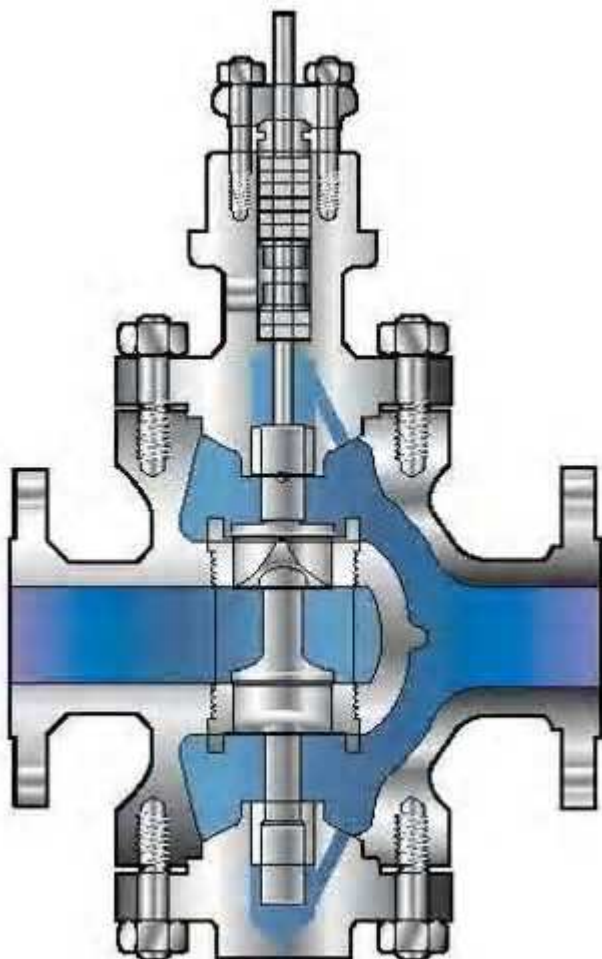


Obsah

1. Úvod

Cílem této diplomové práce je stanovení závislosti mezi změnou průtočnosti kavitujícího ventilu a vysokofrekvenčními pulsacemi tlaku. Pro objasnění dané problematiky je nutno vytvořit postup měření kavitace na ventilu z poklesu průtočnosti a z vysokofrekvenčních pulsací tlaku, 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 pulsacemi tlaku při postupném uzavírání a otevírání ventilu.



Obr. 1.1 - Proudění tekutiny ve ventilu []

Pro pochopení dané problematiky je potřeba si definovat řadu pojmů, jako jsou pulsace, 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 pulsací je možno využít v praxi např. v lékařství, vodohospodářství atd.

2.Kavitace

2.1 Kavitace jako pojem

Slovo kavitace 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 kavitace), případně průchodu intenzivní akustické vlny v periodách zředění (akustická kavitace). Kavitace je zpočátku vyplněna vakuem, později do ní mohou difundovat plyny z okolní kapaliny. Při vymizení podtlaku, který kavitaci vytvořil její bublina kolabuje za vzniku rázové vlny s destruktivním účinkem na okolní materiál. Kavitace 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.).

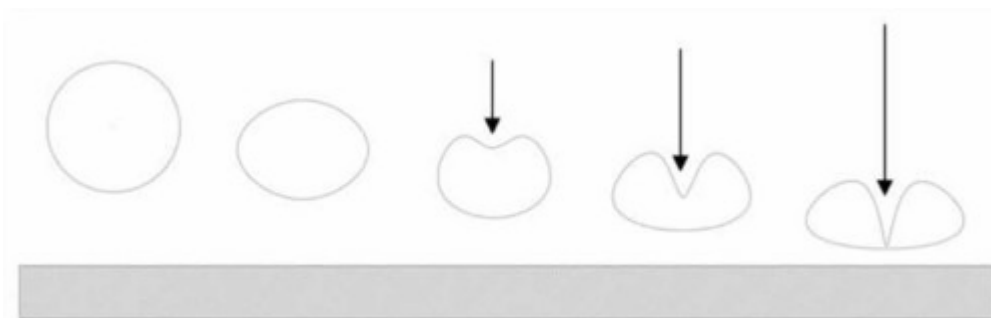
Kavitační působení způsobuje hluk, což v některých provozech způsobuje nemalý problém, daleko větší potíž je, že snižuje účinnost strojů a může způsobit i jejich mechanické poškození, které může vést ke zničení stroje či k jeho odstavení.

Na vznik kavitace má vliv především velikost podtlaku, soudržnost kapaliny (povrchové napětí) kapaliny a teplota. Teplota ovlivňuje vznik kavitace, čím je nižší, tím menší je kavitace.[]



Obr. 2.1.1 - Typický vhled povrchu, na který působí kavitace.[]

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.[]



Obr. 2.1.2 - Asymetricky kolabující parní bubliny[]

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[]

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 10^4 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 částčky dobře skučivé kapalinou nesnižují mez pevnosti kapaliny, pokud fázové rozhraní mezi kapalinou a pevnou částčkou 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 částčkách 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 (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

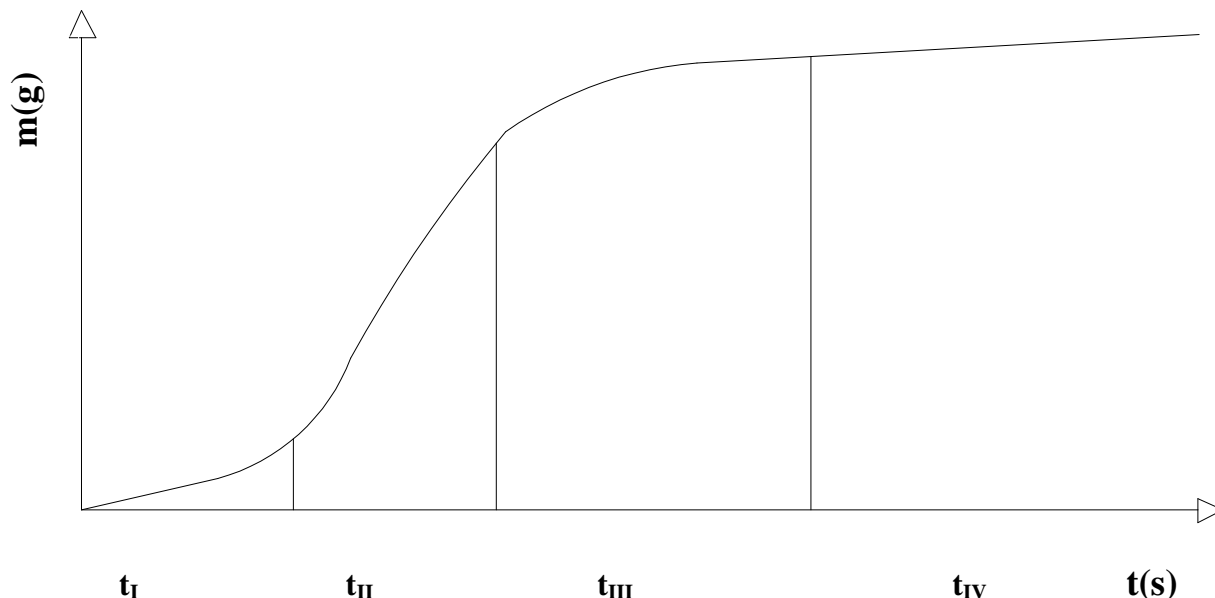
$$\tau = 0,9146 \cdot r_{B0} \cdot \left(\frac{\rho_k}{p_\infty} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.2.2.6)$$

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 explodovala. Přitom menší jádra k tomu potřebují delší čas. V blízkosti obtékané stěny vznikala kavitace asi uprostřed mezní vrstvy, a to při tlaku vyšším než bylo 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

Přemisťuje-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 doprovodným 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. Tento proces je velice rychlý a proto může dojít i k ulomení části součástky a k havárii stroje.

