

Kalibrace fotolitograficky vyrobeného PVDF senzoru

Bakalářská práce

Studijní program:

B2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

Strojní inženýrství

Autor práce:

Martin Dudl

Vedoucí práce:

Ing. Jan Hujer, Ph.D.

Katedra energetických zařízení





Zadání bakalářské práce

Kalibrace fotolitograficky vyrobeného PVDF senzoru

Jméno a příjmení: **Martin Dudl**
Osobní číslo: S17000024
Studijní program: B2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojní inženýrství
Zadávací katedra: Katedra energetických zařízení
Akademický rok: 2020/2021

Zásady pro vypracování:

Téma je věnováno kalibraci piezoelektrického fotolitograficky vyrobeného PVDF senzoru, navrženého pro měření impaktních sil od kolabujících kavitačních bublin a jejich struktur.

V rámci práce se předpokládá:

1. Rešerše literatury na téma PVDF senzorů pro impaktní měření a metod kalibrace impaktních senzorů.
2. Výroba PVDF senzoru fotolitografickou technikou.
3. Sestavení kalibrační trati a kalibrace PVDF senzoru.
4. Příprava programu pro automatické zpracování kalibrace.
5. Vyhodnocení kalibrace a získání kalibrační konstanty včetně diskuze.

Rozsah grafických prací: –
Rozsah pracovní zprávy: 40
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická
Jazyk práce: Čeština



Seznam odborné literatury:

- Kim, K. H., Chahine, G., Franc, J.-P. & Karimi, A. (2014) *Advanced experimental and numerical techniques for cavitation erosion prediction*. Dordrecht, Springer.
- Wang, Y. C. & Chen, Y. W. (2007) Application of piezoelectric PVDF film to the measurement of impulsive forces generated by cavitation bubble collapse near a solid boundary. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 32, 403-414.
- Gaofeng, Z., Yanming, L., Zhengfeng, L., Lujun, C., Shirui G. & Huichao, S. (2018) A Flexible Thin Film Single-Point Force Sensor from PVDF Film. *Journal of Modern Mechanical Engineering and Technology*. 47-55.
- Cong, J., Jing, J., Chen, C. & Dai, Z. (2019) Development of a PVDF Sensor Array for Measurement of the Dynamic Pressure Field of the Blade Tip in an Axial Flow Compressor. *Sensors*. 19 (6), 1404.
- Piezo Film Sensors Technical Manual* (1999), Norrsitown, Measurement Specialties.

Vedoucí práce: Ing. Jan Hujer, Ph.D.
Katedra energetických zařízení

Datum zadání práce: 1. listopadu 2020
Předpokládaný termín odevzdání: 30. dubna 2022

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

L.S.

doc. Ing. Petra Dančová, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 1. listopadu 2020

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

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

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

16. dubna 2021

Martin Dudl

Poděkování

Tímto poděkováním bych chtěl vyjádřit velké díky panu Ing. Janu Hujerovi, Ph.D., za přátelský přístup, ochotu objasnit problematiku a také za způsob jakým dokázal téma kavitačního jevu přednést. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Leoši Petržílkovi za pomoc při fotolitografické výrobě PVDF senzoru.

Kalibrace fotolitograficky vyrobeného PVDF senzoru

Anotace

Bakalářská práce je zaměřena na vyhodnocení citlivosti fotolitograficky vyrobeného PVDF senzoru. PVDF senzor byl vyroben z metalizované PVDF fólie fotolitografickou metodou, která umožňuje vytvořit senzor o námi požadovaných rozměrech. K PVDF senzoru byly následně přinýtovány elektrické vodiče, byl přelepen ochranou kaptonovou páskou a tento celek byl přilepen na kovovou kalibrační destičku. Kalibrace se prováděla metodou pádu kuličky na sestavené kalibrační trati. Záznam kalibračního pádu byl pořízen kamerou mobilního telefonu ve speciálním režimu. Kalibrační signál byl změřen osciloskopickou měřicí kartou a zobrazen pomocí počítačového programu LabView SignalExpress 2012, pomocí něhož byl signál převeden do textové podoby. Pro zpracování kalibračních signálů byl vytvořen poloautomatický program v programovacím prostředí MATLAB. Naměřená textová data v něm byla následně vyhodnocena. Výstupem vyhodnocení byla kalibrační závislost senzoru, kterou lze přímo použít pro potřeby impaktního měření kolapsů kavitačních bublin.

Klíčová slova

fotolitografie, PVDF senzor, kalibrace, citlivost filmu, vyhodnocovací software, kavitace

Calibration of a photolithography made PVDF sensor

Abstract

The bachelor thesis is focused on the evaluation of the sensitivity of a photolithographically fabricated PVDF sensor. The PVDF sensor was made from metallized PVDF film using a photolithographic method that allows us to create a sensor with the dimensions we require. Electrical wires were subsequently riveted to the PVDF sensor. Then the PVDF sensor was taped over with protective kapton tape and this assembly was glued to a metal calibration plate. The calibration was performed using the ball drop method on a calibration track. The recording of the calibration drop was made by a mobile phone camera in a special mode. The calibration signal was measured with an oscilloscope measurement card and displayed by using the computer program LabView SignalExpress 2012, which was used to convert the signal into text file. A semi-automatic MATLAB program was created to process the calibration signals. The measured text data were subsequently evaluated in it. The output of the evaluation was the sensor calibration dependence, which can be directly used for the needs of impact measurement of cavitation bubble collapse.

Keywords

photolithography, PVDF sensor, calibration, film sensitivity, evaluation software, cavitation

Obsah

Poděkování	5
Anotace	6
Seznam symbolů a jednotek	10
Seznam zkratk	10
Seznam obrázků	11
Seznam tabulek	12
Seznam zdrojových kódů	12
1 Úvod	13
2 Kavitace	14
2.1 Kavitační jev	14
2.2 Hydrodynamická kavitace v zařízeních	15
3 PVDF senzory	18
3.1 Definice a historie PVDF filmu	18
3.2 Vlastnosti PVDF filmu	19
3.3 Struktura PVDF senzoru	21
3.4 Popis PVDF senzoru	22
4 Fotolitografie	24
4.1 Proces fotolitografie	24
4.1.1 Fotorezist	25
4.1.2 Fotomaska	25
4.2 Výroba PVDF senzoru	26
4.2.1 Laminování	26
4.2.2 Expozice	28
4.2.3 Vyvolávání	30
4.2.4 Leptání	30
4.2.5 Louhování	31
4.2.6 Použitá zařízení	31
5 Příprava senzoru na kalibraci	34
5.1 Připojení elektrických vodičů k PVDF senzoru	34
5.2 Připevnění PVDF senzoru na kalibrační destičku	36
5.3 Propojení s koaxiálním kabelem	38
6 Kalibrace PVDF senzoru	39
6.1 Metoda zlomení tuhy	39
6.2 Kyvadlová metoda	40
6.3 Metoda pádu kuličky	41

6.4	Kalibrační kulička a kalibrační trať	42
6.5	Kalibrační sestava.....	44
6.6	Výsledky kalibrace	45
6.7	Použitá zařízení	48
6.8	Vyhodnocení kalibrace	50
7	Program pro zpracování dat kalibrace.....	52
7.1	Popis programu.....	53
8	Závěr	58
	Seznam použité literatury.....	59

Seznam symbolů a jednotek

E	celková mechanická energie tělesa [J]
E_k	kinetická energie tělesa [J]
E_p	potenciální energie tělesa [J]
m	hmotnost kapaliny [kg]
v	rychlost proudění kapaliny [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
p	tlak působící v kapalině [Pa]
ρ	hustota kapaliny [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
g	tíhového zrychlení na povrchu Země [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]
h	hloubka určitého bodu v kapalině [m]
λ	vlnová délka UV záření [nm]
f	frekvence [Hz]
P_P	dynamický tlak PVDF filmu [PSI]
F_{konst}	konstatní vyvinutá síla kalibrační kuličkou [N]
m_K	hmotnost kalibračního tělesa [g]
v_{K1}	rychlost kalibračního tělesa při dopadu [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
v_{K2}	rychlost kalibračního tělesa při odrazu [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
t_{K1}	čas, při kterém kalibrační těleso dopadne [s]
t_{K2}	čas, při kterém se kalibrační těleso odrazí [s]
$\Delta\tau$	celková doba působení síly na senzor [s]
d_K	průměr kalibrační kuličky [mm]
h_{K1}	počáteční výška kuličky při kalibraci [mm]
h_{K2}	konečná výška kuličky po odrazu [mm]
l	délka tenkého lana [m]
U	elektrické napětí [V]
U_{max}	maximální elektrické napětí senzoru [V]
U_{konst}	konstantní elektrické napětí senzoru [V]
F_{max}	maximální vyvinutá síla kalibrační kuličkou [N]
u_k	poměr mezi konstantním a maximálním elektrickým napětím [-]
K	kalibrační konstanta [$\text{V}\cdot\text{N}^{-1}$]

Seznam zkratk

BNC	vysokofrekvenční konektor (z anglického Bayonet Neill Concelman connector)
FPS	snímková frekvence (z anglického frames per second)
PCI	počítačová sběrnice pro připojení periférií k základní desce

PVC	polyvinylchlorid
PVDF	polyvinylidenfluorid
SMB	koaxiální konektor (z anglického SubMiniature version B)
TUL	Technická univerzita v Liberci
UV	ultrafialové záření
ZZME	zákon zachování mechanické energie

Seznam obrázků

- Obrázek 1: Fázový diagram – diagram skupenství
- Obrázek 2: Vývoj imploze kavitační bubliny
- Obrázek 3: Vliv působení kavitační eroze na oběžné kolo odstředivého čerpadla [5]
- Obrázek 4: Účel PVDF senzoru při impaktním měření
- Obrázek 5: Běžné infračervené absorpční spektrum PVDF filmu [8]
- Obrázek 6: Základní typy metalizace: a) CuNi b) Ag
- Obrázek 7: Schématické zobrazení výroby a kalibrace PVDF senzoru
- Obrázek 8: Katalogová nabídka PVDF filmů od firmy TE Connectivity [9]
- Obrázek 9: Expozice fotorezistu: a) negativní forezist b) pozitivní fotorezist
- Obrázek 10: PVDF film upevněný na desce před procesem laminování
- Obrázek 11: Struktura PVDF senzoru po laminování
- Obrázek 12: Laminovací proces při výrobě PVDF senzoru
- Obrázek 13: PVDF film s fotomaskou
- Obrázek 14: Proces expozice fotorezistu
- Obrázek 15: PVDF senzor po expozici
- Obrázek 16: Vkládání PVDF senzoru do vyvolávací lázně
- Obrázek 17: PVDF senzor po vyvolávání
- Obrázek 18: Uložení PVDF senzoru do leptací lázně
- Obrázek 19: PVDF senzor po leptání
- Obrázek 20: REMA Laminator RLM 419 Vakuová osvitová jednotka HELLAS
- Obrázek 21: Vakuová osvitová jednotka HELLAS
- Obrázek 22: Sada nástrojů pro tvorbu elektrod
- Obrázek 23: Připojení vodiče k PVDF senzoru
- Obrázek 24: Proces nýtování
- Obrázek 25: Sada nástrojů pro připevnění PVDF senzoru s kalibrační destičkou
- Obrázek 26: Kovová kalibrační destička
- Obrázek 27: Kaptonová izolace
- Obrázek 28: Přilepený PVDF senzor

Obrázek 29: Propojení PVDF senzoru s koaxiálním kabelem
Obrázek 30: Metoda zlomení tuhy [10]
Obrázek 31: Kyvadlová metoda [10]
Obrázek 32: Metoda pádu kuličky [10]
Obrázek 33: Kalibrační trať
Obrázek 34: Kalibrační sestava
Obrázek 35: Naměřený signál kalibrace (zpracovaný v programu MATLAB)
Obrázek 36: Průběh elektrického napětí na kalibrovaném senzoru
Obrázek 37: Citlivost PVDF senzoru
Obrázek 38: PXI box
Obrázek 39: Osciloskopická karta [15]
Obrázek 40: Koncovka SMB
Obrázek 41: Počítačová karta
Obrázek 42: Laboratorní váha a digitální posuvné měřítko
Obrázek 43: Kalibrací zdeformovaný PVDF senzor

Seznam tabulek

Tabulka 1: Základní vlastnosti piezo filmů
Tabulka 2: Srovnání základních parametrů piezo filmů udávaných výrobcem
Tabulka 3: Parametry kalibračních kuliček
Tabulka 4: Nastavené parametry v programu NI Signal Express
Tabulka 5: Základní definice použitých příkazů

Seznam zdrojových kódů

Zdrojový kód 1: Zadávání vstupních hodnot
Zdrojový kód 2: Specifikace parametrů jednoho kalibračního hodu
Zdrojový kód 3: Načtení textových dat a vykreslení signálu do grafu
Zdrojový kód 4: Hledání maximálního elektrického napětí a integračních mezí
Zdrojový kód 5: Výpočet kalibrační konstanty
Zdrojový kód 6: Tvorba tabulky a grafu kalibrační závislosti

1 Úvod

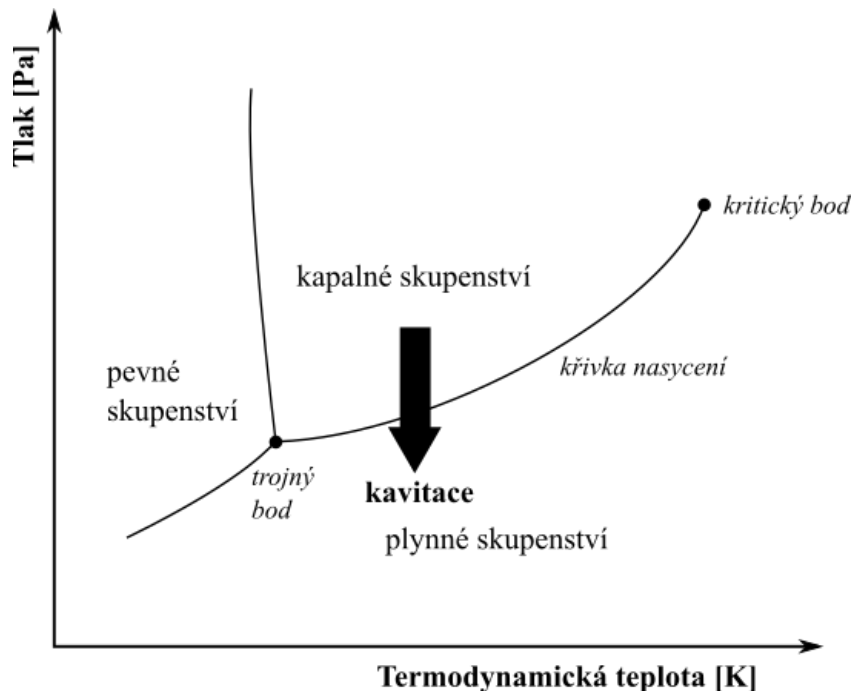
Jako téma své bakalářské práce jsem si zvolil oblast zabývající se měřením impaktních sil vytvořených kolapsem kavitačních bublin. Kavitace je díky svým nepříznivým účinkům známa již po staletí. Mnoho zdrojů poukazuje na to, že jako první se o kavitaci zmínil švýcarský matematik a fyzik Leonhard Euler už v druhé polovině 18. století, při zkoumání vodních turbín. Později vědci zjistili, že zejména v průmyslovém odvětví využívajícím hydraulické stroje, jako jsou čerpadla a turbíny, dochází k narušení povrchu tělesa vlivem kavitační eroze. Tyto negativní účinky vedou ke snížení efektivity a výkonu, což má za následek výrazné ovlivnění provozu zařízení.

Cílem této práce je zdokumentovat výrobu a kalibraci senzorů zhotovených z polymeru polyvinylidenfluoridu (dále PVDF). Tyto senzory a jejich matice budou sloužit pro přesnější lokalizaci míst kolize kavitačních bublin na povrchu těles hydraulických zařízení. Práce je rozdělena do několika částí, kde v první řadě bude čtenář seznámen s problematikou kavitační eroze. Jak s průběhem celého děje, tak s jejím negativním dopadem pro průmyslová zařízení. Dále následuje rešerše na téma PVDF senzory – jejich princip, jaké se vyskytují na trhu a jejich využití v praxi. Poté je zde popsána fotolitografická výroba PVDF senzoru, jenž byla prováděna za účelem zhotovení senzoru o požadovaných rozměrech. Výsledkem tohoto kroku je pouze samotný film ve formě polotovaru, který je následně potřeba propojit s elektrickými vodiči, aby mohl přenášet naměřený signál do měřicí karty. Z měřicí karty se signál odesílá do počítače, který výstupní naměřený signál zpracovává pomocí softwaru. Nakonec je senzor podroben kalibraci na kalibrační trati v experimentální laboratoři. Kalibrace se provádí za účelem zjištění citlivosti PVDF filmu. Tato kapitola také obsahuje rešerši o kalibračních metodách, prováděných za běžných podmínek v laboratořích. Hlavním výstupem této práce je program vytvořený v softwaru MATLAB, ve kterém se zpracovávají signály z kalibračního měření. Zpracováním signálů jsou získány kalibrační konstanty přímo použitelné při měření impaktních sil.

2 Kavítace

2.1 Kavitační jev

Kavítace je složitý termodynamický jev, který vzniká v kapalině. Proces spočívá ve vzniku dutiny (kavitační bubliny) uvnitř kapaliny, jejím růstu a následné implozi. Ke vzniku těchto dutin dochází při dosažení křivky nasycení (křivka varu a kondenzace), která odděluje oblasti kapalného a plynného skupenství ve fázovém diagramu. Na obrázku 1 je znázorněn fázový diagram čisté látky se zobrazením fázové změny – kavítace (červená šipka). Vyjdeme-li z diagramu, vznik bublin nastává při poklesu tlaku kapaliny na tlak nasycených par. Jakmile tento stav nastane, kapalina se začne odpařovat (proběhne změna skupenství). S rostoucím příbytkem páry v kapalině začnou vznikat miniaturní bublinky. Tyto bublinky jsou tvořeny předně párou a dále vyloučeným plynem, který je rozpuštěný v okolní kapalině. Intenzita vylučování je vyšší s rostoucí teplotou a snižujícím se tlakem¹. V momentě, kdy se tlak opět zvýší, dojde ke kondenzaci páry uvnitř bubliny a vytvoří se tak kavitační dutina. Tlak stále roste až do chvíle, kdy překročí mez stability dutin. Následuje poslední fáze, kterou nazýváme zánik bublin (neboli imploze). Dutina kavitační bubliny se začne bortit vlivem velmi rychlého působení kapaliny na její obal. Důsledkem tohoto děje je vznik velmi silných rázových vln, jenž jsou příčinou kavitační eroze.²

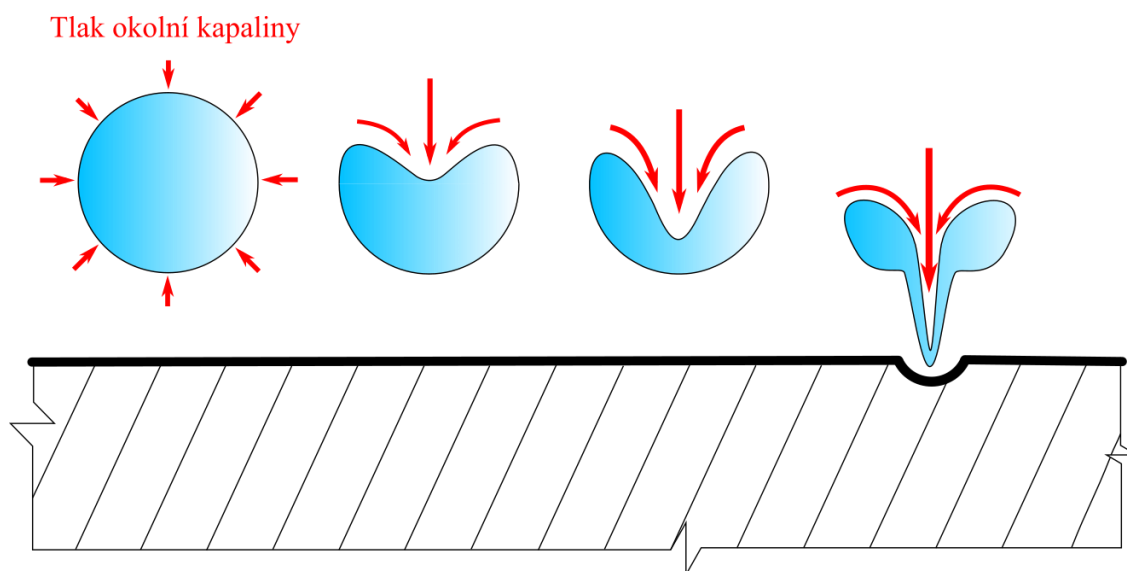


Obrázek 1: Fázový diagram – diagram skupenství

¹ [1] MELICHAR, Jan. *Úvod do čerpací techniky*. Praha: České vysoké učení technické, 2012. s. 20.

