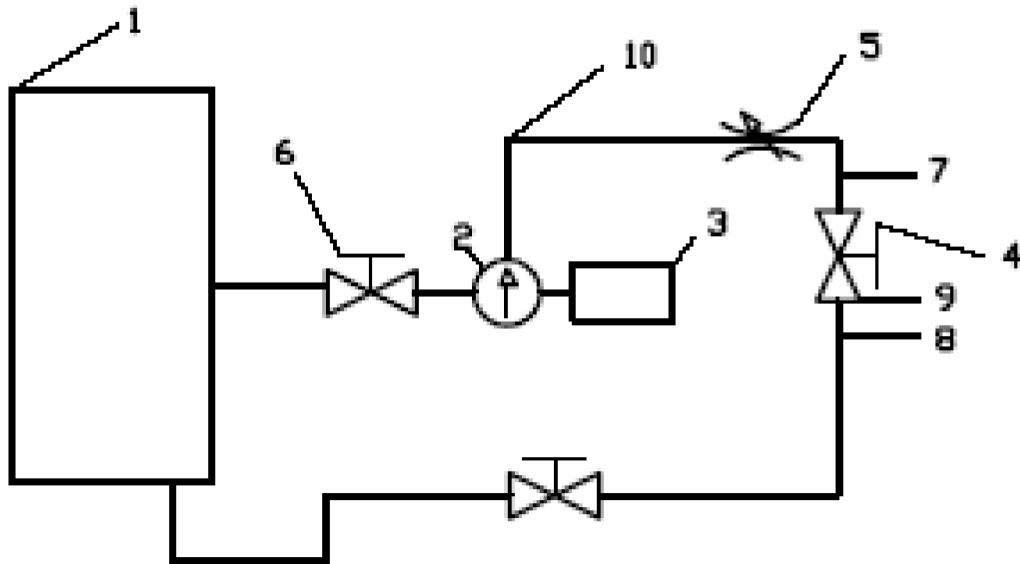


8.2.1.1 – Měřicí trať se zakomponovaným ventilem.

9.1.1 Popis měření

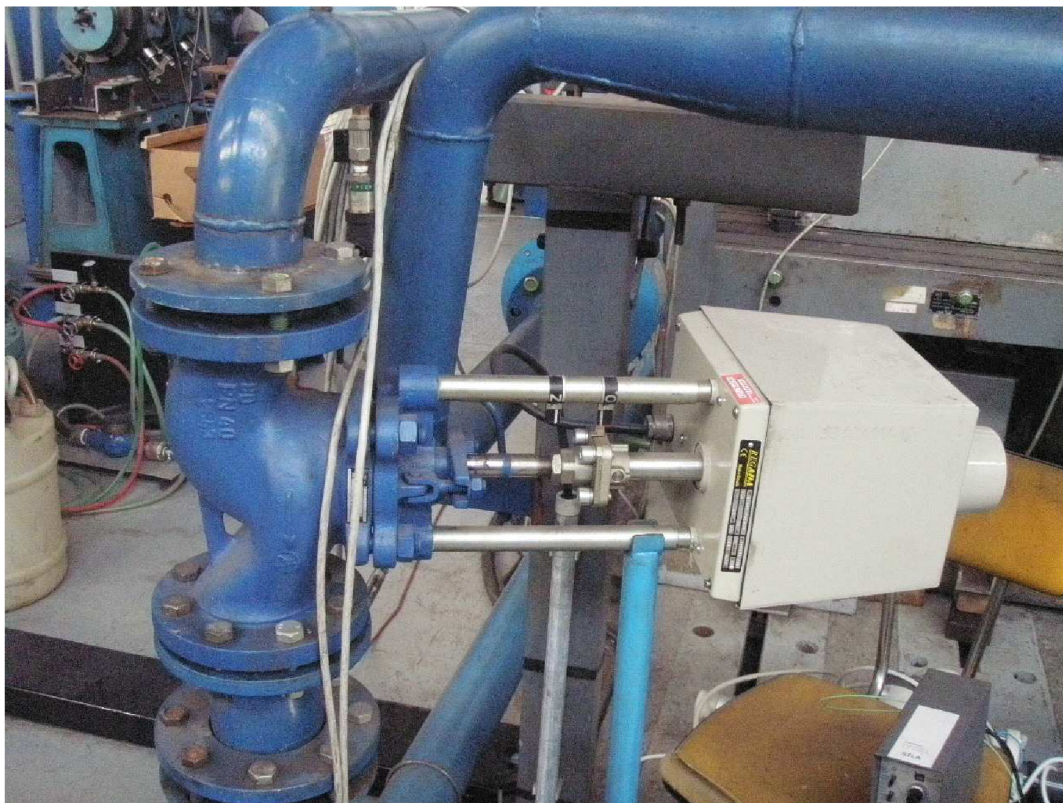
Měření proběhlo dne 7.10 v laboratořích VUT a to na trati, která byla připravena v těchto prostorech. Měřen byl ventil, na kterém byly měřeny tlaky a vysokofrekvenční pulsace. Průtokoměr byl zakomponován před měřeným ventilem. Ventil byl dálkově ovládán. Ovládání spočívalo v tom, že se postupně otevíral či uzavíral a tím se reguloval součinitel KV (průtokový součinitel) čili průtok. Všechny snímače byly vyvedeny do počítačové jednotky. V programu Labview se s těmito veličinami pracovalo. Čerpadlo se regulovalo změnami otáček a to vedlo k nárůstu či poklesu dp (tlakové diference). Měření spočívalo v tom, že se nastavilo určité KV a dp, které během měření bylo konstantní a zvyšováním nebo snižováním tlaku se sledovalo, kdy dojde ke kritickému stržení kavitačního součinitele. Po nastavení tlaku p_2 (tlak za ventilem) a to pomocí tlaku vzduchu od kompresoru se postupně tento tlak snižoval po určitém kroku a pokaždé tyto hodnoty byly uloženy pokud nenastal zmíněný pokles kavitačního součinitele.