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.

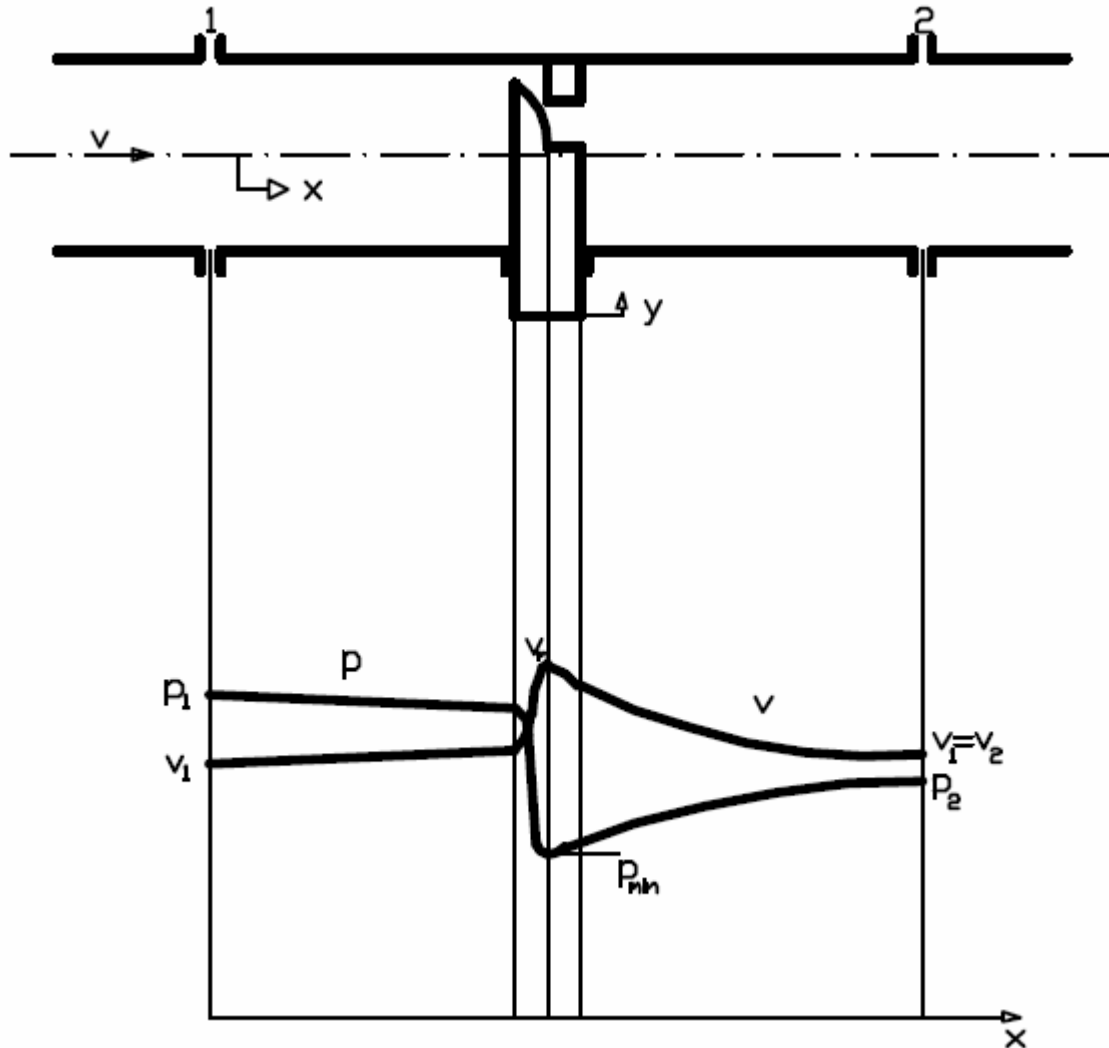
3. Kavítace v armaturách

3.1 Kavítace v průmyslovém provozu

V typickém průmyslovém provozu jsou stovky procesních regulačních smyček. Většina z těchto obvodů používá jako regulační orgán ventil. Proto je výkonnost 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. Tento dokument popisuje hlavní metody používané čelními výrobci, kteří využívají několik metod k posuzování a k zabránění působení škodlivých vlivů kavítace na regulační schopnost a spolehlivost regulačního ventilu.

3.2 Působení kavitace v armaturách

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.

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

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 [Pa]

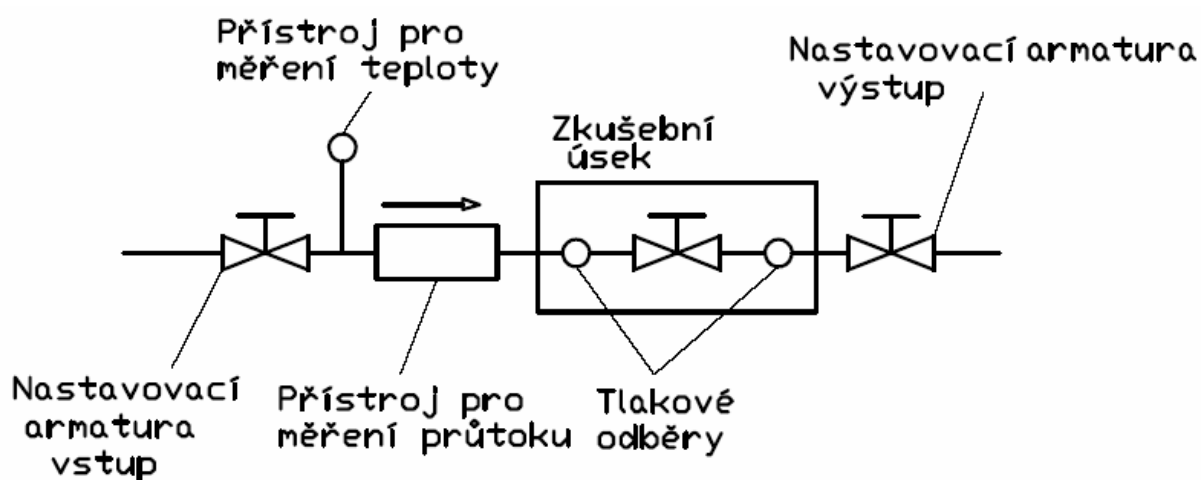
- χ se pohybuje v rozmezí 0,36 až 0,50

4. 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.

