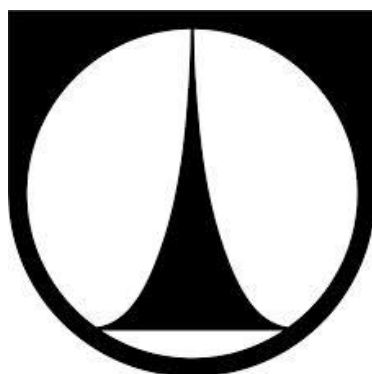


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní



Kavitace ve vodních čerpadlech

Bakalářská práce

Liberec 2015

Václav Jiříček



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní

Kavitace ve vodních čerpadlech

Bakalářská práce

<i>Studijní program:</i>	B2301 – Strojní inženýrství
<i>Autor práce:</i>	Václav Jiříček
<i>Vedoucí práce:</i>	Ing. Miloš Müller, Ph.D.

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Václav Jiříček**
Osobní číslo: **S11000066**
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojní inženýrství**
Název tématu: **Kavitace ve vodních čerpadlech**
Zadávací katedra: **Katedra energetických zařízení**

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

Cílem práce je provést komplexní rešerši kavitačního jevu, vznikajícího při provozu ve vodních čerpadlech. Součástí práce bude příprava lopatky pro měření účinků kavitace v kavitačním tunelu a posouzení výsledků vlastních měření na kavitačním tunelu případně posouzení dříve realizovaných experimentů.

1. Popsat možnosti vzniku kavitace a její účinky v čerpadlech.
2. Popsat projevy kavitace v čerpadlech a možnosti její detekce.
3. Provést instalaci akustických snímačů na lopatku.
4. Provést kalibraci jednotlivých snímačů.
5. Provést analýzu výsledků vlastního měření na lopatce na kavitačním tunelu, případně tuto analýzu provést na již realizovaných měřeních na lopatce na kavitačním tunelu.



Rozsah grafických prací: -
Rozsah pracovní zprávy: **30 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**
Seznam odborné literatury:

- [1] NOSKIEVIČ J., 1969. *Kavitace*. Praha: Academia.
- [2] M. BRDIČKA, L., SAMEK, O. a TARABA, O., 1981. *Kavitace - Diagnostika a technické využití*. Praha: SNTL.
- [3] FRANC, J., P., MICHEL J. M., 2004. *Fundamentals of Cavitation*. London: Kluwer Academic Publishers.
- [4] BRENNEN, C., E., 1995. *Cavitation and Bubble Dynamics*. Oxford: Oxford University Press.
- [5] BRENNEN, C., E., 1994. *Hydrodynamics of pumps*. Oxford: Oxford University Press.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Miloš Müller, Ph.D.**
Katedra energetických zařízení

Datum zadání bakalářské práce: **2. března 2015**
Termín odevzdání bakalářské práce: **3. června 2016**


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




doc. Ing. Václav Dvořák, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 2. března 2015

Poděkování

Rád bych zde poděkoval v první řadě Ing. Miloši Müllerovi, Ph.D., nejen za čas a cenné rady, které mi věnoval při řešení dané problematiky, ale i za trpělivost při konzultacích. Dále bych chtěl poděkovat rodině za podporu při studiu a Bohu za provedení.

Václav Jiříček

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

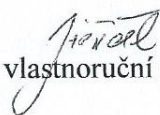
Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS TAG.

V Liberci, 3. 7. 2015


vlastnoruční podpis

KAVITACE VE VODNÍCH ČERPADLECH

Anotace:

Předkládaná bakalářská práce se zabývá kavitací ve vodních čerpadlech. V úvodu práce je proveden základní popis vzniku kavitace a jejího negativního působení na konstrukční materiály hydrodynamických zařízení. Další část práce je zaměřená na popis čerpadel z hlediska konstrukce i provozních parametrů i jejich klasifikace. V této kapitole je také uveden popis vlivu kavitace na provoz čerpadla, klasifikace kavitace v čerpadlech i parametry, které se k popisu kavitace používají. V práci jsou uvedeny a popsány základní možnosti detekce kavitace v čerpadlech. V experimentální části práce je uveden postup instalace piezoelektrických filmů na povrch profilu představujícího čerpadlovou lopatku a jejich následná kalibrace. Kalibrace je založena na metodě pádu kuličky a jejím výsledkem je závislost mezi napětím generovaným na piezoelektrickém filmu a působící silou. Dále je v práci popsáno měření kavitace na profilu s instalovanými piezoelektrickými filmy v kavitačním tunelu. Kavitační jev je zkoumán opticky i akusticky. Optická měření jsou realizována pomocí vysokorychlostní CCD kamery. Akustická měření jsou realizována jednak pomocí piezoelektrických filmů instalovaných na profilu, a také pomocí piezoelektrického jehlového hydrofonu umístěného za profilem. Pro účely práce jsou ze skupiny měření prezentovány pouze výsledky pro dva režimy s rozdílnými parametry průtoku a tlaku před profilem. Výsledky optického záznamu ukazují vývoj kavitační struktury na profilu a měřené signály interakci kavitačních struktur s lopatkou.

Klíčová slova: Kavitace, vodní čerpadlo, lopatka, PVDF film, kavitační tunel.

CAVITATIONS IN WATER PUMPS

Annotation:

The presented bachelor project is focused on cavitation in water pumps. In the introductory part of the work, an elemental description of the cavitation occurrence and its negative effects on construction materials of hydrodynamics devices are described. Next part of the work is focused on the pump description regarding its construction, operating parameters and their classification. The influence of the cavitation phenomena on the pump operation, classification of cavitation in pumps and parameters describing the cavitation are also introduced in this chapter. The possibilities of the cavitation detection in water pumps are also described. In the experimental part of the work the installation of the piezoelectric films on the profile surface representing the pump blade and their following calibration are described. The calibration is based on the drop ball technique and its result is dependence between the generated voltage and acting force. The measurement of the cavitation on the profile at the cavitation tunnel is described. The cavitation phenomenon is investigated optically and acoustically. Optical measurements are realized by high speed CCD camera. Acoustic measurements are realized by piezoelectric films installed on the profile surface and by a needle hydrophone placed behind the profile. For the elaboration in this work only two measured regimes with different flow rate and pressure parameters are presented. Results of the optical measurements show the development of the cavitation structures on the profile and measured signals the interaction of the cavitation structures with the profile.

Keywords: Cavitation, water pump, shovel, PVDF film, cavitation tunnel.

Obsah

ÚVOD	12
1. KAVITAČNÍ JEV	13
1.1 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ KAVITACE	13
1.2 FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI KAPALIN A KAVITACE	16
1.3 KAVITAČNÍ JÁDRA A KAVITAČNÍ BUBLINA	17
1.4 STUPNĚ KAVITACE	19
1.5 KAVITAČNÍ ČÍSLO	20
2. ČERPADLA	21
2.1 ZÁKLADNÍ HYDRAULICKÉ POJMY ČERPADER	21
2.2 ROZDĚLENÍ ČERPADER	22
2.3 ODSŘEDIVÁ ČERPADLA	22
2.3.1 CHARAKTERISTICKÉ KŘIVKY ODSŘEDIVÝCH ČERPADER	24
2.4 OBJEMOVÁ ČERPADLA	26
3. KAVITACE V ČERPADLECH	28
3.1 ÚVOD	28
3.2 Vliv KAVITACE NA CHOD ČERPADER	29
3.3 METODY DIAGNOSTIKY KAVITACE	30
3.1 ZPŮSOBY MĚŘENÍ	30
3.2 METODY PŘÍMÉHO MĚŘENÍ	31
4 MĚŘENÍ A KALIBRACE PVDF FILMŮ	31
4.1 MĚŘENÍ POMOCÍ PVDF FILMŮ – PŘÍPRAVA PRO MĚŘENÍ	32
4.2 MĚŘENÍ POMOCÍ PVDF FILMŮ – KALIBRACE	33
4.3 MĚŘENÍ POMOCÍ PVDF FILMŮ – PŘÍPRAVA PRO MĚŘENÍ	34
4.4 MĚŘENÍ – KALIBRACE	35
5.1 POPIS KAVITAČNÍHO TUNELU	39
5.2 POSTUP MĚŘENÍ NA KAVITAČNÍM TUNELU	41
5.3 ZPRACOVÁNÍ DAT Z KAMERY A PVDF FILMŮ	42
ZÁVĚR	47
Seznam použitých zdrojů	48

Seznam obrázků

Obrázek 1 Fázový diagram vody [9].....	13
Obrázek 2 Vláknová kavitace [9].....	14
Obrázek 3 Plošná kavitace [9].....	14
Obrázek 4: Graf 2 Pevnost vody v závislosti na teplotě [3].....	16
Obrázek 5 Závislost rovnovážného tlaku v kapalině na poloměru bubliny [9]	18
Obrázek 6 Typický průběh jádra ve Venturiho dýze [8].....	19
Obrázek 7 Průřez odstředivým čerpadlem [11].....	23
Obrázek 8 Druhy odstředivých čerpadel [11]	23
Obrázek 9 Průmět různých charakteristických křivek [11].....	24
Obrázek 10 Dopravní výška čerpadla v závislosti na průtoku [11]	25
Obrázek 11 Účinnost čerpadla na základě průtoku [11]	25
Obrázek 12 Křivka NPSH typického odstředivého čerpadla [11]	26
Obrázek 13 Porovnání objemových čerpadel s odstředivými [11]	27
Obrázek 14 Místa kavitace a podmínka [11]	28
Obrázek 15 Účinnost čerpadla v závislosti na průtoku [4]	29
Obrázek 16 PVDF film [12].....	32
Obrázek 17 Zobrazení drážky pro PVDF filmy	32
Obrázek 18 Lopatka připravená k měření	33
Obrázek 19 Schéma zapojení pracoviště	34
Obrázek 20 Nastavení osciloskopu 1	35
Obrázek 21 Nastavení osciloskopu 2	36
Obrázek 22 Graf výstupu osciloskopu při dopadu kuličky	37
Obrázek 23 Graf znázornění síly v závislosti na napětí	38
Obrázek 24 Schéma kavitační trati od firmy Sigma	39
Obrázek 25 Měřicí část trati	40
Obrázek 26 Schéma zapojení měření na tunelu	41
Obrázek 27 Průběh kavitace při vysokém kavitačním čísle	43
Obrázek 29 Graf průběhu síly za čas na filmu, 1 snímkování 1MHz	44
Obrázek 30 Průběh kavitačního jevu při nízkém kavitačním čísle	45
Obrázek 32 Graf průběhu síly za čas na filmu 3, snímkování 1MHz	47
Obrázek 33 - Kompletní schéma měřicího tunelu Sigma	67

Seznam použitých zkratk a symbolů:

p_B – tlak v bublině,

p_K – tlak v kapalině,

r_B – poloměr zkoumané bubliny,

p_w – parciální tlak nasycených par,

p_v – je parciální tlak plyn,

σ – povrchové napětí,

H – sací výška (dopravní výška),

Q – průtok kapaliny čerpadlem [m^3/h],

Q_m – průtok kapaliny udávaný v dopravované hmotnosti [kg/s],

p_{tot} – součet tlaku statického a dynamického [Pa],

p_{dyn} – statický tlak [Pa],

p_{stat} – dynamická tlak [Pa].

ÚVOD

Fyzikální jev, který je charakterizován vznikem, dynamickým chováním a zánikem (implozí) dutin v kapalině, je označován termínem **kavitace** (z latinského *cavitas* – dutina). Tyto dutiny jsou nazývány **kavitační bubliny**. Kavitace vlastně představuje porušení celistvosti kapaliny jako kontinua. Objevuje se v místech, kde tlak poklesne na hodnotu tlaku sytých par při dané teplotě. Zmíněný pokles tlaku může být způsoben např. lokálním zvýšením rychlosti v důsledku změny geometrie nebo průchodem intenzivní akustické vlny (akustická kavitace). Pokud bublina setrvává v oblasti tlaku nižšího, než je tlak nasycených par, buď zachovává svoji velikost, nebo narůstá. Pokud se dostane do oblasti vyššího tlaku, její poloměr se zmenšuje – imploduje. Pokud se kolabující (implodující) bublina nachází v blízkosti stěny, může vlivem mechanického působení bubliny na stěnu docházet k erozi (kavitačnímu poškození).

Kavitace je zkoumána již řadu desetiletí, ale ke značnému rozšíření jejího výzkumu došlo v posledních letech v souvislosti se zvyšujícími se nároky na hydraulická zařízení a jejich využití v medicíně.

S kavitací se můžeme setkat v mnoha odvětvích lidské činnosti i ve volné přírodě. Známa je především pro svůj negativní účinek, např. v hydraulických čerpadlech, vodních turbínách, armaturách a dalších komponentách hydraulických systémů, kde se jedná zejména o kavitační erozi, případně snižování výkonu. Přestože jsou často zdůrazňovány nepříznivé účinky kavitace, lze ji využít např. při čištění povrchů součástí, urychlování chemických reakcí, čištění odpadních vod, odstraňování ledvinových kamenů nebo při laserových operacích očí.

Tato práce se zabývá kavitací ve vodních čerpadlech.

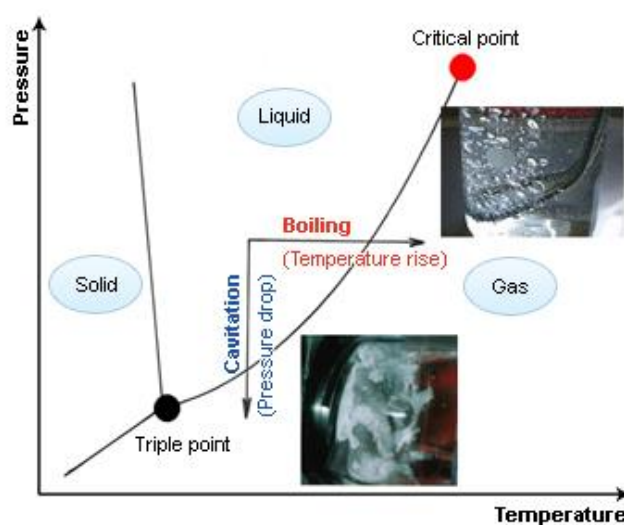
1. KAVITAČNÍ JEV

1.1 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ KAVITACE

Kavitaci se rozděluje podle několika hledisek: obsahu bublin, tvaru kavitačních oblastí, místa výskytu, počtu cyklů, způsobu generování.

Nejprve je však třeba upozornit na mechanismus vzniku bubliny z hlediska termodynamiky.

Při pohledu do fázového diagramu (obrázek 1) je zřejmé, že do stavu, kde je pouze parní fáze, se lze dostat dvěma cestami. Jestliže k překročení mezní křivky dochází za stálého tlaku, jedná se o var. Pokud k překročení mezní křivky dochází za stálé teploty, jde o kavitaci.



Obrázek 1 Fázový diagram vody [9]

Rozdělení:¹

Parní kavitace – bublina obsahuje zejména páru, difuzi plynu z kapaliny lze zanedbat, a množství plynu se tedy při expanzi nemění. Řídicím mechanismem je v tomto případě tlak nasycených par kapaliny při dané teplotě.

Plynová kavitace – do bubliny přechází difuzí plyn z okolní kapaliny, je tvořena plynem a objem bubliny roste pomalu. Podle Henryho zákona je rozpustnost nerozpuštěného plynu v kapalině přímo úměrná tlaku kapaliny. Se zvyšujícím se tlakem se rozpustnost zvyšuje a se snižujícím se tlakem se snižuje. Tak se při nižším tlaku objevuje v kapalině více nerozpuštěného plynu ve formě bublin.

Zatímco parní kavitace je extrémně rychlá, probíhá v mikrosekundách, plyná kavitace je mnohem pomalejší. Čas závisí na stupni přítomné konvekce (cirkulace tekutiny).

¹ [4] NOSKIEVIČ Jaromír, *Kavitace*. 1. vyd. Praha: Academia. 1969, s. 19. ISBN 509-21-875.

Opotřebení kavitace dochází pouze u parní kavitace, při níž rázové vlny a microjety mohou narušit povrch. Plynná kavitace nezpůsobuje na povrchu materiálu žádnou erozi. Vytváří jen hluk, generuje vysoké (i na molekulární úrovni praskání) teploty a degraduje chemické složení tekutiny oxidací.²

Rozdělení dle tvaru kavitační oblasti³: Kavitační oblasti mají různý tvar, podle čehož se rozeznává:

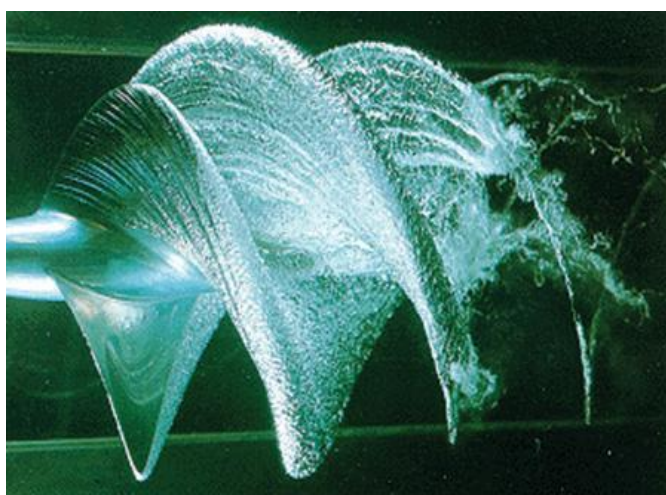
Kapsovitá oblast – vytváří se za obtékanými tělesy (vyplňuje určitý prostor).

Plošná oblast – k povrchu tělesa (vzniká při obtékání lopatek čerpadel).

Vláknová – kavitační bubliny tvoří provazec (dělají se např. za lopatkami turbín).



Obrázek 2 Vláknová kavitace [9]



Obrázek 3 Plošná kavitace [9]

Rozdělení dle kvalitativního popisu:

² [4] NOSKIEVIČ Jaromír, *Kavitace*. 1. vyd. Praha: Academia. 1969, s. 19. ISBN 509-21-875.

³ [4] NOSKIEVIČ Jaromír, *Kavitace*. 1. vyd. Praha: Academia. 1969, s. 19. ISBN 509-21-875.

Vznik kavitace – vznikají izolované bublinky.

Rozvitá kavitace – větší bubliny, roste množství. (Určitá stabilita, lze už definovat tvar.)

Rozdělení podle počtu cyklů:

Kavitace stabilní – velký počet cyklů vznikajících bublin. Mají téměř stálý tvar.

Kavitace přechodná (nestálá) – jeden nebo málo cyklů vzniku bublin (např. odtržením proudu od obtékaného profilu).

Rozdělení dle principu generování:

A) Tlakové principy generace

Hydrodynamická kavitace vzniká při pohybu kapaliny v místech, kde v důsledku zvýšení rychlosti dochází k poklesu tlaku. Jedná se např. o čerpadla, turbíny a další hydrodynamická zařízení či prvky.

Akustická kavitace vzniká při zavedení pulzujícího tlakového pole do kapaliny. V kapalině vznikají střídavě tahová a tlaková napětí. Při tahovém namáhání bublina vnikne a při tlakovém imploduje. Uvedený typ kavitace vzniká zejména v souvislosti se zaváděním ultrazvukového vlnění do kapaliny, např. při čištění povrchů nebo při odstraňování ledvinových kamenů.

B) Energetické principy generace

Optická kavitace vzniká vypařením tekutiny v blízkosti plazmy vytvořené v důsledku fokusace vysoce koncentrovaného proudu fotonů generovaných laserem nebo plazmy vytvořené v centru vysokonapěťového výboje.

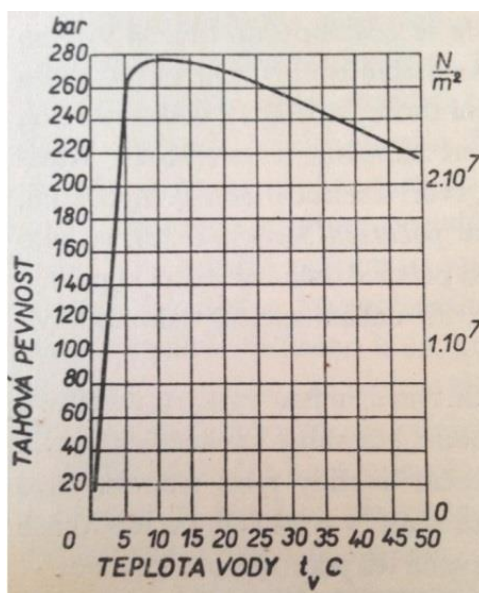
Částicová kavitace je založena na působení elementárních částic mikrosvěta a jejich energie v přehřátých kapalinách.⁶

⁶ [4] NOSKIEVIČ Jaromír, *Kavitace*. 1. vyd. Praha: Academia. 1969, s. 19. ISBN 509-21-875.

1.2 FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI KAPALIN A KAVITACE

Na druh, velikost a celkový průběh kavitace má vliv mnoho faktorů. Mezi základní patří vlastnosti kapaliny, např. povrchové napětí, viskozita, stlačitelnost a pevnost v tahu, které ovlivní přenos tepla, hmoty a hybnosti mezi bublinou a okolní kapalinou.

Přestože je kavitace tvořena velkým množstvím bublin, je z praktického hlediska výhodné studovat chování jednotlivých bublin a tyto znalosti pak aplikovat na jejich shluky či kavitační oblasti. Kavitační bubliny se objevují v místech porušení soudržnosti kapaliny, vznikají na kavitačních jádrech. Podle kinetické teorie kapalin působí u homogenní kapaliny mezi molekulárními vrstvami značné kohezní síly, k jejichž oddělení je potřeba relativně velikých napětí až 10^9 N/m^2 . Graf na obrázku 4 ukazuje tahovou pevnost vody v závislosti na teplotě.⁷



Obrázek 4: Pevnost vody v závislosti na teplotě [3]

Hodnota napětí v tahu uvedená výše je však značně teoretická. Na pevnost kapaliny má vliv mnoho faktorů, především její čistota. Reálné kapaliny mohou obsahovat následující nehomogenity, které snižují jejich tahovou pevnost:

Nerozpuštěné plyny: Mají za důsledek nejvýraznější snížení pevnosti v tahu kapaliny. Tvoří takzvaná kavitační jádra, která jsou budoucím zdrojem kavitačních bublin.

Rozpuštěné plyny: Mají velmi malý vliv na pevnost kapaliny.

Špatně smáčené částčky: Narušují pevnost kapaliny. Povrchové napětí je rozdílné od samotné kapaliny. Pomáhá udržovat plynové bubliny v nerozpuštěném stavu.

⁷ [4] NOSKIEVIČ Jaromír, *Kavitace*. 1. vyd. Praha: Academia. 1969, s. 19. ISBN 509-21-875.

Dobře smáčené částčky: Mají podobné povrchové napětí jako kapalina, a tudíž nemají podstatný vliv na její pevnost.

Experimentálně byla zjištěna pevnost kapaliny v tahu ve výši 10^4 – 10^6 MPa.⁸

1.3 KAVITAČNÍ JÁDRA A KAVITAČNÍ BUBLINA

Kapalina má místa, kde je nestejnorodá. Tím se narušuje její pevnost v tahu a vytvářejí se zárodky pro kavitaci. Po zániku bublin se však v daném místě vytváří homogenní stav.

Kavitační bublina vzniká na kavitačním jádře, které, pokud dosáhne kritické velikosti, může narůstat do makroskopických rozměrů.

Tuto skutečnost lze zjednodušeně objasnit z vyjádření statické rovnováhy kavitační bubliny, respektive jejího jádra v kapalině. Jedná se v podstatě o bilanci tlaků na rozhraní mezi bublinou a kapalinou, kdy předpokládáme, že kulová bublina se vyskytuje v kapalině samostatně a její vnitřek je tvořen plynem a parou kapaliny, v níž se bublina nachází. Pokud zanedbáme sdílení tepla a hmoty mezi obsahem bubliny a okolní kapalinou, můžeme statickou rovnováhu vyjádřit následující rovnicí:

$$p_B = p_K + \frac{2\sigma}{r_B}, \quad (1.1)$$

kde p_B je tlak v bublině, p_K tlak v kapalině ji obklopující, 2σ je povrchové napětí mezi bublinou a kapalinou a r_B je poloměr zkoumané bubliny. Protože bublina obsahuje směs páry a plynu, můžeme ještě dosadit za $p_B = p_v + p_w$ (Daltonův zákon), kde p_v je parciální tlak plynu a p_w parciální tlak nasycených par. Změnu tlaku plynu v závislosti na změně poloměru lze ze stavové rovnice ideálního plynu vyjádřit následovně:

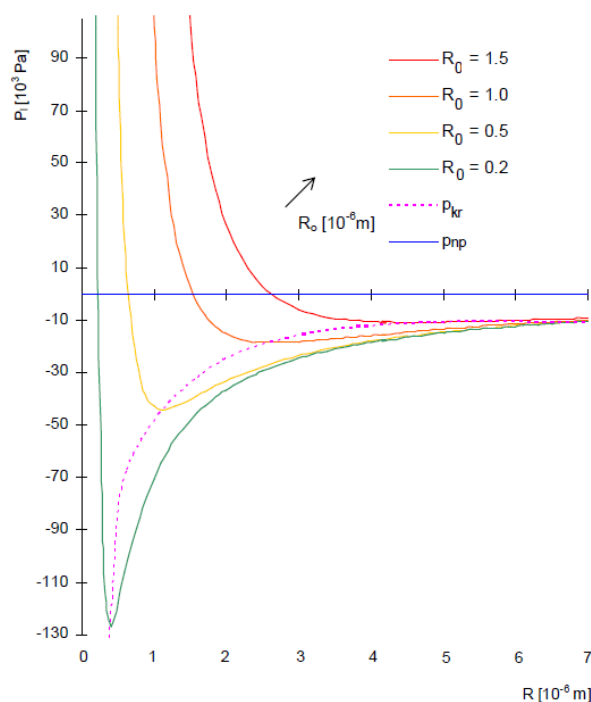
$$p_B = p_v + p_w = p_K + \frac{2\sigma}{r_B}, \quad (1.2)$$

Kombinací rovnic (1.1) a (1.2) dostáváme následující rovnici popisující tlakové pole obklopující bublinu v závislosti na poloměru bubliny:

$$p_K = p_w + \left(p_{K0} - p_w + \frac{2\sigma}{r_{B0}} \right) \left(\frac{r_{B0}}{r_B} \right)^3 - \frac{2\sigma}{r_B}, \quad (1.3)$$

kde indexem 0 označujeme počáteční hodnoty. Po vynesení rovnice do grafu pro různé počáteční poloměry bubliny vidíme, že uvedené křivky lze rozdělit podle tlaku v okolní kapalině na dvě větve. Minima křivek definují kritické poloměry bubliny.

⁸ [4] NOSKIEVIČ Jaromír, *Kavitace*. 1. vyd. Praha: Academia. 1969, s. 19. ISBN 509-21-875.



