



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

DYNAMIKA KAVITUJÍCÍHO PROUDĚNÍ ZA CLONOU

DYNAMICS OF CAVITATING FLOW BEHIND THE ORIFICE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Dávid Kubina

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání diplomové práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Bc. Dávid Kubina**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Fluidní inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.**
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Dynamika kavitujícího proudění za clonou

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Při proudění kontrakcí (Venturiho trubice, clona) dochází ke vzniku kavitujících vírových struktur (vírový kroužek), které výrazně ovlivňují dynamiku proudění. Tlakové pulzace související s kavitujícím prouděním výrazně závisí na geometrii clony (velikost a počet otvorů) a kavitačním čísle. Velikost a frekvence tlakových pulzací má vliv na účinnost eliminace patogenních mikroorganismů hydrodynamickou kavitací.

Cíle diplomové práce:

1. Rešerše kavitujícího proudění v clonách se zaměřením na dynamiku proudění i statické charakteristiky.
2. Realizace experimentu s clonami o různém počtu otvorů, ale stejné průtočné ploše.
3. Vyhodnocení frekvenčních spekter signálů z tlakových snímačů, identifikace dominantních frekvencí. Diskuse rozdílů mezi jednotlivými clonami.
4. Matematický model popisu pulzací v potrubí s kontrakcí.

Seznam doporučené literatury:

TESTUD, P., P. MOUSSOU, A. HIRSCHBERG a Y. AURÉGAN. Noise generated by cavitating single-hole and multi-hole orifices in a water pipe. *Journal of Fluids and Structures*. 2007, 23, 163-189.

RUDOLF, P., HUDEC, M., GRÍGER, M., ŠTEFAN, D. Characterization of the cavitating flow in converging- diverging nozzle based on experimental investigations. In *EPJ Web of Conferences*. EPJ Web of Conferences. epj. org, 2014. s. 1-6. ISSN: 2100-014X.

BRENNEN, C.E. Cavitation and Bubble Dynamics. New York: Oxford University Press, 1995. ISBN 0195094093.

PRESTON, A.T., T. COLONIUS a C.E. BRENNEN. A Numerical Investigation of Unsteady Bubbly Cavitating Nozzle Flows. Physics of Fluids. 2002, 14(1), 300-311. ISSN 1070-6631.

WANG, Y.C. a C.E. BRENNEN. One-Dimensional Bubbly Cavitating Flows Through a Converging-Diverging Nozzle. Journal of Fluids Engineering. 1998, 120, 166-170.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Práca sa zaoberá experimentálnym meraním charakteristík kavitujujúceho prúdenia piatimi clonami s rôznym počtom a geometrickým usporiadaním otvorov pri dodržaní konštantnej prietochnej plochy.

Dynamické charakteristiky: amplitúdy tlaku a dominantné frekvencie v závislosti na kavitačnom čísle, sú stanovené pre všetky režimy kavitačného prúdenia: počiatočnú kavitáciu, čiastočnú kavitáciu, plno vyvinutú kavitáciu a superkavitáciu.

Pre stanovenie dominantných frekvencií sú použité tlakové snímače v dvoch režimoch merania. Výsledné frekvenčné spektrá sú validované obrazovou analýzou záznamov z vysokorýchlostnej kamery.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

hydrodynamická kavitácia, kavitačné clony, dominantné frekvencie, obrazová analýza, Fourierova transformácia

ABSTRACT

Cavitating flow through five perforated plates with different number of holes with preserved constant flow cross-section area in sum were experimentally examined.

Dynamic characteristics such as dependence of pressure amplitudes and dominant frequencies on cavitation number in all regimes of cavitating flow: incipient cavitation, partial cavitation, fully developed cavitation and supercavitation are obtained.

For determination of dominant frequencies several pressure transducers in two regimes of measurement were used. Results were validated with frequency spectra obtained from picture analysis based on high-speed camera records.

KEYWORDS

hydrodynamic cavitation, cavitation plates, dominant frequencies, picture analysis, Fourier transform

VYHLÁSENIE

Vyhlasujem, že som svoju diplomovú prácu na tému „Dynamika kavitujúceho proudění za clonou“ vypracoval(a) samostatne pod vedením vedúceho diplomovej práce, využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor(ka) uvedenej diplomovej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto diplomovej práce som neporušil(a) autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol(-la) nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý(-á) následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona Českej republiky č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákoníka Českej republiky č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora(-ky)

POĎAKOVANIE

Ďakujem vedúcemu práce pánovi doc. Ing. Pavlovi Rudolfovi, Ph.D za odbornú pomoc a cenné rady pri vypracovaní diplomovej práce. Ďakujem tiež Ing. Martinovi Hudcovi za pomoc pri vypracovaní praktickej časti práce. Za podporu pri štúdiu ďakujem tiež svojej rodine.

Brno

.....
podpis autora(-ky)

OBSAH

Úvod	13
1 Teoretická časť	15
1.1 Kavitácia	15
1.2 Kvantitatívne hodnotenie kavitácie	16
1.3 Druhy kavitácie	17
1.3.1 Štádiá hydrodynamickej kavitácie	18
1.4 Využitie hydrodynamickej kavitácie	20
1.5 Modelovanie kavitácie	21
1.6 Statické charakteristiky	27
1.6.1 Vplyv obsahu vzduchu	31
1.7 Dynamické charakteristiky	32
1.7.1 Využitie obrazovej analýzy	34
1.7.2 Mechanická analógia	36
1.8 Meranie tlaku	37
1.8.1 Piezoelektrické tlakomery	37
1.8.2 Piezorezistívne tlakomery	37
1.9 Analýza a spracovanie signálu	37
1.9.1 Vzorkovanie	38
1.9.2 Filtrovanie signálu	39
1.9.3 Fourierova transformácia	40
1.9.4 Výkon signálu a rýchla Fourierova transformácia	40
1.9.5 Obrazová analýza fluktuácie intenzity pixelov	42
2 Praktická časť práce	45
2.1 Experimentálna trať	45
2.2 Postup merania	46
2.2.1 Vplyv teploty	48
2.3 Zoznam meracej techniky	48
2.4 Neistoty merania	49
2.4.1 Metóda typu A	50
2.4.2 Metóda typu B	51
2.4.3 Výpočet neistoty merania	52
3 Výsledky práce	53
3.1 Tlakové snímače - dynamické meranie	53
3.1.1 Korekcia indukčného prietokomeru	57
3.2 Obrazové spracovanie	58
3.3 Tlakové snímače - statické meranie	63
4 Záver	67
Literatúra	69
Zoznam symbolov, veličín a skratiek	75

Zoznam príloh	77
A Dynamické meranie (STFT)	79
B Porovnanie frekvenčných spektier	81
B.1 Clona s jedným otvorom	81
B.2 Clona s deviatimi otvormi (štvorcové usporiadanie)	83
B.3 Clona s deviatimi otvormi (kruhové usporiadanie)	84
B.4 Clona so šestnástimi otvormi	86
B.5 Clona s tridsaťšesť otvormi	89
C Obrazová príloha	91
D Zdrojové kódy	93
D.1 Statické meranie	93
D.2 Obrazová analýza	93

ÚVOD

Hydrodynamická kavitácia je komplexným javom vznikajúcim v prípade zvýšenia rýchlosti prúdenia, resp. poklesu tlaku pod tlak nasýtených pár v prúdiacej kvapaline. V takomto prípade prichádza k vzniku kavitačných bublín, ktorých obsah pri presune do oblastí s vyšším tlakom začína vo veľmi krátkych časových intervaloch kondenzovať, čím prichádza k implodovaniu bubliny.

Tomuto javu je nutné sa pri návrhu hydraulických strojov vyhnúť, keďže sa naň viažu nežiaduce vplyvy: pokles účinnosti, kavitačná erózia, vibrácie, hlučnosť, ...

Druhou stranou mince je fakt, že kavitáciu je možné vďaka extrémnym teplotám a tlakom vytvorených pri implodovaní kavitačných bublín sústredených do malého objemu kvapaliny efektívne využívať pri dezintegrácii bunkových stien vodných mikroorganizmov.

Cielom praktickej časti tejto práce je stanoviť deje súvisiace s kavitačnou dynamikou pri prúdení vody v uzatvorenom hydraulickom okruhu za piatimi kavitačnými clonami s rôznym počtom otvorov splňajúc podmienku konštantnej prietochnej plochy v rôznych režimoch prúdenia. Tiež určiť dominantné frekvencie prislúchajúce jednotlivým režimom kavitácie a závislosti ich vývoja so zmenou kavitačného čísla.

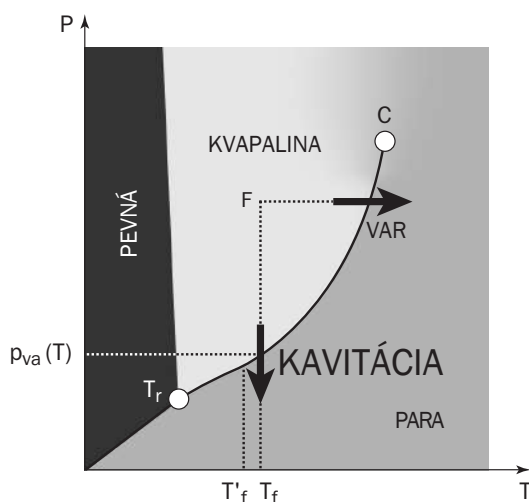
Pre zistenie dominantných frekvencií boli použité frekvenčné spektrá získané Fourierovou transformáciou signálu z tlakových snímačov pri dvoch režimoch merania (statické a dynamické meranie). V záujme jednoznačnej identifikácie frekvencií súvisiacich s kavitačnou dynamikou, boli tieto frekvencie korelované s dominantnými frekvenciami obrazovej analýzy záznamu z vysokorýchlostnej kamery.

1 TEORETICKÁ ČASŤ PRÁCE

Prvá časť práce tvorí úvod do problematiky hydrodynamickej kavitácie a vysvetľuje pojmy používané v nasledujúcich častiach.

1.1 Kavitácia

O kavitácii sa po prvý raz začína hovoriť koncom 19. a na začiatku 20. storočia. V roku 1917 sa touto problematikou zaoberal lord Rayleigh v súvislosti s rýchlostnými lodnými skrútkami. [39] Ešte pred ním v roku 1873 experimentálne medzi prvými potvrdil vznik parou nasýtených bublín v oblasti lopatiek lodných skrutiek Reynolds. Ten sa spočiatku sústredil na možnosť vnikania vzduchových bublín do medzilopatkového priestoru propeleru, tzv. ventiláciou. Asi prvý, kto pripustil možnosť vzniku parných bublín v tejto súvislosti bol Parsons v roku 1906, ktorý takisto vytvoril experiment sústreďujúci sa práve na kavitáciu. Od tohto obdobia je tento fenomén predmetom rozsiahleho teoretického a experimentálneho výskumu, práve v dôsledku vplyvu na znižovanie účinnostných charakteristík, takisto ako aj zvyšovania erozívnych účinkov alebo hlučnosti prevádzky. [4]

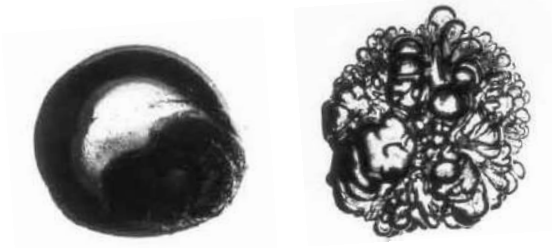


Obr. 1.1: P - T diagram vody, zdroj: [10] (upravené)

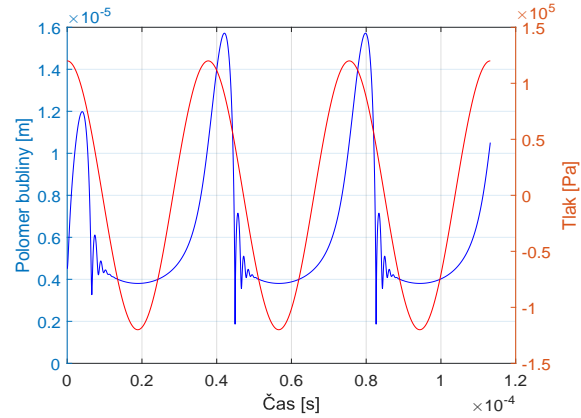
Kavitácia je fyzikálny dej, pri ktorom sa v kvapaline vplyvom náhleho zníženia tlaku (približne na hodnotu tlaku nasýtených pár kvapaliny pri danej teplote, $p_{va}(T)$) začínajú tvoriť kavitačné bubliny. Ide teda o jav podobajúci sa varu kvapaliny, pri ktorom však nie je riadiacim parametrom zmeny stavu premenná hodnota teploty, ale veľkosť statického tlaku v mieste vzniku kavitačných bublín (obrázok 1.1). V aplikáciách so studenou vodou môže byť teplota pri poklese tlaku a prechode do kavitácie považovaná za konštantu, tj. rozdiel $T_f - T'_f \approx 0$. To však neplatí, napríklad v prípade čerpania kryogénnych kvapalín používaných v raketovom priemysle, kde je zníženie teploty vplyvom odoberania latentného tepla vyparovania danej kvapaliny značné.

Následne sú tieto bubliny opätovne vystavené vyššiemu tlaku a nastáva ich kolaps s prudkou kondenzáciou parného obsahu. V prípade hydrodynamickej kavitácie, ktorá je

predmetom tejto práce, sa bublina do oblasti s vyšším statickým tlakom dostáva prirodzene spolu s pohybujúcou sa kvapalinou. Podobná situácia nastáva napríklad pri uvažovaní akustickej kavitácie, kde je príčinou vzniku a zániku bubliny periodická zmena tlaku (vytvorená napríklad ultrazvukovým žiaričom), pričom jediná kavitačná bublina môže prejsť radom niekoľkých cyklov rastu a opätovného kolapsu (obrázky 1.2 a 1.3).



Obr. 1.2: Kolaps kavitačnej bubliny v glyceríne v premenlivom tlakovom poli, pred (v ľavo) a po kolapse (v pravo), zdroj: [4] (upravené)

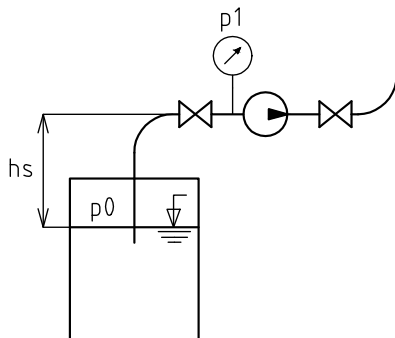


Obr. 1.3: Numerické riešenie Rayleigh-Plessetovej rovnice, zdroj: [14], [33] (upravené)

1.2 Kvantitatívne hodnotenie kavitácie

Kvantitatívne vyhodnocovanie kavitačného prúdenia je dôležité najmä pri návrhu hydraulických strojov. Kavitačné návrhové kritérium sa uplatňuje aj pri výpočte dopravnej výšky čerpadla (podľa obrázku 1.4):

$$\frac{p_0}{\rho} = \frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + g \cdot h_s + Y_{z_{0-1}} \quad (1.1)$$



Obr. 1.4: Zapojenie čerpacej stanice

Definujeme takzvanú *čistú saciu mernú energiu*, alebo tiež tzv.: *kavitačnú depresiú* Δy (v anglickej literatúre uvádzanú ako *NPSH* (eng.- *Net Positive Suction Head*, $NPSH.g = \Delta y$), ktorá predstavuje prebytok celkovej mernej energie (kinetickej a tlakovej) nad mernou energiou nasýtených pár čerpanej kvapaliny) ako:

$$\Delta y = \frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} - \frac{p_{va}(t)}{\rho} \quad (1.2)$$

Spojením rovníc 1.1 a 1.2 získavame podmienku pre bezkavitačnú prevádzku čerpadla:

$$h_s \leq \frac{1}{g} \left(\frac{p_0 - p_{va}(t)}{\rho} - \Delta y - Y_{z_{0-1}} \right) \quad (1.3)$$

tiež možnú písať v tvare:

$$h_s \leq \frac{p_0 - p_{va}(t)}{\rho \cdot g} - NPSH - \frac{Y_{z_0-1}}{g} \quad (1.4)$$

Týmto spôsobom je možné definovať kavitačný súčiniteľ použitý pri návrhu čerpadla (Δy je parameter navrhovaného stupňa) v tvare:

$$\sigma = \frac{\Delta y}{Y} \quad (1.5)$$

Kde Y predstavuje mernú energiu stupňa hydraulického stroja.

Pre rôzne aplikácie je možné definovať *kavitačné číslo* viacerými spôsobmi. V predkladanej práci je vzťah bezrozmerného *Thomovho kavitačného súčiniteľa (čísła)* uvažovaný v tvare 1.6, ktorý tak definuje prebytok statického tlaku nad tlakom nasýtených pár kvapaliny vzhľadom k dynamickému tlaku. Inak povedané ide o pomer síl, ktoré spôsobujú kolabs kavitačných bublín k silám, ktoré sú príčinou ich vzniku [36],[22],[12] [32]:

$$\sigma = \frac{p_{ref} - p_{va}(T)}{\rho \frac{\bar{v}^2}{2}} \quad (1.6)$$

Kde p_{ref} je referenčný tlak v stanovenom mieste a \bar{v} – stredná rýchlosť v zvolenom priereze (v tejto práci je zvoleným prierezom najmenší prierez celej sekcie, teda prierez kavitačnej clony, ktorý je konštantný pre všetky kavitačné clony). So znižovaním *kavitačného čísla* prichádza k nukleácii parou naplnených bublín v kvapaline. Tento stav býva označovaný ako počiatočná kavitácia, ktorej prislúcha tzv. *kritické kavitačné číslo*, ktoré je označené ako σ_i (eng.: *incipient*).

V mnohých teoretických prácach, napríklad [46], [4], [32] je pre charakterizáciu prúdenia používaný tzv. *tlakový koeficient*:

$$C_p = \frac{p_{ref} - p_\infty}{\rho \frac{v_\infty^2}{2}} \quad (1.7)$$

Kde p_∞ a v_∞ je tlak, resp. rýchlosť v neovplyvnenej oblasti.

Pre ideálnu kvapalinu je zrejme, že platí vzťah: $\sigma_i = -C_{pmin}$. V prípade reálnej kvapaliny, však hodnotu σ_i ovplyvňuje viacero faktorov a experimentálne stanovené hodnoty sa môžu preto líšiť:

- Existencia ťahového napätia môže spôsobiť ovplyvnenie hodnoty σ_i .
- Prítomnosť nerozpusteného plynu môže spôsobiť vyššiu hodnotu σ_i .
- Turbulentné efekty (spojené so vznikom koherentných vírových štruktúr) takisto môžu zapríčiniť, že σ_i dosahuje vyšších hodnôt.

Preto v experimentálnych prácach [22], [36], kde je určovaný priebeh veličín v závislosti na *kavitačnom čísle* je nutné, aby bola dodržaná dostatočná ustalovacia dĺžka pred meraným úsekom trate, a tiež aby sa znížil obsah nerozpustených plynov na hodnotu, ktorá je porovnateľná pre všetky merania.

1.3 Druhy kavitácie

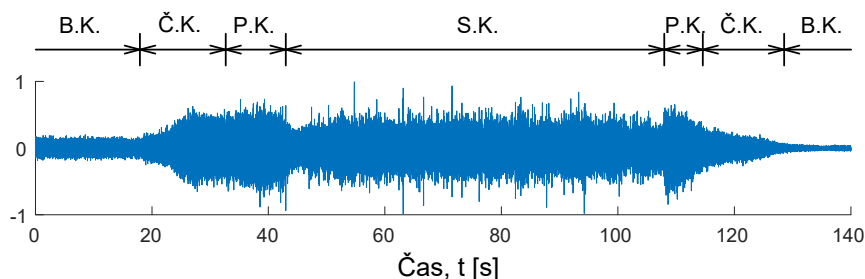
I keď všetky druhy kavitácie majú spoločný základ, ktorým je vznik a zánik bublín v kvapaline, môžeme tento jav rozdeliť do niekoľkých skupín podľa uplatneného fyzikálneho princípu zapríčiniujúci ich vznik.

V technickej praxi rozšíreným druhom kavitácie, hlavne pri čistení povrchov kovových súčastí je *akustická kavitácia*. V tomto prípade ide o periodický vznik a zánik bublín v ultrazvukovom akustickom poli, ktoré je tvorené generátorom tlakových vln s dostatočnou hladinou intenzity zvuku, ktorá môže byť fokusovaná do ľubolného miesta kvapaliny, [22], [3]. S iným druhom nazývaným *plynová kavitácia* sa stretávame v kvapalinách s veľkým obsahom plynov, ktoré sú schopné vyplňať kavitačné jadrá difúznym mechanizmom. S veľkým obsahom vzduchu a veľkým počiatočným polomerom bublín v kvapaline sa vyznačuje tzv. *pseudokavitácia*, pri ktorej je rast bublín riadený poklesom tlaku. Tento druh kavitácie ovplyvňuje dynamiku hydraulického stroja, a tiež jeho straty, resp. účinnosť, avšak bez výraznejšej kavitačnej erózie, keďže je kolaps bublín spomaľovaný obsahom vzduchu, [12]. Najčastejším druhom kavitácie v hydraulických strojoch je *hydrodynamická kavitácia*, ktorá sa vyznačuje explozívnym rastom resp. rýchlou implóziou kavitačných bublín pri poklese tlaku, resp. regenerácii tlaku, napríklad v prípade obtekania profilov alebo iných častí hydraulických strojov.

1.3.1 Štádiá hydrodynamickej kavitácie

Hydrodynamickú kavitáciu je možné charakterizovať podľa priebehu *kavitačného čísla*, a identifikovať tak rôzne fázy jej vývoja. Je nutné povedať, že v predkladanej práci je prechod medzi jednotlivými štádiami určený len na základe osobného vizuálneho pozorovania, a tiež zmeny charakteru a intenzity akustickej emisie.

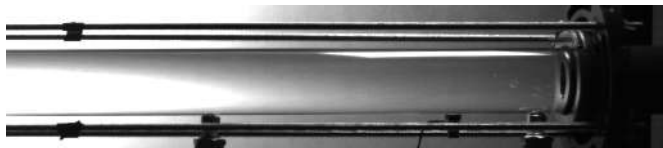
Kvalitatívny náhľad na princíp stanovenia rôznych režimov kavitačného prúdenia sluchom poskytuje audiozáznam na obrázku 1.5 z tzv. dynamickej skúšky kavitačnej clony s jedným otvorom (viac v kapitole 2.2). Ide o vykreslenie normalizovanej hladiny akustického tlaku v závislosti na čase (hodnoty akustického tlaku sú v intervale (-1,1)) z kamerového záznamu vo vzdialenosti približne jeden meter od potrubia. Viditeľný je nárast hluku v okamžiku objavenia kavitácie, pričom maximálny akustický prejav je dosahovaný v režime *plno vyvinutej kavitácie* a *superkavitácie*. Pri prechode z *plno vyvinutej kavitácie* do *superkavitačnej* oblasti, nastáva značný pokles hlučnosti, ktorý je spôsobený vplyvom pulzovania vytvoreného vodného lúča vo väčšej vzdialenosti od kavitačnej clony. Hlučnosť sa opäť zvyšuje po tom ako kavitačný lúč dosiahne koniec plexisklovej trubice v dôsledku zvyšovania prietoku.



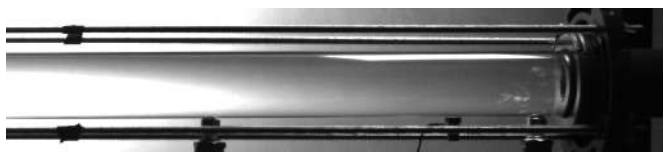
Obr. 1.5: Záznam hluku pri tzv. dynamickom meraní kavitačnej clony s jedným otvorom. Význam skratiek: B.K. - bezkavitačná oblasť, Č.K. - čiastočná kavitácia, P.K. - plno vyvinutá kavitácia, S.K. - superkavitácia

Prvým zo štádií je *počiatočná kavitácia*, ktorá je v prípade kavitačnej clony s jedným otvorom na obrázku 1.6 (smer prietoku je z prava do ľava (obr. 1.6 až 1.10)). Toto štádium

je charakteristické a identifikovatelné zvýšením akustickej emisie, pričom tu vznikajú a zanikajú veľmi malé zhľuky kavitačných bubľín, ktoré sú sústredené do koherentných vírových štruktúr s nízkym tlakom, vznikajúcich odtrháváním turbulentnej medznej vrstvy, súčasne je to štádium spojené s poklesom *strátového súčiniteľa* (vid. kapitola 1.6). [12]

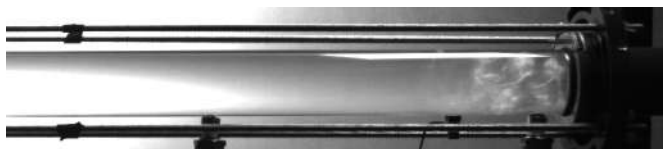


Obr. 1.6: Počiatková kavitácia, kavitačné číslo určované z tlakového odberu p_3 , podľa obrázku 1.19: $\sigma = \sigma_i = 1,45 [-]$

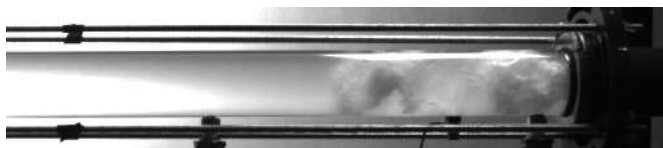


Obr. 1.7: Čiastočná kavitácia, kavitačné číslo určované z tlakového odberu p_3 , podľa obrázku 1.19: $\sigma = 0,987 [-]$

Významným ovplyvnením hydraulických pomerov, ako účinnosť (straty) alebo prietok predstavuje plno vyvinutá kavitácia. V takto vyvinutom kavitačnom prúde je viditeľný pulzujúci kavitačný mrak (obrázky 1.8 a 1.9).

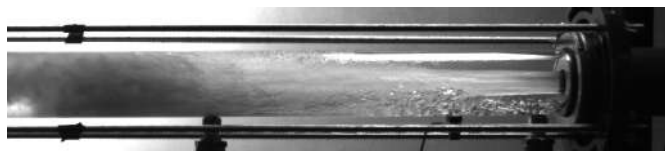


Obr. 1.8: Plno vyvinutá kavitácia, kavitačné číslo určované z tlakového odberu p_3 , podľa obrázku 1.19: $\sigma = 0,323 [-]$



Obr. 1.9: Plno vyvinutá kavitácia, kavitačné číslo určované z tlakového odberu p_3 , podľa obrázku 1.19: $\sigma = 0,146 [-]$

Na obrázku 1.10 je možné vidieť vodný lúč obklopený kapsou nasýtených vodných pár s tlakom, riadiacim sa vzťahom 2.1. Ide o posledné štádium vývoja kavitačného prúde: tzv. *superkavitácia*.

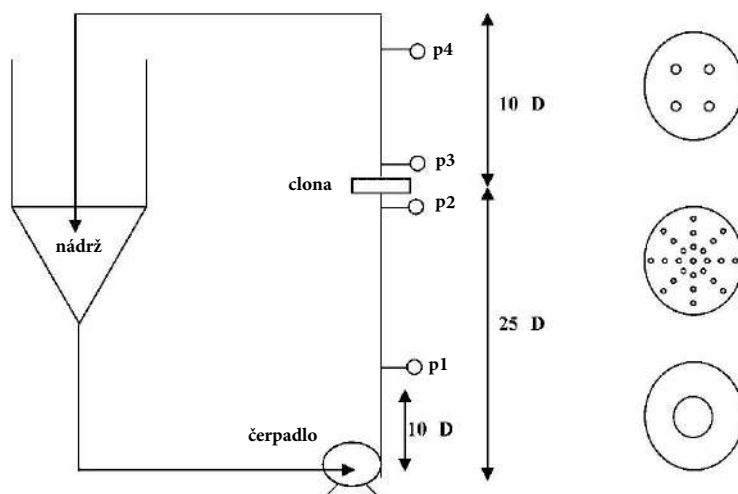


Obr. 1.10: Superkavitačné štádium, kavitačné číslo určené z tlakového odberu p_3 , podľa obrázku 1.19: $\sigma = 0,004$ [-]

1.4 Využitie hydrodynamickej kavitácie

Princíp hydrodynamickej kavitácie a jej využitie na dezintegráciu bunkových stien kvasiniek, je experimentálne testovaný v prípade [1] na testovacom okruhu, podľa schémy na obrázku 1.11 bol zisťovaný vplyv troch premenných veličín systému:

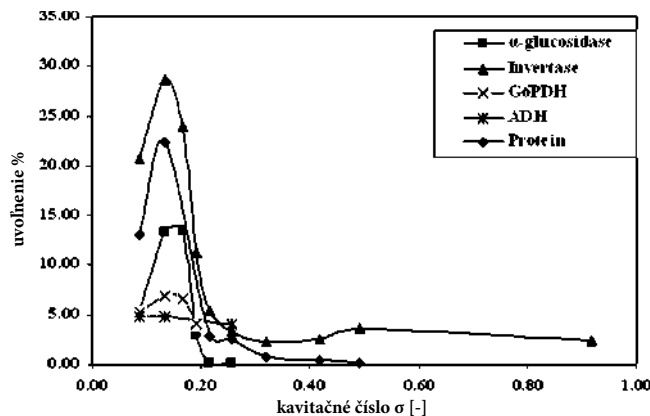
1. vplyv kavitačného čísla (podľa vzťahu 1.6)
2. vplyv počiatkovej koncentrácie kvasiniek v roztoku
3. vplyv počtu prechodov cez kavitačnú zónu



Obr. 1.11: Schéma uzatvoreného testovacieho okruhu a použitých kavitačných clôn podľa [1], priemer potrubia: $D = 26,64$ mm (upravené)

Pri zisťovaní vplyvu kavitačného čísla na rozpad bunkových stien je tu zvolený prístup, kde sa pre každý prevádzkový bod meria koncentrácia piatich rôznych cytoplazmatických enzýmov uvoľňovaných pri porušení bunkovej steny. Táto závislosť pre jednotlivé vyhodnocované zložky je na obrázku 1.12, pričom ako 100% uvoľneného obsahu je stanovený údaj získaný pri dezintegrácii bunkových stien pri vysokotlakej homogenizácii. Kavitačné číslo je v tomto prípade nastavované pomocou zmeny kavitačnej clony s rôznou geometriou a počtom otvorov. Bola tu teda nutná zmena svetlosti kavitačnej clony, tak aby pri konštantnom prietoku boli dosahované kavitačné čísla v rozsahu: $\sigma = 0,09$ až $0,99$.¹ Bol pri tom využívaný fakt, že s rastúcou svetlosťou narastá aj hodnota kavitačného čísla pri konštantnej hodnote prietoku.

¹Kavitačné číslo je v tomto prípade stanovené z tlakomeru p_4 podľa obrázku 1.11.



Obr. 1.12: Závislosť uvoľneného objemu enzýmov z porušených bunkových stien kvasiniek na kavitačnom čísle (upravené) [1]

Z obrázku 1.12 je zrejmé, že s klesajúcim kavitačným číslom narastá kavitačné pôsobenie spolu s narastajúcim počtom generovaných kavitačných bublín k oblasti nízkeho tlaku s optimom približne pre $\sigma = 0,13$. S rastúcim počtom kavitačných bublín narastá aj interagovanie jednotlivých bublín medzi sebou, čím sa znižuje účinnosť kavitácie. Dôsledom je výskyt optima pre kavitačné pôsobenie na dezintegráciu bunkových stien, ktorý bol popísaný aj v práci [23].

1.5 Modelovanie kavitácie

Pre modelovanie kavitácie sú v dnešnej dobe využívané hlavne programy pracujúce na základe metódy konečných objemov (Fluent, CFX, OpenFoam) [21], [20].