4.1 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. 4.1.1 – Základní schéma uspořádání průtokového systému. []

4.1.1 Zkušební vzorek []

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.

4.1.2 Zkušební úsek []

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.

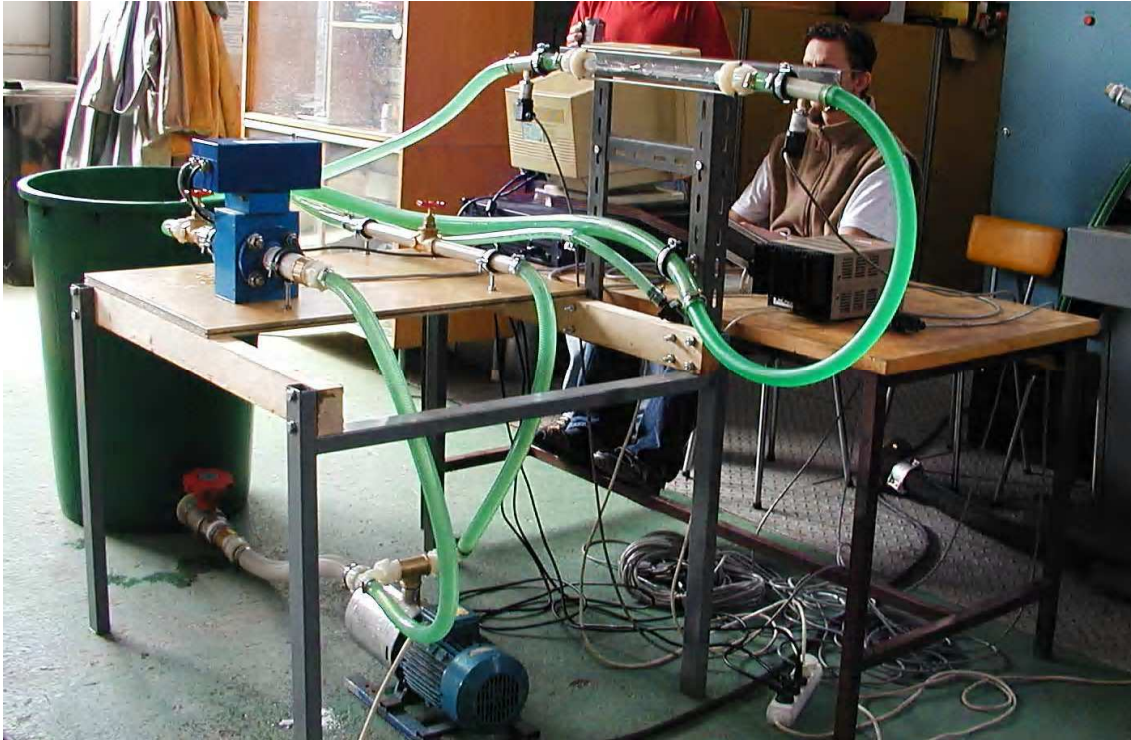
Vnitřní průměr připojené trubky musí být v rozmezí mezní úchytky $\pm 2\%$ skutečného vnitřního průměru na koncích zkušebního vzorku pro jmenovitou světlost do DN 250 a do jmenovitého tlaku PN 100. Pro armatury jmenovité světlosti větší než DN 250 nebo armatury s jmenovitým tlakem vyšším než PN 100 musí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

4.1.3 Nastavovací armatury []

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.

4.2 Schéma trati a zapojení jednotlivých členů

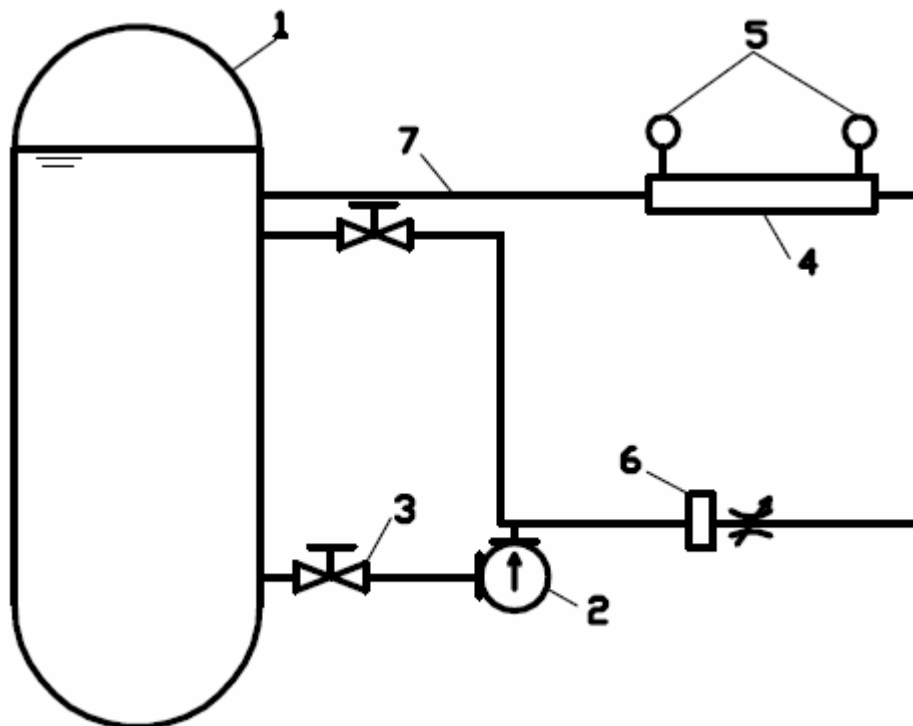
Trat' pro toto měření, která byla sestavena v laboratořích VUT vychází ze základního uspořádání průtokového systému, jako zkušební vzorek byla použita tryska (Lavalova dýza).



Obr. 4.2.1 – 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.

4.2.1 Schéma měřicí tratě

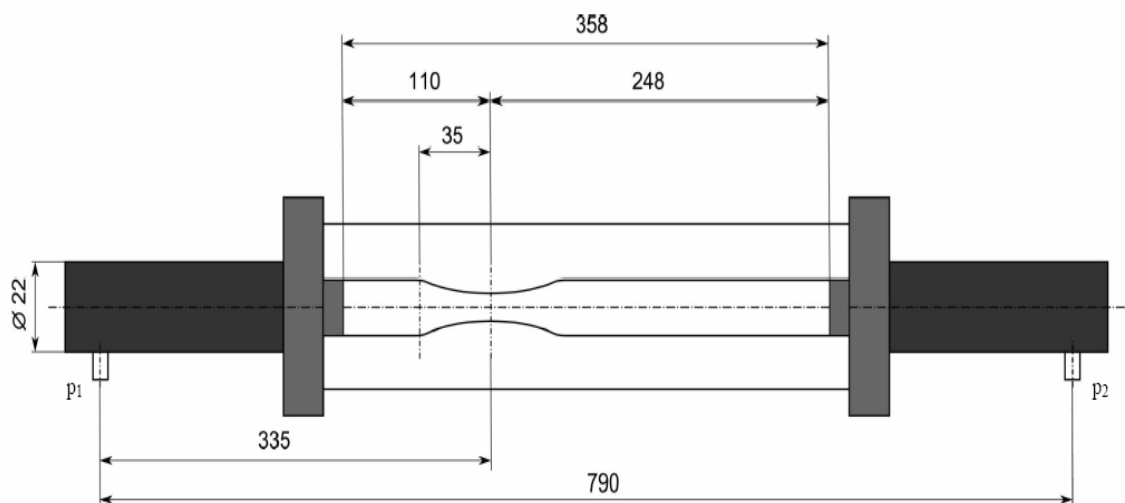


Obr. 4.2.1.1 – Schéma měřicí tratě se zakomponovanou tryskou.