Graf : Závislost rovnovážného tlaku v kapalině na poloměru bublinky

Obrázek 5 Závislost rovnovážného tlaku v kapalině na poloměru bubliny [9]

Graf na obrázku 5 byl vytvořen pro olej o teplotě 25°C s povrchovým napětím $\sigma = 33,36 \cdot 10^{-3} \text{ Nm}^{-1}$. Tlak nasycených par byl použit obecně $p_v = 1\,000 \text{ Pa}$. Atmosférický tlak byl použit obecný $p_{10} = 101\,325 \text{ Pa}$. Počáteční poloměr bubliny byl zvolen ve čtyřech hodnotách

$R_0 = 0,2 \cdot 10^{-6}, 0,5 \cdot 10^{-6}, 1,0 \cdot 10^{-6}, 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}$. Stejný charakter má uvedená závislost i pro vodu.

Větev nalevo od kritického bodu je stabilní a větev napravo od kritického bodu a kritický bod jsou nestabilní.⁹

Chování bublinky na lopatce čerpadla si můžeme přiblížit pomocí Blakova modelu zabývajícím se vývojem izolovaného jádra procházejícího přes oblasti nízkého tlaku. Uvažujme např. vývoj jádra ve Venturiho dýze (obr. 6). Místní tlak při vzdálenostech v tomto přibližně jednorozměrném toku je označován p_s .

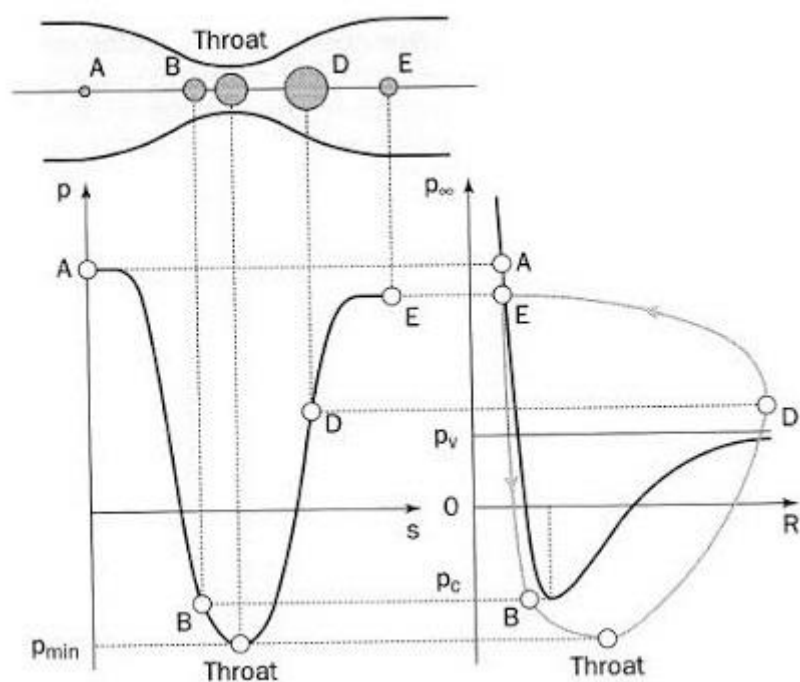
Dva případy musí být uvažovány v souvislosti s hodnotou minimálního tlaku ($p_{\min}$) a v souvislosti s kritickým tlakem (p_c) jádra.

Pokud je $p_{\min} > p_c$, jádro mírně roste a po průchodu hrdlem vrátí do svého původního stavu.

Pokud je $p_{\min} < p_c$, stává se jádro nestabilním a narůstá na poloměr mnohem větší, než byl původní poloměr. Na obr. 6 je ukázán vývoj jádra v (R, p_{∞}) diagramu. Jak lze vyvodit z

⁹ [8] *Fundamentals of Cavitation (Fluid Mechanics and Its Applications)* [online]. [cit. 03.08.2014]

dynamických výpočtů zahrnujících vliv setrvačných sil, je maximální velikosti bubliny dosaženo v bodě D směrem po proudu od hrdla C. U bodu D dochází v důsledku zvyšujícího se tlaku ke kolapsu bublinky.



Obrázek 6 Typický průběh jádra ve Venturiho dýze [8]

1.4 STUPNĚ KAVITACE

Kavitační stupně představují kvantitativní obraz, jak velká kavitace právě probíhá. Byly stanoveny na základě pozorování výskytu kavitačních bublin ve speciálním potrubí, v němž byla průhledná skříň. Pozorováním bylo stanoveno od počínající, až po plně rozvinutou kavitaci 5 stupňů kavitace.¹⁰

Třída 0	bez kavitace
Třída 1	výskyt prvních ojedinělých kavitačních dutin
Třída 2	stabilní oblak kavitačních dutin na náběžných hranách lopatek oběžného kola
Třída 3	souvislý proud kavitačních dutin
Třída 4	kritická kavitace: $D_h < D_{h_{kr}}$

Tabulka 1 Třídy kavitace, např. pro čerpadlo [8]

¹⁰ [7] FLEK, Ondřej. *Diagnostika kavitace v hydrodynamických čerpadlech* [online]. 11.2004. Praha: Výzkumné středisko Rockwell Automation.
Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=32626

1.5 KAVITAČNÍ ČÍSLO

Při hodnocení kavitace a jejího vzniku v hydraulických zařízeních není možné vystačit si jen s předchozím členěním, tedy druhem či stupněm kavitace. Je nutno ji posuzovat kvantitativně. K tomu např. slouží parametr K ¹¹:

$$K = \frac{2 \cdot (p_1 - p_n)}{\rho \cdot v_{max}^2}, \quad (1.4)$$

kde v_{max} je maximální rychlost kapaliny (např. v zúženém místě trubice), p_n je tlak nasycených par, p_1 tlak na vstupu.

¹¹ [2] KIANIČKA, Martin. *Využití kavitace v technické praxi*. Diplomová práce 2009/2010. Brno: VUT, Fakulta strojního inženýrství.

2. ČERPADLA

Čerpadlo nebo pumpa (v olejové hydraulice nazýváno hydrogenerátor) je mechanický stroj, který dodává kinetickou, potenciální nebo tlakovou energii tekutině, která jím protéká. Poháněno bývá obvykle jiným strojem – zpravidla motorem.¹²

Průmyslová výroba klade velké požadavky na čerpadla všude tam, kde se vyžaduje optimální provoz, vysoká spolehlivost a nízká energetická náročnost.¹³

2.1 ZÁKLADNÍ HYDRAULICKÉ POJMY ČERPADEL

Mezi základní parametry čerpadel patří průtok, dopravní výška a tlak.¹⁴

Průtok:

Jedná se o údaj, který nám říká, jaké množství kapaliny čerpadlo přepraví za jednotku času.

U čerpadel se udávají dva typy průtoku:

Objemový – značíme ho písmenem Q ; obvykle udává objem dopravované kapaliny v $[m^3/h]$.

Hmotnostní – značíme ho písmenem Q_m ; Obvykle udává hmotnost dopravované kapaliny za jednotku času $[kg/s]$.

Tlak:

Rozlišujeme tlak statický, dynamický a celkový. Celkový tlak je součtem statického a dynamického tlaku:

$$p_{tot} = p_{stat} + p_{dyn}, \quad (2.1)$$

Statický tlak (p_{sta}) je měřený manometrem umístěným kolmo na průtok nebo v kapalině v klidovém stavu.

Dynamický tlak (p_{dyn}) je způsoben rychlostí proudění kapaliny a nelze jej měřit běžným manometrem; vypočte se pomocí následujícího vzorce:

$$p_{dyn} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2, \quad (2.2)$$

kde:

ρ je hustota kapaliny v $[kg/m^3]$,

v je rychlost proudění kapaliny v $[m/s]$.

¹² [9] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Kavitace> [online]. Kavitace [cit. 06.02.2014]

¹³ [11] *Příručka čerpací techniky* [online]. GRUNDFOS Management A/S. 2004. Dostupné z: http://net.grundfos.com/doc/webnet/waterutility/_assets/downloads/gcz/pumphandbook_gcz.pdf

¹⁴ [5] Vlastní zápisky z hodin hydraulické a pneumatické pohony – TUL – FS rok 2013/2014

Oba tlaky se udávají buď pascalech Pa (N/m^2), barech (10^5 Pa), nebo v PSI (lb/in^2).

Dopravní výška (H)

Jedná se o údaj, který nám říká, do jaké výšky je čerpadlo schopno přesunout kapalinu. Udává se v základní jednotce [m].

Výpočet pro dopravní výšku:

$$H = \frac{p}{\rho \cdot g}, \quad (2.3)$$

kde

H je dopravní výška v [m],

p je tlak v [$\text{Pa} = \text{N/m}^2$],

ρ je hustota kapaliny v [kg/m^3],

g je tíhové zrychlení v [m/s^2].

2.2 ROZDĚLENÍ ČERPADEL

Čerpadla se dělí především podle typu použití:

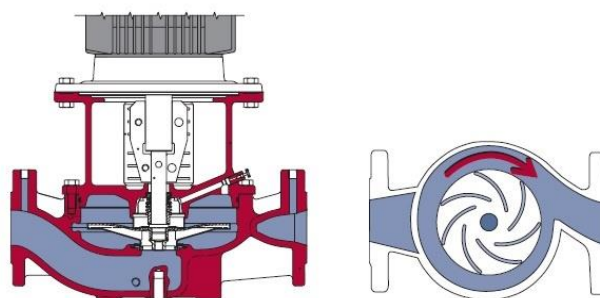
Typy čerpadel: normovaná, s děleným tělesem, hermeticky utěsněná, pro sanitární aplikace, na odpadní vodu, normá, do čerpacích vrtů, objemová.

Typy čerpadel dle konstrukce: odstředivá a objemová.

2.3 ODSTŘEDIVÁ ČERPADLA

Vynálezcem odstředivého čerpadla byl fyzik Denis Papin v roce 1689. Dnes je tento typ považován za nejrozšířenější. Použití v takové míře si odstředivé čerpadlo zasloužilo především zásluhou jednoduchého principu, který je založen na přivádění kapaliny na náboj oběžného kola, kde se odstředivou silou pohybuje směrem k obvodu oběžného kola.¹⁵

¹⁵ [11] *Příručka čerpací techniky* [online]. GRUNDFOS Management A/S. RRRR . Dostupné z: http://net.grundfos.com/doc/webnet/waterutility/_assets/downloads/gcz/pumphandbook_gcz.pdf



Obrázek 7 Průřez odstředivým čerpadlem [11]

Tento princip lze uskutečnit robustním, jednoduchým a poměrně levným strojem. Mezi další výhody čerpadla je jeho vlastní pohánění, kde vysoké otáčky lopatek umožňují přímé napojení asynchronního motoru. Další z výhod je, že dodává stabilní proud kapaliny, který lze snadno regulovat, aniž by to ovlivňovalo samotné čerpadlo.

Na obrázku 7 je vidět proudění, kde se vtokovým hrdlem dostává kapalina do středu oběžného kola, odkud je vrhána směrem k jeho obvodu. Tohle řešení je především určené pro čisté kapaliny, při nichž dosahují dobré účinnosti.

Čerpadla určená pro znečištěné kapaliny (např. odpadní vody) mají odlišné oběžné kolo, které je uzpůsobeno tak, aby nedocházelo k zachycování nežádoucích pevných látek.

Rozdělení odstředivých čerpadel:



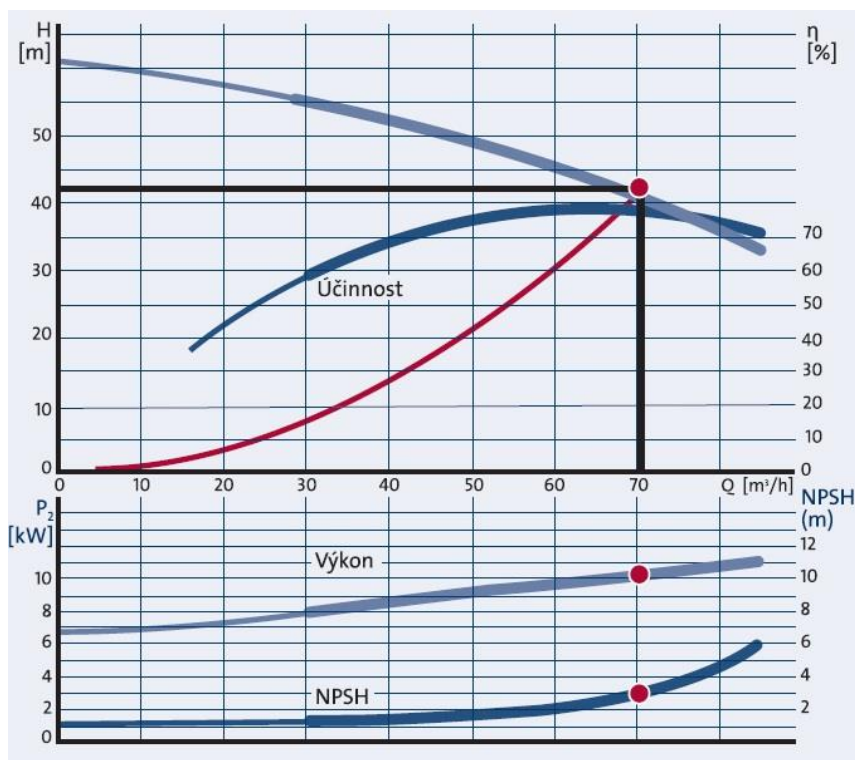
Obrázek 8 Druhy odstředivých čerpadel [11]

Radiální a diagonální čerpadla jsou nejrozšířenějším typem čerpadel. Axiálních čerpadel se používá v ojedinělých případech. Proto se další popis bude týkat především předchozích dvou typů.

Na odstředivá čerpadla je mnoho rozdílných výkonnostních požadavků – především na jejich dopravní výšku průtok.

2.3.1 CHARAKTERISTICKÉ KŘIVKY ODSTŘEDIVÝCH ČERPADEL

Celkové výkonové parametry čerpadla se skládají z více křivek. Jedná se především o dopravní výšku, spotřebu energie, účinnost a NPSH. Všechny tyto parametry jsou zaznamenány v obrázcích grafů jako funkce průtoku (viz obrázek 9).¹⁶



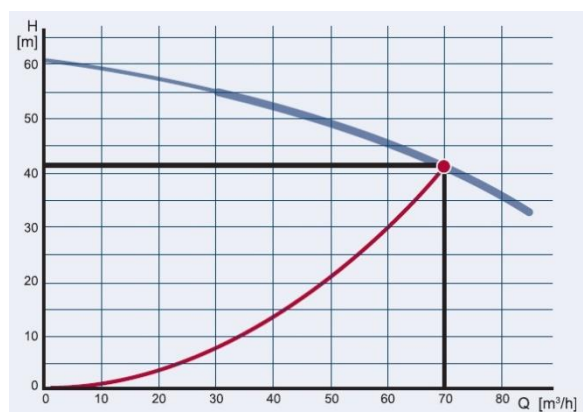
Obrázek 9 Průmět různých charakteristických křivek [11]

Obecně lze říci, že křivky čerpadla se stanoví podle normy ISO 9906, která specifikuje tolerance křivek takto:

- $Q \pm 9 \%$,
- $H \pm 7 \%$,
- $P + 9 \%$,
- -7% .

¹⁶ [11] *Příručka čerpací techniky* [online]. GRUNDFOS Management A/S. 2004. Dostupné z: http://net.grundfos.com/doc/webnet/waterutility/_assets/downloads/gcz/pumphandbook_gcz.pdf

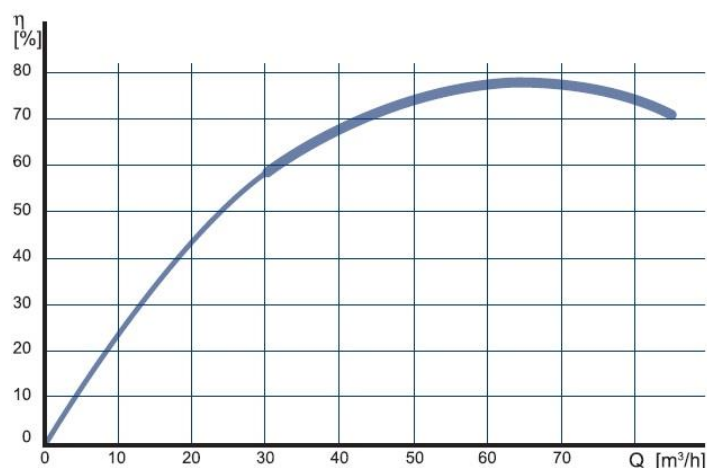
Dopravní výška, QH křivka¹⁷:



Obrázek 10 Dopravní výška čerpadla v závislosti na průtoku [11]

QH křivky ukazují, jakého vodního sloupce (dopravní výšku udáváme v měrové jednotce metr [m]) můžeme při daném průtoku dosáhnout. Tato křivka není ovlivněna druhem kapaliny, která se čerpá. Tento obrázek je příkladem typického grafu odstředivého čerpadla, s nímž při nízkém průtoku dosahujeme vysokých výšek a naopak.

Účinnost, křivka η :



Obrázek 11 Účinnost čerpadla na základě průtoku [11]

Účinnost čerpadla je dána vztahem mezi přiváděnou energií (např. motorem) a energií, kterou čerpadlo dále předává kapalině. P_H je výkon dodávaný čerpadlem a P_2 výkon přiváděný motorem.

$$\eta_p = \frac{P_H}{P_2} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{P_2} \quad (2.4)$$

¹⁷ [11] *Příručka čerpací techniky* [online]. GRUNDFOS Management A/S. 2004. Dostupné z: http://net.grundfos.com/doc/webnet/waterutility/_assets/downloads/gcz/pumphandbook_gcz.pdf

ρ = hustota kapaliny [kg/m^3],

g = tíhové zrychlení [$9,81 \text{ m/s}^2$],

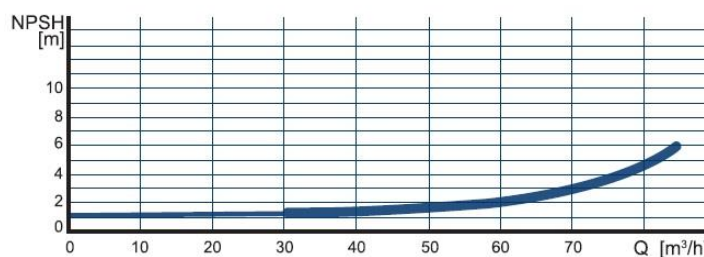
Q = průtok v [m^3/h],

H = dopravní výška v [m].

Z křivky je zřejmé, že čerpadlo by se mělo volit tak, aby jeho pracovní bod (provozní stav, ve kterém se čerpadlo nachází nejdéle) byl v oblasti jeho největší účinnosti.

*Křivka NPSH=Net Positive Suction Head (čistá pozitivní sací výška).*¹⁸

Odečítá se v místě nejvyššího provozního průtoku. Tato hodnota udává, do jaké míry je čerpadlo schopno vytvořit absolutní vakuum, tj. utvořit plný sloupec vody s výškou 10,33 m nad hladinou moře. Při různých nadmořských výškách se tato výška plného sloupce mění.



Obrázek 12 Křivka NPSH typického odstředivého čerpadla [11]

Hodnota NPSH čerpadla je minimální absolutní tlak, který musí být přítomen na sací straně čerpadla k vyloučení kavitace. Hodnota NPSH se měří v [m] a závisí na velikosti průtoku, při zvyšujícím se průtoku se také zvyšuje hodnota NPSH.

Tato křivka se stanovuje tak, že dosáhne-li čerpadlo křivky NPSH, bude intenzita kavitace natolik vysoká, že dopravní výška čerpadla se sníží o 3 %.

Hodnotu NPSH musíme poté odečítat od teoretické dopravní výšky čerpadla.

2.4 OBJEMOVÁ ČERPADLA

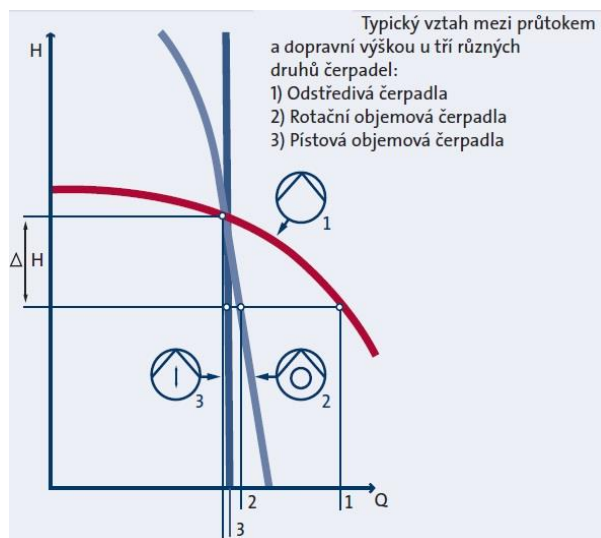
Objemové čerpadlo dává přibližně konstantní průtok při pevných otáčkách i při měnícím se protitlaku. Existují dva základní typy objemových čerpadel¹⁹:

- rotační,
- pístová.

Charakteristika čerpadla objemového a odstředivého je vidět na obrázku 13.

¹⁸ [11] *Příručka čerpací techniky* [online]. GRUNDFOS Management A/S. 2004. Dostupné z: http://net.grundfos.com/doc/webnet/waterutility/_assets/downloads/gcz/pumphandbook_gcz.pdf

¹⁹ Tamtéž.



Obrázek 13 Porovnání objemových čerpadel s odstředivými [11]

Čerpadlo odstředivé má na rozdíl od objemových i při malé změně protitlaku značné změny průtoku.

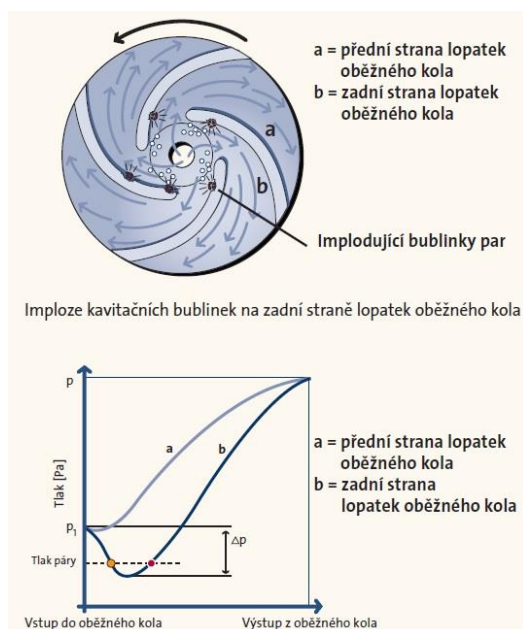
Samotný rozdíl mezi pístovým a rotačním objemovým čerpadlem je také zřejmý. Je to způsobeno samotnou konstrukcí, kdy těsnicí plochy u rotačního čerpadla jsou větší než u pístového. I když jsou tolerance stejné, jsou proto ztráty v těchto plochách u rotačního čerpadla větší.

Objemová čerpadla jsou pro své tolerance a přesnost výroby dražší, ale zaručují maximální účinnost a sací schopnost.

Nevýhodou však je, že výtok kapaliny zpravidla pulzuje, což způsobuje v cyklu nestálost průtoku.

3. KAVITACE V ČERPADLECH

3.1 ÚVOD



Obrázek 14 Místa kavitace a podmínka [11]

Parní kavitace se obvykle projeví při snížení tlaku kapaliny pod hodnotu nasycených par.

Jakmile tlak na sací straně klesne pod hodnotu tlaku par kapaliny (obrázek 14 – žlutá tečka), začnou se vytvářet malé bubliny par, které v oblasti vyššího tlaku začnou bortit (implodovat), jakmile se tlak začne zvyšovat (obrázek 10 – červená tečka) a způsobovat tak rázové vlny.²⁰

Tento stav většinou způsobují následující podmínky:²¹

Vnější: Změna atmosférického tlaku, neboť čerpadlo nasává z nádrže, v níž je podtlak.

Místní: Tlakové ztráty v sacím potrubí nebo často na oběžném kole čerpadla zvětšením rychlosti kapaliny při vyšších otáčkách. Dále odklonění proudnice od normálního tvaru, nebo dokonce odtržení proudu.

Provozním režimem: Při spouštění čerpadla či jeho odstavování.

Všechny tyto projevy kavitace způsobují buď poškození čerpadla, nebo ztrátu účinnosti zařízení.

²⁰ [11] *Příručka čerpací techniky* [online]. GRUNDFOS Management A/S. 2004. Dostupné z: http://net.grundfos.com/doc/webnet/waterutility/_assets/downloads/gcz/pumphandbook_gcz.pdf

²¹ [4] NOSKIEVIČ Jaromír, *Kavitace*. 1. vyd. Praha: Academia. 1969, 280 s. ISBN 509-21-87.

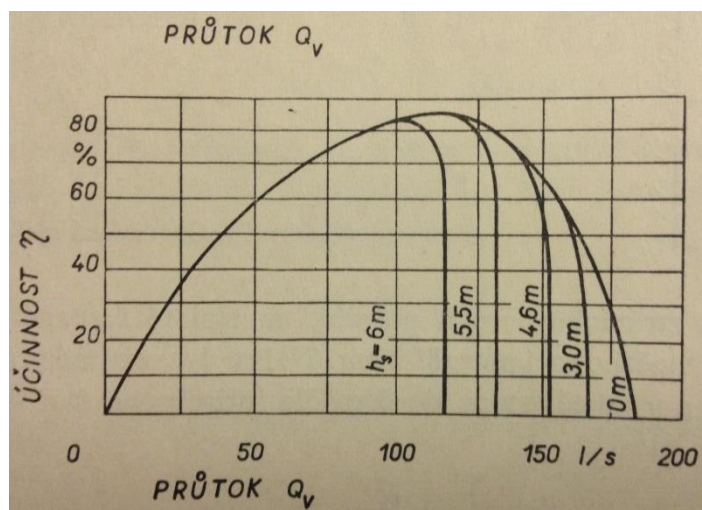
V odstředivých čerpadlech nebo jiných hydraulických zařízeních rozeznáváme hlavně dva druhy kavitací:

Plošnou kavitaci, která se objevuje na obtékaném povrchu čerpadla, např. oběžné lopatky, přesněji na zadní straně lopatky blízko náběžné hrany. Vznik kavitace na lopatce má mnoho faktorů, které mohou její výskyt ovlivnit: Tloušťka náběžné hrany. Obvykle tam, kde je síla materiálu při náběžné hraně největší, vzniká velká kavitační oblast. Proto se volí laminární profily, které mají většinou největší tloušťku materiálu zhruba uprostřed, a zaoblení náběžné hrany.

Odtržení proudu se tvoří na nerovnostech povrchu za oběžným kolem čerpadla nebo místním snížením tlaku. Další vznik kavitace mohou způsobit vibrace součástí čerpadla, zvláště u větších strojů. Kmitání pružných částí nemůže kapalina sledovat, a proto dojde k jejímu odtržení.

3. 2. VLIV KAVITACE NA CHOD ČEPADLA

Jedním z hlavních vlivů na chod čerpadla je jeho poškozování kavitací, která rozrušuje povrchy oběžného kola, difuzoru či spirály, což ovlivňuje životnost čerpadla. Dalším faktorem je, jak se čerpadlo chová při kavitaci. Většinou se sníží sací výška stroje, jeho účinnost nebo se změní průtok. Kavítace může zvyšovat hluk čerpadla nebo zvětšit jeho vibrace. Tyto znaky se zpravidla odrazí v charakteristice čerpadla.²²



Obrázek 15 Účinnost čerpadla v závislosti na průtoku [4]

²² [7] FLEK, Ondřej. *Diagnostika kavitace v hydrodynamických čerpadlech* [online]. 2004.

