

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

MĚŘENÍ ULTRAZVUKOVÝCH POLÍ HLADINOVÝCH SNÍMAČŮ

ULTRASONIC FIELD OF LEVEL SENSORS MEASUREMENT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Radek Hlavatý

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

BRNO 2019

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Radek Hlavatý

ID: 191411

Ročník: 3

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Měření ultrazvukových polí hladinových snímačů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem bakalářské práce je návrh a ověření systému pro měření ultrazvukového pole v okolí ultrazvukového hladinového snímače. Zadání lze shrnout do následujících bodů:

1. Nastudujte problematiku ultrazvukových snímačů hladiny, zpracujte literární průzkum týkající se metod měření vyzařovaného ultrazvukového svazku.
2. Navrhněte a proveďte praktické experimenty s laboratorním skenerem ultrazvukového pole, ověřte opakovatelnost měření na různých vzorcích snímačů, případně i při různých podmínkách měření.
3. Diskutujte dosažené výsledky, hlavní zdroje nejistot a způsoby omezení jejich vlivu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Richard Regazzo - Ultrazvuk, základy ultrazvukové defektoskopie.

BEN - technická literatura (2013), ISBN 9788073004668

Termín zadání: 4.2.2019

Termín odevzdání: 20.5.2019

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Práce se věnuje popisu a měření ultrazvukového pole v okolí piezoelektrických snímačů. Teoretická část slouží jako přehled pro pochopení ultrazvukové problematiky. Blíže zkoumaný je jev útlumu ultrazvukového vlnění. Na závěr teoretické části byly vybrány a popsány 3 odlišné metody měření ultrazvukového pole v prostoru. Náplní praktické části semestrální práce byl popis a zprovoznění měřicího systému dostupného v laboratoři společnosti Continental. Systém využívá pro měření ultrazvukového pole odrazovou metodu. Zároveň byl navrhnout automatizovaný způsob zpracování dat ve formě skriptu v Pythonu a navazujícího makra v Excelu. Testovacími měřeními byly určeny nejistoty a potvrzena opakovatelnost měřených výsledků, které odpovídají fyzikální teorii.

KLÍČOVÁ SLOVA

Ultrazvukové pole, útlum, piezoelektrické snímače, ultrazvukový snímač, mapování ultrazvukového pole.

ABSTRACT

The paper deals with the description of the ultrasonic field around the piezoelectric sensors. The theoretical part serves as an overview for the understanding the ultrasound problematics. More closely studied is the phenomenon of ultrasound wave attenuation. At the end of the theoretical part, three different methods of field measuring were selected and described. The practical part of this work is a more detailed description of the whole measuring system available in the Continental laboratory, that has been put into operation. The system uses a reflection method to measure the ultrasonic field. Automated way of data processing in the form of a script in Python and a macro in Excel was designed. Uncertainties were determined by the test measurements, so was the repeatability of the measured results, that correspond to the physical theory.

KEY WORDS

Ultrasonic field, attenuation, piezoelectric transducers, ultrasonic transducer, ultrasonic field mapping.

Bibliografická citace:

HLAVATÝ, Radek. Měření ultrazvukových polí hladinových snímačů. Brno, 2019, 62 str. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Měření ultrazvukových polí hladinových snímačů jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 20. května 2019

.....
podpis autora

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Petru Benešovi, Ph.D. za vstřícné jednání, odborné vedení a podnětné připomínky k práci.

V Brně dne: 20. května 2019

.....
podpis autora

Obsah

ÚVOD.....	13
1. TEORIE ULTRAZVUKOVÝCH VLN.....	14
1.1 Obecné vlastnosti	14
1.2 Druhy ultrazvukového vlnění.....	14
1.2.1 Podélné vlnění.....	14
1.2.2 Příčné vlnění	14
1.2.3 Rayleighovo vlnění	15
1.3 Základní veličiny pro popis ultrazvukového vlnění.....	15
1.3.1 Rychlost šíření ultrazvukového vlnění.....	15
1.3.2 Vlnová délka	16
1.3.3 Akustický tlak	16
1.3.4 Akustická intenzita a výkon.....	16
1.3.5 Akustická impedance	17
2. FYZIKÁLNÍ CHOVÁNÍ ULTRAZVUKU.....	18
2.1 Odraz	18
2.2 Lom (Refrakce)	18
2.3 Absorpce	19
2.4 Rozptyl.....	19
2.5 Útlum.....	19
2.5.1 Útlum v kapalinách a plynech.....	20
3. ZDROJE A PŘIJÍMAČE ULTRAZVUKU	23
3.1 Popis vyzařovaného ultrazvukového pole.....	23
3.1.1 Blízké pole	23
3.1.2 Vzdálené pole.....	25
3.2 Piezoelektrické měniče.....	26
3.2.1 Piezoelektrický jev	26
3.2.2 Piezoelektrické materiály	27
3.3 Ultrazvukový snímač	28
4. METODY MAPOVÁNÍ ULTRAZVUKOVÉHO POLE.....	29
4.1 Měření hydrofonem.....	29
4.2 Šlírová metoda	30

4.3	Měření tepelných účinků infračervenou termokamerou	30
5.	LABORATORNÍ MĚŘICÍ SYSTÉM	32
5.1	Úvod.....	32
5.2	Popis celku	32
5.3	3D manipulátor.....	34
5.4	LabVIEW program.....	35
5.5	Přípravek pro generování a zesilování uzv pulzů	37
5.6	Osciloskop.....	40
5.7	Ukázka naměřeného signálu jednoho měřicího cyklu	41
5.8	Specifika měřicí soustavy	41
6.	ZPRACOVÁNÍ A VIZUALIZACE DAT	43
6.1	Zpracování naměřeného signálu v Pythonu	43
6.2	Excel makro pro zpracování prostorových dat.....	45
6.3	Přehled generovaných grafů a parametrů.....	46
6.3.1	Grafy a parametry generované z bodů na nalezené ose snímače	46
6.3.2	Grafy a parametry generované z řezů určeného kónusu.....	49
6.3.3	Grafy a parametry generované softwarem Origin	50
7.	MĚŘENÍ	52
7.1	Nastavení aparatury před měřením	52
7.2	Opakovatelnost a nejistoty měření	52
7.3	Prostorová měření	56
7.3.1	Opakovatelnost určení koncových parametrů.....	56
7.3.2	Porovnání chování uzv pole v různých médiích	56
	ZÁVĚR	59

Seznam symbolů a zkratek

Zkratky:

UZ	...	ultrazvuk
uzv	...	ultrazvukový

Symbols:

λ	...	vlnová délka	$[m]$
E	...	Youngův modul pružnosti v tahu	$[N/m^2]$
ρ	...	hustota prostředí	$[kg \cdot m^{-3}]$
c	...	rychlost šíření uzv vln	$[m \cdot s^{-1}]$
θ	...	teplota prostředí	$[^{\circ}C]$
b	...	absolutní teplotní součinitel	$[m \cdot s^{-1} \cdot K^{-1}]$
f	...	frekvence ultrazvuku	$[Hz]$
p	...	akustický tlak	$[Pa]$
Z	...	akustická impedance	$[Pa \cdot s \cdot m^{-1}]$
I	...	akustická intenzita	$[W \cdot m^{-2}]$
r	...	měrný akustický odpor	$[Pa \cdot s \cdot m^{-1}]$
x	...	měrný akustická reaktance	$[Pa \cdot s \cdot m^{-1}]$
R	...	součinitel odrazu	$[-]$
D	...	součinitel průchodu	$[-]$
L	...	hladinová úroveň	$[dB]$
α	...	činitel útlumu prostředí	$[Np \cdot m^{-1}]$
η	...	dynamická viskozita	$[Pa \cdot s^{-1}]$
λ_T	...	tepelná vodivost	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$
N	...	délka blízkého pole	$[m]$
J_1	...	Besselova funkce prvního druhu řádu 1	
a	...	poloměr měniče	$[m]$
k	...	vlnové číslo	$[rad/m]$

Seznam obrázků

Obrázek 1: Podélné vlnění [1]	14
Obrázek 2: Příčné vlnění [1]	15
Obrázek 3: Rayleigovo vlnění [1]	15
Obrázek 4: Kolmý dopad uzv vlny na rozhraní prostředí s různými vln. odpory	18
Obrázek 5: Šikmý dopad uzv vlny na rozhraní prostředí s různými vln. odpory	18
Obrázek 6: Semilogaritmický graf se závislostmi ztrátového čísla na teplotě u vybraných kapalin [7]	21
Obrázek 7: Grafy naměřených závislostí rychlosti šíření a útlumu ultrazvuku v motorovém oleji Shell Advance AX5 na teplotě (frekvence 5 MHz) [8]	22
Obrázek 8: Znázornění situace pro odvození blízkého pole [9]	24
Obrázek 9: Grafy závislostí normalizované intenzity v ose z na normalizované vzdálenosti $\lambda z/a^2$. Spodní graf je přiblížený počátek horního. [10]	24
Obrázek 10: Graf závislosti relativní intenzity I/I_{max} vzdáleného pole na úhlu θ pro různé součiny ka . [9]	25
Obrázek 11: Modely uzv polí kruhového měniče s poloměrem $a = 2,5\text{ mm}$ pro frekvence 1 a 3 MHz. [10]	25
Obrázek 12: Kužel s úhlem θ_0 popisující rozbíhavost hlavního uzv svazku	26
Obrázek 13: Molekulární model pro vysvětlení přímého piezoelektrického jevu, a) molekula v klidovém stavu, b) molekula vystavena vnější síle, c) polarizační jev na povrchu materiálu [14]	27
Obrázek 14: Názorná ukázka přímého (část a) a nepřímého (část b) piezoelektrického jevu [11]	27
Obrázek 15: Schéma piezoelektrického snímače pro popis, upraveno [11]	28
Obrázek 16: Zjednodušené schéma měřicí metody s hydrofonem, upraveno [16] ..	29
Obrázek 17: Schéma měřicí aparatury využívající šlírové metody, upraveno [11] ..	30
Obrázek 18: Ukázka snímku uzv pole z popisované měřicí aparatury [11]	30
Obrázek 19: Principiální schéma měřicí metody snímání tepelných účinků infračervenou termokamerou, upraveno [17]	31
Obrázek 20: Základní schéma zapojení měřicí aparatury	32
Obrázek 21: Fotografie měřicí aparatury (chybí připojený PC)	33
Obrázek 22: Řídící diagram měřicího cyklu	33