9.1.2 Schéma měřicí tratě s ventilem



- 1- sací koš
- 2- čerpadlo
- 3- dynamometr
- 4- měřený ventil
- 5- průtokoměr
- 6- ventil
- 7- odběr tlaku před zkušebním vzorkem
- 8- odběr tlaku za zkušebním vzorkem
- 9- snímač vysokofrekvenčních pulsací
- 10- potrubí

9.1.3 Měřený ventil



9.1.3.1 –Umístění ventilu a jeho snímačů.



9.1.3.2 –Ovládání čerpadla.

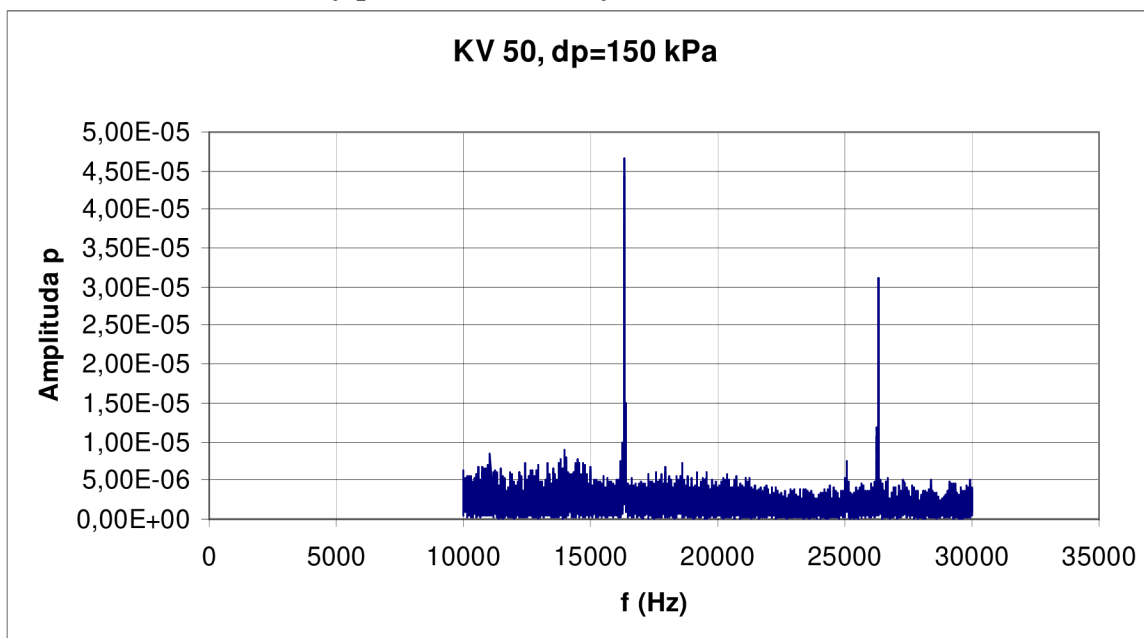
9.1.4 Použitá měřící technika

Při tomto měření byla použita stejná měřící technika jako u předešlého měření na trysce. Bylo však použito jiné čerpadlo a to BETA 14. Médium bylo vedeno kovovým potrubím.