Praha: Výzkumné středisko Rockwell Automation.

Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=32626

[4] NOSKIEVIČ Jaromír, *Kavitace*. 1. vyd. Praha: Academia. 1969, s. 114-116. ISBN 509-21-875.

Zjišťují se obvykle při kavitačních zkouškách modelů, prováděných na simulovaném běhu čerpadla, při čemž se napodobují různé provozní stavy. Nastavují se např. dopravní výška H a průtok Q .²³

U odstředivých čerpadel pozorujeme dva typy kavitace – počáteční a kritickou. Počáteční se téměř neprojeví na charakteristice a výška sacího sloupce poklesne cca o 2 %. Kritická oblast kavitace však má na čerpadlo již velký účinek a charakteristika sací výšky prudce klesá. Oblast na rozmezí stržení křivky a počáteční kavitací se obvykle nazývá skrytá oblast.

Chod s mírně vyvinutou kavitací může být spolehlivý a není téměř k rozeznání od běžného provozu. V některých publikacích se dokonce uvádí, že má i příznivé vlastnosti na zvýšení sací výšky. Toto zlepšení vlastností čerpadla je způsobeno drobnou kavitací na povrchu obtékaných částí, kde kavitace snižuje tření a tím zvýší hydraulickou účinnost čerpadla. (avšak ve většině manuálů se spíše uvádí mírný pokles sací výšky).²⁴

Jiní odborníci se zas kloní k názoru, že mírná kavitace působí na čerpadlo destruktivněji než plně rozvinutá, protože kavitační bubliny se pohybují ve větší blízkosti obtékaného materiálu a při implozi součást více narušují.

3. 3 METODY DIAGNOSTIKY KAVITACE

3. 1 ZPŮSOBY MĚŘENÍ

Je více způsobů, jak lze popsat a zjistit stav kavitace v přístroji. Liší se přístroj od přístroje. V zásadě existují dva základní způsoby měření – akustický a optický.

Metoda nepřímá:

Jedním z dalších způsobů je nepřímá metoda, která se zakládá na detekci podmínek, při kterých obvykle ke kavitaci dochází. Je však dosti nepřesná a model je jen přibližný.

Metody přímého měření:²⁵

Optické metody se dělí např. na: stínovou, šlírovou a PIV.

Akustické metody jsou např. detekce kolapsů bublin pomocí hydrofonů, měření spektra bubliny pomocí akustického bublinkového spektrometru (ABS).

²³ [4] NOSKIEVIČ Jaromír, *Kavitace*. 1. vyd. Praha: Academia. 1969, s. 113. ISBN 509-21-875.

²⁴ [4] NOSKIEVIČ Jaromír, *Kavitace*. 1. vyd. Praha: Academia. 1969, s. 113. ISBN 509-21-875.

²⁵ [1] HUJER, Jan. *Diagnostika kavitace v hydraulickém tlumiči*. Bakalářská práce 2010. Liberec: Technická univerzita.

3.2 METODY PŘÍMÉHO MĚŘENÍ²⁶

Tato skupina metod diagnostiky čerpadel má ve srovnání s nepřímou metodou výhodu. Detekována je již samotná kavitace a její projev nikoli pouze podmínky, za kterých vzniká. Tyto metody především využívají vlivu implozí kavitačních dutin, které vyvolávají tlakové vlny. Ty se měří např. již zmíněným hydrofonem. Zůstává však stále problém, že toto měření je invazivní a výsledky z části ovlivňuje. Dále dochází na plochách čerpadla k vibracím, jež se však dají vhodně snímat akcelerometry. Tyto informace se dají použít k diagnostice. Metoda je však velice nákladná a je potřeba odborníků se zkušenostmi, kteří data dokáží vyhodnotit. Využívala se proto převážně jen u velkých čerpadel. Cílem vývoje je autonomní diagnostika integrovaná přímo v čerpadle. Docházelo by při ní k tzv. inteligentnímu řízení čerpadla (tj. regulace otáček hřídele tak, aby při požadovaném průtoku a dopravní výšce pracovalo čerpadlo s maximální účinností). Nyní se už používání těchto řídicích funkcí pomalu rozšiřuje, protože ceny snímačů pro diagnostiku kavitace (vibrací) se s rostoucí poptávkou snižují.

4 MĚŘENÍ A KALIBRACE PVDF FILMŮ

Pro posouzení vlivu kavitace na čerpadlovou lopatku byl zvolen profil s označením NACA 2412. Na tomto profilu byla provedena instalace PVDF filmů a následně jejich kalibrace. Piezoelektrický (polyvinylidenfluorid PVDF) film byl pro detekci interakce kavitace s profilem (lopatkou) zvolen zejména pro vysokou citlivost, široké frekvenční pásmo a nízkou cenu, která je důležitá zejména s ohledem na hrozící poškození snímačů. PVDF film neslouží k přímému měření síly impulzů. Výstupem kontaktů při zatížení dynamickou silou je napětí. Proto je třeba provést kalibraci snímače. Aby bylo možno měřit rozložení působící síly na lopatku bylo zvoleno 5 PVDF filmů instalovaných v různých pozicích.²⁷

PVDF piezoelektrické fólie (DT1-028K/L) použité v této práci vyrábí firma Measurement Specialties, Inc., PA, USA. Skládají ze z aktivní oblasti 12 mm · 30 mm, která má potisk stříbrnou barvou, jež představuje elektrody na povrchu obou ochranných fólií (uretanu) s rozměry 15 mm · 40 mm. Ochranná fólie má tloušťku 28 μm. Dva elektrické vodiče jsou pak přinýtovány na konci filmu k elektrodám pro výstupní signál. Celková tloušťka je 40 μm.

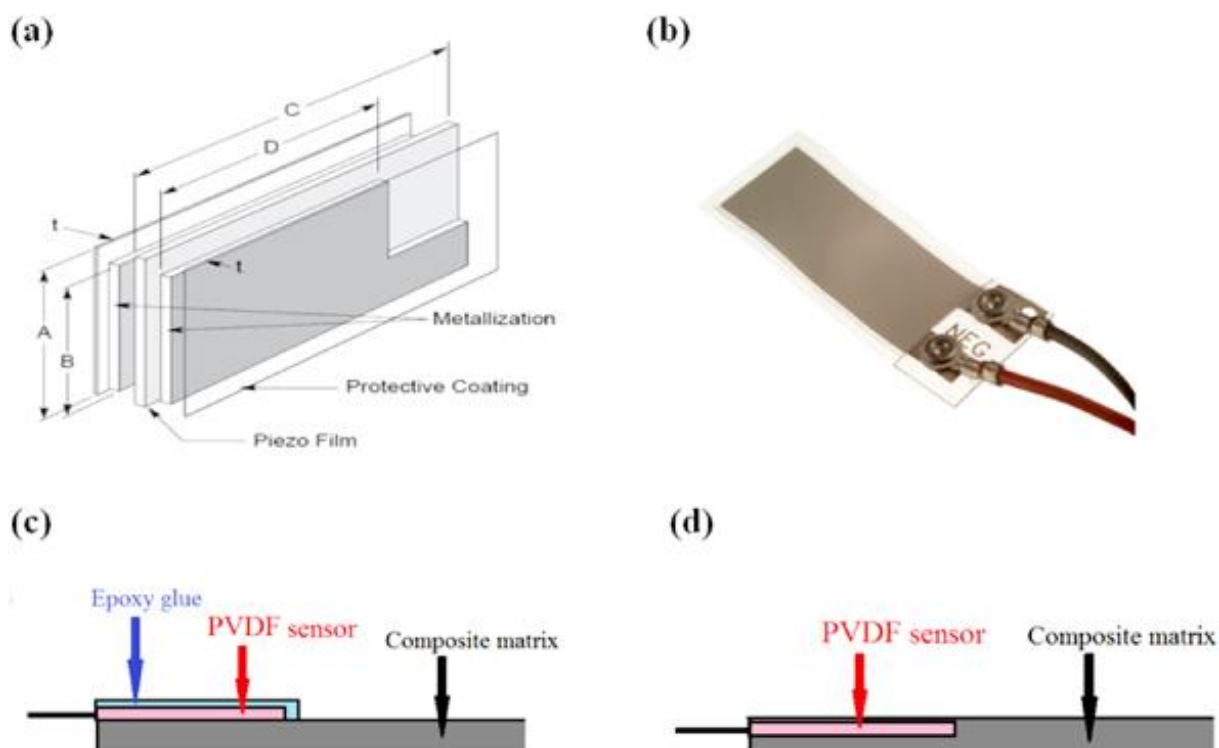
Jelikož je tloušťka filmu malá, dosahuje vysoké citlivosti až 0,013 V/N (citlivost = = napětí/síla). ~~Toto je odhad výrobce.~~ Ovšem kvůli instalaci na lopatku a následnému zalití

²⁶ [7] FLEK, Ondřej. *Diagnostika kavitace v hydrodynamických čerpadlech* [online]. 2004. Praha: Výzkumné středisko Rockwell Automation.

Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=32626

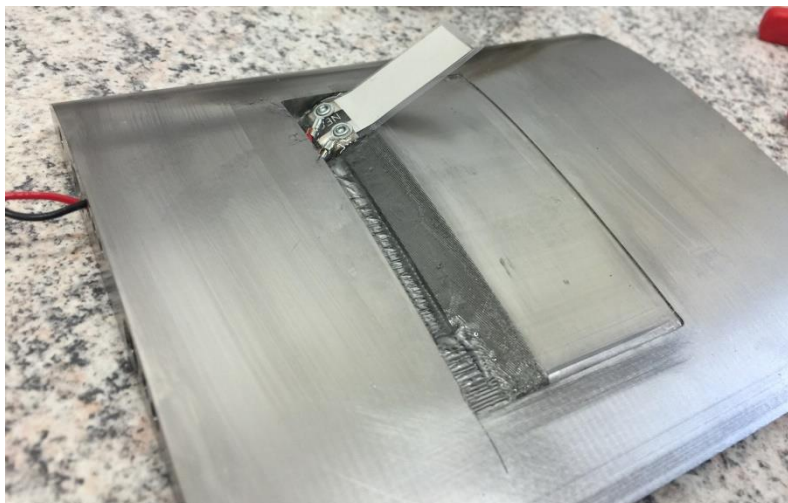
²⁷ [6] *Application of piezoelectric PVDF film to the measurement of impulsive forces generated by cavitation bubble collapse near a solid boundary* [online]. [cit. 15.05.2007]. Dostupné z: www.sciencedirect.com

lepidlem se tato citlivost může měnit. Nicméně použití polypropylenu jako ochranné vrstvy naukázalo zásadní rozdíl v citlivosti snímání [6].



Obrázek 16 PVDF film [12]

4.1 MĚŘENÍ POMOCÍ PVDF FILMŮ – PŘÍPRAVA PRO MĚŘENÍ



Obrázek 17 Zobrazení drážky pro PVDF filmy

Filmy byly připevněny na povrch lopatky do vyfrézovaného profilu pomocí dvou typů lepidel. Odfrézovaný povrch je rozdělen na dvě části. Hlubší drážka slouží k ochraně a zakrytí kontaktů filmu a odvodu kabelů, které jsou následně odvedeny z boční strany profilu. Mělká drážka slouží k uložení činné plochy filmu k povrchu lopatky. Hloubka je volena tak, aby se

film přichytil a po nanesení tenké vrstvy lepidla, plocha přesně odpovídala tvaru profilu. Na celou plochu bylo přilepeno pět filmů.

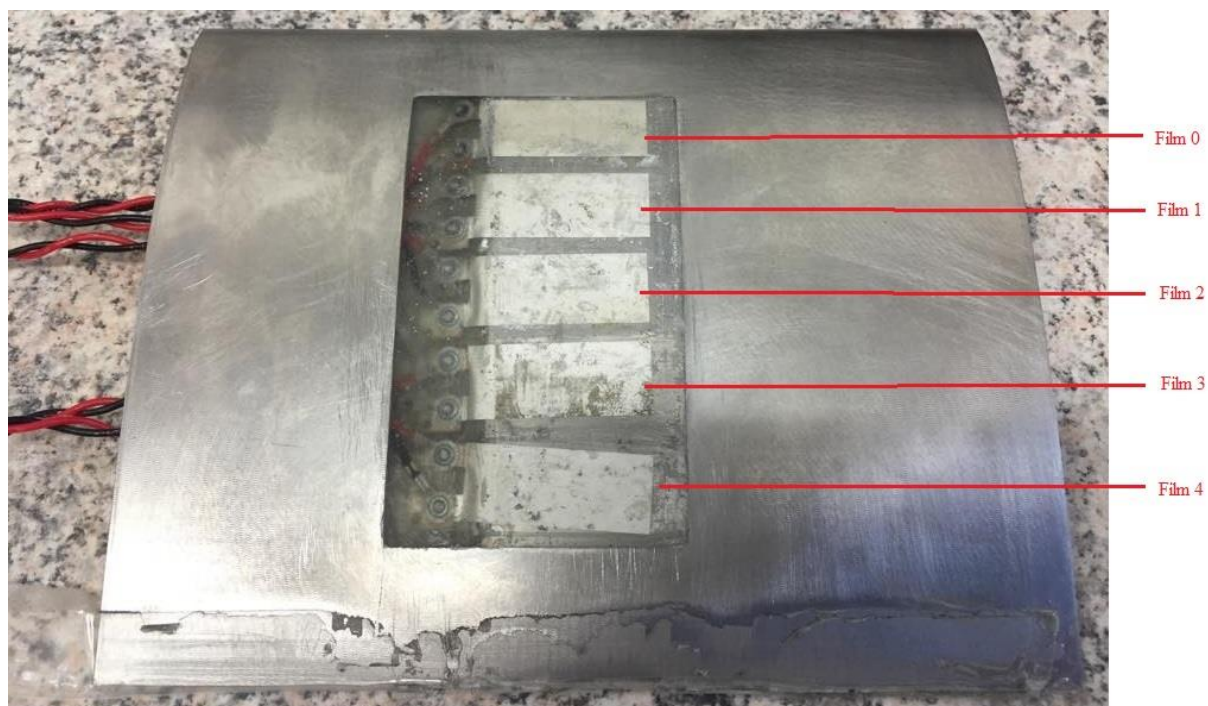
K přilepení filmu bylo použito lepidlo Loctite Super Attak, které krycí vrstvě dává určitou pružnost. K uchycení kontaktů a k jejich zalití sloužilo dvousložkové lepidlo Bison epoxy, které je pevnější.

Při lepení všech filmů a jejich zalévání bylo průběžně kontrolováno, zda jsou filmy stále funkční, protože jsou tvořeny ze dvou tenkých fólií nalepených na sebe, a při lepení hrozilo jejich roztržení.

Ke kontrole sloužily především osciloskop a ohmmetr. Osciloskop ukazoval, zda prochází elektrický signál, ohmmetr zjišťoval, zda film není elektricky propojen s lopatkou.

Na obrázku 18 je vidět lopatku připravenou k měření. V jejím zúženém místě je přilepena izolepa kvůli bezpečnosti proti pořezání, která byla následně při měření v tunelu odstraněna.

Označení měřících PVDF filmů je na obrázku 18 od vrchu. Filmy jsou označeny 0-4 směrem od náběžné k odtokové hraně profilu. Označení odpovídá i číslování kanálů na osciloskopické kartě.



Obrázek 18 Lopatka připravená k měření

4.2 MĚŘENÍ POMOCÍ PVDF FILMŮ – KALIBRACE

PVDF filmy na kontaktech při dynamickém namáhání ukazují určitou hodnotu napětí. Dále je uveden postup určení vztahu mezi působící silou a generovaným napětím na PVDF filmu. Kalibrace byla provedena pro každý film zvlášť. Byla provedena pomocí ocelové kuličky, která se pouštěla z určitých výšek.

Tato metoda vychází ze zákona o impulsu síly, který má tvar,

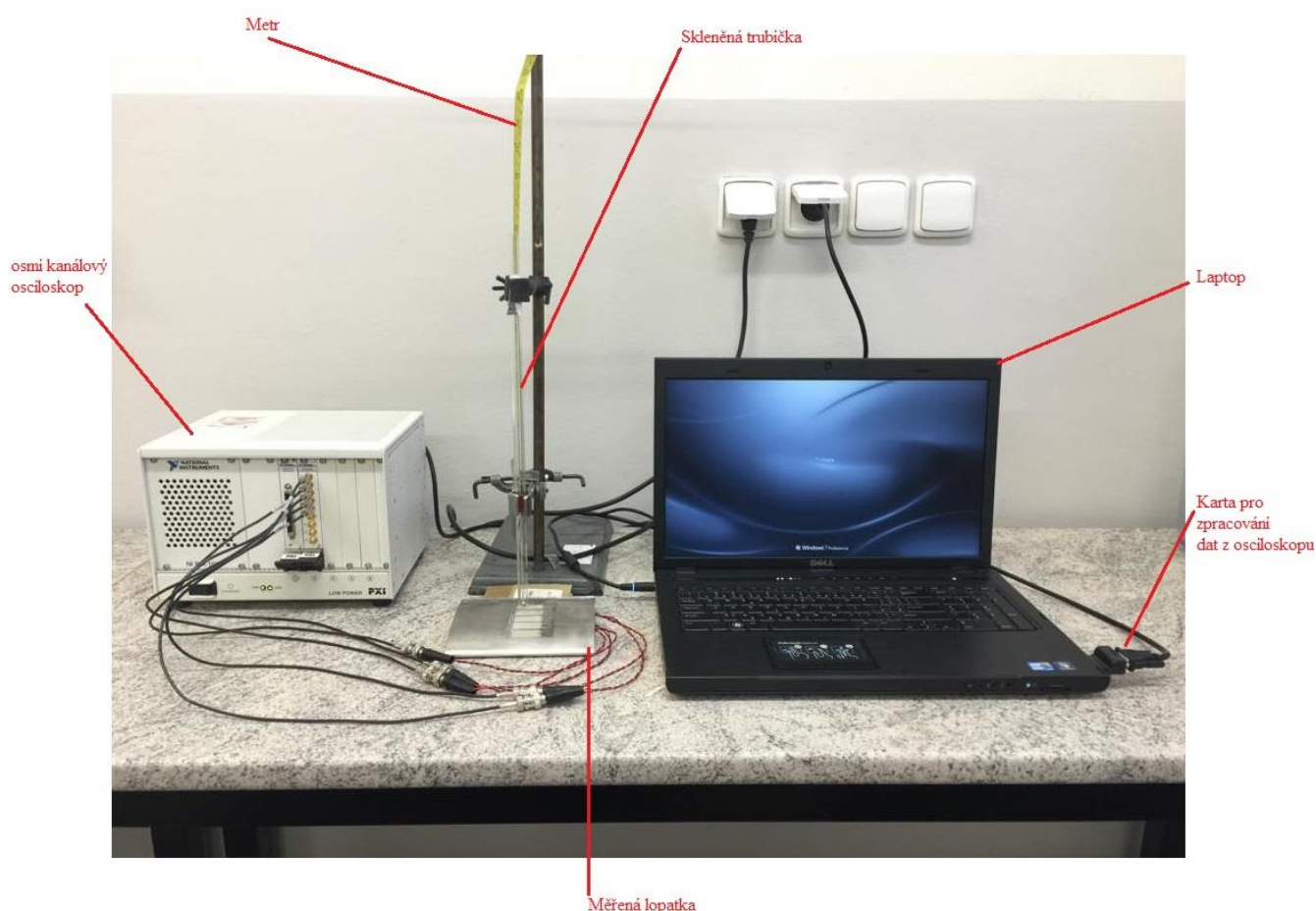
$$F = \frac{m \cdot (V_1 + V_2)}{T} \quad (3.1)$$

,kde výsledkem je síla – F [N] působící na film, m – hmotnost [kg], T – trvání impulsu [s] a V – potenciální energie na začátku a na konci děje. Časová délka pulzu je určena jako plná šířka na polovině maxima signálu.

Filmy byly kalibrovány na více místech, s ohledem na možnost rozdílné tloušťky krycí vrstvy. Každý film byl měřen na dvou místech.

Další parametr měření byla výška, ze které se pouštěla kulička a následně výška odrazu kuličky. Vybrány byly tři výšky: 150 mm, 300 mm a 401 mm. Uvedené výšky umožnily sestavit závislost různých hodnot napětí a jím odpovídajících sil Celkově bylo provedeno 150 kalibračních hodů. Pro zpřesnění místa dopadu na PVDF filmu byla kulička vedena ve skleněné trubičce.,

4.3 MĚŘENÍ POMOCÍ PVDF FILMŮ – PŘÍPRAVA PRO MĚŘENÍ



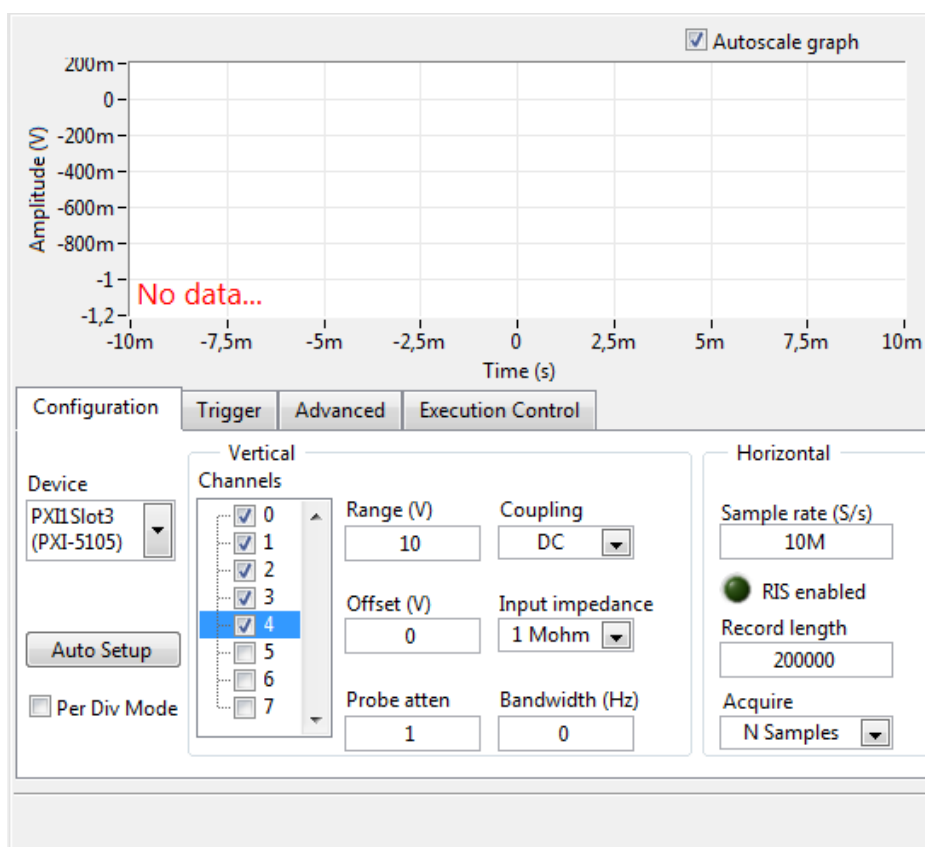
Obrázek 19 Schéma zapojení pracoviště

Na obrázku 19 je vidět je osmi kanálová osciloskopická karta pro záznam signálu z filmů. Při měření bylo zapojeno pět filmů najednou, aby bylo možné stanovit jejich vzájemné ovlivnění.

Kabely vycházejí z měřené lopatky, nad kterou je umístěna pomocí stojanu skleněná trubička navádějící kalibrační kuličku pro dopad. Vedle trubičky je přiložen metr, který slouží k odečítání hodnoty výšky odražené kuličky.

Napravo je notebook, který sloužil ke zpracování signálu z osciloskopu pomocí programu SignalExpress.

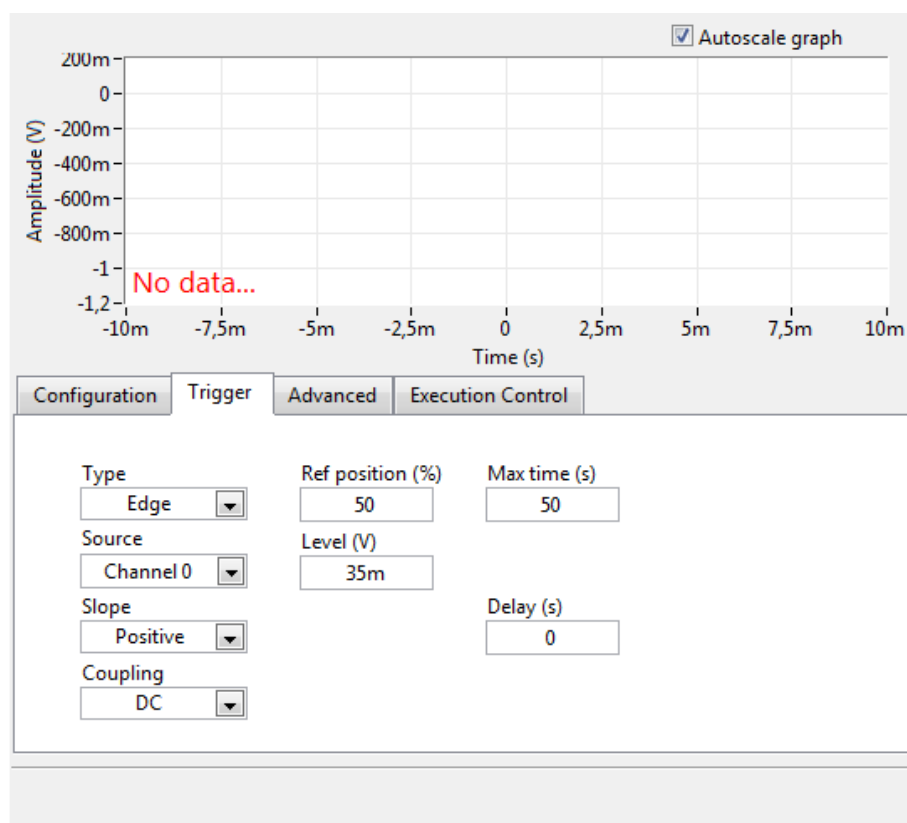
4.4 MĚŘENÍ – KALIBRACE



Obrázek 20 Nastavení osciloskopu 1

Ke zpracování dat sloužil program Labview Signalexpress, který dokázal zpracovat výstupní signály z osciloskopické karty. Nastavení snímání nalezneme na Obrázku 20.

Obrázek ukazuje aktivní kanály, nastavený rozsah měření, vstupní impedanci, typ očekávaného signálu a vzorkovací frekvenci.