Obrázek 23: Popis polohovacího příkazu v jazyce g-kód.....	34
Obrázek 24: Série příkazů s komentářem pro inicializaci měřicí aparatury	34
Obrázek 25: Makro pro generování g-kódu.....	35
Obrázek 26: Řídící diagram měřicího programu v LabVIEW.....	36
Obrázek 27: Prostředí měřicího programu.....	36
Obrázek 28: Principiální schéma zapojení přípravku	37
Obrázek 29: Vývojový diagram programu na Arduino	38
Obrázek 30: Přístrojový zesilovač s přepínatelným vnějším odporem.....	38
Obrázek 31: Sériové zapojení op. zesilovačů	39
Obrázek 32: Fotografie přípravku s popisem	39
Obrázek 33 : Fotografie osciloskopu Keysight DSOX3024T	40
Obrázek 34: Ukázka nastavování parametrů v LabVIEW	40
Obrázek 35: Ukázka měřeného průběhu.....	41
Obrázek 36: Diagram procesu zpracování a vizualizace dat	43
Obrázek 37: Ukázka funkcionality algoritmu hledání maxima echa.....	44
Obrázek 38: Ukázka funkcionality algoritmu hledání počátku echa	44
Obrázek 39: Ukázka generovaného souboru <i>report.log</i> se zpracovanými daty	45
Obrázek 40: Řídící diagram makra pro zpracování prostorových dat v Excelu	45
Obrázek 41: Schéma popisující známé informace o snímači během měření.....	46
Obrázek 42: Graf naměř. rychlostí ultrazvuku v bodech na ose Z (olej 5W30).....	47
Obrázek 43: Graf závislosti max. amplitudy na uražené vzdálenosti (olej 5W30) ..	47
Obrázek 44: Graf závislosti útlumu na uražené vzdálenosti (olej 5W30)	48
Obrázek 45: Grafy bodů s poklesem amplitudy 3dB v řezech osami X a Y	49
Obrázek 46: Prostorový graf kónusu s vypočtenou osou (olej 5W30)	50
Obrázek 47: Vrstevnicové grafy rozložení amplitudy v řezech osami X, Y	51
Obrázek 48: Fotografie procesu vyrovnávání přípravku pomocí vodováhy	52
Obrázek 49: Výsledky opak. měření v demineralizované vodě (gain 178).....	53
Obrázek 50: Výsledky opakovaného měření v oleji 5W30 (gain 178).....	53
Obrázek 51: Výsledky opakovaného měření v isopropylalkoholu (gain 178)	53
Obrázek 52: Graf porovnání naměřených řezu kónusu v různých mediích.....	57
Obrázek 53: Graf porovnání útlumu echa na ose snímače různých mediích.....	58
Obrázek 54: Porovnání rozložení amp. echa v řezu osou X v různých mediích	58

Seznam tabulek

Tabulka 1: Přehled zmíněných fyzikálních parametrů při teplotě 20 °C [5]	17
Tabulka 2: Přehled součinitelů útlumu pro kapaliny a plyny [5]	21
Tabulka 3: Vypočtené parametry nejistot při opakovaném měření bodu X0 Y2 Z30 v různých mediích (n = 25, vzorek č. 65, zesílení 178, teplota 22,5° C).....	55
Tabulka 4: Souhrn koncových parametrů uzv pole pro měření v oleji 5W30 (vzorek č. 65, zesílení 178, teplota 22,5 °C)	56
Tabulka 5: Souhrnný přehled naměřených a teoretických hodnot parametrů uzv pole v různých mediích.....	57

ÚVOD

Principu ultrazvuku se v dnešní době využívá v širokém okruhu oblastí. V průmyslových aplikacích se jedná především o zjišťování přítomnosti objektů a měření jejich vzdálenosti, nebo právě měření výšky hladiny kapalin. V lékařství lze potom pomocí ultrazvuku bezpečně provádět diagnostiku struktury nebo funkčnosti tkání a orgánů.

Při využití ultrazvuku, v našem případě, pro měření výšky hladiny kapaliny je mimo jiné nutné uvažovat vliv okolního prostředí, který mění jeho chování. Pro účely vývoje ultrazvukových snímačů je proto vhodné mít nástroj, který by dokázal sledovat, jak se mění parametry vyzařovaného pole v závislosti na vlivech prostředí nebo konstrukčních parametrech snímače.

Cílem této bakalářské práce je v teoretické části seznámit čtenáře s problematikou popisu vyzařovaného pole ultrazvukových piezoelektrických snímačů. Jde tedy především o popis ultrazvukových fyzikálních principů spojených s funkcí piezoelektrických měničů a chováním generovaného mechanického vlnění. Zároveň je zde obsažen popis některých metod měření různých parametrů ultrazvukového pole.

V praktické části je následně popsán způsob měření pomocí dostupného laboratorního zařízení vyvíjeného ve společnosti Continental. Vzhledem k tomu, že na začátku práce se jednalo o zařízení nefunkční s nedostatečnou dokumentací, věnuje se část této práce právě podrobnějšímu popisu funkcionality jednotlivých částí měřicího zařízení. Kromě měřicí aparatury práce popisuje také navržený způsob zpracování dat, přehled možných generovaných parametrů a výsledky testovacích měření, které slouží pro určení nejistot, opakovatelnosti a srovnání s fyzikální teorií.

1. TEORIE ULTRAZVUKOVÝCH VLN

1.1 Obecné vlastnosti

Ultrazvukem (UZ) označujeme mechanický kmitavý pohyb pružného prostředí, jehož frekvence je vyšší než 20 kHz, tedy vyšší, než je horní mez slyšitelnosti lidského ucha. Příčinou existence mechanického vlnění jsou vzájemné vazebné síly mezi částicemi látky, kdy kmitání jedné částice kolem své rovnovážné polohy se vzájemnými vazbami v pružném prostředí přenáší na částice další, aniž by docházelo k jejich transportu. Dochází tedy k opakujícímu se stlačování a rozpínání prostředí.

Podle účinků lze rozdělit UZ na aktivní a pasivní. Jako aktivní lze nazvat ultrazvukové (uzv) vlny, které při svém šíření v prostředí projevují fyzikální nebo chemické účinky, což představuje případy jako v průmyslu: uzv čištění, svařování, nebo v lékařství například odstraňování ledvinových kamenů. Pasivní ultrazvuk, který na rozdíl od aktivního má menší, obvykle zanedbatelný výkon, lze využít za účely zjišťování vad materiálu (defektoskopie), uzv měřicí techniky, popřípadě lékařské diagnostiky.

1.2 Druhy ultrazvukového vlnění

Ultrazvukové vlnění lze rozdělit na několik druhů, které se navzájem liší způsobem pohybu částic prostředí vzhledem ke směru postupu uzv vlny.

1.2.1 Podélné vlnění

Jedná se o vlnění, při kterém částice kmitají přímočaře ve směru šíření vlny. Kvůli tomuto pohybu dochází ke střídavému zhušťování a zředňování částic a tím i ke změně objemu, který zaujímají. Podélné vlny se mohou šířit každým látkovým prostředím za předpokladu, že jsou jeho rozměry dostatečně velké vzhledem k délce vlny λ . [1]



Obrázek 1: Podélné vlnění [1]

1.2.2 Příčné vlnění

Příčné vlny se mohou šířit pouze v prostředí, které odolává namáhání ve smyku, tj. v tuhém prostředí, a jeho rozměry jsou mnohem větší, než je vlnová délka λ . U tohoto vlnění kmitají částice kolmo na směr šíření vlny. V kapalinách a plynech, které nekladou žádný odpor smykovému namáhání, se příčné vlnění nemůže vyskytnout. [1]



Obrázek 2: Příčné vlnění [1]

1.2.3 Rayleighovo vlnění

Na povrchu tuhého prostředí se mohou šířit povrchové (Rayleighovy) příčné vlny do hloubky, rovnající se přibližně velikosti vlnové délky λ . Výsledný pohyb částic vzniklý složením dvou vektorů probíhá po velmi protáhlé elipse. Podélná složka povrchové vlny ubývá s hloubkou rychleji než příčná. [1]



Obrázek 3: Rayleighovo vlnění [1]

1.3 Základní veličiny pro popis ultrazvukového vlnění

Každé uzv vlnění lze vzhledem prostředí, ve kterém se vyskytuje z akustického hlediska charakterizovat různými parametry. Mezi nejdůležitější patří fyzikální veličiny jako rychlost šíření ultrazvuku, vlnová délka, akustický výkon, intenzita ultrazvuku, akustická impedance nebo akustický tlak.

1.3.1 Rychlost šíření ultrazvukového vlnění

Rychlost šíření uzv vln c závisí na elastických vlastnostech a hustotě prostředí. Zmíněný výsledný vztah vychází z řešení šíření podélných vln v tenké tyči, v našem případě si lze představit trubici se sloupcem kapaliny, kterou se šíří rovinná vlna.

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (1.1)$$

E je Youngův modul pružnosti v tahu, který charakterizuje dané prostředí a má jednotku: $[Pa]$, $[N/m^2]$, $[kg \cdot s^2/m]$. ρ je hustota prostředí $[kg \cdot m^{-3}]$. [4]

Rychlost šíření uzv vln c v kapalinách se mění s teplotou θ , což lze přibližně popsat linearizovanou rovnicí 1.2:

$$c(\theta) \doteq c_0 + b(\theta - \theta_0) \quad [m \cdot s^{-1}], \quad (1.2)$$

kde $c_0 [m \cdot s^{-1}]$ je rychlost při počáteční teplotě $\theta_0 [^{\circ}C]$, b je absolutní teplotní součinitel $[m \cdot s^{-1} \cdot K^{-1}]$. [5]

1.3.2 Vlnová délka

Představuje nejkratší vzdálenost mezi dvěma hmotnými body vlnění, které kmitají ve fázi. Vlnová délka může být definovaná vždy za předpokladu, že uzv vlny jsou do prostředí vysílány spojitě nebo jako impulzy, u kterých se v konkrétním časovém intervalu opakuje alespoň několik kmitů s frekvencí f . [1]

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad [m] \quad (1.3)$$

c je rychlost šíření uzv vln $[m \cdot s^{-1}]$, f je frekvence ultrazvuku $[Hz]$.

1.3.3 Akustický tlak

Jak už bylo zmíněno u definice podélného vlnění, při šíření uzv vlny dochází ke střídavému stlačování a roztahování částic prostředí. Proto lze v daném časovém okamžiku najít v plynech a kapalinách místa přetlaku a podtlaku. Akustický tlak p lze definovat jako efektivní hodnotu změn statického tlaku p_c vzduchu, způsobené šířící se zvukovou vlnou rychlostí c . [4]

$$p = Zc \quad [Pa] \quad (1.4)$$

Z je akustická impedance $[Pa \cdot s \cdot m^{-1}]$, c je rychlost šíření uzv vln $[m \cdot s^{-1}]$.

1.3.4 Akustická intenzita a výkon

Ultrazvukové vlny přenášejí mechanickou energii ve formě kinetické energie (pohyb částic) a potenciální energie (stlačování kapaliny).

Intenzitu I ultrazvukového vlnění lze definovat jako průměrnou akustickou energii procházející za jednotku času jednotkovou plochou orientovanou kolmo na směr šíření rovinné nebo kulové vlny nebo jako součin efektivních hodnot akustického tlaku a akustické rychlosti. [4]

$$I = \frac{P}{S} = p_{ef} v_{ef} \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (1.5)$$

P je průměrný výkon $[W]$, S je plocha $[m^2]$.

1.3.5 Akustická impedance

Akustická impedance představuje důležitou veličinu pro popis vzájemné interakce mezi uzv vlnění a prostředím, ve kterém se toto vlnění šíří.