9.2 Fourierova transformace amplitud tlaku

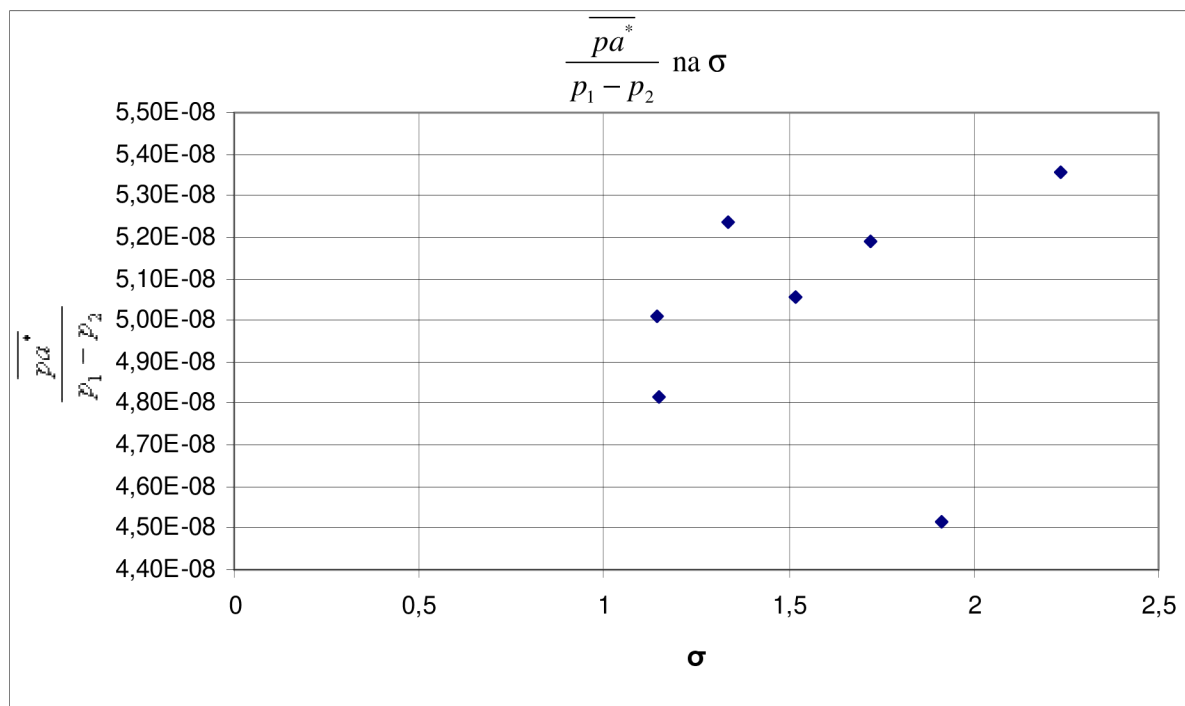
Pro toto měření se pomocí otevírání či zavírání nastavil průtokový součinitel, v tomto případě bylo $K_v=50 \text{ m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$ a $\Delta p=150 \text{ kPa}$, tyto hodnoty byly po čas měření konstantní. Postupně se snižoval tlak p_2 . Snižovalo se po určitém kroku až do okamžiku až by došlo ke stržení Thomava kavitačního součinitele. Což v tomto případě měření nenastalo. V každém kroku se data uloží. Pomocí programu Parametr se amplitudy tlaku převedou ze závislosti na čase na závislost na frekvenci.