² [2] NOSKIEVIČ, Jaromír. *Kavítace*. Praha: Academia, 1969. s. 19.

Na tento jev lze v technické praxi narazit převážně přirozenou formou. Ačkoliv se může zdát, že tento děj je spíše nechtěný, můžeme jej i využít v případě, že bude vytvořen uměle. V dnešní době si tento postup již našel řadu uplatnění. Například významnou aplikací se stal v medicíně, kde se používá k odstraňování ledvinového kamene (metoda litotrypse rázovou vlnou)³. Dále se využívá pro odstranění špíny ze zákoutí šperků, které jsou těžko dostupné⁴. Jako jednu z dalších aplikací můžeme zmínit nekonvenční metodu kavitačního obrábění (obrábění ultrazvukem). Zde se přímo pomocí uměle vytvořené kavitační eroze rozrušuje (obrábí) povrch obrobku. Navzdory využití kavitace, se budu nadále zabírat jejím negativním dopadem pro společnost. Při přirozeném vzniku kavitace lze uvažovat pouze stav, kdy kapalina proudí (například v potrubí). Tento děj nazýváme hydrodynamickou kavitačí. V případě, že kapalina setrvává v klidu, jedná se zpravidla o tzv. akustickou kavitačí, kde děj vyvolávají ultrazvukové pulzy⁵.



Obrázek 2: Vývoj imploze kavitační bubliny

2.2 Hydrodynamická kavitace v zařízeních

Velkým odvětvím, kde kavitace způsobuje značné škody, je oblast hydraulických zařízení. Zde jsou tomuto jevu vystavována hlavně čerpadla (hydrogenerátory) a lopatkové turbíny. Při konstrukčním návrhu je proto důležité dbát na negativní účinky způsobené kavitační erozí v blízkosti navrhovaných objektů. Hydrodynamická kavitace totiž nastává při proudění kapaliny. Kapalina může buď zařízení obtékat, nebo se zařízení pohybuje samo v kapalině (pohyb lopatek turbíny nebo může těleso kmitat).

³ [3] Kavitace. *Wikiskripta.eu* [online]. Brno: MEFANET, 2021.

⁴ [4] Udržujte své šperky v dokonalé čistotě. *Sperky.cz* [online]. Chrudim: VIVANTIS, 2021.

⁵ [1] MELICHAR, Jan. *Úvod do čerpací techniky*. Praha: České vysoké učení technické, 2012. s. 22.

Prvotní příčinou vzniku kavitace je náhlá změna rychlosti, která podle rovnice zákona zachování mechanické energie (dále ZZME) musí vyvolat reakci⁶.

$$E = E_k + E_p = konst. \quad (1)$$

kde: E je celková mechanická energie tělesa [J]

E_k je kinetická energie tělesa [J]

E_p je potenciální energie tělesa [J]

Abychom mohli aplikovat ZZME na naši problematiku, musíme naši rovnici upravit pro vyjádření rychlostní složky energie. V tomto případě lze využít Bernoulliho vztahu pro ustálené proudění ideální kapaliny.

$$\frac{1}{2}mv^2 + pV + mgh = konst. \quad (2)$$

kde: m je hmotnost kapaliny [kg]

v je rychlost proudění kapaliny [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

p je tlak působící v kapalině [Pa]

ρ je hustota kapaliny [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]

g je tíhového zrychlení [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]

h je hloubka určitého bodu v kapalině [m]

Vztažením energie na jeden kilogram kapaliny, můžeme vyjádřit energetický tvar Bernoulliho rovnice, jenž se skládá z rychlostní, tlakové a výškové složky energie.

$$\frac{1}{2}v^2 + \frac{p}{\rho} + gh = konst. \quad (3)$$

Rychlostní složka, kterou nám představuje první člen v rovnici, zvýší svou hodnotu. Reakcí na tento děj poté bude snížení tlakové složky (druhý člen). Dochází tak k místnímu poklesu tlaku, který je příčinou kavitačního děje. Důsledkem bude rychlé rozrušování povrchu obtékaného tělesa, vlivem kolapsu kavitačních bublin v blízkosti povrchu⁷. Na obrázku 3 lze vidět, jaký dopad může mít kavitace na stěnu tělesa. V tomto případě se jedná o oběžné kolo odstředivého čerpadla.

⁶ [1] MELICHAR, Jan. *Úvod do čerpací techniky*. Praha: České vysoké učení technické, 2012. s. 16-20.

⁷ Tamtéž, s. 22.



Obrázek 3: Vliv působení kavitační eroze na oběžné kolo odstředivého čerpadla [5]

Hydraulická zařízení i v dnešní době stále trpí na důsledky kavitační eroze. Tento děj nevede pouze ke snížení účinnosti stroje, ale může podstatně ovlivnit i jeho životnost či přímo selhání. Při tomto ději může docházet k vibracím samotného stroje, které jsou doprovázené zvýšenou hlučností⁸. Nakonec i samotné médium, které zařízením protéká, může být do jisté míry ovlivněno (teplotní změnou). Konstruktivním řešením lze sice předcházet četnějšímu výskytu kavitace (např. zvýšením sací výšky čerpadla), avšak z ekonomické stránky se jedná o nevhodné řešení. Proto dodnes průmysl stále těží z diagnostiky výskytu kavitačních bublin experimentální formou. Snaží se v tom stále zdokonalovat, aby tím snížil vliv tohoto nepříznivého jevu na stěny hydraulických těles⁹.

⁸ [1] MELICHAR, Jan. *Úvod do čerpací techniky*. Praha: České vysoké učení technické, 2012. s. 22.

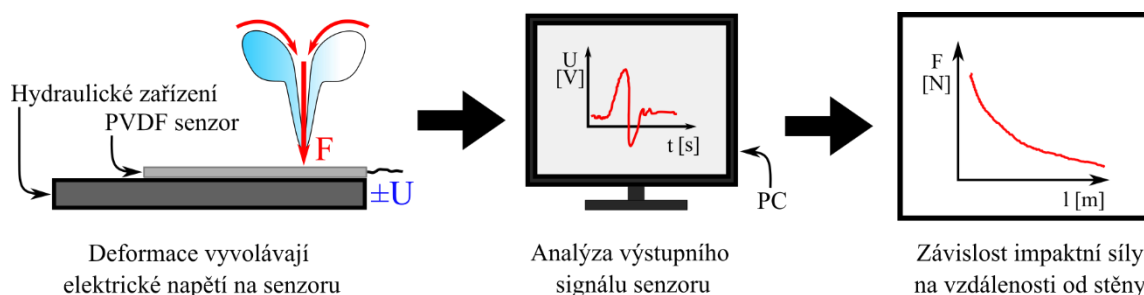
⁹ [6] JIŘIČEK, Václav. *Diagnostika kavitace ve vodních čerpadlech*. Liberec: TUL, 2017. Diplomová práce. s. 19.

3 PVDF senzory

Tato kapitola pojednává o PVDF senzorech pro impaktní měření, které fungují na principu tenzometru. V našem případě nám slouží ke změření impaktní síly, vyvolané kolapsem kavitační bubliny. Úvodem je čtenář seznámen s principem funkce PVDF filmu a jeho historií. Dále jsou zde shrnuty veškeré vlastnosti filmu, ze kterého se senzory zhotovují.

3.1 Definice a historie PVDF filmu

Hlavní funkce materiálů, sloužících ke snímání měřených hodnot, je převádění jedné formy energie na druhou. Na tomto principu poté fungují i materiály sloužící k měření impaktních sil. PVDF film tvoří základ dynamického senzoru, jehož princip spočívá na přímém piezoelektrickém jevu. Při tomto jevu dochází k deformaci piezoelektrického materiálu, který je tvořen krystaly (např. křemen, křišťál). Důsledkem deformace je posun iontů v krystalové mřížce, což zapříčiní vznik elektrického náboje na povrchu krystalů. Při kavitačním ději tuto deformaci vyvolává silná rázová vlna a další doprovodné efekty. V případě PVDF senzoru je film zhotoven z polymeru polyvinylidenfluoridu, který je tvořen krystalickou strukturou¹⁰.



Obrázek 4: Účel PVDF senzoru při impaktním měření

Piezoelektrický jev byl poprvé zaznamenán již v 80. letech 19. století, zásluhou bratří Curieových. Tehdy zjistili, že křemen dokáže změnit své rozměry, jakmile je vystaven elektrickému napětí, a naopak (mechanická deformaci generuje elektrický náboj). Prvnímu praktickému využití se dostalo od francouzského fyzika Paula Langevina, který vyvinul vysílač a přijímač podvodního zvuku. Tento vynález dostal jméno aktivní sonar a sloužil pro účely první světové války. Postupem času docházelo k objevům dalších piezoelektrických materiálů, jako jsou některé keramické materiály, velrybí kosti a šlachy. Hledání dalších organických zdrojů přineslo úspěch v roce 1969, kdy Heiji Kawai objevil velmi vysokou piezoelektrickou aktivitu u polarizovaného

¹⁰ [7] HUJER, Jan. Mechanizmy kolapsů kavitačních bublin v blízkosti pevných povrchů. Liberec: TUL, 2013. Diplomové práce. s. 44.

fluoropolymeru. Ostatní polymery (PVC, nylon) vykazovaly též dobré piezoelektrické vlastnosti, avšak žádný z nich nedosahoval parametrů jako polymer PVDF a jeho kopolymery. V současné době patří technologie piezoelektrického polymeru (také piezo polymer) k nejrychleji rostoucím technologiím v oblasti celosvětového trhu zabývajících se senzory.¹¹ V oblasti měření kavitace použili průmyslově vyráběný PVDF senzor Wang a Chen již v roce 2007 [17]. S bližší lokalizací tlakového působení na hydraulické stroje přišel v roce 2019 Cong a kol., který ve své studii vytvořil matici senzorů pro měření dynamických účinků [19].

3.2 Vlastnosti PVDF filmu

Vlastností piezo polymerů (PVDF a jeho kopolymerů) je velká řada, ale lze jej předně označit jako flexibilní, lehký a houževnatý technický plast. Flexibilita zahrnuje například různorodost v oblasti tvarů výsledného senzoru, velmi dobrou přilnavost při lepení materiálu komerčním lepidlem nebo vysokou elastickou poddajnost. Naopak mezi flexibilitu nemůžeme v tomto případě zahrnout ohebnost, jelikož se jedná o tenký film. Mezi technickými parametry vyniká obzvláště v širokém frekvenčním rozsahu, kde se pohybuje v rozmezí 0,001 až 10⁹ Hz, a velkém dynamickém rozsahu (10⁻⁸ až 10⁶ PSI). Základní vlastnosti piezo filmů jsou shrnuty v tabulce 1¹².

Tabulka 1: Základní vlastnosti piezo filmů

Základní vlastnosti piezo filmů	
Frekvenční rozsah	0,001 až 10 ⁹ Hz
Dynamický rozsah	10 ⁻⁸ až 10 ⁶ PSI
Akustická impedance	Nízká hodnota podobající se hodnotám vody nebo lidské tkáně.
Výstupní napětí	Hodnota je 10x vyšší než u piezokeramiky za stejných podmínek.
Dielektrická odolnost	Odolává elektrickým polím o síle 75 V/μm
Mechanická pevnost	Odolnost proti nárazů, 10 ⁹ až 10 ¹⁰ Pa modulu pružnosti.
Stabilita	Odolnost vůči vlhkosti (<0,02 %), většině chemikálií, oxidantů a intenzivnímu ultrafialovému a jadernému záření.

Zdroj: [8] Piezo Film Sensors Technical Manual. Measurement Specialities. Norristown, 1999. s. 2.

¹¹ [8] Piezo Film Sensors Technical Manual. Measurement Specialities. Norristown, 1999. s. 1.

¹² Tamtéž, s. 2.

Piezo polymer bývá často srovnáván s piezo keramikou, jenž byla jeho předchůdcem a kterou postupně zastoupil na trhu senzorů. Jednou z hlavních výhod piezo polymerů je již zmiňovaná nízká hodnota akustické impedance (tabulka 1). Piezo polymery disponují 2,6 x větší hodnotou než voda, zatímco akustická impedance piezokeramiky je až 11 x větší. Díky bližší hodnotě akustické impedance s měřicím prostředím, dosahujeme účinnějšího výsledného signálu. Na druhou stranu mají piezo filmy určité nedostatky v oblasti nízkofrekvenčních aplikací. Pracovní teplota PVDF filmu je omezena pouze na hodnotu 100 °C, poté začne fólie degradovat. Pokud piezo film prochází procesem expozice při tvorbě senzoru, může dojít ke zvýšení citlivosti na elektromagnetické záření. Pro prostředí s vysokým elektromagnetickým zářením jsou k dispozici techniky stínění, které fungují na principu zakrytí senzoru piezoelektrickým materiálem nebo stínící fólií¹³.

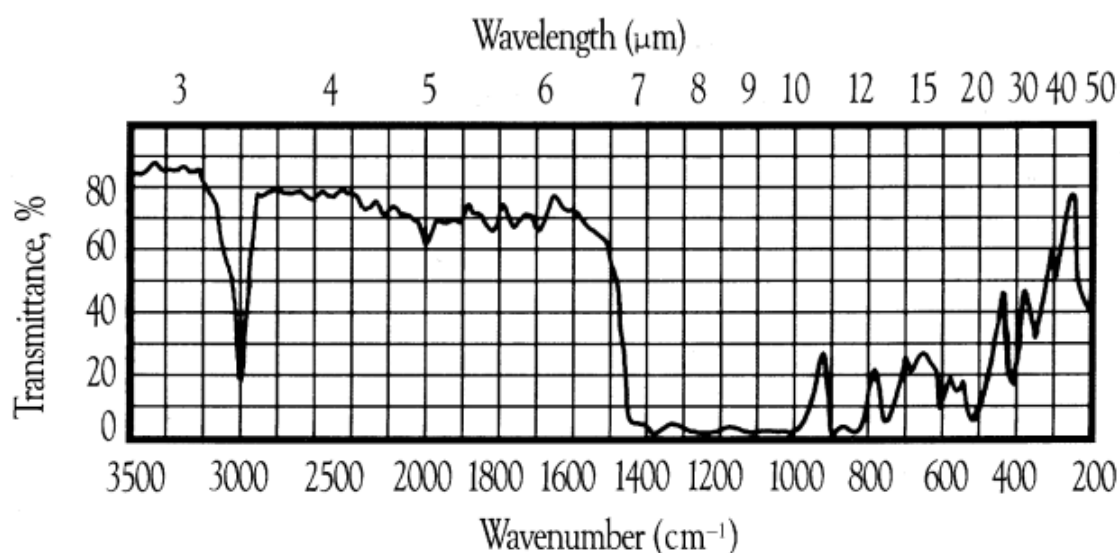
Tabulka 2: Srovnání základních parametrů piezo filmů udávaných výrobcem

Srovnání základních parametrů PVDF a jeho kopolymerů		
Označení a jednotky	PVDF	Kopolymer
Tloušťka [μm]	9, 28, 52, 110	<1 ÷ 1200
Kapacita [pF/cm²]	380 pro 28 μm	68 pro 100 μm
Teplotní rozsah [°C]	-40 ÷ 100	-40 ÷ 145
Pyroelektrický koeficient 10⁻⁶[C/m²°K], 1kHz	30	40
Permitivita 10⁻¹²[F/m]	106 ÷ 113	65 ÷ 75
Relativní permitivita [-]	12 ÷ 13	7 ÷ 8
Hmotnostní hustota 10³[kg/m]	1,78	1,82
Mez kluzu 10⁶[N/m²]	45 ÷ 55	20 ÷ 30
Youngův modul 10⁹[N/m²]	2 ÷ 4	3 ÷ 5

Zdroj: [8] Piezo Film Sensors Technical Manual. Measurement Specialities. Norristown, 1999. s. 3.

¹³ [8] Piezo Film Sensors Technical Manual. Measurement Specialities. Norristown, 1999. s. 2.

PVDF film je zároveň pyroelektrický polymer, který produkuje elektrický náboj při změně teploty. PVDF silně absorbuje infračervenou energii pohybující se v oblasti vlnových délek $7 \div 20 \mu\text{m}$ (viz Obrázek 5). Tyto hodnoty pokrývají stejné spektrum vlnových délek jako teplo lidského těla. Díky této vlastnosti je užitečným senzorem pohybu člověka. Pyroelektrické senzory nacházejí využití v sofistikovanějších aplikacích. Mezi takové případy použití patří vidikonové kamery pro noční vidění nebo senzory profilování laserovým paprskem¹⁴.



Obrázek 5: Běžné infračervené absorpční spektrum PVDF filmu [8]

3.3 Struktura PVDF senzoru

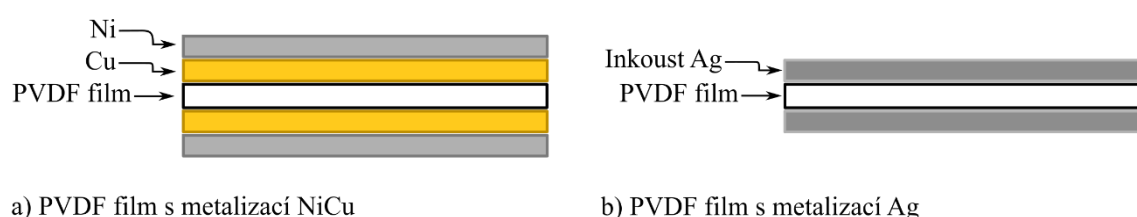
PVDF film je na svém povrchu pokryt metalizační vrstvou. Ta plní funkci elektrického vodiče, jelikož se v případě PVDF jedná o polymer. Díky této vrstvě kovu lze přenášet naměřené hodnoty napětí, které vznikly na povrchu senzoru při piezoelektrickém jevu. Metalizace se buď nanáší ve formě zasychajícího inkoustu, nebo v práškové formě. Druhů metalizačních vrstev může být mnoho, avšak mezi základní typy se řadí¹⁵:

- kombinace niklu a mědi (CuNi)
- stříbro
- zlato a jeho sloučeniny
- hliník

¹⁴ [8] Piezo Film Sensors Technical Manual. Measurement Specialities. Norristown, 1999. s. 1.