Měrnou akustickou impedanci lze definovat jako veličinu vyjadřující vztah mezi akustickým tlakem p při průchodu uzv vlny s akustickou rychlostí v , což je rychlost kmitání částic vlnění. Při harmonickém kmitání může být mezi akustickým tlakem a akustickou rychlostí fázový posun, proto je akustická impedance v symbolickém vyjádření obecně komplexního charakteru [4]:

$$Z = \frac{p}{v} = r + jx \quad [Pa \cdot s \cdot m^{-1}]. \quad (1.6)$$

Reálná část měrné akustické impedance je měrný akustický odpor r , imaginární část je měrná akustická reaktance x . V případě postupné rovinné nebo kulové vlny v nekonečném prostředí je akustická impedance pouze reálná [1] a v literatuře je často nazývána měrným akustickým vlnovým (charakteristickým) odporem, značeným obvykle také Z . Právě vlnový odpor má podstatný vliv na odraz a přestup ultrazvukových na rozhraní dvou prostředí.

Další vztah:

$$Z = \rho c \quad [Pa \cdot s \cdot m^{-1}] \quad (1.7)$$

Tabulka 1: Přehled zmíněných fyzikálních parametrů při teplotě 20 °C [5]

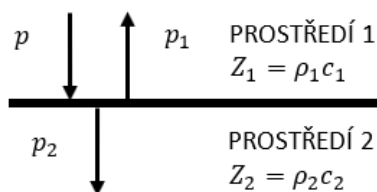
Prostředí	Rychlost šíření podélných vln $c [m \cdot s^{-1}]$	Měrný akustický vlnový odpor $Z [Pa \cdot s \cdot m^{-1}]$	Teplotní součinitel b $[m \cdot s^{-1} \cdot K^{-1}]$
voda	1483	$148 \cdot 10^{-4}$	+2,5
isopropylalkohol	1170	$89 \cdot 10^{-4}$	-3,3
ethanol	1180	$93 \cdot 10^{-4}$	-3,3
vzduch	343	413	+0,61

2. FYZIKÁLNÍ CHOVÁNÍ ULTRAZVUKU

Jestliže máme nadefinované základní veličiny pro popis uzv vlnění, můžeme popsat základní děje ke kterým dochází během interakce s prostředím.

2.1 Odraz

Předpokladem k odrazu je existence rozhraní 2 prostředí s různou akustickou impedancí. Při kolmém dopadu uzv vlny s akustickým tlakem p na rozhraní dvou prostředí 1 a 2 s vlnovými odpory Z_1 a Z_2 se část s akustickým tlakem p_1 odráží zpět do prostředí 1 a část s akustickým tlakem p_2 prochází do prostředí 2 [2].



Obrázek 4: Kolmý dopad uzv vlny na rozhraní prostředí s různými vln. odpory

Poměr mezi p_1 a p_2 závisí na akustických vlnových odporech Z_1 a Z_2 . Pro jejich vzájemné vztahy s akustickým tlakem p se definují součinitelé odrazu R a průchodu D .

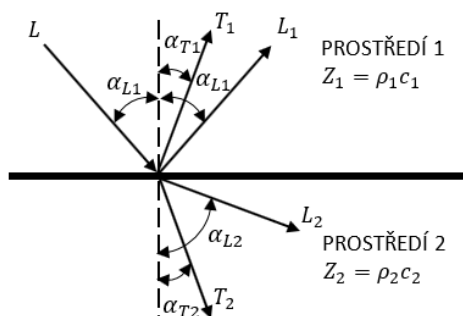
$$R = \frac{p_1}{p} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad [-] \quad (1.8)$$

$$D = \frac{p_2}{p} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad [-] \quad (1.9)$$

$$D = 1 + R \quad [-] \quad (1.10)$$

2.2 Lom (Refrakce)

Při dopadu uzv vlnění na rozhraní dvou prostředí pod úhlem α dochází k jeho odrazu, lomu nebo transformaci, jestliže jedno z prostředí dokáže přenášet příčné vlny. Vše závisí na úhlu dopadu uzv vlny na rozhraní a na rychlostech šíření vln v obou prostředí.



Obrázek 5: Šikmý dopad uzv vlny na rozhraní prostředí s různými vln. odpory

Dopadne-li podélná uzv vlna (obrázek 5) na rozhraní dvou tuhých prostředí 1 a 2, v každém mohou obecně vzniknout dvě složky. Dopadající podélná vlna (L) se odráží zpět do prostředí 1 pod úhlem odrazu α_{L1} , který se rovná úhlu dopadu a transformuje se na příčnou vlnu T_1 , která se odráží pod úhlem α_{T1} . Dále se šíří do prostředí 2 jako podélná vlna pod úhlem průchodu α_{L2} a transformuje se na vlnu příčnou, která se šíří po úhlem α_{T2} .

Vzájemný vztah úhlů všech složek měřených od normály k rozhraní a jejich rychlostí šíření je dán Snellovým zákonem. [2]

$$\frac{\sin \alpha_{L1}}{c_{L1}} = \frac{\sin \alpha_{T1}}{c_{T1}} = \frac{\sin \alpha_{L2}}{c_{L2}} = \frac{\sin \alpha_{T2}}{c_{T2}} \quad [-] \quad (1.11)$$

c_{L1} , c_{T1} , c_{L2} , c_{T2} jsou rychlosti šíření podélné a příčné vlny v daných prostředích.

2.3 Absorpce

Jde o jev, kdy se mění část mechanické energie uzv vlnění v energii tepelnou v důsledku vnitřního tření kmitajících částic, hysterezních ztrát, relaxačních a tepelných jevů, charakteristických pro látku tvořící dané prostředí. [6]

2.4 Rozptyl

Především v nehomogenních a polykrystalických prostředích (např. kovy), které nemají ideální elastické vlastnosti dochází opět ke ztrátám energie uzv vlnění. Příčinou je dopad uzv vln na jednotlivá rozhraní v nehomogenní látce, při kterém uzv energie ztrácí v důsledku odrazu a lomů do různých směrů. Největší roli na vliv rozptylu má vztah mezi délkou vlny a střední velikostí zrna struktury. [1]

2.5 Útlum

Během šíření uzv vlny prostředím dochází k poklesu její energie, a tudíž i akustického tlaku v závislosti na vlastnostech daného prostředí. Příčinou útlumu je kombinace výše popsaných jevů v této kapitole.

Matematické vyjádření poklesu amplitudy uzv vlny:

$$A_z = A_0 e^{-\alpha z}. \quad (1.12)$$

A_z je amplituda ve vzdálenosti z , A_0 je amplituda ve vzdálenosti 0 (referenční bod), α je činitel útlumu prostředí (frekvenčně závislý) [$Np \cdot m^{-1}$].

Vztah 1.13 odpovídá vztahu pro výpočet poklesu amplitudy akustického tlaku P uzv vlny:

$$P_z = P_0 e^{-\alpha z} \quad [\text{Pa}]. \quad (1.13)$$

Pro pokles intenzity uzv vlny platí:

$$I_z = I_0 e^{-2\alpha z} \quad [W \cdot m^{-2}]. \quad (1.14)$$

Činitel útlumu α bývá často uváděn v decibelech na metr $[dB \cdot m^{-1}]$, přičemž pokles akustického tlaku v dB je dán dvacetinásobkem dekadického logaritmu poměru počátečního a koncového tlaku:

$$L_P = 20 \log \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \quad [dB]. \quad (1.15)$$

Pokles intenzity v dB je pak dán vztahem:

$$L_I = 10 \log \left(\frac{I_2}{I_1} \right) \quad [dB]. \quad (1.16)$$

Kvůli rozdílu vztahů 1.14 a 1.15 je při vyjadřování útlumu velmi důležité doplnit, zda jde o útlum amplitudy nebo intenzity.

Mezi hodnotami v decibelech $[dB]$ a v neperech $[Np]$ platí převodní vztahy [1], [5]:

$$X [dB \cdot m^{-1}] = 8,68 Y [Np \cdot m^{-1}] \quad (1.17)$$

$$X [Np \cdot m^{-1}] = 0,115 X [dB \cdot m^{-1}]. \quad (1.18)$$

2.5.1 Útlum v kapalinách a plynech

V kapalinách a plynech závisí útlum především na ztrátách α_v způsobených viskozitou (vnitřním třením) a na tepelných ztrátách α_T vznikajících vlivem tepelné vodivosti.

Lze vyjádřit vztahem:

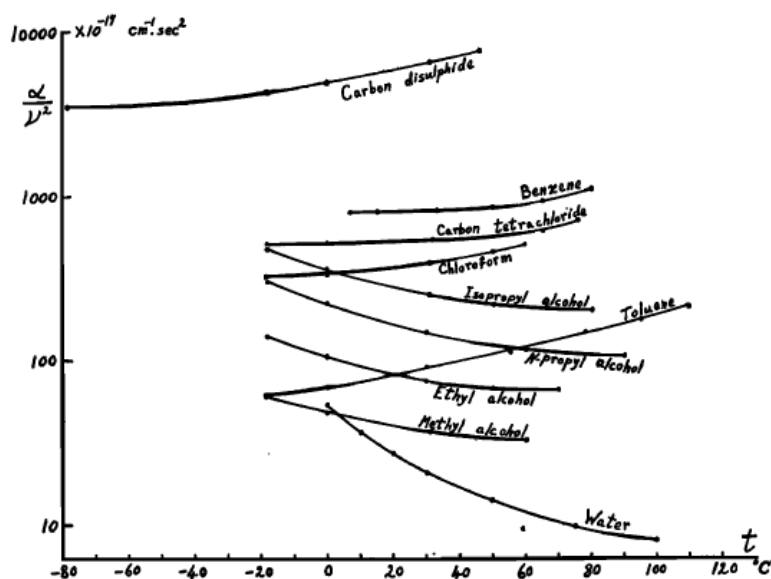
$$\alpha = \alpha_v + \alpha_T = \frac{2\pi^2}{\rho c^3} \left[\frac{4}{3} \eta + \lambda_T \left(\frac{1}{c_v} - \frac{1}{c_p} \right) \right] f^2 = a f^2, \quad (1.19)$$

kde ρ je hustota prostředí $[Kg \cdot m^{-3}]$,
 c - rychlost šíření ultrazvuku $[m \cdot s^{-1}]$,
 η - dynamická viskozita $[Pa \cdot s^{-1}]$,
 λ_T - tepelná vodivost $[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$,
 c_v, c_p - měrné teplo při stálém objemu a tlaku $[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$.

Útlum udávaný rovnicí 1.19 má pouze informativní teoretickou hodnotu, avšak z něj vyplývá kvadratická závislost koeficientu útlumu na frekvenci u kapalin a plynů. Naměřené hodnoty útlumu vycházejí obvykle větší, což lze vysvětlit relaxačními ztrátami v kapalinách i plynech. Charakteristikou útlumu je ztrátové číslo $a = \alpha/f^2$ nezávislé na frekvenci [1], [5].

Naměřená teplotní závislost ztrátového čísla a u různých kapalin je zobrazena v semilogaritmickém grafu na obrázku 6. [7], kde jsou vyneseny teplotní závislosti pro 5 asociovaných kapalin, kam patří voda a různé alkoholy (methylalkohol, ethylalkohol, n-propylalkohol a isopropylalkohol) a pro 5 neasociovaných kapalin (sirouhlík, benzen, tetrachlormethan, chloroform a toluen).

Asociované kapaliny se skládají ze skupin molekul vázaných mezi sebou (např. hydrogenová vazba mezi jednotlivými molekulami vody), u neasociovaných kapalin tyto další mezimolekulární vazby nejsou.