V tomto prípade je modelovanie možné rozdeľovať do dvoch skupín. Prvou z nich je tzv. jednofázový model prúdenia (eng.: single-phase model). V tomto prípade je uvažovanou hranicou medzi kvapalinou a sýtymi parami plocha s konštantnou hodnotou tlaku, ktorého veľkosť je práve hodnota nasýtených pár kvapaliny. Výhodou tohto prístupu sú nižšie požiadavky na výpočtovú techniku a tiež lepšia numerická stabilita. Použitelnosť je obmedzená na vyšetrenie prúdenia, ktoré nie je priamo spojené s výskytom parnej fázy, napríklad vír vznikajúci za obežným kolom Francisovej turbíny. [21]

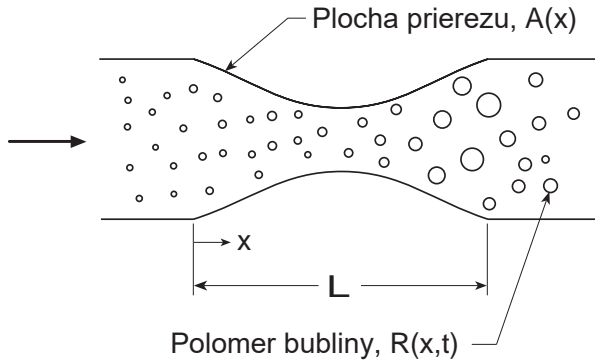
V prípade modelovania prúdenia silno spojeného s výskytom kavitácie je používaný viacfázový model prúdenia (eng.: multi-phase model). Využitie tohto modelu a prítomnosť parnej fázy v kvapaline je dôvodom pre výskyt tzv. produkčného člena baroklinickej turbulencie, ktorý predstavuje prídavný produkčný člen v transportnej rovnici vírivosti. [21]

Prenos hmoty môže byť modelovaný viacerými kavitačnými modelmi, ktoré sú založené na zjednodušenej Rayleigh-Plessetovej rovnici v ktorej sú zanedbané nelineárne členy, pre numerické modelovanie je tak použitý len člen obsahujúci rýchlosť kvapaliny v radiálnom smere bubliny podľa vzťahu 1.8:

$$\frac{dR_B}{dt} = \sqrt{\frac{2 p_B(t) - p_L(t)}{3 \rho_L}} \quad (1.8)$$

V oblasti CFD modelovania je možné kombinovať tiež Lagrangeov a Eulerov popis kontinua. V tomto prípade je Eulerov popis použitý pre počítanie hlavného prúdu, pričom Lagrangeov popis slúži na riešenie malých častíc rozptýlených v prúde.

Je možné takisto použitie Eulerovho popisu pre obe (alebo viaceré) riešené fázy prúdenia. Znamená to riešenie celého systému rovníc pre každú z fáz. Táto možnosť je však kladie najväčšie nároky na výpočtový výkon.



Obr. 1.13: Dvojfázové prúdenie v potrubí s kontrakciou (upravené) [46]

V prípade kavitačného prúdenia v potrubí je pre zjednodušenie možné zanedbanie rozmerov kolmých na primárny smer prúdenia. Takéto jednodimenzionálne kavitujúce prúdenie je numericky riešené v práci [46]. Práca sa zaoberá vytvorením matematického modelu, pozostávajúceho z rovníc 1.9, 1.10 a 1.19, ktorý zahŕňa aj dynamické správanie bublín uzatvorením systému rovníc Rayleigh-Plessetovou rovnicou. Ide o prúdenie zmesi kvapaliny a parných bublín len v ose prúdenia (vystupuje tu len jedna zložka rýchlosti v kladnom smere osi x), pričom sa vychádza zo základných rovníc zachovania hmoty (rovnice kontinuity - 1.9) a zákona zachovania hybnosti pomocou upravenej Navier-Stokesovej rovnice 1.10 so zanedbaním viskózneho člena a tiež bez vplyvu gravitačného zrýchlenia. Za týchto predpokladov ide o bezrozmernú Eulerovu rovnicu hydrodynamiky s jedinou nenulovou zložkou rýchlosti v axiálnom smere. Predpoklady tohto modelu sú uvedené nasledovne:

- nestlačiteľná, neviskózna kvapalina
- relatívne pohyby medzi fázami (voda/vodná para) sú zanedbateľné
- trenie medzi povrchom trubky a kvapalinou je zanedbateľné
- počastiach konštantná koncentrácia bublín: $\eta = \text{konšt.}$
- bez vyparovania a kondenzácie pár v bublinách
- aplikovanie modelu len pre nízke hodnoty parného zlomku: $\alpha \ll 1$

Uvedené rovnice boli upravené tak, aby v nich vystupovali len bezrozmerné parametre s použitím veličín získaných proti prúdu pred kontrakciou z okrajovej podmienky (značené dolným indexom „s“), veličiny značené horným indexom „*“ sú rozmerové veličiny.

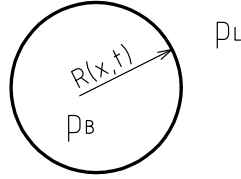
$$\frac{\partial}{\partial t} [(1 - \alpha) A] + \frac{\partial}{\partial x} [(1 - \alpha) u A] = 0 \quad (1.9)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} u = -\frac{1}{2(1 - \alpha)} \frac{\partial C_p}{\partial x} \quad (1.10)$$

kde $A(x)$ je plocha prietochného prierezu a u je bezrozmerná rýchlosť v smere osi x . Ďalej C_p vyjadruje bezrozmerný tlakový koeficient riadiaci sa vzťahom:

$$C_p(x, t) = \frac{p^*(x, t) - p_s^*}{\frac{1}{2} \rho_L^* u_s^{*2}} \quad (1.11)$$

kde $p^*(x,t)$ je tlak kvapaliny v referenčnom mieste (rovnako ako vo vzťahu 1.7) a p_s^* je tlak proti prúdu pred kontrakciou získaný z okrajovej podmienky.



Obr. 1.14: Kavitačná bublina

Aby sa dosiahlo bezrozmerných veličín rovnici 1.9 zavedený parameter α , ktorý predstavuje *objemový zlomok parnej fázy* kavitačného prúdenia podľa vzťahu:

$$\alpha(x,t) = \frac{V_{va}}{V} = \frac{V_{va}}{V_{va} + V_L} = \frac{\frac{4}{3}\pi\eta R^3(x,t)}{1 + \frac{4}{3}\pi\eta R^3(x,t)} \quad (1.12)$$

kde $R(x,t)$ predstavuje polomer kavitačnej bubliny závislý na súradnici x a čase t , označenie η vyjadruje bezrozmernú hodnotu počtu kavitačných bublín na jednotku objemu: $\eta = \eta^* R_s^{*3}$, kde R_s^{*3} je počiatočný polomer kavitačnej bubliny proti prúdu. Označenie V_{va} je objem sýtej pary a V_L objem kvapaliny.

Následne výraz $(1 - \alpha)$ predstavuje bezrozmernú hustotu dvojzložkovej zmesi vychádzajúc z úvahy o hustote „N“ zložkovej resp. dvojzložkovej zmesi podľa [4]:

$$\rho = \sum_{i=1}^N \alpha_i \rho_i \quad (1.13)$$

$$\rho = \alpha_{va} \rho_{va} + \alpha_L \rho_L \quad (1.14)$$

Je teda zrejmé, že platí:

$$\begin{aligned} V_{va} + V_L &= V \\ \frac{V_{va}}{V} + \frac{V_L}{V} &= 1 \\ \alpha_{va} + \alpha_L &= 1 \\ \alpha_L &= 1 - \alpha_{va} \end{aligned}$$

Konečne pomocou posledného riadku a vzťahu 1.14 je získaná výsledná rovnica:

$$\rho = \alpha_{va} \rho_{va} + (1 - \alpha_{va}) \rho_L \quad (1.15) \quad \rho = \alpha \rho_{va} + (1 - \alpha) \rho_L \quad (1.16)$$

Ďalej podľa oprávneného predpokladu, kedy $\rho_{va} \ll \rho_L$ je možné zapísať približný tvar rovnice 1.16:

$$\rho^* \approx (1 - \alpha) \rho_L^* \quad (1.17)$$

Potom pre bezrozmernú hustotu, ktorá je získaná podelením hustotou kvapaliny proti prúdu pred kontrakciou, je získaný výsledný vzťah:

$$\rho \approx (1 - \alpha) \quad (1.18)$$

Ako už bolo spomenuté, interakcia medzi bublinami a prúdením tekutiny je v tomto prípade riešená pomocou upravenej Rayleigh-Plessetovej rovnice, ktorá určuje vzťah medzi tlakom (v tomto prípade bezrozmerným tlakovým koeficientom C_p) a polomerom kavitačnej bubliny R v tvare:

$$R \frac{D^2 R}{Dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{DR}{Dt} \right)^2 + \frac{\sigma}{2} (1 - R^{-3k}) + \frac{4}{Re} \frac{1}{R} \frac{DR}{Dt} + \frac{2}{We} (R^{-1} - R^{-3k}) + \frac{1}{2} C_p = 0 \quad (1.19)$$

kde výraz $\frac{D}{Dt}$ zastupuje substanciální (materiálovú) deriváciu, k je polytropický exponent a σ zastupuje *kavitačné číslo* podľa:

$$\sigma = \frac{p_s^* - p_{va}^*}{\frac{1}{2} \rho_L^* u_s^{*2}} \quad (1.20)$$

ďalej bezrozmerné Reynoldsovo Re a Weberovo We číslo:

$$Re = \frac{\rho_L^* u_s^* R_s^*}{\mu_E^*} \quad (1.21) \quad We = \frac{\rho_L^* u_s^{*2} R_s^*}{S^*} \quad (1.22)$$

kde S^* predstavuje povrchové napätie rozhrania kvapalina/plyn a μ_E^* je efektívna viskozita.

Ďalej v práci [46] a rovnako aj v [6], je metódou Runge-Kutta riešená sústava rovníc 1.9, 1.10 a 1.19 pre stacionárne prúdenie s konštantným hmotnostným tokom. Čo znamená, že parciálne derivácie podľa času: $\frac{\partial}{\partial t} = 0$. Tým sa sústava mení na systém obyčajných diferenciálnych rovníc s jednou nezávislou premennou x :

$$(1 - \alpha) u A = \text{konšt} \quad (1.23)$$

$$u \frac{du}{dx} = - \frac{1}{2(1 - \alpha)} \frac{dC_p}{dx} \quad (1.24)$$

$$R \left(u^2 \frac{d^2 R}{dx^2} + u \frac{du}{dx} \frac{dR}{dx} \right) + \frac{3u^2}{2} \left(\frac{dR}{dx} \right)^2 + \frac{\sigma}{2} (1 - R^{-3k}) + \frac{4}{Re} \frac{u}{R} \frac{dR}{dx} + \frac{2}{We} (R^{-1} - R^{-3k}) + \frac{1}{2} C_p = 0 \quad (1.25)$$

S okrajovými podmienkami:

$$R(x=0) = 1, \quad u(x=0) = 1, \quad C_p(x=0) = 0 \quad (1.26)$$

Kontrakcia potrubia sa riadi vzťahom:

$$A(x) = \begin{cases} \sqrt{1 + \frac{1}{2} C_{pmin} \left[1 - \cos \left(\frac{2\pi x}{L} \right) \right]}, & \text{pre } 0 \leq x \leq L \\ 1, & \text{pre } x < 0 \text{ a } x > L \end{cases} \quad (1.27)$$

Použitý profil tvorí minimálny tlakový koeficient C_{pmin} v strede kontrakčnej oblasti.

Riešenie pre päť rôznych počiatkových parných zlomkov α_s je zobrazené v grafoch na obrázkoch 1.15 až 1.18, kde sú vykreslené závislosti bezrozmernej rýchlosti: $u = \frac{u^*}{u_s^*}$, tlakového koeficientu C_p , parného zlomku α a bezrozmerného polomeru kavitačnej bubliny: $R = \frac{R^*}{R_s^*}$ na bezrozmernej súradnici podľa vzťahu: $x = \frac{x^*}{R_s^*}$ pre prúdení v potrubí s kontrakciou podľa obrázku 1.13.

Použité konštanty:

k	1,4	—
R_s^*	100	μm
ρ_L^*	1000	kg/m^3
μ_L^*	0,001	Ns/m^2
S^*	0,073	N/m
u_s^*	10	m/s
σ	0,8	—
C_{pmin}	-1	—
Re	1000	—
We	137	—
L	500	—
μ_E^*	0,03	Ns/m^2

V prípade počiatočného parného zlomu, kedy $\alpha = 0$ ide o modelovanie prúdenia bez vplyvu stlačiteľnosti (bez obsahu bublín).

So zvýšením počiatočného parného zlomku na hodnotu $\alpha_s = 2 \cdot 10^{-6}$ je v grafoch 1.15 a 1.16 viditeľná okamžitá zmena charakteru priebehu rýchlosti a tlaku. Pulzovanie kavitačných bublín v radiálnom smere vytvára fluktuácie rýchlosti po prúde za kontrakciou. So zvyšujúcim sa podielom parnej fázy sa zvyšuje aj vlnová dĺžka (znižuje frekvencia) a amplitúda kmitu.

Pri zvýšení počiatočného objemu parnej fázy na určitú hodnotu (v tomto prípade $\alpha = 2,862 \cdot 10^{-6}$ nastáva vo vývoji prúdenia bifurkačný bod. Je to medza, kedy prechádza prúdenie z režimu tzv. kvázi-staticky stabilného prúdenia do oblasti tzv. kvázi-staticky nestabilného prúdenia.

Pre kvázi-staticky stabilné prúdenie platí, že rýchlosť sa po dokmitaní blíži k svojej pôvodnej ustálenej hodnote. To platí aj v prípade tlaku, resp. tlakového koeficientu, ktorý je však oproti pôvodnej hodnote znížený o tzv. kavitačnú tlakovú stratu. Ide o stratu tlmením, spôsobenú kmitaním bublín v radiálnom smere, súčasne predstavuje jedinú zložku tlmenia systému v predstavenom matematickom modeli.

V prípade kvázi-staticky nestabilného ($\alpha > 2,862 \cdot 10^{-6}$) prúdenia nastáva rast bez-rozmernej rýchlosti nad všetky medze. Toto správanie je podmienené dodržaním zákona zachovania hmotnosti prúdenia zmesi, to znamená, že zväčšovanie objemu kavitačných bublín zvyšuje rýchlosť prúdenia spolu so znižovaním tlakového koeficientu, podľa Bernoulliho rovnice. Zníženie tlaku sa prejaví vo výsledku Rayleigh-Plessetovej rovnice rastom polomeru bublín podľa obrázku 1.18.

Graf na obrázku 1.17 predstavuje vývoj parného zlomku $\alpha(x)$ v závislosti na bez-rozmernej súradnici. V oblasti nadkritickej hodnoty počiatočného parného zlomku α_s nadobúda $\alpha(x)$ hodnôt blížiacich sa k jednej. Čo znamená vytvorenie oblasti sýtej pary v takmer celej oblasti po prúde za kontrakciou. V tejto oblasti je podľa predstaveného modelu tak isto viditeľný aj rast rýchlosti, resp. pokles tlaku. Znamená to však, že použitý model neposkytuje korektné fyzikálne výsledky, keďže jedným zo základných predpokladov Rayleigh-Plessetovej rovnice je dynamika izolovanej kavitačnej bubliny vo veľkej vzdialenosti od stien nádoby. [6]

Prechod medzi kvázi-staticky stabilným a kvázi-staticky nestabilným prúdením sa dá odvodiť z rovnice 1.25. Podľa obrázku 1.18 je vidieť, že bifurkačný bod nastáva v prípade, keď polomer bublín dosiahne kritickej hodnoty: R_c . V takomto prípade platí: $\frac{dR}{dx} = 0$ a tiež $\frac{d^2R}{dx^2} = 0$ a rovnica 1.25 prechádza do tvaru:

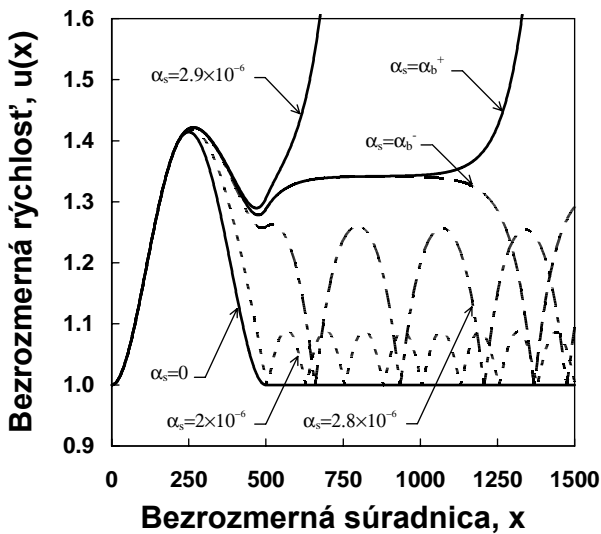
$$\frac{2}{We} (R_c^{-1} - R_c^{-3k}) + \frac{\sigma}{2} (1 - R_c^{-3k}) + \frac{1}{2} C_{Pc} = 0 \quad (1.28)$$

Kde R_c je kritický polomer kavitačných bublín a C_{Pc} je prislúchajúca kritická hodnota tlakového koeficientu.

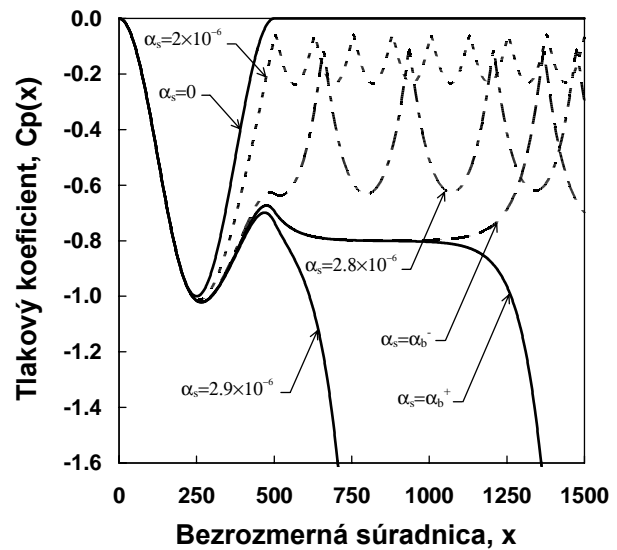
Z rovnice 1.28 je možné po úprave, oprávnenom predpoklade: $1 \ll R_c$ a zanedbaní malých členov získať vzťah, ktorý približne určuje hodnotu kritického polomeru bubliny:

$$R_c \approx \left(\frac{\sigma}{2\alpha_b} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1.29)$$

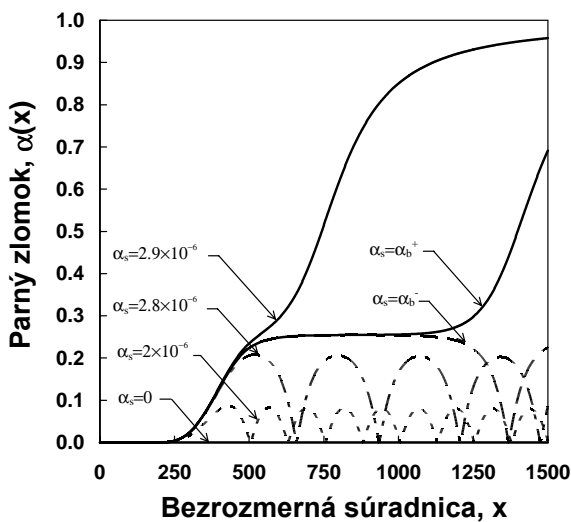
Kde α_b je kritická hodnota parného zlomku, pri ktorom sa vyskytuje bifurkácia.



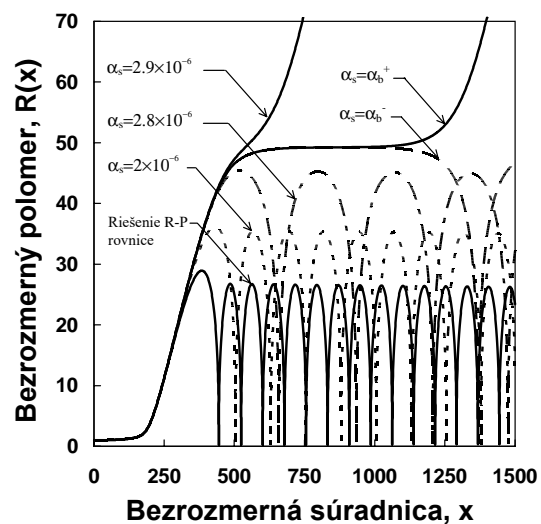
Obr. 1.15: Závislosť bezrozmernej rýchlosti na polohe (upravené), zdroj: [46]



Obr. 1.16: Závislosť tlakového koeficientu na polohe (upravené), zdroj: [46]



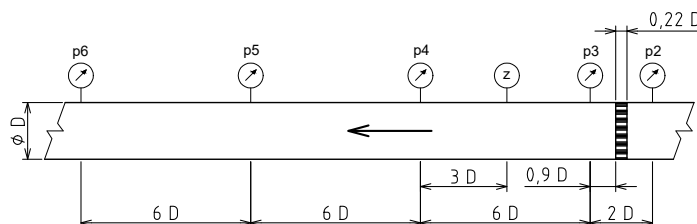
Obr. 1.17: Závislosť parného zlomku na polohe (upravené), zdroj: [46]



Obr. 1.18: Závislosť polomeru bubliny na polohe (upravené), zdroj: [46]

1.6 Statické charakteristiky

Predkladaná diplomová práca je priamym nadviazaním na bakalársku prácu [22], ktorej hlavným cieľom bolo experimentálne stanovenie statických charakteristík piatich kavitačných cloniek pre rôzny počet otvorov. Počet, priemery a usporiadanie otvorov je schematicky uvedené na obrázku 1.20². V tejto kapitole, sú preto zhrnuté experimentálne výsledky, ktorých meranie prebiehalo na testovacom okruhu so zapojením tlakových snímačov podľa obrázku 1.19 [22]. V plexisklovej časti trate je inštalovaných 5 tlakových snímačov typu BD a jeden snímač zrýchlenia po celej dĺžke trubice, aby bolo možné pozorovať vývoj stratového súčiniteľa a dynamiky prúdenia.



Obr. 1.19: Zapojenie tlakových snímačov na plexisklovej trubici, $D = 50 \text{ mm}$ (upravené) [22].

Boli vyhodnocované clony s 1, 9, 16 a 36 otvormi, pričom clona s deviatimi otvormi bola testovaná s dvomi geometrickými usporiadaniami otvorov: usporiadanie do štvorca a do kruhu. Clony boli navrhnuté tak, aby spĺňali podmienku konštantnej prietocnej plochy (približne 452 mm^2).



Obr. 1.20: Kavitačné clony s rôznym počtom otvorov spĺňajú podmienku konštantnej prietocnej plochy (upravené) [22]

S pojmom statických charakteristík je spájaná závislosť miestneho súčiniteľa strát ξ_m podľa vzťahu 1.30 na kavitačnom čísle σ [22],[12],[36]:

$$\xi_m = \frac{p_2 - p_3}{\rho \frac{v^2}{2}} \quad (1.30)$$

Ide o bezrozmerný koeficient súvisiaci so stratovou mernou energiou, ktorá je dôsledkom miestneho tlakového odporu v tvare: $Y_z = \xi_m \cdot \frac{v^2}{2}$. Pričom p_2 a p_3 sú hodnoty statického tlaku v odberných miestach tlakových snímačov pred resp. za kavitačnou clonou (podľa obrázku 1.19). Tiež je dôležité určiť k akému prierezu je vzťahovaná priemerná prierezová

²Výrobné výkresy všetkých testovaných cloniek sú v prílohe práce [22]

rýchlost \bar{v} . V prácach [22], [37] je ako konštantná referenčná prierezová plocha stanovená prietočná plocha clony.

V prípade armatúr potrubného systému sa častejšie používa závislosť *prietokového súčiniteľa* K_v podľa vzťahu 1.31 v závislosti na *kavitačnom čísle*, alebo na *pomernom otvorení ventilu* z^* .

$$K_v = Q \cdot \sqrt{\frac{\frac{\rho}{\rho_{20^\circ C}}}{\frac{\Delta p}{\Delta p_{1bar}}}} \quad (1.31)$$

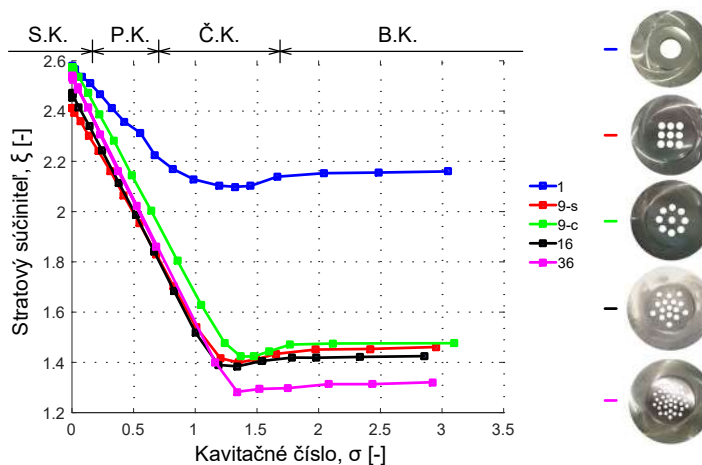
V prácach [22], [12] a [36] je venovaná pozornosť práve závislosti *miestneho súčiniteľa strát* na *kavitačnom čísle* (výhodou tohto je, že oba parametre sú bezrozmerné).

Z obrázku 1.21 je zrejماً jasná závislosť *stratového súčiniteľa* na počte otvorov v clone. V tomto prípade je *stratový súčiniteľ* definovaný vzťahom pre konkrétne odberné miesta tlaku, tomu zodpovedá aj určenie *kavitačného čísla* podľa obr.: 1.19:

$$\xi_m = \frac{p_2 - p_3}{\rho \frac{\bar{v}^2}{2}} \quad (1.32) \quad \sigma = \frac{p_3 - p_{va}(t)}{\rho \frac{\bar{v}^2}{2}} \quad (1.33)$$

Vo všetkých režimoch prúdenia, teda pre kavitačnú aj bezkavitačnú oblasť je tu viditeľný výrazný pokles strát pre clony s vyšším počtom otvorov v porovnaní s jednootvorovou clonou. V bezkavitačnej oblasti je pokles strát medzi clonu s jedným otvorom a tridsaťšesť otvorovou clonou na úrovni 60% [37]. S klesajúcim *kavitačným číslom*, teda pri narastaní prietoku, sa tento rozdiel znižuje.

Taktiež je tu možné vidieť konštantný priebeh *stratového súčiniteľa* pre všetky clony v bezkavitačnej oblasti. Po prechode do nižších kavitačných čísiel v oblasti plno vyvinutej kavitácie a superkavitácie so znižovaním *kavitačného čísla* *stratový súčiniteľ* lineárne narastá.



Obr. 1.21: Závislosť stratového súčiniteľa na kavitačnom čísle, čísla v legende grafu označujú počet otvorov v kavitačnej clone, pri dodržaní konštantnej prietočnej ploche, (upravené). [22], [37]

Podobne ako pri strhávacej skúške vodnej turbíny, kedy tesne pred poklesom účinnosti nastáva (vplyvom nukleácie bublín na pevných povrchoch) jej mierny nárast v rádoch jednotiek percent (a teda zníženie strát) [9], tak aj v prípade kavitačných clôn v potrubnom

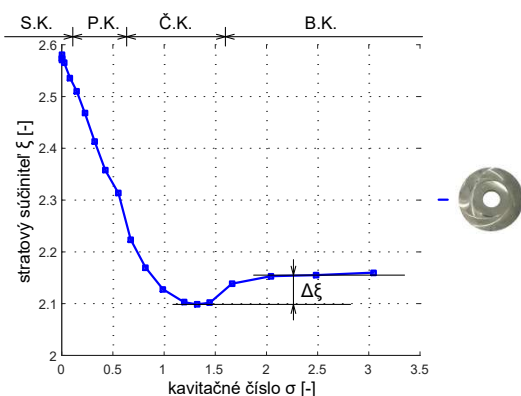
systeme môžeme pozorovať analogické správanie *stratového súčiniteľa* (vzťah 1.30). Na obrázku 1.22 je toto zobrazené pre clonu s jedným otvorom, pre ktorú je pokles *stratového súčiniteľa* najvýraznejší. Z relatívneho hľadiska pri zavedení bezrozmerného parametra:

$$\frac{\xi_{B.K.}}{\Delta\xi} \quad (1.34)$$

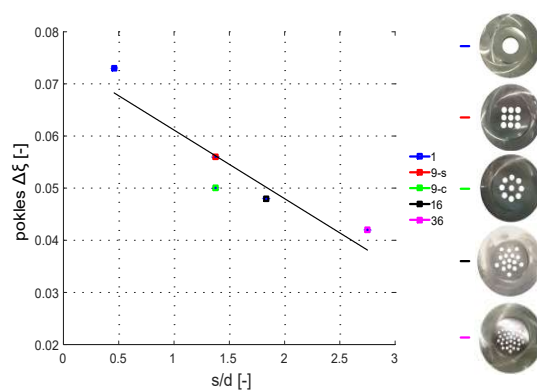
kde $\xi_{B.K.}$ je hodnota *stratového súčiniteľa* v bezkavitačnej oblasti a $\Delta\xi$ je maximálny pokles *stratového súčiniteľa* v oblasti počiatkovej kavitácie je ukázané [37], že tento pokles predstavuje hodnotu približne $\frac{\xi_{B.K.}}{\Delta\xi} = 3,5\%$ pre všetky kavitačné clony.

Pre porovnanie rôzneho poklesu *stratového súčiniteľa* u jednotlivých cloniek je možné zaviesť bezrozmerný parameter, ktorý je určený podielom hrúbky clony „s“, k priemeru otvorov v clone „d“. Táto závislosť je zobrazená na obrázku 1.23 [22],[37], ktorý zachytáva lineárnu zmenu $\Delta\xi$ s pomerom s/d .

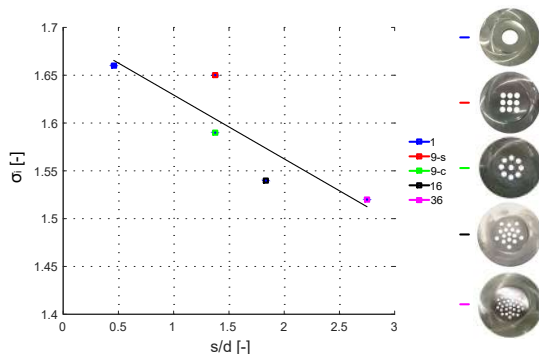
Rovnakým bezrozmerným parametrom je vhodné zachytiť aj lineárnu závislosť *kritického kavitačného čísla* 1.6 pre všetky kavitačné clony. V tomto prípade je *kritické kavitačné číslo* stanovené vizuálnym pozorovaním clony cez plexisklovú trubicu (obr. 2.2), tzn. že o tom, či je dosiahnuté kavitačné režimu, je rozhodnuté na základe individuálneho pozorovania vzniku kavitačných bublín.



Obr. 1.22: Pokles strat. súč. pre jednotvornú clonu (upravené) [37]



Obr. 1.23: Závislosť poklesu strat. súč. na počte otvorov (upravené) [22],[37]



Obr. 1.24: Závislosť kritického kavitačného čísla na počte otvorov (upravené) [37]

Podobnou problematikou ako v prípade [22] sa zaoberá aj práca [16], kde sú experimentálne zisťované statické charakteristiky kavitačných cloniek, ktorých prietokový prierez je definovaný fraktálnou geometriou (viď obrázok 1.25), pričom je dodržaná podmienka konštantnej svetlosti cloniek a súhlasí s prietokovou plochou v práci [22].



Obr. 1.25: Kavitačné clony vytvorené pomocou fraktálnej geometrie s dodržaním podmienky konštantnej svetlosti s clonami z práce [22] (upravené), zdroj: [16]

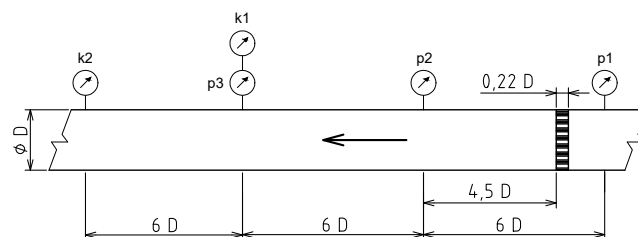
V práci [16] je používaná testovacia trať s plexisklovou trubicou (viď obrázok 1.26) s iným umiestnením tlakových snímačov, ako v prípade [22]. Preto nemôžu byť porovnávané absolútne hodnoty *stratového súčiniteľa* z grafu 1.21 a 1.27.