- 1- nádrž s vodou
- 2- čerpadlo
- 3- ventil
- 4- zkušební vzorek (Lavalova dýza)
- 5- odběry tlaku
- 6- měřič průtoku
- 7- potrubí

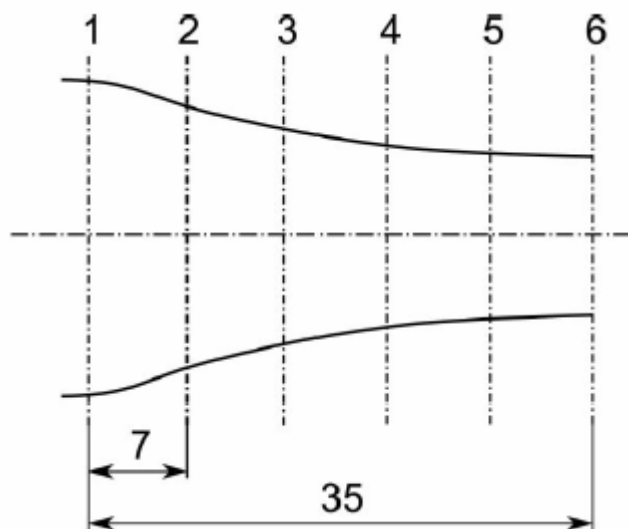
4.2.2 Použitá tryska

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. 4.2.2.1 – Rozměry trysky a její ochrany z plexiskla. []

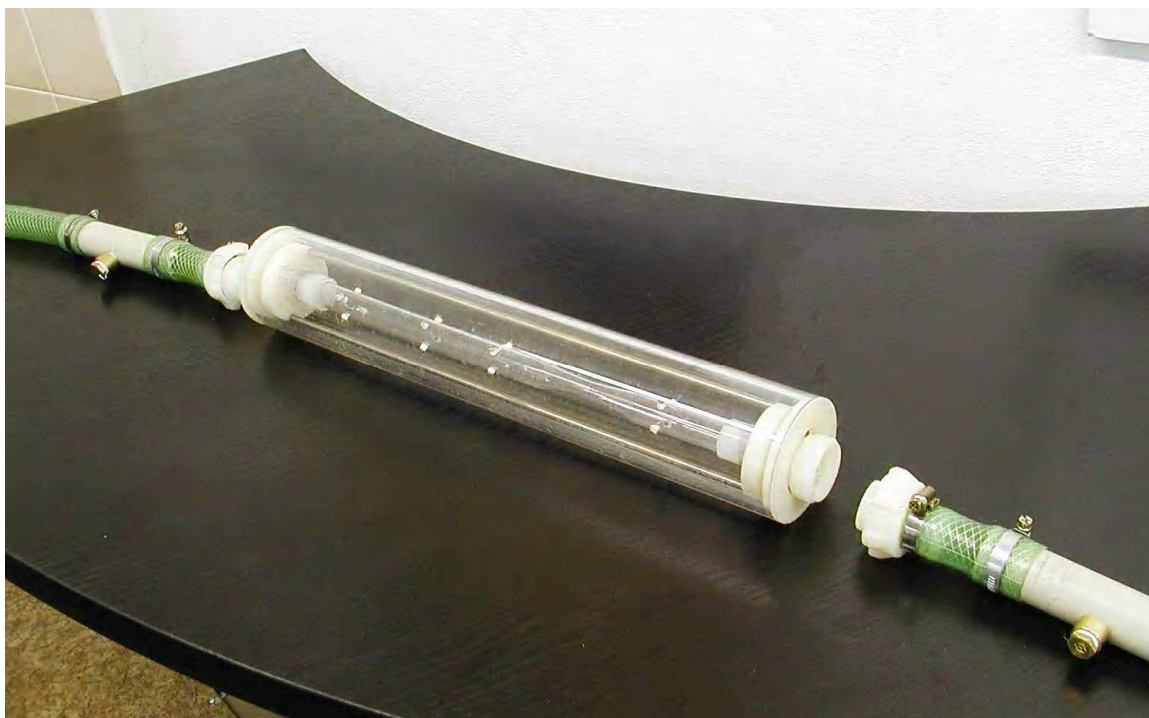
Tryska byla od počátku zúžení po její nejužší část rozdělena šesti řezy na pět částí o délce 7 mm. V těchto řezech byly odměřeny vnitřní průměry. Průměry jsou uvedeny v tabulce. Odběry tlaků se provádějí před a za tryskou



Obr. 4.2.2.2 – 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. 4.2.2.3 – Fotografie trysky(její konstrukční řešení).

4.2.3 Měřené veličiny []

Měření průtoku

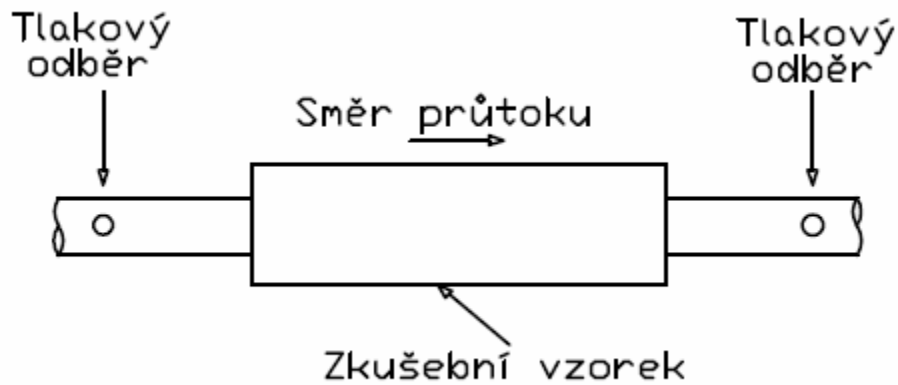
Zařízení na měření průtoku může být umístěno před nebo za zkušebním úsekem může být jakéhokoliv druhu, pokud dociluje předepsanou přesnost. Měřící zařízení musí být cejchováno tak často, jak je potřeba, aby tato přesnost byla zachována. Toto zařízení se užívá pro stanovení okamžitého středního průtoku 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 otřepů, jehel nebo jiných nepravidelností. Není striktně určená metoda připojení jeli v souladu s normou. V žádném případě nesmí žádná část vyčnívat dovnitř trubky



Obr. 4.2.3.1 – 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).