Obrázek 6: Semilogaritmický graf se závislostmi ztrátového čísla na teplotě u vybraných kapalin [7]

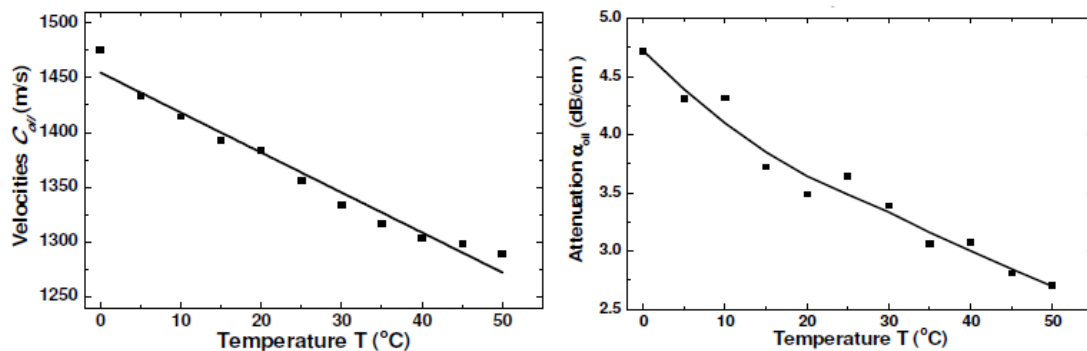
Z grafu vyplývá, že měřené asociované kapaliny mají záporný teplotní součinitel pro absorpci a neasociované naopak kladný.

Tabulka 2: Přehled součinitelů útlumu pro kapaliny a plyny [5]

Prostředí	Součinitel útlumu α [Np. mm ⁻¹ . MHz ⁻¹]	Prostředí	Součinitel útlumu α [Np. mm ⁻¹ . MHz ⁻¹]
voda	$2,5 \cdot 10^{-5}$	benzen	$9 \cdot 10^{-5}$
glycerol	$6 \cdot 10^{-3}$	toluen	$20 \cdot 10^{-5}$
ethanol	$5,4 \cdot 10^{-6}$	jedlý olej	$8,4 \cdot 10^{-3}$
methanol	$3,4 \cdot 10^{-6}$	vzduch	$1,6 \cdot 10^{-2}$

Z tabulky 2 vyplývá, že útlum ultrazvuku ve vzduchu je 640 krát vyšší než ve vodě.

Na obrázku 7 [8] je ukázka chování ultrazvuku v motorovém oleji Shell Advance AX5. Z naměřených grafů vyplývá lineární pokles rychlosti šíření a útlumu při vzrůstající teplotě. Autoři textu [8], ze kterého naměřené závislosti pochází, dochází k závěru, že hlavním důvodem chování útlumu oleje je změna jeho viskozity.



Obrázek 7: Grafy naměřených závislostí rychlosti šíření a útlumu ultrazvuku v motorovém oleji Shell Advance AX5 na teplotě (frekvence 5 MHz) [8]

3. ZDROJE A PŘIJÍMAČE ULTRAZVUKU

V následující kapitole je uveden přehled pro teoretický popis vyzařovaného uzv pole. Dále je popsán piezoelektrický jev, kterého je v našem případě využito pro generaci i příjem uzv pole, základní přehled piezoelektrických materiálů a provedení uzv snímače.

3.1 Popis vyzařovaného ultrazvukového pole

Pro kvantitativní popis uzv pole byl vybrán případ kruhového měniče o poloměru a , který kmitá v kapalině a jehož zadní strana je tlumená, aby akustická energie byla vyzařována pouze jedním směrem.

Použité odvození vybraného případu je autorů Hobbie a Roth [9]. Osa symetrie měniče leží v ose z a jeho přední budící stěna protíná osu z v bodě $z = 0$. Generované pole měničem se dělí na blízké a vzdálené pole.

3.1.1 Blízké pole

Podle Huygensova principu si lze představit, že každý kmitající bod povrchu měniče je elementárním zdrojem vlnění, který vytváří vlnoplochu ve tvaru polokoule s daným akustickým tlakem. Amplituda takových kulových vln klesá jako $1/r$, kde r je vzdálenost od zdroje.

Předpokládá se, že posunutí kapaliny, která je v kontaktu s měničem je stejné jako posunutí celé přední stěny měniče. Výsledný akustický tlak v určitém bodě prostoru před měničem lze určit jako sumu příspěvků od jednotlivých zdrojů na povrchu měniče.

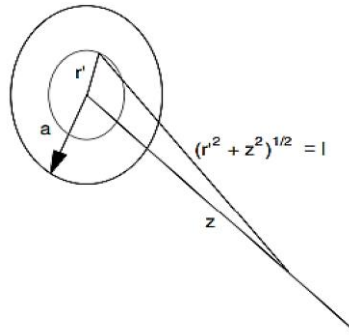
Jednoduchý způsob zmíněné sumace vyplývá pro body na ose Z , kde je možné sumaci příspěvků od jednotlivých bodů zjednodušit na sumaci příspěvků od kruhových prstenců s poloměrem r' , který nabývá hodnot od 0 do a , kde a je poloměr měniče. Daný případ se zmíněnými symboly popisuje obrázek 8. V daném bodě na ose z interferují vlny přicházející s různou fází, nicméně se stejnou fází pokud vychází z kruhového prstence o poloměru r' . Jinými slovy tak v čase t je fáze vlny ve vzdálenosti l od elementárního zdroje stejná jako fáze vlny opouštějící zdroj v dřívějším čase $t - l/c$.

Výsledný akustický tlak p ve vzdálenosti z na ose měniče je možné vypočítat pomocí integrálu:

$$p \propto 2\pi \int_0^a r' \frac{\cos[\omega(t - l/c)]}{l} dr' [Pa]. \quad (1.20)$$

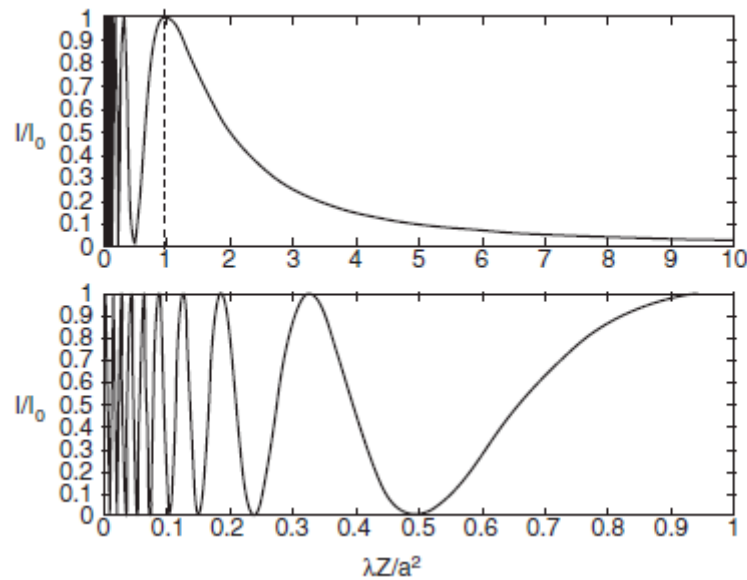
Po zavedení vhodné substituce $l = \sqrt{r'^2 + z^2}$, integrování výrazu 1.20 se substitucí a přepočtu výsledku na intenzitu, zjistíme, že intenzita I ve vzdálenosti z na ose měniče je úměrná výrazu:

$$I \propto \sin^2 \left[\frac{\omega}{2c} \left(z - \sqrt{a^2 + z^2} \right) \right] [W \cdot m^{-2}]. \quad (1.21)$$



Obrázek 8: Znázornění situace pro odvození blízkeho pole [9]

Vynesená závislost z výrazu 1.21 je na obrázku 9. Z grafů je patrná výrazná oscilace intenzity v blízkosti měniče. Blízké nebo také Fresnelovo pole je ohraničenou polohou posledního maxima na ose z [9], [15].



Obrázek 9: Grafy závislostí normalizované intenzity v ose z na normalizované vzdálenosti $\lambda Z/a^2$. Spodní graf je přiblížený počátek horního. [10]

Délka blízkeho pole N je potom vzdálenost posledního maxima od počátku v ose měniče a platí pro ni vztah:

$$N = \frac{a^2}{\lambda} [m]. \quad (1.22)$$

Vztah 1.22 platí za předpokladu, že $a^2 \gg \lambda^2$ (tzn. poloměr měniče je mnohem větší než vlnová délka vlnění). [9]

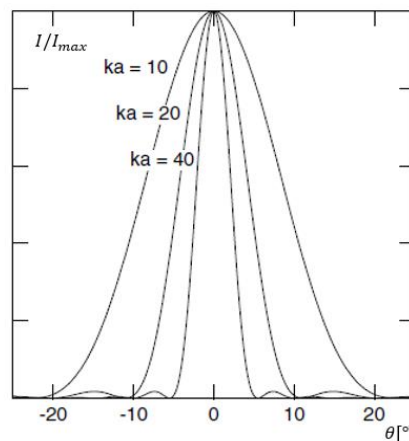
3.1.2 Vzdálené pole

Část grafu na obrázku 9 za posledním maximem ukazuje, že průběh intenzity ve vzdálenosti $z > N$ od měniče je výrazně jednodušší než v blízkosti měniče. Jedná se o tzv. vzdálené pole (Frauenhoferova oblast), kde intenzita na ose z klesá rovnoměrně od zdroje jako $1/z^2$. Popis výsledné intenzity i mimo osu Z ve vzdáleném poli popisuje vztah:

$$I \propto \frac{1}{h^2} \left[\frac{J_1(ka \sin\theta)}{ka \sin\theta} \right]^2 [m]. \quad (1.23)$$

h je vzdálenost od středu měniče, J_1 je Besselova funkce prvního druhu řádu 1, k je tzv. vlnové číslo pro které platí: $k = 2\pi/\lambda$ [rad/m], θ je úhel, který svírá osa Z se spojnicí středu měniče a bodu, kde je intenzita určována.

Ukázka závislosti relativní intenzity na úhlu θ pro kruhový měnič s různým součinem parametrů ka obsahuje graf na obrázku 10. Vyrůstajícím součinem ka odpovídají při stejném poloměru měniče $a = 0,25$ cm vyrůstající frekvence 1, 2, 4 MHz. Z grafu tudíž vyplývá, že se vyrůstající frekvencí je průběh intenzity strmější a užší, zároveň se vedle hlavního uzv laloku začne zvětšovat počet laloků vedlejších. Z obrázku 11 na kterém jsou počítačové modely uzv polí vyplývá stejný závěr.