Na obrázku 1.27 je zobrazené porovnanie pre kavitačnú clonu s jedným otvorom a dve clony s fraktálnou geometriou. V tomto prípade je *stratový súčiniteľ* a *kavitačné číslo* definované z tlakových odberov trubice na obrázku 1.26:

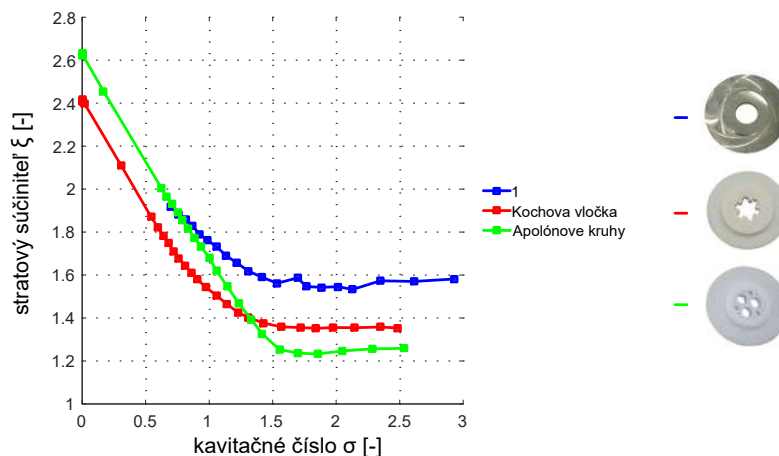
$$\xi_m = \frac{p_1 - p_2}{\rho \frac{\bar{v}^2}{2}} \quad (1.35)$$

$$\sigma = \frac{p_2 - p_{va}(t)}{\rho \frac{\bar{v}^2}{2}} \quad (1.36)$$

Táto charakteristika bola v záujme opakovateľnosti a reprodukovateľnosti metodiky experimentu overená opätovným premeraním aj autorom tejto práce na identickom testovacom okruhu. Zhoda s meraniami z práce [16] je veľmi dobrá a bol tak potvrdený dobrý postup pri meraní a spracovaní výsledkov merania. Viditeľný je pokles strát v bezkavitačnej oblasti v porovnaní s jednootvorovou clonou o 14,5% pre geometriu s Kochovou vložkou a o 20,5% pre geometrické usporiadanie s Apolónovými kruhmi.



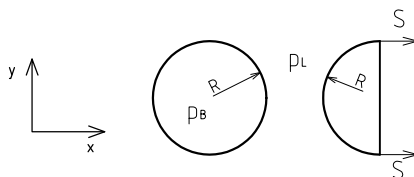
Obr. 1.26: Plexisklová trubica testovacieho okruhu používaná v práci [16], $D = 50 \text{ mm}$ (upravené)



Obr. 1.27: Závislost stratového súčiniteľa na kavitačnom čísle pre fraktálne clony, opakované meranie podľa [16]

1.6.1 Vplyv obsahu vzduchu

Pri stanovovaní statických charakteristík je v práci [22] preukázaný aj vplyv koncentrácie rozpusteného vzduchu na priebeh statickej charakteristiky, konkrétne na hodnotu *počítačného kavitačného čísla*, σ_i (okamih *počiatočnej kavitácie* je v tomto prípade stanovený vizuálne holým okom - objavenie prvých kavitačných bublín).



Obr. 1.28: Statická rovnováha kavitačnej bubliny s polomerom R

Podľa obrázku 1.28 musí pre silovú rovnováhu v smere osi x platiť [38]:

$$\pi R^2 p_L + S 2\pi R - \pi R^2 p_B = 0$$

$$R p_L + 2S - R p_B = 0$$

$$p_L - p_B + \frac{2S}{R} = 0$$

$$p_B - p_L = \frac{2S}{R} \quad (1.37)$$

Kde R je polomer bubliny a S v tomto prípade značí povrchové napätie rozhrania dvojice bublina/kvapalina (výraz $\frac{2S}{R}$ býva označovaný ako kapilárny tlak). V prípade ak je v objeme bublín okrem nasýtených pár aj rozpustený plyn, je možné podľa Daltonovho zákona o parciálnych tlakoch písať:

$$p_B = p_G + p_{va} \quad (1.38)$$

kde p_G je parciálny tlak plynu a p_{va} označuje parciálny tlak nasýtených pár kvapaliny. Potom je možné rovnicu 1.37 prepísať do tvaru:

$$p_G + p_{va} - p_L = \frac{2S}{R} \quad (1.39)$$

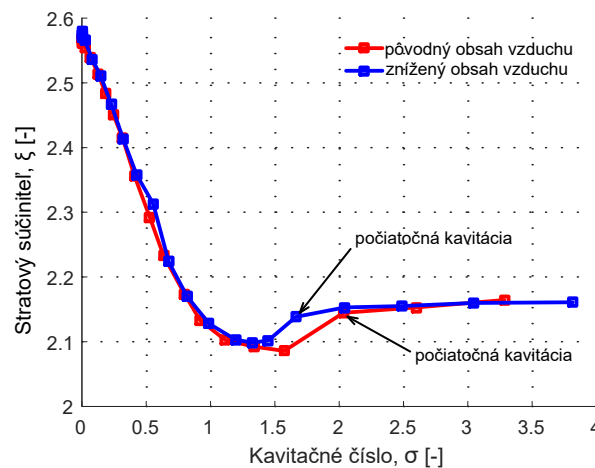
Pri vzniku kavitácie, kedy prichádza k znižovaniu tlaku, je hodnota Δp označovaná ako ťahové napätie kvapaliny. Jeho veľkosť je získaná zo vzťahu [4]:

$$\Delta p = p_{va} - p \quad (1.40)$$

kde p je hodnota tlaku v kvapaline. Kritická hodnota ťahového napätia kvapaliny Δp_C je hodnota, kedy prichádza k rastu bublín. Dosadením rovnice 1.39 do výrazu 1.40 je získaná závislosť kritického ťahového napätia kvapaliny:

$$\Delta p_C = \frac{2S}{R} - p_G \quad (1.41)$$

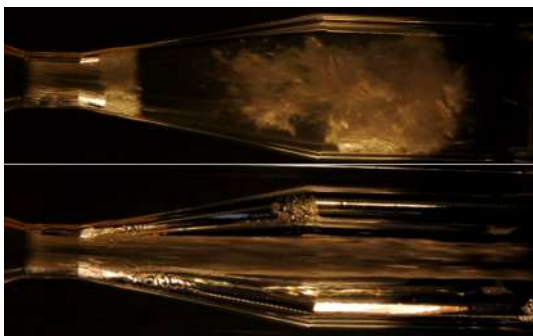
čo znamená, že rozpustený vzduch znižuje hodnotu potenciálneho kritického ťahového napätia kvapaliny. [4]



Obr. 1.29: Vplyv obsahu vzduchu na počiatok kavitácie (upravené) [22]

1.7 Dynamické charakteristiky

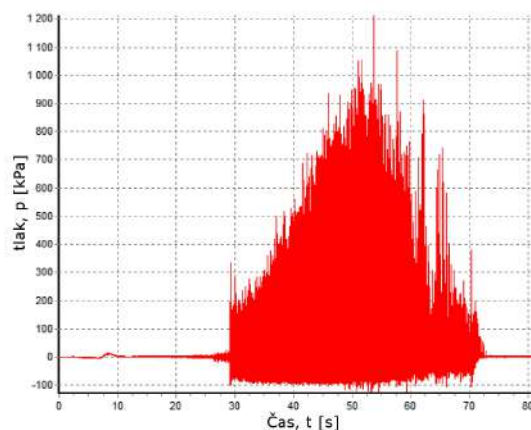
Dynamické charakteristiky kavitačného prúdenia sú vyhodnocované aj v prípade [12], kedy sú okrem statických charakteristík rôznych kavitačných trysiek, zisťované aj frekvencie tlakových pulzácií v dôsledku vzniku a zániku vírových krúžkov, a tiež frekvencie nestability vodného lúča v prípade rôznych druhov kavitačných trysiek (obrázok: 1.30).



Obr. 1.30: Tvorba vírového krúžku a paprsku v kavitačnej tryske (upravené) [12]

V práci [12] bola potvrdená očakávaná skutočnosť pri znižovaní *kavitačného čísla* (zvyšovaním prietoku) a síce, že so zväčšujúcim sa podielom parnej fázy v hydraulickom okruhu sa frekvencia tlakových pulzov znižuje, čo bolo potvrdené aj obrazovou analýzou - viď podkapitola 1.7.1.

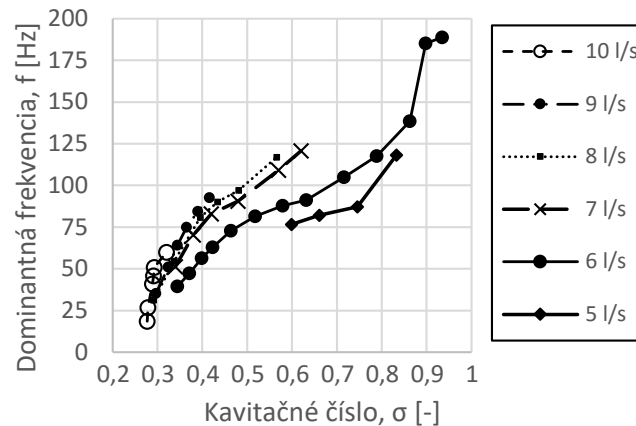
Ďalej je v tejto práci sústredený pohľad na tzv. dynamickú skúšku kavitačnej trysky podobným spôsobom ako aj v tejto práci (metodika merania viď kapitola 2.2 a 3.1). V grafe na obrázku 1.31 je zobrazená časová závislosť vývoja amplitúd z relatívneho tlakového snímača typu Kistler umiestneného za kavitačnou tryskou. Je viditeľný nárast amplitúd tlaku spolu s rastúcim prietokom až do oblasti *plno vyvinutej kavitácie*, kde maximálne tlakové špičky dosahujú hodnoty približne 1200 kPa relatívneho tlaku. Ďalším zvyšovaním prietoku kavitačný režim prechádza približne v sedemdesiatej sekunde do *superkavitácie*, čím odberné miesto tlaku prechádza do oblasti sýtych pár.



Obr. 1.31: Závislosť tlakových pulzov na čase, získané zo snímača typu Kistler za kavitačnou tryskou pri dynamickkej skúške, zdroj: [12] (upravené)

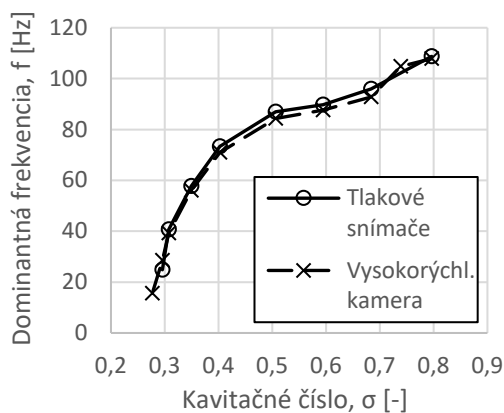
O experimentálnom testovaní kavitačných trysiek s premennou hodnotou statického tlaku v hydraulickom okruhu je pojednané v práci [19]. Pribeh závislosti dominantných frekvencií na *kavitačnom čísle* pri konštantnej hodnote prietoku, pričom parametrom je hodnota statického tlaku, je v grafe na obrázku 1.32. Tu je možné si všimnúť, že s rastúcim prietokom narastá aj strmlosť jednotlivých kriviek. Čo znamená, že pri zvolenej konštantnej hodnote *kavitačného čísla* môžu byť pozorované rôzne hodnoty frekvencií kavitačných

tlakových pulzov v závislosti od veľkosti prietoku. S rastúcou hodnotou prietoku rastie aj dominantná frekvencia spektra.

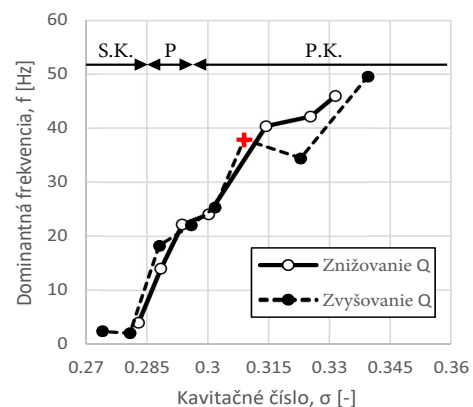


Obr. 1.32: Priebeh dominantných frekvencií pri konštantnom prietoku pre rôznu statickú tlak v hydraulickom okruhu (upravené) [19]

1.7.1 Využitie obrazovej analýzy



Obr. 1.33: Závislosť dominantných frekvencií kavitačnej trysky na kavitačnom čísle, porovnanie tlakových snímačov a obrazového spracovania (upravené) [19]



Obr. 1.34: Použitie obrazovej analýzy pri preukazovaní hysterézneho správania kavitácie v kavitačnej tryske, S.K. - superkavitácia, P - prechodová oblasť, P.K. - plno vyvinutá kavitácia (upravené) [20]

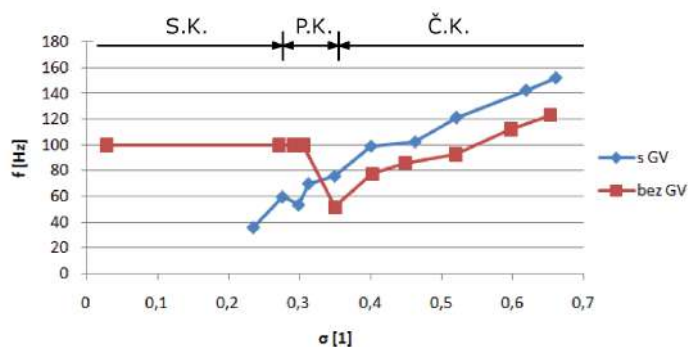
Možnosťou pre zisťovanie dynamiky kavitujúceho prúdenia je aj obrazové spracovanie signálu pomocou vyhodnocovania intenzity pixelov (viď podkapitulu 1.9.5). Uplatnenie tejto metódy je možné, samozrejme len pri priehľadnom potrubí, ktoré je ďalej nutné vhodným spôsobom osvetliť (viď obrázok C.1). Identifikácia kavitácie je založená na rozdielnom uhle lomu svetla pri prechode cez prostredia s rôznou optickou hustotou, vďaka čomu je možné opticky pozorovať parné štruktúry v kvapaline. Nespornou výhodou je jednoznačná možnosť identifikácie dominantných frekvencií súvisiacich s kavitáciou, keďže sú

v tomto prípade vyhodnocované len frekvencie dejov zachytených na videozázname (odtrhание vírových krúžkov, pulzovanie kavitačného mraku,...). Týmto je možné z frekvenčného spektra jednoznačne vylúčiť dominantné frekvencie sprievodných javov (frekvencia otáčania motoru, lopatková frekvencia čerpadla, vlastné kmity potrubia,...)[22], [36], [20], [19].

Príkladom použitia pri overovaní dominantných frekvencií získaných z tlakových snímačov (viď. obrázok 1.33) môže byť napríklad práca [19], kde sa zhoda obrazového spracovania a tlakových snímačov pohybovala s chybou maximálne 4%.

Ďalším príkladom použitia obrazového spracovania intenzity pixelov je v práci [20], kde bol pokus pomocou FFT intenzity pixelov o preukázanie hysterézneho správania sa kavitácie medzi stavom, kedy sa prietok kavitačnou tryskou zvyšuje, resp. znižuje. Táto metóda sa však v tomto prípade neosvedčila a nebolo možné touto metódou hysterézne správania preukázať.

Rovnaká metóda spracovania obrazu je použitá aj v prípade [12], kde je zisťovaná frekvencia odtrhania vírových krúžkov v difúzorovej časti kavitačnej trysky pre oblasť čiastočne vyvinutej kavitácie. V tomto prípade bol okrem závislosti dominantnej frekvencie tvorby vírových krúžkov na kavitačnom čísle testovaný aj vplyv prúdenia s určitou mierou predrotácie na vstupe do kavitačnej trysky. Pred meranú sekciu bol zaradený generátor víru (GV) [12], ktorý prúdeniu vnucoval okrem axiálnej aj tangenciálnu zložku rýchlosti. Táto závislosť je zobrazená na obrázku 1.35 pre oba testované prípady (s generátorom víru, a bez predradeného generátora víru).



Obr. 1.35: Závislosť dominantnej frekvencie odtrhania vírových krúžkov na kavitačnom čísle s generátorom víru a bez predradeného generátora víru získaných z vysokorýchlostnej kamery (upravené) [12]

Na obrázku 1.35 je zjavný nárast dominantných frekvencií v prípade prúdenia s generátorom víru pre celú kavitačnú oblasť približne o 30 Hz. Ďalej je tu potvrdený pokles dominantných frekvencií spojených s kavitačnými javmi so zvyšujúcim sa podielom parnej fázy v testovacom okruhu.

V tejto súvislosti je ďalej dôležité upozorniť na pravdepodobne zlú interpretáciu výsledkov v práci [12] v prípade prúdenia bez GV, ktorá vyplýva z výsledkov v praktickej časti tejto práce ďalej zobrazených na obrázku 2.5. Pre nízke kavitačné čísla zodpovedajúce plno vyvinutej kavitácii a superkavitácii, je viditeľný nárast dominantných frekvencií získaných z obrazovej analýzy. Tento jav je pravdepodobne spojený s propagáciou frekvencie osvetlovacích diód do frekvenčného spektra, čo vyplýva z výsledkov tejto práce podľa obrázku 2.5.

1.7.2 Mechanická analógie

Kvalitativnu predstavu o priebehu dominantných frekvencií kavitujúceho prúdenia ponúka porovnanie s jednodotovým systémom s vlastným kmitaním pri uvažovaní hmotnosti telesa m , tlmenia tlmíča b a tuhosti pružiny k . Riešením obyčajnej homogénnej diferenciálnej rovnice druhého rádu vychádzajúcej z rovnováhy síl pôsobiacich na kmitajúce teleso, je možné získať vlastné čísla ($s = \alpha + i\omega$) riešenia prenosu diferenciálnej rovnice v tvare:

$$s_{1,2} = -\frac{b}{2m} \pm i\sqrt{\frac{k}{m} - \frac{b^2}{4m^2}} \quad (1.42)$$

ak je tlmenie v riešení zanedbané, a teda $b = 0$, potom vlastná frekvencia netlmeného kmitania:

$$\Omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1.43)$$

Ďalšou úpravou po zavedení kritického útlmu b_{kr} je možné pracovať s bezrozmerným parametrom, ktorým je pomerný útlm b_p :

$$b_{kr} = 2m\Omega_0 \quad (1.44) \quad b_p = \frac{b}{b_{kr}} \quad (1.45)$$

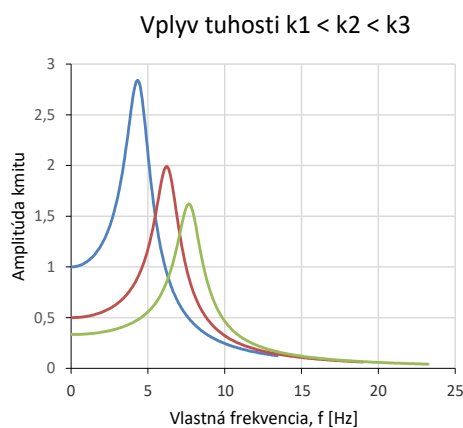
Následne sú vlastné čísla prenosu v tvare:

$$s_{1,2} = -b_p\Omega_0 \pm i\Omega_0\sqrt{1 - b_p^2} \quad (1.46)$$

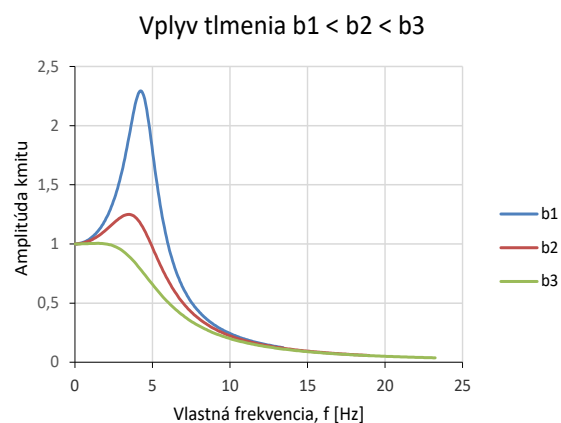
z čoho vyplýva aj vlastná frekvencia tlmeného kmitania:

$$\Omega_t = \Omega_0\sqrt{1 - b_p^2} \quad (1.47)$$

Z rovníc 1.43 a 1.47 je zrejmé, že so znižovaním tuhosti systému, resp. zvyšovaním tlmenia, prichádza k znižovaniu vlastnej frekvencie sústavy. V prípade kavitujúceho prúdenia je tento vplyv tuhosti a tlmenia zastúpený podielom parnej fázy v okruhu.



Obr. 1.36: Vplyv zmeny tuhosti na vlastnú frekvenciu kmitania jednodotového systému



Obr. 1.37: Vplyv zmeny tlmenia na vlastnú frekvenciu kmitania jednodotového systému

1.8 Meranie tlaku

Meranie tlaku je v technickej praxi, či už v priemyselnej prevádzke alebo laboratórnych podmienkach veľmi častá úloha. Tlakomery môžu byť rozdelené podľa niekoľkých základných hľadísk:

1. Podľa veľkosti meraného tlaku
2. Podľa definičných vzťahov a uplatneného fyzikálneho princípu
 - kvapalinové
 - zvonové
 - piestové
 - deformačné
 - elektrické
3. Podľa primárnej a sekundárnej metódy merania
 - primárna metóda merania
 - sekundárna metóda merania
4. Podľa stupňa presnosti
 - prevádzkové
 - kontrolne
 - laboratórne

Rozsiahlejším rozdelením, vysvetlením a príkladom použitia sa venujú najmä práce: [8], [5] [41]. Táto kapitola sa bližšie venuje len charakteristike tlakomerov používaných v experimentálnej časti tejto práce.

1.8.1 Piezoelektrické tlakomery

V tomto type tlakových snímačov sa využíva piezoelektrického javu, ktorého princípom je elektrická polarizácia polykryštalického dielektrika (piezokeramika, kremeň), ktorá vzniká mechanickou deformáciou prostredníctvom pôsobiacej sily na piezoelement. V tomto stave sa snímač chová ako generátor náboja, ktorý je prevádzaný na napätie a zosilovaný. Takýto typ snímačov sa vyznačuje malými rozmermi s možnosťou použitia v prostredí s vysokými teplotami (až do 500°C). Sú vhodné pre meranie neustálených (časová odozva v rádoch mikrosekúnd) a dynamických dejov, keďže majú vysoké hodnoty vlastných frekvencií. Prakticky nie sú schopné merať statický tlak. [8], [2] [41]

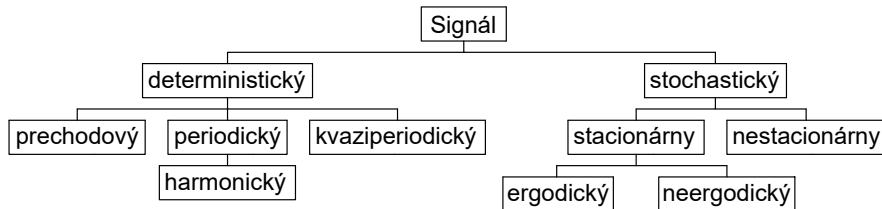
1.8.2 Piezorezistívne tlakomery

Sú snímače tlaku využívajúce piezorezistívny materiál pomocou ktorého sú schopné prevádzať pôsobiaci tlak na zmenu odporu. Využívajú pritom princíp piezorezistívneho javu, kedy sa pôsobením mechanického namáhania menia geometrické rozmery a tým aj odpor piezorezistívneho prvku. Pomocou piezorezistívnych tlakomerov je možné merať aj statický tlak. [8] [41]

1.9 Analýza a spracovanie signálu

Signálom sa obecné v technickej praxi chápe závislosť meranej fyzikálnej veličiny na nezávislej premennej, ktorú predstavuje čas. Zaznamenávaná fyzikálna veličina závisí od

popisovaného javu a technických možností, najčastejšie sú to signály elektrické, elektromagnetické, optické, akustické, hydraulické, Pri klasifikácii signálu v závislosti na čase, je možné hovoriť o deterministickom signále, teda o signále, ktorý je daný presným matematickým popisom. Ďalej sú to signály stochastické, ktorých spracovanie a vyhodnocovanie je náplňou tejto práce (viď obrázok 1.38). [44] [8]



Obr. 1.38: Rozdelenie signálov podľa ich priebehu (upravené) [44]

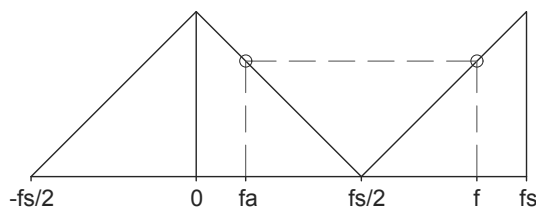
1.9.1 Vzorkovanie

Prevod signálu spojitého na diskretný sa nazýva vzorkovanie. Táto operácia vyžaduje naplnenie niekoľkých podmienok. Asi najsilnejšou podmienkou zostáva voľba vzorkovacej frekvencie f_s (eng.- *sampling frequency*) podľa Nyquistovho teorému (tiež nazývaný Shannon-Nyquistov, alebo Shannon-Kotelnikov teorém). Tento vyjadruje najmenšiu možnú použitú vzorkovaciu frekvenciu:

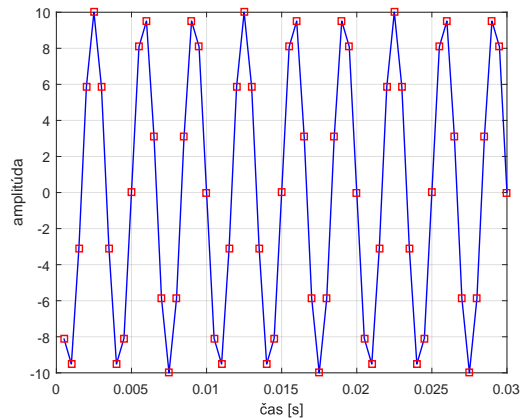
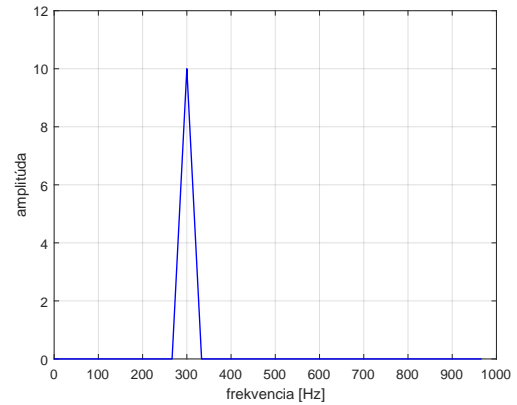
$$f_s \geq 2f_{max} \quad (1.48)$$

V rovnici 1.48 vyjadruje f_{max} maximálnu hodnotu postihnuteľnej frekvencie. V prípade nedodržania prichádza k strate informácií, vzniku tzv. aliasingu.

Tento jav je zobrazený nižšie, podľa [44] [27], kde je vykreslený umelo vytvorený signál v podobe periodickej funkcie $\sin(2\pi ft)$ s amplitúdou $a_1 = 10$, kde $f_s = 2$ [kHz], pričom frekvencia v predpise periodickej funkcie $f = 1,7$ [kHz]. Výsledná frekvencia signálu je zdeformovaná na hodnotu: $f_a = 2 - 1,7 = 0,3$ [kHz]. V tomto prípade je teda frekvencia f_a získaná z FFT symetricky odzrkadená podľa Nyquistovej frekvencie, ktorej hodnota: $f_N = \frac{1}{2}f_s$ oproti reálnej frekvencii signálu.



Obr. 1.39: Grafické znázornenie aliasingu

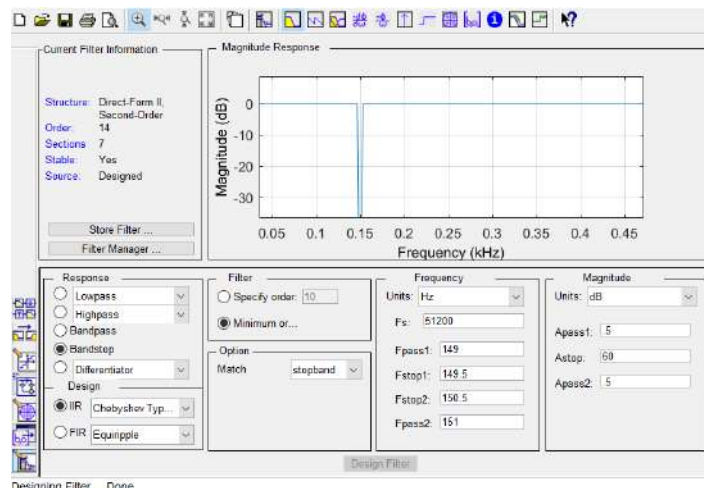
Obr. 1.40: Časová závislost interpolácie vzorkovaním periodickej funkcie $\sin(2\pi ft)$ 

Obr. 1.41: Aliasing - deformované frekvenčné spektrum signálu

1.9.2 Filtrovanie signálu

Meraný signál získaný z tlakových snímačov je v mnohých prípadoch vhodné príslušným spôsobom filtrovať v závislosti na tom, o aký signál ide, a aký dej máme za úlohu postihnúť. V našom prípade bolo žiaduce znížiť vplyv striedavého elektrického napätia siete (harmonický signál s frekvenciou 50 Hz) propagovaného do meraného signálu.

Na tento účel bolo vytvorené filtrovanie získaného signálu v MATLAB-e pomocou nástroja `fdtool`. V tomto užívateľskom rozhraní je možné vyberať z niekoľkých typov filtrov. V našom prípade bol zvolený *Bandstop* filter pre frekvenciu 50 Hz. Takto vytvorený filter v užívateľsky priateľskom rozhraní je jednoduché vygenerovať v podobe zdrojového kódu MATLAB-u a zaradiť do používaného kódu.

Obr. 1.42: Grafické prostredie *FilterDesignu*

1.9.3 Fourierova transformácia

Fourierova transformácia je silným nástrojom pre analýzu signálu. Služi k prevodu signálu z časovej do frekvenčnej domény. V ideálnom prípade je teda jej výsledkom frekvenčné spektrum meraného systému. Matematicky je možné túto transformáciu zapísať vzťahom:

$$F \{x(t)\} = x(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-i\omega t} dt \quad (1.49)$$

Pre technické aplikácie, kedy je definovaný časový rad len v určitom časovom úseku, je praktickejšie písať:

$$F \{x(t)\} = x(\omega) = \int_0^T x(t)e^{-i\omega t} dt \quad (1.50)$$

Keďže pri meraní zaznamenávame hodnoty veličiny x (tlak, zrýchlenie,...) v diskretnom čase, potom $x = x(n)$, kde n je číslo časového vzorku a $x(n)$ je teda príslušná hodnota veličiny x , je praktickejšie prejsť k tzv. diskretnéj Fourierovej transformácii (DFT) v tvare:

$$F \{x(t)\} = x(\omega) = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-i2\pi \frac{kn}{T} \Delta t} \quad (1.51)$$

V tejto práci je Fourierova transformácia riešená v prostredí MATLAB-u pomocou príkazu *fft*, čo predstavuje tzv. rýchlu Fourierovu transformáciu (*eng.- Fast Fourier Transform*) využívajúcu algoritmu *radix-2 FFT*, ktorý redukuje počet nutných krokov (komplexných násobení) z počtu N^2 (v prípade DFT) na hodnotu $\frac{N}{2} \log_2 N$ (pre prípad FFT). Tento postup apriórne vnucuje DFT rozmer s hodnotou mocniny čísla dva (počet vyhodnocovaných bodov transformácie je rovný: $N = 2^k$, kde k je prirodzené číslo), v tomto prípade teda hovoríme o FFT. V bežnej praxi však tento predpoklad splnený nebýva. Je možné ho obísť formálnym predpisom veľkosti spracúvanej sekvencie signálu, ktorá svojou dĺžkou zodpovedá práve veľkosti $N_a = 2^k$, pričom hodnota exponentu k je zvolená tak, aby výsledná dĺžka N_a súhlasila s najbližšou vyššou mocninou čísla 2 k číslu N (vo vzniknutých bodoch, kde amplitúdy nie sú definované, je dosadená nula).^[27] Musí teda platiť:

$$N \leq N_a \quad (1.52)$$

1.9.4 Výkon signálu a rýchla Fourierova transformácia

Ak sú skúmané signály vo frekvenčnej oblasti, často je výhodné pracovať s výkonom, pričom ten je úmerný štvorcu amplitúdy tohto signálu. Pre jednoduchosť, ak je konštanta úmernosti rovná jednej, je možné písať:

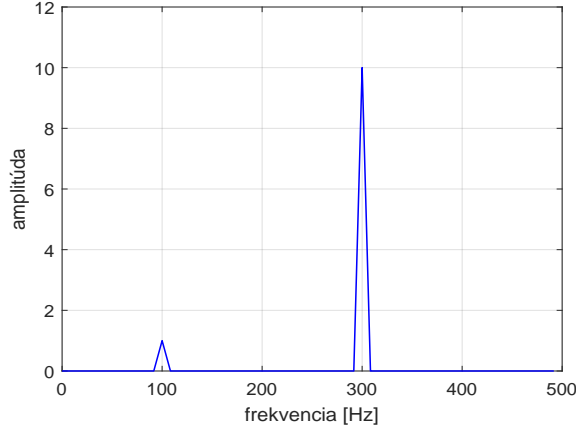
$$x_v(n) = x(n)^2 = |x(n)|^2 \quad (1.53)$$

kde x sú diskretné hodnoty signálu v bodoch n . Rovnaká závislosť bude platiť pre signál vo frekvenčnej oblasti:

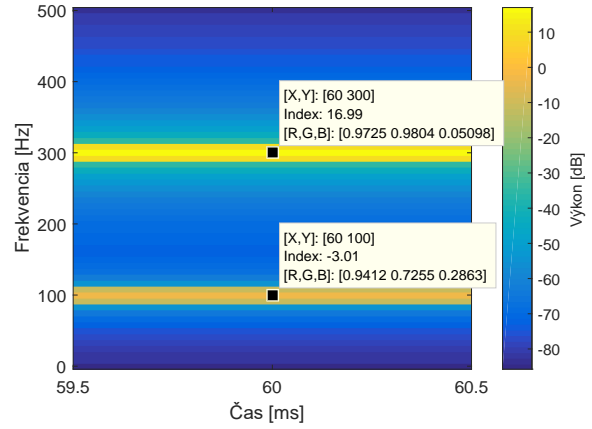
$$\text{diskretné výkonové spektrum z } X(m) = X(m)^2 = |X(m)|^2 \quad (1.54)$$

kde hodnoty $X(m)$ predstavujú amplitúdy signálu v bodoch m . Rovnica 1.54 predstavuje teda výkon signálu, nie však výkon v klasickom zmysle, kde je používaná jednotka Watt.^[27]

Použitie je výhodné predviesť na jednoduchom príklade, pričom bude použitý signál z kapitoly 1.9.1, ku ktorému je pridaný ďalší sínusový priebeh s amplitúdou $a_2 = 1$ a frekvenciou $f_2 = 100$ [Hz] (viď obrázok 1.43).