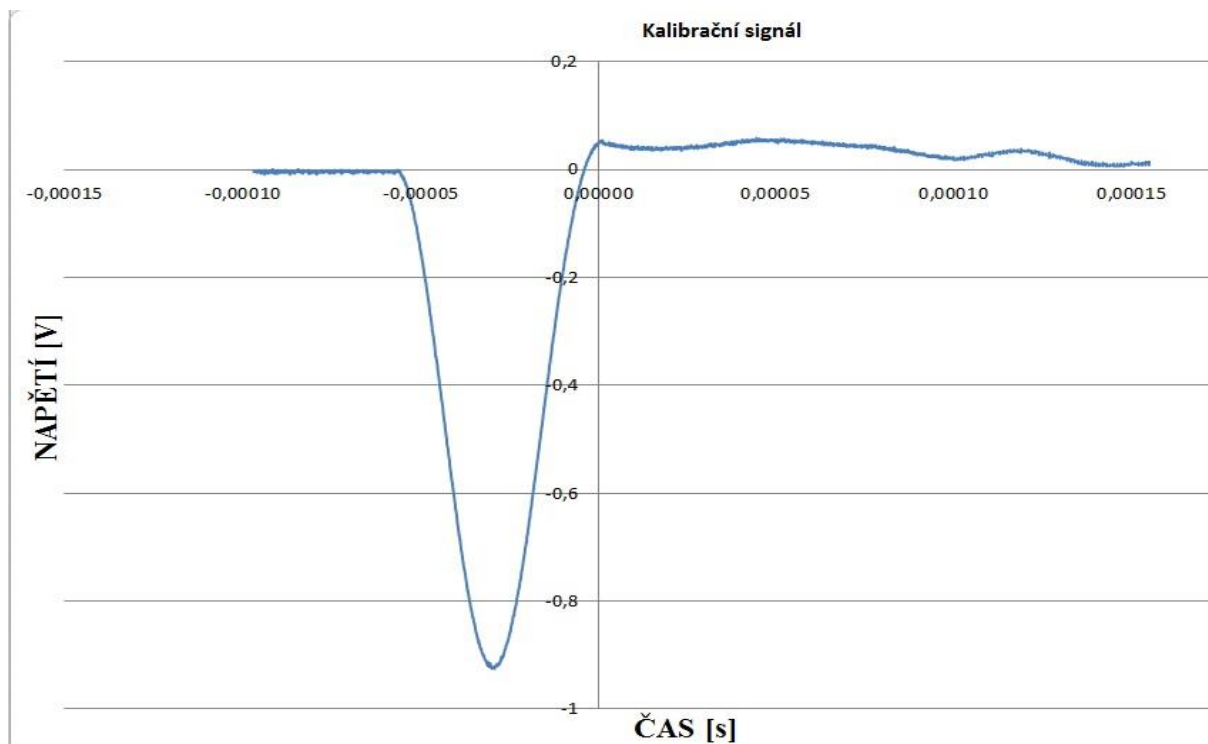


Obrázek 21 Nastavení osciloskopu 2

V další kartě nastavení bylo třeba určit hladinu spouštění (Trigger)tj. hodnotu napětí od které začne karta signál zaznamenávat., kdy má osciloskop začít snímat. V položce Type bylo dále provedeno nastavení typu signálu, který sloužil jako spoušť. Položka Source určuje který kanál, resp.film, bude zdrojem signálu pro spuštění. Hladina signálu byla nastavena tak aby ke spuštění došlo už při velmi malých hodnotách napětí.

ODEČÍTÁNÍ HODNOT

Graf číslo 7 reprezentuje jeden testovaný hod. Kde je vidět v levé části, že osciloskop nezaznamenal žádnou sílu (drobné rozkmitání grafu je elektrický šum). Poté přišel dopad kuličky na film a na kontaktech filmu byl zaznamenán prudký nárůst signálu. Ze signálu byla odečtena maximální hodnota napětí a dále trvání signálu, která jak bylo uvedeno, odpovídala šířce signálu na polovině maxima (FWAHM – full width at half maximum). Po odeznění hlavního signálu je na pravé straně vidět doznívání signálu. Z výsledku měření bylo možno vysledovat, že vzájemné ovlivnění jednotlivých filmů je minimální. Zde je vidět, že se filmy mohou měřit i události, které se staly na jiném filmu, než na kterém se měří.

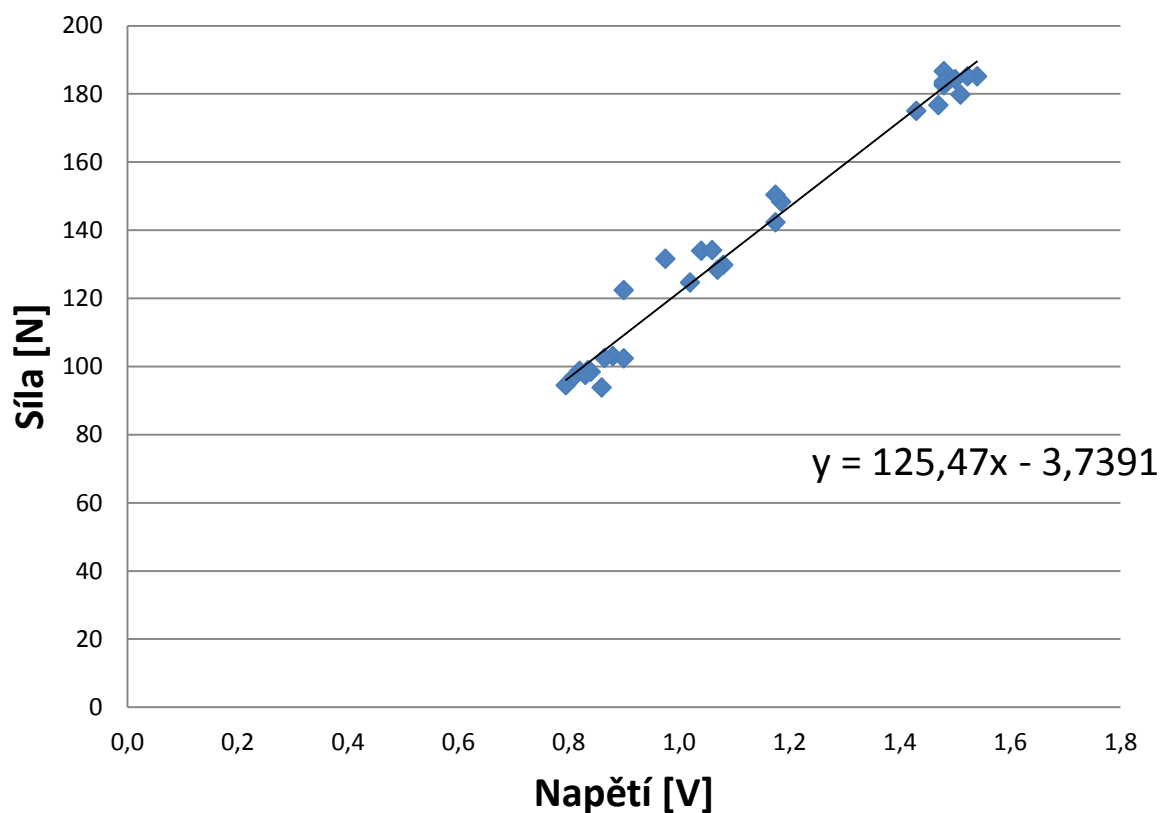


Obrázek 22 Graf výstupu osciloskopu při dopadu kuličky

Zpracování těchto signálů probíhalo pro všechna měření.

Z jednotlivých naměřených hodnot pak byla určena směrnice přímky, aby se dosáhlo závislosti mezi napětím a proudem pro každý jednotlivý film.

Film 1

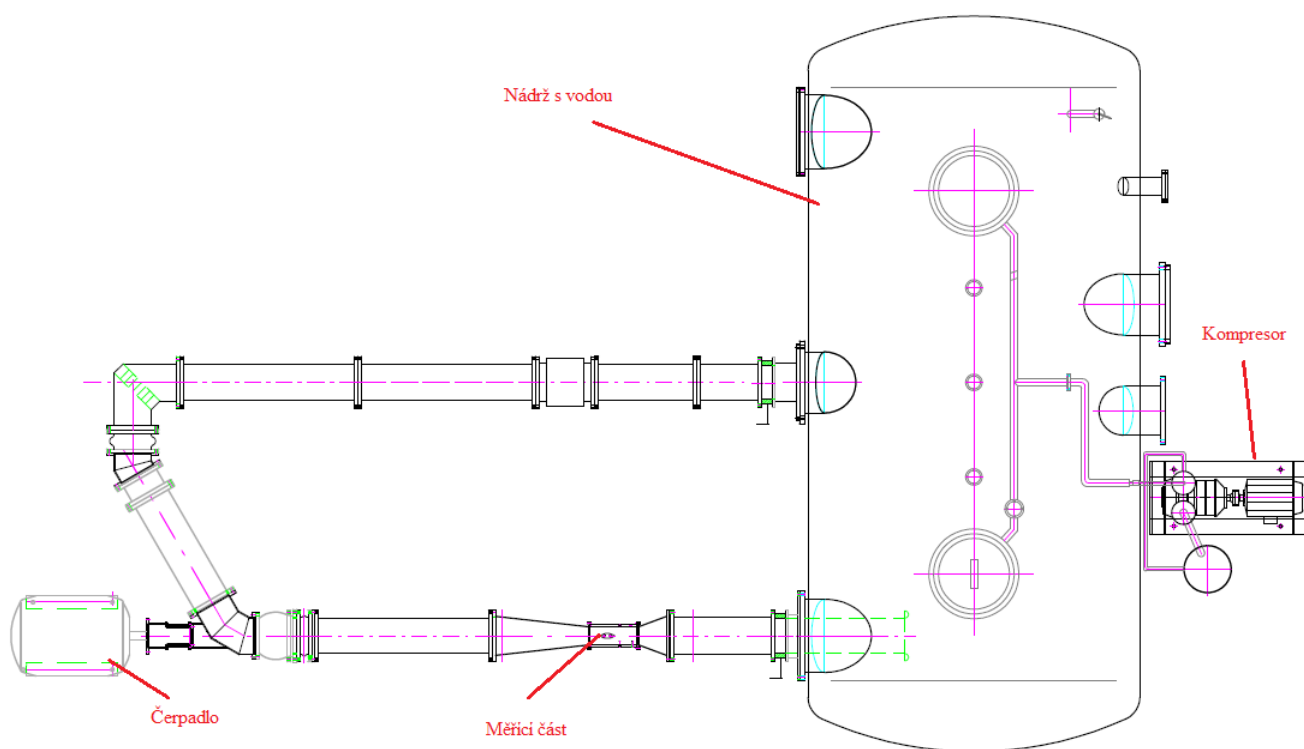


Obrázek 23 Graf znázornění síly v závislosti na napětí

V obrázku 23 je vidět příklad naměřených hodnot pro film číslo jedna. Získaná směrnice přímky umožňuje využít rozsah kalibrace i mimo měřený rozsah. Kalibrace ukázala, že všechny filmy mají směrnici v rozsahu $118 \cdot$ až $126 \cdot$ N/V (viz příloha).

5 MĚŘENÍ KAVITACE NA KAVITAČNÍM TUNELU 5.1 POPIS KAVITAČNÍHO TUNELU²⁸

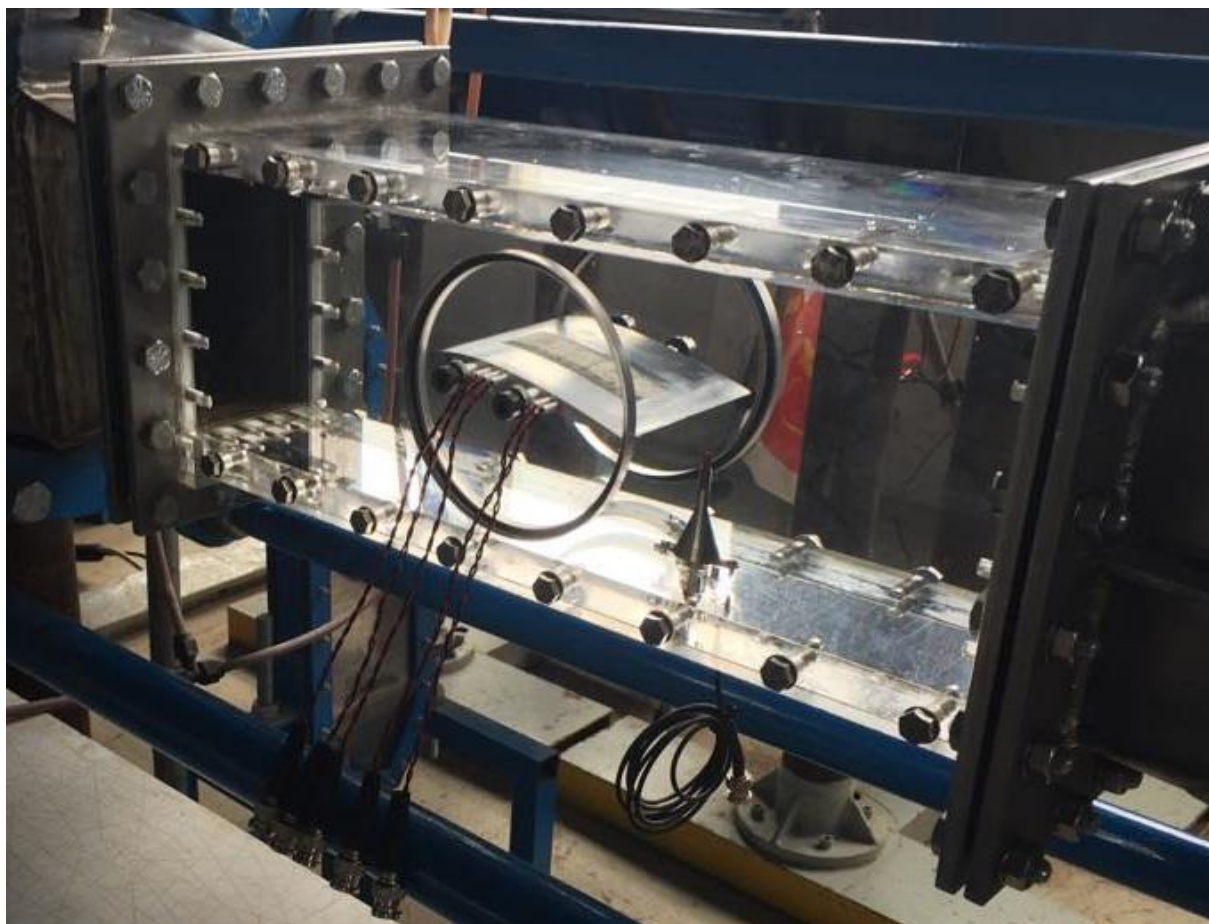
Kavitační tunel ve firmě Sigma byl postaven v roce 2007. V počátcích byl používán k vyšetřování eroze vyvolané kavitací. V roce 2013 byl přestavěn tak, aby umožňoval studovat neustálené kavitační jevy.



Obrázek 24 Schéma kavitační trati od firmy Sigma

Zařízení se skládá z vodní nádrže, která má kapacitu 35m^3 . Z nádrže je pomocí trubek vytvořena smyčka sloužící k oběhu vody, kde je oddělena od zásobníku s vodou dvěma klapkami. Materiál okruhu je nerezová ocel DN300. Voda je poháněna čerpadlem a tlak vzduchu v nádrži je regulován kompresorem. Čerpadlem lze v tunelu dosáhnout rychlosti průtoku až 25m/s . Pomocí kompresoru a čerpadla je možno nastavovat různé parametry tlaku a průtoku a nastavovat tak různé režimy provozu.

²⁸ [12] KOMÁREK, M., SEDLÁŘ, M., VYROUBAL, M., ZIMA, P., MÜLLER, M., PÁLKA, T. *Preparation of experimental and numerical research on unsteady cavitating flow around hydrofoil* [online]. Český Krumlov: 2014. Příspěvky z konference, 2014-11-18 2014. /2014-11-21. Zdrojový dokument: Experimental Fluid Mechanics Dostupné z: <http://www.nusl.cz/ntk/nusl-180559>



Obrázek 25 Měřicí část trati

Měřicí část má tvar obdélníku s rozměry 150*150*500 mm a je vyrobena z organického skla.

Zařízení dokáže při vstupu do měřicí části udržovat rovnoměrnou rychlost toku podle nastavení v rozmezí $\pm 1\%$. Měřená lopatka je uchycena pomocí čtyř imbusových šroubů k víčkům, která jsou navzájem k sobě přitahována. Kolem víček je těsnící o-kroužek.

Kompletní výkres měřicí trati je uveden v příloze. V měřicí části za lopatkou je umístěn PVDF hydrofon, který slouží k detekci kolapsů kavitačních mraků za lopatkou. Označení PVFD filmů odpovídá značení použitému na profilu při kalibraci.

5.2 POSTUP MĚŘENÍ NA KAVITAČNÍM TUNELU

Na obrázku 26 je snímek měřící sestavy použitý pro měření interakce kavitačních struktur s profilem.



Obrázek 26 Schéma zapojení měření na tunelu

V měřicí části je umístěna lopatka (Obrázek 25), na kterou působí kavitační jev. Měří se pomocí PVDF filmů, které jsou připojeny pomocí osciloskopu k PC. K osciloskopu jsou ještě připojeny dva další vstupy. Jeden z nich je hydrofon, který snímá události kavitačního jevu za lopatkou a druhý je generátor signálu. Celý proces je v měřicí oblasti zaznamenáván vysokorychlostní kamerou, nastavenou na 1 000 snímků/sec. Protože kamera při tomto snímání vyžaduje značné osvětlení, bylo na tunel přidáno osvětlení.

Měření probíhalo v jedenácti různých režimech, při nichž se reguloval tlak na sání a průtok vody.

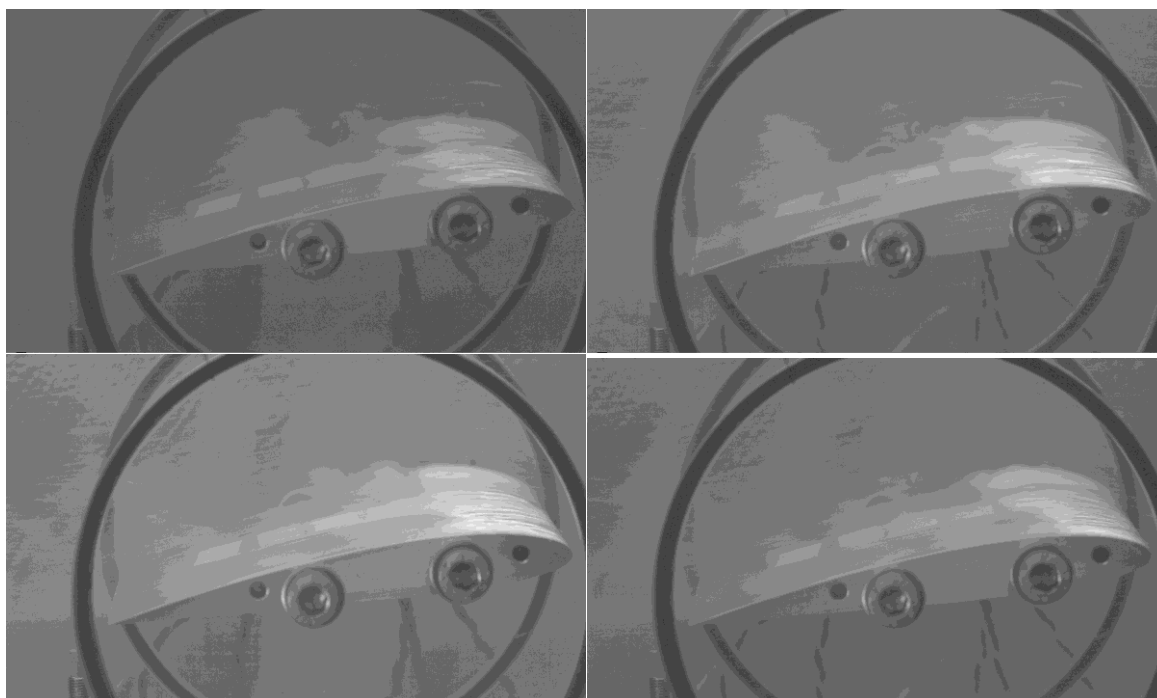
Každý režim, až na agresivní režimy, byl měřen čtyřikrát. Dvě měření byla pro záznam z PVDF filmů při snímkování signálu 100 kHz a druhý při 10 MHz.

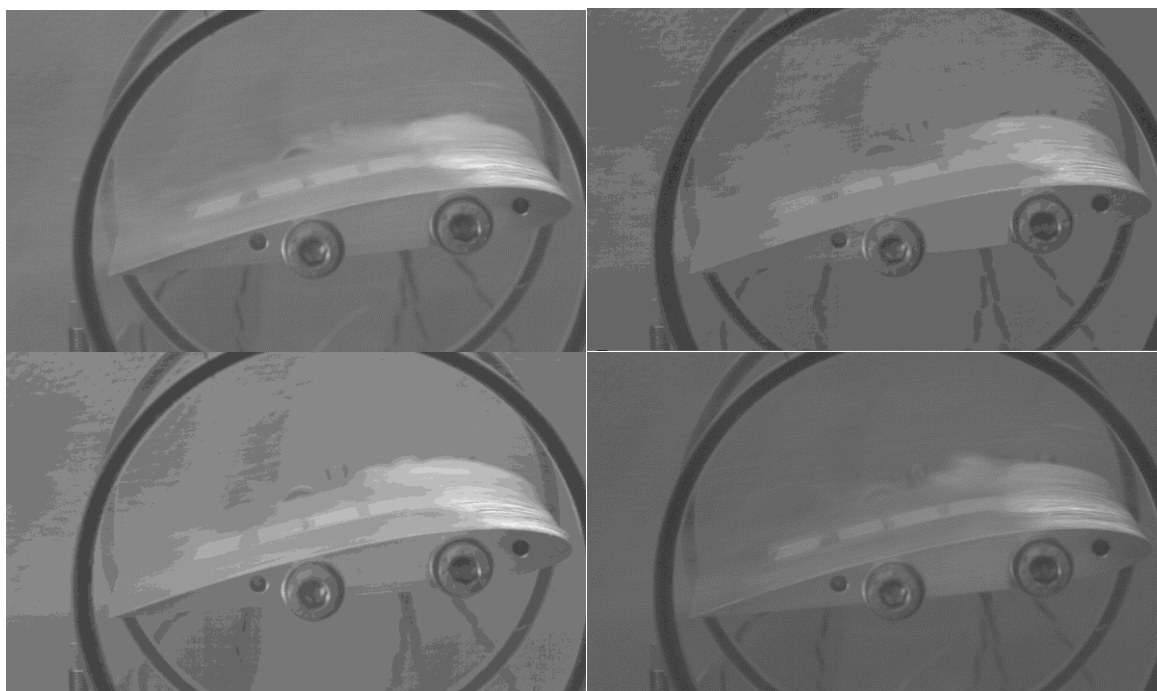
Každé měření probíhalo tak, že nejprve byl spuštěn osciloskop, na kterém byl nastaven jeden kanál jako spouštěcí. Tento impuls byl vyvolán generátorem signálu, který zároveň ovládal spouštění kamery. Tímto způsobem se pustily osciloskop i kamera zároveň. Dosáhlo se tudíž časové synchronizace.

5.3 ZPRACOVÁNÍ DAT Z KAMERY A PVDF FILMŮ

Pro zpracování v této práci byly zvoleny dva reprezentativní režimy s různou úrovní kavitace. Kompletní zpracování měření představuje velmi náročnou proceduru a její provedení přesahuje rámec této práce. Výsledky jsou v tomto případě prezentovány tak, že je nejprve graficky znázorněn režim pomocí snímků z vysokorychlostní kamery. Dále je uvedena ukázka části záznamu z měření při nízké frekvenci a následně ukázka z měření při vysoké frekvenci. Obě ukázky záznamů jsou provedeny na PVDF filmech, kde je očekáván nejvyšší účinek. V prvním režimu s nízkou úrovní kavitace byla rychlost v měřicí sekci 7.1 m/s a tlak na vstupu 95 kPa. V režimu s vysokou úrovní kavitace byla rychlost v měřicí sekci 12.9 m/s a tlak na vstupu 245 kPa. Odpovídající kavitační čísla pak byla 3.6 pro režim s nízkou úrovní kavitace a 2.8 pro režim s vysokou úrovní kavitace. Pro převod velikosti signálu v jednotkách napětí na signál v jednotkách síly je použita kalibrace uvedená v kapitole 4.

Charakter režimu s nízkou úrovní kavitace je uveden na obrázku č. 27..

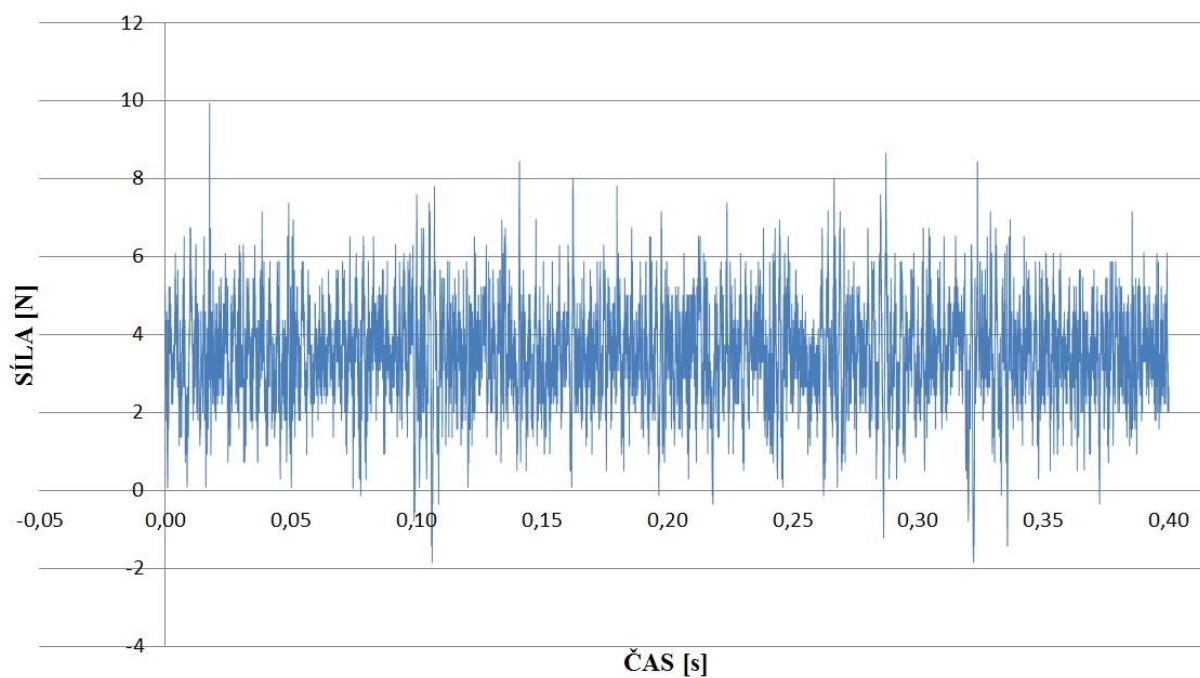




Obrázek 27 Průběh kavitace při vysokém kavitačním čísle

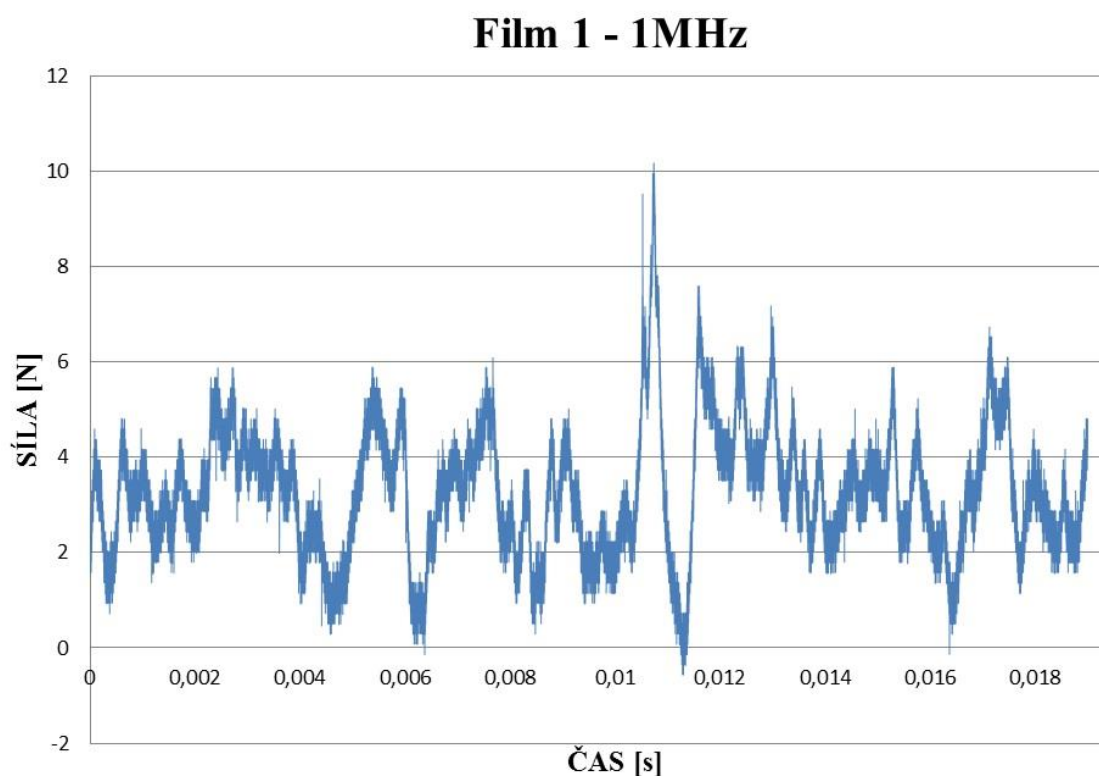
Při tomto režimu se na náběžné hraně lopatky vytvořila plošně kavitační kapsa, která je téměř neměnná. Zatížen byl v tomto případě pouze film č. 1 Ukázka signálu zaznamenaného na prvním filmu, je uvedena v Grafu č. 9. Tento signál byl zaznamenan se vzorkovací frekvencí 100 kHz.