¹⁵ Tamtéž, s. 43.

Mezi nejpoužívanější typy metalizace lze zařadit kombinaci CuNi nebo samotné stříbro (ve formě inkoustu). V případě CuNi je tenká naprašovaná metalizace křehčí a používá se tam, kde požadavky na odstup signálu od šumu vyžadují velmi nízké hmotnostní zatížení elektrod. Nikl vede elektrické napětí a zároveň chrání měď před oxidací. Metalizační vrstvy dosahují tloušťky jen několik stovek angstromů – $300 \div 700 \text{ \AA}$ ($30 \div 70 \text{ nm}$), a proto jsou tyto vrstvy velmi náchylné k poškrábání nebo poprasknutí. Metalizace mědi a niklu se velmi dobře následně leptají standardním leptadlem na desky plošných spojů (chlorid železitý)¹⁶. Stříbrný inkoust je nejvhodnější pro aplikace, kde se uplatňuje mechanické namáhání. Díky tekuté podobě lze na povrchu piezo filmu vytvářet libovolné tvary pro výsledný senzor¹⁷. Jeho nevýhodou je poměrně vyšší cena (to samé platí pro zlato).



Obrázek 6: Základní typy metalizace: a) CuNi b) Ag

Většina metalizací podléhá korozi, zejména při manipulaci se senzorem. To je důvodem proč po metalizaci následuje řada možných kroků zpracování, za účelem výroby odolnějšího senzoru. Nejčastěji se piezo fólie laminuje do ochranné nosné fólie a následně se výsledný tvar senzoru vyřízne. Nosnou část tvoří tenké konformní povlaky nebo lamináty. Při laminování a montáži se často používají akrylová lepidla, syntetický kaučuk pryskyřice, epoxidy a kyanoakryláty¹⁸.

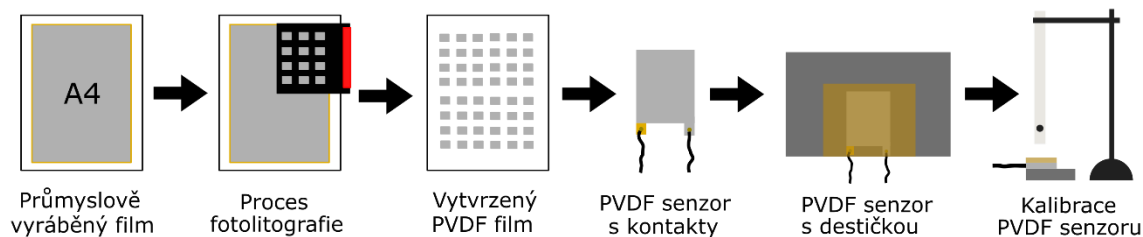
3.4 Popis PVDF senzoru

Pro výrobu senzoru byl použit průmyslový film s označením Part Number 1-1003702-7, jenž producentem je firma TE Connectivity company. Samotný film pro nás v této práci představuje pouze jakýsi polotovár, z něhož se senzor vyrábí (obrázek 7). Celková výroba senzoru v našem případě zahrnuje proces fotolitografie, kdy se na filmu vytvoří odolná vrstva fólie, která chrání film před deformací. Další proces výroby obnáší připojení elektrod na kontakty a připevnění senzoru k experimentální kovové destičce, na které bude docházet ke kalibraci.

¹⁶ [8] Piezo Film Sensors Technical Manual. Measurement Specialities. Norristown, 1999. s. 12.

¹⁷ [9] METALLIZED PIEZO FILM SHEETS. TE Connectivity company. Schaffhausen 2017. s. 1.

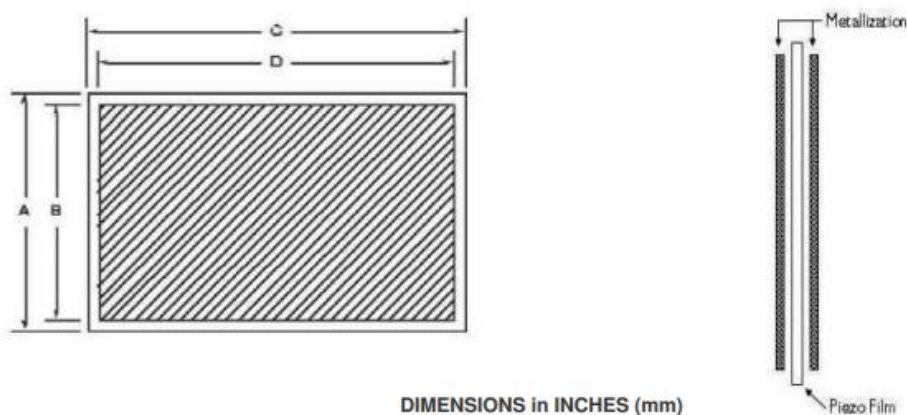
¹⁸ [8] Piezo Film Sensors Technical Manual. Measurement Specialities. Norristown, 1999. s. 6.



Obrázek 7: Schématické zobrazení výroby a kalibrace PVDF senzoru

V našem případě je PVDF fólie (1-1003702-7) vyráběna s metalizací CuNi. Výška nanášené vrstvy se pro měď uvádí v hodnotách 700 Å a pro nikl 100 Å. Na obrázku 8 se nachází výtažek z katalogu od firmy TE Connectivity. Film se dodává v podobě listu o rozměrech A x C (203 x 280 mm). Funkční rozměr (tj. plocha, kterou lze použít pro snímání napětí) je roven rozměru B x D (190 x 267 mm). Celková tloušťka je rovna 28 µm (PVDF film s metalizací CuNi)¹⁹.

DIMENSIONS



DIMENSIONS in INCHES (mm)

Film Thickness	Total Thickness (µm)	Metallization	A Film	B Electrode	C Film	D Electrode	Part Number
28 µm	28	Cu-Ni	8.00 (203)	8.00 (190)	11.00 (280)	11.00 (267)	1-1003702-7
28 µm	40	Silver Ink	8.00 (203)	7.50 (190)	5.50 (140)	5.00 (127)	1-1004347-0
28 µm	40	Silver Ink	8.00 (203)	7.50 (190)	11.00 (280)	10.50 (267)	1-1004346-0
52 µm	52	Cu-Ni	8.00 (203)	8.00 (190)	11.00 (280)	11.00 (267)	2-1003702-7
52 µm	64	Silver Ink	8.00 (203)	7.50 (190)	5.50 (140)	5.00 (127)	2-1004347-0
52 µm	64	Silver Ink	8.00 (203)	7.50 (190)	11.00 (280)	10.50 (267)	2-1004346-0
110 µm	110	Cu-Ni	8.00 (203)	8.00 (190)	11.00 (280)	11.00 (267)	3-1003702-7
110 µm	122	Silver Ink	8.00 (203)	7.50 (190)	5.50 (140)	5.00 (127)	3-1004347-0
110 µm	122	Silver Ink	8.00 (203)	7.50 (190)	11.00 (280)	10.50 (267)	3-1004346-0

Obrázek 8: Katalogová nabídka PVDF filmů od firmy TE Connectivity [9]

¹⁹ [9] METALLIZED PIEZO FILM SHEETS. TE Connectivity company. Schaffhausen 2017. s. 1-2.

4 Fotolitografie

Fotolitografie je metoda, která vychází z procesu zvaného litografie. Litografie byla objevena již v roce 1796, kdy ji jako první použil česko-německý vynálezce Alois Senefelder. Postup spočíval v ručním nanesení kresby písma či jiného obrazce pomocí tuše na povrch hladkého kamene (zpravidla vápence). Celý povrch vápence se poté zaleptal vodným roztokem arabské gumy se zředěnou kyselinou dusičnou. Tiskařský kámen poté přijímal tiskařskou barvu pouze tam, kde byl před zaleptáním pokreslen mastnou tuší, ostatní místa, kde byl pouze mastný vodný roztok, mastnou barvu odpuzovala. Tato metoda si později vysloužila, díky použití kamene, název kamenotisk²⁰.

V dnešní době se můžeme s litografií setkat ve více formách technologických metod, které jsou předně používané k výrobě integrovaných obvodů. Moderní požadavky na integrované součástky, požadují stále miniaturnější rozměry, které již dosahují jednotek nanometrů. Litografické metody dělíme na rentgenové, iontové, elektronové a optické. Pro naše účely se budeme na následujících stranách věnovat pouze metodě optické litografie (známé také jako fotolitografie)²¹.

4.1 Proces fotolitografie

Fotolitografie je soubor technologických procesů, které slouží k přenášení topologicky přesných struktur na podložku (polovodičový substrát nebo vodivý film) pomocí světla. Zdroj světla v tomto případě tvoří nejčastěji ultrafialové záření (dále UV) dosahující vlnové délky $\lambda = 450 \div 150 \text{ nm}$ ²². Film má na svém povrchu vytvořený velmi tenký obal (v řádech desítek μm), který je tvořen z fotocitlivého materiálu (označovaného dále jako fotorezist). Za působení UV záření se nám na podložce, změní chemická struktura fotorezistu. Tvar výsledného geometrického vzoru filmu ovlivňuje fotomaska, ta nám vymezuje oblasti pro exponování (vytvrzení) fotorezistu a oblasti, které se nevyexponují. Po vytvrzení následuje řada chemických operací, jako je například vyvolávání, leptání, louhování, atp. Tyto operace jsou nutné z hlediska dosažení, co nejlepší kvality vodivých částí vyráběného vodiče.

²⁰ [11] KRÁTKÝ, Stanislav. *Studium vlastností periodických mřížek vytvořených elektronovou litografií*. Brno: Vysoké učení technické, 2010. Bakalářská práce. s. 10.

²¹ Tamtéž, s. 10-11.

²²[12] TRUHLÁŘ, Michal. *Příprava polovodičových součástek křemikovou technologií*. Brno: Masarykova univerzita, 2011. Diplomová práce. s. 25-26.

4.1.1 Fotorezist

Přítomnost fotorezistu hraje při výrobě senzoru podstatnou roli. Jeho úlohou je vytvořit velmi tenkou vrstvu vytvrzeného materiálu na povrchu PVDF fólie. Tato vrstva poté chrání samotný film před jeho poškozením, vlivem okolních faktorů. Senzor tak nabývá větší odolnosti a lze s ním lépe manipulovat. Samotný film je totiž velmi náchylný na opotřebení a může docházet k popraskání metalizace, kterou je na povrchu potažen. Důsledkem toho by byl senzor nefunkční a to by bylo při nákladech na jeho výrobu neekonomické. Aby byl fotorezist dokonale vytvrzen, musí splňovat před expozicí několik obecných požadavků. Mezi tyto požadavky se řadí například jeho přilnavost k filmu, odolnost vůči podmínkám, kterým bude vystaven nebo jeho fotocitlivost (vlnová délka osvitového zařízení a fotorezistu by se měla pohybovat ve stejném rozmezí).

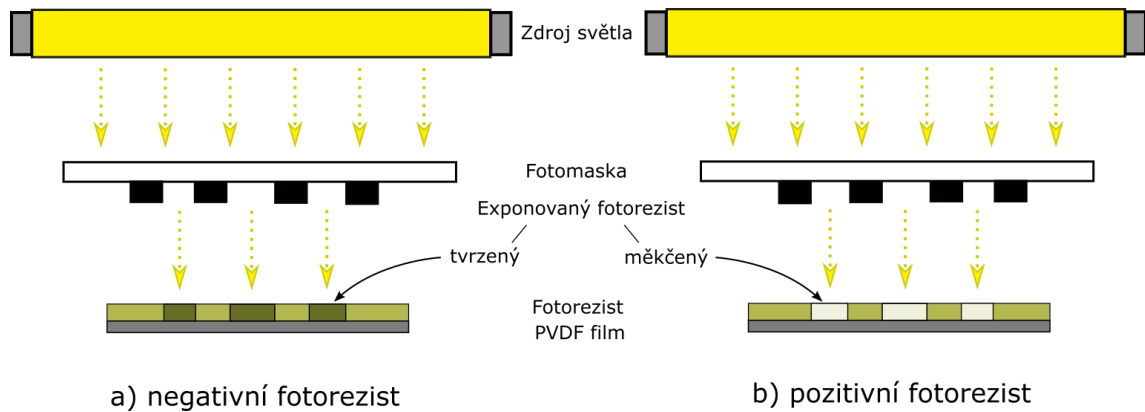
Pro expozici ochranné vrstvy, musí být fotorezist tvořen fotocitlivým materiálem. Tato vlastnost poté způsobí, že molekuly fotorezistu absorbují fotony poskytované UV zářením. Foton obsahuje energii, jenž je potřebná pro chemickou reakci na povrchu folie. Hodnota energie se pohybuje v rozmezí od 3 ÷ 3,4 eV (pro blízké ultrafialové záření). Molekula se poté při kontaktu s fotonem dostává do excitovaného stavu²³.

Fotorezist dělíme zpravidla na základní druhy - negativní a pozitivní. Toto rozdělení nám definuje, jaký dopad bude mít expozice na fotocitlivou fólii. Důležitou roli zde má i přítomnost fotomasky, která nám popisuje vztah mezi vzorem na masce a vzorem fólie, jenž nám zůstane po vyvolání (výsledný tvar senzoru). Pro negativní fotorezist platí, že se exponovaná část vytvrdí a stane se nerozpustnou. V druhém případě se jedná pozitivní fotorezist, který se také exponuje, avšak chemické složení fólie zapříčiní, že vzor naopak změkne a rozpustí se.

4.1.2 Fotomaska

Fotomaska slouží primárně pro zakrytí exponované fólie. Skládá se ze dvou vrstev, kde hlavní vrstvou je průhledný fóliový obal, který zaujímá celou plochu masky. Druhá vrstva je zatemňovací (černá a neprůhledná) a jejím účelem je zakrytí ploch, které nebudou tvořit výsledný senzor. Tato vrstva brání působícímu UV záření v expozici a foton tudíž nespustí reakci na povrchu fotocitlivé látky. Jestliže fotomaska tvoří negativ, dochází k vytvrzení transparentní části. V případě pozitivu dojde k rozpuštění fólie pod průhlednou částí. Pro bližší představu budou průběhy expozic obou fotorezistů s fotomaskou znázorněny na obrázku 9.

²³ [12] TRUHLÁŘ, Michal. *Příprava polovodičových součástek křemikovou technologií*. Brno: Masarykova univerzita, 2011. Diplomová práce. s. 25-27.



Obrázek 9: Expozice fotorezistu: a) negativní fotorezist b) pozitivní fotorezist

4.2 Výroba PVDF senzoru

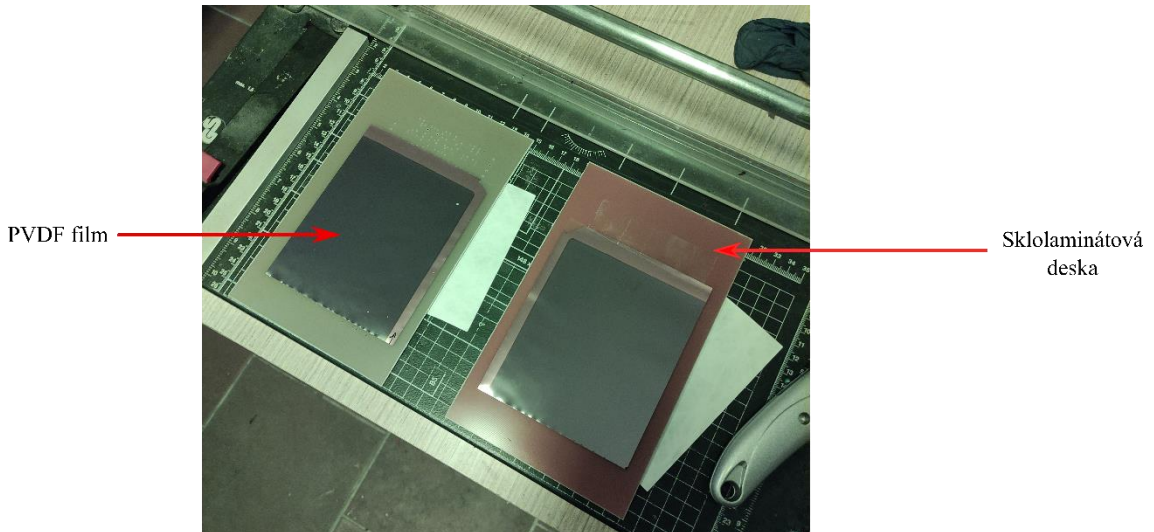
Jak už bylo v úvodu uvedeno, jedním z výstupů této práce je zpracování a zdokumentování postupné výroby PVDF senzoru. Pro zhotovení senzoru byl použit průmyslově vyráběný list PVDF filmu o daných rozměrech 203×280 mm a celkové tloušťce $28 \mu\text{m}$, již zmiňovaný v kapitole 3 (od firmy TE Connectivity). Zhotovený senzor bude mít tvar obdélníku ($11,5 \times 12$ mm). Na jedno použití lze s fotomaskou vytvrdit 23 senzorů. Z jednoho listu filmu je poté možné vyrobit až 92 senzorů (film se rozdělí na dílce odpovídající ploše fotomasky). Fotosenzitivní vrstvu tvoří suchý film s názvem KOLON KP-2100. Výroba probíhala v Laboratoři pro vývoj a výrobu desek plošných spojů. Běžně používané zářivky v laboratoři jsou z důvodu ochrany fotocitlivých materiálů nahrazeny tlumenými zářivkami vyzařujícími pouze žluté světlo. Celý postup výroby obsahuje mnoho bodů, avšak lze jej rozdělit do několika hlavních kroků:

1. Laminování
2. Expozice (fotolitografický proces)
3. Vyvolávání
4. Leptání
5. Louhování

4.2.1 Laminování

Laminování je dnes všeobecně známá povrchová úprava tiskovin, při které za pomoci tepla a tlaku dochází k zakrytí požadovaných ploch, použitím polymerové fólie. V našem případě se jedná o důležitý proces, jelikož při laminaci spojujeme fotorezist s PVDF filmem. Před samotnou laminací je potřeba PVDF film upravit na rozměry, které bude mít fotomaska. Tento krok se musí provést, jelikož dodaný film má příliš velké parametry. S větším formátem by se hůře manipulo-

valo a to by mohlo nepříznivě ovlivnit kvalitu vyrobeného senzoru. Fotomaska má v našem případě formát A5. Jakmile se film nařeže na potřebné části, připevníme jej pomocí lepicí pásky na sklolaminátové desky.



Obrázek 10: PVDF film upevněný na desce před procesem laminování

Desky zajistí pevnou oporu pro film a ten tak lépe odolá tlaku laminace. Lepicí pásky zamezí pohybu filmu v momentě, kdy prochází mezi navzájem se pohybujícími laminačními válci. Nutnou podmínkou pro úspěšně provedený proces je správná pracovní teplota, při které dochází ke spojení materiálů. Jelikož se mezní teplota PVDF filmu pohybuje okolo hodnoty 100 °C, je nutné uzpůsobit laminovací teplotu zařízení. V případě, že by k tomuto kroku nedošlo (max. laminovací teplota zařízení je 120 °C), film by ztratil své piezoelektrické vlastnosti a stal by se tak bezcenným pro naše účely.