Obr. 1.43: FFT umělého signálu



Obr. 1.44: Spektrogram

Kvůli definícii výkonu ako druhej mocniny amplitúdy, je nutné do jedného grafu vykreslovať hodnoty od veľmi malých až po vysoké čísla, preto je vhodné vyjadrovať tieto závislosti v decibeloch. Podľa definície decibelu je možné pre sekvenciu výkonového spektra písať [27]:

$$X_{dB}(m) = 10 \log_{10} (|X(m)|^2) = 20 \log_{10} (|X(m)|) \quad [\text{dB}] \quad (1.55)$$

podľa rovnice 1.55 sa následne lineárna os magnitúd prevádza do logaritmickej osi výkonu. Vo väčšine literatúry a používaných softwaroch sa však používa tzv. normalizácia spektra výkonu podľa vzťahu: [27]

$$X_{norm}(m) = 10 \log_{10} \left(\frac{|X(m)|^2}{|X_{ref}(m)|^2} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{|X(m)|}{|X_{ref}(m)|} \right) \quad [\text{dB}] \quad (1.56)$$

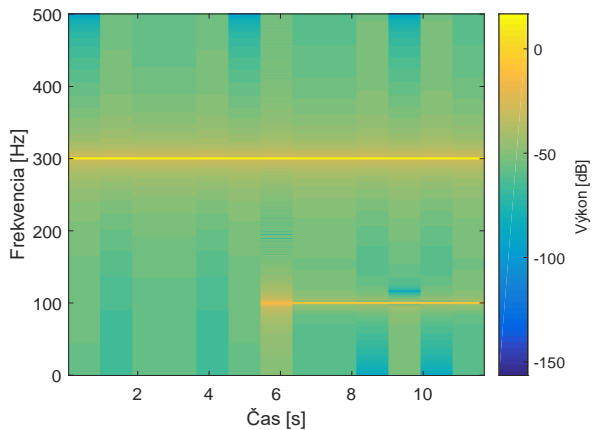
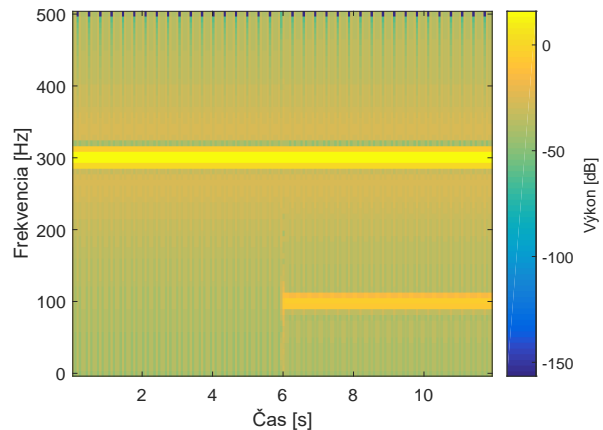
kde $|X_{ref}(m)|^2$ je referenčná (vzťažná) hladina výkonu signálu. Pre vykreslovaný spektrogram v MATLAB-e je ako referenčný používaný signál s amplitúdou $a_{ref} = \sqrt{2}$. Po dosadení hodnôt uvažovaných v príklade sú získané hodnoty pre $a_2 = 1$ podľa vzťahu 1.56 (viď obrázok 1.44):

$$X_{norm1}(m) = 10 \log_{10} \left(\frac{|1|^2}{|\sqrt{2}|^2} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{|1|}{|\sqrt{2}|} \right) \approx -3,01 \quad [\text{dB}] \quad (1.57)$$

a tiež pre amplitúdu $a_1 = 10$:

$$X_{norm2}(m) = 10 \log_{10} \left(\frac{|10|^2}{|\sqrt{2}|^2} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{|10|}{|\sqrt{2}|} \right) \approx 16,99 \quad [\text{dB}] \quad (1.58)$$

Použitie spektrogramu je však opodstatnené len v prípade, ak je úlohou stanoviť dominantné frekvencie, pričom sa predpokladá zmena frekvenčného zloženia signálu v čase. Ide teda o zobrazenie frekvenčného obsahu signálu v závislosti na čase pomocou tzv. krátkej Fourierovej transformácie (STFT) (*eng.: Short-Time Fourier Transform*). Podstatou je rozdelenie signálu na kratšie sekvencie (okná) na ktorých sa ďalej jednotlivo počíta Fourierova transformácia. [42]

Obr. 1.45: *Spektrogram*, $N_1 = 1024$ Obr. 1.46: *Spektrogram*, $N_2 = 128$

Vplyv dĺžky okna na interpretáciu výsledkov získaných zo spektrogramu je ilustrovaný na obrázkoch 1.45 a 1.46, kde je použitý signál z predchádzajúceho príkladu s dĺžkou 12 sekúnd, pričom zložka s amplitúdou $a_2 = 1$ a frekvenciou $f_2 = 100$ [Hz] sa objavuje vo frekvenčnom spektre až v šiestej sekunde. Pri návrhu dĺžky okna platí, že kratšie okno poskytuje dobré časové rozlíšenie, avšak zhoršuje rozlíšenie na frekvenčnej ose a naopak. V prípade kratších okien, tak ako na 1.46 (kde N_2 predstavuje počet bodov v okne, pre ktoré je vyhodnocovaná FFT), je výkon signálu rozptýlený medzi väčší rozsah frekvencií, avšak objavenie sa druhej sínusovej zložky vo frekvenčnom spektre odhaľuje presnejšie ako v prípade 1.45. Z tohto dôvodu je nevyhnutné voliť kompromisnú dĺžku (resp. prekryv) okna. V ideálnom prípade by počet vyhodnocovaných bodov vstupujúcich do FFT v jednom okne mal spĺňať podmienku o počte zhodujúcom sa s mocninou čísla dva (podkapitola 1.9.3). [42], [7], [7]

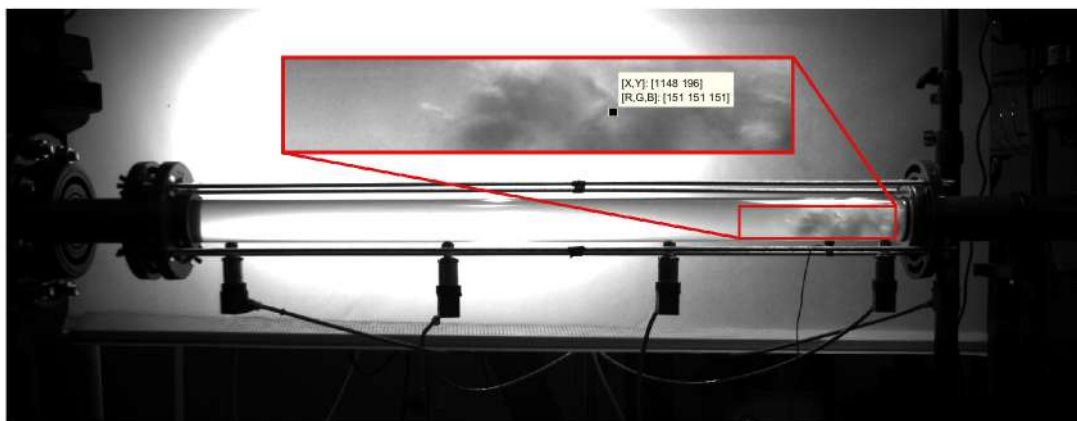
1.9.5 Obrazová analýza fluktuácie intenzity pixelov

Podkapitola sa zaoberá podrobnejším popisom zisťovania dominantných frekvencií pomocou fluktuácie intenzity pixelov zachytených vysokorýchlostnou kamerou.

Je zrejmé, že výstupom digitálnej kamery je matica pixelov, ktorej rozmer je určený práve zvoleným rozlíšením danej snímky. Každý pixel je jednoznačne určený svojou polohou kartézskymi súradnicami v rovine a intenzitou, ktorej hodnota sa pre čiernobielu snímku pohybuje od 0 pre čiernu až po 255 pre bielu farbu.³ Hodnoty v tomto rozmedzí jednoznačne priradujú intenzitu každému pixelu s rôznym odtieňom sivej farby. [19], [22], [20]

Podstatou tejto metódy je nájdenie tzv. *zdrojového pixelu* v danej rade snímok, ktorý má vhodnú polohu na to, aby zmena jeho intenzity v čase dokázala ideálne popísať dynamiku prúdenia. Následne pre tento pixel získať vektor intenzity danej sekvencie obrázkov a ďalej získať frekvenčné spektrum tohto vektoru pomocou Fourierovej transformácie (podkapitola 1.9.3).

³Tieto hodnoty platia pre osem bitovú farebnú hĺbku pixelov. S rastúcim počtom bitov popisujúcich jeden pixel rastie aj škála farieb ale tak isto aj pamäťové nároky.



Obr. 1.47: Výber vhodnej oblasti snímky

Ručné hľadanie *zdrojového pixelu* by v prípade niekoľkých tisícok snímok bolo prakticky nerealizovateľné. Preto bola použitá poloautomatická metóda hľadania takéhoto pixelu podľa [20]. Postup spočíva vo výbere vhodnej záujmovej podoblasti z existujúcej fotografie (viď obrázok 1.47), tak aby z nej bolo možné vhodným algoritmom popísaným nižšie, nájsť príslušný pixel.

Pri vyhodnocovaní obrazovej analýzy bol zisťovaný aj vplyv na výsledné frekvenčné spektrum zmenou veľkosti a umiestnenia vybranej záujmovej oblasti. Metóda sa však ukázala ako dostatočne robustná a nezávislá na veľkosti a umiestnení oblasti, ktorej rozmery závisia predovšetkým na kavitáčnom režime a rozsahu kavitácie. Používané boli rozmery: (100 x 50) až (400 x 50) [px].



Obr. 1.48: Postup spracovania záujmovej oblasti

Automatický algoritmus pracuje na princípe výberu vhodného pixelu na základe najväčšej hodnoty *smerodajnej odchýlky* intenzity, podľa vzťahu 1.59. Pixel s najvyššou hodnotou predstavuje hľadaný *zdrojový pixel*, ktorého intenzita v danej oblasti, pre vzorky j až N dosahuje najvyššie fluktuácie.[20]

$$s = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (I_j - I_{avg})^2} \quad (1.59)$$

Kde N predstavuje počet všetkých snímok vo vyhodnocovanej sekvencii a I_j je intenzita „ j -tej“ snímky.

Ďalej I_{avg} predstavuje strednú hodnotu intenzity všetkých pixelov od j do N , podľa:

$$I_{avg} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N I_j \quad (1.60)$$

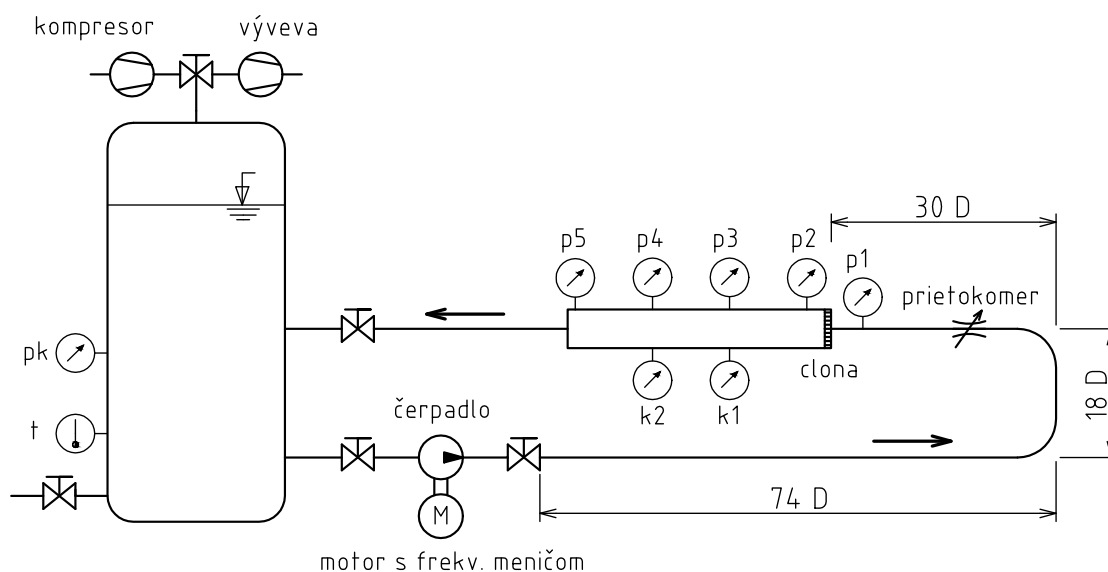
2 PRAKTICKÁ ČASŤ PRÁCE

Nasledujúca kapitola sa zaoberá popisom meracej techniky a metód používaných pri meraní kavitačných clôn.

2.1 Experimentálna trať

Na zjednodušenej schéme 2.1 je zobrazená experimentálna trať uzatvoreného hydraulického okruhu v laboratóriu hydraulických strojov oboru Fluidného inžinierstva Victora Kaplana v Brne.

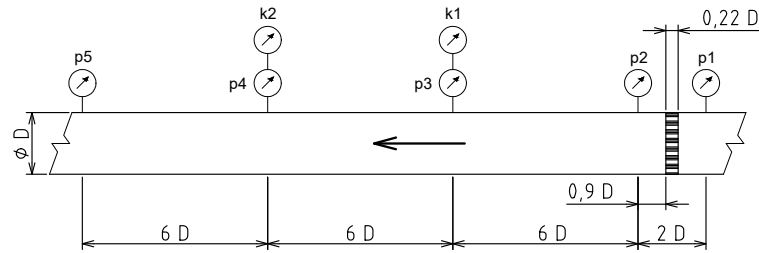
Pre dosiahnutie prietoku a nastavovanie kavitačného režimu slúži päťlopatkové hydrodynamické čerpadlo, ktoré spolu s motorom s frekvenčným meničom zaisťuje plynulú reguláciu otáčok, a tým zmenu prietoku a *kavitačného čísla*. Za rovnakým účelom je na tlakovú nádobu trojcestným ventilom pripojený prívod tlakového vzduchu a výveva, pomocou ktorých je možné plynulo meniť statický tlak v celom okruhu. K meraniu prietoku je využitý indukčný prietokomer (kompletný zoznam meracej techniky je v kapitole 2.3). Kvôli závislosti nasýtených pár na teplote (vzťah 2.1), je tiež nutná inštalácia teplomeru v tlakovej nádobe.



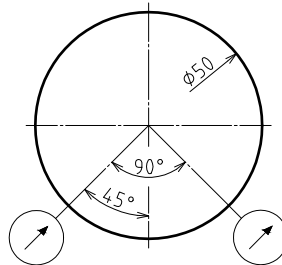
Obr. 2.1: Uzatvorený experimentálny okruh, priemer plexisklovej trubice: $D = 50 \text{ mm}$

Požiadavka vstupu prúdenia s dominantnou axiálnou zložkou rýchlosti bez výrazného zavírenia pred kavitačnou clonou, ktoré by mohlo ovplyvňovať kavitačné charakteristiky je splnená umiestnením meranej sekcie s clonou približne $1,5 \text{ m}$ po prúde za najbližším ohybom.

Plexisklová časť trate s dĺžkou približne jeden meter je osadená celkom siedmimi tlakovými snímačmi. Na obrázku 2.2 je zobrazené presné uloženie kavitačnej clony vzhľadom na odberné miesta tlaku.

Obr. 2.2: Plexisklová časť testovacieho okruhu, $D = 50 \text{ mm}$

Aby sa zamedzilo vstupu nečistôt alebo vzduchových bublín do odberných miest tlakomerov, ktoré by mohli ovplyvniť presnosť merania tlaku, boli tlakové snímače inštalované podľa obrázku 2.3:



Obr. 2.3: Zapojenie tlakových snímačov

2.2 Postup merania

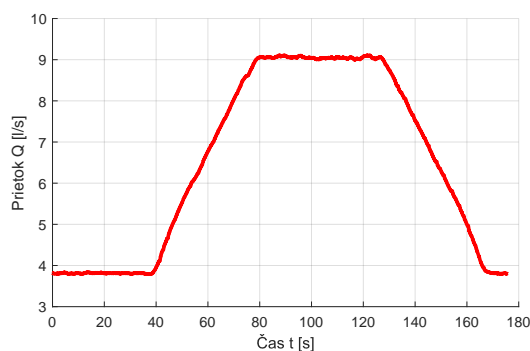
Aby sa zaručili porovnateľné vlastnosti vody, hlavne hodnoty týkajúce sa nerozpustného obsahu vzduchu, bol pred začatím každého merania tlak v tlakovej nádobe pomocou vývevy nastavený na hodnotu približne 40 kPa . Spolu so zapnutým čerpadlom bol testovací okruh v tomto stave prevádzkovaný v *superkavitačnom* režime približne po dobu tridsiatich minút, tak aby sa znížil obsah vzduchu vo vode.

Pre určenie dominantných frekvencií boli v tejto práci použité tri rôzne prístupy, ktorých výsledky a ich presnosť je možné navzájom medzi sebou porovnávať a tiež korelovať jednotlivé dominantné frekvencie s kavitačnou dynamikou.

Prvým z nich je tzv. statické meranie. Pri tomto meraní je pomocou frekvenčného meniča nastavovaná hodnota prietoku pre jednotlivé prevádzkové body. Prietok tratom bol obmedzený minimálnou hodnotou, približne $Q_{min} \approx 4 \text{ [l/s]}$, čomu zodpovedajú otáčky čerpadla $n_{min} = 500 \text{ [1/min]}$. Následne bol prietok menený s krokom približne $\Delta Q \approx 0,2 \text{ [l/s]}$ až do hodnoty približne $Q_{max} \approx 9 \text{ [l/s]}$, čomu zodpovedajú maximálne používané otáčky čerpadla $n_{max} = 3000 \text{ [1/min]}$. Týmto spôsobom bolo pre každú kavitačnú clonu zmeraných približne 25 pracovných bodov. Čas potrebný na zmenu otáčok a ustálenie prietoku pri prechode medzi prevádzkovými bodmi bol približne 5 minút. Aby bolo možné dosiahnuť *superkavitačný* režim v celej dĺžke plexisklovej trubice a bola pritom zaručená tesnosť trate (kritické miesto s ohľadom na tesnosť trate je na tesnení pred kavitačnou

clonou) nebolo možné z dôvodu rastúcej tlakovej diferencie ďalej zvyšovať prietok, preto bola pre znižovanie statického tlaku za clonou používaná výveva, približne pre 3 až 5 prevádzkových bodov pri prietoku nad 8 [l/s], pri konštantných otáčkach čerpadla.

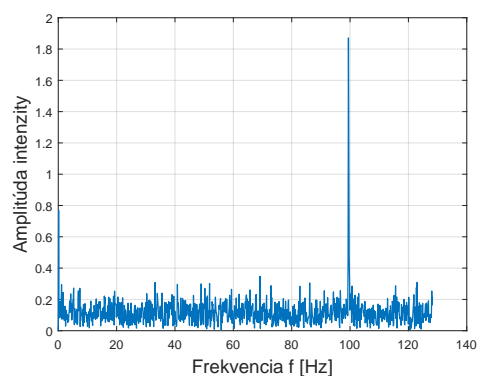
Druhým prístupom je tzv. dynamická skúška. Tento spôsob bol použitý pre kavitačnú clonu s jedným otvorom rovnako ako aj pre clonu s tridsaťšesť otvormi. Princípom je strojne riadené zvyšovanie a takisto znižovanie otáčok čerpadla cez frekvenčný menič, čím dochádza k plynulej zmene prietoku podľa obrázku 2.4 a tiež *kavitačného čísla*. Pri rozbehu čerpadla ide o 40 sekundový interval, počas ktorého sa zmení prietok z hodnoty $Q_{min} \approx 4$ [l/s] na maximálnu hodnotu $Q_{max} \approx 9$ [l/s]. Analogická situácia platí pri znižovaní otáčok čerpadla.



Obr. 2.4: Plynulá zmena prietoku pri dynamickej skúške clony s jedným otvorom

Tretím použitým spôsobom zistenia dominantných frekvencií je obrazový záznam vysokorýchlostnej kamery. Boli použité kamerové záznamy zhotovené v práci [22] pre zapojenie snímačov na plexisklovej trubici podľa obrázku 1.19. Vzorkovacia frekvencia kamery bola nastavená na hodnotu $f_s = 256,5$ [Hz] s celkovým použitým rozlíšením snímok 2048 x 1088 [px]. Obrazové záznamy s dĺžkou 10 sekúnd boli zhotovené pre tzv. statické meranie všetkých piatich kavitačných cloniek pre prevádzkové body v kavitačnom režime (kavitačné bubliny viditeľné holým okom).

Jednou z výhod použitia vysokorýchlostnej kamery je jediná dominantná parazitná frekvencia, ktorá je propagovaná do vyhodnocovaných frekvenčných spektier. Tento vplyv je najvýraznejší vo frekvenčnom spektre pre nulový prietok hydraulickým okruhom zobrazený v grafe na obrázku 2.5. Ide o frekvenciu približne $f \approx 99$ [Hz], ktorá súvisí pravdepodobne s použitými osvetlovacími diódami, ktoré pri tomto meraní zabezpečujú dostatočné kontrastné pomery na vyhodnocovanom obrazovom zázname podľa obrázku C.1.



Obr. 2.5: Frekvenčné spektrum kalibračného merania vysokorýchlostnej kamery pri nulovom prietoku: $Q=0$ l/s.

2.2.1 Vplyv teploty

Pri spracovaní výsledkov bol zohľadnený vplyv zmeny teploty vody, ktorá sa mení v čase medzi jednotlivými meraniami, ale narastá vplyvom strát v okruhu aj počas jedného merania (teplotný rozdiel v tomto prípade môže presiahnuť až 5°C , počas merania trvajúceho približne 3 hodiny [22]).

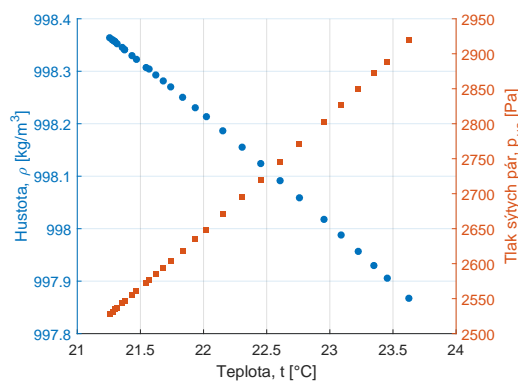
Tento vplyv je nutný zahrnúť hlavne z dôvodu vyhodnocovania závislostí na *kavitačnom čísle* podľa vzťahu 1.6, kde sa prejavuje teplotná závislosť cez tlak nasýtených pár vyjadraný empirickou rovnicou 2.1 [36], [22]:

$$p_{va} = 100 \cdot e^{53,67957 - \frac{6743,69}{T} - 4,8451 \cdot \ln(T)} \quad (2.1)$$

Ďalšou veličinou závislou na teplote vystupujúcou vo vzťahu 1.6 je hustota. Na popis tejto závislosti je použitá taktiež empirická závislosť, podľa [38]:

$$\rho = \sum_{i=0}^3 a_i \cdot t^i \quad (2.2)$$

kde koeficienty a_i sú: $a_0 = 1002$, $a_1 = -0,2716$, $a_2 = 0,01047$, $a_3 = -0,00027$. Ďalej t je teplota [$^{\circ}\text{C}$]. Tieto závislosti sú zobrazené v grafe na obrázku 2.6:



Obr. 2.6: Závislosť hustoty a tlaku sýtych pár vody na teplote počas jedného merania

2.3 Zoznam meracej techniky

1. p1 - Piezorezistívny snímač tlaku DMP 331, výrobca BD SENSORS s.r.o. Uh. Hradišťa, merací rozsah: 0..10 bar abs., výstup: 0..20 mA, napätie: 14..36 VDC, presnosť: $\pm 0,25\%$, výr. č.: 1830087
2. p2 - Piezorezistívny snímač tlaku DMP 331, výrobca BD SENSORS s.r.o. Uh. Hradišťa, merací rozsah: 0..1,6 bar abs., výstup: 0..20 mA, napätie: 14..36 VDC, presnosť: $\pm 0,25\%$, výr. č.: 1830093
3. p3 - Piezorezistívny snímač tlaku DMP 331, výrobca BD SENSORS s.r.o. Uh. Hradišťa, merací rozsah: 0..2,5 bar abs., výstup: 0..20 mA, napätie: 14..36 VDC, presnosť: $\pm 0,25\%$, výr. č.: 1762377
4. p4 - Piezorezistívny snímač tlaku DMP 331, výrobca BD SENSORS s.r.o. Uh. Hradišťa, merací rozsah: 0..2,5 bar abs., výstup: 0..20 mA, napätie: 14..36 VDC, presnosť: $\pm 0,25\%$, výr. č.: 1495462

5. p5 - Piezorezistívny snímač tlaku DMP 331, výrobca BD SENSORS s.r.o. Uh. Hradiště, merací rozsah: 0..2,5 bar abs., výstup: 0..20 mA, napätie: 14..36 VDC, presnosť: $\pm 0,25\%$, výr. č.: 1495463
6. pk - Piezorezistívny snímač tlaku DMP 331, výrobca BD SENSORS s.r.o. Uh. Hradiště, merací rozsah: 0..2,5 bar abs., výstup: 4..20 mA, napätie: 8..32 VDC, presnosť: $\pm 0,25\%$, výr. č.: 1853282
7. k1 - Piezoelektrický snímač tlaku, typ: 211B3, výrobca: KISTLER, merací rozsah: 500 psi, presnosť $\pm 1\%$, výstup 4-20 mA [18]
8. k2 - Piezoelektrický snímač tlaku, typ: 211B3, výrobca: KISTLER, merací rozsah: 500 psi, presnosť $\pm 1\%$, výstup 4-20 mA [18]
9. Piezoelektrický snímač zrýchlenia
10. Snímač teploty, odporový PTP 55, výrobca Rawet, merací rozsah: $-5.. + 50^{\circ}C$, rozsah výstupného prúdu: 4..20 mA, presnosť: $\pm 0,3\%$ z rozsahu, výr. č.: 3111035
11. Kamera BAUMER - HXC 20, snímač CMOSIS CMV2000 2/3'', maximálne rozlíšenie: 2048 x 1088 px, obrazová frekvencia 337 FPS pre 2 Mpx a 640 FPS pre 0,5 Mpx, monochromatická, 256 MB buffer, komunikačná zbernica dual CameraLink
12. Magneticko - indukčný prietokomer, výrobca: Ela, spol. s.r.o., typ: MQI 99 - SN, svetlosť: DN 50, $Q_{max} = 20l/s$, napájanie: 85 - 260 V AC/ 50 Hz, presnosť merania $\pm 0,3\%$ z aktuálne meranej hodnoty v prípade ak je prietok v intervale 10 až 100 % z rozsahu prietokomeru, výstupný prúd 4 - 20 mA, výrobné číslo: 09544 [28]
13. Svietidlo Troll 50 W, kód ML-511.152.15.0, typ TR50E230CW120, svetelný tok > 3500 Lm (studená biela), napätie AC 175 - 240 V, frekvencia 50 - 50 Hz
14. Svietidlo Aputure AL-H528S LED, prúd $< 2,8$ A, napájanie: 18 V DC, výkon 30 W, hmotnosť 540 g, teplota svetla 5500 K

2.4 Neistoty merania

„Neistota výsledku merania je kvantitatívnym ukazovateľom jeho kvality.“ [29] Neistota merania sa skladá z niekoľkých zložiek (čiastočných neistôt). Pre stanovenie ich veľkosti môžu byť použité dva principiálne rôzne postupy, pričom získané neistoty sú rovnocenné:

- štatistické spracovanie nameraných hodnôt = metóda typu A (neistota typu A), ozn.: u_A
- iné, než štatistické spracovanie hodnôt = metóda typu B (neistota typu B), ozn.: u_B

Týmito metódami je možné získať tzv. základné typy neistôt (štandardné neistoty), ktorými je možné pomocou vzťahu 2.3 získať tzv. kombinovanú (celkovú) neistotu merania a získať tak jediný parameter, ktorý vypovedá o kvalite merania (za predpokladu, že neexistuje súvislosť medzi zdrojmi neistôt vyhodnocovanými jednotlivými metódami) [8], [29] :

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (2.3)$$

Okrem neistoty kombinovanej je možné použiť aj tzv. rozšírenú neistotu, používanú pre prípad, kedy je žiaduce, aby bol interval hodnôt spadajúcich do tolerančného pásma väčší (pre štandardnú neistotu toto tolerančné pásmo predstavuje pre Gaussovo rozdelenie hodnotu približne 68 %). V tomto prípade je použitý vzťah:

$$U = k_r \cdot u_C \quad (2.4)$$

v ktorom k_r predstavuje koeficient rozšírenia (význam tohto parametru je zhodný s kvantilom u rozdelenia pravdepodobností), ktorého hodnoty v prípade Gaussovho rozdelenia: $k_r = 2$ (pre rozšírenie konfidenčného intervalu na 95 % - veľmi časté), alebo $k_r = 3$ (pre konfidenčný interval 99,7 %).

2.4.1 Metóda typu A

Ako bolo spomenuté vyššie, výpočet štandardnej neistoty typu A je založený na štatistickom spracovaní hodnôt získaných z opakovaného merania (predpokladá sa, že merania sú navzájom nezávislé a vykonané za konštantných podmienok). Základným výsledkom merania je predstavovaný odhadom hodnoty meranej veličiny aritmetickým priemerom:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.5)$$

Pričom ako štandardná neistota je v tomto prípade chápaná smerodajná odchýlka aritmetického priemeru:

$$u_A(x) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.6)$$

Do vyhodnotenia neistôt typu A sú zahrnuté aj tzv. systematické chyby.[29] Tento druh chýb môže byť ľahko identifikovaný a odstránený napríklad pomocou korekcií získaných zo statickej skúšky trate ($Q = 0 \text{ l/s}$), podobne ako na obrázku 2.7. Sú tu zobrazené priebehy tlakov z tlakových snímačov podľa zapojenia na obrázku 2.2. Ako referenčný je v tomto prípade zvolený tlakový snímač p_2 , ku ktorému sú následne vzťahnuté ostatné snímače tlaku a získané korekčné hodnoty:

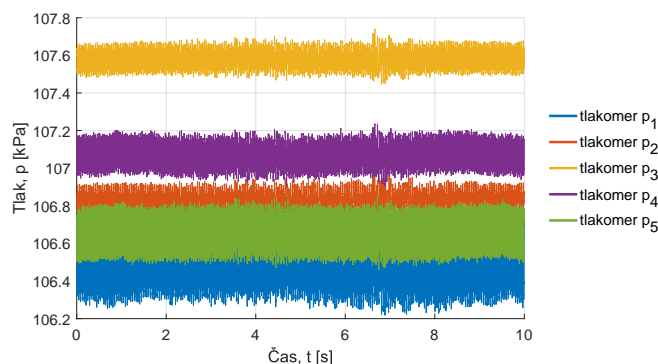
$$r_1 = p_1 - p_2$$

$$r_3 = p_3 - p_2$$

$$r_4 = p_4 - p_2$$

$$r_5 = p_5 - p_2$$

Hodnoty r_1, r_3, r_4, r_5 sú následne v každom vyhodnocovanom bode odčítavané od aktuálnej hodnoty tlaku, čím je zmenšená systematická chyba.