Film 1



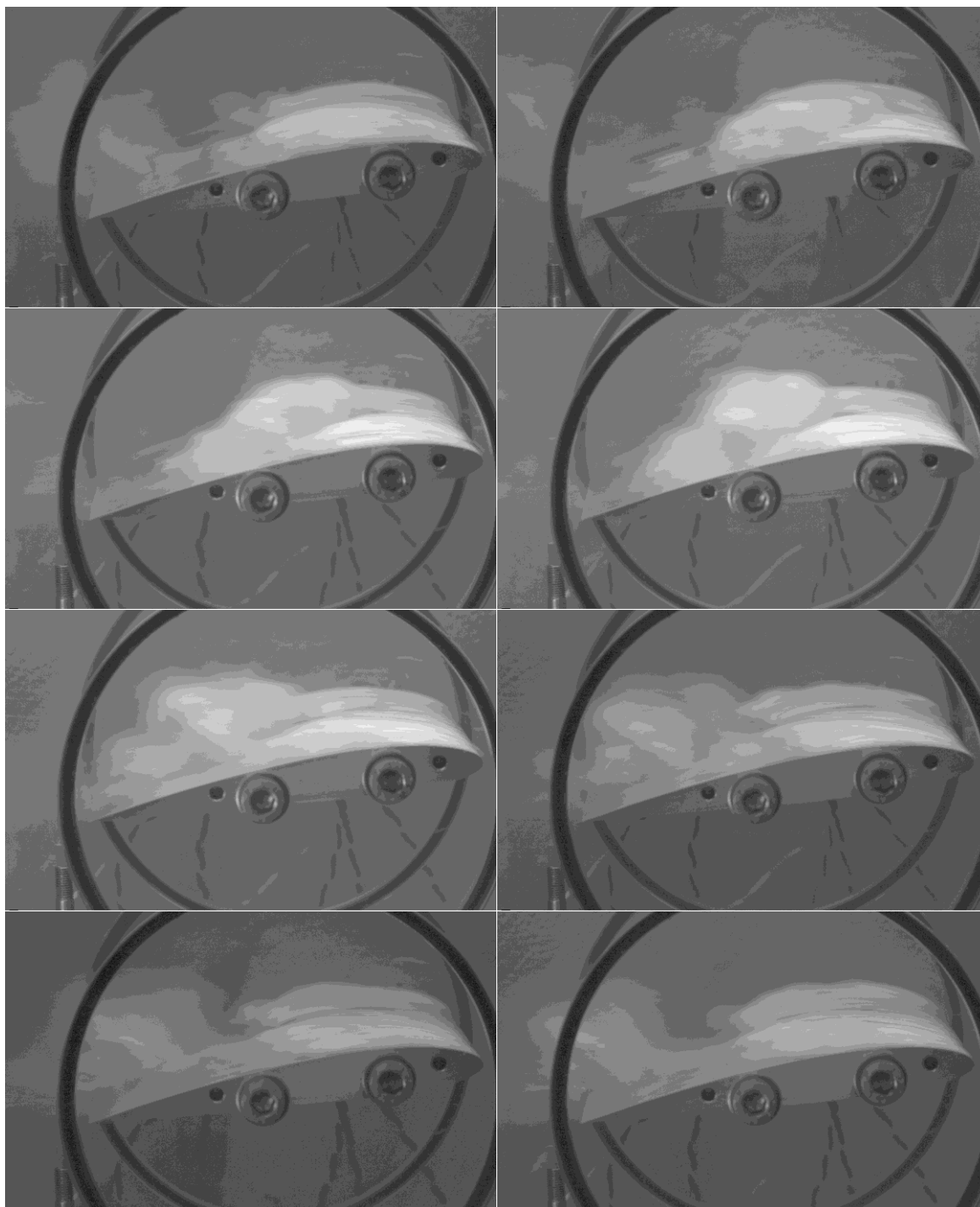
Obrázek 28 Graf průběhu síly za čas na filmu 1, snímkování 100kHz

Z grafu nejsou patrné žádné amplitudy nepřesahující více jak 10N. Kavitace nemá žádný výrazný vliv na lopatku. Velká část signálu, která kmitá kolem hodnoty 3N a může představovat elektrický šum, případně interakci proudu tekutiny s filmem. Na záznamu se vzorkovací frekvencí 10MHz uprostřed je patrný signál který může odpovídat kolapsu samostatného kavitačního mraku či samostatné větší bublinky. V příloze 11 jsou patrné častější nárůsty hodnoty síly, které mohou odpovídat kolapsům bublinek či jejich mraků na odtoku z lopatky.



Obrázek 29 Graf průběhu síly za čas na filmu, 1 snímkování 1MHz

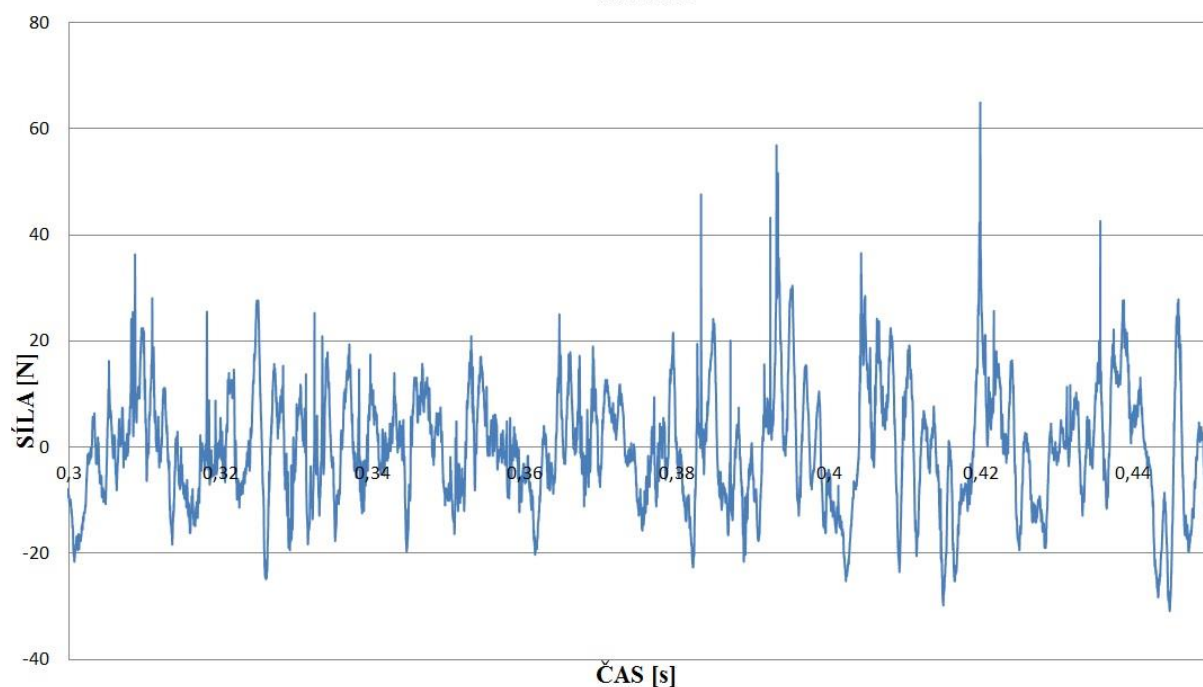
Druhý režim byl volen tak , aby vykazoval dle kavitačního čísla vyšší intenzitu kavitace. Záznam z rychlostní kamery pro tento režim je uveden na obrázku 30.



Obrázek 30 Průběh kavitačního jevu při nízkém kavitačním čísle

Signál odpovídající tomuto režimu zaznamenaný na filmu č. 3 je uveden na obrázku 31. Vzorkovací frekvence byla v tomto případě 100kHz. Z průběhu jsou patrné vyšší hodnoty sil na filmu i některé charakteristické tvary signálů odpovídající kolapsům bublin a jejich mraků. Z charakteru signálů v příloze (Graf 30 – 35) je i patrné rozložení sil podél profilu lopatky, kdy film na náběžné hraně vykazuje nižší zatížení než filmy směrem k odtokové hraně.

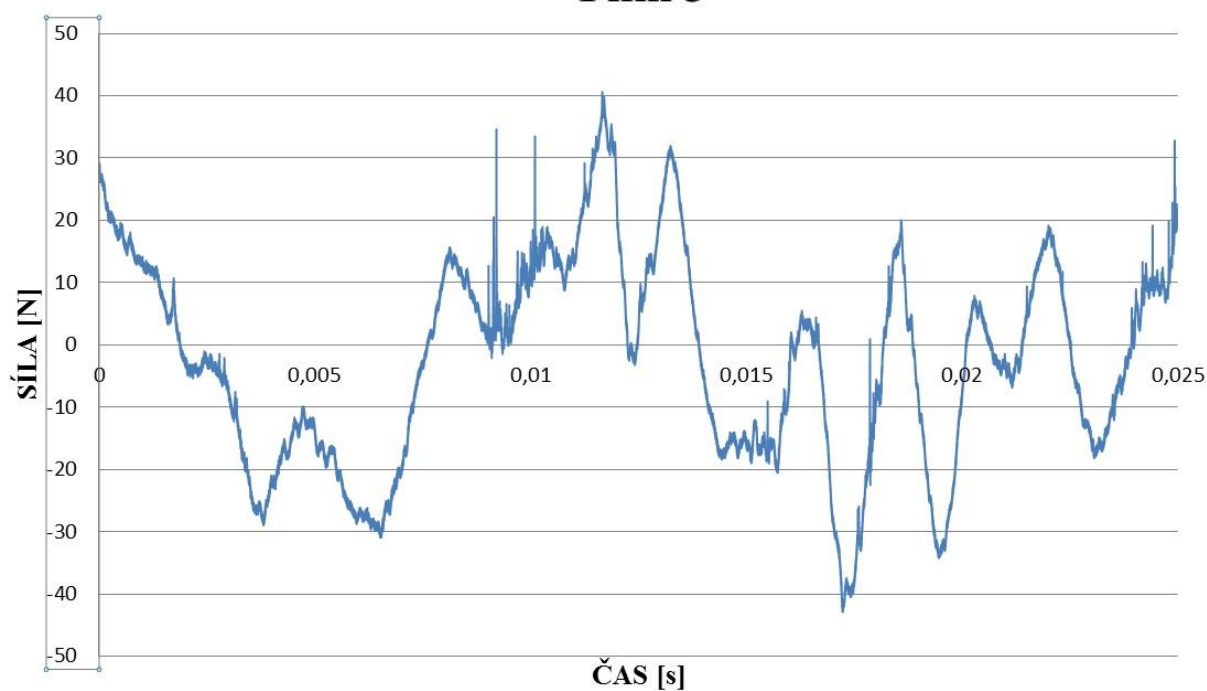
Film 3



Obrázek 31 Graf průběhu síly za čas na filmu 3, snímkování 100kHz

Tento graf je vytvořen ze vzorku, kde rychlost snímání a zápisu elektrického signálu byla nastavena na 100 kHz, rychlost vody 12.888 m/s, tlaku 245 kPa a kavitačního čísla 2.872218. Zde je vidět, že amplitudy v určitých místech dosahují až 60 N, což v daném okamžiku pravděpodobně znamená kolaps jednotlivých kavitačních mraků.

Film 3



ZÁVĚR

Základním cílem této práce byla příprava, provedení měření a vyhodnocení účinků kavitace na profil, který reprezentoval lopatku čerpadla.

V rešeršní části práce je uveden popis základních typů čerpadel, jejich funkčních principů a provozních parametrů. Jsou zde uvedena i místa, kde může ke kavitaci v čerpadle dojít a jaké se používají parametry k jejímu popisu a klasifikaci. Je potřeba říci, že kavitace v čerpadle vzniká v oběžném kole, které obsahuje řadu lopatek. Experiment prováděný v rámci této práce se zaměřuje pouze na jednu lopatku, a proto jevy vedoucí ke kavitaci v obou těchto případech mohou být mírně odlišné. Jedná se například o složitější charakter proudění.

K měření charakteru kavitace na lopatce bylo použito optických i akustických metod. Synchronizace těchto přístupů umožňuje skloubení vysokofrekvenčního akustického záznamu s pomalejším záznamem z rychlostní kamery, který nám však pomáhá identifikovat charakter zkoumané struktury.

Pro záznam interakce kavitačního proudu s lopatkou byly použity PVDF filmy, které byly kalibrovány metodou pádu kuličky. Rozložení PVDF filmů po povrchu lopatky ukazuje rozložení zatížení lopatky od kavitujiícího proudu. Současné použití jehlového hydrofonu za odtokovou hranou dává další informaci o síle kolapsů mraků bublin v tomto místě. Jehlový hydrofon však pravděpodobně zaznamenává spíše rázové vlny šířící se v tekutině po kolapsu bublinky.

Na vybraných režimech intenzity kavitace je zřetelné, že při nižší intenzitě kavitace je lopatka zatížena minimálně a kolapsy jsou spíše nahodilé, což odpovídá i vizuálnímu záznamu z rychlostní kamery. Naopak při vyšší úrovni kavitace jsou na jednotlivých filmech zřetelné kolapsy mraků bublin nebo i samostatných bublin. Z porovnání záznamů s vyšší a nižší vzorkovací frekvencí je zřejmé, že každý z uvedených záznamů poskytuje informaci o jiném charakteru děje.

Získané informace pomohou ke zpřesnění popisu interakce kavitačního proudu s lopatkami čerpadel a umožní lépe predikovat erozivní potenciál kavitace.

Vlastní vyhodnocení a komplexní analýze dějů na lopatce čerpadla je součástí rozsáhlého projektu. Tato práce ukazuje možnosti představených měření a jejich další analýza bude pravděpodobně součástí navazující diplomové práce.

Seznam použitých zdrojů

Literatura

- [1] HUJER, Jan. *Diagnostika kavitace v hydraulickém tlumiči*. Bakalářská práce 2010. Liberec: Technická univerzita.
- [2] KIANIČKA, Martin. *Využití kavitace v technické praxi*. Diplomová práce 2009/2010. Brno: VUT, Fakulta strojního inženýrství.
- [3] NOSKIEVIČ, J. et al. *Kavitace v hydraulických strojích a zařízeních*. 1. vydání. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury. 1989. 336 s. ISBN 80-03-00206-0.
- [4] NOSKIEVIČ Jaromír, *Kavitace*. 1. vyd. Praha: Academia. 1969, 280 s. ISBN 509-21-875.
- [5] Vlastní zápisky z hodin hydraulické a pneumatické pohony – TUL – FS rok 2013/2014.

Elektronické zdroje

- [6] *Application of piezoelectric PVDF film to the measurement of impulsive forces generated by cavitation bubble collapse near a solid boundary* [online], [cit. 15.05.2007] Dostupné z: www.sciencedirect.com
- [7] FLEK, Ondřej. *Diagnostika kavitace v hydrodynamických čerpadlech* [online]. 2004. Praha: Výzkumné středisko Rockwell Automation. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=32626
- [8] *Fundamentals of Cavitation (Fluid Mechanics and Its Applications)* [online]. [cit. 03.08.2014].
- [9] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Kavitace> [online]. *Kavitace* [cit. 06.02.2014]
- [10] <http://www.machinerylubrication.com/Read/380/cavitation-wear-hydraulic> [online]. 2002. *Kavitace wear v hydraulických systémech*
- [11] *Příručka čerpací techniky* [online]. GRUNDFOS Management A/S. 2004. Dostupné z: http://net.grundfos.com/doc/webnet/waterutility/_assets/downloads/gcz/pumphandbook_gcz.pdf
- [12] KOMÁREK, M., SEDLÁŘ, M., VYROUBAL, M., ZIMA, P., MÜLLER, M., PÁLKA, T. Preparation of experimental and numerical research on unsteady cavitating flow around hydrofoil [online]. Český Krumlov: 2014. Příspěvky z konference, 2014-11-18 2014. /2014-11-21. *Zdrojový dokument: Experimental Fluid Mechanics* Dostupné z: <http://www.nusl.cz/ntk/nusl-180559>

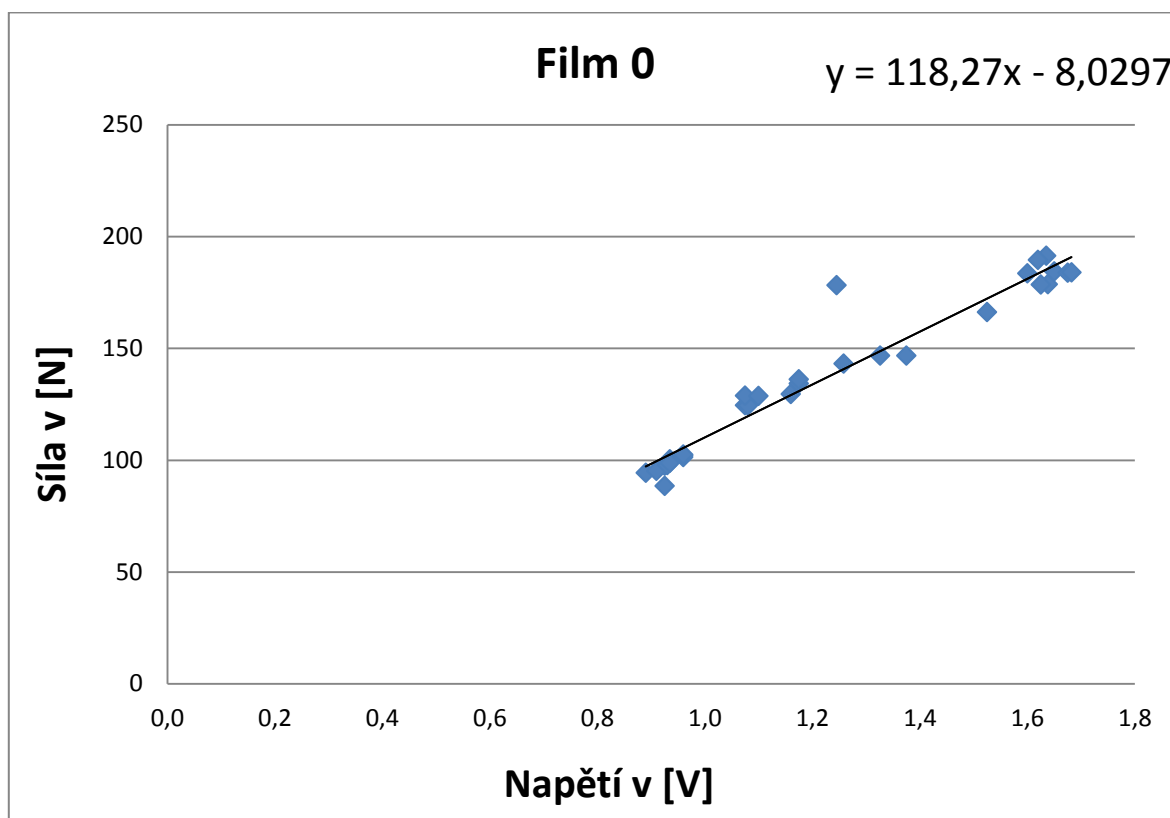
[13] *Survivability of integrated PVDF film sensors to accelerated ageing conditions in aeronautical/aerospace structures*. 2013
<http://m.iopscience.iop.org/0964-1726/22/6/065020/article>

Seznam příloh

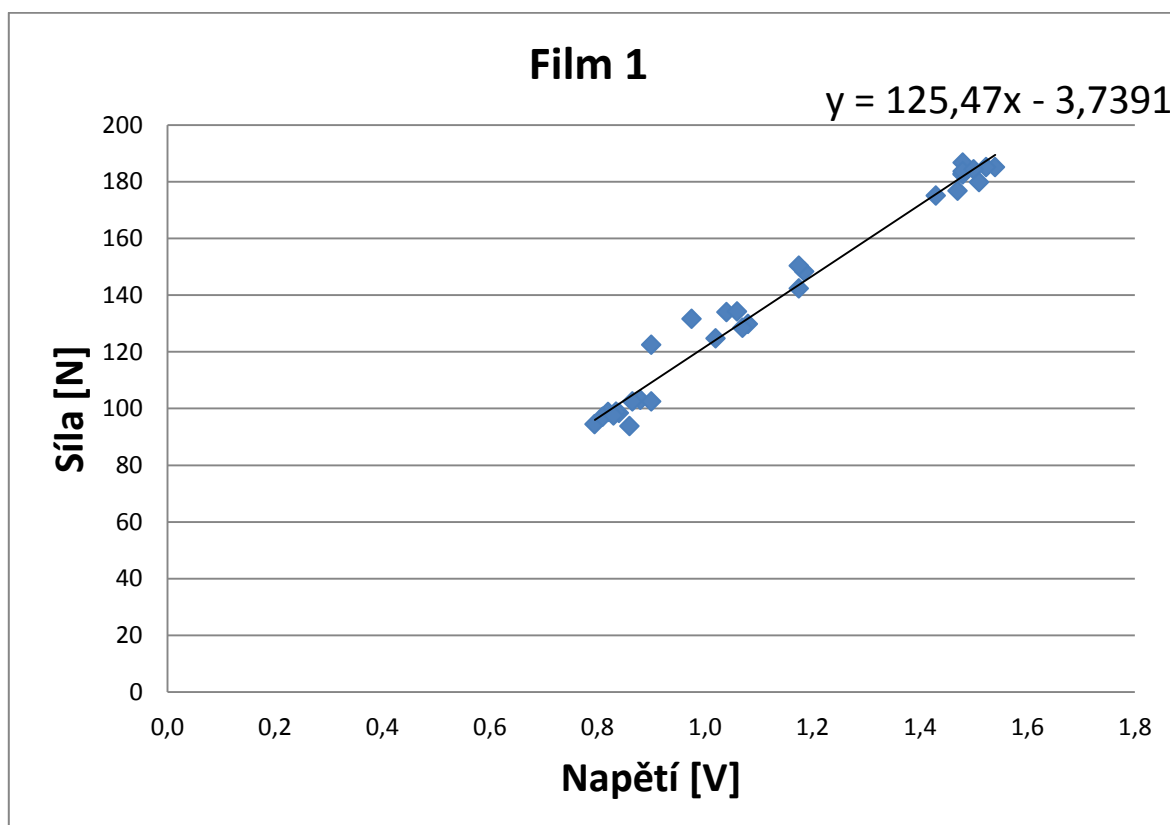
Příloha 1 Graf znázornění síly v závislosti na napětí Film 0	52
Příloha 2 Graf znázornění síly v závislosti na napětí Film 1	52
Příloha 3 Graf znázornění síly v závislosti na napětí Film 2	53
Příloha 4 Graf znázornění síly v závislosti na napětí Film 3	53
Příloha 5 Graf znázornění síly v závislosti na napětí Film 4	54
Příloha 6 Graf průběhu síly za čas na filmu 0 snímkování 100 kHz, kavitační číslo 3,592692	54
Příloha 7 Graf průběhu síly za čas na filmu 1 snímkování 100 kHz, kavitační číslo 3,592692	55
Příloha 8 Graf průběhu síly za čas na filmu 2 snímkování 100 kHz, kavitační číslo 3,592692	55
Příloha 9 Graf průběhu síly za čas na filmu 3 snímkování 100 kHz, kavitační číslo 3,592692	56
Příloha 10 Graf průběhu síly za čas na filmu 4 snímkování 100 kHz, kavitační číslo 3,592692	56
Příloha 11 Graf průběhu napětí za čas na hydrofonu snímkování 100 kHz, kavitační číslo 3,592692	57
Příloha 12 Graf průběhu síly za čas na filmu 0 snímkování 1 Mhz, kavitační číslo 3,592692	57
Příloha 13 Graf průběhu síly za čas na filmu 1 snímkování 1 Mhz, kavitační číslo 3,592692	58
Příloha 14 Graf průběhu síly za čas na filmu 2 snímkování 1 Mhz, kavitační číslo 3,592692	58
Příloha 15 Graf průběhu síly za čas na filmu 3 snímkování 1 Mhz, kavitační číslo 3,592692	59
Příloha 16 Graf průběhu síly za čas na filmu 4 snímkování 1 MHz, kavitační číslo 3,59269259	
Příloha 17 Graf průběhu napětí za čas na hydrofonu snímkování 1 MHz, kavitační číslo 3,592692	58
Příloha 18 Graf průběhu napětí za čas na hydrofonu snímkování 100 kHz, kavitační číslo 2,872218	60
Příloha 19 Graf průběhu síly za čas na filmu 0 snímkování 100 kHz, kavitační číslo 2,872218	61
Příloha 20 Graf průběhu síly za čas na filmu 1 snímkování 100 kHz, kavitační číslo 2,872218	61
Příloha 21 Graf průběhu síly za čas na filmu 2 snímkování 100 kHz, kavitační číslo 2,872218	62