9.2.1 Převedené hodnoty pomocí Fourierovy transformace



9.2.1.1 –Závislost amplitud tlaku na frekvenci pro stav tlaku $p_2=80 \text{ kPa}$.

9.2.2 Vyhodnocení měření a stanovení vysokofrekvenčních pulsací



9.2.2.1-Závislost dynamické složky tlaku na kavitačním souč. pro měření na ventilu.

Měření na ventilu bylo zřejmě ovlivněno vnějšími vlivy nebo došlo k nevhodnému sestavení tratě, kdy umístěný ventil nekavitoval v daných podmínkách. Proto tyto závislosti jsou nepřesné. Vykreslené závislosti byly vynášena stejně jako u předešlé trysky.

9.3 Statické měření

9.3.1 Naměřené statické hodnoty

| p_1 [kPa] | Q [l.s ⁻¹] | p_2 [kPa] | Q [m ³ .hod ⁻¹] | dp [bar] |
|----------------|-----------------------------|----------------|---|---------------|
| 100,57 | 16,96 | 248,84 | 61,06 | 1,4827 |
| 120,44 | 17,04 | 269,85 | 61,35 | 1,4941 |
| 140,32 | 17,06 | 289,97 | 61,44 | 1,4964 |
| 160,43 | 17,06 | 309,93 | 61,42 | 1,4949 |
| 180,35 | 17,06 | 329,79 | 61,44 | 1,4943 |
| 200,02 | 17,05 | 349,49 | 61,40 | 1,4946 |
| 219,55 | 17,06 | 369,07 | 61,43 | 1,4951 |
| 66,70 | 16,98 | 216,14 | 61,14 | 1,4944 |
| 80,37 | 16,78 | 226,32 | 60,43 | 1,4594 |