Obr. 2.7: Korekcia tlakových snímačov pri nulovom prietoku

2.4.2 Metóda typu B

Neistoty typu B sú viazané na identifikovateľné a kvantifikovateľné zdroje chýb. Štandardná neistota sa odhaduje na základe racionálneho úsudku a skúseností na základe rôznych zdrojov informácií:

- Skúsenosti zo spracovania predchádzajúcich meraní
- Informácie o meradlách získané od výrobcov (certifikáty, kalibračné listy,...)
- Vlastné skúsenosti

Pri vyhodnocovaní neistoty metódou typu B je nutné stanoviť zdroje neistôt (Z_1, Z_2, \dots, Z_m), ktoré vstupujú do vyhodnotenia cez priamo merané vstupné veličiny (x_1, x_2, \dots, x_m). Ak teda uvažujeme vzťah medzi výslednou veličinou Y , ktorá je ovplyvnená jednotlivými zdrojmi a má známu funkčnú závislosť:

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_m) \quad (2.7)$$

je nutné pre túto funkciu určiť štandardné neistoty každého z uvažovaných zdrojov ($u_{Bz1}, u_{Bz2}, \dots, u_{Bzj}, \dots, u_{Bzm}$) použitím certifikátov, katalógových listov, atd. Ďalej pomocou zákona o šírení neistôt (podľa vzťahu 2.8) určiť pre funkčnú závislosť 2.7 neistotu $u_B(x)$

$$u_B(x) = \sqrt{\sum_{j=1}^m A_j^2 u_{Bzj}^2(x)} \quad (2.8)$$

kde u_{Bzj} predstavuje štandardnú neistotu „j-teho“ zdroja, ktorá je získaná zo štítku meradla zohľadňujúc triedu nepresnosti snímača vzťahom:

$$u_{Bzpj} = \text{presnosť} \cdot \text{rozsah snímača} \quad (2.9)$$

Ďalej A_j je označenie pre tzv. koeficient citlivosti, určovaný zo vzťahu:

$$A_j = \frac{\partial f(x_1, \dots, x_p)}{\partial x_j} \quad (2.10)$$

Pre štandardné neistoty typu B podľa vzťahu 2.9, vychádzajúc z triedy nepresnosti tlakových snímačov:

Tlakový snímač	Presnosť [%]	Rozsah [kPa]	Štandardná neistota, u_{Bpj} [kPa]
p_1	$\pm 0,25$	0..1000	2,5
p_2	$\pm 0,25$	0..160	0,4
p_3	$\pm 0,25$	0..250	0,625
p_4	$\pm 0,25$	0..250	0,625
p_5	$\pm 0,25$	0..250	0,625
p_k	$\pm 0,25$	0..250	0,625

Štandardnú neistotu typu B pre indukčný prietokomer získame zo vzťahu 2.11 [28]:

$$u_{BzQ} = \text{presnosť} \cdot \text{aktuálna hodnota prietoku} \quad (2.11)$$

Prietokomer	Presnosť [%]	Rozsah [l/s]	Štandardná neistota, u_{BQ} [l/s]
Q	$\pm 0,3$	2..20	$0,003 \cdot Q$

2.4.3 Výpočet neistoty merania

V práci sú uvažované len chyby typu B pri výpočte *kavitačného čísla*, kde sú zahrnuté zdroje neistôt vyplývajúce z triedy presnosti tlakových snímačov a zdroj neistoty v podobe indukčného prietokomeru. Teplotné vplyvy sú zanedbané (vzťahy 2.1, 2.2) [13], [12], [22].

Stanovenie koeficientov citlivosti tlakových snímačov resp. prietokomeru:

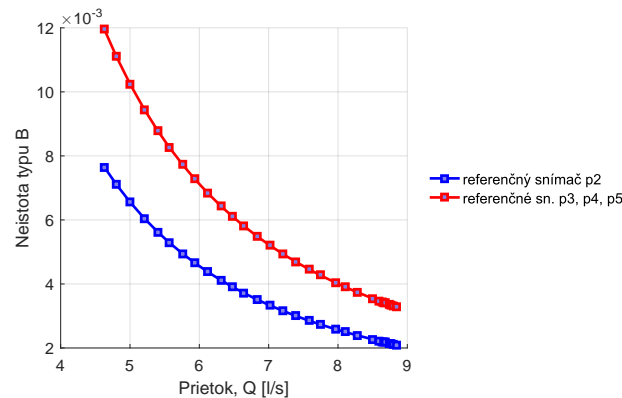
$$A_{pj} = \frac{\partial \sigma}{\partial p_j} = \frac{1}{\frac{1}{2}\rho \frac{Q^2}{S^2}} \quad (2.12)$$

$$A_Q = \frac{\partial \sigma}{\partial Q} = \frac{-2(p_{ref} - p_{va})}{\frac{1}{2}\rho \frac{Q^3}{S^2}} \quad (2.13)$$

Rešpektovaním zákona o šírení neistôt je možné neistotu typu B pre *kavitačné číslo* písať:

$$u_{B\sigma} = \sqrt{\left(\frac{1}{\frac{1}{2}\rho \frac{Q^2}{S^2}} \cdot u_{Bpj}\right)^2 + \left(\frac{-2(p_{ref} - p_{va})}{\frac{1}{2}\rho \frac{Q^3}{S^2}} \cdot Q \cdot u_{BQ}\right)^2} \quad (2.14)$$

Neistota typu B pre *kavitačné číslo* podľa vzťahu 2.14 v závislosti na veľkosti prietoku pre všetky tlakomery pre konfidenčný interval 68% je v grafe na obrázku 2.8.



Obr. 2.8: Neistota typu B pre kavitačné číslo σ pre použité tlakové snímače v závislosti na prietoku

3 VÝSLEDKY PRÁCE

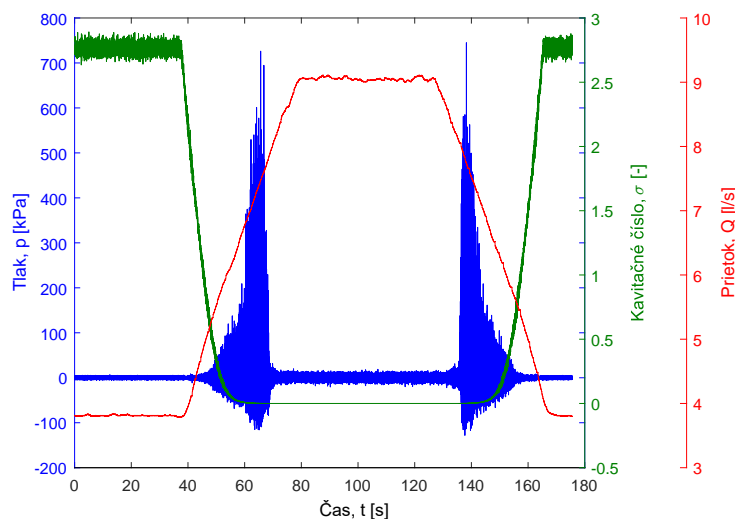
Kapitola zahrňuje výsledky, komentáře a porovnanie meraní popísaných v predchádzajúcich častiach práce.

3.1 Tlakové snímače - dynamické meranie

V nasledujúcej kapitole sú uvedené výsledky z dynamického merania dvoch kavitačných clôn: s jedným a s tridsaťšesť otvormi. Vzorkovacia frekvencia pri tomto meraní bola $f_s = 51200 \text{ Hz}$. Presný postup merania je popísaný v kapitole 2.2.

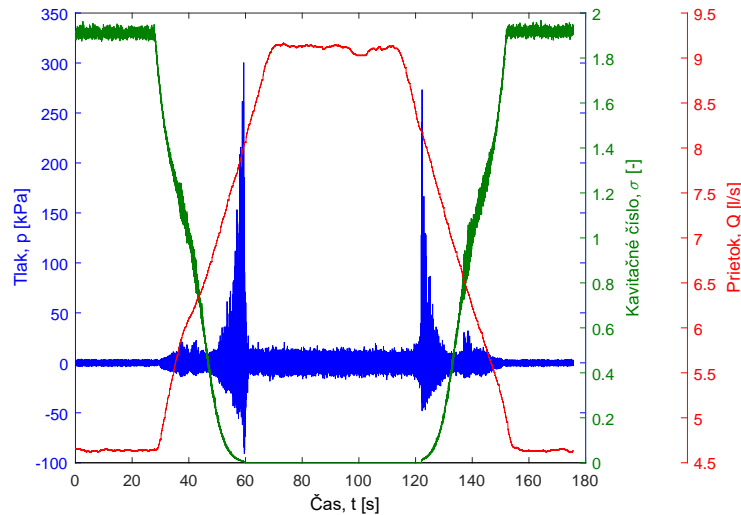
Na obrázkoch 3.1 až 3.4 sú zobrazené časové priebehy tlaku spolu s aktuálnou hodnotou prietoku z indukčného prietokomeru. Tiež je tu zobrazená časová závislosť aktuálnej hodnoty *kavitačného čísla*¹, pričom rýchlosť, resp. prietok vystupujúci vo vzťahu 1.6 je získavaný regresnou charakteristikou podľa kapitoly 3.1.1.

Z grafu na obrázku 3.1 je viditeľný postupný nárast tlakových pulzácií z oblasti čiastočnej kavitácie až do oblasti plno *vyvinutej kavitácie*. Záporné hodnoty tlaku sú zobrazené z dôvodu relatívneho tlakového snímača, tzn. že nulová hodnota tlaku v skutočnosti predstavuje statický tlak v potrubí. Maximálna hodnota tlakových pulzácií sa prejavuje v oblasti plno vyvinutého kavitačného prúdenia tesne pred vstupom tlakového snímača do oblasti sýtych pár. Tlakové maximum pri zvyšovaní otáčok čerpadla je $726,2 \text{ kPa}$ a pri znižovaní predstavuje hodnota maximálneho tlaku 745 kPa . Podobný charakter má dynamická skúška v grafe na obrázku 3.3, taktiež pre clonu s jedným otvorom. Maximálne tlakové amplitúdy v tomto prípade dosahujú hodnôt $560,2 \text{ kPa}$ pri rozbehu čerpadla a $569,4 \text{ kPa}$ pri znižovaní otáčok.

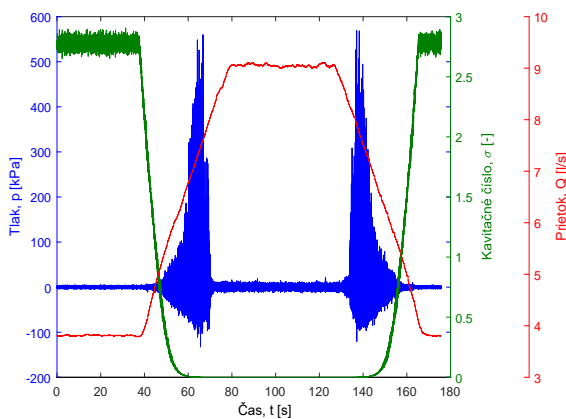
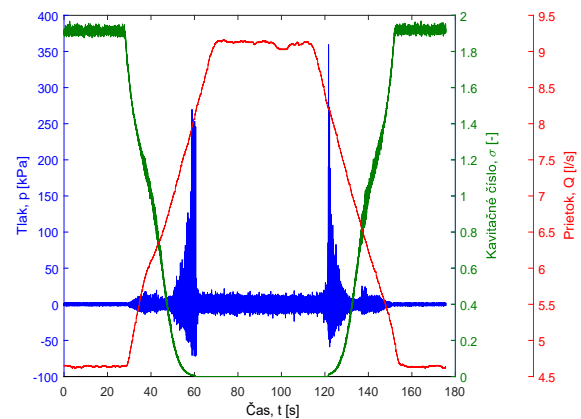


Obr. 3.1: Clona s jedným otvorom, snímač k_1 podľa schémy 2.2

¹Kavitačné číslo je získavané z tlakového snímača typu BD vždy z prislúchajúcej pozície snímača Kistler (podľa obrázku 2.2, k_1 prislúcha p_3 a k_2 prislúcha p_4), nakoľko tlakové snímače typu Kistler nie sú schopné merať statický tlak.

Obr. 3.2: Clona s 36 otvormi, snímač k_1 podľa schémy 2.2

Iný charakter priebehu tlakových pulzácií v čase pri zvyšovaní a znižovaní otáčok čerpadla je zobrazený na grafoch 3.2 a 3.4, kde sú zobrazené závislosti pre clonu s 36 otvormi. V oboch prípadoch je viditeľný nárast tlakových pulzácií pri zvyšovaní otáčok počínajúc počiatočnou kavitáciou. Medzi štádiom čiastočne vyvinutej kavitácie a plno vyvinutej kavitácie je však viditeľný pokles amplitúd pri zvyšovaní a tak isto aj pri znižovaní otáčok čerpadla. Maximálna hodnota amplitúdy pri rozbehu v prípade tlakového snímača k_1 na obrázku 3.2 je $300,3 \text{ kPa}$ a pri znižovaní otáčok $273,3 \text{ kPa}$. Podobné tlakové amplitúdy sú zobrazené aj v prípade 3.4 pre zvyšovanie otáčok: $269,9 \text{ kPa}$ a pri znižovaní otáčok čerpadla: $359,4 \text{ kPa}$.

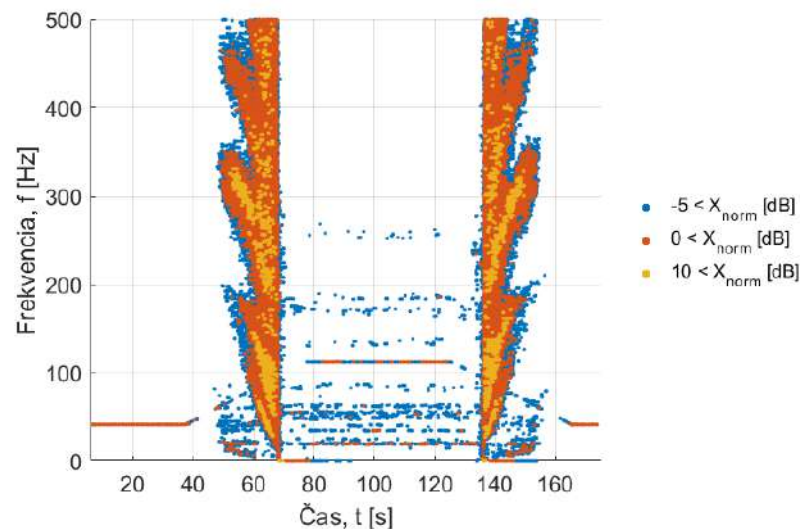
Obr. 3.3: Clona s jedným otvorom, snímač k_2 podľa schémy 2.2Obr. 3.4: Clona s 36 otvormi, snímač k_2 podľa schémy 2.2

V prílohe A na spektrogramoch A.1 až A.12 je zobrazená krátka Fourierova transformácia (STFT, podľa podkapitoly 1.9.4) signálu tlaku z dynamického merania so zapojením tlakových odberov podľa obrázku 2.2. Z týchto frekvenčných spektier je vidieť, že v okamžiku objavenia kavitácie sa spektrum stáva zašumeným, pričom sa tu objavuje široké pásmo frekvencií (vykresľovanie frekvencií bolo obmedzené na hodnotu 500 Hz). Taktiež je možné si všimnúť rozdielov v hodnotách výkonu signálu pre snímače typu BD a snímače

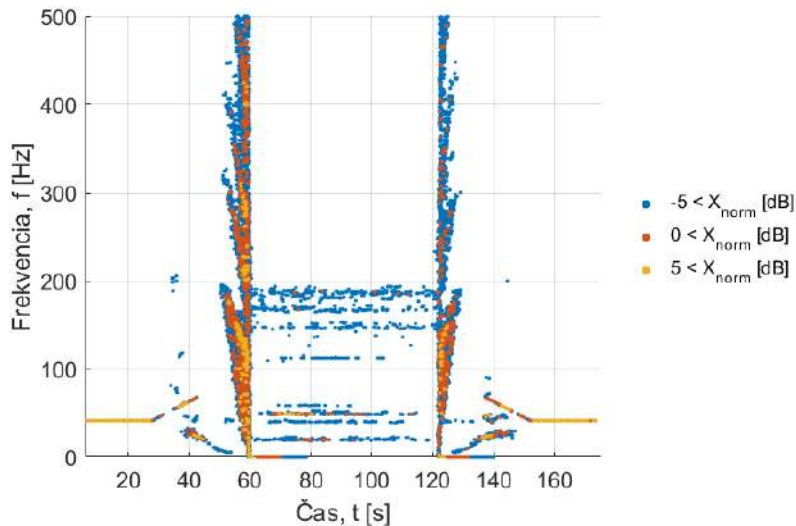
Kistler, pričom v prípade snímačov typu BD prichádza k väčšiemu útlmu amplitúd tlaku, čím sú zobrazené hodnoty výkonu signálu menej výrazné.

V grafoch na obrázkoch 3.5 až 3.8 sú zobrazené vybrané spektrá z prílohy A pre tlakové snímače typu Kistler. Spektrogramy je možné si predstaviť ako trojdimenzionálnu reliéfnu mapu nad rovinou času a frekvencie, kde najvyššie hodnoty výkonu predstavujú kopce a nízke hodnoty údolia. Preto je pre jednoduchšiu identifikáciu vývoja dominantných frekvencií vhodné ohraničenie výkonu signálu z dola hodnotou $X_{norm} = -5 \text{ dB}$ (výkon signálu: podkapitola 1.9.4).

Vo frekvenčných spektrách je možné identifikovať lopatkovú frekvenciu čerpadla, ktorá je najvýraznejšou zobrazenou prazitnou frekvenciou. V bezkavitačnej oblasti má táto zložka spektra konštantnú hodnotu $41,6 \text{ Hz}$ (toto zodpovedá minimálnym otáčkam čerpadla, viď kapitolu 2.2) a v grafoch na obrázkoch 3.5 až 3.8 je to v tejto oblasti jediná dominantná frekvencia celého spektra. So zvyšovaním otáčok čerpadla prichádza k lineárnemu rastu tejto zložky spolu so zvyšovaním prietoku až do oblasti *superkavitačného* režimu prevádzky trate. V tejto oblasti zodpovedá lopatkovej frekvencii hodnota $112,3 \text{ Hz}$. V oblasti *superkavitačného* prúdenia, kedy sa odberné miesta snímačov tlaku nachádzajú v oblasti sýtych pár sú viditeľné len frekvencie, ktoré nesúvisia s kavitačnou dynamikou. Preto sú v tomto prípade zachytené len frekvencie súvisiace s otáčkovou frekvenciou motoru čerpadla a frekvencie súvisiace s napájaním meracej techniky - frekvencia električnej siete (a násobky týchto frekvencií).



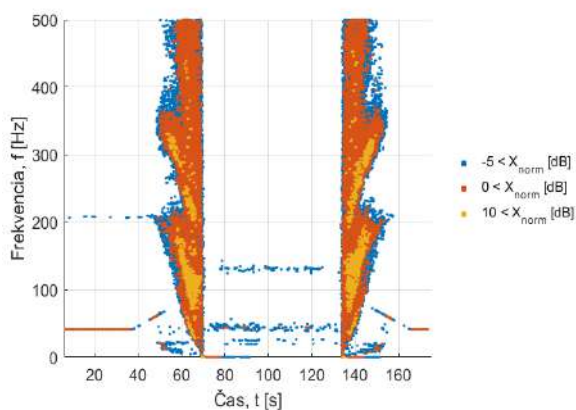
Obr. 3.5: Spektrogram: Clona s jedným otvorom, tlakový snímač k_1 podľa schémy na obrázku 2.2



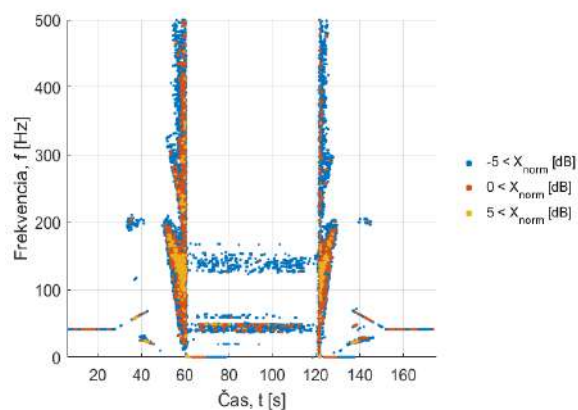
Obr. 3.6: Spektrogram: Clona s tridsaťšest otvorami, tlakový snímač k_1 podľa schémy na obrázku 2.2

Pri pohľade na oblasť kavitácie v spektrogramoch 3.5 až 3.8 je jasný klesajúci charakter frekvencií spojených s kavitáčnou dynamikou. Na základe porovnania meraní s kapitolami 3.3 a 3.2 je možné si všimnúť dvoch charakteristických priebehov frekvencií, ktoré sa znižujú spolu so znižujúcim kavitáčným číslom a zvyšujúcim sa prietokom.

Prvým a najvýraznejším z nich je priebeh frekvencie s dominantnou amplitúdou v oblasti *plno vyvinutej kavitácie*, ktorý je viditeľný vo všetkých spektrogramoch 3.5 až 3.8 a tiež v prílohe A. Ide o kavitáčny dej, ktorý je iniciovaný počiatkom *plno vyvinutej kavitácie* s frekvenciou na úrovni približne $f \approx 200 \text{ Hz}$ pre obidve kavitáčné clony. V prípade clony s jedným otvorom (obrázky 3.5 a 3.7), je však v tejto oblasti viditeľné väčšie zastúpenie frekvencií s vysokou tlakovou amplitúdou v porovnaní s tridsaťšest otvorovou clonou.



Obr. 3.7: 1-otv., snim. k_2 podľa 2.2



Obr. 3.8: 36-otv., snim. k_2 podľa 2.2

Druhý dej súvisiaci s kavitáčnou dynamikou, ktorý je dominantný pri *počiatočnej* a *čiastočne vyvinutej kavitácii*, a ktorého vývoj je možné sledovať aj v ďalších oblastiach kavitáčného prúdenia, je najlepšie viditeľný v prípade merania clony s tridsaťšest otvorami pre snímač Kistler na obrázku 3.6. Prejavenie tejto frekvencie vo frekvenčných spektrách

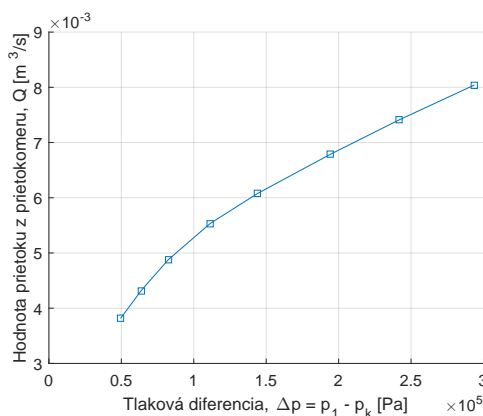
je ohraničené maximom pri *počiatočnej kavitácii* na úrovni približne $f \approx 30$ až 35 Hz. So znižujúcim sa *kavitačným číslom* prichádza poklesu frekvencie až na úroveň jednotiek Hercov v oblasti *plno vyvinutej kavitácie*.

V spektrogramoch sú tiež zobrazené celočíselné násobky dominantnej frekvencie. Pri použití názvoslovia hudobnej teórie, ide o tzv. alikvotné frekvencie, ktoré tvoria farbu zvuku (farbu tónu), a sú prítomné pri každom výskyte primárnej frekvencie. Zloženie a intenzita týchto vyšších harmonických frekvencií v hudbe závisí, okrem iného aj od tvaru hudobného nástroja, preto rovnaký tón hraný rôznymi nástrojmi znie rôzne, má totiž inú „farbu“, tj. zloženie alikvotných frekvencií. Toto zloženie je rovnako ovplyvnené aj v prípade kavitačného prúdenia tvarom, nie však hudobného nástroja, ale kavitačnej clony (veľkosťou a usporiadaním otvorov). V Spektrogramoch je viditeľná väčšia amplitúda vyšších harmonických frekvencií pre clonu s jedným otvorom. [24], [35]

3.1.1 Korekcia indukčného prietokomeru

Indukčný prietokomer je integrálny merací prístroj (pracuje s nastavenou hodnotou integračnej konštanty). To znamená, že počas stanovenej doby zberá okamžité hodnoty prietoku, ktoré sú ďalej priemerované. Táto priemerná hodnota za stanovenú dobu tvorí poskytovanú výstupnú hodnotu prietoku. Takýmto spôsobom musí nutne nastať oneskorenie za okamžitými hodnotami získanými z tlakových snímačov. [17]

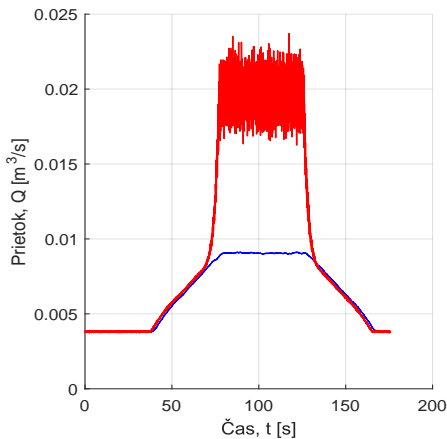
Preto bol pre počítanie okamžitých hodnôt *kavitačného čísla* zvolený prístup regresnej charakteristiky, ktorá je pre clonu s jedným otvorom zobrazená na grafe 3.9. Ide o závislosť tlakovej diferencie ($\Delta p = p_1 - p_k$), pričom odberné miesto tlakomeru p_1 je pred kavitačnou clonou, podľa obrázku 2.2, a tlakomer p_k je umiestnený v tlakovej nádobe (obrázok 2.1). Týmto spôsobom bola stanovená regresná charakteristika, vychádzajúca z ôsmich prevádzkových bodov, získaných pri statickej skúške. Podľa nej je možné v čase pre konkrétnu hodnotu $\Delta p = p_1 - p_k$ po dosadení do rovnice regresnej charakteristiky určiť prietok.



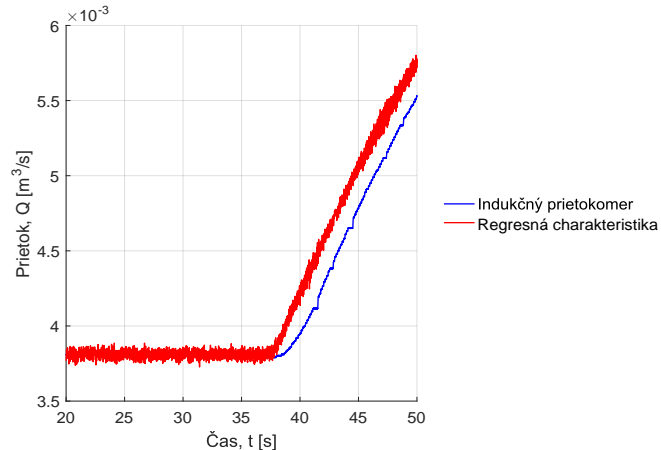
Obr. 3.9: Regresná charakteristika pre clonu s jedným otvorom získaná z merania pri tzv. statickej skúške z ôsmich prevádzkových bodov

Porovnanie hodnoty prietoku získaného z indukčného prietokomeru a regresnej charakteristiky je zobrazená v grafoch na obrázkoch 3.10 a 3.11. Na obrázku 3.10 je možné vidieť zhodu oboch kriviek pre veľkú časť vyhodnocovaného prietoku. Závislosti sa začínajú podstatne líšiť až pri prechode prúdenia do superkavitačného režimu, kde už nie

je možné použiť regresnú závislosť. Oneskorenie hodnoty prietoku z indukčného prietokomeru, spôsobené integračnou konštantou za okamžitou hodnotou prietoku podľa regresnej charakteristiky, je detailne zobrazená na grafe 3.11. Veľkosť oneskorenia sa v tomto prípade pohybuje v intervale 1,7 až 2,2 sekundy.



Obr. 3.10: Porovnanie prietokov



Obr. 3.11: Detail obrázku 3.10

3.2 Obrazové spracovanie

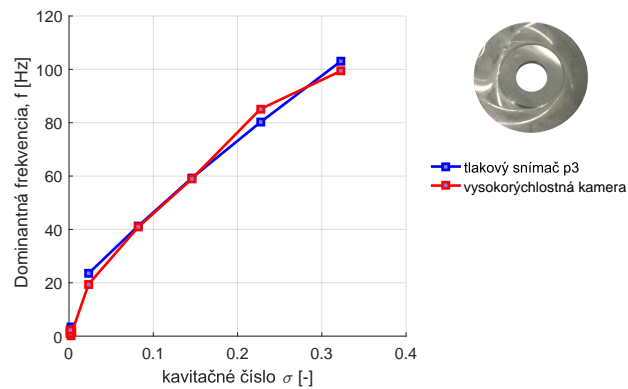
V nasledujúcej kapitole sú uvedené priebehy dominantných frekvencií získaných z fluktuácie intenzity pixelov (kapitola 1.9.5) v závislosti na *kavitačnom čísle* pre tri clony (clona s jedným otvorom, s deviatimi otvormi v štvorcovom usporiadaní a clona s deviatimi otvormi usporiadanými do kruhu). Priebeh frekvencií získaných z obrazového spracovania je porovnaný s frekvenciami získanými z tlakového snímača p_4 pre usporiadanie tlakových snímačov podľa obrázku 1.19. Úplné frekvenčné spektrá z ktorých boli získavané hodnoty dominantných frekvencií sú v prílohe B. Vstupný signál obrazového spracovania nebol nijakým spôsobom filtrovaný.

Vo všetkých troch prípadoch je v grafoch viditeľná dobrá zhoda medzi oboma použitými metódami. Najväčšia odchýlka pri clone s jedným otvorom je približne 4% (hodnota je vztiahnutá k rozlišovaciemu rozsahu frekvencií vysokorychlostnej kamery, teda k polo-vici vzorkovacej frekvencie: $\frac{f_s}{2} = 128,25 [Hz]$). Pri clone s deviatimi otvormi v štvorcovom usporiadaní sa preukázala najlepšia zhoda oboch metód na úrovni približne 3%. Naopak s najväčšou chybou približne 14% sa zhodujú výsledky dominantných frekvencií v prípade clony s deviatimi otvormi s usporiadaním do štvorca.

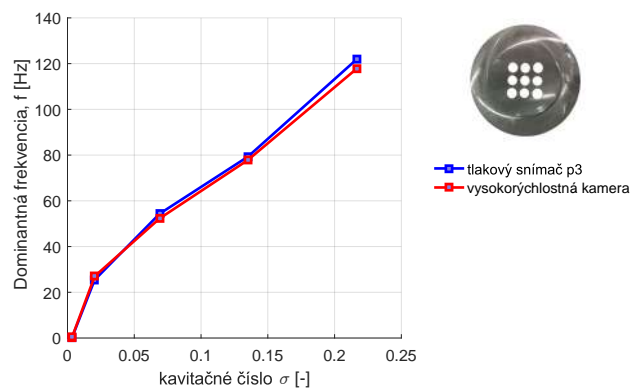
Definícia *kavitačného čísla* vo všetkých závislostiach 3.12 až 3.21 je definovaná identicky podľa vzťahu:

$$\sigma = \frac{p_3 - p_{va}(T)}{\rho \frac{\bar{v}^2}{2}} \quad (3.1)$$

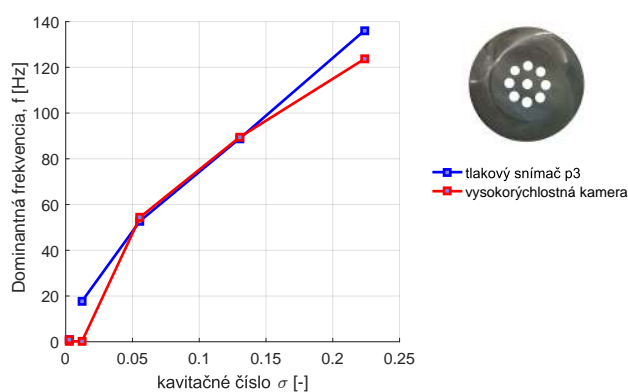
pričom referenčná hodnota tlakového odberu p_3 je určená podľa schémy na obrázku 1.19.