Příloha 22 Graf průběhu síly za čas na filmu 3 snímkování 100 kHz, kavitační číslo 2,872218	62
Příloha 23 Graf průběhu síly za čas na filmu 3 snímkování 100 kHz, kavitační číslo 2,872218	63
Příloha 24 Graf průběhu síly za čas na filmu 4 snímkování 100 kHz, kavitační číslo 2,872218	63
Příloha 25 Graf průběhu síly za čas na filmu 0 snímkování 1 MHz, kavitační číslo 2,87221864	
Příloha 26 Graf průběhu síly za čas na filmu 1 snímkování 1 MHz, kavitační číslo 2,87221864	
Příloha 27 Graf průběhu síly za čas na filmu 2 snímkování 1 MHz, kavitační číslo 2,8722182222	65
Příloha 28 Graf průběhu síly za čas na filmu 3 snímkování 1 MHz, kavitační číslo 2,87221865	
Příloha 29 Graf průběhu síly za čas na filmu 4 snímkování 1 MHz, kavitační číslo 2,87221866	
Příloha 30 Graf průběhu napětí za čas na hydrofonu snímkování 1MHz, kavitační číslo 2,872218	66
Příloha 31 Okruh - kavitační tunel	67

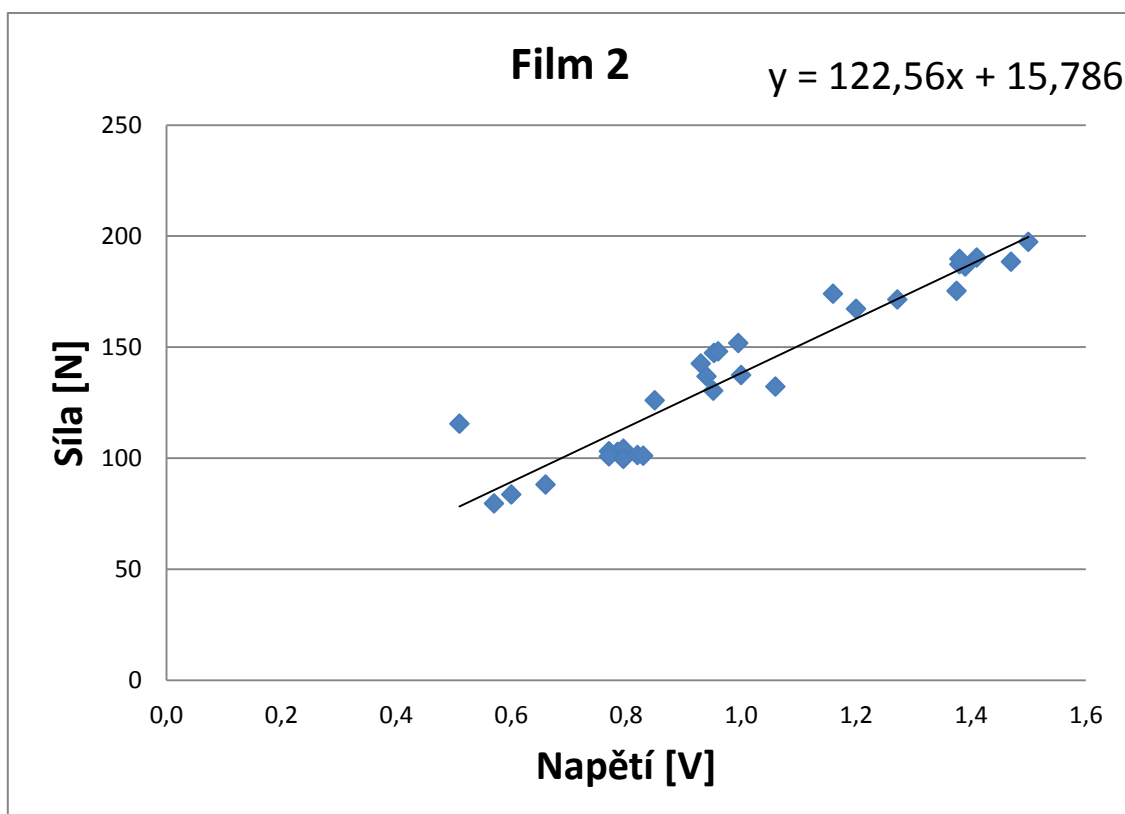
Přílohy



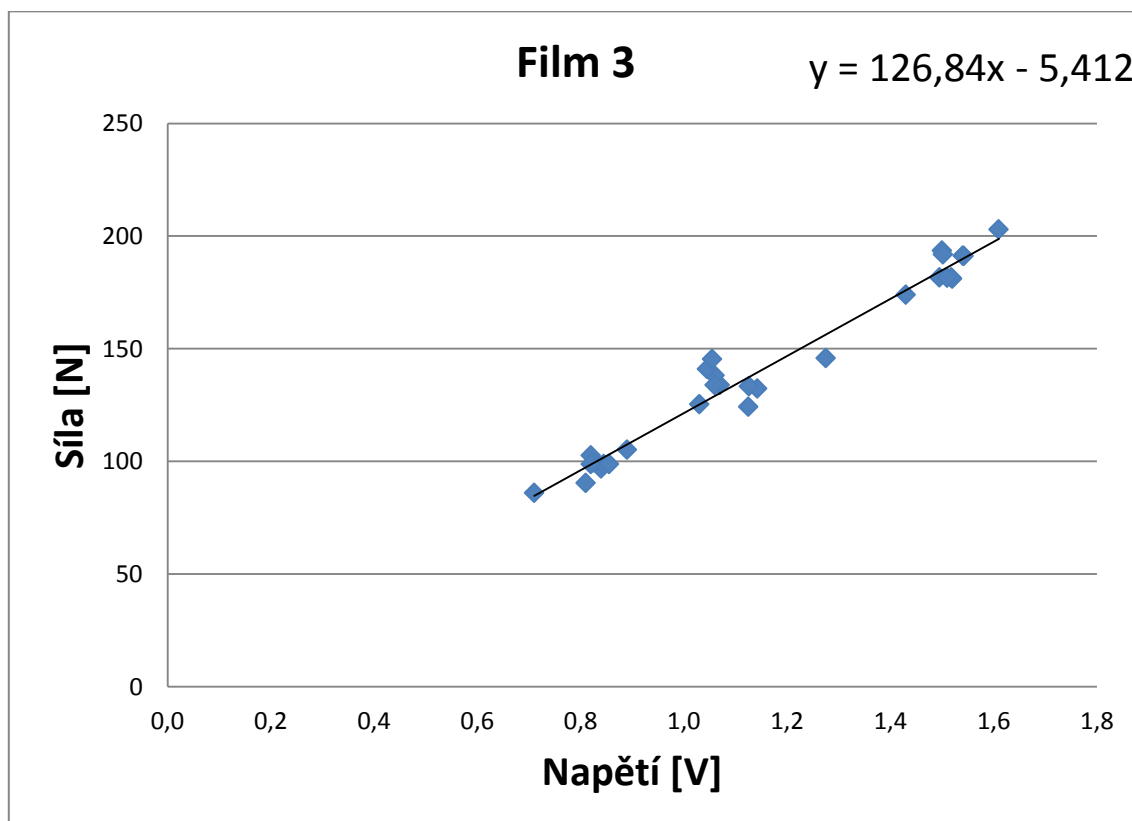
Příloha 2 Graf znázornění síly v závislosti na napětí Film 0



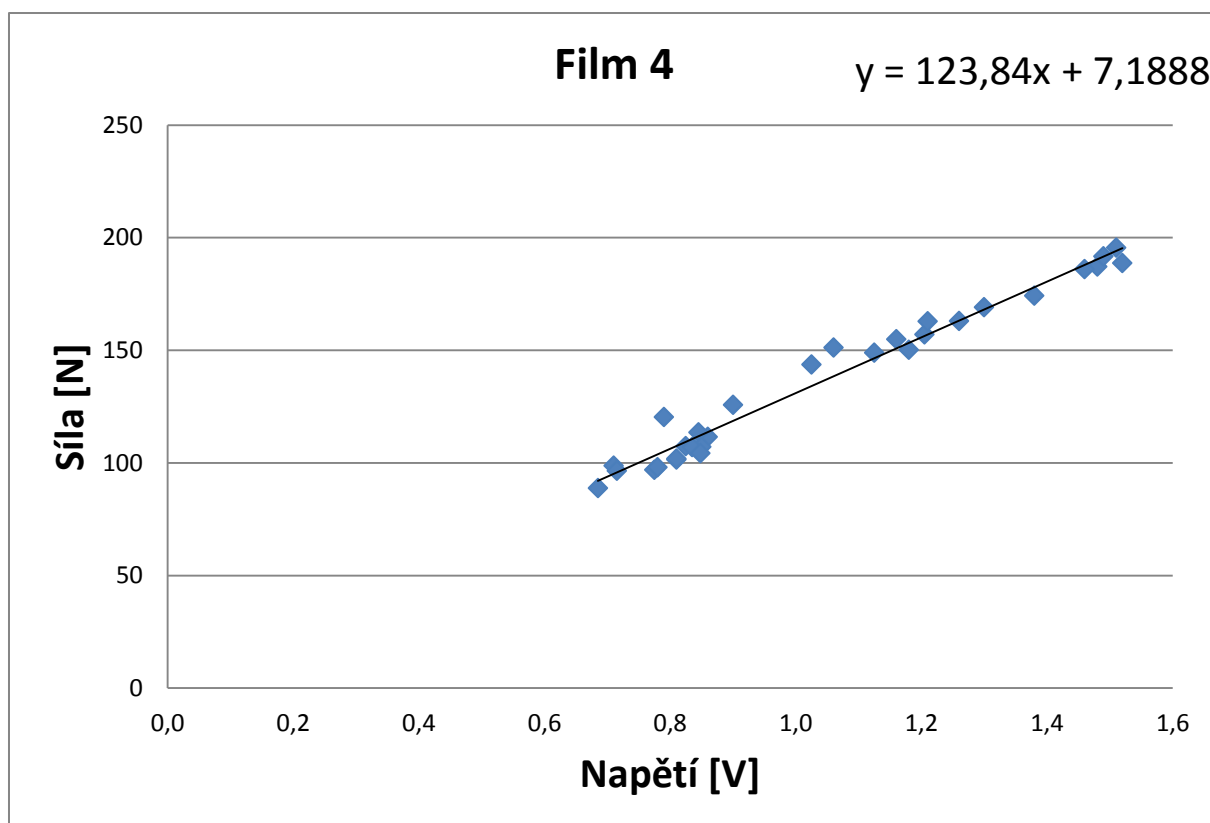
Příloha 3 Graf znázornění síly v závislosti na napětí Film 1



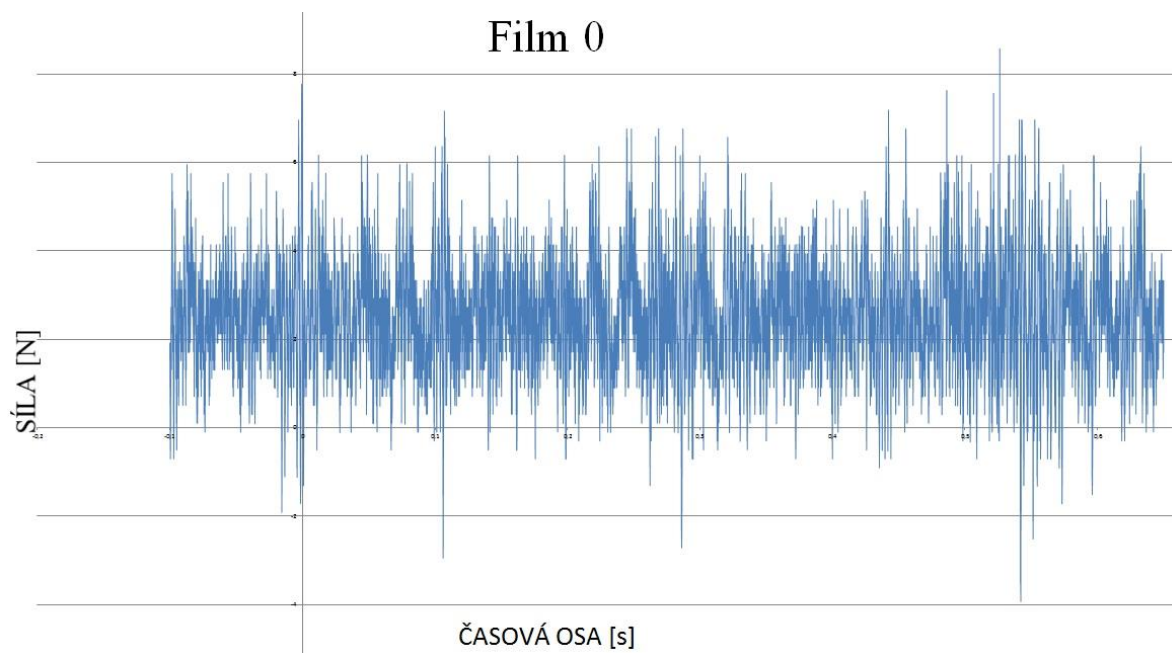
Příloha 4 Graf znázornění síly v závislosti na napětí Film 2



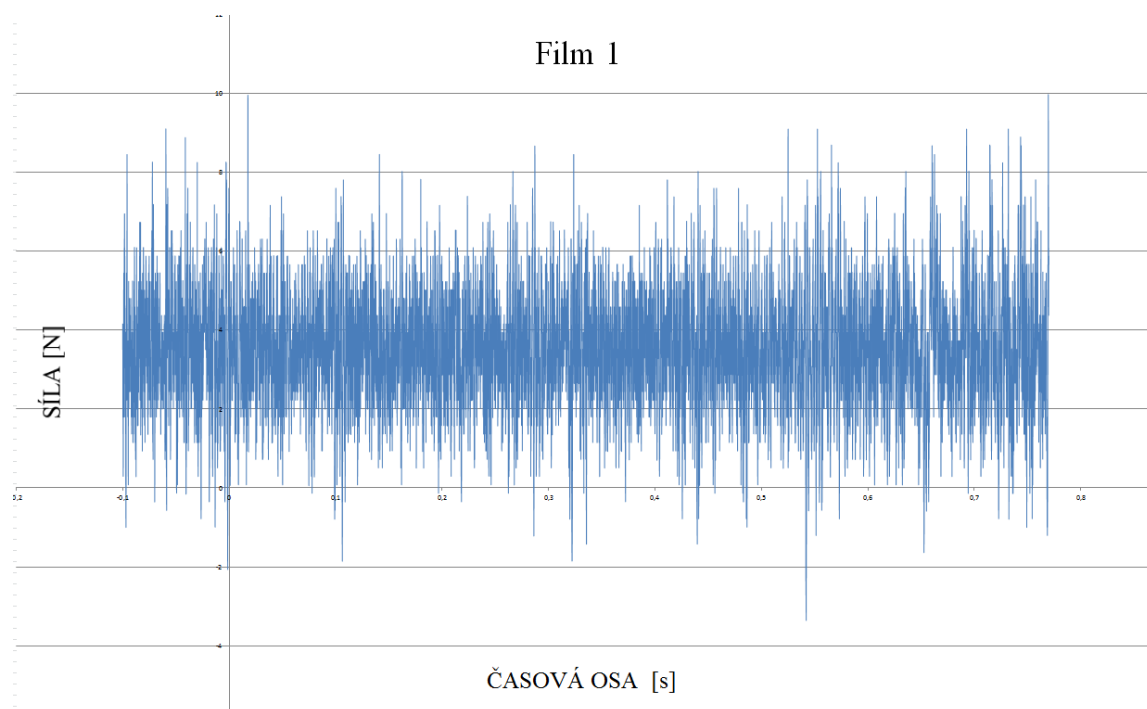
Příloha 5 Graf znázornění síly v závislosti na napětí Film 3



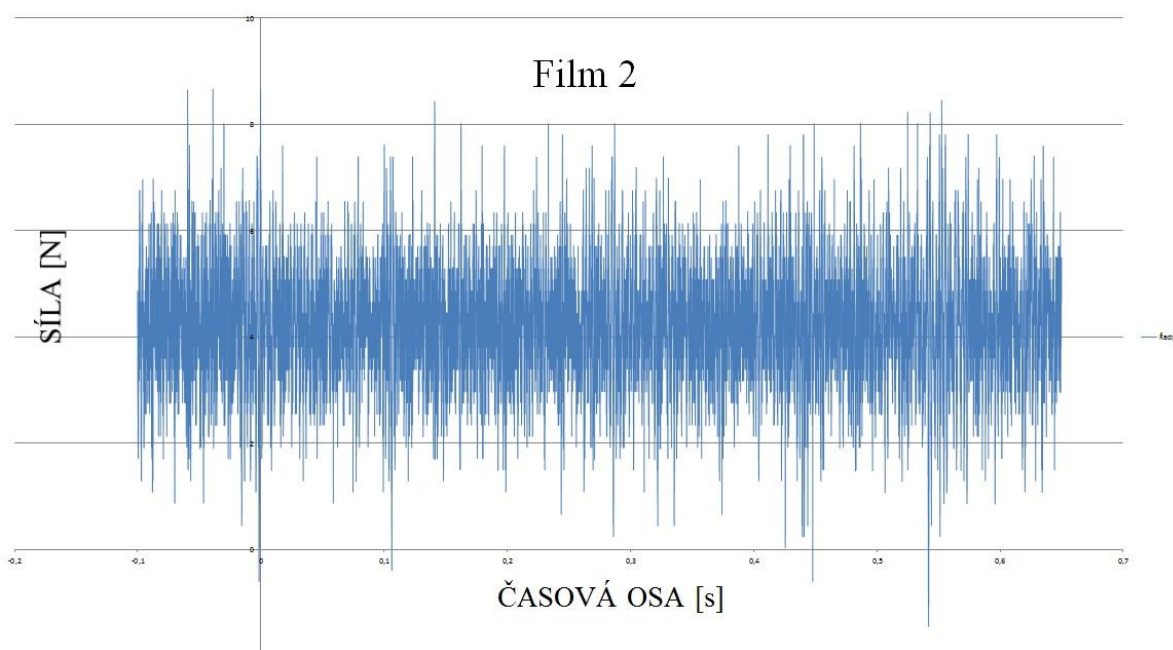
Příloha 6 Graf znázornění síly v závislosti na napětí Film 4



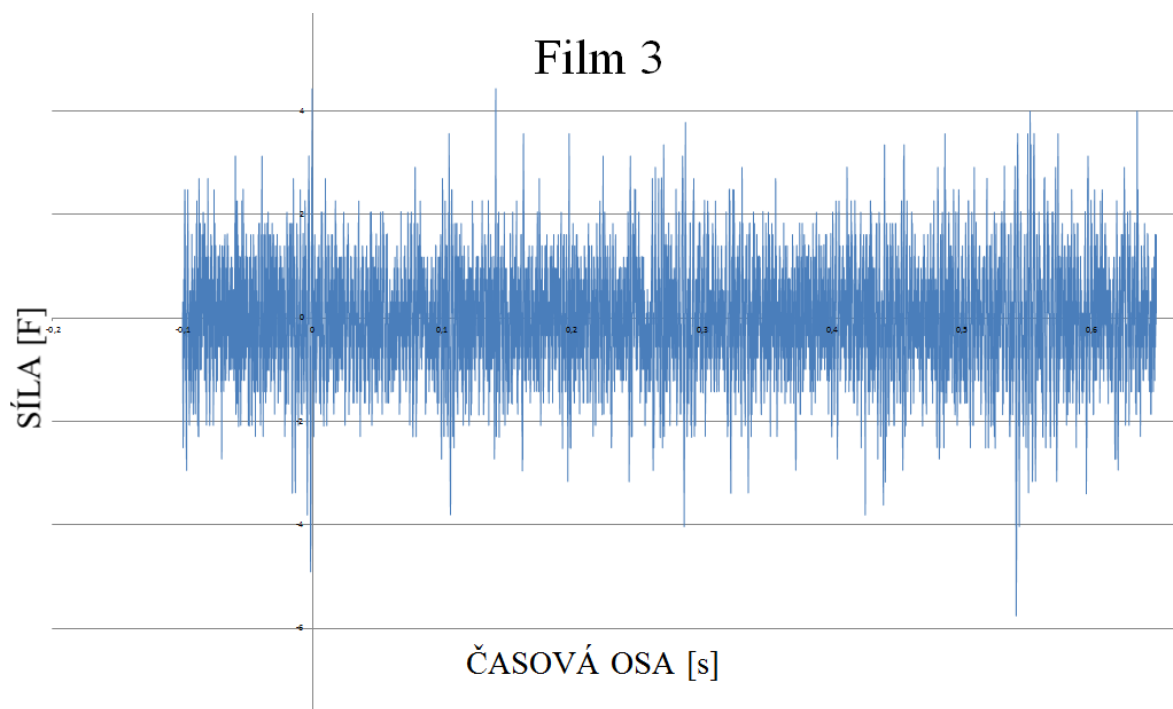
Příloha 7 Graf průběhu síly za čas na filmu 0 snímkování 100 kHz, kavitační číslo 3,592692



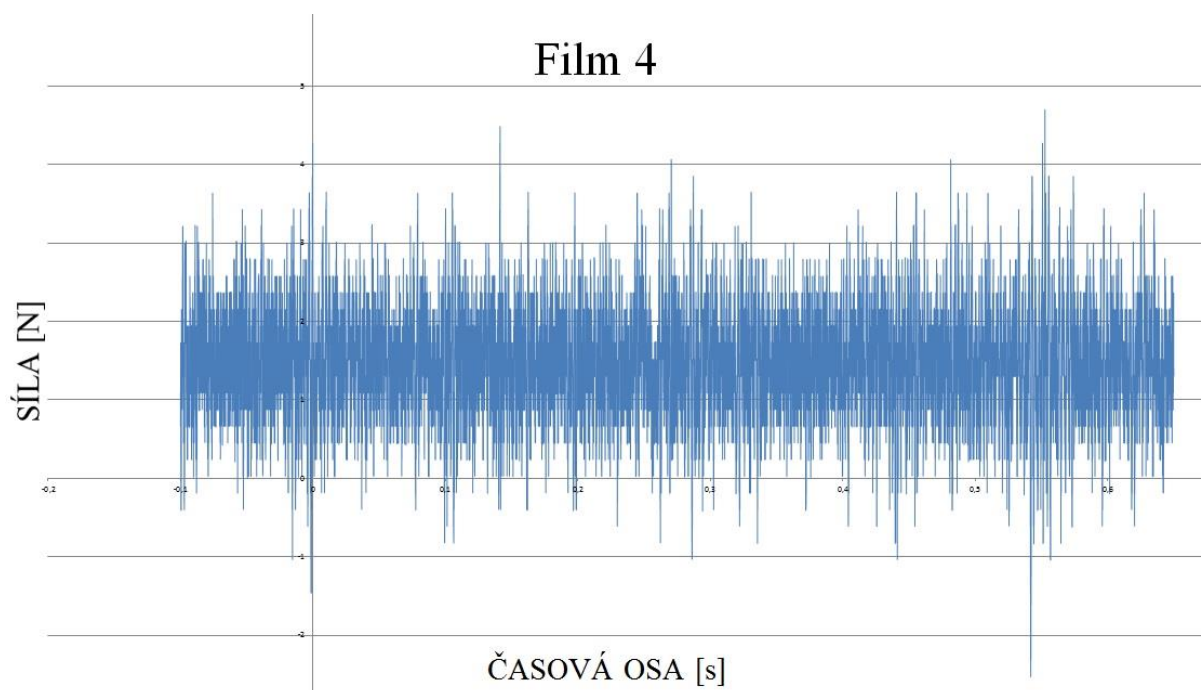
Příloha 8 Graf průběhu síly za čas na filmu 1 snímkování 100 kHz, kavitační číslo 3,592692



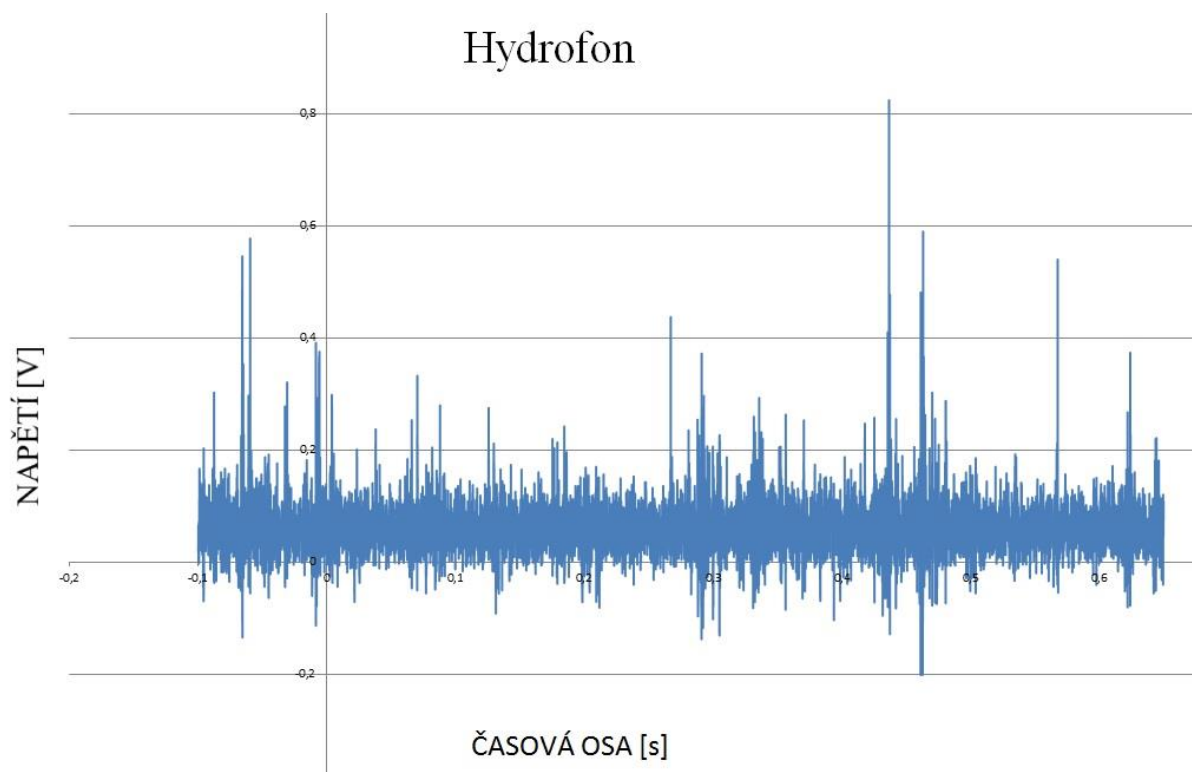
Příloha 9 Graf průběhu síly za čas na filmu 2 snímkování 100 kHz, kavitační číslo 3,592692