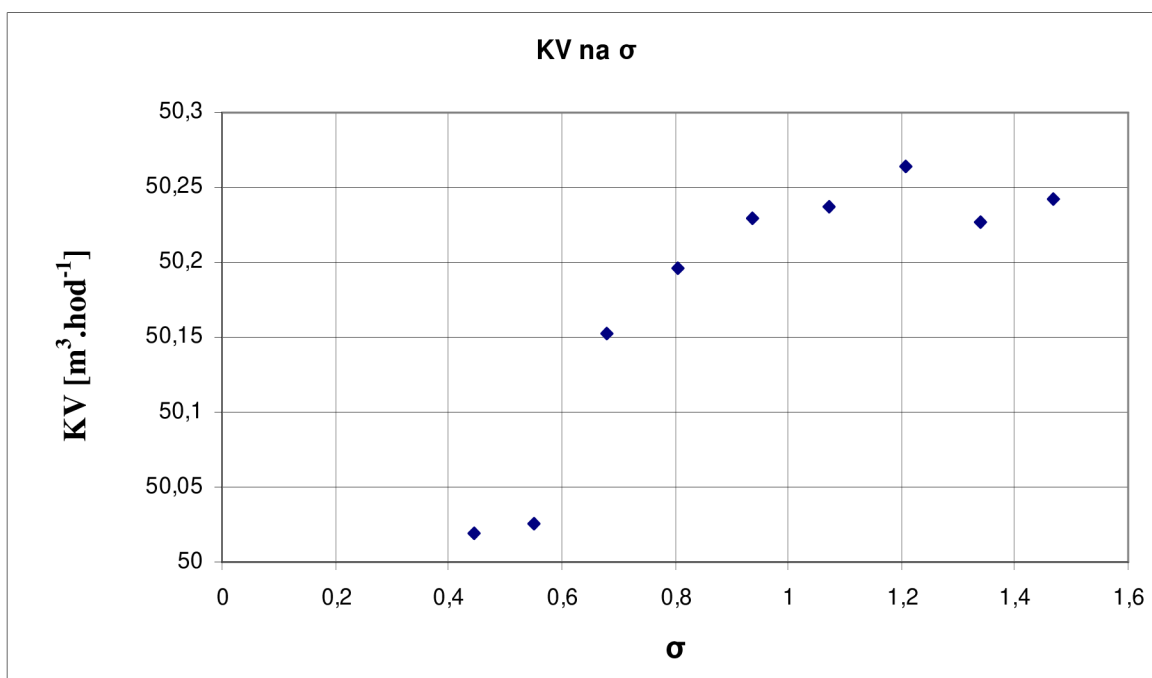
Tabulka č.8

9.3.2 Přepočtené statické hodnoty

| sp_2 [kPa] | sQ [l.s ⁻¹] | sp_1 [kPa] | σ [-] | KV [m ³ .hod ⁻¹] |
|-----------------|------------------------------|-----------------|-----------------|--|
| 1,643 | 0,0071 | 2,209 | 0,678 | 50,152 |
| 1,162 | 0,0113 | 1,767 | 0,806 | 50,196 |
| 0,939 | 0,0094 | 1,341 | 0,937 | 50,229 |
| 0,884 | 0,0071 | 1,188 | 1,073 | 50,237 |
| 0,794 | 0,0068 | 1,072 | 1,206 | 50,264 |
| 0,854 | 0,0090 | 1,138 | 1,338 | 50,226 |
| 0,855 | 0,0092 | 1,029 | 1,468 | 50,242 |
| 1,407 | 0,0073 | 0,609 | 0,446 | 50,018 |
| 0,957 | 0,0071 | 0,636 | 0,550 | 50,025 |

Tabulka č.9

9.3.3 Vykreslení závislostí



9.3.3.1 –Statická charakteristika pro měření na ventilu.

Z charakteristiky je zřejmé, že nedojde ke stržení křivky, tudíž ventil se nedostane do stavu, kdy kavituje. To jen utvrzuje o nepřesnostech měření a nevhodného zvolení umístění ventilu. Statické měření se provádělo také jako u dynamického pro KV=50 m³.hod⁻¹ a dp=150 kPa.

10. Závěr

V rámci této diplomové práce byly provedeny celkem tři měření na trysce, z toho u prvního případu byly poskytnuty pouze data ke zpracování. U dalších dvou se již měřilo regulérně. V posledním čtvrtém měření se proměřil ventil. Pro všechny tyto případy byly sestaveny tratě, na kterých se naměřily data. U prvního měření nebyl do tratě zapojen vysokofrekvenční snímač a proto se zpracovala pouze statická část. U dalších třech naměření (dvě na trysce a jedno na ventilu) byl tento snímač již umístěn do tratě. Tyto dynamická data (amplitudy tlaku) se dále vyhodnocovaly.

Amplitudy tlaku, které udával snímač byly závislé na čase, bylo potřeba tyto amplitudy převést na závislost na frekvenci. K tomuto převodu se využilo Fourierovci transformace, kterou využívá program Parametr. Cílem bylo, aby se v grafické závislosti ukázalo, kdy dojde k výraznému amplitudovému skoku a to při jaké frekvenci, bylo by pak názorné při jakých vysokofrekvenčních pulzacích dochází ke kavitaci.

Z měření na trysce bylo už ze statického vyhodnocení průkazné, že tryska kavituje, jelikož došlo ke stržení Thomova kavitačního součinitele, navíc to bylo zřejmé i s vizuálního pozorování. Pro každý průtok byla provedena závislost amplitudy tlaku na frekvenci. Dále se provedla suma přes amplitudy tlaku od frekvence 5000 Hz do 18000 Hz a tato suma se podělila rozdílem tlaků před a za tryskou, ve výsledku se uvedla v závislost na Thomově kavitačním součiniteli.