Fólie, kterou pokryjeme PVDF film, se skládá ze dvou částí. V první řadě se jedná o fotocitlivý materiál, jenž budeme následně vytvářet. Druhou část tvoří povrchový ochranný obal (nejčastěji z celofánu), který chrání nanášenou fólii před světlem a poškozením. Pro lepší představu, jak vypadá struktura po laminovacím procesu, poslouží obrázek 11.



Obrázek 11: Struktura PVDF senzoru po laminování

Poté, co fólie pokryje náš senzor, odebereme jej i s podložkou ze stroje a vyřízneme požadovanou část (PVDF). Jelikož při prvním potahu laminátoru zakrývala spodek senzoru sklolanátová deska, je nutné proces zopakovat pro nepotaženou stranu. Výsledkem je sendvičová struktura PVDF senzoru, jehož obal se skládá z nevytvrzeného fotocitlivého materiálu a ochranné vrstvy tvořící povrch.



Obrázek 12: Laminovací proces při výrobě PVDF senzoru

4.2.2 Expozice

Jako další proces po laminování následuje expozice fotocitlivé vrstvy PVDF senzoru. Zde již dochází k vytvrzení povrchu senzoru za pomoci vakuové osvitové jednotky (zkráceně osvitka). Ze senzoru je před expozicí odstraněna ochranná vrstva laminovací fólie. Poté je potřeba senzor ošetřit pomocí průmyslového pudru, naneseného na povrch fotorezistu. Pudr zajistí, že povrch nebude příliš lepkavý a dojde tak k efektivnějšímu exponování. Následně se film zakryje fotomas-kou. V tomto případě je fotomaska vyhotovena ze dvou fólií (fotofilm), díky kterým se nám na každé straně exponuje námi požadovaný tvar (z důvodu různé polohy kontaktů). Fotofilm byl vyroben na průmyslovém vyvolávacím zařízení používaným ve fotolaboratořích. Senzor se vloží do prostoru mezi fóliemi fotomasky tak, aby se docílilo největšího využití plochy PVDF filmu. Na výrobu senzoru byl použit pozitivní fotorezist. Z čehož plyne, že průsvitné plochy (tvary budoucích senzorů) budou při expozici vytvrzené. Fotomasku společně s filmem položíme na

skleněnou podložku osvětlovacího zařízení a uzavřeme ji z vrchu víkem, který je také ze skla (křemenné sklo). Nakonec přiklopíme i vrchní část zařízení.

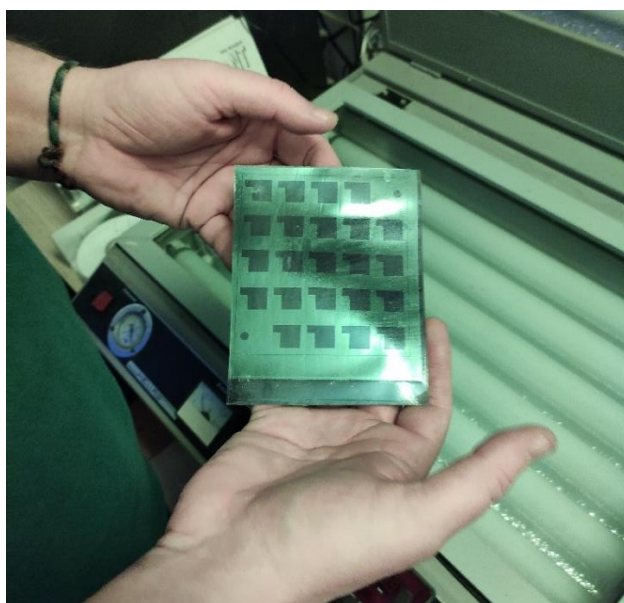


Obrázek 13: PVDF film s fotomaskou



Obrázek 14: Proces expozice fotorezistu

V prostoru mezi skleněnými deskami uměle vytvořené vakuum. Jakmile k tomu dojde, nastane samotný proces uvolňování fotonů na povrch fotorezistu pomocí UV záření. Expozice se vykonává po dobu 80 sekund. Po dokončení předem nastaveného času osvětlování se senzor vyjme ze zařízení. Výsledná podoba vytvrzeného senzoru je zachycena na obrázku 15.



Obrázek 15: PVDF senzor po expozici

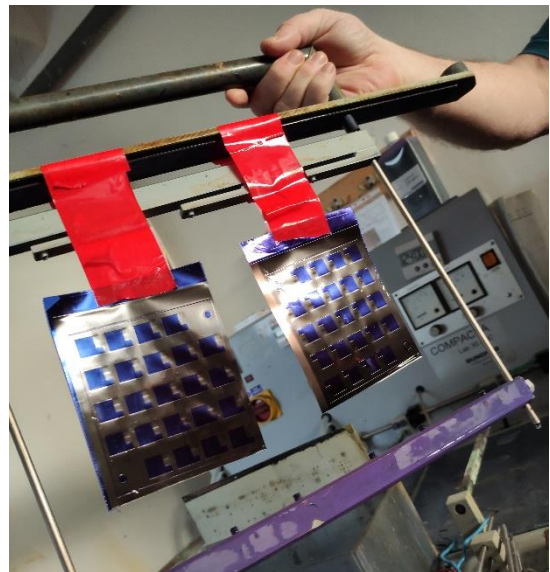
4.2.3 Vyvolávání

Vyvolávání je proces, při kterém dochází k chemické reakci mezi filmem a roztokem na bázi čistícího prostředku. V tomto případě zastupuje roztok uhličitán sodný (Na_2CO_3 nebo také soda na praní). Cílem této operace je se zbavit nevytvrzeného fotorezistu, jenž zůstal na povrchu PVDF filmu po expozici.

Nevyvolaný senzor je potřeba, za pomoci lepicí pásky, připevnit k desce zakladače. Ta tvoří zásobník, který poté slouží jako nosník pro filmy při mytí v očišťovací lázni. V podmínkách, při kterých byla výroba prováděna, jsme do lázně založili dvě sady senzorů najednou (obrázek 16). Obě sady senzorů byly přilepeny pouze z vrchní části. Hlavní část vyvolávacího procesu probíhala při teplotě zhruba $22\text{ }^\circ\text{C}$ po dobu 2 minut. Vyvolávací čas se může lišit v závislosti na konzistenci roztoku ve vaně. Jakmile se nevytvrzený fotorezist vypere, je nutné obě sady filmů ještě jednou opláchnout čistou vodou a nechat je následně vysušit. Veškerá manipulace musí být prováděna s opatrností, jelikož při tomto procesu lze senzory jednoduše poškodit.



Obrázek 16: Vkládání PVDF senzoru do vyvolávací lázně

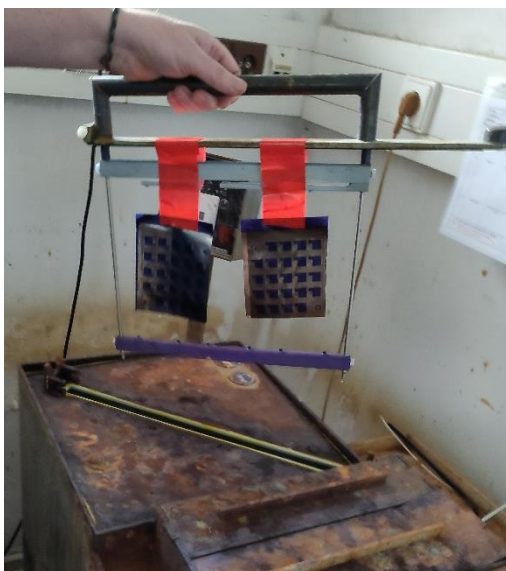


Obrázek 17: PVDF senzor po vyvolávání

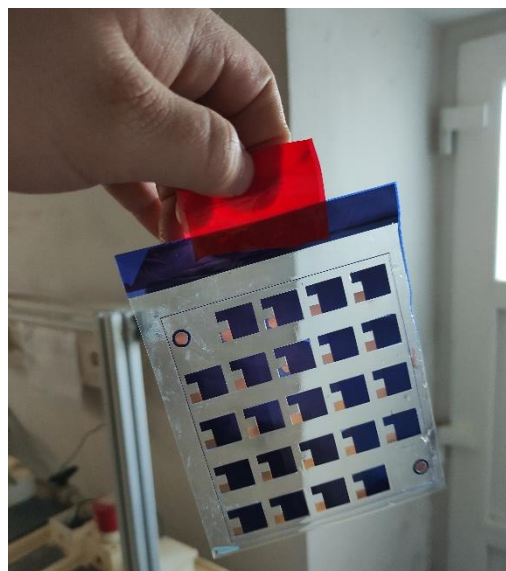
4.2.4 Leptání

Leptání slouží výhradně k odstranění přebytečné vrstvy metalizace PVDF filmu, jenž byla původně zakryta maskou při osvětlování senzoru. Jako leptací činidlo se používá chlorid železitý FeCl_3 , který účinně odstraní vrstvy metalizace.

Samotný proces se provádí za stejného principu jako u vyvolávání. Jediným rozdílem je, že se sady filmů připevní na zásobník leptacího zakladače. K odleptání povrchové vrstvy dochází velmi rychle, proto se senzory ponechávají v leptadle pouze 6 sekund (nebo dokud původně maskou zakryté oblasti nezmizí). Po odstranění přebytečného materiálu se sady filmů opět pořádně opláchnou čistou vodou a následně se osuší.



Obrázek 18: Uložení PVDF senzoru do leptací lázně



Obrázek 19: PVDF senzor po leptání

4.2.5 Louhování

Finální operací při fotolitografické výrobě PVDF senzoru je louhování. Tento krok se provádí za účelem odstranění povrchové fólie na metalizaci (modré plochy na obrázku 19). Díky tomu se poté senzor stává kontaktovatelný a lze na něj následně přinýtovat elektrody. Při louhování využíváme jako činidlo hydroxid sodný (louh sodný). Doba louhování se pohybuje okolo 5 minut. Jakmile dojde k odstranění modrých plošek z povrchu jednotlivých senzorů, omyjeme je a naposledy necháme vysušit.

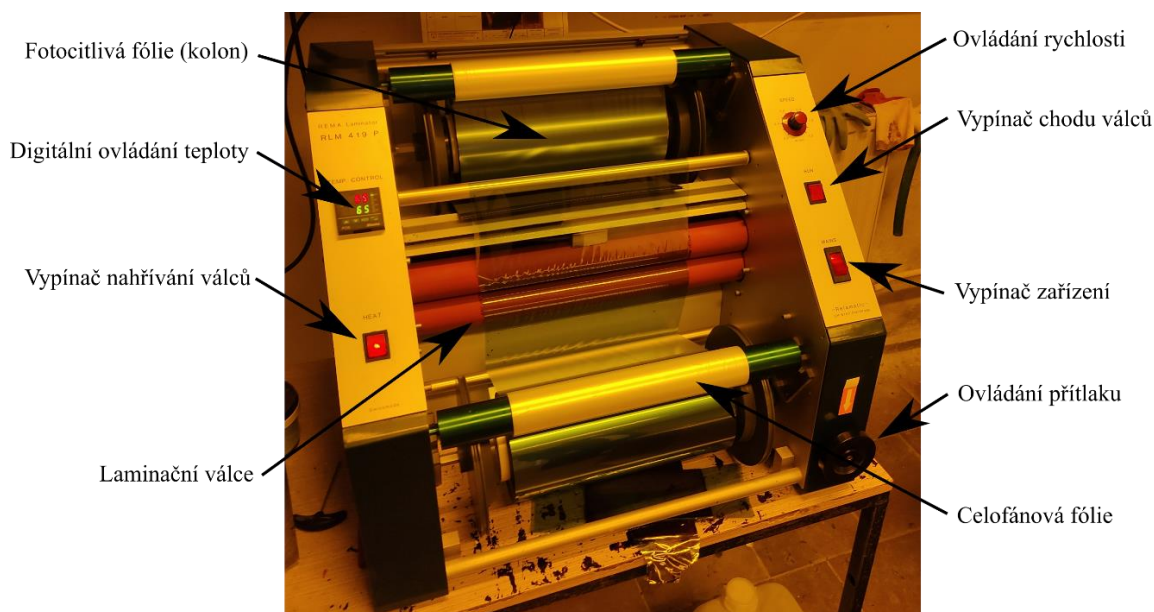
4.2.6 Použitá zařízení

Tato kapitola obsahuje popis všech použitých zařízení pro fotolitografickou výrobu PVDF senzoru. Zmíněna budou pouze zařízení s případným příslušenstvím, která slouží výhradně k našim účelům. Doprovodné nástroje použité při tvorbě senzoru, budou vynechány (lepicí páska, nůž, pravítko, tužka).

REMA Laminator RLM 419P

Laminátor REMA zastupuje zařízení, jenž slouží pro laminování suchých fólií. Zařízení se po spuštění vytápí na nejvyšší pracovní teplotu, která činí 120 °C. Teplotu lze manuálně nastavit pomocí digitálního ovládacího panelu až na minimální hodnotu 20 °C (vzhledem k možnému výskytu teplotní hystereze, je nutné dbát na teploty tání filmu při laminování). Laminátor obsahuje elektricky vyhřívané rotační válce s rovnoměrným rozložením teploty a ručně nastavitelný přítlak, který válce vyvíjí. Stroj pracuje s maximální laminovací šířkou 400 mm a přepravní šířkou 440 mm. Nastavitelná hodnota rychlosti se může pohybovat v rozmezí 0,2 ÷ 1,2 m/min. Zařízení je napájeno pomocí sítě o hodnotě napětí 230 V, frekvenci 50 Hz a příkonu 2 kW. Tloušťky desek používaných k laminování (desky plošných spojů, podložky pod filmy) se předepisují v rozmezí 0,3 ÷ 5 mm. Zbylé parametry šířky a délky se poté doporučují používat od minimálního rozměru 50 x 50 mm² až po maximální přepravní šířku (440 mm). Maximální délkový rozměr výrobce neudává²⁴.

Laminátor RLM 419P se zpravidla dodává do malých firem, škol a výzkumných oddělení. Hlavní oblast využití spočívá ve výrobě desek plošných spojů. Vzhledem k nastavitelné regulaci přítlaku a rychlosti laminování jej lze bez problémů použít i k nanášení pájecí masky²⁵.



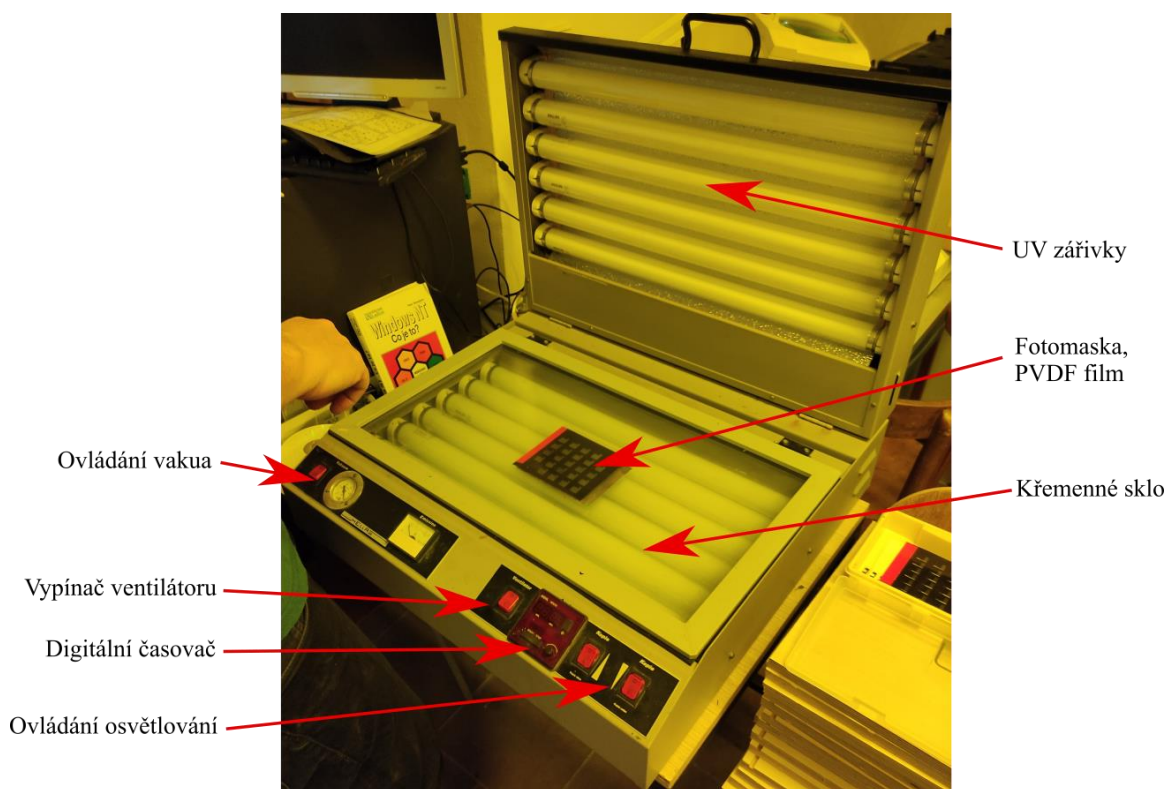
Obrázek 20: REMA Laminator RLM 419

²⁴ [13] Dry Film Laminator. *Bungard.de* [online]. Windeck: Bungard Elektronik GmbH & Co.KG, 2021.

²⁵ Tamtéž.

Vakuová osvitová jednotka HELLAS

Vakuová osvitová jednotka (nebo vakuová expoziční jednotka) se řadí do kategorie osvětlovacích zařízení. Hlavním účelem osvitky je skrze světelný zdroj vyprodukovat proud fotonů, který bude dopadat na materiál, jenž následkem toho změní svou strukturu. Materiál se pokládá na skleněnou podložku, jenž je vytvořeno z 8 mm tlustého křemenného skla (SiO_2). Křemenné sklo zaručuje propustnost pro širší spektrum záření než příměsové sklo, které již UV záření nepropustí. Protikus pro skleněnou desku uzavírá prostor mezi skly a tvoří tak vakuovou planžetu. Zařízení poté vytvoří v tomto prostoru vakuum. Přednosti tohoto typu osvitky je možnost oboustranného osvětlování fotorezistu (lze i jednostranné). K tomu slouží šest 20 W zářivek oddělených vakuovou planžetou (viz Obrázek 21.). Osvitová jednotka HELLAS disponuje rozsahem produkovaného UV záření v mezích $360 \div 400$ nm. Pracovní plocha se pohybuje v rozmezí 570×300 mm². Součástí ovládacího panelu je také odpočítávání času na digitálním časovači. V případě použití vakuové osvitové jednotky HELLAS se jedná zejména o pozitivní nebo negativní exponování desek plošných spojů²⁶.



Obrázek 21: Vakuová osvitová jednotka HELLAS

²⁶ [14] Vacuum exposure unit. *Bungard.de* [online]. Windeck: Bungard Elektronik GmbH & Co.KG, 2021

5 Příprava senzoru na kalibraci

V rámci této části práce je senzor podroben konečným úpravám pro kalibraci. K senzoru jsou připojeny elektrické vodiče pro přenášení vzniklého elektrického napětí. Poté je senzor připevněn na experimentální kovovou destičku.