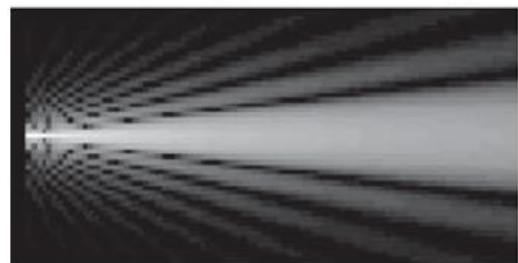


Obrázek 10: Graf závislosti relativní intenzity I/I_{max} vzdáleného pole na úhlu θ pro různé součiny ka . [9]

$a = 2,5$ mm



$f = 1$ MHz

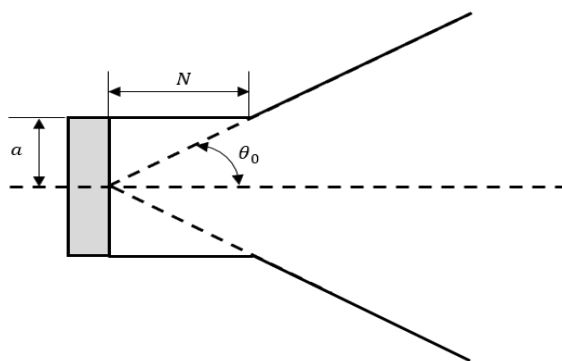


$f = 3$ MHz

Obrázek 11: Modely uzv polí kruhového měniče s poloměrem $a = 2,5$ mm pro frekvence 1 a 3 MHz. [10]

Pro blízké pole platí, že jeho tvar lze považovat za válec s poloměrem stejným jako má kruhový měnič. U vzdáleného pole však dochází ke směrové rozbíhavosti hlavního uzv laloku. Lalok se pro výpočty nahrazuje kuželem s vrcholem ve středu měniče, jehož plášť je v prostoru ohraničen prvním minimem intenzity, které jak je vidět v grafu na obrázku 10, nastává při určité hodnotě úhlu $\theta = \theta_0$. Ten potom určuje úhel rozbíhavosti svazku, pro který platí vztah [9]:

$$\theta_0 = \arcsin\left(\frac{0,61\lambda}{a}\right) [^\circ]. \quad (1.24)$$



Obrázek 12: Kužel s úhlem θ_0 popisující rozbíhavost hlavního uzv svazku

3.2 Piezoelektrické měniče

Pro vysílání a přijímání uzv vln bývá v uzv měřicí technice často využíváno piezoelektrických měničů, u kterých dochází k přeměně elektrické energie na mechanickou a naopak, v důsledku tzv. piezoelektrického jevu.

3.2.1 Piezoelektrický jev

Pro vysvětlení piezoelektrického jevu slouží molekulární model na obrázku 13 [14], který popisuje generování elektrického náboje působením síly na piezo. element.

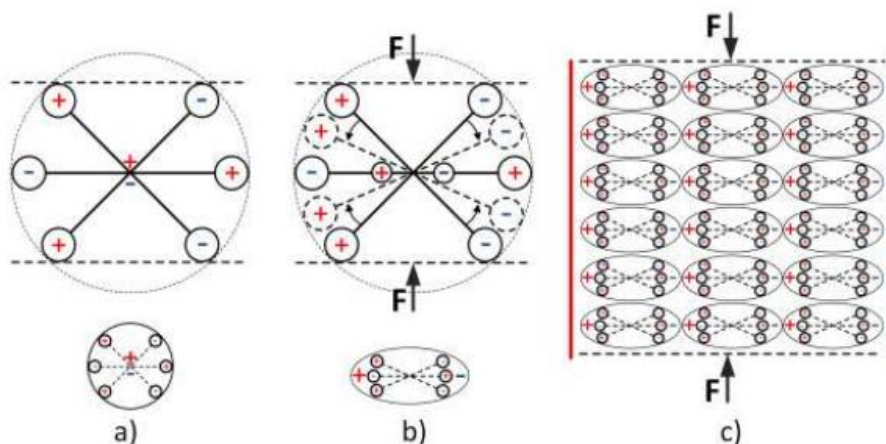
Část *a* obrázku 13 popisuje shodu těžišť negativních a pozitivních nábojů molekuly ve stavu, kdy na ni nepůsobí vnější síla a molekula se jeví jako elektricky neutrální.

V části *b* začne působit na piezo. materiál externí síla, která způsobí narušení rovnováhy mezi náboji, což vede k oddělení pozitivních a negativních těžišť nábojů v molekule. Původně neutrální molekuly tak mají malé dipóly, jak ukazuje spodní část obrázku *b*.

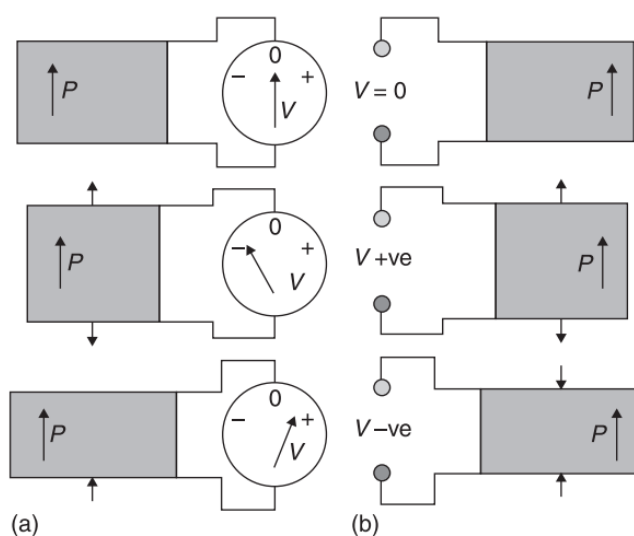
Na části obrázku *c* pak dochází k vzájemnému rušení protilehlých pólů jednotlivých dipólových molekul uvnitř materiálu, přičemž na povrchu materiálu, a tedy i na přilehlých elektrodách se objeví náboj vázaný. Tento jev se označuje jako tzv. polarizační efekt nebo souhrnně v tomto případě přímý piezoelektrický jev. Látky mající takovéto vlastnosti se vyskytují ve formě krystalů, přičemž v okamžiku, kdy na ně přestane být působeno tlakem, polarizace zaniká a látka se vrátí do původního neutrálního stavu.

K přímému piezoelektrickému jevu existuje i jev opačný tzv. nepřímý, kdy působením elektrického pole na krystal dochází k jeho mechanické deformaci. Na obrázku 14 je názorná ukázka přímého (část *a*) a nepřímého (část *b*) piezoelektrického

jevu, kde ciferník ukazuje velikost a polaritu generovaného napětí na elektrodách a hodnota V mezi svorkami ukazuje velikost a polaritu přivedeného napětí [11], [12], [14].



Obrázek 13: Molekulární model pro vysvětlení přímého piezoelektrického jevu, a) molekula v klidovém stavu, b) molekula vystavena vnější síle, c) polarizační jev na povrchu materiálu [14]



Obrázek 14: Názorná ukázka přímého (část a) a nepřímého (část b) piezoelektrického jevu [11].

3.2.2 Piezoelektrické materiály

Podle typu struktury lze rozdělit piezoelektrické materiály do 3 skupin. První skupinou jsou monokrystalické piezoelektrické látky (monokrystaly), kam například patří křemen (SiO_2), lithium niobát (LiNbO_3) a lithium tantalát (LiTaO_3). Jednotlivé krystaly jsou anizotropní a vykazují různé materiálové vlastnosti závislé na jejich řezu a směru šíření uzv vln. Využití těchto monokrystalů je důležité pro kmitočtově stabilizované oscilátory a akustická zařízení pracující s povrchovými vlnami tzv. SAW (Surface Acoustic Wave) zařízení [13].

Další skupinou jsou polycrystalické látky (piezoelektrická keramika), kam patří materiály na základě titaničitanu barnatého (BaTiO_3), niobátů a tuhých roztoků titaničitanů a zirkoničitanů olovnatých ($\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$). Piezoelektrická keramika (PZT) se vyrábí lisováním příslušného jemného prášku a vypalováním v peci. Poté následuje polarizace zahřátím obvykle v oleji blízko nad Curieovu teplotu, přičemž se na elektrody přiloží vysoké napětí kolem $3 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$. Poslední zmíněnou skupinou jsou organické polymery [1], [13].

3.3 Ultrazvukový snímač

Pro popis uzv snímače slouží obrázek 15 [11] na kterém je schéma jednoduchého snímače s jedním piezoelektrickým měničem.

Piezoelektrický měnič je obvykle vlepen mezi vnější krycí vrstvu a vnitřní tlumicí vrstvu tzv. *backing*. Na stranách měniče jsou elektrody tvořené vypáleným stříbrem nebo práškem chromu a zlata, vnější elektroda je uzemněna. Vnější krycí vrstva je často tvořena umělou pryskyřicí, která bývá plněna kovovým práškem pro akustické přizpůsobení měniče, a vnějšího prostředí se kterým je snímač v kontaktu. Pro činnost snímače má velký význam tloušťka krycí vrstvy d_0 a jejího vlnového odporu z_0 .

Aby bylo dosaženo minimální změny vysílaného nebo přijímaného signálu ochranou vrstvou, platí pro parametry d_0 , z_0 vztahy:

$$d_0 = \frac{\lambda_0}{4} \quad [\text{m}] \quad (1.25)$$

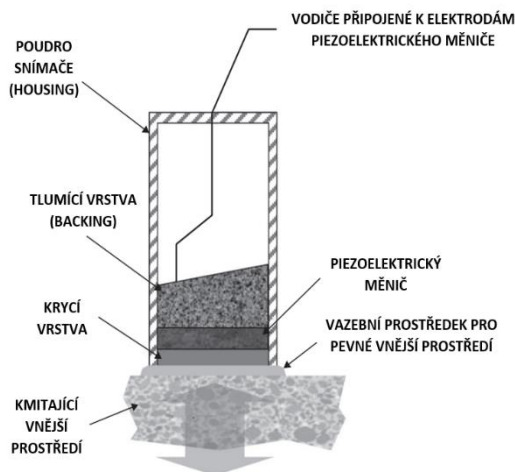
$$z_0 = \sqrt{z_1 z_2} \quad [\text{Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}]. \quad (1.26)$$

λ_0 je vlnová délka odpovídající rezonanci měniče $[\text{m}]$, z_1 vlnový odpor měniče a z_2 je vlnový odpor vnější vrstvy $[\text{Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}]$.

Nevýhodou navržené krycí vrstvy je například její optimalizace pro jednu frekvenci, což vyplývá ze vztahu (1.25). Pro ideální funkci měniče je důležité, aby kmital v rezonanci, při níž je vysílaný akustický tlak největší. Nejpoužívanější je základní rezonanční frekvence, kdy pro tloušťku d měniče platí vztah:

$$d = n \frac{\lambda}{2} = n \frac{c}{2f} \quad [\text{m}], n = 1 [-]. \quad (1.27)$$

c je rychlost šíření uzv podélných vln v měniči $[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$, f je žádaná rezonanční frekvence $[\text{Hz}]$. Jestliže chceme, aby byla rezonanční frekvence měniče z LiNbO_3 5 MHz, bude při rychlosti šíření $7400 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ tloušťka měniče pouhých 0,74 mm, což vyžaduje velmi přesnou výrobu. Zmíněná vnitřní tlumicí vrstva je obvykle vyrobena ze směsi umělé pryskyřice a wolframového prášku. Účelem této vrstvy je co nejrychleji utlumit uzv pulzy, což vede k snížení mrtvého pásma a ke zvýšení prostorového rozlišení [1], [11].



Obrázek 15: Schéma piezoelektrického snímače pro popis, upraveno [11]

4. METODY MAPOVÁNÍ ULTRAZVUKOVÉHO POLE

Pro měření a zobrazení parametrů vyzařovaného uzv pole ve vybraném prostředí bylo vypracováno několik metod, které si v našem případě rozdělíme tímto způsobem:

- Metody založené na tepelných účincích vyzařovaného pole (např. použití infračervené termokamery).
- Optoakustické metody, vycházející ze změny indexu lomu média při průchodu uzv vlnění (např. šlírová metoda).
- Metody využívající kalibrovaný hydrofon.