Pro měření na ventilu bylo využito dálkového ovládání, kterým se ventil reguloval (otevíral a zavíral). Touto regulací se měnil průtokový součinitel, který se po dobu měření držel na konstantní úrovni. Otáčkami čerpadla se měnila tlaková diference, která také musela být konstantní. Zvyšováním a snižováním tlaku přísávaného vzduchu se měnil tlak p_2 . Při postupné snižování p_2 se proměřovalo. Už ze statické závislosti bylo zřejmé, že na ventilu nedocházelo ke kavitaci a proto i dynamické vyhodnocení nebylo uspokojivé, jelikož nešlo uvést vysokofrekvenční pulzace vyvolané kavitací v závislost na amplitudě tlaku.

Proměření ventilu nedospělo k uspokojivému výsledku, ve studii bude potřeba v budoucnu pokračovat a dále ji rozvíjet. Umístění ventilu do tratě nebylo ideální, protože ventil byl umístěn za koleno a za ventilem nedocházelo k potřebnému poklesu tlaku, který je spjat s kavitací. V navazujícím měření by se měl ventil umístit blíže k sacímu koši, což by mělo vést ke zdárnějším výsledkům.

11. Seznam použitých zdrojů

- [1] NOSKIEVIČ, Jaromír, et al. Kavítace v hydraulických strojích a zařízeních. Praha : STNL, 1990. 330 s.
- [2] ČSN EN 60534-2-3 (IEC 60534-2-3:1997): Regulační armatury pro průmyslové procesy – Část 2-3: Průtok – Zkušební postupy. (13 4523).
- [3] TŮMA, Jiří. Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT. Praha : Sdělovací technika, 1997. 174 s. ISBN 80-901936-1-7.
- [4] FLEK, Ondřej. www.odbornecasopisy.cz [online]. 1. vydání. Praha : Výzkumné středisko Rockwell Automation, 2004 [cit. 2010-10-15]. [Http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=32626](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=32626). Dostupné z WWW: <www.odbornecasopisy.cz>.
- [5] www.wikipedia.org [online]. 2005 [cit. 2010-10-15]. [Http://cs.wikipedia.org/wiki/Směrodatná_odchylka](http://cs.wikipedia.org/wiki/Směrodatná_odchylka). Dostupné z WWW: <wikipedia.org>.
- [6] CHALOUPKA, Dušan; BENEŠ, Jiří. www.allforpower.cz [online]. 2009 [cit. 2010-10-15]. [Http://www.allforpower.cz/clanek/kavitace-regulacnich-ventilu-vyhodnoceni-poskozeni/](http://www.allforpower.cz/clanek/kavitace-regulacnich-ventilu-vyhodnoceni-poskozeni/). Dostupné z WWW: <allforpower.cz>.
- [7] URONE, Paul ; C. ROSSE, Richard . www.pubs.acs.org [online]. 1979 [cit. 2010-10-15]. [Http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es60151a016](http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es60151a016). Dostupné z WWW: <www.pubs.acs.org>.

12. Seznam použitých symbolů

| | | |
|------------|--------------------------------------|---|
| r_B | [m] | poloměr kulové bubliny |
| p_v | [Pa] | tlak plynu (syté páry) |
| p_w | [Pa] | tlak nasycených par |
| p_k | [Pa] | tlak v kapalině obklopující bublinu |
| σ | [Pa] | povrchové napětí |
| p_∞ | [Pa] | konstantní tlak |
| ρ_K | [kg.m ⁻³] | hustota kapaliny |
| r_∞ | [m] | konstantní poloměr bubliny |
| r_{kr} | [m] | kritický poloměr bubliny |
| v_B | [m.s ⁻¹] | rychlost na rozhraní dutiny s kapalinou |
| τ | [s] | celková implozí doba bubliny |
| p_{max} | [Pa] | tlak vyvinutý na konci imploze |
| p_2 | [Pa] | tlak za armaturou |
| p_{min} | [Pa] | minimální tlak |
| p_1 | [Pa] | tlak před armaturou |
| χ | [-] | konstanta |
| K_v | [m ³ .hod ⁻¹] | průtokový součinitel |
| Q | [m ³ .hod ⁻¹] | měřený průtok |
| N_1 | [-] | konstanta |
| Δp | [kPa] | měřená tlaková diference |
| ρ | [kg.m ⁻³] | hustota kapalin |
| ρ_0 | [kg.m ⁻³] | hustota vody |
| σ_p | [-] | Thomův kavitační součinitel |
| σ | [-] | směrodatná odchylka |
| X | [-] | náhodná veličina |
| $D(X)$ | [-] | rozptyl náhodné veličiny |
| $E(X)$ | [-] | střední hodnota |
| \bar{X} | [-] | aritmetický průměr hodnot |