5.1 Připojení elektrických vodičů k PVDF senzoru

Aby bylo vůbec možné zaznamenávat výsledný průběh elektrického napětí, které vzniká na PVDF senzoru, je nutné k senzoru připojit elektrické vodiče. V tomto případě dochází k trvalému nerozebíratelnému spojení senzoru s elektrodami za pomoci nýtového spoje. Sada všech potřebných nástrojů je vyobrazena na obrázku níže.



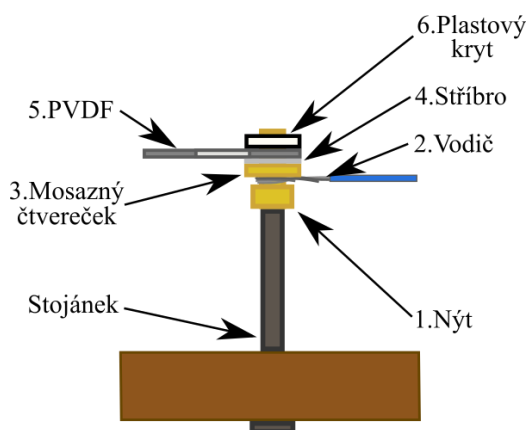
Obrázek 22: Sada nástrojů pro tvorbu elektrod

Mezi základní součástky a povrchové úpravy, kterými bude výsledný PVDF senzor tvořen patří:

- Dutý nýt s plochou hlavou – měděný, průměr 1 mm
- Vícežilový kabel – průřez $0,5 \text{ mm}^2$
- Mosazný plíšek – tloušťka 0,5 mm, plocha 3 x 3 mm

- PVDF senzor
- Stříbrný inkoust
- Krycí fólie z PVC – tloušťka 0,5 mm, plocha 3 x 3 mm

Pro jednodušší tvorbu nýtového spoje poslouží stojánek (tvořen dřevěným prkénkem a hřebíkem), na nějž nasadíme zmiňovaný dutý nýt. Poté za pomoci kleští odizolujeme polymerový plášť vícežilového kabelu (vodiče) na obou stranách. Odizolování druhé strany poslouží pro pozdější spojení vodiče s koaxiálním kabelem (s koncovkou BNC). Na jedné straně odizolovaného vodiče vytvoříme z drátků kroužek použitím ocelového párátko (obmotáním kolem párátko). Vznikne tak na konci oko, jenž navlečeme na měděný nýt, který je již na stojánku. Z mosazného plíšku vystříháme čtverec o rozměrech 3 x 3 mm. Následně do čtverce uděláme díru výsečnickem o průměru 1 mm. Jelikož se při tvorbě díry výsečnickem čtverec zdeformoval, narovnáme jej kladivem co nejlépe (ideálně do původního stavu) a opatrně jej nasuneme na nýt. V tuto chvíli nastává řada na nasunutí PVDF senzoru. Senzor nejprve očistíme užitím alkoholového čističe povrchů (Isopropylalkohol, IPA 170) a necháme jej zaschnout (5 min.). Vzhledem k opakované nefunkčnosti senzorů (pravděpodobně popraskání vrstvy metalizace), se musí plochy kontaktů s niklovým povrchem potříit stříbrným inkoustem. Po potření je nutné opět chvíli setrvat a nechat inkoust zaschnout (5 až 10 min.). Ten zajistí zvýšenou vodivost PVDF senzoru, což zapříčiní přenos signálu na celé měřicí ploše senzoru (10 x 10 mm). Dále je nutné do senzoru udělat otvory výsečnickem, jako tomu bylo v případě s mosazným čtverečkem. Tento krok vyžaduje vysoké opatrnosti, jelikož může dojít k poničení celého senzoru. Po vytvoření děr nasuneme PVDF senzor na nýt tak, aby inkoustem potažená část kontaktu dosedala na mosazný čtvereček (z vrchu budeme hledět na vyleptaný měděný kontakt). Poslední součástí bude plastový kryt, jenž má funkci ochrany kontaktu a celkového zpevnění senzoru. Při nýtovacím procesu docházelo k protrhnutí PVDF filmu, jakmile jsme se jej snažili vyndat z nýtovacího nástroje. Díky plastovému vyztužení toto riziko pominulo. Do plastové krycí fólie uděláme odpět díru pomocí výsečnicku a nasuneme ho na nýt. Nakonec vyjmeme nýt z hřebíkového stojánku a nasadíme jej na nýtovací hlavu (o průměru 1 mm). Poté stlačíme páku a vytvoříme nýtový spoj. Na páku půsíme zlehka, aby nedošlo k deformaci PVDF senzoru stlačením. Jakmile páka dosáhne dolní úvrati, uvolníme ji a vyjmeme opatrně senzor. Celý proces připojování vodičů je postupně očíslován a vyobrazen na obrázku 23.



Obrázek 23: Připojení vodiče k PVDF senzoru



Obrázek 24: Proces nýtování

Proces se z důvodu existence dvou kontaktů provádí dvakrát. Pro nýtování byl použit ruční nýtovací nástroj od firmy BUNGARD BEL s označením BUN-FAVORIT a vyměnitelnou hlavici BUN-FAVTOOLS-10 (hlavice pro 1 mm).

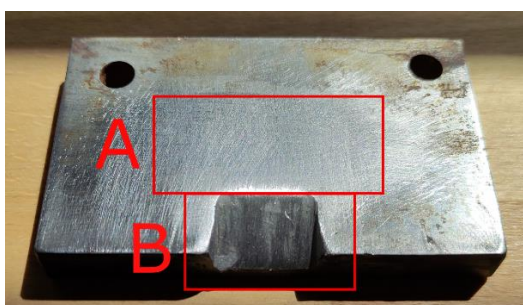
5.2 Připevnění PVDF senzoru na kalibrační destičku

Abychom mohli PVDF senzor podrobit kalibrační metodě pádu kuličky je potřeba senzor zajistit proti pohybu a zároveň jej umístit na pevný podklad. Použitím lepicích prostředků dosáhneme tuhosti přilepeného senzoru ke kalibrační ocelové destičce. Sada vhodných nástrojů pro tvorbu pevného spoje je vyobrazena níže.

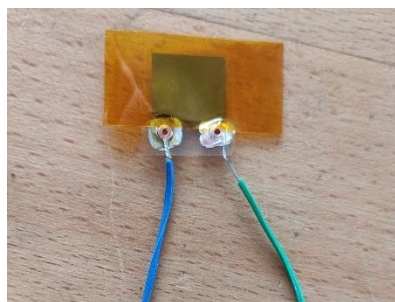


Obrázek 25: Sada nástrojů pro připevnění PVDF senzoru s kalibrační destičkou

Před připevněním PVDF senzoru k destičce je nutné sensor přelepit z obou stran kaptonovou páskou (izolační páska z polyimidu). Tato páska se vyznačuje velmi vynikajícími izolačními vlastnostmi. V tomto případě hlavně chrání PVDF sensor před lepidly (gel, dvousložkové) a zároveň plní funkci stínícího prvku. Jelikož je sensor citlivý i na elektromagnetické pole částí laboratorních zářivek (cívka), je stínící funkce kaptonu nutná z hlediska výsledného signálu (výsledný průběh napětí nebude zkreslován zářením ze světel v místnosti). Kovová destička je vyrobena přímo pro kalibrační metodu pádu kuličky a má rozměry 80 x 50 x 10 mm. Z jedné strany se přibližně v polovině delší hrany destičky nachází sražení, které po přilepení PVDF senzoru vytvoří jakousi kapsu (obrázek 26, plocha B). Jelikož bude destička spojena se senzorem pomocí lepidla, musí být povrch ideálně co nejčistší, aby došlo k čistému spojení. Drobné nečistoty či částičky na povrchu destičky by mohli zkreslovat výsledný průběh elektrického napětí. Proto se pomocí brusných papírů (různé zrnitosti) povrch brousí až do dosažení požadované jakosti povrchu (lesklý, nezašpiněný povrch). Jakmile jsou plochy A i B připravené k přilepení, zakryjeme sraženou plochu B obyčejnou lepicí páskou. Ta bude sloužit k jednoduššímu odstranění vrstvy dvousložkového lepidla od destičky v momentě, kdy dochází odebrání PVDF senzoru.



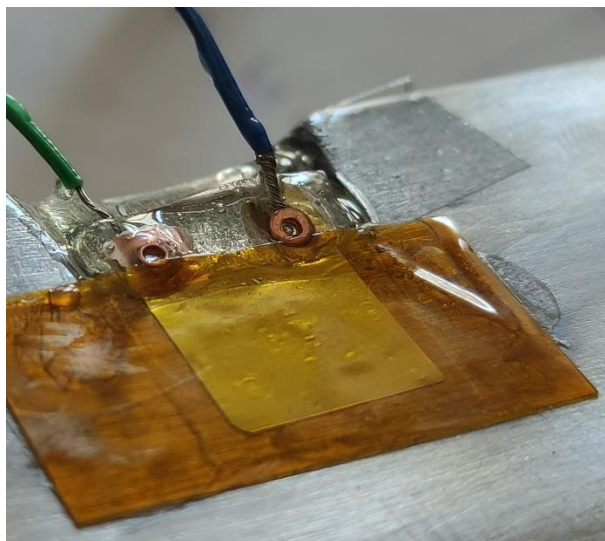
Obrázek 26: Kovová kalibrační destička



Obrázek 27: Kaptonová izolace

Než začneme lepit, je vhodné si nasadit gumové rukavice, které usnadní práci s oběma lepidly. Ve fázi lepení potřeme plochu A vteřinovým lepidlem (LOCTITE Super Bond gel). Po rozetření gelu okamžitě přiložíme PVDF senzor izolovaný kaptonovou páskou na plochu tak, abych do prostoru plochy B přesahovaly pouze nýtové spoje. K tuhnutí dochází téměř ihned, proto je nutné odstranit veškeré vzduchové bublinky zpod senzoru co nejdříve a vyhladit gelové médium po celé ploše pásky. Přesahující část PVDF senzoru vytvoří spolu se sraženou hranou jakousi kapsu, jenž je následně vyplněna dvousložkovým lepidlem (BISON EPOXY 5 MIN). Dvousložkové lepidlo z epoxidu si vytlačíme do míchací misky, kde smícháme obě složky za pomoci ocelového párátko. Jakmile se obě složky dostatečně smísí (hmota bude opět čirá), nanese lepidlo na plochu B. Za použití ocelového párátko vyplníme veškerá místa mezi senzorem a sraženou hranou destičky. Poté necháme vrstvu zatuhnout a následně nanese druhou vrstvu, která vyplní sraženou část a pokryje konce vodičů včetně nýtů (obrázek 31). K vytvoření pevného

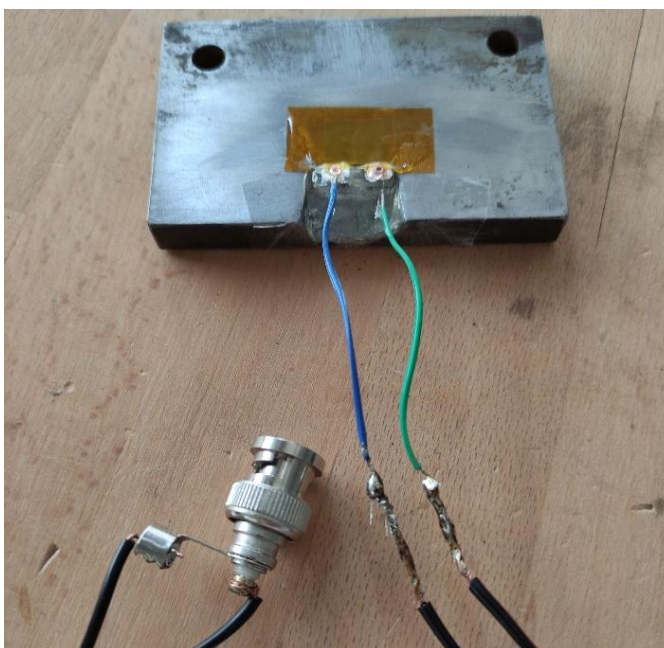
spoje dvousložkového lepidla dochází až po vytvrzení, které se pohybuje okolo 24 hodin od nanesení. K procesu kalibrace však stačí setrvat okolo 20 minut, aby lepidlo dostatečně zatuhlo.



Obrázek 28: Přilepený PVDF senzor

5.3 Propojení s koaxiálním kabelem

Pro zaznamenávání signálu kalibrace je potřeba propojit vodiče PVDF senzoru s koaxiálním kabelem, který má bajonetovou koncovku (BNC). K propojení dochází připájením vodiče ke koaxiálnímu kabelu. Po následné kalibraci senzoru může docházet k chybným výsledkům vlivem špatně připájené polarizace vodičů (hodnoty elektrického napětí by byly převážně záporné).



Obrázek 29: Propojení PVDF senzoru s koaxiálním kabelem

6 Kalibrace PVDF senzoru

Kalibraci senzoru provádíme za účelem zjištění citlivosti filmu. Tato vlastnost vypovídá o časové reakci senzoru na deformační impuls, vytvořený na jeho povrchu. Citlivost poté hraje důležitou roli v momentě, kdy se rozhoduje o vhodnosti senzoru pro dané zatížení (časový průběh kavitační eroze). Vliv na citlivost senzoru může mít do jisté míry opotřebení jeho povrchu, oxidace nebo laminovaná vrstva fólie. Pro určení citlivosti se využívají tři základní metody kalibrace impaktních senzorů – metoda zlomení tuhy, kyvadlová metoda a metoda pádu kuličky²⁷.

Cílem této kapitoly je získat, za pomoci kalibrační metody, průběh elektrického napětí vzniklého ho na PVDF senzoru. Pomocí těchto dat lze následně určit citlivost filmu. Pro tento účel byla sestavena kalibrační trať, na které se kalibrace prováděla. Celý experiment probíhal na půdě Katedry energetických zařízení, konkrétně v Laboratoři vícefázového proudění a kavitace, která slouží mimo jiné i pro zkoumání kavitačního děje.

6.1 Metoda zlomení tuhy

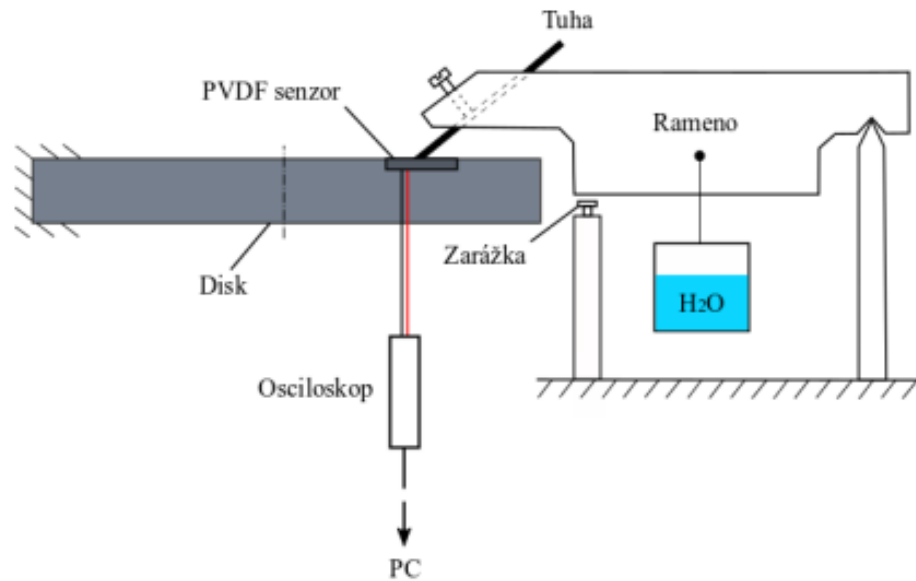
Tato metoda spočívá v postupném zatěžování kalibrovaného senzoru a jeho okamžitým uvolnění. Zatížení zde způsobuje síla vyvolaná tuhou. Velikost této síly koriguje nádoba s vodou, která je připevněna k rameni s tuhou. Tuha, působící na ploše senzoru, se v určitý moment zlomí a vyvolá tak skokovou změnu zatížení (odlehčení). Důsledkem odlehčení vzniká na senzoru elektrické napětí, jehož průběh je následně zpracován v závislosti na vyvinuté síle²⁸.

Tato metoda se preferuje z hlediska nejbližší časové reakce na změnu zatížení (7 - 8 μ s), jelikož ostatní metody se pohybují v řádech desítek μ s. Na druhou stranu s sebou nese řadu nevýhod, počínaje nákladnějším zřízením kalibrační trati až po kvalitu a spotřebu uhlíkových tuh, které jsou zapotřebí pro kalibraci²⁹.

²⁷ [10] HUJER, Jan. Studie kolapsu kavitačních bublin a jejich struktur v blízkosti povrchů. Liberec: TUL, 2020. s. 53.

²⁸ Tamtéž, s. 53-54.

²⁹ Tamtéž, s. 53.



Obrázek 30: Metoda zlomení tuhy [10]

6.2 Kyvadlová metoda

Kyvadlová metoda využívá principu impulsové věty, díky které lze vypočítat střední hodnotu síly F_{konst} , kterou těleso (kovová kulička) vyvine na povrch senzoru při dopadu v průběhu kyvu. Výpočtu střední síly dosáhneme za předpokladu, že kalibrační těleso o dané hmotnosti m_K , má v místě A (místo dopadu) rychlost v_{K1} v čase t_{K1} a v místě B (místo odrazu) rychlost v_{K2} v čase t_{K2} ³⁰. Rozdíl časů t_{K2} a t_{K1} lze označit jako délku trvání kalibračního děje $\Delta\tau$.

$$F_{\text{konst}} = \frac{m_K}{t_{K2} - t_{K1}} (v_{K1} + v_{K2}) = \frac{m_K}{\Delta\tau} (v_{K1} + v_{K2}) \quad (4)$$

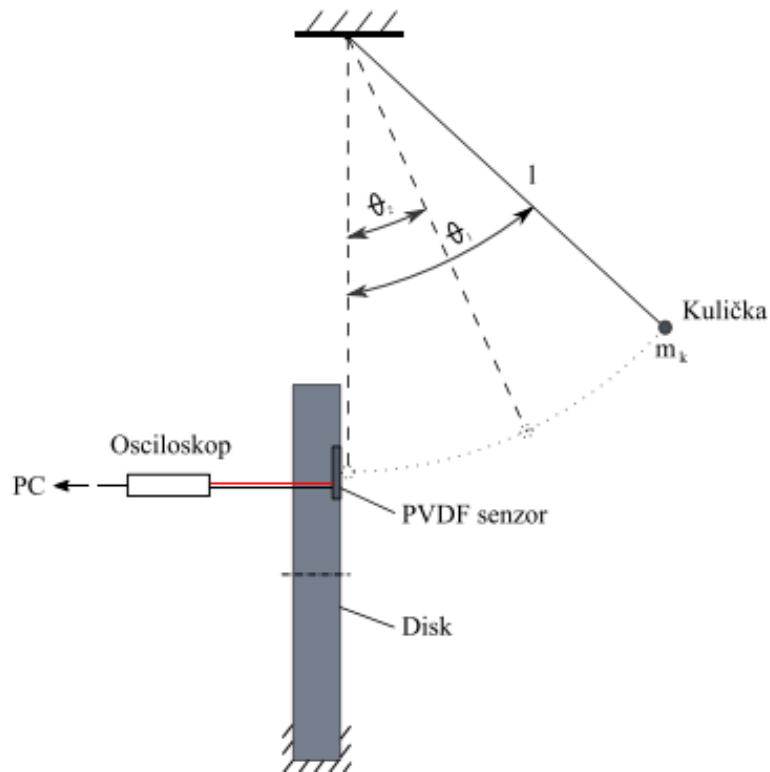
Při kyvadlové metodě se kalibrační kovová kulička, zavěšená na tenkém laně, spustí z pozice o počátečním úhlu θ_1 na kalibrovaný senzor, jenž je připevněný na svisle stojící desku. Kulička se po odrazu, od kalibrovaného senzoru, odrazí do polohy definované koncovým úhlem θ_2 . Aplikací energetické bilance lze odvodit vztah pro rychlost³¹:

$$v_{K1} = \sqrt{2gl(1 - \cos \theta_1)}, \quad v_{K2} = \sqrt{2gl(1 - \cos \theta_2)} \quad (5), (6)$$

³⁰ [10] HUJER, Jan. Studie kolapsu kavitačních bublin a jejich struktur v blízkosti povrchů. Liberec: TUL, 2020. s. 54.