4.2.4 Použitá měřicí technika

4.3 Výpočetní vztahy

4.3.1 Průtokový součinitel

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

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 $\Rightarrow \rho = \rho_0$

4.3.2 Kavitační součinitel

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

σ_p	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. 4.3.2.1 – Ukázka kavitující trysky. []

4.3.3 Směrodatné odchyly []

Směrodatná odchylnka je v teorii pravděpodobnosti a statistice často používanou mírou statistické disperse. 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 odchylnka 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 odchylnka je nejužívanější míra variability.

Směrodatná odchylnka, 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:

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

kteřý 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 Excellu.

4.4 Grafické závislosti

4.4.1 Naměřené hodnoty na trati

čas	p ₁	p ₂	p _a	Q	Q	dp
[s]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[l.s ⁻¹]	[m ³ .hod ⁻¹]	[bar]
37222,69	100,2714	93,75304	98,0809	0,532827	1,918176	0,065184
37222,69	107,1812	95,73081	98,15216	0,718523	2,586682	0,114504
37222,69	120,1555	98,85259	98,15397	0,951011	3,423639	0,213029
37222,7	126,9873	100,5791	98,15497	1,061359	3,820891	0,264082
37222,7	128,9386	100,9931	98,16385	1,085326	3,907173	0,279455
37222,7	131,2027	101,5183	98,19422	1,116119	4,018028	0,296844
37222,7	133,888	102,0844	98,21598	1,148562	4,134822	0,318036
37222,7	135,179	102,423	98,23556	1,166295	4,198663	0,32756
37222,7	138,5869	103,2023	98,23565	1,209632	4,354674	0,353846
37222,7	143,5544	103,7394	98,23593	1,23854	4,458742	0,39815
37222,7	153,5555	104,5641	98,23846	1,281238	4,612457	0,489914
37222,7	166,3834	105,6094	98,24218	1,336285	4,810624	0,607739
37222,71	179,3458	106,623	98,2459	1,387558	4,995209	0,727228
37222,71	189,8665	107,3382	98,2993	1,425415	5,131494	0,825283
37222,71	210,2358	109,029	98,31135	1,50353	5,412708	1,012068
37222,71	230,9923	110,6358	98,31489	1,576506	5,67542	1,203565
37222,71	252,0062	112,1473	98,31706	1,647361	5,930499	1,398588
37222,71	272,3749	113,8466	98,31706	1,71592	6,177312	1,585282
37222,71	292,8487	115,4342	98,31715	1,784941	6,425789	1,774145
37222,72	315,2592	117,5135	98,31715	1,8604	6,697441	1,977458
37222,72	342,1244	119,599	98,31725	1,939536	6,982328	2,225254
37222,75	92,11195	92,30049	98,39875	0	0	-0,001885

Tabulka č.2

Po odměření nastává odstavení čerpadla a dochází k zavodnění tratě.

4.4.2 Přepočtené hodnoty na trati

s p ₁	s p ₂	s p _a	s Q	KV [m ³ .hod ⁻¹]	σ
0,320516	0,250836	0,024953	0,00398	7,51310044	14,02393
0,479768	0,303329	0,012027	0,003013	7,64421037	8,156114
0,724677	0,426456	3,82E-16	0,002718	7,41768828	4,53049
1,05067	0,593821	0,008965	0,003519	7,43524873	3,720026
1,112433	0,581903	0,02662	0,002757	7,39105917	3,530197
1,138534	0,590614	0,040792	0,002855	7,3747807	3,341098
1,282931	0,649882	0,034846	0,002724	7,33193165	3,136258
1,165502	0,639302	8,67E-16	0,003337	7,33611116	3,055414
1,009139	0,55736	0,002718	0,003101	7,32062912	2,850457
0,8768	0,593646	0,005427	0,003218	7,06625239	2,546766
0,868723	0,687029	0,015109	0,003172	6,58980146	2,086572
0,926977	0,696781	0,022275	0,003114	6,17081891	1,699239
1,103857	0,706258	0,027137	0,004338	5,85758299	1,43398
0,853261	0,660249	0,033737	0,003395	5,64861914	1,272269
0,891907	0,691186	0,02097	0,003038	5,38034012	1,054168
1,099493	0,934003	0,013408	0,003206	5,17324637	0,899792
1,42289	1,128191	0,002718	0,003324	5,01471523	0,78513
1,326061	2,446233	0,002718	0,003787	4,90621131	0,703387
1,158069	3,914873	2,78E-16	0,003433	4,82427285	0,637457
1,270203	5,517288	2,78E-16	0,003516	4,76272268	0,582432
1,658024	6,45506	0,002718	0,003307	4,68069667	0,526947
0,02399	0,197519	3,82E-16	0	0	-477,1435

Tabulka č.3

4.4.3 Vykreslení závislostí

4.5 Vyhodnocení měření a stanovení vysokofrekvenčních pulsací

Z tohoto měření nelze vyhodnotit vysokofrekvenční pulsace, jelikož do tratě nebyl zakomponován snímač pro vysokofrekvenční pulsace, při postupném zvyšování průtoku lze sledovat vznik kavitace a její průběh. Naměřené hodnoty a to statické hodnoty, které sloužily pro přepočet kavitačního součinitele a průtokového součinitele. S grafických závislostí lze vyčíst, kdy bude médium v trysce kavitovat a při jakém průtoku.

5. Fourierova transformace[]

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 spojitém či diskrétním čase.

5.1 Podstata metody

Průběh signálu se obvykle znázorňuje v 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.

5.2 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.

5.3 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. funkcí $x(t)$ ve významu vzoru nebo originálu, jsou následující:

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

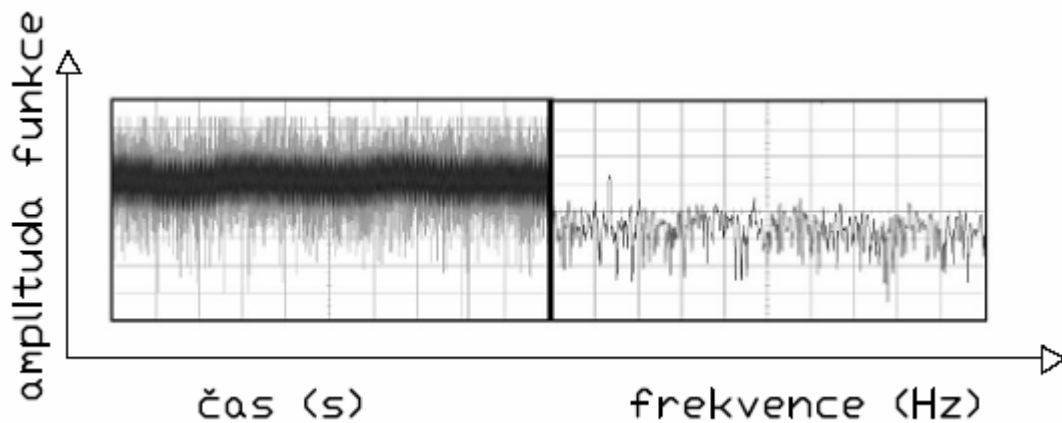
$$x(t) = F^{-1}\{X(\omega)\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} X(\omega) \exp(j\omega t) d\omega \quad (5.3.2)$$