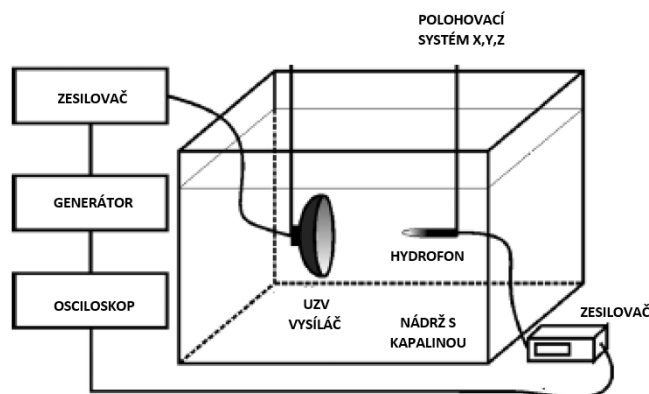
4.1 Měření hydrofonem

Tato metoda je při mapování uzv pole pravděpodobně využívána nejčastěji. Pro měření je využit hydrofon, což je speciální elektroakustický měnič, využívaný k absolutnímu měření akustického tlaku. Hydrofony jsou konstruované z piezoelektrických organických polymerů jako např. PVDF, a vzhledem k rozměrům lze jejich měření považovat za bodové. Tlaková vlna dopadající na povrch snímače generuje v hydrofonu elektrický signál, který je dále zesílen zesilovačem a přiveden na vstup osciloskopu. Pro časovou závislost výsledného akustického tlaku $p(t)$ platí vztah:

$$p(t) = \frac{u(t)}{M(f)} \text{ [Pa]}. \quad (1.28)$$

$u(t)$ je generované napětí hydrofonem naměřené na osciloskopu [V], $M(f)$ je frekvenčně závislá citlivost hydrofonu. Při kalibraci hydrofonu je pak zajištěna vysoká přesnost absolutního měření akustického tlaku [15]. Pro popis rozložení akustického tlaku v prostoru zkoumaného snímače je potřeba bodové měření opakovat pro jednotlivé body v prostoru polohováním hydrofonu.

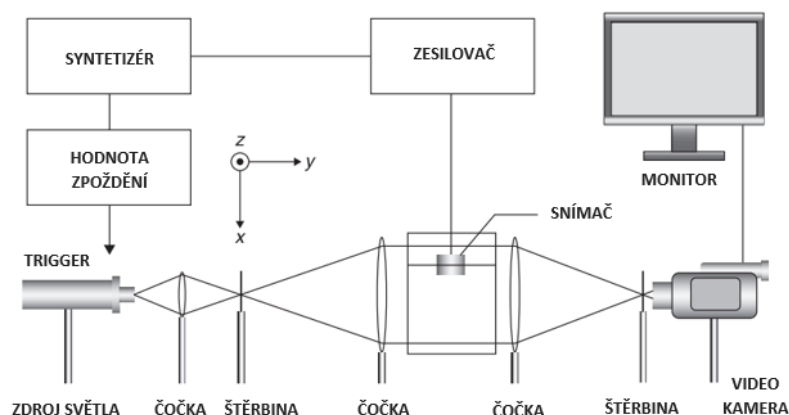
Zjednodušené schéma popisované metody je na obrázku 16 [16]. Výhodou oproti námi použité metodě je fakt, že hydrofon má konstantní měřicí vlastnosti. Měřicí vlastnosti použité metody, kde vysílač i měřicí přijímač je samotný senzor se pak odvíjí od vlastností a stavu konkrétního zkoumaného senzoru. Nevýhoda obou metod spočívá v době měření, která roste počtem měřených bodů.



Obrázek 16: Zjednodušené schéma měřicí metody s hydrofonem, upraveno [16]

4.2 Šlírová metoda

Zástupcem optoakustické metody je šlirová metoda založena na vychylování světelných paprsků v místech, kde dochází ke změně indexu lomu média v důsledku změny akustického tlaku při šíření uzv vlny. Schéma metody je na obrázku 17 [11].



Obrázek 17: Schéma měřicí aparatury využívající šlírové metody, upraveno [11]

Základem měřicí aparatury je stroboskopické vysíláníbleskových světelných výbojů z bodového světelného zdroje (xenonová výbojka) triggerované po určité době zpoždění od vyslání uzv pulzu snímače. Bílé světlo z výbojky, které je nekoherentní a širokospektrální, prochází od zdroje soustavou čoček a šěrbin až k snímající video kameře. Při průchodu světelných paprsků uzv vlněním dochází k jejich ohybu a tedy vychýlení, což vede k dopadání paprsků i mimo šěrbinu a vzniku světlých a tmavých míst na snímaných obrazech odpovídající rozložení akustického tlaku [1], [11]. Výhodou metody je rychlá vizualizace uzv pole a jeho chování v čase.



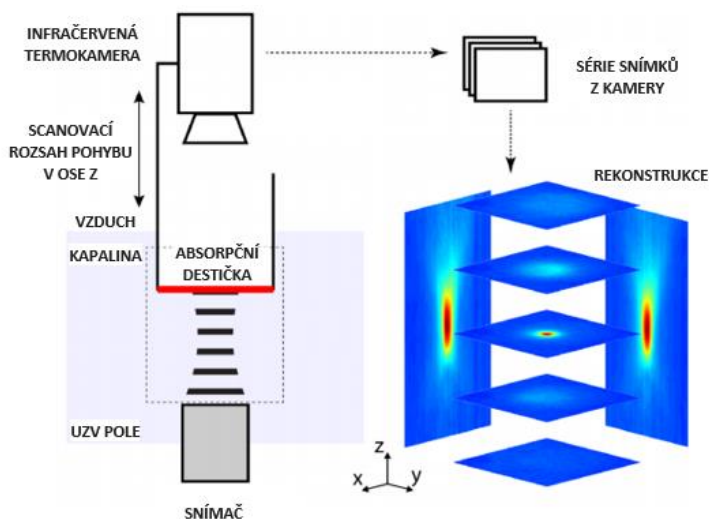
Obrázek 18: Ukázka snímku uzv pole z popisované měřicí aparatury [11]

4.3 Měření tepelných účinků infračervenou termokamerou

Poslední popisovaná metoda opět umožňuje rychlé pozorování uzv pole. Principiálně jde o měření tepelných účinků uzv pole, z nichž lze za jistých podmínek popsat rozložení akustického tlaku nebo jeho intenzity.

Principiální schéma je na obrázku 19 [17]. Měřicí zařízení obsahuje válcovou kapsu jejíž dno je tvořeno absorpčním materiálem. Kapsa zajišťuje, že vrchní plocha ze strany kamery je ve vzdušném prostředí a spodní v prostředí kapaliny ve které se šíří ultrazvuk

ze snímače. Zároveň je kapsa namontovaná tak, aby vzdálenost kamery od absorpční destičky byla konstantní. Během měření se kapsa s kamerou pohybují známou rychlostí v ose Z. Při dopadání vysílaných uzv vln na destičku, dochází k jejímu zahřátí, které závisí na akustickém tlaku vlny, absorpčních vlastnostech destičky a dalších materiálových konstantách, které jsou pro dané měření známy. Proto je možné vytvořit 3D graf rozložení akustického tlaku v prostoru, jak je vidět v pravé části obrázku 19 [17]. Pro podrobnější informace a popisované metodě odkazují na zdroj [17].



Obrázek 19: Principiální schéma měřicí metody snímání tepelných účinků infračervenou termokamerou, upraveno [17]

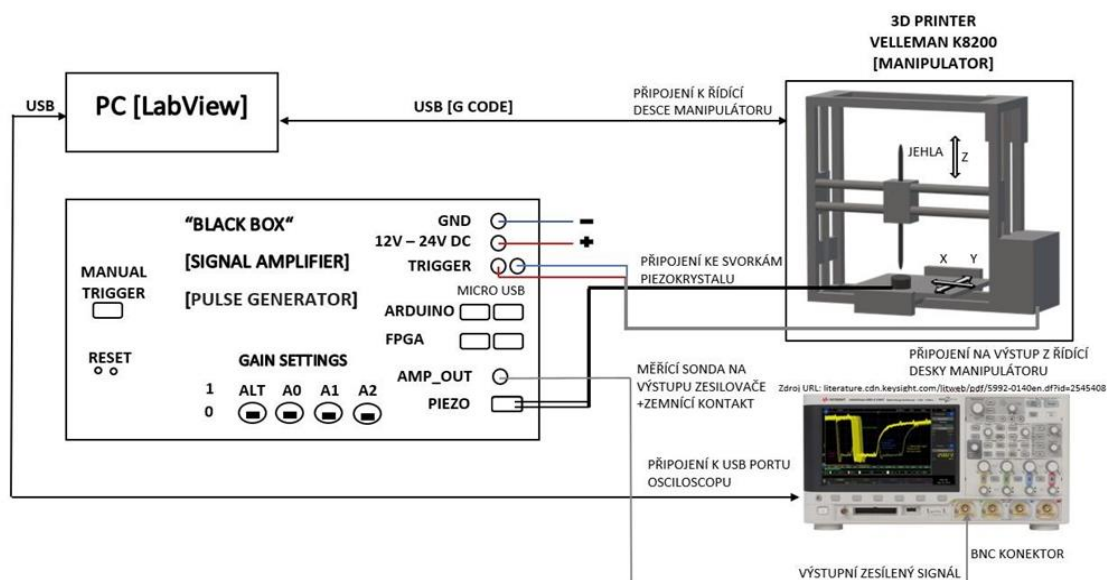
5. LABORATORNÍ MĚŘICÍ SYSTÉM

5.1 Úvod

Praktická část práce spočívala nejprve v seznámení se s laboratorním měřicím systémem pro měření vlastností uzv pole vyvíjeným ve společnosti Continental, což pro začátek znamenalo identifikovat počáteční stav. Ukázalo se, že měřicí aparatura byla rok mimo provoz, a při počátečních neúspěšných snahách o zapojení, jsem tudíž zjistil, že není funkční. Nakonec bylo nutné vyřešit sérii technických problémů, které se při zprovoznování aparatury objevily a jejichž řešení bude zmíněno při popisu jednotlivých částí systému.

Principiálně využívá měřicí aparatura pro měření parametrů uzv vln odrazovou metodu, kdy uzv sonda piezosnímače je vybuzena k vysílání několika krátkých obdélníkových impulzů, které jsou vedeny prostředím kapaliny k odraznému objektu, v tomto případě kulovité jehly. Odražené echo od této jehly je snímáno toutéž uzv sondou, tentokrát ve funkci přijímače. Z naměřeného průběhu z osciloskopu lze poté vyčíst parametry uzv pole v bodě odrazu jehly jako například útlum nebo rychlost šíření vlnění. Při opakování tohoto procesu pro ostatní body odrazu od jehly v prostoru snímače, lze z naměřených hodnot charakterizovat chování celého uzv pole.