³¹ Tamtéž, s. 54.

kde: g je tíhové zrychlení na povrchu Země [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]
 l je délka tenkého lana [m]



Obrázek 31: Kyvadlová metoda [10]

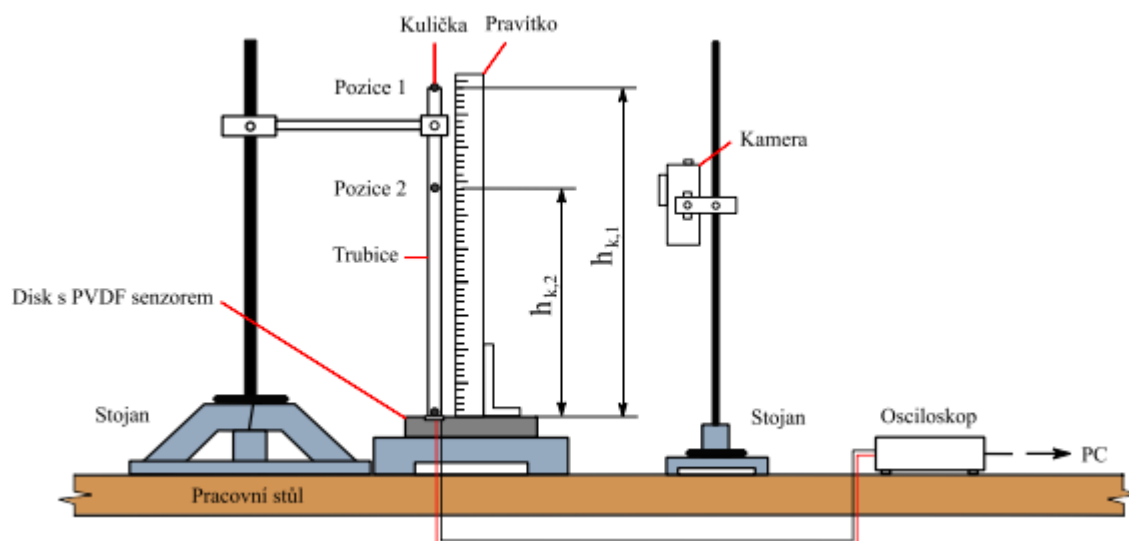
6.3 Metoda pádu kuličky

Tato metoda vychází ze stejného principu užití impulsové věty, jako metoda předchozí. Na rozdíl od kyvadlové metody je zde kalibrační těleso (ložisková kulička) spuštěno z výšky h_{K1} , odpovídající vrcholu plastové vodící trubice. Těleso dopadá volným pádem na kalibrovaný senzor, který důsledkem vyvinuté deformační síly zaznamená průběh elektrického napětí. Následně dojde k odrazu kalibrační kuličky do výše h_{K2} , která se odečte na výškové stupnici vodící trubice (nebo pomocí pravítka). Pro zjištění výšky h_{K2} je zapotřebí kamery s vysokou hodnotou snímkové frekvence (FPS), jelikož běžná snímací rychlost nestačí na zachycení polohy kuličky h_{K2} . Výpočet střední síly F_{konst} se provádí obdobně jako u kyvadlové metody (4). Jediný rozdíl v rovnici zastupuje vyjádření rychlosti kalibračního tělesa³²:

³² [10] HUIER, Jan. Studie kolapsu kavitačních bublin a jejich struktur v blízkosti povrchů. Liberec: TUL, 2020. s. 55.

$$v_{K1} = \sqrt{2gh_{K1}}, \quad v_{K2} = \sqrt{2gh_{K2}} \quad (7), (8)$$

V rámci experimentu bakalářské práce byla zvolena tato metoda kalibrace senzoru. Důvodem je snadná proveditelnost a osvědčenost mezi zbývajícími metodami (zlomení tuhy, kyvadlové). V upřednostnění před kyvadlovou metodou, hraje podstatnou roli lanko, na kterém je kulička upevněna. To totiž přináší do experimentální části jisté neznámé, jako například spojení mezi kuličkou a lankem nebo tuhost lanka samotného³³.



Obrázek 32: Metoda pádu kuličky [10]

6.4 Kalibrační kulička a kalibrační trať

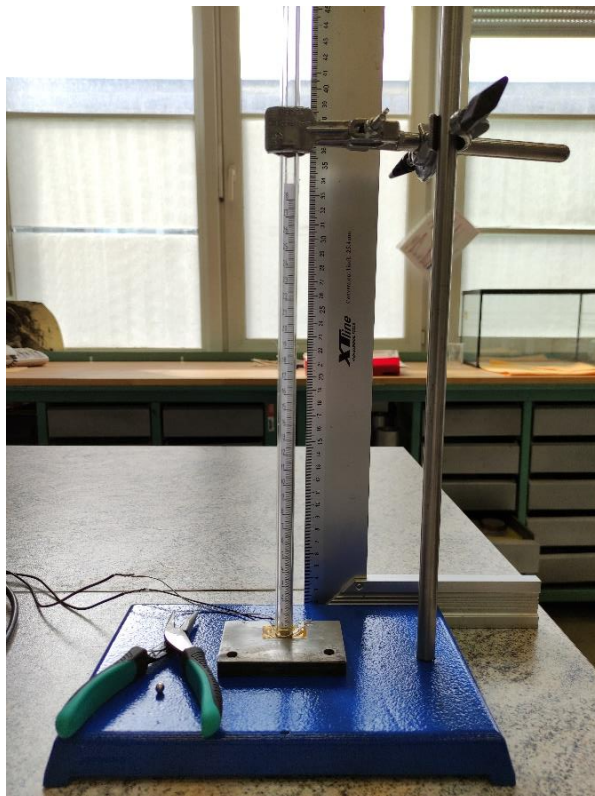
Při aplikaci metody pádu kuličky hraje podstatnou roli hmotnost kalibrační kuličky. Pro naše účely kalibrace PVDF senzoru jsou použity čtyři rozdílné kalibrační kuličky o různých hodnotách hmotnosti (tabulka 3). Počet hodů (kalibračních vzorků) pro každou kalibrační kuličku byl stanoven na pět. Základní parametry kuliček byly změřeny za pomoci laboratorních měřících přístrojů (digitální posuvné měřítko, laboratorní váha). Další vliv na výsledný průběh elektrického napětí, vzniklého na kalibrovaném PVDF senzoru, má výška vodící trubice, jenž je součástí sestavy kalibrační trati. Kalibrační trať je sestavena za účelem provedení kalibrační metody pádu kuličky, při zachování stejných podmínek pro každý hod kalibrační kuličky. Vrchol vodící trubice se nachází ve výšce 400 mm (h_{K1}) nad kalibrační destičkou. Vodící trubice obsahuje délkovou měřicí stupnici a je připevněna pomocí ramene k ocelovému stojanu. Za použití pravouhlého pravítka je zaručena kolmost vedení kalibrační trati vůči kalibrační destičce.

³³ [10] HUJER, Jan. Studie kolapsu kavitacních bublin a jejich struktur v blízkosti povrchů. Liberec: TUL, 2020. s. 55.

Tabulka 3: Parametry kalibračních kuliček

Kalibrační kuličky		
Pořadí kuličky	Průměr kuličky d_K [mm]	Hmotnost kuličky m_K [g]
1.	3,87	0,270
2.	4,66	0,458
3.	4,89	0,515
4.	5,46	0,750

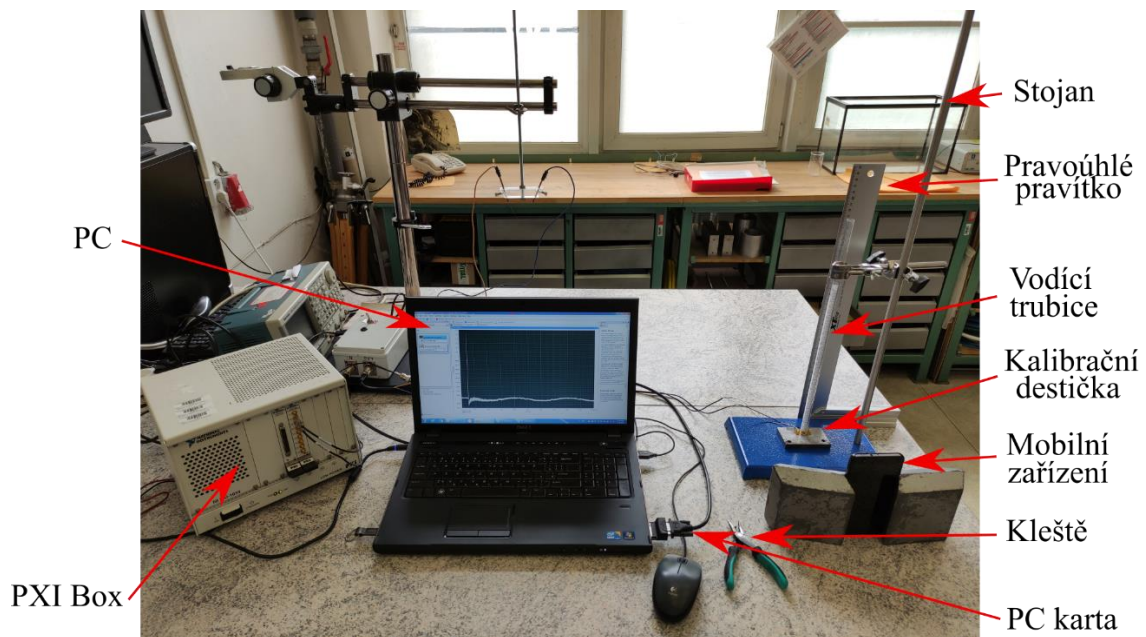
V momentě, kdy je kontrola kolmosti trubice zajištěna, lze považovat kalibrační trať za připravenou k procesu kalibrace. S kalibrační kuličkou manipulujeme pomocí plochých kleští. Při spuštění kuličky, na počátku jednotlivé kalibrace, opřeme čelisti kleští o vrchol vodící trubice. Díky tomu dosáhneme vždy stejné počáteční výšky (h_{K1}). Pád kuličky se zaznamenává na mobilní zařízení, které se nachází před kalibrační tratí v poloze, jenž zabírá objektivem číselnou stupnici vodící trubice. Pozici kuličky po odrazu od kalibrovaného senzoru vyhodnotíme ze záznamu.



Obrázek 33: Kalibrační trať

6.5 Kalibrační sestava

Abychom získali naměřená data ze senzoru, je nutné propojit nejdříve počítač s PXI boxem a PXI box s vodiči PVDF senzoru. Ke spojení PVDF senzoru s PXI boxem dochází za užití dřívě připájeného koaxiálního kabelu. Koaxiální kabel disponuje koncovkou BNC, jenž je propojena s kabelem vstupujícím do osciloskopické karty. Osciloskopická karta slouží pro zaznamenávání signálu a je součástí PXI boxu, ze kterého poté vede datový kabel s PC kartou digitalizovaný signál do počítače. Počítačem přijatý digitalizovaný signál je dále zpracováván ve virtuálním prostředí programu NI Signal Express.



Obrázek 34: Kalibrační sestava

Ve virtuálním prostředí použijeme virtuální přístroj pro měření elektrického napětí NI Scope, jenž spustí Step Setup rozhraní, kde si blíže specifikujeme parametry měření. V našem případě jsme si zde nastavili, prostřednictvím záložky Configuration, z jakého kanálu PXI boxu chceme přijímat signál do počítače, vzorkovací frekvenci, rozsah zaznamenaného elektrického napětí nebo délku zaznamenávání dat. Na další záložce s názvem Trigger, je možné nastavit podmínky startu snímání elektrického napětí na PVDF senzoru. Nastavuje se zde například, jak dlouho bude program reagovat na změny elektrického napětí na senzoru, během jednoho cyklu měření. Dále zde můžeme nastavit trigger měření (reakce na hranu), při čemž lze ovlivnit, jaké procento dat se před touto reakcí uloží do již zmiňované délky zaznamenávání dat. Veškerá přednastavená data jsou zaznamenána v tabulce 4. Díky záložce Data View lze v programu nastavit detailnější náhled naměřených dat kalibrace. Naměřená data z každého kalibračního pokusu byla uložena do textového souboru a dále zpracována prostřednictvím programu MATLAB R2020b.

Tabulka 4: Nastavené parametry v programu NI Signal Express

NI Signal Express	
Parametr	Hodnota
Zařízení	PXI1 Slot3 (PXI-5105)
Kanál osciloskopické karty	Kanál 2 (zvolen)
Rozsah elektrického napětí	20 V
Elektrický proud	Stejnoseměrný
Vzorkovací frekvence	1 M (1000000 Hz)
Délka zaznamenávání dat	150000 vzorků
Typ reakce na změnu	Reakce na pozitivní hranu při skokové změně 100 mV
Referenční pozice	10 % z celku dat zaznamenaných před skokovou změnou
Doba snímání signálu	15 s

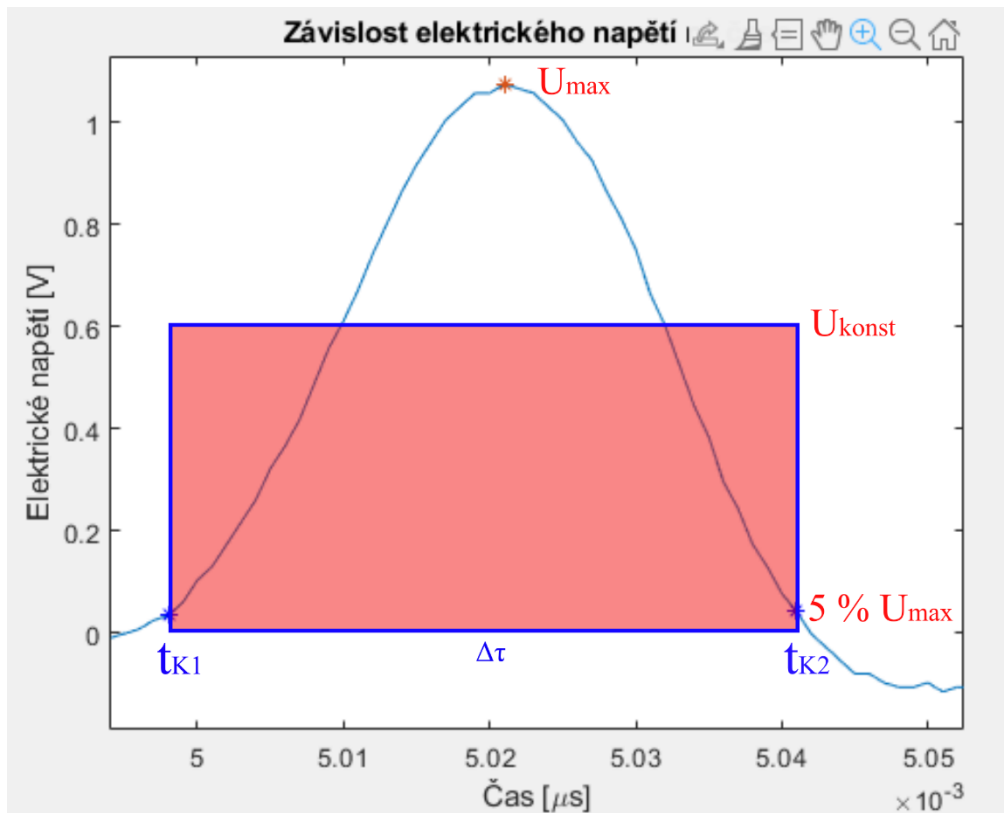
6.6 Výsledky kalibrace

Výstupem kalibrace je kalibrační závislost $F = f(U)$ popisující citlivost PVDF filmu. Z měření kalibrace jsme zjistili, že průběh elektrického napětí v čase se při kontaktu kuličky se senzorem mění. Podobný průběh nastává i v případě sil, které při dopadu kuličky na senzor, mění svou velikost. Z těchto dvou faktů lze uvažovat jistou spojitost mezi veličinami, proto dále budeme považovat maximální elektrické napětí (U_{\max}) jako funkci se závislostí na maximální působící síle (F_{\max}). Hodnotu maximálního elektrického napětí lze získat pomocí jednoduchého příkazu v programu MATLAB. Pro výpočet maximální síly je potřeba zjistit hodnotu podílu mezi konstantním elektrickým napětím (U_{konst}) a maximálním elektrickým napětím U_{\max} . U_{konst} je rovna číselné hodnotě vztahu (9).

$$U_{\text{konst}} = \frac{1}{\Delta\tau} \int_{t_{K1}}^{t_{K2}} U(t) dt \quad (9)$$

K integraci dochází v časových mezích t_{K1} a t_{K2} , které označují počátek a konec signálu. Výsledek integrovaného signálu elektrického napětí se poté dělí celkovou dobou působení síly $\Delta\tau$. Pro určení mezí t_{K1} a t_{K2} je potřeba definovat smluvní hodnotu počátku vyvolaného signálu. V našem případě je tato hodnota rovna 5 % z U_{\max} . Na obrázku 35 je vyobrazen jeden z naměřených kalibračních signálů s přiblížením aplikace výpočtu konstantního elektrického napětí. Pro

kalibraci byla použita kulička o průměru $d_K = 4,89$ mm a hmotnosti $m_K = 0,515$ g. Kalibrační kulička byla spuštěna z výšky $h_{K1} = 400$ mm a po odrazu vystoupala do výšky $h_{K2} = 102$ mm.