5.4 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.:

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

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

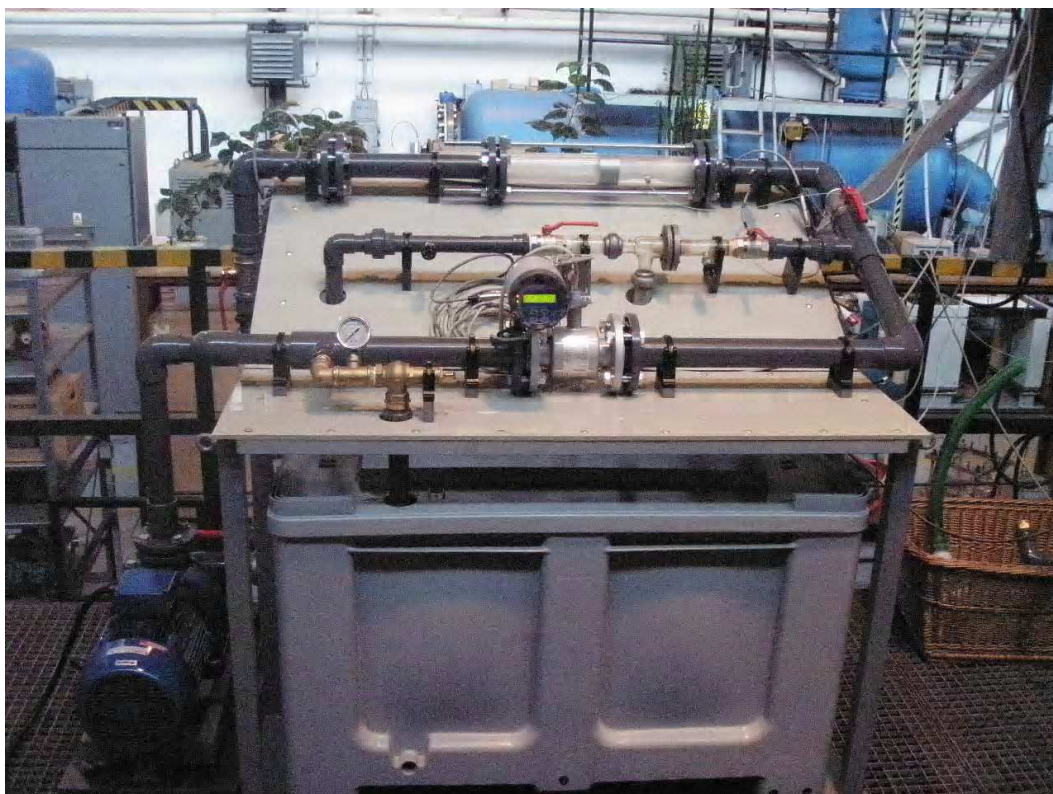


Obr. 5.4.1 – Ukázka chvění a její fourierova transformace.

6. Měření vysokofrekvenčních pulsací na trati s tryskou

6.1 Popis měření

Měření proběhlo v laboratořích VUT a to 29.4 2010. Základní uspořádání tratě bylo vyvedeno do PC, kde se v programu ??? 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. V podstatě se měří statické a dynamické hodnoty.



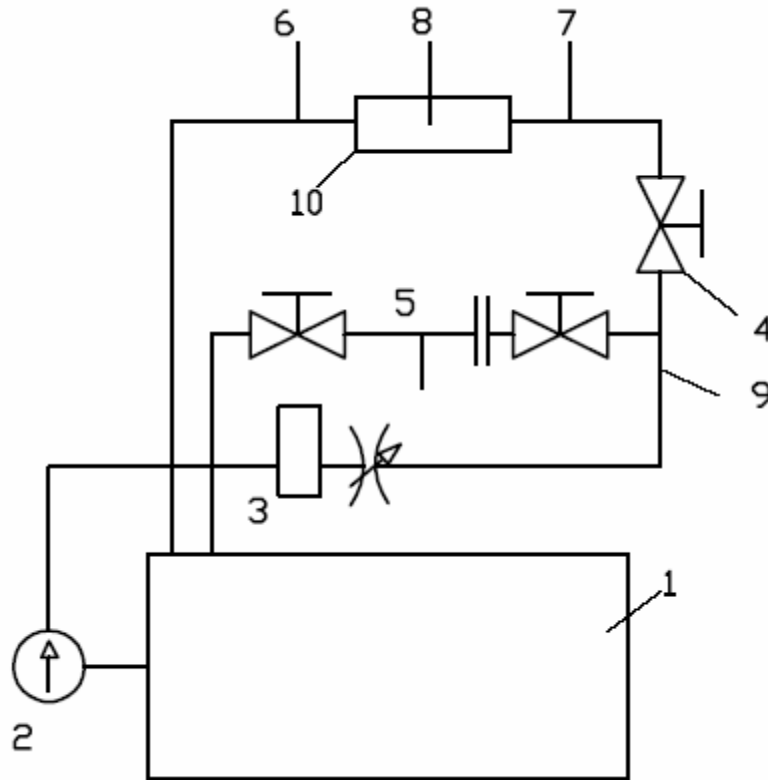
Obr. 6.1.1 – Sestavená trať.



Obr. 6.1.2 – Použité čerpadlo.