5.2 Popis celku



Obrázek 20: Základní schéma zapojení měřicí aparatury

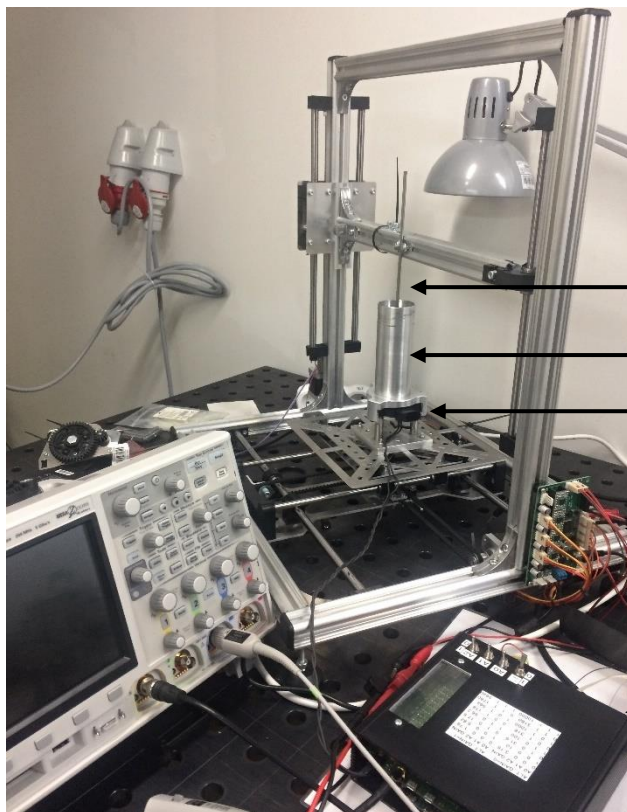


Schéma na obrázku 20 obsahuje přehled komponent měřicí aparatury včetně způsobů vzájemného propojení a použitých konektorů v konkrétních případech. Na obrázku 21 je poté fotografie celku.

Měřicí jehla

Nádržka pro nalití kapaliny

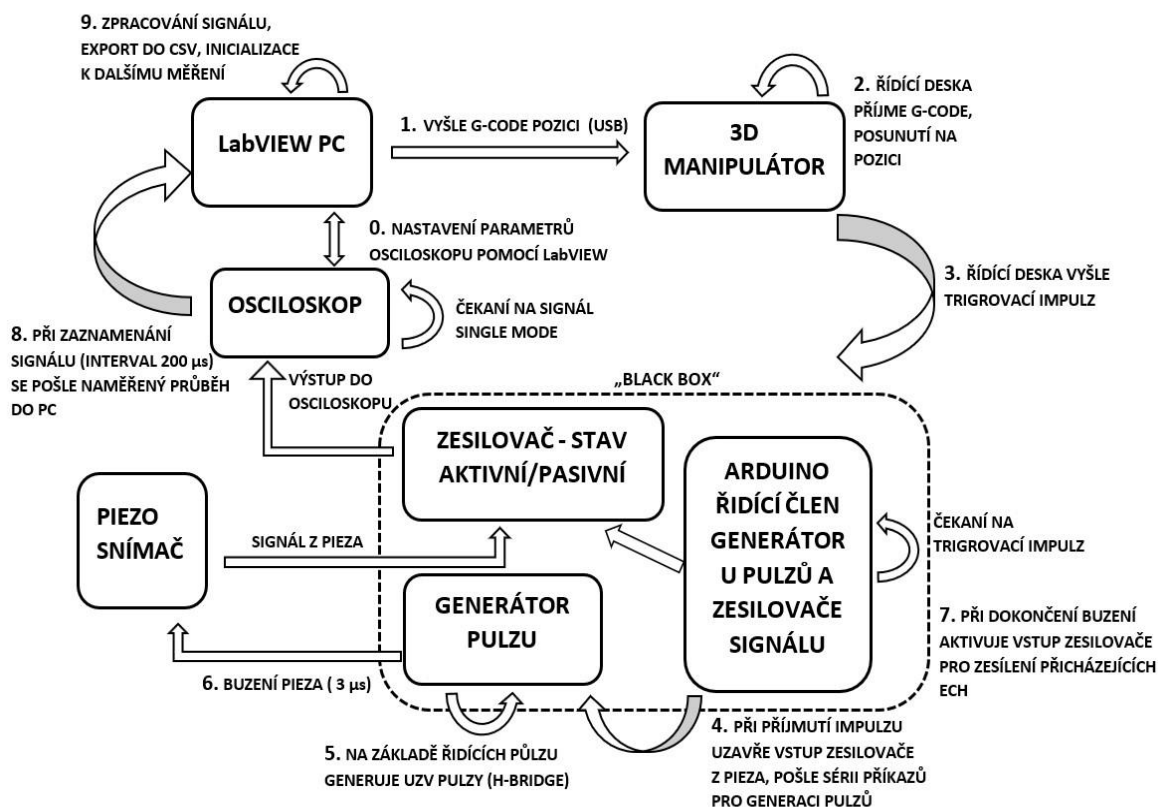
Osazený snímač tvořící dno nádržky

Řídící deska manipulátoru

Přípravek na generování uzv pulzů a zesilování signálu

Obrázek 21: Fotografie měřicí aparatury (chybí připojený PC)

Pro pochopení funkcionality systému jako celku slouží řídicí diagram na obrázku 22.



Obrázek 22: Řídicí diagram měřicího cyklu

5.3 3D manipulátor

Jak bylo řečeno v úvodu principu měření, je potřeba změřit pokles amplitudy echa odrazu od jehly v bodech prostoru, do kterého uzv měnič vysílá.

Pro účely nastavení vzájemné polohy mezi uzv snímačem a jehlou byla využita 3D tiskárna belgického výrobce Velleman typ K8200. Jedná se o kartézskou 3D tiskárnu, u níž se podložka na spodní (základové) části pohybuje 2 dvou horizontálních osách X,Y a rameno rovnoběžné s podložkou se pohybuje ve vertikální ose Z.

Předělání tiskárny pro účely manipulace spočívalo v odmontování extruderu (tiskové části), která byla přišroubovaná na středu ramene pro vertikální pohyb, a odmontování základové podložky. Místo extruderu se kolmo k základně přišroubovala k ramenu kovová tyč o průměru 5 mm a délce 200 mm s kulovým koncem na straně blíže základny. Místo původní tiskové podložky byla vytvořena kovová konstrukce s otvory pro uložení různých typů senzorů. Pro testování uzv pole v kapalinách, lze na senzor přidělat kovová nádržka tak že čelo senzoru tvoří dno této nádržky.

Polohování tiskárny je zajištěno pohybovou soustavou se 4 krokovými motory řízenými dodanou řídicí deskou. Výrobce uvádí rozlišení pohybu v osách X, Y 0,015 mm a v ose Z dokonce 0,781 μm , tudíž by měla být zajištěna dostatečná přesnost polohování v krocích 0,5 mm ve všech osách, které se využívají jako nejmenší kroky při současném měření.

Samotné ovládání pohybu probíhá posíláním příkazů v programovacím jazyce g-kód z počítače na řídicí desku. Vzájemné propojení mezi počítačem a řídicí deskou je zajištěno pomocí USB. Základní popis syntaxe g-kódu a fungování tohoto jazyka je zobrazen na následujících obrázcích.



Obrázek 23: Popis polohovacího příkazu v jazyce g-kód

```
M203 X80 Y80 Z10 ; nastavení maximální rychlosti pohybu v jednotlivých osách
G21 ; nastavení jednotek v milimetrech
G91 ; nastavení relativního polohování vůči počátku os (home), počátek = poloha 0
G28 X Y ; nastavení počátku v osách X,Y, pohyb manipulátoru do sepnutí koncových kontaktů
G28 Z ; nastavení počátku v osách X,Y
M84 S0 ; deaktivace krokových motorů do dalšího polohování
M42 P35 S0 ; nastavení napěťové úrovně 0 na výstupu z řídicí desky
G00 Z235 ; rychlé polohování (nahoru) 235mm v ose Z
G00 X112.5 Y70 ; polohování nad střed snímače
G92 X0 Y0 ; reset počátků os X,Y

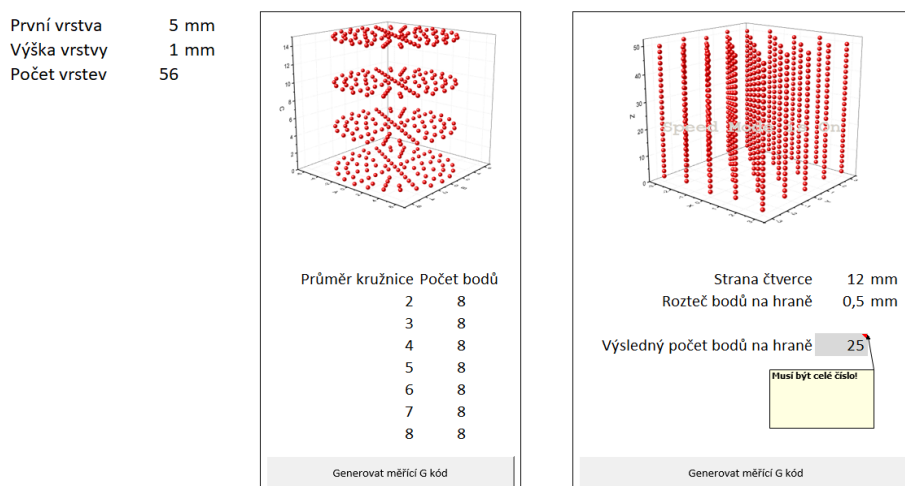
G28 Z ; nastavení počátku v ose Z, pohyb jehly do sepnutí koncového kontaktů na testovacím snímači
G00 Z140; pohyb jehly (140mm) v ose Z pro osazení testovacího snímače
```

Obrázek 24: Série příkazů s komentářem pro inicializaci měřicí aparatury

Jak jde vidět na obrázku 24, příkazy v jazyce g-kód nejsou vždycky jen polohovacího charakteru, ale lze pomocí nich nastavovat například napěťové úrovně na výstupech řídicí desky. Tohoto je využito v našem případě pro nastavení triggerovacího signálu při dokončení polohování.

Ke generaci g-kódu pro polohování ke všem bodům v prostoru, které si vybere uživatel, slouží již vytvořené makro v tabulkovém softwaru Microsoft Excel. Uživatel si může vybrat ze 2 módů pro tvar, jaký budou body pro prostoru zaujímat. Lze vytvářet soustředné vrstvy kružnic nebo vrstvy čtverců vyplněné určitým počtem bodů s různým odstupem od sebe, naskládaných s nastavitelným odstupem v ose Z.

Výsledný g-kód je vygenerován v textovém souboru s koncovkou .nc, který se načte v měřicím programu napsaném v jazyce LabVIEW.