Obr. 3.12: Porovnanie dominantných frekvencií získaných z tlakového snímača p_4 (pre trubicu podľa obrázku 1.19) pre clonu s jedným otvorom



Obr. 3.13: Porovnanie dominantných frekvencií získaných z tlakového snímača p_4 (pre trubicu podľa obrázku 1.19) pre clonu s deviatimi otvormi v štvorcovom usporiadaní



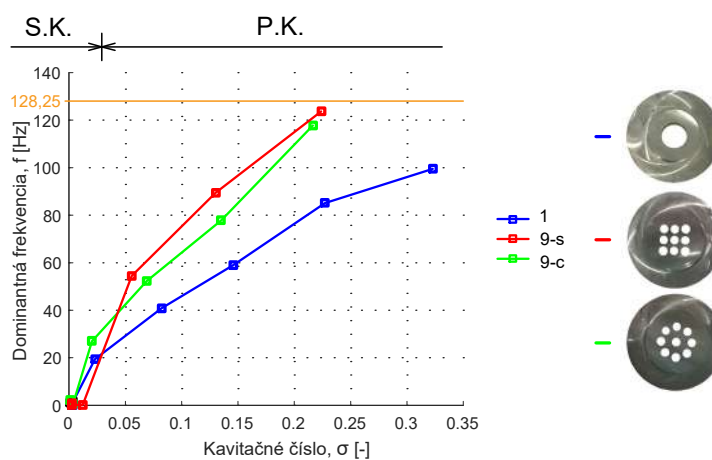
Obr. 3.14: Porovnanie dominantných frekvencií získaných z tlakového snímača p_4 (pre trubicu podľa obrázku 1.19) pre clonu s deviatimi otvormi s kruhovým usporiadaním

Porovnanie priebehu dominantných frekvencií v závislosti na *kavitačnom čísle* získaných z obrazového spracovania pre tri kavitačné clony je uvedené v grafe na obrázku 3.15.

Pri obrazovom spracovaní sú zachytené, z dôvodu obmedzenia vzorkovacou frekvenciou (v grafe 3.15 oranžovou farbou), len dva prevádzkové režimy prúdenia: režim *plno vyvinutej kavitácie* a *superkavitačný režim*.

V celom rozsahu vyhodnocovaných bodov je vidieť pokles dominantnej frekvencie s klesajúcim *kavitačným číslom*. Maximálna zaznamenaná frekvencia pre clonu s jedným otvorom má hodnotu $f = 99$ [Hz] pri *kavitačnom čísle* $\sigma = 0,32$ [-]. Na hranici Nyquistovej frekvencie (kapitola 1.9.1) sa pohybujú maximálne zistené hodnoty pre obe clony s deviatimi otvormi. Maximálnu frekvenciu zo všetkých vyhodnotených clôn dosahuje clona s kruhovým usporiadaním otvorov: $f = 123,7$ [Hz] s hodnotou $\sigma = 0,22$ [-]. Ďalej maximum pre clonu s usporiadaním otvorov do štvorca je $f = 117,7$ [Hz] s *kavitačným číslom* $\sigma = 0,21$ [-].

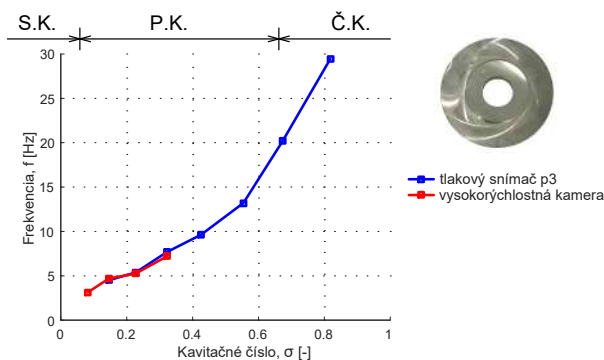
Vo vyhodnocovanom rozsahu *kavitačných čísel* je pre clony s deviatimi otvormi viditeľný strmší priebeh charakteristík v porovnaní s jednootvorovou clonou.



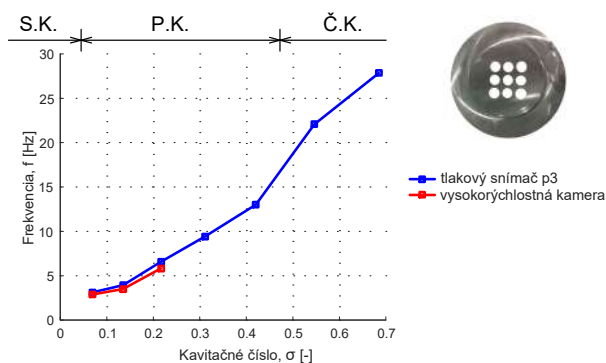
Obr. 3.15: Porovnanie dominantných frekvencií získaných z obrazového spracovania, P.K. - plno vyvinutá kavitácia, S.K. - superkavitácia

V grafoch na obrázkoch 3.16 až 3.18 sú zobrazené frekvencie, ktoré majú dominantnú amplitúdu len v oblasti *počiatočnej* a *čiastočne vyvinutej kavitácie*. V režimoch s väčšou hodnotou prietoku, kedy prúdenie prechádza do režimu *plno vyvinutej kavitácie* s nižším *kavitačným číslom* amplitúda prislúchajúca tomuto dejú vo frekvenčných spektrách klesá. Ide takisto o porovnanie priebehov frekvencií získaných z tlakového snímača p_4 (podľa obrázku 1.19) a frekvencií určených obrazovou analýzou.

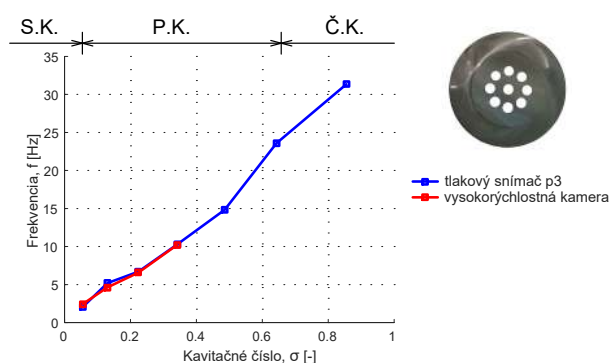
Opäť je viditeľná veľmi dobrá zhoda so zanedbateľnou percentuálnou odchýlkou charakteristických priebehov frekvencií pre obidve použité metódy vyhodnotenia. V prípade spracovania obrazu z vysokorychlostnej kamery však je možné identifikovať kavitačnú frekvenciu len v prípade plno vyvinutej kavitácie, pre hodnoty $\sigma < 0,4$ [-]. Pravdepodobnou príčinou je nižšie použité rozlíšenie snímok vysokorychlostnej kamery.



Obr. 3.16: Porovnanie frekvencií získaných z tlakového snímača p_4 (pre trubicu podľa obrázku 1.19) pre clonu s jedným otvorom, Č.K. - čiastočná kavitácia, P.K. - plno vyvinutá kavitácia, S.K. - superkavitácia



Obr. 3.17: Porovnanie frekvencií získaných z tlakového snímača p_4 (pre trubicu podľa obrázku 1.19) pre clonu s deviatimi otvormi v štvorcovom usporiadaní, Č.K. - čiastočná kavitácia, P.K. - plno vyvinutá kavitácia, S.K. - superkavitácia

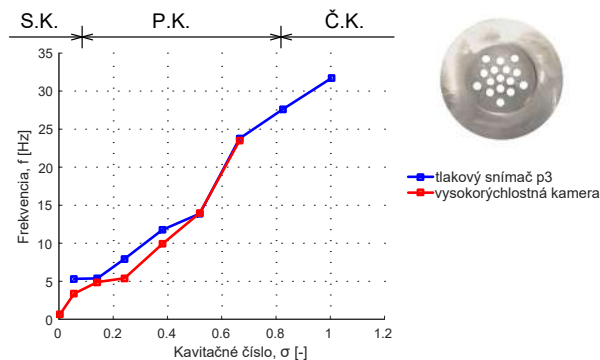


Obr. 3.18: Porovnanie frekvencií získaných z tlakového snímača p_4 (pre trubicu podľa obrázku 1.19) pre clonu s deviatimi otvormi s kruhovým usporiadaním, Č.K. - čiastočná kavitácia, P.K. - plno vyvinutá kavitácia, S.K. - superkavitácia

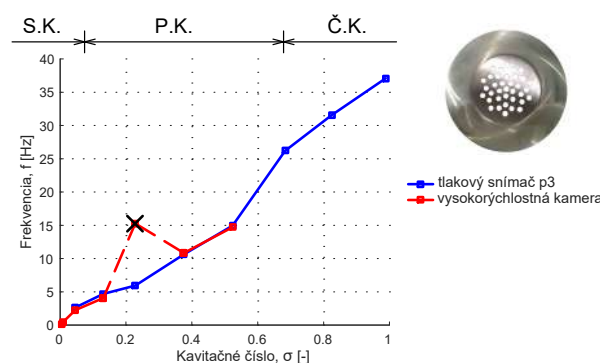
Kamerové záznamy boli rovnakým spôsobom vyhodnocované aj pre clonu so 16 a 36 otvormi. V týchto prípadoch kavitačných clón sa však vo frekvenčných spektrách podarilo

identifikovať len kavitačný dej spojený s nižšími hodnotami frekvencií (grafy na obrázkoch 3.19 a 3.20).

Frekvencie získané obrazovou analýzou aj v tomto prípade kopírujú priebehy frekvencií určených Fourierovou transformáciou z tlakového snímača. V prípade clony so šesťnástimi otvormi sa percentuálna odchýlka vzťahnutá k Nyquistovej frekvencii $\frac{f_s}{2} = 128,25 [Hz]$ medzi priebehmi pohybuje v rozmedzí 1,5% až 2%. Aj v prípade clony s tridsaťšesť otvormi je v celej vyhodnocovanej oblasti viditeľný pokles frekvencií s klesajúcim kavitačným číslom. Jedinú výnimku tvorí bod s kavitačným číslom $\sigma = 0,23 [-]$ v oblasti plno vyvinutej kavitácie v grafe na obrázku 3.20 a 3.21 označený čiernym krížom.



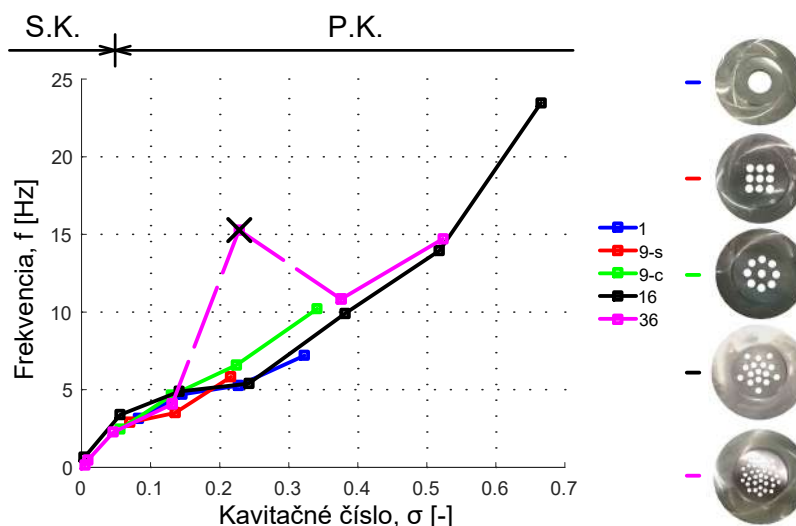
Obr. 3.19: Porovnanie frekvencií získaných z tlakového snímača p_4 (pre trubicu podľa obrázku 1.19) pre clonu s šesťnástimi otvormi, Č.K. - čiastočná kavitácia, P.K. - plno vyvinutá kavitácia, S.K. - superkavitácia



Obr. 3.20: Porovnanie frekvencií získaných z tlakového snímača p_4 (pre trubicu podľa obrázku 1.19) pre clonu s tridsaťšesť otvormi, Č.K. - čiastočná kavitácia, P.K. - plno vyvinutá kavitácia, S.K. - superkavitácia

V grafe na obrázku 3.21 je zobrazený priebeh frekvencií pre všetky kavitačné clony získané obrazovou analýzou. Najvyššia frekvencia je v tomto prípade zachytená pri clone so šesťnástimi otvormi s hodnotou približne $f \approx 23,5 Hz$ pre kavitačné číslo $\sigma \approx 0,67 [-]$.

Ďalej je tu zobrazený pokles frekvencií s kavitačným číslom pre oba vyhodnotenú režimi kavitácie bez výrazného vplyvu počtu otvorov kavitačnej clony a ich usporiadania na priebeh dominantnej frekvencie.



Obr. 3.21: Porovnanie jednotlivých priebehov frekvencií získaných z obrazovej analýzy pre všetkých päť kavitačných clôn. P.K. - plno vyvinutá kavitácia, S.K. - superkavitácia

3.3 Tlakové snímače - statické meranie

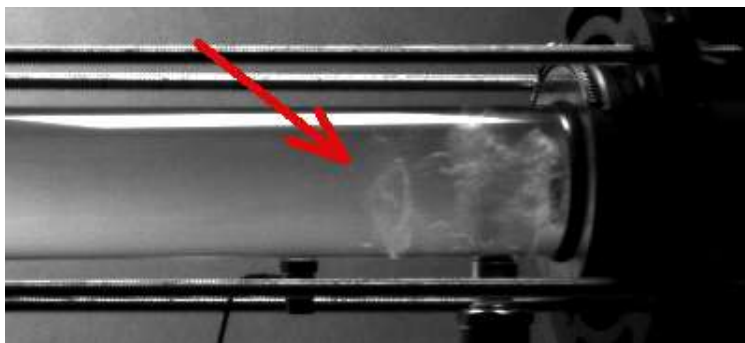
Statické meranie kavitačných clôn malo totožný postup merania (viď kapitola 2.2) ako v prípade zisťovania statických charakteristík v prácach [22], [16], a tiež v prípade stanovovania statických charakteristík a frekvenčných závislostí rôznych typov kavitačných trysiek v prácach [12], [36] a [20]. Vzorkovacia frekvencia tlakomerov pri tomto meraní je $f_s = 51200 \text{ Hz}$.

Meranie statických charakteristík započalo so zapojením tlakových snímačov podľa plexisklovej trubice použitej aj v práci [16] podľa schémy 1.26. Toto meranie však sprevádzala nepredpokladaná komplikácia v podobe deštrukcie tejto trubice pravbedpodobne únavovou trhlinou, ktorá sa začala šíriť z miesta predvrtaného otvoru slúžiaceho na zapojenie tlakového snímača. Z toho dôvodu sú v prípade clony s jedným otvorom použité aj merania z práce [22] podľa zapojenia snímačov na obrázku 1.19.

Rovnako ako v kapitole 3.1, kde boli v spektrogramoch (3.5 až 3.8 a tiež v prílohe A) pre dynamické meranie identifikované priebehy dvoch dejov spojených s kavitačnou dynamikou, aj v prípade statického merania je možné vo frekvenčných spektrách spojiť s kavitáciou vývoj dvoch dominantných frekvencií.

Prvou z nich je frekvencia spájaná s tvorbou vírových štruktúr. Podobne ako v práci [12] pre prúdenie v kavitačnej tryske sa podarilo aj v prípade kavitačného prúdenia v clone s jedným otvorom identifikovať tvorbu vírových krúžkov v kavitačnom štádiu prechodu z čiastočnej kavitácie do plno vyvinutého kavitačného prúdenia.

Obrázok 3.22 zobrazuje tvorbu dvoch vírových krúžkov tvorených odtrhnutím medznej vrstvy s koncentrovanou vírivostou od hrany kavitačnej clony. Tento jav sa vizuálne podarilo pozorovať len v prípade clony s jedným otvorom. Vývoj kavitačného prúdenia je pre všetky kavitačné clony a vybrané hodnoty kavitačných čísel podľa definície 3.1 zobrazené v prílohe C. Tu je možné si všimnúť najväčšej intenzity a tvorby vírových štruktúr práve pre clonu s jedným otvorom pri porovnaní s ostatnými clonami s približne konštantnou hodnotou kavitačného čísla.



Obr. 3.22: Tvorba a postupovanie vírových krúžkov pre clonu s jedným otvorom v oblasti plno vyvinutej kavitácie, kavitačné číslo $\sigma = 0,67 [-]$ (referenčný tlakomer p_3 podľa schémy 1.19)

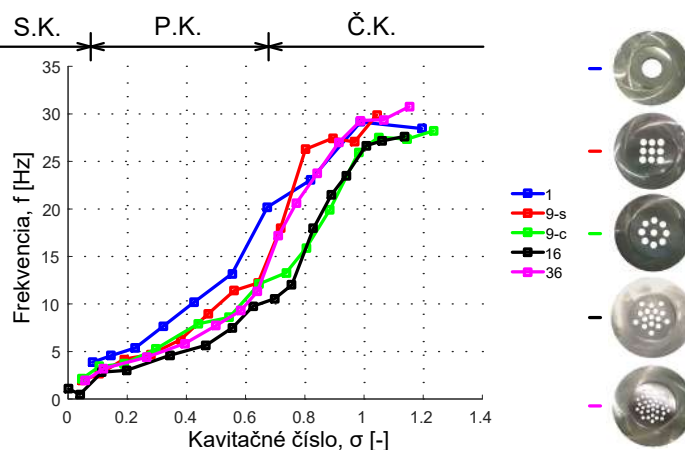
V grafe na obrázku 3.23 je zobrazený priebeh frekvencií spojených s odtrhnutím medznej vrstvy. V prípade clony s jedným otvorom sú frekvencie získané z tlakomera p_3 podľa schémy 1.19 a pre ostatné clony ide o snímač p_2 podľa schémy 2.2 (ich použitie je zameniteľné, keďže majú totožné umiestnenie vzhľadom na kavitačnú clonu). Zobrazená frekvencia je v tomto prípade jedinou zložkou s dominantnou amplitúdou v celom frekvenčnom spektre (okrem jasno identifikovateľných frekvencií súvisiacich s lopatkovou a otáčkovou frekvenciou čerpadla). Priebeh frekvencií v grafe na obrázku 3.23 korešponduje s frekvenciami získanými z analýzy obrazu podľa obrázku 3.21.

Vývoj frekvencií má veľmi podobný priebeh pre všetky kavitačné clony. Na hranici kavitačného prúdenia v počiatkoch čiastočnej kavitácie ($\sigma \approx 1$ až $1,2$) je frekvencia odtrhnutia medznej vrstvy takmer konštantná len s miernym poklesom, pričom hodnota maximálnych frekvencií je približne $f \approx 27,5$ až 30 Hz. Znižovaním kavitačného čísla pri prechode medzi čiastočnou a plno vyvinutou kavitáciou, je viditeľný strmý pokles frekvencií. Počas prechodu cez plno vyvinutú kavitáciu je zobrazený priebeh menej strmý až na hranicu superkavitácie. V prípade tvorby superkavitačného paprsku sú tieto frekvencie na nulovej hodnote.

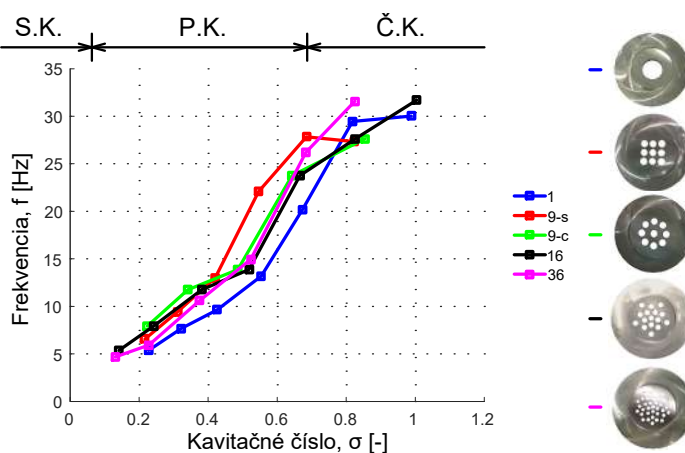
Pre porovnanie je rovnaká závislosť vykreslená aj v grafe na obrázku 3.24 pre tlakový snímač p_4 , umiestnený približne $7D$ za kavitačnou clonou podľa schémy 1.19. Tu je takisto viditeľný priebeh frekvencií súvisiacich s odtrhnutím medznej vrstvy s počiatočnou hodnotou $f \approx 25$ až 30 Hz. So vstupom do plno vyvinutej kavitácie prichádza k prudkému poklesu frekvencií, ktoré sú tu zachytené až po hranicu superkavitačného prúdenia.

Amplitúda frekvencií, ktorých priebeh je zobrazený na obrázku 3.23 a 3.24 však v oblasti plno vyvinutej kavitácie nie je dominantnou. Táto situácia je najlepšie viditeľná pri zobrazení frekvenčných spektier z tlakových snímačov, ktoré sú umiestnené vo väčšej vzdialenosti od kavitačnej clony, tak aby kapsa sýtých pár vytvorená tesne za kavitačnou clonou v plno vyvinutej kavitácii nemohla ovplyvniť tlakový snímač.

Priebeh frekvencií s dominantnou amplitúdou v režime plno vyvinutej kavitácie je v grafe na obrázku 3.25. Tieto frekvencie prislúchajú tlakovým pulzáciám kvapaliny a kavitačného mraku v ose potrubia. Obrázok 3.25 zobrazuje porovnanie priebehu tlakových pulzácií podľa tlakomera p_5 podľa schémy 1.19 pre všetky kavitačné clony. Pre clony s jedným otvorom a obe clony s deviatimi otvormi sú pre porovnanie tiež čiarkovane zobrazené dominantné frekvencie získané z obrazovej analýzy.



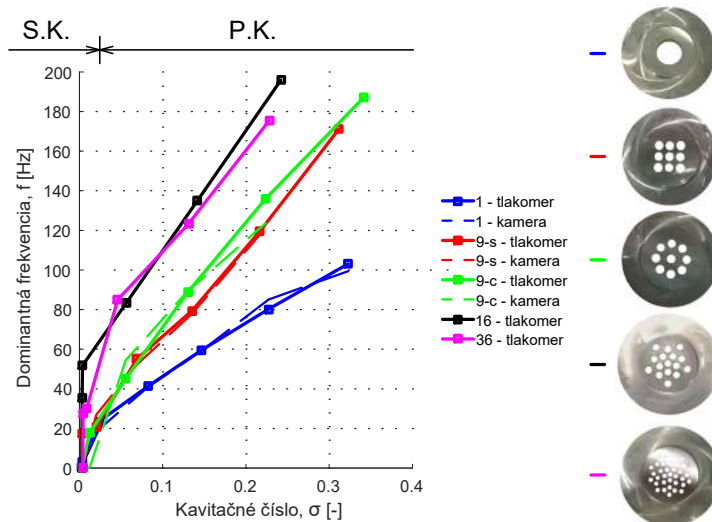
Obr. 3.23: Porovnanie priebehu frekvencií piatich kavitačných clôn v závislosti na kavitačnom čísle podľa definície 3.1



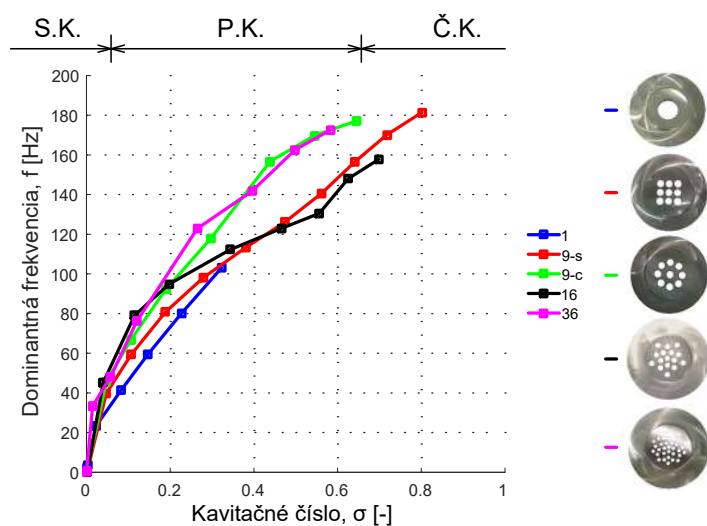
Obr. 3.24: Porovnanie priebehu frekvencií piatich kavitačných clôn v závislosti na kavitačnom čísle podľa definície 3.1, tlakový snímač p_4 podľa schémy 1.19

Viditeľný je pokles dominantných frekvencií v celej škále kavitačných čísiel. Zjavná je aj rôzna strmnosť kriviek, pričom s rastúcim počtom otvorov kavitačnej clony rastie aj strmnosť charakteristiky. Toto správanie súhlasí aj s výsledkami z dynamického merania, konkrétne znázornených na spektrogramoch 3.5 až 3.8, kde je znázornená rozdielna strmnosť poklesu, resp. rastu dominantných frekvencií pre clonu s jedným a s tridsaťšesť otvormi.

Rovnaká závislosť je zobrazená aj v grafe na obrázku 3.26 pre tlakový snímač p_3 podľa schémy 2.2, pre clonu s jedným otvorom je použité meranie podľa 1.19 a referenčný snímač p_4 . V tomto prípade je viditeľná závislosť dominantnej frekvencie pre širší interval kavitačného čísla popisujúci celú oblasť *plno vyvinutej kaviácie*. V oblasti nízkych hodnôt kavitačného čísla: $\sigma < 0,2$ prevláda zhoda v charaktere priebehu a platí strmší pokles dominantných frekvencií pre väčší počet otvorov. So zvyšujúcim sa kavitačným číslom je priebeh frekvencií horšie predvídateľný, v grafe na obrázku 3.26 to zobrazuje napríklad priebeh frekvencií pre clonu so šesťnástimi otvormi.



Obr. 3.25: Porovnání průbehů dominantních frekvencí statického měření s výsledkami z obrazové analýzy a tlakomeru p_5 pro zapojení podle 1.19 a definici kavitačního čísla 3.1



Obr. 3.26: Porovnání průbehů dominantních frekvencí statického měření pro všechny kavitační clony z tlakového odberu v místě p_3 podle schémy 2.2, pro clonu s jedním otvorem je použitý tlakomer p_4 podle 1.19

4 ZÁVER

Hlavným cieľom diplomovej práce bolo vyhodnotenie kavitačnej dynamiky piatich kavitačných cloniek, ktoré sa líšia počtom otvorov pričom spĺňajú podmienku konštantnej prietochnej plochy.

Pre zistenie dominantných frekvencií boli použité tri metódy merania (statické meranie, dynamické meranie, záznamy vysokorýchlostnej kamery), tak aby mohli byť medzi sebou vzájomne porovnávané, pričom pre každú z metód bola dodržaná metodika merania a vyhodnotenia, založená na Fourierovej transformácii, popísaná v predchádzajúcich kapitolách.

Dynamická skúška bola vykonaná pre dve rôzne usporiadania otvorov v kavitačnej clone: pre clonu s jedným a pre clonu s tridsaťšesť otvormi. Z výsledkov práce je vidieť rozdielny charakter priebehu amplitúd tlakových pulzácií so zmenou prietoku. Zatiaľ čo pre clonu s jedným otvorom platí postupné zvyšovanie amplitúdy tlaku od okamihu *počiatočnej kavitácie* až do *plno vyvinutého kavitačného* prúdenia. Pre clonu s tridsaťšesť otvormi je typický pokles amplitúd tlaku pri prechode medzi *čiasťou* a *plno vyvinutou kavitáciou* v smere zvyšovania a takisto aj znižovania prietoku. Pre obidve clony platí, že maximálne tlakové špičky sú dosahované v režime *plno vyvinutej kavitácie*, pričom pre clonu s jedným otvorom má maximálna zaznamenaná hodnota tlaku veľkosť približne 745 kPa . Pri clone s tridsaťšesť otvormi prichádza k zníženiu amplitúd tlaku v tejto oblasti na hodnotu približne 270 kPa . Použitie druhej spomínanej clony tak predstavuje zníženie tlakových amplitúd o 64% (pre porovnanie amplitúdy tlaku zmerané v kavitačnej tryske v práci [12], dosahujú maximálnych hodnôt približne 1200 kPa). Z dynamickej skúšky vyplýva tiež nižšia amplitúda vyšších harmonických frekvencií a menšie zašumenie signálu so zväčšujúcim sa počtom otvorov.

Veľmi prínosnou metódou použitou pre stanovenie dominantných frekvencií je obrazová analýza videozáznamu. Vďaka nej bolo možné jednoznačne priradiť frekvencie prislúchajúce kavitačnej dynamike, resp. vylúčiť z frekvenčných spektier tzv. statických meraní tie, ktoré sú propagované do signálu z iných zdrojov (otáčková a lopatková frekvencia čerpadla, vlastná frekvencia hydraulického okruhu,...).

Predstavené vyhodnocovacie metódy vo výsledku ponúkajú uspokojujúcu zhodu pri identifikácii dominantných frekvencií. Pre všetky uvedené kavitačné clony sa tak podarilo určiť dva javy súvisiace s kavitačnou dynamikou. Prvým z nich je frekvencia odtŕhania turbulentnej medznej vrstvy, pričom pri clone s jedným otvorom sa pozoroval vznik vírových krúžkov. Tento dej sa s frekvenciou $f \approx 25$ až 30 Hz vo frekvenčných spektrách všetkých kavitačných clôn objavuje v počiatočnej fáze *čiasťou vyvinutej kavitácie*, tj pre $\sigma \approx 0,7$ do $1,2$. Postupným znižovaním *kavitačného čísla* klesá aj frekvencia odtŕhania medznej vrstvy až na jednotky Hercov v *plno vyvinutej kavitácii*. Pre všetky kavitačné clony sa túto frekvenciu podarilo potvrdiť vo frekvenčných spektrách obrazovej analýzy.

Vo frekvenčných spektrách Fourierovej transformácie z tlakových snímačov sa v oblasti *plno vyvinutej kavitácie* pre *kavitačné čísla* $\sigma \approx 0,05$ do $0,6$ objavuje dominantná frekvencia s maximálnou hodnotou $f \approx 200 \text{ Hz}$, ktorá súvisí s pulzovaním kavitačného mraku v ose potrubia. Z výsledkov vyplýva aj rôzna strmosť kriviek priebehov dominantných frekvencií v závislosti na *kavitačnom čísle* a počte otvorov v kavitačnej clone. Preukázalo sa, že v tomto prípade s rastúcim počtom otvorov rastie aj strmosť krivky. Jednotlivé priebehy boli s dobrou presnosťou potvrdené aj obrazovou analýzou pre clonu s jedným otvorom a pre obidve clony s deviatimi otvormi.