6.2 Schéma trati a zapojení jednotlivých členů

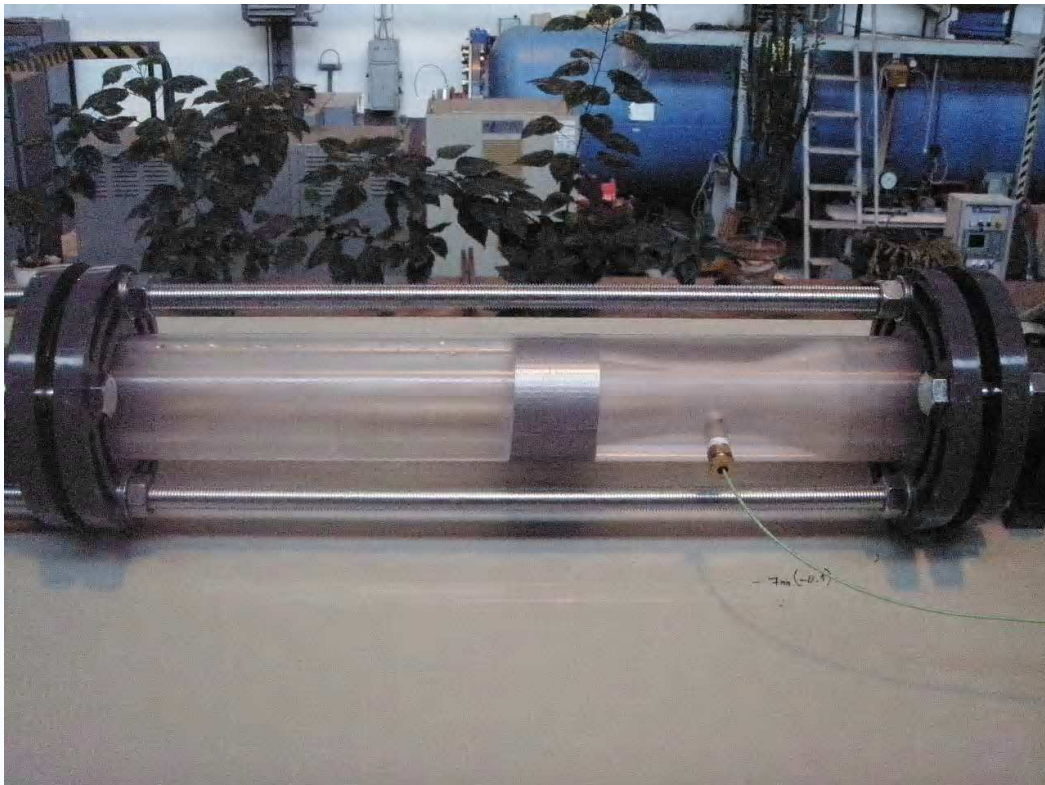
6.2.1 Schéma měřicí tratě



- 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

6.2.2 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 navrtná, 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.



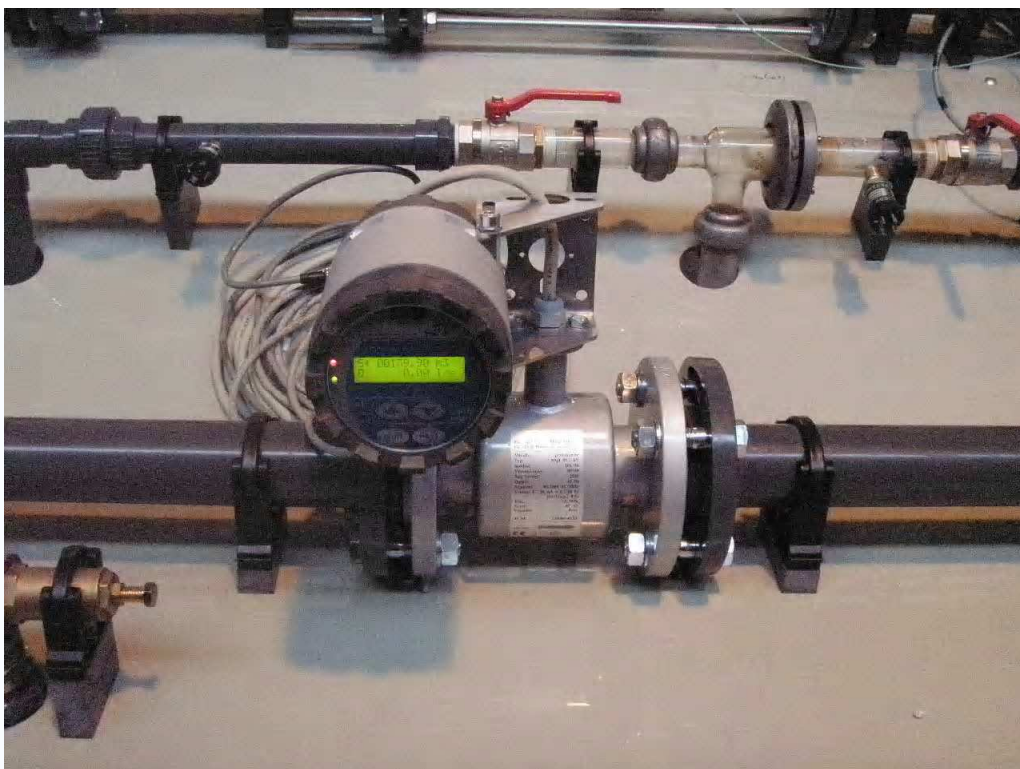
Obr. 6.2.2.1 – Zakomponovaná tryska.

6.2.3 Měřené veličiny

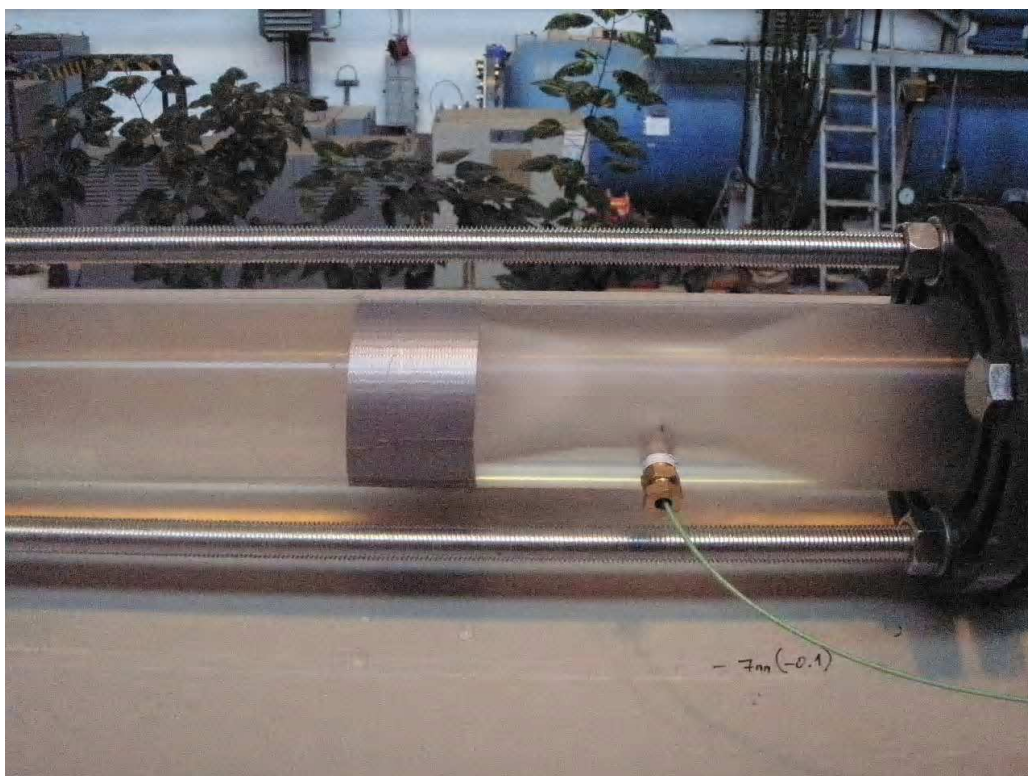
Při postupném měření na této trati se měřily statické veličiny a dynamické veličiny. Postupovalo se při postupném zvyšování průtoku až do maximální hodnoty, která je limitována možností čerpadla, respektive otáčkami. Začátek byl uveden na 5 l.s^{-1} a další krok byl odstupňován po litru. Po každém nastavení 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 1 250000 hodnot. Po ustálení průtoku se uložily data. Průtok byl odstupňován po 1 l.s^{-1} .