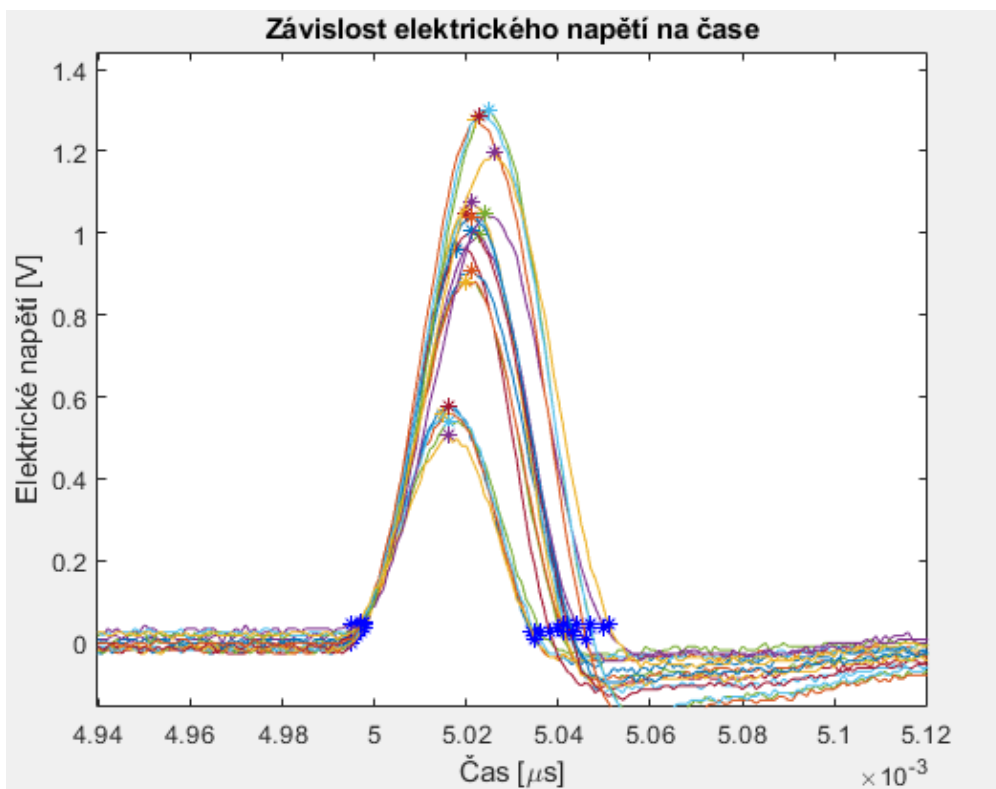


Obrázek 35: Naměřený signál kalibrace (zpracovaný v programu MATLAB)

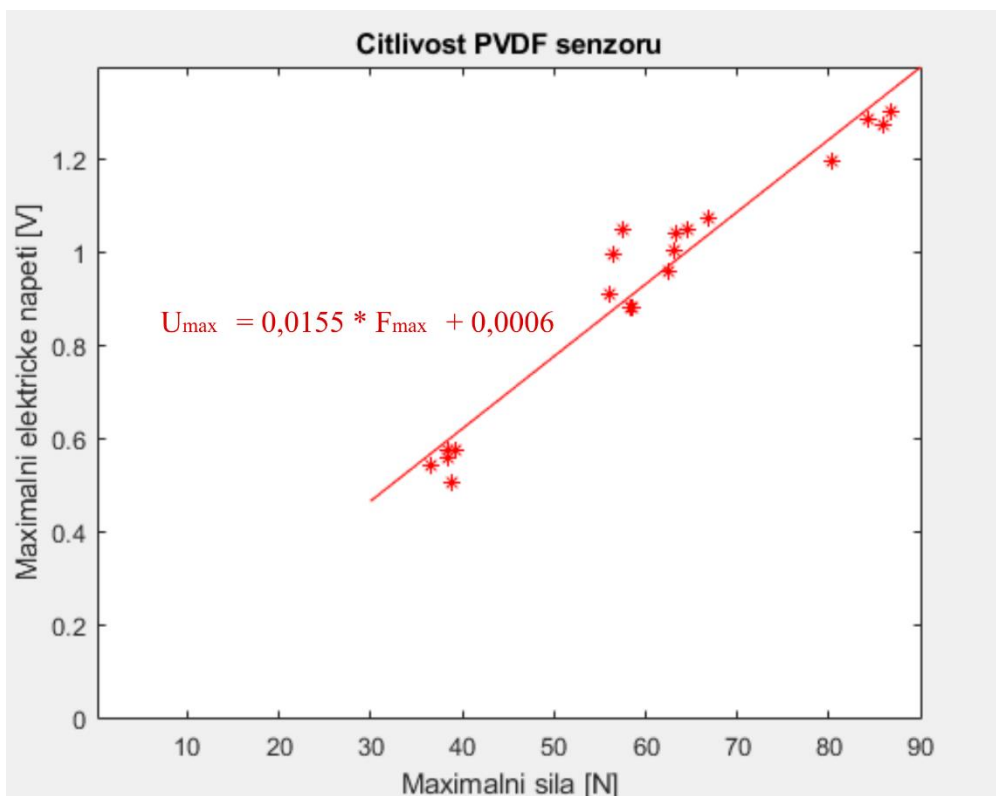
Po vypočtení podílu mezi U_{konst} a U_{max} , získáváme hodnotu poměru u_k (průměrně $u_k = 0,558$), jenž bude nadále sloužit pro analogickou aplikaci výpočetního vztahu mezi podílem F_{konst} a F_{max} . Hodnotu F_{konst} lze dopočítat pomocí dříve definovaných vztahů (4), (7) a (8).

$$F_{konst} = \frac{m_K}{\Delta\tau} (v_{K1} + v_{K2}) = \frac{m_K}{\Delta\tau} (\sqrt{2gh_{K1}} + \sqrt{2gh_{K2}}) \quad (10)$$

Výpočtem vztahu $F_{max} = F_{konst}/u_k$ dostáváme výslednou hodnotu maximální působící síly. Citlivost PVDF filmu se poté stanoví aplikací lineární regrese. Pro výše prezentovaný signál vyšla hodnota $u_k = 0,562$ a $F_{max} = 66,91$ N. Tento postup byl pomocí programu zrealizován pro všechny datové soubory, které jsme při kalibraci PVDF senzoru pořídili. Lineární regresi všech kalibračních měření byla zjištěna hodnota kalibrační závislosti: $F_{max} = (U_{max} - 0,0006) / 0,0155$. Z těchto výsledků byl následně vytvořen bodový graf, který byl proložen přímkou lineární regrese (obrázek 37). Nejvyšší působící síla dosahovala velikosti 87 N.



Obrázek 36: Průběh elektrického napětí na kalibrovaném senzoru



Obrázek 37: Citlivost PVDF senzoru

6.7 Použitá zařízení

Obsah této podkapitoly je věnován popisu všech použitých zařízení při kalibraci PVDF senzoru. Opět zde budou zmíněna pouze zařízení, případně jejich příslušenství, která slouží výhradně k našim účelům.

Mobilní zařízení Xiaomi POCO X3 NFC

Použité mobilní zařízení spadá do skupiny moderních chytrých telefonů. Xiaomi POCO X3 disponuje fotoaparátem o rozlišení 64 Mpix. Pro naše účely byla využita funkce s názvem „Zpomalení“, jenž je součástí základního rozhraní fotoaparátu. Nastavením položky FPS lze dosáhnout maximální dosažitelná snímkové frekvence 960 snímků za sekundu, při maximálním rozlišení videa ve Full HD (1080p).

PXI box NI PXI-1033 a osciloskopická karta NI PXI-5105

PXI box slouží jako zařízení pro dálkové ovládání aplikací, jenž zpracovávají naměřená data. Tyto data jsou PXI boxem odesílána do počítače, kde jsou za pomoci speciálního programu zpracována. Data jsou zaznamenána pomocí sběrnic PCI (Peripheral Component Interconnect), které představují zásuvné měřicí moduly. PXI box NI PXI-1033 obsahuje 5 slotů pro zásuvné moduly. V našem případě byl ke sběru dat použit druhý modul, který představovala osciloskopická karta NI PXI-5105. Osciloskopická karta obsahuje 8 vstupních kanálů pro kabely s koncovkou SMB a 12 bitový A/D převodník. Pro záznam dat dosahuje maximální vzorkovací frekvence 60 MS/s při rozsahu citlivosti 12,2 μV až 7,3 mV. Frekvenční pásmo lze nastavit od 0 Hz do 60 MHz. Pro komunikaci s počítačem slouží již dříve zmiňovaná PC karta NI ExpressCard 8360, která je zasunutá do modulu na zadní straně PXI boxu. Veškeré ovládání PXI boxu se provádí pomocí programu LabVIEW SignalExpress 2012³⁴.

Laboratorní váha KERN PBS/PBJ a digitální posuvné měřítko Mitutoyo

Laboratorní váha měří hmotnost kalibrační kuličky s přesností na 0,01 g. Digitální displej však umožňuje zobrazit orientační hodnotu hmotnosti. Orientační hodnota se pohybuje v jednotkách miligramů a je vyobrazena v závorce. Kalibrační kulička se pokládá na kovový podstavec. Digitální posuvné měřítko slouží ke změření průměru kalibrační kuličky s přesností $\pm 0,02$ mm.

³⁴ [7] HUJER, Jan. Mechanizmy kolapsů kavitačních bublin v blízkosti pevných povrchů. Liberec: TUL, 2013. Diplomové práce. s. 39-40.



Obrázek 38: PXI box



Obrázek 39: Osciloskopická karta [15]



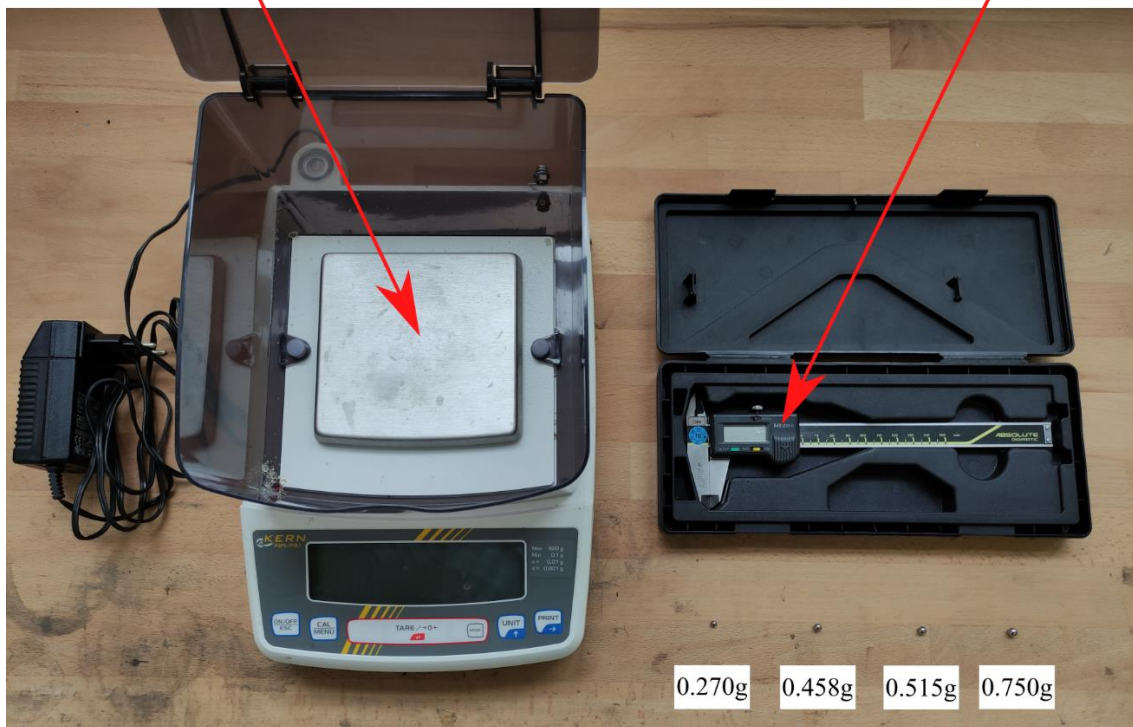
Obrázek 40: Koncovka SMB



Obrázek 41: Počítačová karta

Laboratorní váha

Digitální posuvné měřítko



Obrázek 42: Laboratorní váha a digitální posuvné měřítko

6.8 Vyhodnocení kalibrace

Podkapitola vyhodnocení kalibrace je určena k představení již vzniklých studií v oblasti kalibrace PVDF senzorů. Cílem je porovnat výsledky, kterých jsme při kalibraci dosáhli a seznámit tak čtenáře s více druhy výsledků.

Wang a Chen (2007)

Wang a Chen se ve své studii rozhodli aplikovat průmyslově vyráběný PVDF senzor (typu DT1-028K/L w/rivets od firmy Measurement Specialties Inc.) při měření impaktních sil. Tyto síly vyvinula generovaná kavitační bublina v blízkosti pevné stěny. Kalibraci PVDF senzoru o rozměrech 12 x 30 mm a tloušťce 28 μm prováděli pomocí kyvadlové metody. Při kalibraci použili tři různé kalibrační kuličky (0,511 g; 1,050 g; 2,099 g) na dva totožné PVDF senzory. Pro dosažení vodotěsnosti a vyšší odolnosti byl kalibrovaný senzor překryt izolační vrstvou polypropylenové pásky tloušťky 50 μm . Pohyb kyvadla zaznamenávala CCD vysokorychlostní kamera. Výsledkem bylo dosažení stejné hodnoty citlivosti 0,013 V/N, kterou udává i výrobce. Z tohoto výsledku je patrné, že jedna vrstva polypropylenové pásky nemá vliv na citlivost senzoru³⁵.

Hujer (2019)

Hujer se ve své disertační práci věnuje kalibraci průmyslově vyrobeného PVDF senzoru (typ opět DT1-028K/L w/rivets od firmy TE Connectivity, jenž je nástupcem firmy Measurement Specialties Inc.), jenž byl zkrácen na rozměr 1,5 x 12 mm a připevněn na ocelovou destičku. V rámci kalibrace je zde použita metoda pádu kuličky. Kalibrace senzoru se v této práci provádí dvakrát – před podrobením senzoru kavitační erozi a po něm. Rozměry a tloušťka kalibrovaného senzoru jsou totožné jako případě senzoru Wang a Chen. Pro kalibraci byly použito pět kalibračních kuliček o hmotnosti 0,440 g; 0,700 g; 1,046 g; 1,398 g; 2,040 g. Senzor byl překryt vrstvou epoxidového lepidla o tloušťce 1 mm. Hodnota citlivosti PVDF senzoru před vystavením kavitačním účinkům byla rovna 0,017 V/N a po vystavení byla 0,018 V/N³⁶.

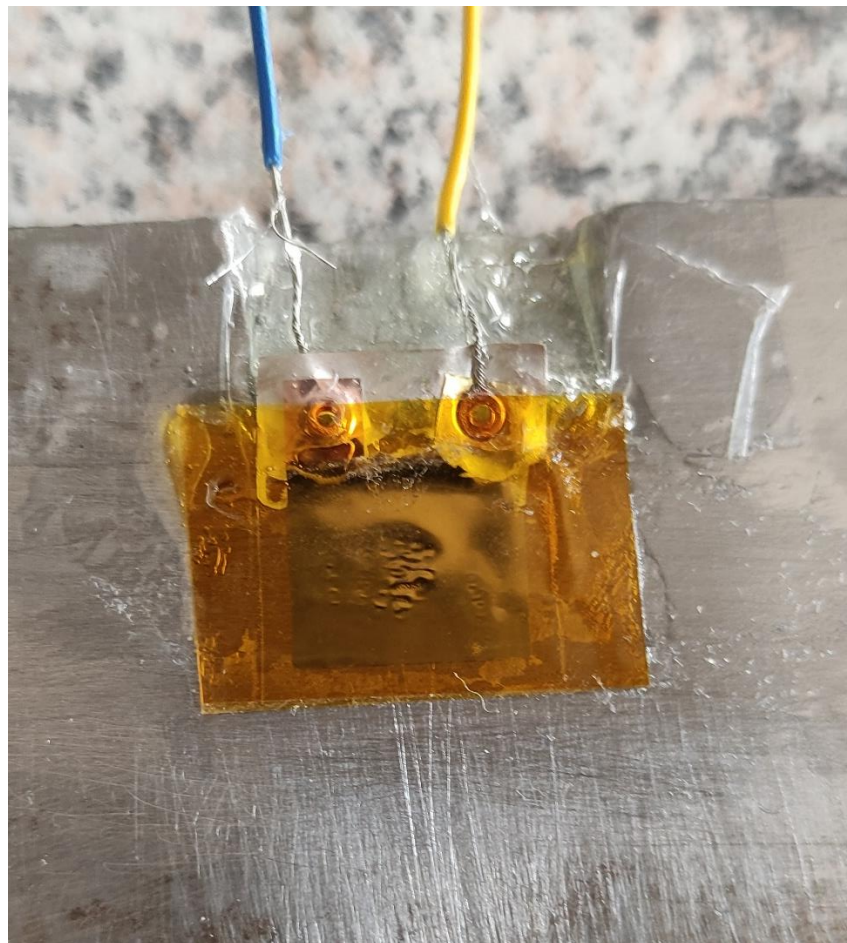
Citlivost fotalitograficky vyrobeného PVDF filmu lze pro srovnání s ostatními výsledky jednoduše určit z kalibrační závislosti při nezahrnutí posuvu, její hodnota je pak 0,016 V/N. Citlivost se spíše blíží k hodnotám průmyslově vyráběného PVDF senzoru od firmy TE Connectivity (stejná firma od které je i náš film). Jistý vliv na podobné výsledky, kterých dosáhl Hujer při kalibraci, má i použití stejné kalibrační metody pádu kuličky. Při měření citlivosti jsme použili

³⁵ [17] Wang, Y. C. & Chen, Y. W. *Application of piezoelectric PVDF film to the measurement of impulsive forces generated by cavitation bubble collapse near a solid boundary*. 2007. s. 405-407.

³⁶ [10] HUIJER, Jan. *Studie kolapsu kavitačních bublin a jejich struktur v blízkosti povrchů*. Liberec: TUL, 2020. s. 55

jednu vrstvu kaptonové izolační pásky, obdobně jako Wang a Chen použili polypropylenovou pásku.

Důsledkem kalibrace kuličkou o hmotnosti 0,750 g, začalo docházet k trvalé deformaci senzoru. V místech dopadu se začaly objevovat miniaturní důlky. Použitím kalibračních kuliček o vyšších hmotnostech (0,875 g; 1,038 g) došlo již ke vzniku dutin (obrázek 43). Naměřená data z pádů kuličkou $m_K = 0,750$ g jsou tudíž diskutabilní. Jejich naměřený průběh signálu lze však jednoduše zhodnotit v rámci podobnosti s předchozími naměřenými signály. Z důvodu deformace PVDF senzoru jsme se rozhodli provést kalibraci s přidáním druhé vrstvy kaptonové pásky. Výsledkem byl odolnější senzor, jenž odolal i kalibračním kuličkám o hmotnosti 0,750 g a 0,875 g. Bohužel jsme tímto krokem snížili i citlivost PVDF senzoru, což dokazuje fakt, že dříve zaznamenaný signál od kalibrační kuličky o hmotnosti $m_K = 0,270$ g jsme již po přidání druhé kaptonové vrstvy nenaměřili. Z těchto kroků plyne závěr, že by bylo vhodné nalézt krycí vrstvu, jenž by dostatečně chránila senzor a zároveň by co nejméně snižovala citlivost senzoru. Druhou možností je volba jiné škály hmotností kalibračních kuliček. Zde však je nutno podotknout, že blízké hodnoty hmotností zkreslují výsledný graf signálů a lze tak obtížněji objevit chybně změřený signál.



Obrázek 43: Kalibrací zdeformovaný PVDF senzor

7 Program pro zpracování dat kalibrace

Program pro zpracování dat kalibrace je hlavním výstupem bakalářské práce. Jako software sloužící k tvorbě programu byl zvolen MATLAB. MATLAB je interaktivní programovací jazyk, který lze využít k inženýrským výpočtům, analýze dat, simulacím nebo například k tvorbě algoritmů. V našem případě by program měl sloužit k jednoduché analýze naměřených dat. Uživatel po nastavení adresáře, ze kterého bude MATLAB načítat textové soubory naměřených dat, spustí program a následně bude zadávat hodnoty, jenž po něm bude program vyžadovat. Pro tvorbu programu jsou použity různé programovací příkazy. Tabulka 5 tvoří souhrn všech použitých příkazů a jejich obecné definice.