LITERATÚRA

- [1] BALASUNDARAM, B. a S.T.L. HARRISON. *Disruption of Brewers- Yeast by Hydrodynamic Cavitation: Process Variables and Their Influence on Selective Release* [online]. Department of Chemical Engineering, University of Cape Town, 2006, , 9 [cit. 2018-03-25]. DOI: 10.1002/bit.20878. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/bit.20878>
- [2] BLAŽEK, Josef. Měření a analýza spalovacích tlaků. In: *Slide Player* [online]. Technická univerzita v Liberci [cit. 2018-03-25]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/12327760/>
- [3] BRDIČKA, Miroslav, Ladislav SAMEK a Oldřich TARABA. *Kavitace: Diagnostika a technické využití*. Prvé. Praha: SNTL, 1981.
- [4] BRENNEN, Christopher E. (Christopher Earls). *Cavitation and bubble dynamics*. New York: Cambridge University Press, 2014. ISBN 9781107644762.
- [5] ČECH, Jaroslav, Jiří PERNIKÁŘ a Kamil PODANÝ. *Strojírenská Metrologie I*. Třetí vydanie. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN 978-80-214-4010-4.
- [6] D'AGOSTINO, Luca, Angelo CERVONE, Giovanni PACE a Dario VALENTINI. *An Introduction to Cavitation in Inducers and Turbopumps* [online]. Marec 2017, , 38 [cit. 2018-05-14]. DOI: 10.1007/978-3-319-49719-8_1. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/315352164_An_Introduction_to_Cavitation_in_Inducers_and_Turbopumps
- [7] DEVELKER, Kirthi Kumar. *Spectral Analysis with MATLAB* [online]. [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=qrU2jsSqWD8>
- [8] DOKOUPIL, Pavel. *Měření napjatosti ve spirále vodní turbíny pomocí tenzometrů* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2014 [cit. 2018-01-25]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/34366>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Vladimír Habán.
- [9] DOKOUPIL, Pavel. *Modelový výzkum vodních turbín* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2012 [cit. 2018-03-08]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/15474>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Jaroslav Štigler.
- [10] FRANC, Jean-Pierre a Jean-Marie MICHEL. FUNDAMENTALS OF CAVITATION. *Grenoble Sciences* [online]. 2003, 16 [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <https://www.grenoble-sciences.fr/sites/default/files/pdf/ouvrages/extraits/31732041.pdf44>
- [11] GOGATE, Parag R. *Hydrodynamic Cavitation for Food and Water Processing*. *Springer Science+Business Media* [online]. 2010, , 16 [cit. 2018-03-25]. Dostupné z: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs11947-010-0418-1.pdf>

- [12] GRÍGER, Milan. *Hydraulické charakteristiky proudění v kavitačních tryskách* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2013 [cit. 2018-01-30]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/26884>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Energetický ústav. Vedoucí práce Pavel Rudolf.
- [13] HABÁN, Vladimír. Osobná konzultácia. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 24.4.2018
- [14] HÁTAŠOVÁ, JUSTÝNA. *RAYLEIGH-PLESSETOVA ROVNICE* [online]. Brno, 2015 [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=104495. Bakalářská práce. VUT Brno, FSI. Vedoucí práce Doc. Ing. PAVEL RUDOLF, Ph.D.
- [15] HLAVÁČEK, David. *Kavitující proudění v konvergentně-divergentní trysce* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2012 [cit. 2018-01-25]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/5673>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Energetický ústav. Vedoucí práce Pavel Rudolf.
- [16] HOCHMAN, Ondřej. *Využití fraktální geometrie při návrhu hydraulické clony* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2017 [cit. 2018-01-31]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/66309>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Energetický ústav. Vedoucí práce Pavel Rudolf.
- [17] HUDEC, Martin. Osobná konzultácia. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Laboratoř hydraulických strojů odboru fluidního inženýrství Victora Kaplana, 14.12.2017
- [18] *Kistler - Piezorton* [online]. In: . [cit. 2018-03-25]. Dostupné z: https://intertechnology.com/Kistler/pdfs/Pressure_Model_211B.pdf
- [19] KOZÁK, Jiří, Pavel RUDOLF, David ŠTEFAN, Martin HUDEC a Milan GRÍGER. *ANALYSIS OF PRESSURE PULSATIONS OF CAVITATING FLOW IN CONVERGING-DIVERGING NOZZLE* [online]. 9.9.2015, , 9 [cit. 2018-02-08]. Dostupné z: http://iahrwg2015.si/files/papers/1_Numerical_and_experimental_investigation_on_cavitating_flows/IAHR__WG_15_1_2_KOZAK.pdf
- [20] KOZÁK, Jiri, Pavel RUDOLF, Rostislav H., et al. Transition of cavitating flow to supercavitation within Venturi nozzle - Hysteresis investigation. *EPJ Web of Conferences* [online]. EDP Sciences, 2017, **143**, xocs:firstpage xmlns:xocs= [cit. 2018-02-08]. DOI: 10.1051/epjconf/201714302055. ISSN 21016275.
- [21] KOZÁK, Jiří. Cavitation induced by rotation of liquid. Brno, 2015. Pojednání k disertační práci. VUT Brno. Vedoucí práce Doc. Ing. PAVEL RUDOLF, Ph.D.
- [22] KUBINA, Dávid. *Kavitující proudění v perforovaném disku* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2016 [cit. 2018-01-30]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/60183>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Energetický ústav. Vedoucí práce Pavel Rudolf.

- [23] KUMAR, Senthil P., Siva KUMAR a A.B. PANDIT. *Experimental quantification of chemical effects of hydrodynamic cavitation* [online]. [cit. 2018-03-25]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Aniruddha_Pandit2/publication/259577802_Experimental_Quantification_of_Chemical_Effects_of_Hydrodynamic_Cavitation/links/546369c10cf2c0c6aec4b7d4.pdf. University of Mumbai.
- [24] LADMA, Vladimir. Music theory - Musical perception. *Traced ideas* [online]. [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: <http://www.traced-ideas.eu/music/perception.html>
- [25] LEE, Andrew K. , David M. LEWIS a Peter J. ASHMAN. Microalgal cell disruption by hydrodynamic cavitation for the production of biofuels. *Springer Science+Business Media* [online]. , 11 [cit. 2018-03-25]. DOI: 10.1007/s10811-014-0483-3. ISSN 0921-8971. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Andrew_Lee16/publication/269577907_Microalgal_cell_disruption_by_hydrodynamic_cavitation_for_the_production_of_biofuels/links/54949bca0cf2ec1337581a21/Microalgal-cell-disruption-by-hydrodynamic-cavitation-for-the-production-of-biofuels.pdf
- [26] LIUZZI, Daniele. *Two-Phase Cavitation Modelling: Fully Compressible Formulation* [online]. Rím, 2012 [cit. 2018-04-06]. Dostupné z: <https://web.uniroma1.it/aerophd/sites/default/files/Thesis-06-06-2012.pdf>. Dizertační práce. UNIVERSITY OF ROME - LA SAPIENZA -, Faculty of Civil and Industrial Engineering.
- [27] LYONS, G. Richard. *Understanding digital signal processing*. Vyd. 2. New Jersey: Prentice-Hall, 2004, 665 s. ISBN 0-13-108989-7.
- [28] MQI 99 - S: Indukční průtokoměr. *ELA přístroje pro měření hladiny a průtoku* [online]. [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <http://www.elabrno.cz/cs/mqi-99-s/>
- [29] *Nejistoty v měření I: vyjadřování nejistot* [online]. 2001, **2001**(7-8) [cit. 2018-03-31]. ISSN ISSN 1210-9592. Dostupné z: http://www.automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/10960.pdf
- [30] *Nejistoty v měření II: nejistoty přímých měření* [online]. 2001, **2001**(10) [cit. 2018-03-31]. ISSN 1210-9592. Dostupné z: http://www.automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/10961.pdf
- [31] *Nejistoty v měření III: nejistoty nepřímých měření* [online]. 2001, **2001**(12) [cit. 2018-03-31]. ISSN ISSN 1210-9592. Dostupné z: http://www.automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/10962.pdf
- [32] PLESSET, M.S. The Dynamics of Cavitating Flow. *Journal of Applied Mechanics* [online]. 1949, September 1949, 6 [cit. 2018-04-16]. ISSN 0021-8936. Dostupné z: <https://authors.library.caltech.edu/48246/1/The%20Dynamics%20of%20Cavitation%20Bubbles.pdf>
- [33] POCHYLÝ, František a Simona FIALOVÁ. *The Cavitation Effect on the Electromagnetic Field* [online]. Janurár 2010, , 7 [cit. 2018-05-14]. DOI: 10.1007/978-3-642-05022-0_19. Dostupné z:

https://www.researchgate.net/publication/226908350_The_Cavitation_Effect_on_the_Electromagnetic_Field

- [34] PRESTON, A.T., T. COLONIUS a C.E. BRENNEN. *A numerical investigation of unsteady bubbly cavitating nozzle flows* [online]. , 12 [cit. 2018-04-06]. DOI: 10.1063/1.1416497. Dostupné z: <https://authors.library.caltech.edu/138/1/PRE206.pdf>
- [35] ROTHERY, Evan. Spectrograms: an Introduction. *National Music Centre* [online]. [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=_FatxGN3vAM
- [36] RUDOLF, P., M. HUDEC, M. GRÍGER a D. ŠTEFAN. Characterization of the cavitating flow in converging-diverging nozzle based on experimental investigations. *EPJ Web of Conferences* [online]. EDP Sciences, 2014, **67**, xocs:firstpage xmlns:xocs= [cit. 2018-01-30]. DOI: 10.1051/epjconf/20146702101. ISBN 9788026053750. ISSN 21016275.
- [37] RUDOLF, Pavel, Dávid KUBINA, Martin HUDEC, Jiří KOZÁK, Blahoslav MARŠÁLEK, Eliška MARŠÁLKOVÁ ELIŠKA a František POCHYLÝ. Experimental investigation of hydrodynamic cavitation through orifices of different geometries. *EPJ Web of Conferences* [online]. EDP Sciences, 2017, **143**, 02098 [cit. 2018-03-02]. DOI: 10.1051/epjconf/201714302098. ISSN 2100-014X. Dostupné z: https://www.epj-conferences.org/articles/epjconf/abs/2017/12/epjconf_efm2017_02098/epjconf_efm2017_02098.html
- [38] RUDOLF, Pavel. Prednášky k predmetu: Hydromechanika (5HY). Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2016
- [39] SAMSON AG. *Cavitation in Control Valves: Technical Information* [online]. 11/2003, , 64 [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <https://www.samson.de/document/l351en.pdf>
- [40] SEDLÁ, M, M KOMÁREK, P RUDOLF, J KOZÁK a R HUZLÍK. Numerical and experimental research on unsteady cavitating flow around NACA 2412 hydrofoil. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2015, **72**(2), 022014 [cit. 2018-02-08]. DOI: 10.1088/1757-899X/72/2/022014. ISSN 1757-8981.
- [41] SLAVÍČEK, Ondřej. *Dynamické charakteristiky běžně používaných snímačů tlaku* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2016 [cit. 2018-03-27]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/60905>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Energetický ústav. Vedoucí práce Vladimír Habán.
- [42] Spectrogram: Spectrogram using short-time Fourier transform. *MathWorks* [online]. [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/signal/ref/spectrogram.html>
- [43] TESTUD, P., P. MOUSSOU, A. HIRSCHBERG a Y. AURÉGAN. Noise generated by cavitating single-hole and multi-hole orifices in a water pipe. *Journal of Fluids and Structures* [online]. Elsevier, 2007, **23**(2), 163-189 [cit. 2018-01-30]. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2006.08.010. ISSN 0889-9746.

- [44] TŮMA, Jiří. *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT*. Praha: Sdělovací technika, 1997. ISBN 80-901936-1-7.
- [45] VAN VEEN, Barry. *Short-time Fourier Transform and the Spectrogram* [online]. [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=NA0TwPsECUQ>
- [46] WANG, Yi-Chun a Christopher E. BRENNEN. *One-Dimensional Bubbly Cavitating Flows Through a Converging-Diverging Nozzle* [online]. , 5 [cit. 2018-03-01]. Dostupné z: <https://authors.library.caltech.edu/173/1/WNG173.pdf>

ZOZNAM SYMBOLOV, VELIČÍN A SKRATIEK

Symbol	Jednotka	Názov
A	m^2	plocha
C_p	-	tlakový koeficient
D	m	priemer
f	Hz	frekvencia
f_N	Hz	Nyquistova frekvencia
f_s	Hz	vzorkovacia frekvencia
g	m/s^2	gravitačné zrýchlenie
h_s	m	sacia výška
p	Pa	tlak
p_B	Pa	tlak v kavitačnej bubline
p_G	Pa	parciálny tlak plynu v bubline
p_L	Pa	tlak v kvapaline
p_{va}	Pa	parciálny tlak nasýtených pár
p_∞	Pa	tlak v neovplyvnenej oblasti
Q	l/s	prietok
R	m	polomer
t	s	čas
t	°C	teplota
T	K	termodynamická teplota
S	N/m	povrchové napätie
u	m/s	rýchlosť
v	m/s	rýchlosť
\bar{v}	m/s	stredná prierezová rýchlosť
x	m	dĺžková súradnica
Y	J/kg	merná energia
Y_z	J/kg	strátová merná energia
Grécke písmená		
α	-	parný objemový zlomok
η	-	počet kavitačných bublín na jednotku objemu
μ	-	dynamická viskozita
σ	-	kavitačné číslo
σ_i	-	počiatočné kavitačné číslo
ξ_m	-	miestny stratový súčiniteľ
ρ	kg/m^3	hustota
Značky		
B.K.		bezkvitačná oblasť
Č.K.		oblasť čiastočnej kavitácie
DFT		diskrétna Fourierova transformácia
FFT		rýchla Fourierova transformácia
NPSH	m	čistá sacia merná výška
P.K.		oblasť plno vyvinutej kavitácie
S.K.		superkvitačná oblasť

STFT

krátka Fourierova transformácia

Indexy

L

kvapalina

s

hodnota veličiny získaná proti prúdu z okrajovej
podmienky

va

nasýtená para

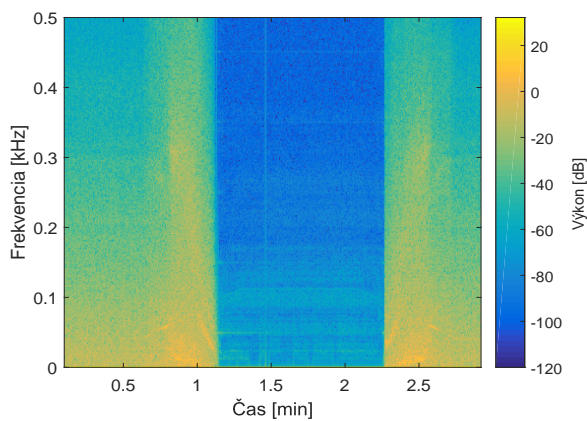
*

rozmerová veličina

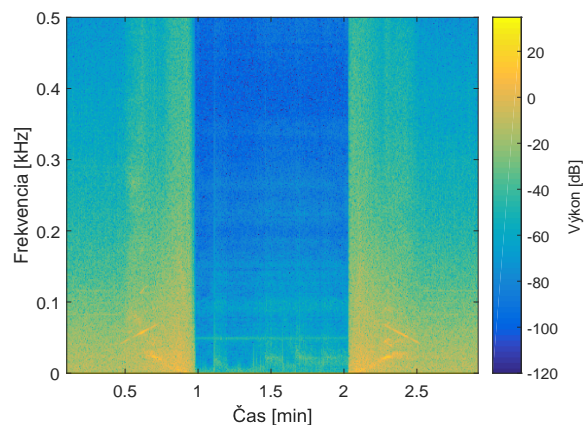
ZOZNAM PRÍLOH

A	Dynamické meranie (STFT)	79
B	Porovnanie frekvenčných spektier	81
B.1	Clona s jedným otvorom	81
B.2	Clona s deviatimi otvormi (štvorcové usporiadanie)	83
B.3	Clona s deviatimi otvormi (kruhové usporiadanie)	84
B.4	Clona so šestnástimi otvormi	86
B.5	Clona s tridsaťšesť otvormi	89
C	Obrazová príloha	91
D	Zdrojové kódy	93
D.1	Statické meranie	93
D.2	Obrazová analýza	93

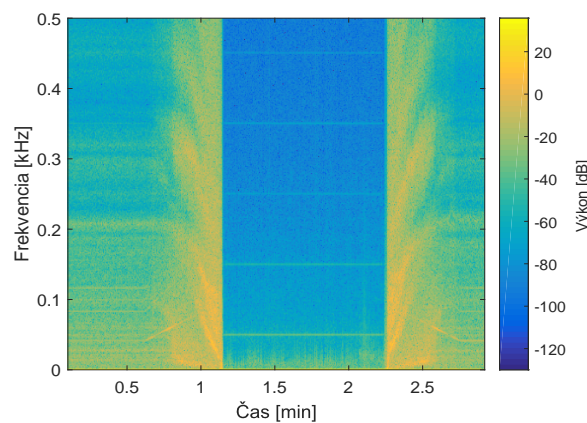
A DYNAMICKÉ MERANIE (STFT)



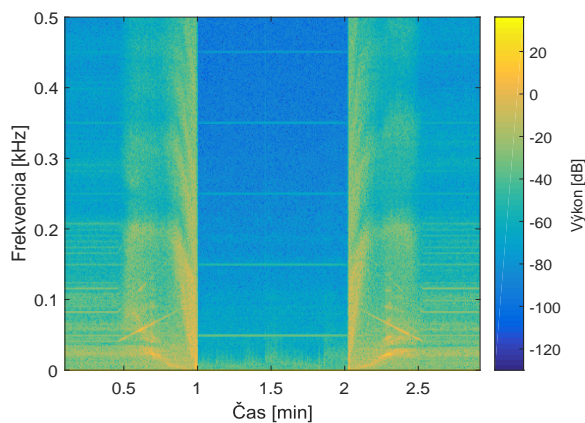
Obr. A.1: 1-otv., sním. p_2 podľa 2.2



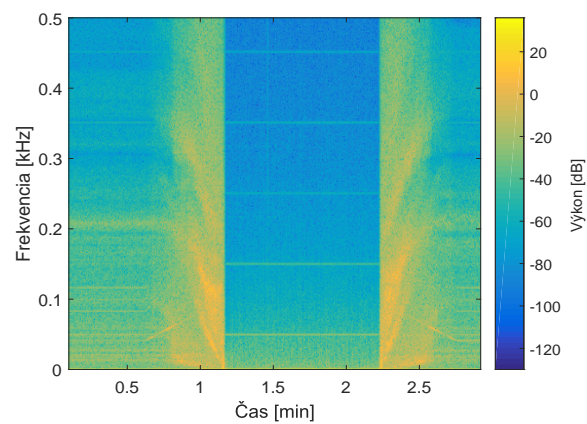
Obr. A.2: 36-otv., sním. p_2 podľa 2.2



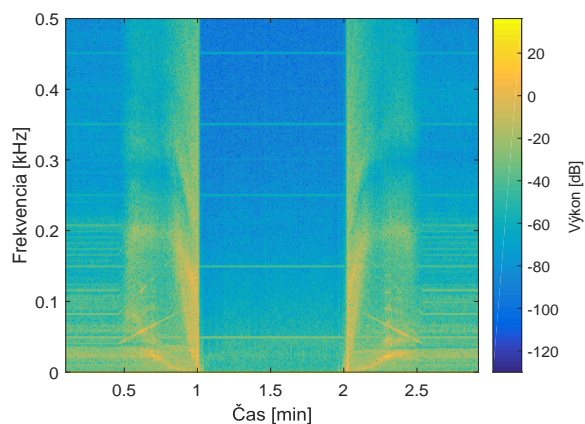
Obr. A.3: 1-otv., sním. p_3 podľa 2.2



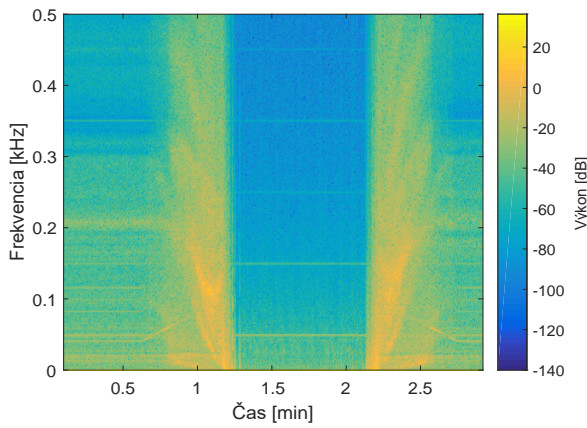
Obr. A.4: 36-otv., sním. p_3 podľa 2.2



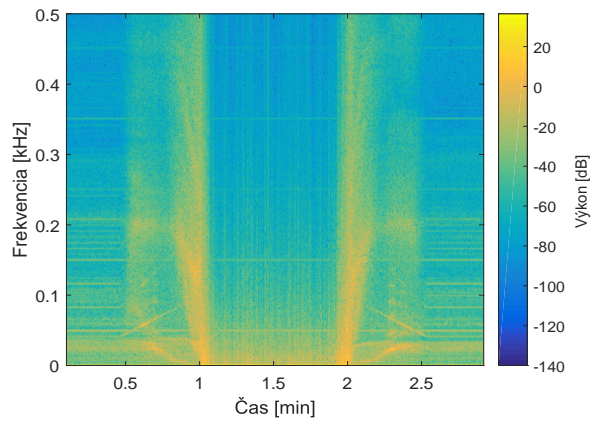
Obr. A.5: 1-otv., sním. p_4 podľa 2.2



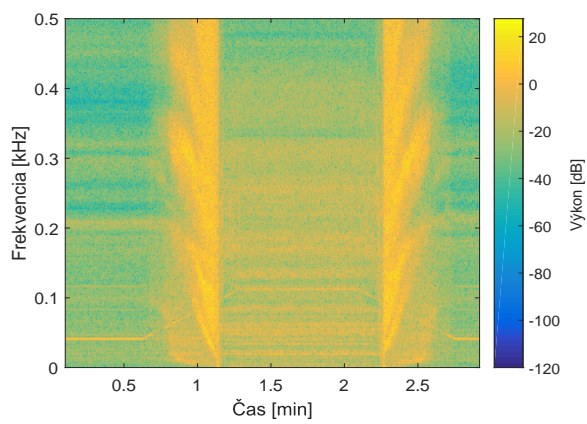
Obr. A.6: 36-otv., sním. p_4 podľa 2.2



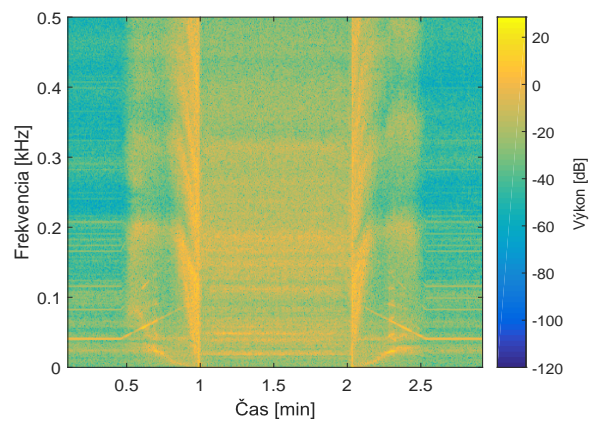
Obr. A.7: 1-otv., snim. p_5 podla 2.2



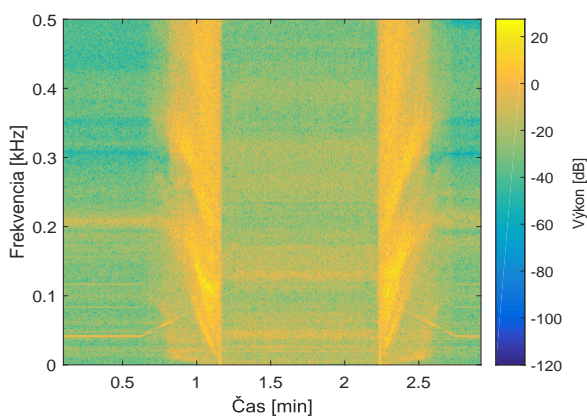
Obr. A.8: 36-otv., snim. p_5 podla 2.2



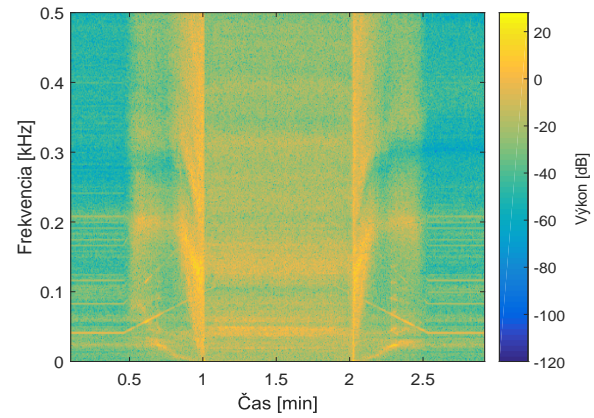
Obr. A.9: 1-otv., snim. k_1 podla 2.2



Obr. A.10: 36-otv., snim. k_1 podla 2.2



Obr. A.11: 1-otv., snim. k_2 podla 2.2

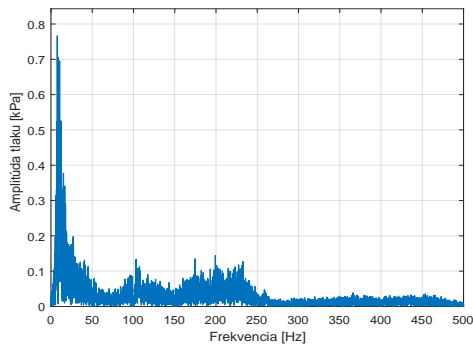


Obr. A.12: 36-otv., snim. k_2 podla 2.2

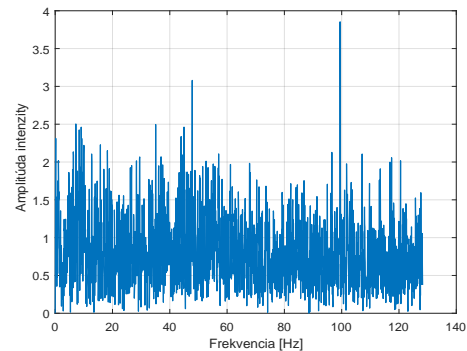
B POROVNANIE FREKVENČNÝCH SPEKTIER

Pre rýchlejšiu orientáciu vo frekvenčných spektrách je vhodné čitateľa upozorniť na rozdielny rozsah frekvencií uvádzaných na horizontálnej ose pre meranie tlakovým snímačom a vysokorýchlostnou kamerou.

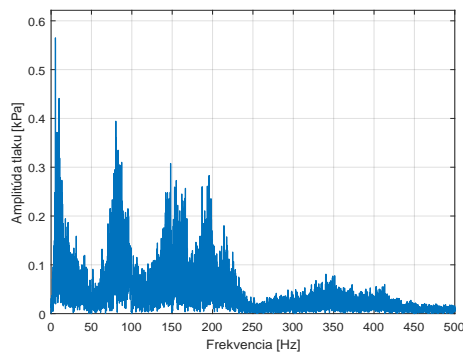
B.1 Clona s jedným otvorom



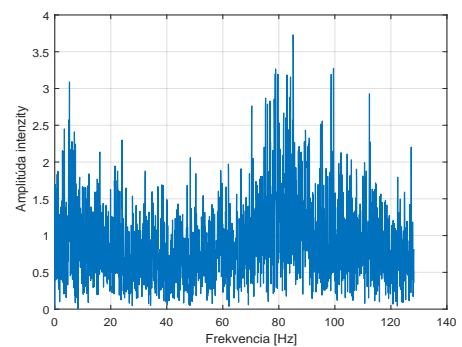
Obr. B.1: Tlakový snímač p_4 podľa 1.19



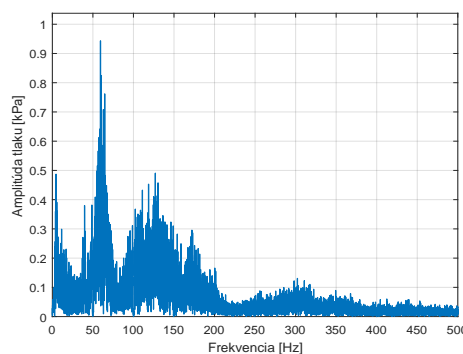
Obr. B.2: Vysokorýchlostná kamera



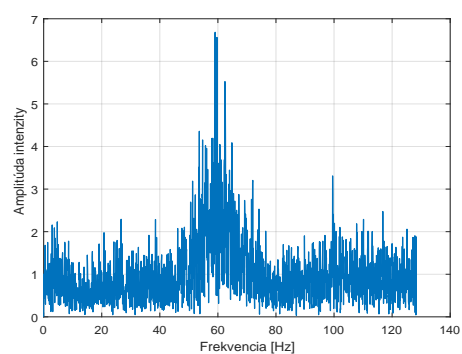
Obr. B.3: Tlakový snímač p_4 podľa 1.19



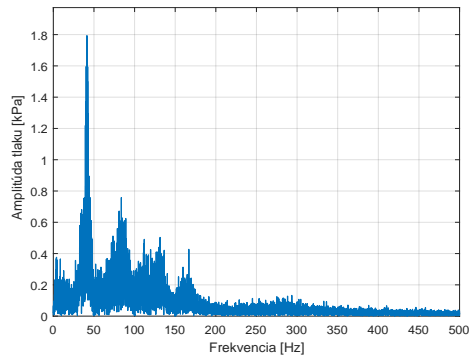
Obr. B.4: Vysokorýchlostná kamera



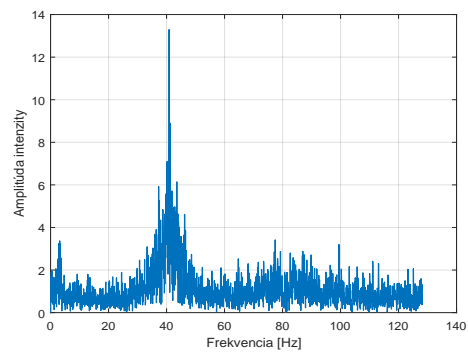
Obr. B.5: Tlakový snímač p_4 podľa 1.19



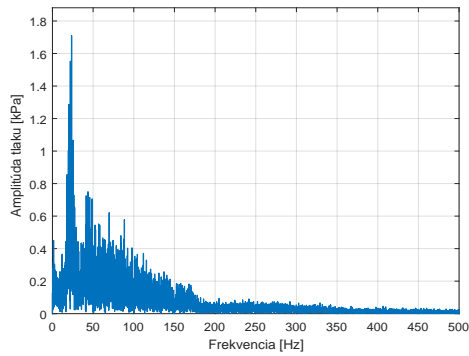
Obr. B.6: Vysokorýchlostná kamera



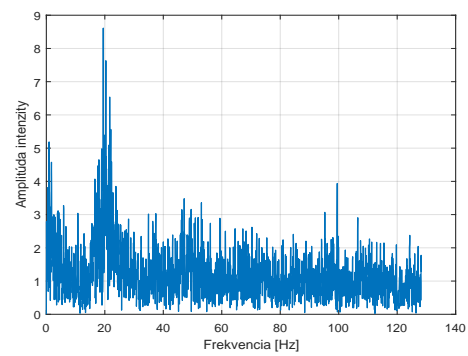
Obr. B.7: *Tlakový snímač p_4 podla 1.19*



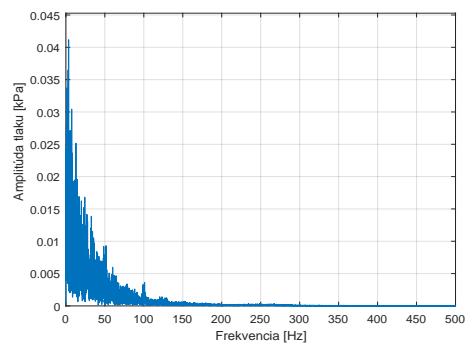
Obr. B.8: *Vysokorychlostná kamera*



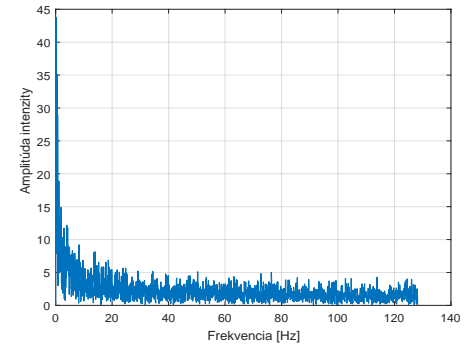
Obr. B.9: *Tlakový snímač p_4 podla 1.19*



Obr. B.10: *Vysokorychlostná kamera*

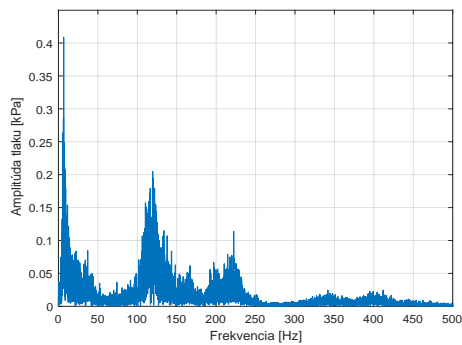


Obr. B.11: *Tlakový snímač p_4 podla 1.19*

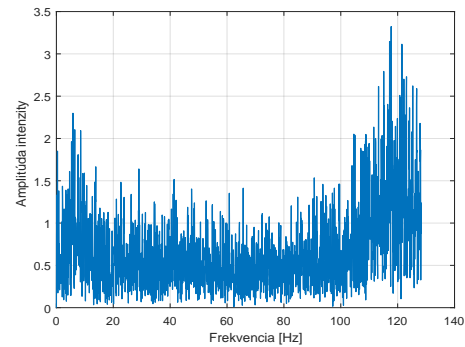


Obr. B.12: *Vysokorychlostná kamera*

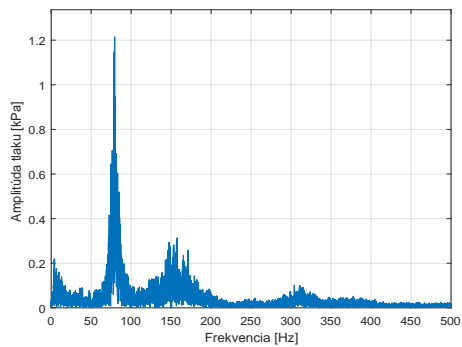
B.2 Clona s deviatimi otvormi (štvorcové usporiada- nie)



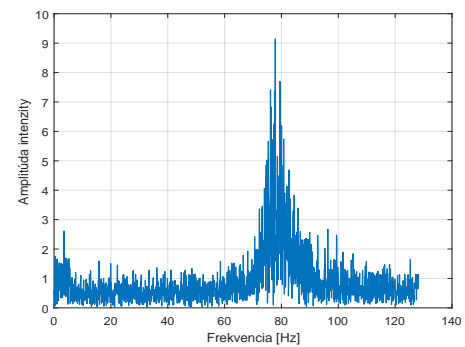
Obr. B.13: *Tlakový snímač p_4 podľa 1.19*