| | | |
|-----------------|----------------------|--|
| s | [-] | výběrová směrodatná odchylka |
| sp ₁ | [kPa] | směrodatná odchylka tlaku před armaturou |
| sp ₂ | [kPa] | směrodatná odchylka tlaku za armaturou |
| sQ | [l.s ⁻¹] | směrodatná odchylka průtoku |
| spa | [kPa] | směrodatná odchylka atmosférického tlaku |
| p ₃ | [kPa] | amplituda tlaku z vysokofrekvenčního snímače |



13. Seznam příloh

Příloha č.1-tabulka s hodnotami tlaku nasycených par

Tlak nasycených par vody a absolutní vlhkost

| t [°C] | p [kPa] | Fmax [g/m ³] | t [°C] | p [kPa] | Fmax [g/m ³] |
|--------|---------|--------------------------|--------|---------|--------------------------|
| -10 | 0,26 | 2,14 | 20 | 2,34 | 17,291 |
| -9 | 0,28 | 2,33 | 21 | 2,49 | 18,330 |
| -8 | 0,31 | 2,54 | 22 | 2,64 | 19,422 |
| -7 | 0,34 | 2,76 | 23 | 2,81 | 20,570 |
| -6 | 0,37 | 2,99 | 24 | 2,98 | 21,776 |
| -5 | 0,40 | 3,24 | 25 | 3,17 | 23,042 |
| -5 | 0,40 | 3,24 | 26 | 3,36 | 24,372 |
| -4 | 0,44 | 3,51 | 27 | 3,56 | 25,766 |
| -3 | 0,48 | 3,81 | 28 | 3,78 | 27,229 |
| -2 | 0,52 | 4,13 | 29 | 4,00 | 28,762 |
| -1 | 0,56 | 4,47 | 30 | 4,24 | 30,368 |
| 0 | 0,61 | 4,847 | 31 | 4,49 | 32,052 |
| 1 | 0,66 | 5,192 | 32 | 4,75 | 33,816 |
| 2 | 0,71 | 5,558 | 33 | 5,03 | 35,661 |
| 3 | 0,76 | 5,947 | 34 | 5,32 | 37,591 |
| 4 | 0,81 | 6,359 | 35 | 5,62 | 39,610 |
| 5 | 0,87 | 6,795 | 36 | 5,94 | 41,722 |
| 6 | 0,93 | 7,259 | 37 | 6,27 | 43,929 |
| 7 | 1,00 | 7,748 | 38 | 6,62 | 46,234 |
| 8 | 1,07 | 8,268 | 39 | 6,99 | 48,643 |
| 9 | 1,15 | 8,817 | 40 | 7,37 | 51,156 |
| 10 | 1,23 | 9,397 | 41 | 7,78 | 53,781 |
| 11 | 1,31 | 10,010 | 42 | 8,20 | 56,516 |
| 12 | 1,40 | 10,658 | 43 | 8,64 | 59,372 |
| 13 | 1,50 | 11,342 | 44 | 9,10 | 62,348 |
| 14 | 1,60 | 12,064 | 45 | 9,58 | 65,454 |
| 15 | 1,70 | 12,825 | 46 | 10,09 | 68,686 |
| 16 | 1,82 | 13,647 | 47 | 10,61 | 72,051 |
| 17 | 1,94 | 14,475 | 48 | 11,16 | 75,552 |
| 18 | 2,06 | 15,366 | 49 | 11,74 | 79,202 |
| 19 | 2,20 | 16,302 | 50 | 12,34 | 83,001 |