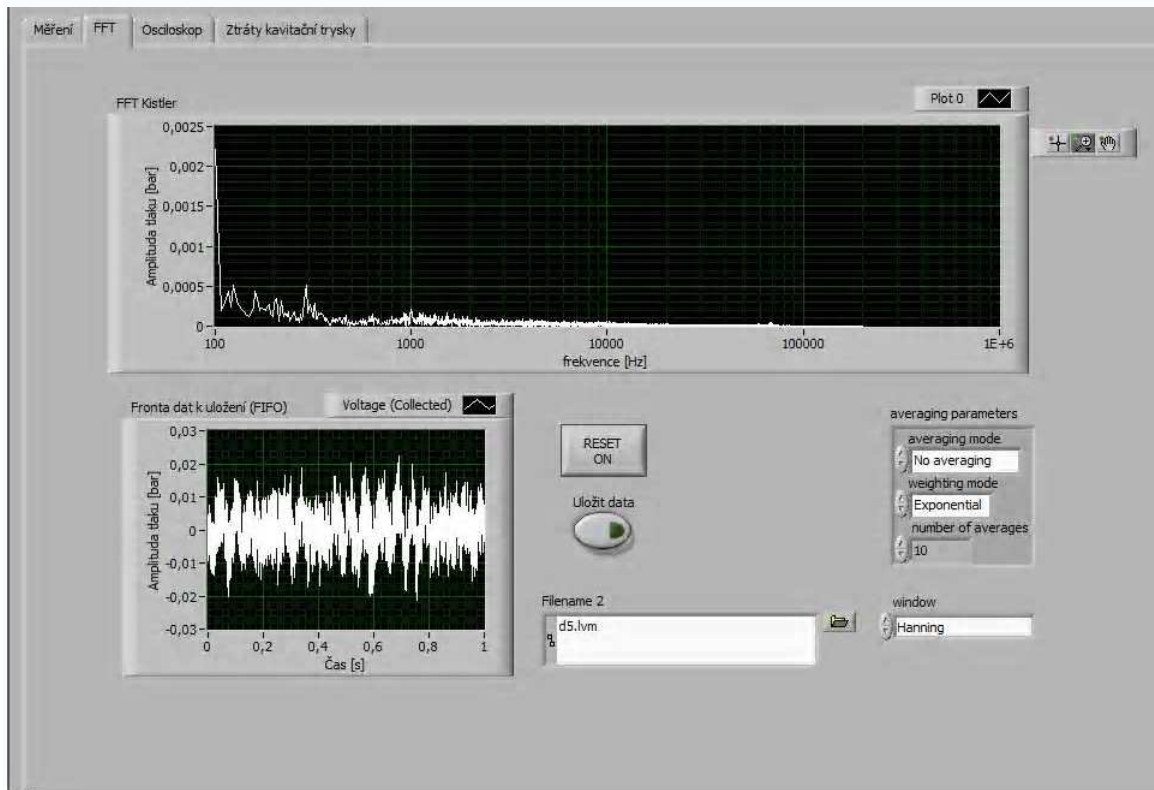


Obr. 6.2.3.1 – Zakomponovaný průtokoměr.

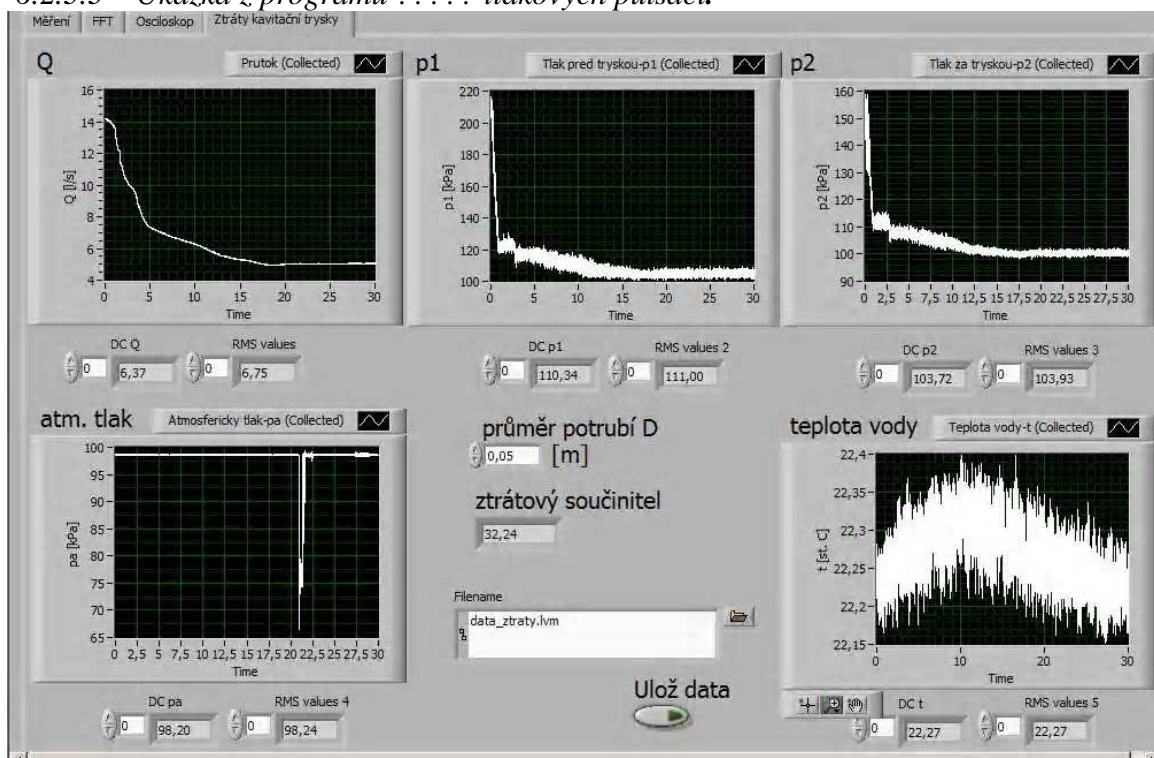


Obr. 6.2.3.2 – Zapojení snímače na vysokofrekvenční pulsace.

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



6.2.3.3 – Ukázka z programu ????? tlakových pulsací.



6.2.3.3 – Ukázka z programu ?????statických hodnot.

6.2.4 Použitá měřicí technika

6.3 Fourierova transformace amplitud tlaku

6.3.1 Převedené hodnoty pomocí Fourierovy transformace

6.3.2 Grafické závislosti statických měřených hodnot

6.4 Vyhodnocení měření a stanovení vysokofrekvenčních pulsací

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

. Závěr

11. Seznam použité literatury

[1]

12. Seznam použitých symbolů

13. Seznam příloh