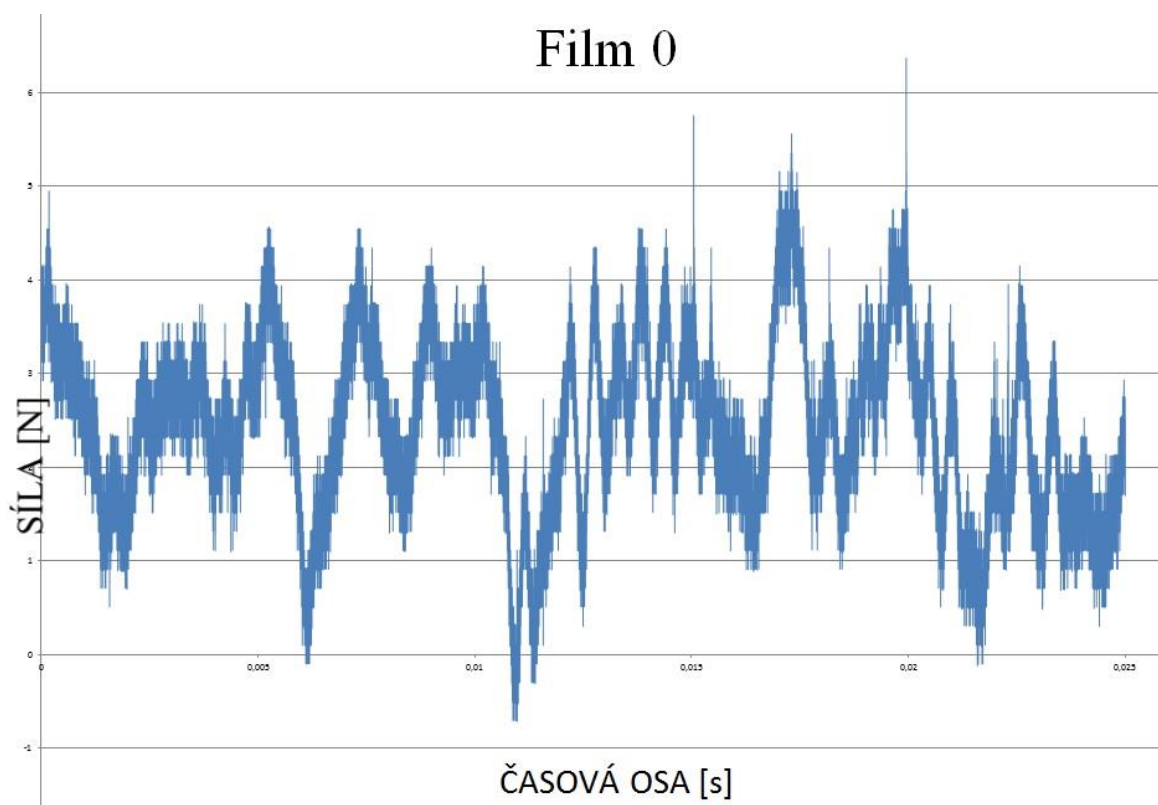
Příloha 10 Graf průběhu síly za čas na filmu 3 snímkování 100 kHz, kavitační číslo 3,592692



Příloha 11 Graf průběhu síly za čas na filmu 4 snímkování 100 kHz, kavitační číslo 3,592692

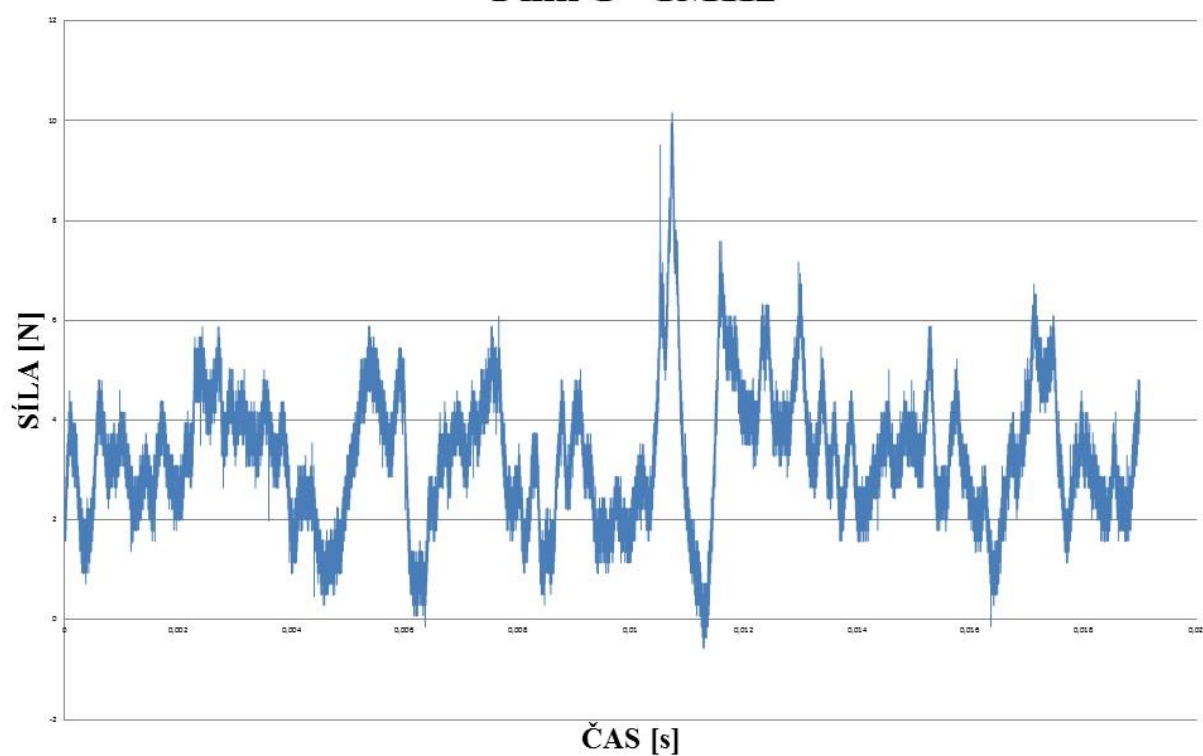


Příloha 12 Graf průběhu napětí za čas na hydrofonu snímkování 100 kHz, kavitační číslo 3,592692



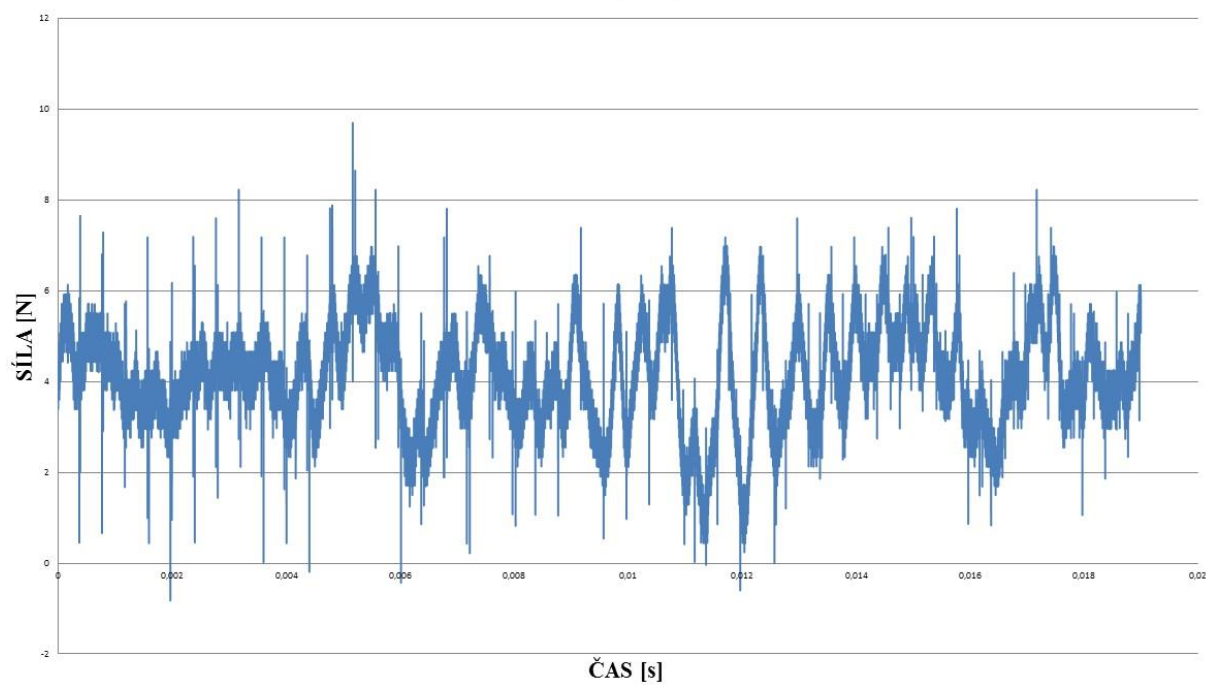
Příloha 13 Graf průběhu síly za čas na filmu 0 snímkování 1 Mhz, kavitační číslo 3,592692

Film 1 - 1MHz



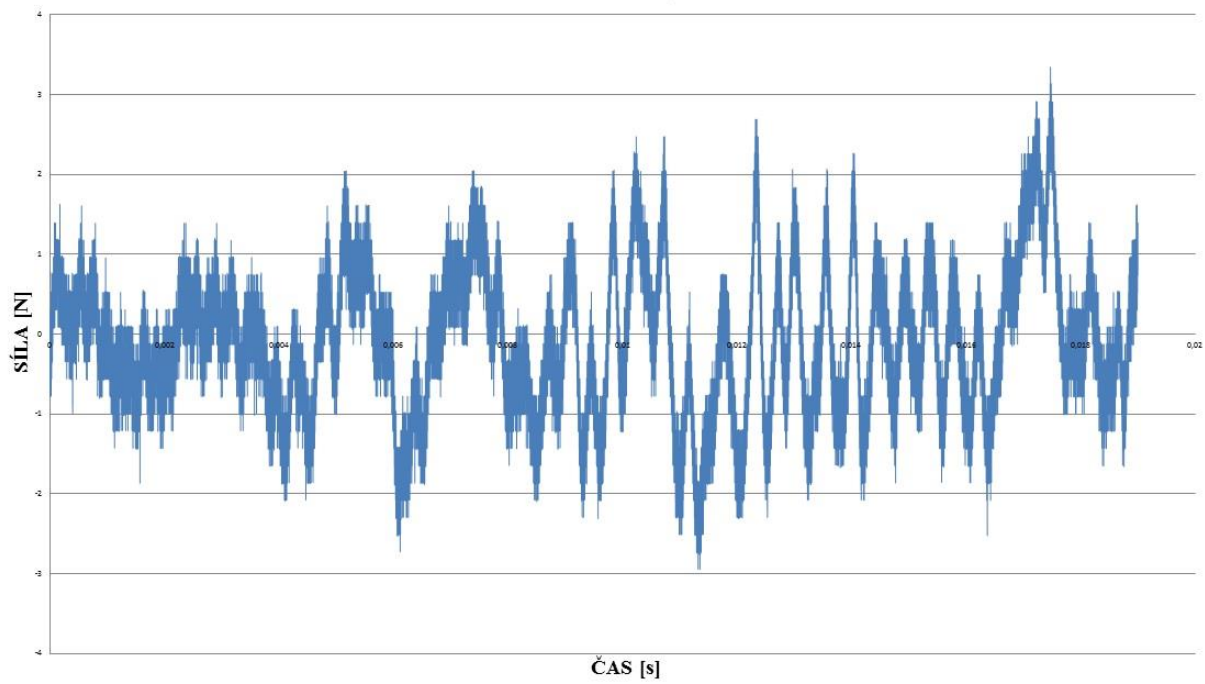
Příloha 14 Graf průběhu síly za čas na filmu 1 snímkování 1 Mhz, kavitační číslo 3,592692

Film 2



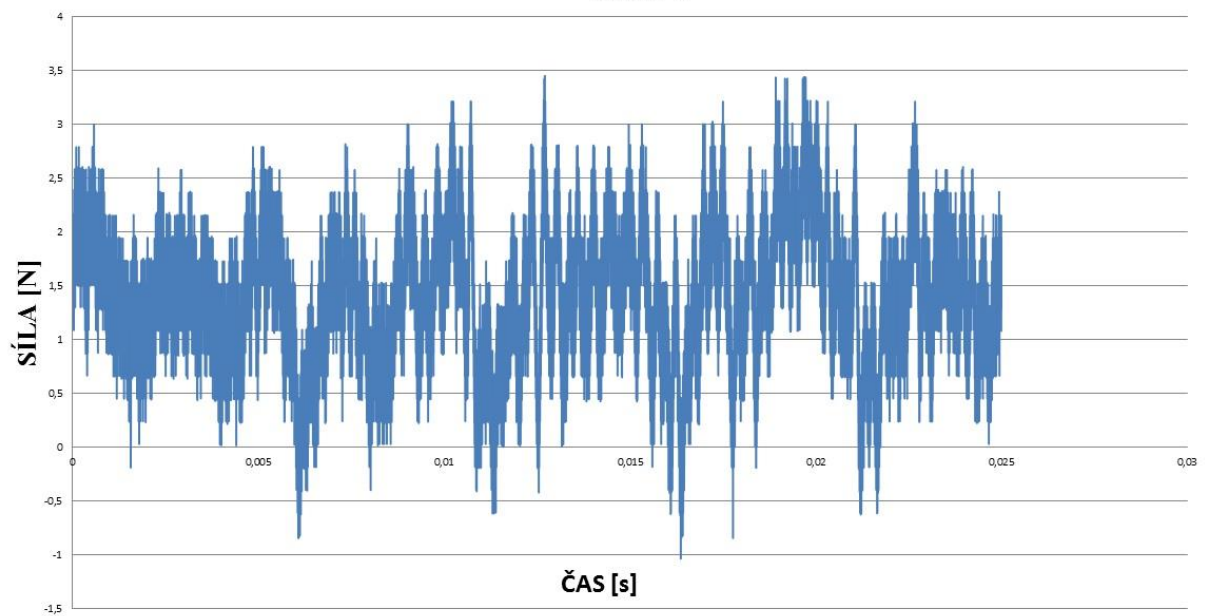
Příloha 15 Graf průběhu síly za čas na filmu 2 snímkování 1 Mhz, kavitační číslo 3,592692

Film 3

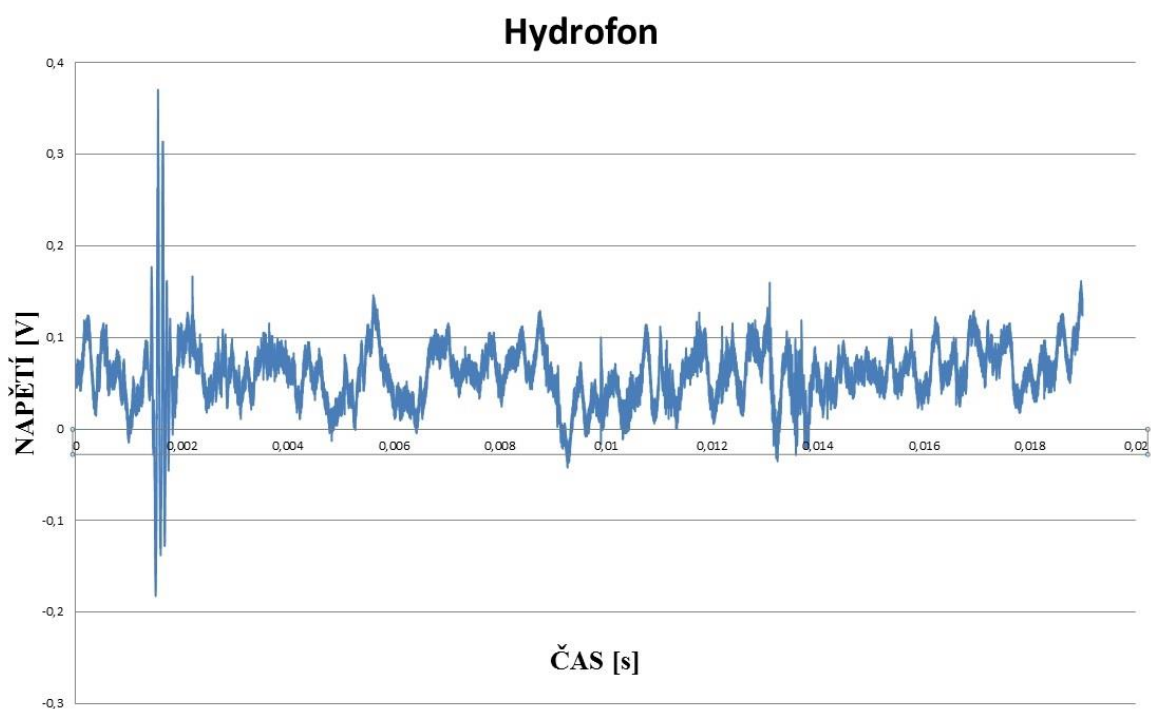


Příloha 16 Graf průběhu síly za čas na filmu 3 snímkování 1 Mhz, kavitační číslo 3,592692

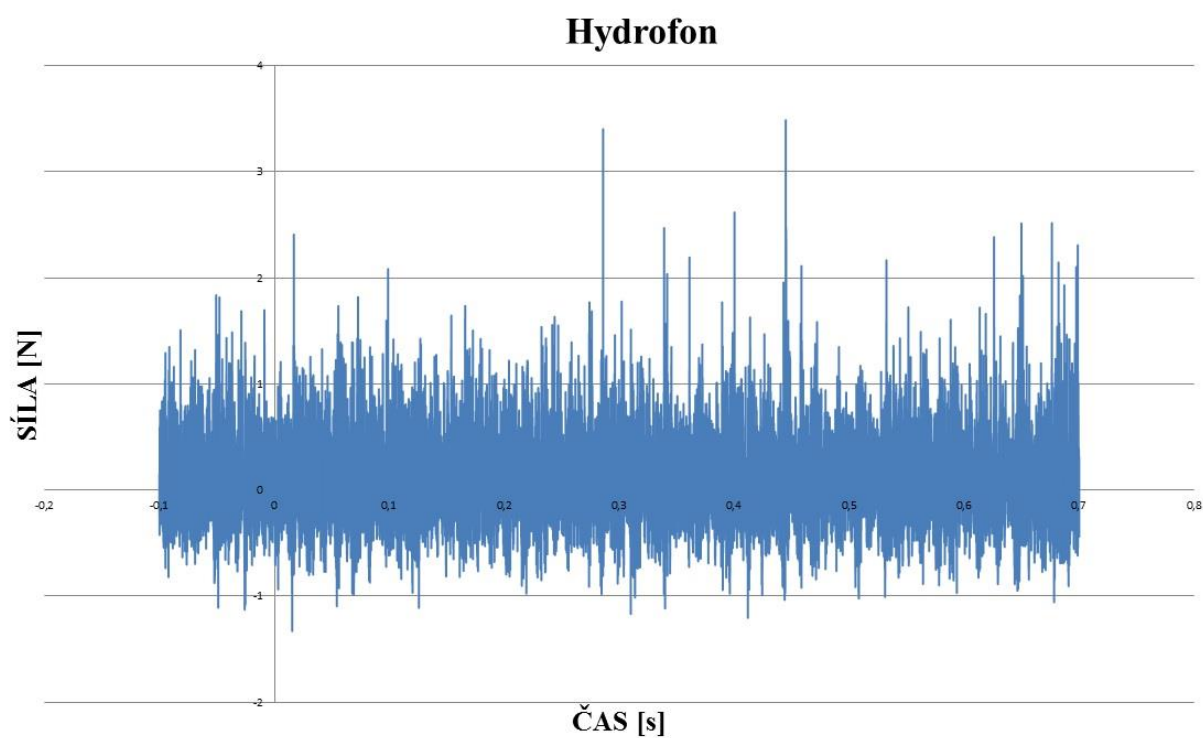
Film 4



Příloha 17 Graf průběhu síly za čas na filmu 4 snímkování 1 MHz, kavitační číslo 3,592692

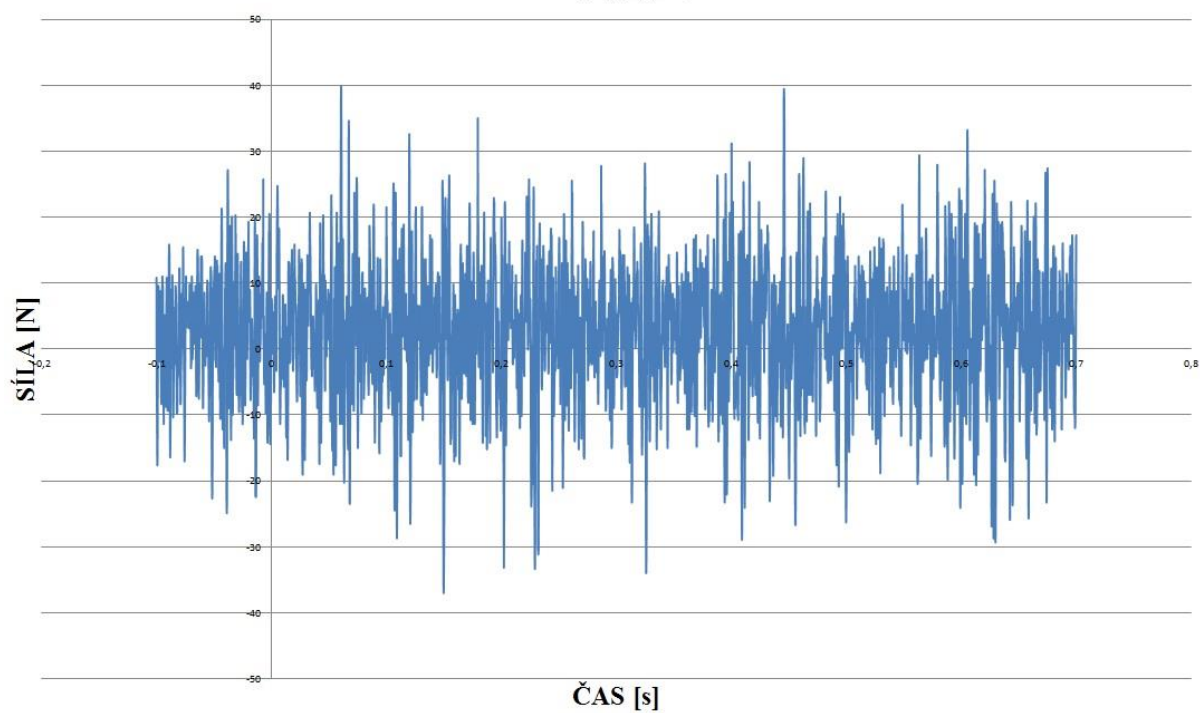


Příloha 18 Graf průběhu napětí za čas na hydrofonu snímkování 1 MHz, kavitační číslo 3,592692



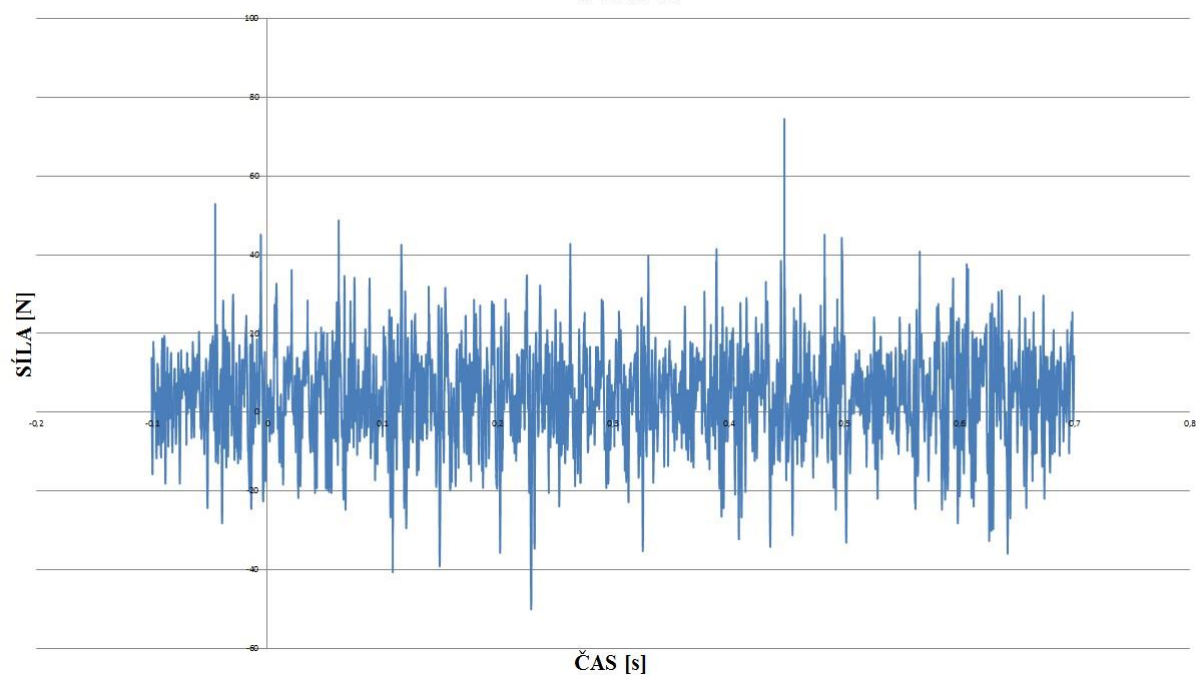
Příloha 19 Graf průběhu napětí za čas na hydrofonu snímkování 100 kHz, kavitační číslo 2.872218

Film 0



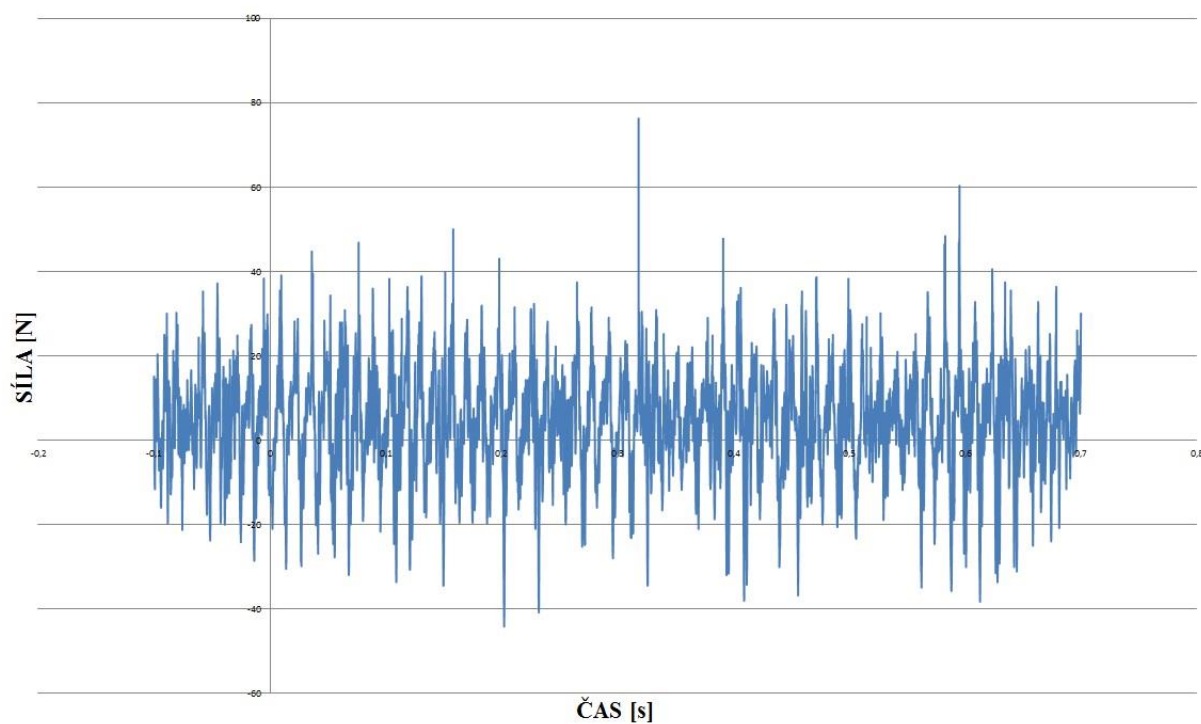
Příloha 20 Graf průběhu síly za čas na filmu 0 snímkování 100 kHz, kavitační číslo 2,872218