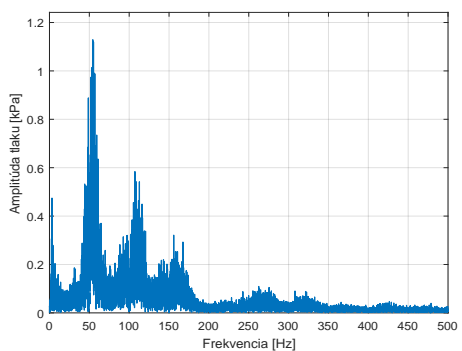
Obr. B.14: *Vysokorýchlostná kamera*



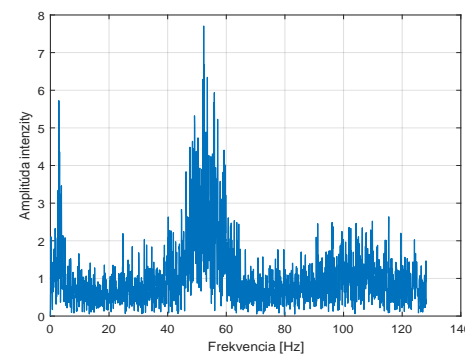
Obr. B.15: *Tlakový snímač p_4 podľa 1.19*



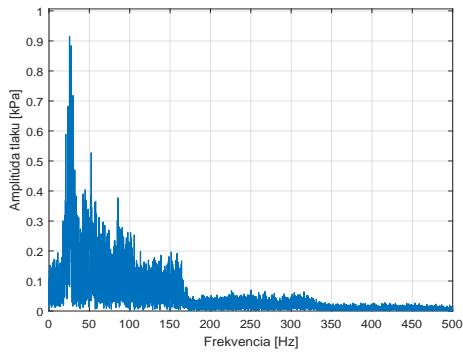
Obr. B.16: *Vysokorýchlostná kamera*



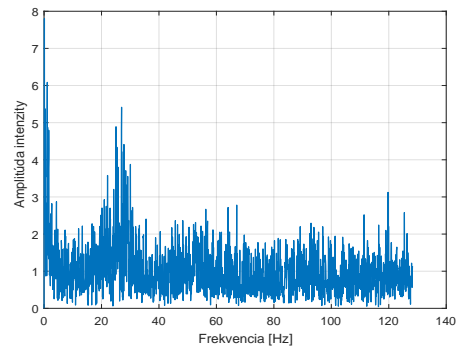
Obr. B.17: *Tlakový snímač p_4 podľa 1.19*



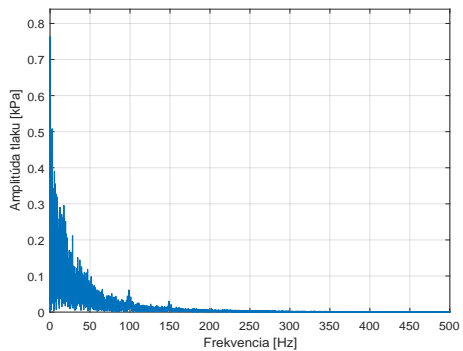
Obr. B.18: *Vysokorýchlostná kamera*



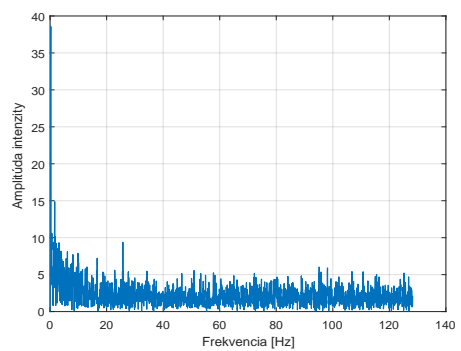
Obr. B.19: *Tlakový snímač p_4 podľa 1.19*



Obr. B.20: *Vysokorychlostná kamera*

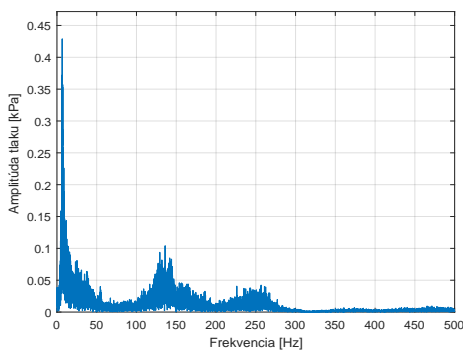


Obr. B.21: *Tlakový snímač p_4 podľa 1.19*

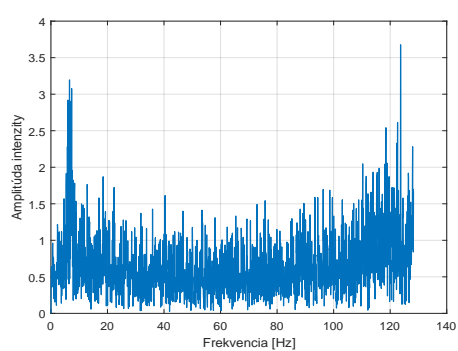


Obr. B.22: *Vysokorychlostná kamera*

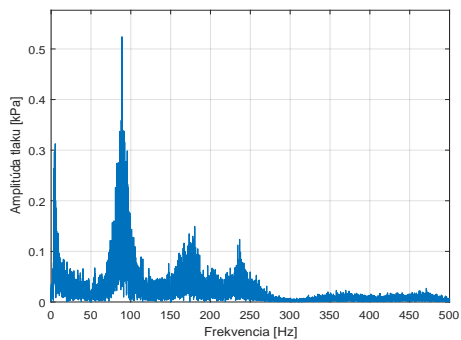
B.3 Clona s deviatimi otvormi (kruhové usporiadanie)



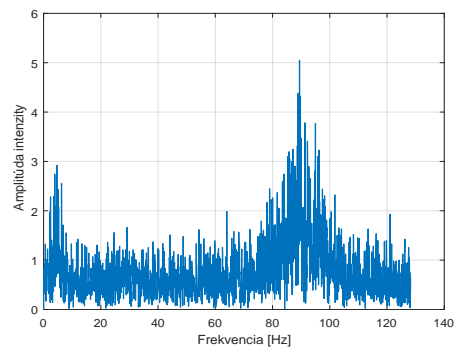
Obr. B.23: *Tlakový snímač p_4 podľa 1.19*



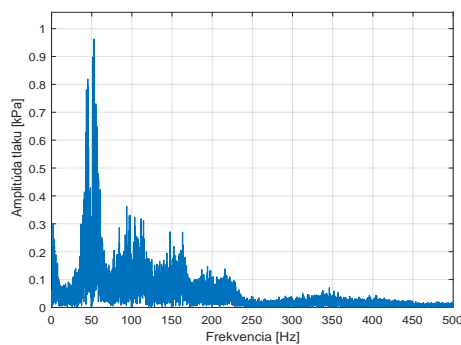
Obr. B.24: *Vysokorychlostná kamera*



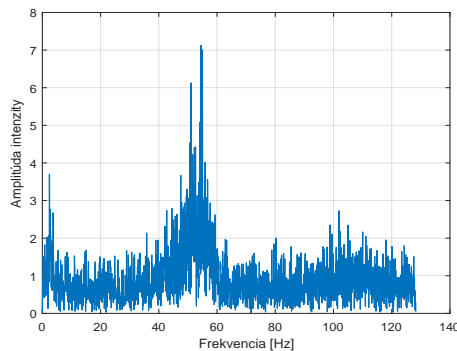
Obr. B.25: *Tlakový snímač p_4 podľa 1.19*



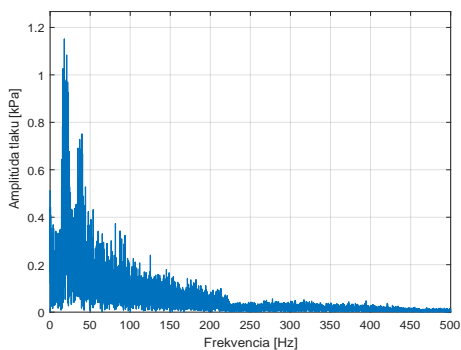
Obr. B.26: *Vysokorýchlostná kamera*



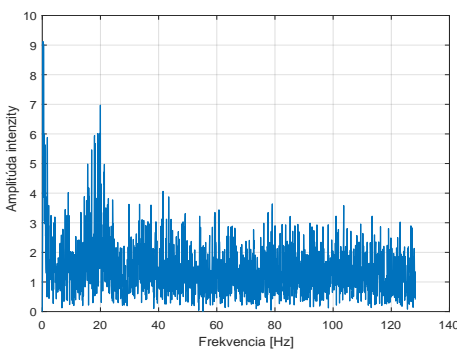
Obr. B.27: *Tlakový snímač p_4 podľa 1.19*



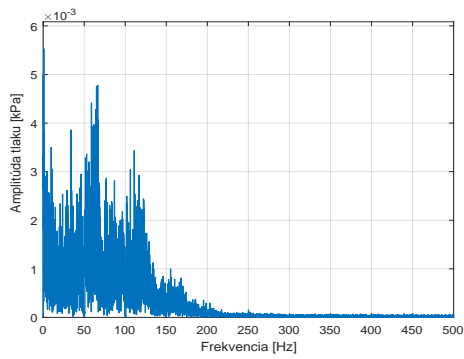
Obr. B.28: *Vysokorýchlostná kamera*



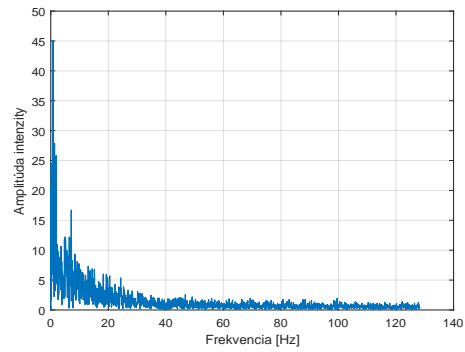
Obr. B.29: *Tlakový snímač p_4 podľa 1.19*



Obr. B.30: *Vysokorýchlostná kamera*

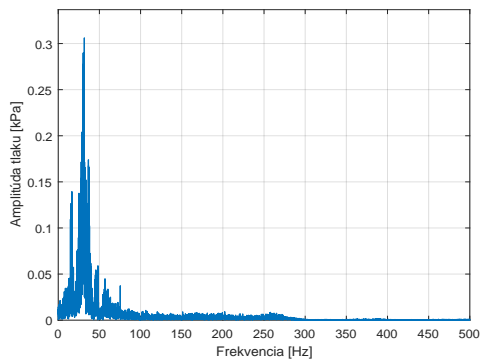


Obr. B.31: *Tlakový snímač p_4 podľa 1.19*

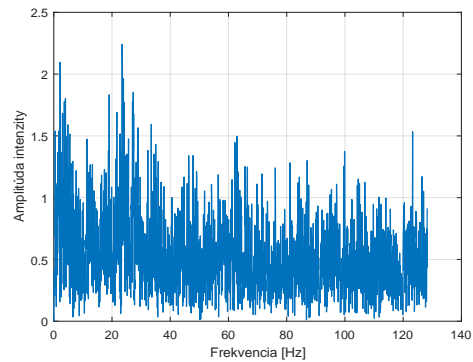


Obr. B.32: *Vysokorýchlostná kamera*

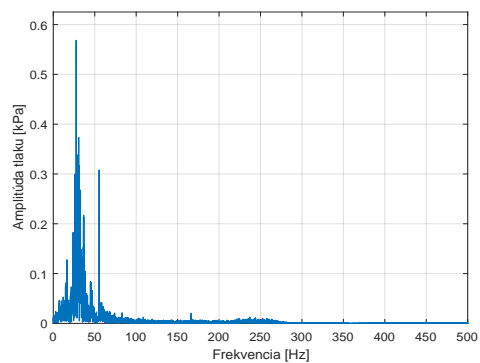
B.4 Clona so šestnáctimi otvormi



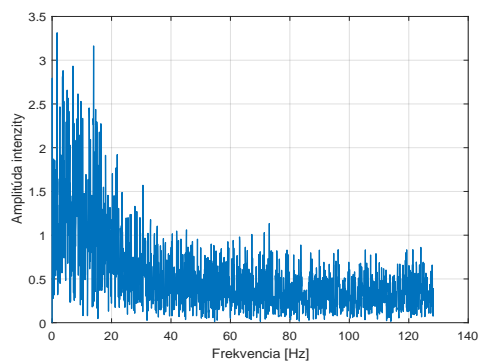
Obr. B.33: *Tlakový snímač p_4 podľa 1.19*



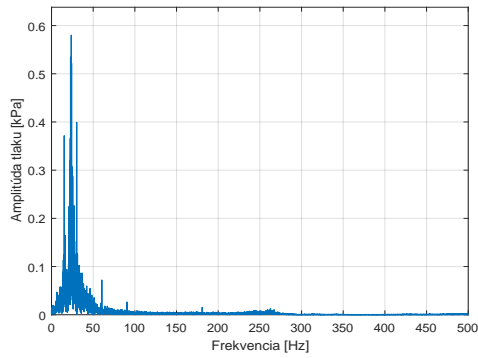
Obr. B.34: *Vysokorýchlostná kamera*



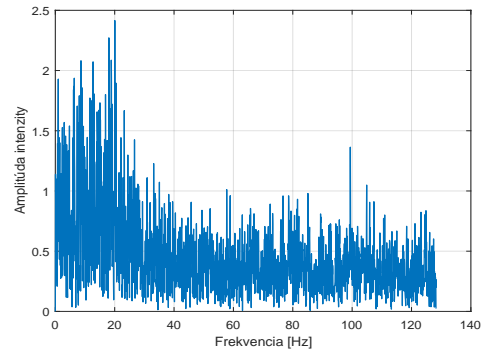
Obr. B.35: *Tlakový snímač p_4 podľa 1.19*



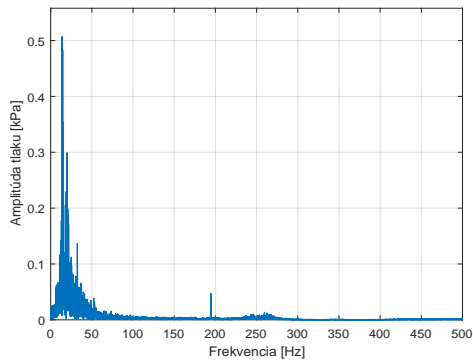
Obr. B.36: *Vysokorýchlostná kamera*



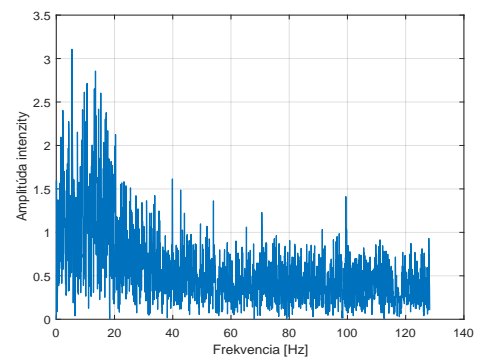
Obr. B.37: *Tlakový snímač p_4 podla 1.19*



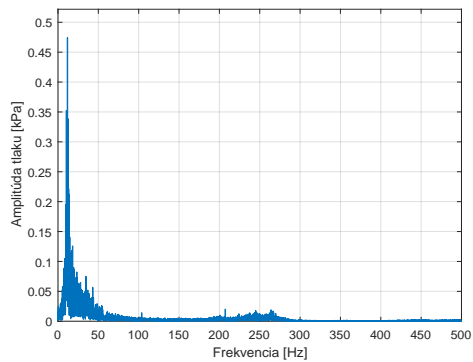
Obr. B.38: *Vysokorýchlostná kamera*



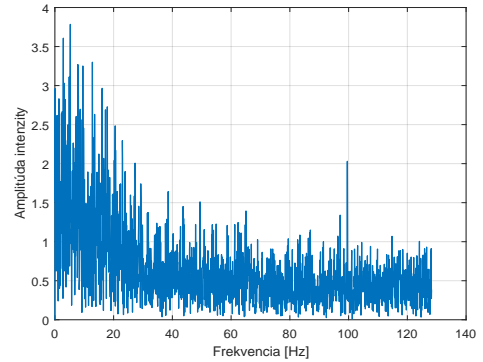
Obr. B.39: *Tlakový snímač p_4 podla 1.19*



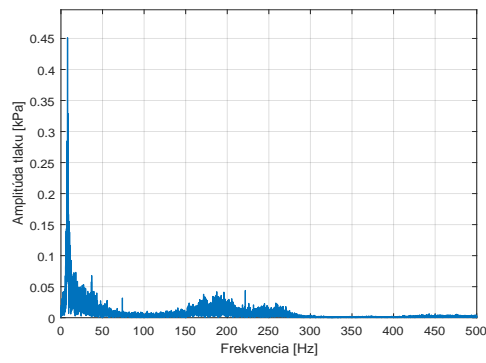
Obr. B.40: *Vysokorýchlostná kamera*



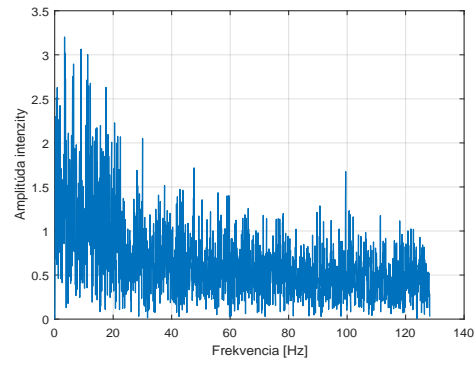
Obr. B.41: *Tlakový snímač p_4 podla 1.19*



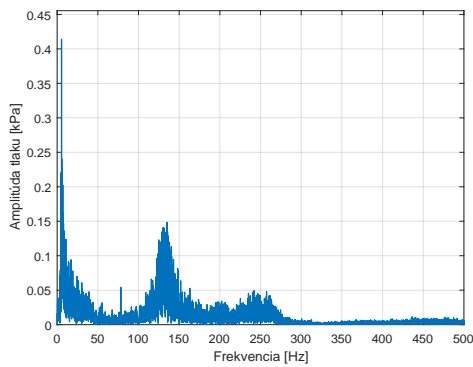
Obr. B.42: *Vysokorýchlostná kamera*



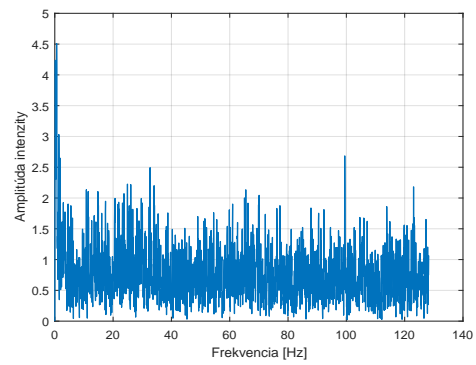
Obr. B.43: *Tlakový snímač p_4 podla 1.19*



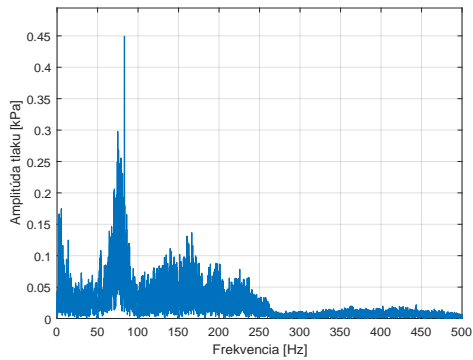
Obr. B.44: *Vysokorychlostná kamera*



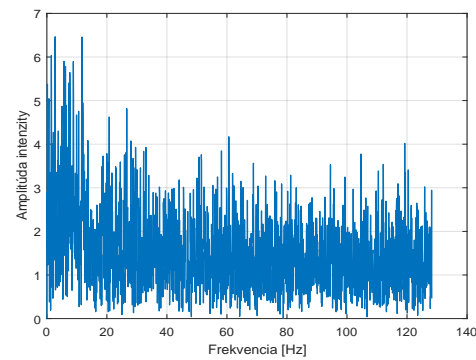
Obr. B.45: *Tlakový snímač p_4 podla 1.19*



Obr. B.46: *Vysokorychlostná kamera*

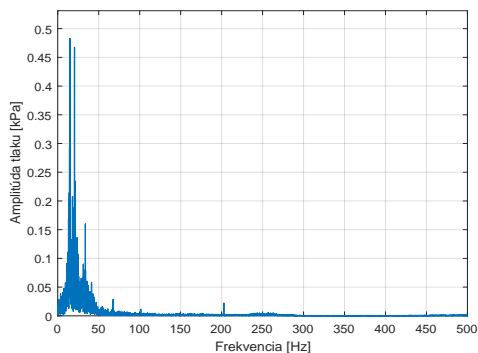


Obr. B.47: *Tlakový snímač p_4 podla 1.19*

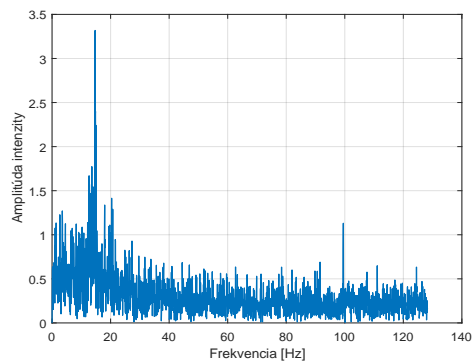


Obr. B.48: *Vysokorychlostná kamera*

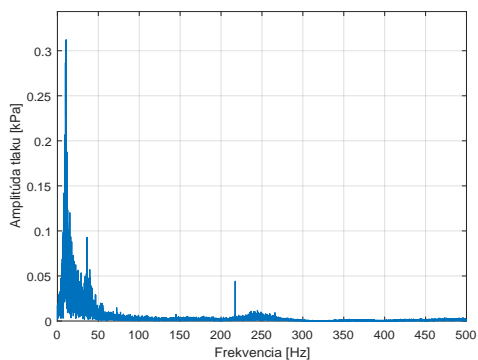
B.5 Clona s tridsatšestí otvory



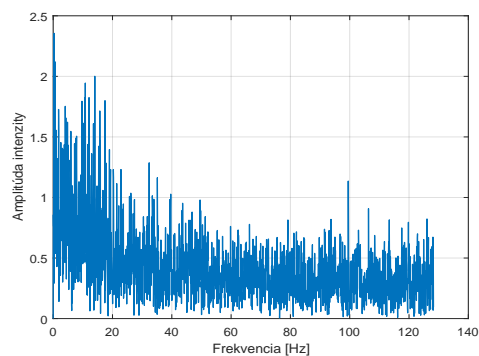
Obr. B.49: *Tlakový snímač p_4 podľa 1.19*



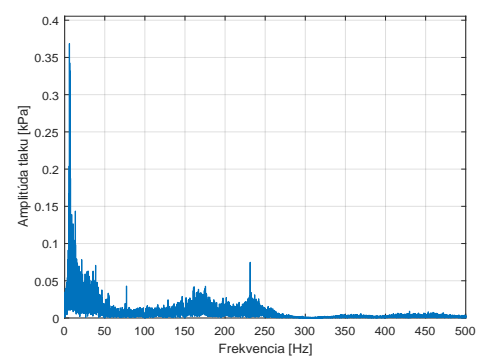
Obr. B.50: *Vysokorýchlostná kamera*



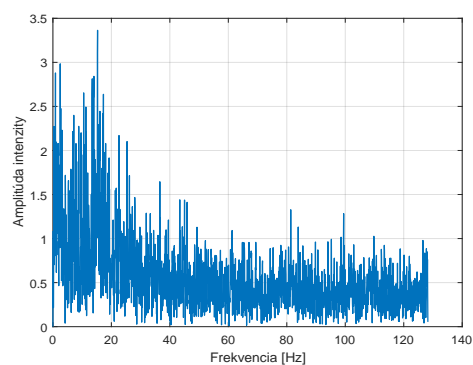
Obr. B.51: *Tlakový snímač p_4 podľa 1.19*



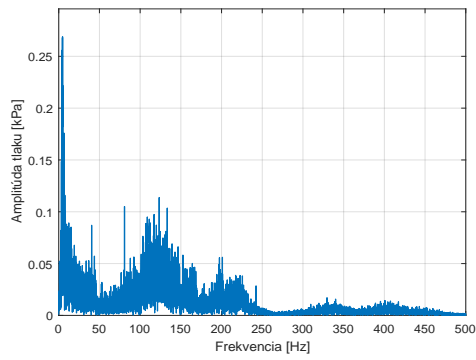
Obr. B.52: *Vysokorýchlostná kamera*



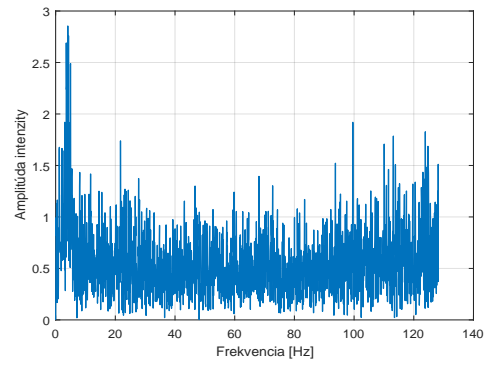
Obr. B.53: *Tlakový snímač p_4 podľa 1.19*



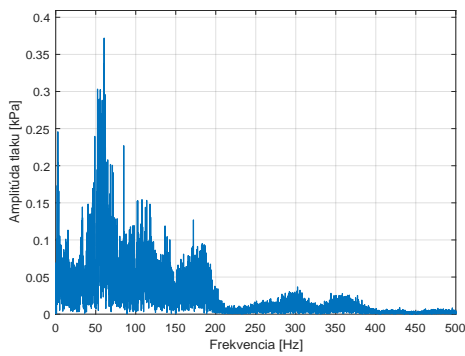
Obr. B.54: *Vysokorýchlostná kamera*



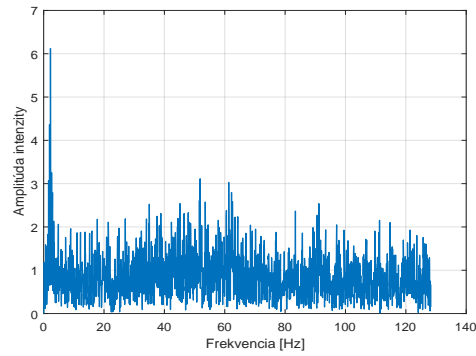
Obr. B.55: *Tlakový snímač p_4 podla 1.19*



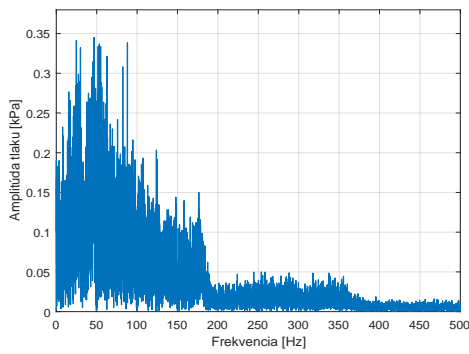
Obr. B.56: *Vysokorychlostná kamera*



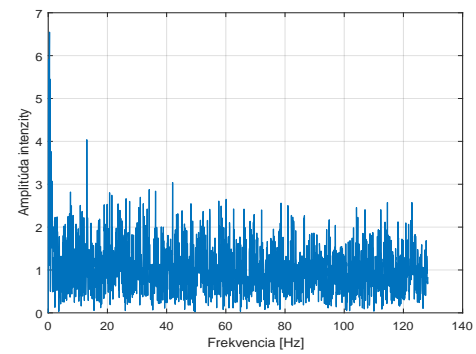
Obr. B.57: *Tlakový snímač p_4 podla 1.19*



Obr. B.58: *Vysokorychlostná kamera*



Obr. B.59: *Tlakový snímač p_4 podla 1.19*



Obr. B.60: *Vysokorychlostná kamera*

C OBRAZOVÁ PŘÍLOHA



Obr. C.1: *Svetelné podmienky, zdroj: [22]*



Obr. C.2: *Zapojenie tlakomerov*



Obr. C.3: *Čerpadlo (5 lopatiek), zdroj: [17]*



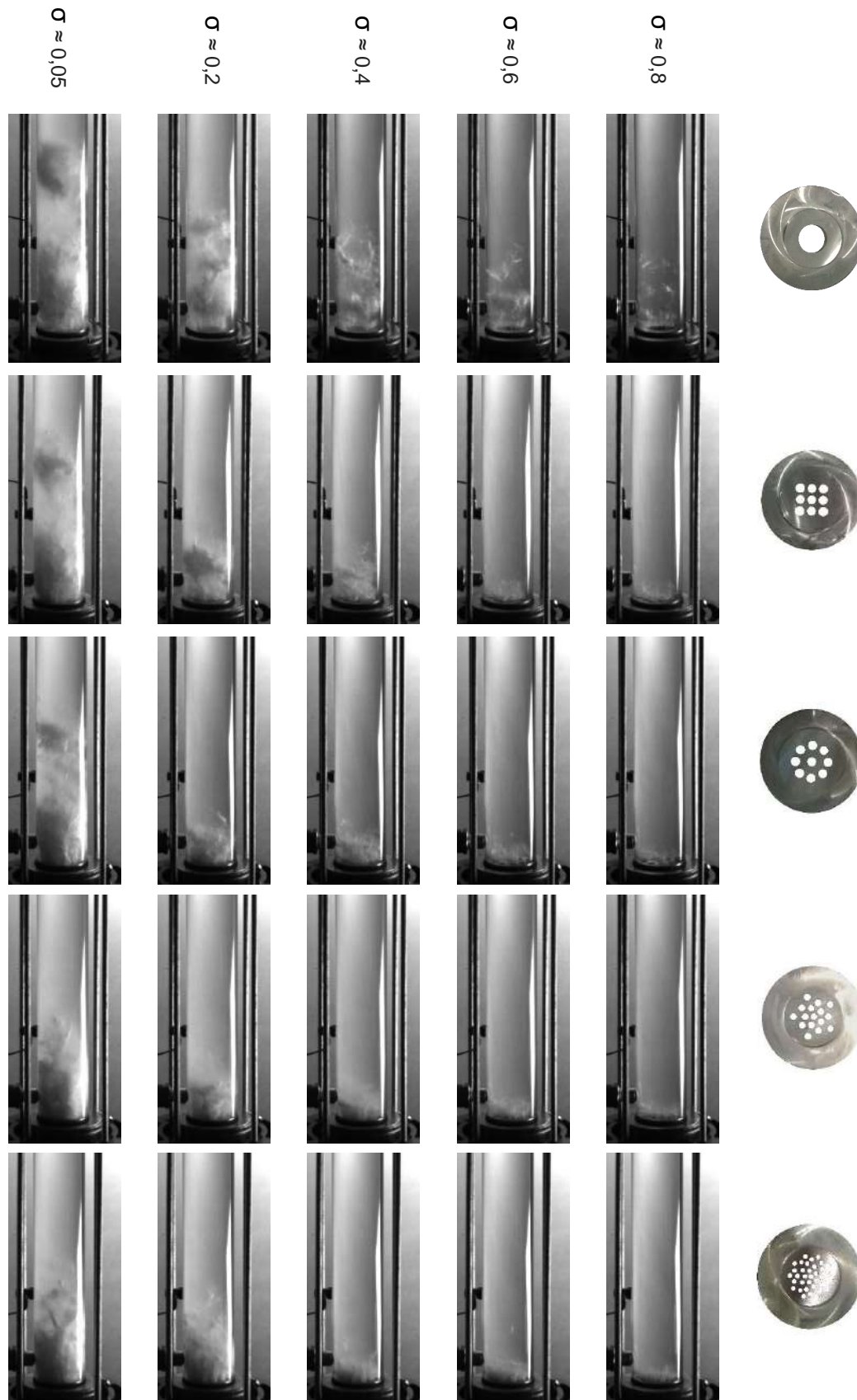
Obr. C.4: *Indukčný prietokomer*



Obr. C.5: *Tlaková nádoba*



Obr. C.6: *Experimentálna trať*



Obr. C.7: Porovnanie vývoja kavitujícího proudění pro všechny kavitující clony, kavitující číslo σ podľa vztahu 3.1. Videozáznamy z vysokorychlostnej kamery sú v prílohe práce [22]

D ZDROJOVÉ KÓDY

Zdrojové kódy v programovacím jazyku MATLAB sú v zložke na priloženom CD usporiadané do dvoch priečinkov pre statické meranie a obrazovú analýzu. Jednotlivé súbory obsahujú stručný návod a vysvetlenie použitia.

D.1 Statické meranie

```
Kalibracia.m  
FFT_nacitanie_filtrovane_export.m  
f_50_fs_51200.m  
f_100_fs_51200.m  
f_150_fs_51200.m
```

D.2 Obrazová analýza

```
Vyber_zaujmovej_oblasti.m  
FFT_spracovanie_obrazu.m
```