Tabulka 5: Základní definice použitých příkazů

MATLAB	
Příkaz	Definice
close all	Zavření všech oken
fclose datacell	Zavření otevřeného souboru <i>datacell</i>
clear all	Smazání všech definovaných proměnných
clear datacell	Smazání proměnné s názvem <i>datacell</i>
prompt = '... x: '	Zapsání textu pod dané heslo <i>prompt</i>
x = input (prompt)	Vyvolání žádosti definovat určitou proměnnou pomocí hesla <i>prompt</i>
for i = z : n	Spuštění cyklu proměnné <i>i</i> , který začne na hodnotě <i>z</i> a skončí na hodnotě <i>n</i>
dir ('*.txt')	Uložení veškerých základních dat (název, velikost, datum vytvoření) daného typu (<i>txt</i>)
repmat ('%f', 1, 2)	Definice dvou sloupců (1, 2) tvořených hodnotami různého řádu (%f) jako proměnnou
fopen (a(i).name, 'rt')	Otevření souboru proměnné <i>a</i> a výběr dat pro <i>i</i> člen,
textscan (...)	Přečtení zformátovaných dat a jejich sloučení
data = datacell{1}	Vytvoření matice dat podle souboru <i>datacell</i>
size (data)	Zjištění rozměrů matice <i>data</i>

figure (1)	Vytvoření nového okna s označením <i>l</i>
plot (x,y)	Vykreslení grafu s osou <i>x</i> a <i>y</i>
xlabel ('...')	Popis osy <i>x</i> textem v závorce
ylabel ('...')	Popis osy <i>y</i> textem v závorce
title ('...')	Popis názvu grafu textem v závorce
hold on	Zapnutí přikreslování (grafy, body) do aktuálního grafu
max (data)	Vyhledání maximální hodnoty v souboru <i>data</i>
find (data)	Zjištění indexu a hodnoty ze souboru <i>data</i>
while x > y	Spuštění cyklu s opakováním, dokud platí podmínka
trapz (data)	Spuštění trapézové numerické integrace souboru <i>data</i>
sqrt (x)	Vypočtení odmocniny z <i>x</i>
VarNames = {'...'} 	Popis názvů sloupců v tabulce
uifigure	Opakované vyvolání nového okna
uitable (...)	Vytvoření tabulky dle uživatelského rozhraní
lsline	Přidání přímky lineární regrese do grafu
polyfit (x,y,n)	Lineární regrese pomocí metody nejmenších čtverců
Disp (...)	Vypíše hodnotu do příkazového řádku

7.1 Popis programu

Tato podkapitola je věnována popisu vytvořeného programu v programovacím prostředí MATLAB. V rámci popisu nebudou komentovány opakující se příkazy, obecné příkazy (clear all). Dále nebudou popisovány řádky sloužící pro převody jednotek. Ty se v programu vyskytují z důvodu zjednodušení a urychlení celkové doby zadávání vstupních hodnot. Samotný program je psán i s komentářem v MALABu.

Zadávání vstupních hodnot

V této části programu je uživatel vyzván k zadání vstupních hodnot pro zpracování kalibrace. Mezi tyto hodnoty patří:

- Koeficient pro určení integračních mezí: p [%]

- Snímací frekvence: f [MHz]
- Počáteční výška kuličky (vrchol vodící trubice): h_{K2} [mm]
- Počet kalibračních kuliček: o [-]

```

1 close all
2 clear all

3 prompt='Zadejte koeficient pro urceni meze integrace: p[%]= ';
4 p=input(prompt);
5 p=p/100;

6 prompt='Zadejte frekvenci snimani: f[MHz]= ';
7 f=input(prompt);
8 f=f*1000000;

9 prompt='Zadejte pocatecni vysku kulicky: hk2[mm]= ';
10 hk2=input(prompt);
11 hk2=hk2/1000;

12 prompt='Zadejte pocet kalibracnich kulicek: o[-]= ';
13 o=input(prompt);

```

Zdrojový kód 1: Zadávání vstupních hodnot

Specifikace parametrů jednoho kalibračního hodu

Spuštěním cyklu „j“ začíná smyčka příkazů, která se zopakuje pro každou kalibrační kuličku, kterou při kalibraci použijeme (počet udává proměnná „o“). Opět zde definujeme proměnnou. Tentokrát pro kalibrační kuličku, která bude sloužit pro smluvených pět hodů. Následuje vytvoření proměnné „a“, jenž představuje všechny textové soubory v námi definovaném adresáři. Nakonec je potřeba definovat první a poslední pozici dat v adresáři. Tyto pozice poté přiřazují textové soubory signálů ke kuličkám, které signál vytvořily.

```

14 for j=1:o
15 prompt='Zadejte hmotnost kulicky: m[g]= ';
16 m=input(prompt);
17 m=m/1000;

18 a=dir('*.txt');

19 prompt='Zadejte poradi prvnioho souboru hodnot: z[-]= ';
20 z=input(prompt);

21 prompt='Zadejte poradi posledniho souboru hodnot: n[-]= ';
22 n=input(prompt);

```

Zdrojový kód 2: Specifikace parametrů jednoho kalibračního hodu

Načtení textových dat a vykreslení signálu do grafu

Spuštěním cyklu „i“ začíná smyčka příkazů, která se zopakuje pro každý hod kalibrační kuličky. Poté je pomocí příkazů (definovaných v tabulce 5) vyvolán textový soubor z proměnné „a“ s pořadovým číslem „i“ a je z něj vytvořena matice od dvou sloupcích. Na programovém řádku 30 až 33 je vytvořen třetí sloupec, který zastupuje časovou periodu. Nakonec je vytvořen graf, jenž má na ose x časovou periodu dT a na ose y hodnoty elektrického napětí (viz obrázek 36).

```
23 for i=z:n
24     fmt= repmat('%f',1,2);
25     fid=fopen(a(i).name, 'rt');
26     datacell=textscan(fid, fmt, 'Delimiter', ',', 'HeaderLines', 22,
27     'CollectOutput', 1);
27     fclose(fid);
28     data=datacell{1};
29     clear datacell
30
30     size(data);
31     [r,s]=size(data);
32     dT=1/f;
33     data(:,3)=(0:dT:(r-1)*dT);
34
34     figure(1)
35     plot(data(:,3),data(:,2));
36     xlabel('Cas [\mus]')
37     ylabel('Elektricke napeti [V]')
38     title('Zavislost napeti na case')
39
39     hold on
```

Zdrojový kód 3: Načtení textových dat a vykreslení signálu do grafu

Hledání maximálního elektrického napětí a integračních mezí

Jako první krok je potřeba určit maximální hodnotu elektrického napětí pomocí příkazu, jenž vyhledá nejvyšší číselnou hodnotu ve druhém sloupci dat. Poté, co je U_{\max} nalezeno, vykreslí se bod do dříve vytvořeného grafu (figure 1). Následuje hledání integračních mezí pro určení hodnoty U_{konst} . Při hledání konstanty t_{k1} položíme nejdříve hodnotu indexu periody rovnou indexu U_{\max} a za aplikace proměnné „p“, spustíme cyklus snižování indexu. Cyklus se ukončí v momentě, kdy hodnota elektrického napětí (U_{start}) dosáhne hodnoty 5 % z U_{\max} (p). Opět bod vykreslíme bod do grafu. Analogicky aplikujeme postup i pro hledání integrační meze t_{k2} . Na rozdíl od hledání indexu t_{k1} však zde index přičítáme k hodnotě indexu U_{\max} .


```

40 maximum=max(data(:,2));
41 M=find(data(:,2)==max(data(:,2)));
42 plot(data(M(1),3),data(M(1),2),'*');
43 Umax=maximum;

44 tstart=M(1);
45 Utstart=data(tstart,2);
46 while Utstart>=p*maximum
47 tstart=tstart-1;
48 Utstart=data(tstart,2);
49 end
50 plot(data(tstart,3),data(tstart,2),'b*');
51 tk1=tstart;
52 tstart=tstart/f;

53 tfinish=M(1);
54 Utfinish=data(tfinish,2);
55 while Utfinish>=p*maximum
56 tfinish=tfinish+1;
57 Utfinish=data(tfinish,2);
58 end
59 plot(data(tfinish,3),data(tfinish,2),'b*');
60 tk2=tfinish;
61 tfinish=tfinish/f;

```

Zdrojový kód 4: Hledání maximálního elektrického napětí a integračních mezí

Výpočet maximální vyvinuté síly

Pro výpočet maximální vyvinuté síly aplikujeme výpočet, který byl sepsán v podkapitole 6.6. Zadáním poslední proměnné hk_1 poté získáváme z dříve uvedených vzorců hodnoty U_{konst} , F_{konst} , u_k . Z těchto proměnných poté dopočítáme výslednou hodnotu maximální vyvinuté síly F_{max} .

```

62 deltaTau=tfinish-tstart;
63 Ukonst=trapz(data(tinta:1:tintb,2))*dT/(deltaTau);

64 prompt='Zadejte vysku odrazu kulicky: hk1[mm]= ';
65 hk1=input(prompt);
66 hk1=hk1/1000;
67 g=9.81;
68 deltav=sqrt(2*g*(hk1+hk2));
69 Fkonst=(m*deltav/deltaTau);

70 uk=Ukonst/Umax;
71 Fmax=Fkonst/uk;
72 K=Umax/Fmax;

```

Zdrojový kód 5: Výpočet kalibrační konstanty

Vytvoření tabulky výsledků a bodového grafu kalibrační závislosti

Tabulka naměřených a vypočtených hodnot nese název „VYSLEDKY“ a jsou v ní sepsány všechny proměnné, které jsou k vidění mezi řádky 73 až 87. Zaznamenáním těchto výsledků končí cyklus „i“ a následuje vytvoření samostatného okna s průběžnými výsledky, které se po každé vyhodnocené kuličce otevře v MATLABu. Toto okno se skládá z nadefinovaných sloupců hodnot, jež jsou popsány řádky 88 až 91. Vytvořením tohoto okna končí cyklus „j“. V poslední části programu je vykreslen bodový graf, který vyobrazuje kalibrační závislost senzoru a je proložen přímkou lineární regrese (viz obrázek 37). Výsledná hodnota kalibrační závislosti je poté vypsána v příkazovém řádku.

```
73 VYSLEDKY(i,1)=m;
74 VYSLEDKY(i,2)=tstart;
75 VYSLEDKY(i,3)=tfinish;
76 VYSLEDKY(i,4)=deltaTau;
77 VYSLEDKY(i,5)=Utstart;
78 VYSLEDKY(i,6)=Utfinish;
79 VYSLEDKY(i,7)=Umax;
80 VYSLEDKY(i,8)=Ukonst;
81 VYSLEDKY(i,9)=uk;
82 VYSLEDKY(i,10)=hk2;
83 VYSLEDKY(i,11)=hk1;
84 VYSLEDKY(i,12)=deltav;
85 VYSLEDKY(i,13)=Fkonst;
86 VYSLEDKY(i,14)=Fmax;
87 VYSLEDKY(i,15)=K;
88 end

89 VarNames={'hmotnost [kg]', 'tstart [μs]', 'tfinish [μs]',
90 'deltaTau [μs]', 'utstart [V]', 'utfinish [V]', 'umax [V]',
91 'ukonst [V]', 'poměr k [-]', 'hk2 [m]', 'hk1 [m]', 'deltav [m/s]',
92 'Fkonst [N]', 'Fmax [N]', 'kalibracni konstanta K [-]'};
93 q=uifigure(j);
94 V=uitable(q,'data',VYSLEDKY,'columnname',VarNames);

95 j=j+1;
96 end

97 figure(2)
98 plot(VYSLEDKY(:,14),VYSLEDKY(:,7),'r*');
99 xlabel('Maximalni sila [N]')
100 ylabel('Maximalni elektricke napeti [V]')
101 title('Citlivost PVDF senzoru')
102 lsline
103 P=polyfit(VYSLEDKY(:,14),VYSLEDKY(:,7),1);
104 disp(['Fmax=(Umax - ' num2str(P(2)) ') / ' num2str(P(1))])
```

Zdrojový kód 6: Tvorba tabulky a grafu kalibrační závislosti

8 Závěr

Bakalářská práce se zabývá problematikou kalibrace piezoelektrického fotolitograficky vyrobeného PVDF senzoru, jenž je navržen pro měření impaktních sil způsobených kolabující kavitační bublinou. Úvodní část práce seznamuje čtenáře s principem a výskytem kavitačního jevu v hydraulických zařízeních. Čtenář si tak může udělat stručnou představu o současných poznatcích této nežádoucí problematiky. Následující rešeršní část se zabývá tématem PVDF senzorů pro impaktní měření. Zde je sepsán hlavní princip funkce PVDF senzorů, historie vývoje tohoto piezoelektrického polymeru a nakonec popis průmyslově vyráběného filmu včetně jeho vlastností. V další části je zdokumentována fotolitografická výroba PVDF senzoru v laboratoři pro výrobu desek plošných spojů. Tato kapitola obsahuje jak stručné objasnění principů fotolitografie, tak i podrobné sepsání celého výrobního procesu – laminování, expozice, vyvolávání, leptání a louhování PVDF senzoru. Pro možnost přenášení naměřeného elektrického signálu do počítače, je následující kapitola věnována přípravě senzoru na kalibrační měření. V rámci této kapitoly jsou k senzoru připojeny elektrické vodiče a následně je celý sensor připevněn na kalibrační destičku pomocí lepicích prostředků. Experimentální část bakalářské práce se poté zabývá kalibrací fotolitograficky vyrobeného PVDF senzoru za použití metody pádu kuličky. Tato kapitola obsahuje v první řadě rešerši z oblasti aplikovaných kalibračních metod, sestavení kalibrační trati a propojení s kalibrační sestavou. V druhé řadě je zde provedena kalibrace PVDF senzoru se zaznamenáním výsledků a principu, díky kterému vznikly. Z těchto výsledků se poté určuje hodnota kalibrační závislosti (citlivosti senzoru). Nakonec jsou výsledky kalibrace zhodnoceny v rámci diskuze a porovnány s již existujícími zdokumentovanými výsledky od jiných autorů. Po této kapitole následuje hlavní část bakalářské práce, kterou je tvorba programu pro vyhodnocování kalibrační závislosti PVDF senzorů pro impaktní měření. Vyhodnocovací program byl vytvořen v programu MATLAB a je celý sepsán i s komentářem v poslední kapitole této práce.

Jak již bylo zmíněno v části vyhodnocení výsledků kalibrace, bylo by užitečné zabývat se nalezením vhodnější krycí vrstvy PVDF senzoru. Vhodná vrstva by senzor chránila před deformací při kalibraci a poškozením od kavitace při měření impaktních sil a zároveň by nesnižovala jeho citlivost. Do budoucna lze uvažovat také nad vytvořením matice PVDF senzorů o miniaturních rozměrech dle požadavku (např. 1 x 1 mm), jenž by sloužila k bližší lokalizaci výskytu kavitační eroze na povrchu hydraulických zařízení.

Seznam použité literatury

- [1] MELICHAR, J. *Úvod do čerpací techniky*. Praha: České vysoké učení technické, 2012. s. 16-23. ISBN 978-80-01-05056-9.
- [2] NOSKIEVIČ, J. *Kavitace*. Praha: Academia, 1969. s. 9-19. ISBN 21-047-69, 509-21-875.
- [3] Kavitace. *Wikiskripta.eu* [online]. Brno: MEFANET, 2021 [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: <https://www.wikiskripta.eu/w/Kavitace>.
- [4] Udržujte své šperky v dokonalé čistotě. *Sperky.cz* [online]. Chrudim: VIVANTIS, 2021 [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: <https://www.sperky.cz/magazin/udrzujte-sve-sperky-v-dokonale-cistote>.
- [5] WHAT IS PUMP CAVITATION AND FOUR WAYS TO PREVENT IT? *Csidesigns.com* [online]. Springfield, MO: Central States Industrial, 2021 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: <https://www.csidesigns.com/blog/articles/what-is-pump-cavitation-and-how-to-prevent-it>.
- [6] JIŘIČEK, V. *Diagnostika kavitace ve vodních čerpadlech: Diagnostic of cavitation in water pumps*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2017. Diplomové práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Miloš Müller.
- [7] HUJER, J. *Mechanismy kolapsů kavitačních bublin v blízkosti pevných povrchů: Mechanisms of cavitation bubble collapses near the solid boundaries*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2013. Diplomové práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Miloš Müller.
- [8] *Piezo Film Sensors Technical Manual*. Measurement Specialties, Inc. Norristown, 1999.
- [9] *METALLIZED PIEZO FILM SHEETS*. Measurement Specialties, Inc., TE Connectivity company. Schaffhausen, 2017.
- [10] HUJER, J. *Studie kolapsu kavitačních bublin a jejich struktur v blízkosti povrchů: Study of the cavitation bubble collapse and the cavitation bubble structures collapse close to surfaces*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2020.
- [11] KRÁTKÝ, S. *Studium vlastností periodických mřížek vytvořených elektronovou litografií*. Brno: Vysoké učení technické, 2010. Bakalářská práce. s. 10.
- [12] TRUHLÁŘ, M. *Příprava polovodičových součástek křemíkovou technologií*. Brno: Masarykova univerzita, 2011. Diplomová práce. s. 25-28.
- [13] Dry Film Laminator. *Bungard.de* [online]. Windeck: Bungard Elektronik GmbH & Co.KG, 2021 [cit. 2021-6-17]. Dostupné z: <https://www.bungard.de/en/machines/dry-film-laminator/rlm-419p-426p>.
- [14] Vacuum exposure unit. *Bungard.de* [online]. Windeck: Bungard Elektronik GmbH & Co.KG, 2021 [cit. 2021-6-17]. Dostupné z: <https://www.bungard.de/en/machines/exposure-units/hellas>.
- [15] PXI-5105. *NI* [online]. Austin: NATIONAL INSTRUMENTS, 2021 [cit. 2021-6-28]. Dostupné z: <https://www.ni.com/cs-cz/support/model.pxi-5105.html>.

- [16] KIM, K. H., CHAHINE, G., FRANC, J.-P. & KARIMI, A. *Advanced experimental and numerical techniques for cavitation erosion prediction*. Dordrecht, Springer. 2014.
- [17] WANG, Y. C. & CHEN, Y. W. *Application of piezoelectric PVDF film to the measurement of impulsive forces generated by cavitation bubble collapse near a solid boundary*. Experimental Thermal and Fluid Science. 2007. s. 32, 403-414.
- [18] GAOFENG, Z., YANMING, L., ZHENGFEN, L., LUJUN, C., SHIRUI G. & HUICHAO, S. *A Flexible Thin Film Single-Point Force Sensor from PVDF Film*. Journal of Modern Mechanical Engineering and Technology. 2018. s. 47-55.
- [19] CONG, J., JING, J., CHEN, C. & DAI, Z. *Development of a PVDF Sensor Array for Measurement of the Dynamic Pressure Field of the Blade Tip in an Axial Flow Compressor*. Sensors. 19 (6). 2019. s. 1404.