Film 1



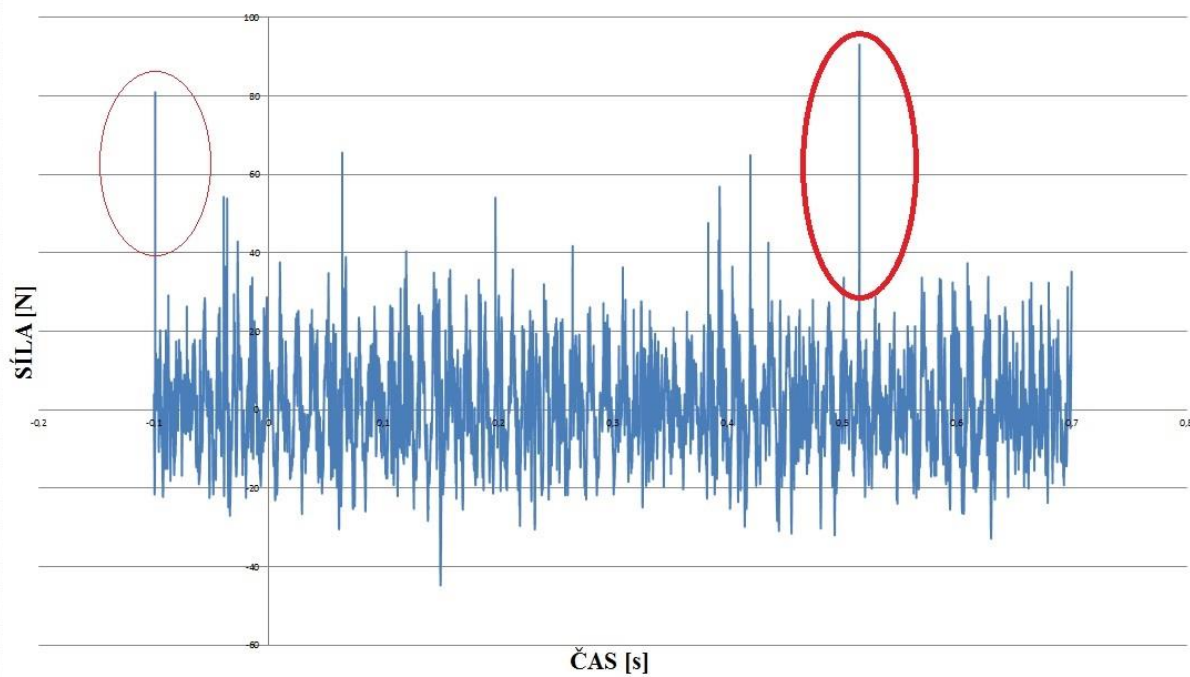
Příloha 21 Graf průběhu síly za čas na filmu 1 snímkování 100 kHz, kavitační číslo 2,872218

Film 2



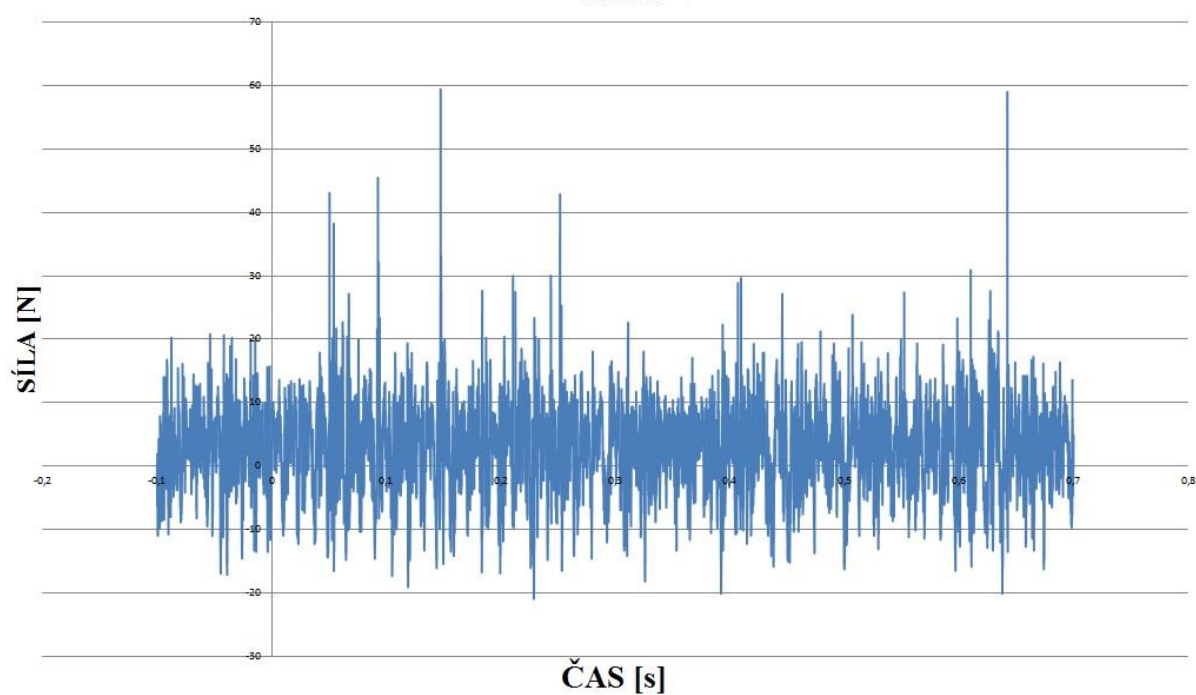
Příloha 22 Graf průběhu síly za čas na filmu 2 snímkování 100 kHz, kavitační číslo 2,872218

Film 3



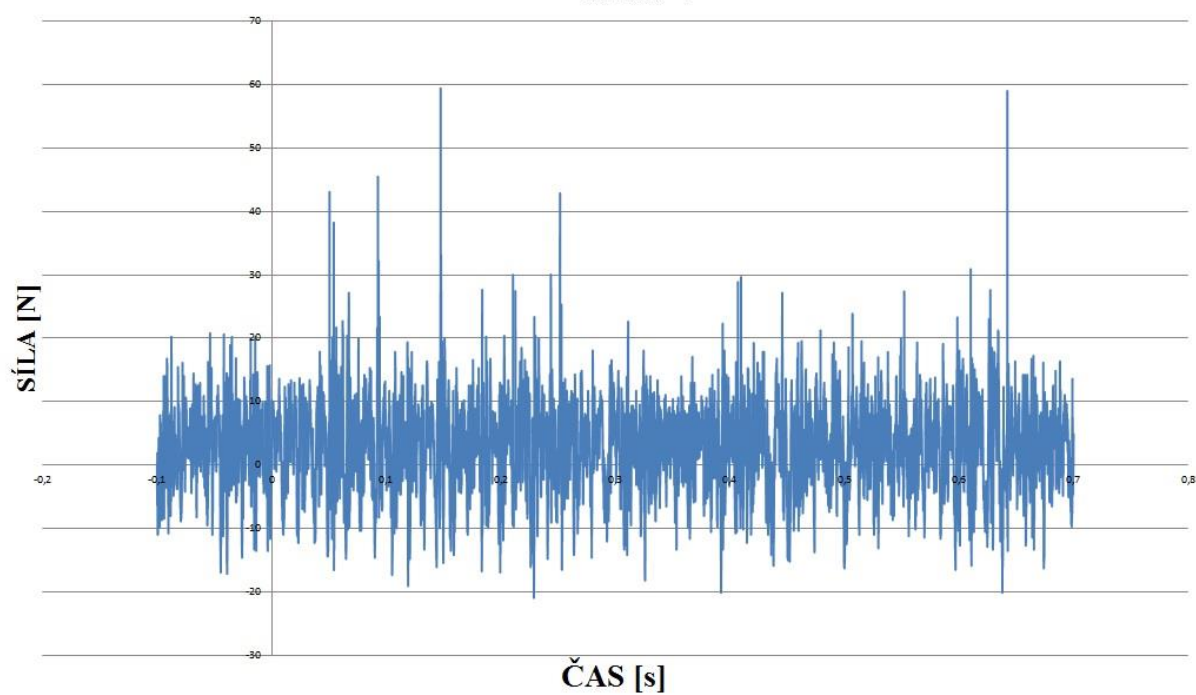
Příloha 23 Graf průběhu síly za čas na filmu 3 snímkování 100 kHz, kavitační číslo 2,872218

Film 4



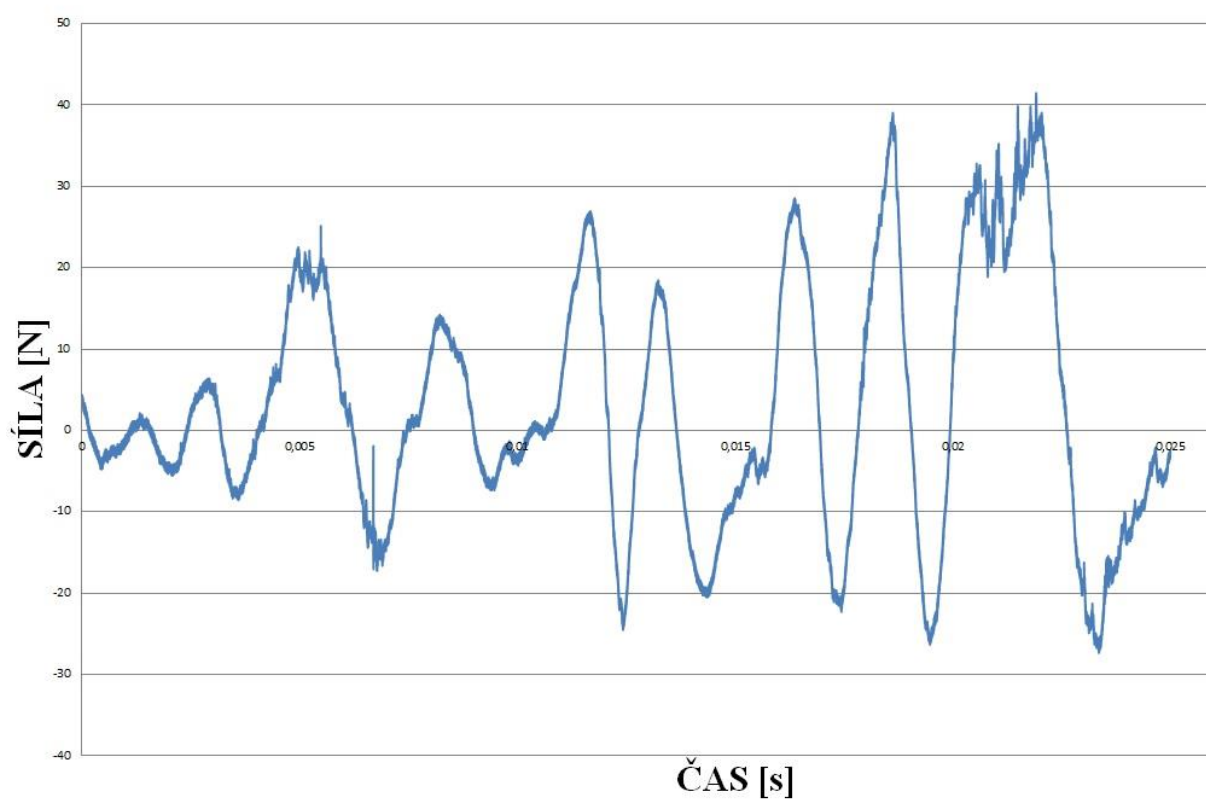
Příloha 24 Graf průběhu síly za čas na filmu 3 snímkování 100 kHz, kavitační číslo 2,872218

Film 4



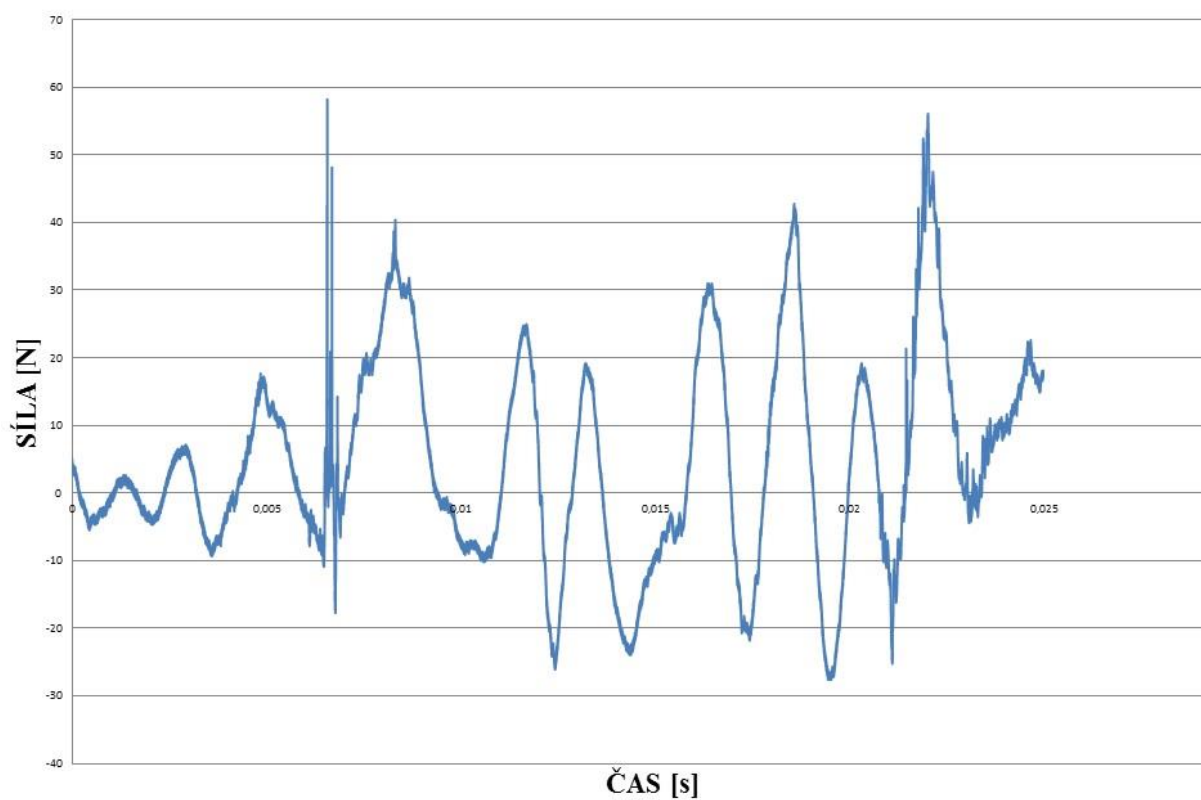
Příloha 25 Graf průběhu síly za čas na filmu 4 snímkování 100 kHz, kavitační číslo 2,872218

Film 0



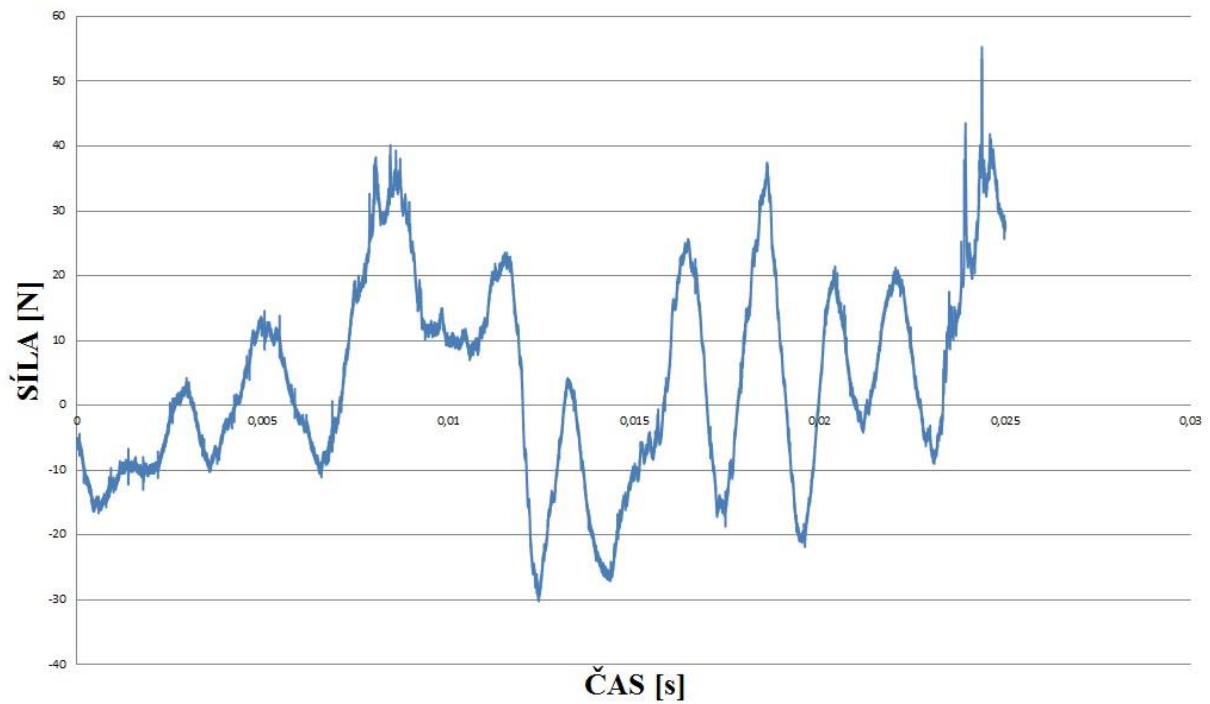
Příloha 26 Graf průběhu síly za čas na filmu 0 snímkování 1 MHz, kavitační číslo 2,872218

Film 1



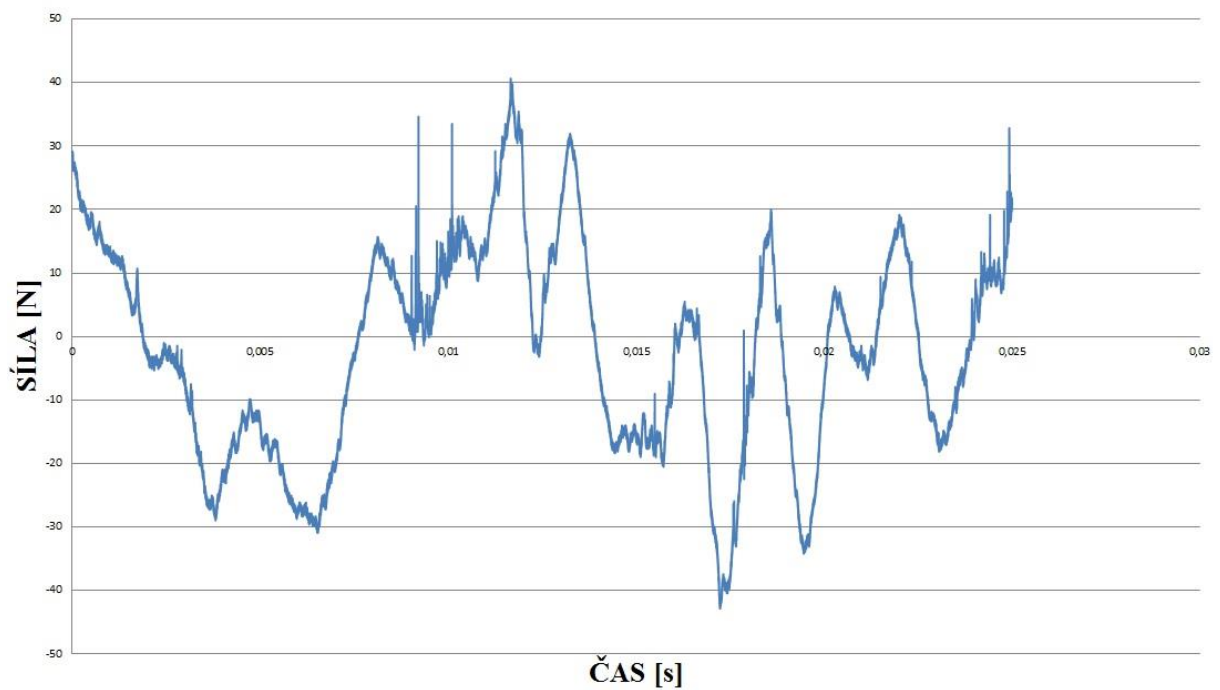
Příloha 27 Graf průběhu síly za čas na filmu 1 snímkování 1 MHz, kavitační číslo 2,872218

Film 2



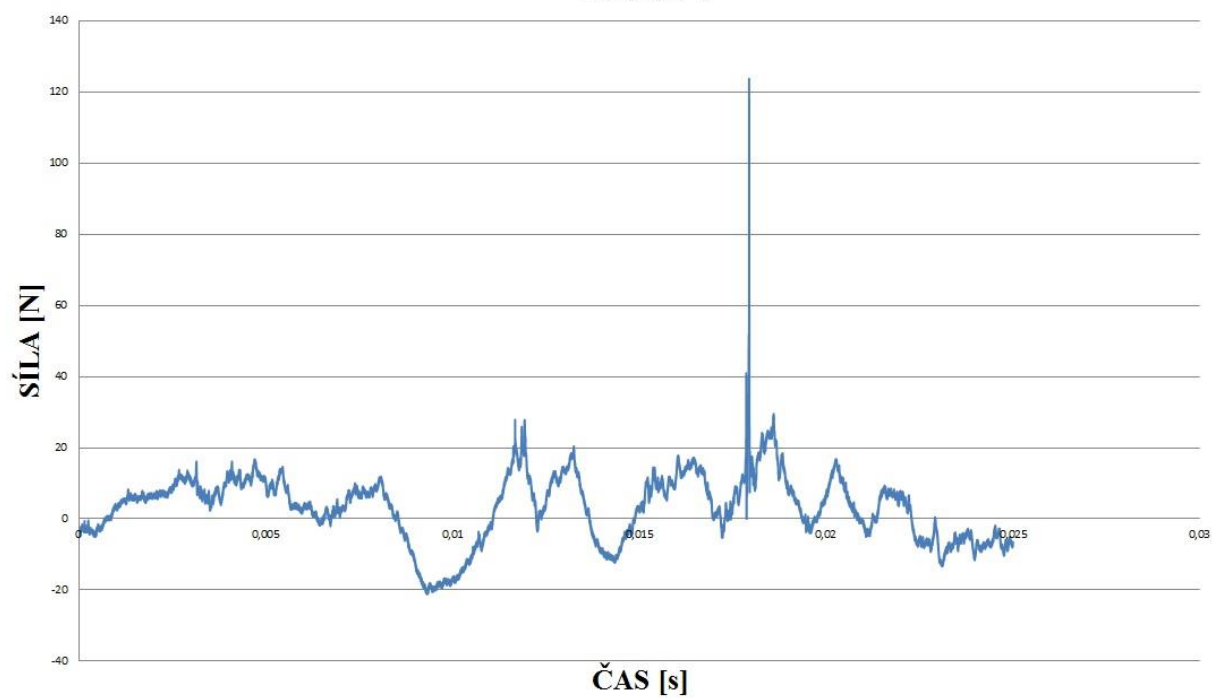
Příloha 28 Graf průběhu síly za čas na filmu 2 snímkování 1 MHz, kavitační číslo 2,8722182222

Film 3



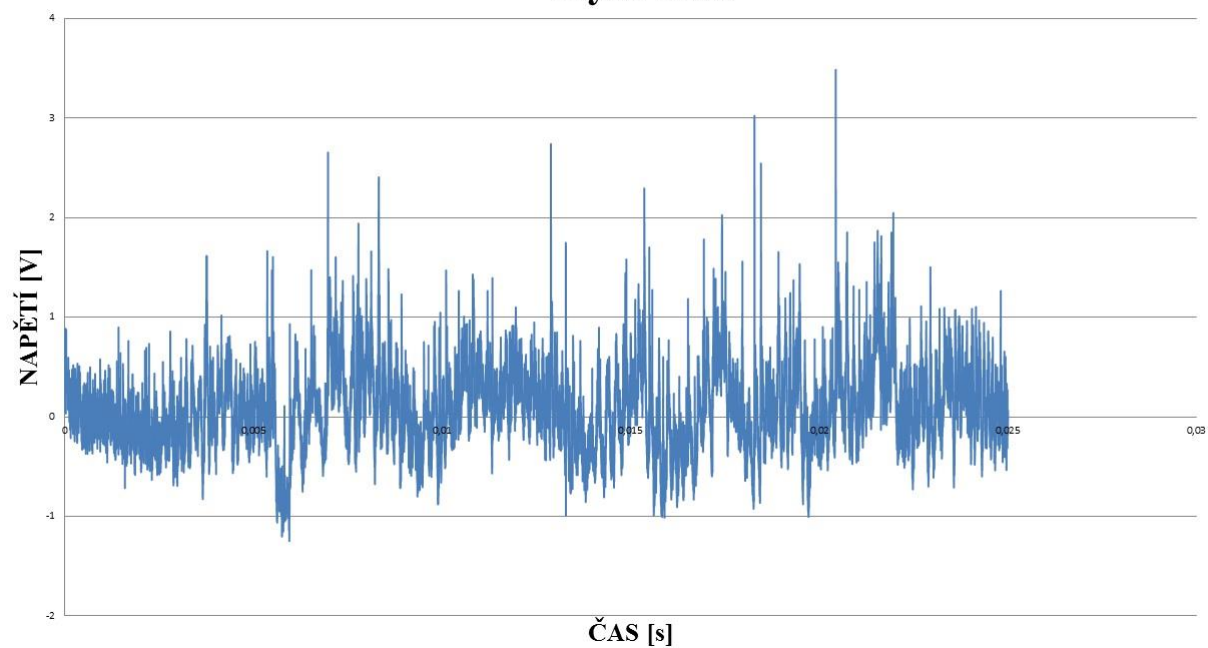
Příloha 29 Graf průběhu síly za čas na filmu 3 snímkování 1 MHz, kavitační číslo 2,872218

Film 4



Příloha 30 Graf průběhu síly za čas na filmu 4 snímkování 1 MHz, kavitační číslo 2,872218

Hydrofon



Příloha 31 Graf průběhu napětí za čas na hydrofonu snímkování 1MHz, kavitační číslo 2,872218