Obrázek 25: Makro pro generování g-kódu

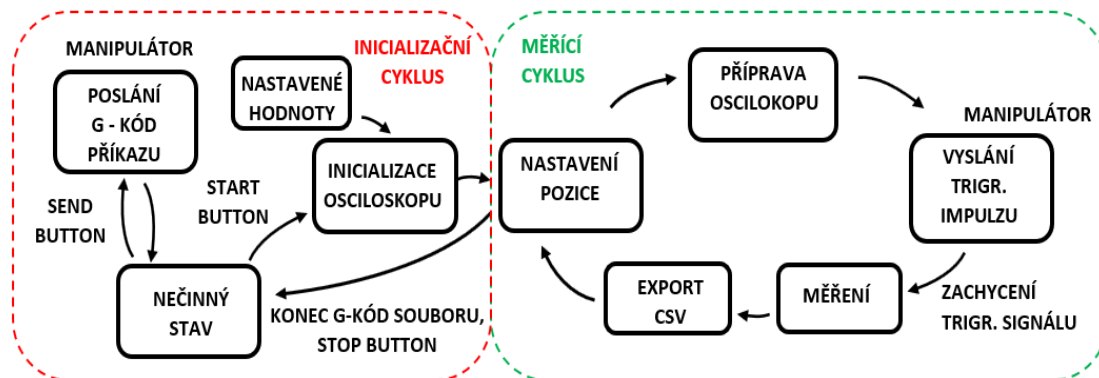
Počáteční problémy s manipulátorem, který byl na začátku nefunkční, spočívaly ve špatně připojeném micro-USB konektoru na řídicí desce, k čemuž došlo pravděpodobně při předchozích opravách. Konektor stačilo správně připájet a nahrát do desky nový firmware.

5.4 LabVIEW program

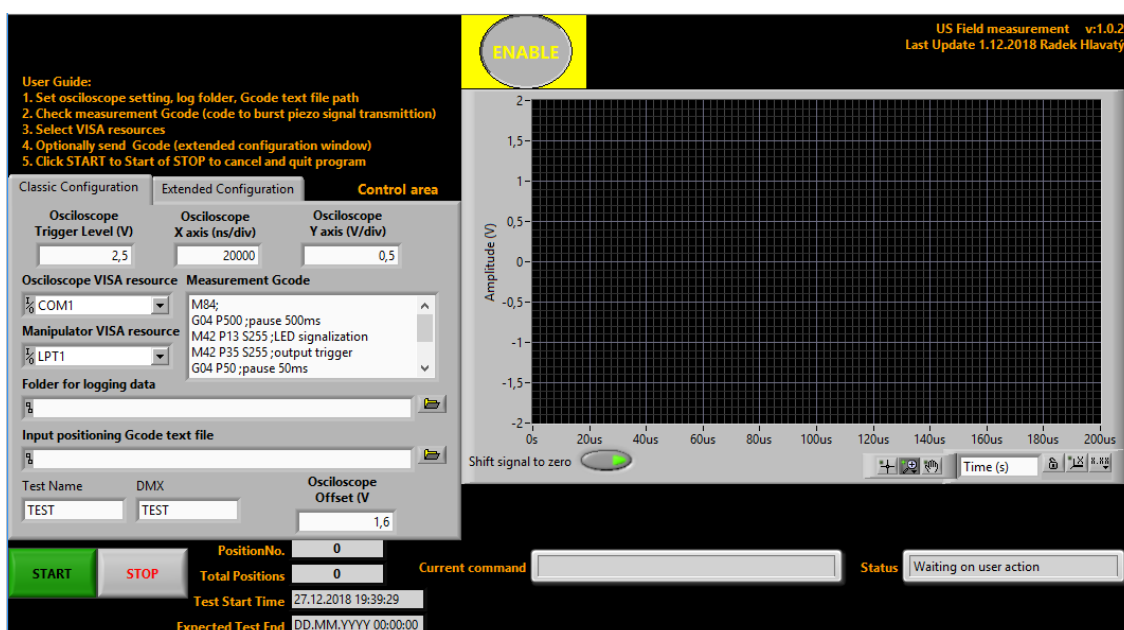
Pro účely řízení měřicího cyklu slouží měřicí program vyvinutý v prostředí LabVIEW. Mezi jeho hlavní funkce patří:

- Ovládání manipulátoru při měřicím cyklu, inicializace jeho pohybových os před měřením, nastavení triggerovacího výstupu na řídicí desce manipulátoru a aktivace/deaktivace přívodu napájení do krokových motorů (z důvodu rušení).
- Načtení naměřeného průběhu na osciloskopu, export naměřených hodnot do csv textového souboru a inicializace nastavení osciloskopu.

Fungování programu lze rozdělit na 2 cykly: inicializační a měřicí. Inicializační cyklus souvisí s nastavením parametrů osciloskopu a manuálním ovládáním manipulátoru zadáváním g-kódu v prostředí programu. Měřicí cyklus poté obsahuje jednotlivé kroky měření jednoho bodu v prostoru uzv snímače. Ke konkrétnějšímu popisu slouží řídicí diagram na obrázku 26.



Obrázek 26: Řídící diagram měřicího programu v LabVIEW



Obrázek 27: Prostředí měřicího programu

Na obrázku 27 je screen prostředí měřicí aplikace, který lze rozdělit na tři části. V levé části jsou kolony pro nastavení důležitých parametrů osciloskopu jako rozlišení os X, Y, triggerovací úroveň a offset. Dále je zde nastavení portů pro propojení PC s manipulátorem a osciloskopem nebo kolonka s výběrem adresáře pro ukládání csv souborů jednotlivých měření a kolonka pro výběr umístění souboru s g-kódem. Série příkazů v části *Measurement Gcode* s textovým editorem zahrnuje úkony jako vypnutí krokových motorů při dokončení polohování a obsluhu triggerovacího impulsu pro aktivaci přípravku generujícího a zesilovacího uzv pulzy.

V pravé části se nachází obrazovka osciloskopu, která kopíruje průběh na osciloskopu reálném. Virtuální osciloskop obsahuje funkci *Shift signal to zero*, která průměruje naměřené hodnoty, aby výsledný průběh posunula o daný průměr a zarovнала k nule na ose y.

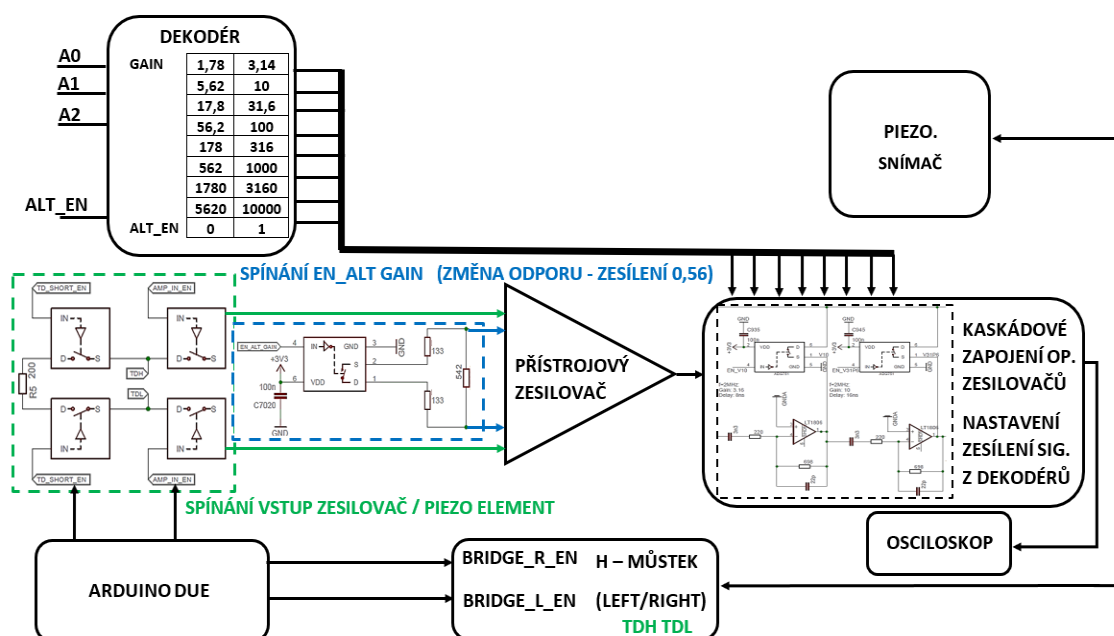
Spodní lišta prostředí ukazuje informace o probíhající měření jako: celkový počet měřených bodů, aktuální počet naměřených bodů, čas startu a přibližného konce měření, které program dopočítává z průměrné doby trvání jednoho měření, aktuální g-kód příkaz a stav ve kterém se program nachází (viz. řídicí diagram na obrázku 26). Při kliknutí na

záložku *Extended configuration* se uživateli okno s textovým editorem pro manuální zadávání g-kódu.

Problémů a chyb, které se vyskytly u měřicího programu bylo několik. Nejprve bylo potřeba změnit nastavení instrument driveru pro použitý osciloskop. Dále přidat nastavení offsetu osciloskopu a vyřešit chyby, které se často vyskytovaly a neumožňovaly dokončit měření.

5.5 Přípravek pro generování a zesilování uzv pulzů

Pro účely generování uzv pulzů a zesilování odraženého echa signálu slouží zařízení vyvíjené pro tyto účely společností Continental. Toto zařízení bylo nefunkční a jeho zprovoznění zabralo nejvíce času věnovanému fyzickému zprovoznění celé aparatury. Díky poskytnutým schémátům k zařízení se mi podařilo pochopit funkcionalitu všech jeho částí, která je zřehledněna schématem na obrázku 28.

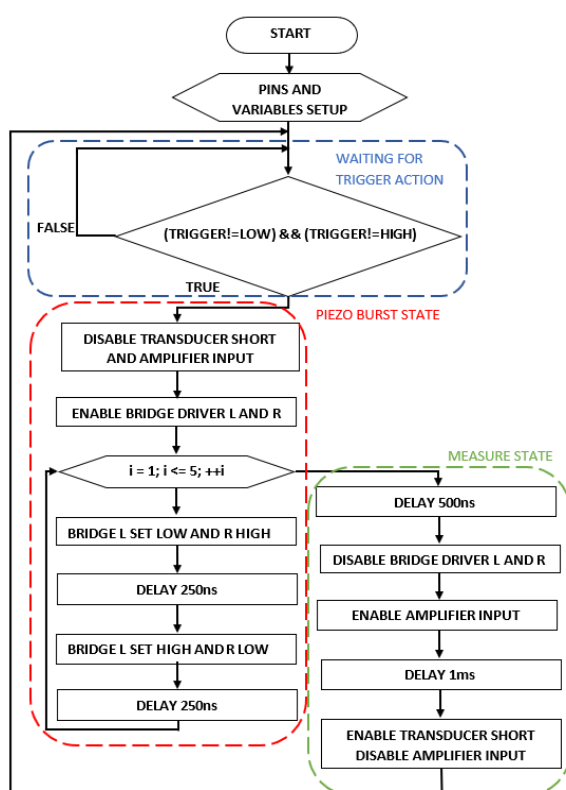


Obrázek 28: Principiální schéma zapojení přípravku

Schéma uvedené výše obsahuje pouze prvky zařízení nutné pro pochopení toho, jak funguje. Ve skutečnosti je zařízení složitější a obsahuje další komponenty, a především vzájemná propojení mezi sebou.

Řídícím členem přípravku je jednodeskový (*single-board*) počítač Arduino Due, který má několik hlavních funkcí:

- Obsluha části obsahující H-můstek s řídicími driversy, sloužící ke generování uzv pulzů.
- Obsluha části se spínači před vstupem do zesilovače uzv přichozího echa (zelený rámeček na schématu), sloužící k odpojení vstupu při generaci uzv pulzů (mohlo by dojít k poškození zesilovače) a následného připojení vstupu při čekání na echo.
- Nastavení frekvence generace uzv pulzů a vstupního napětí H-můstku.

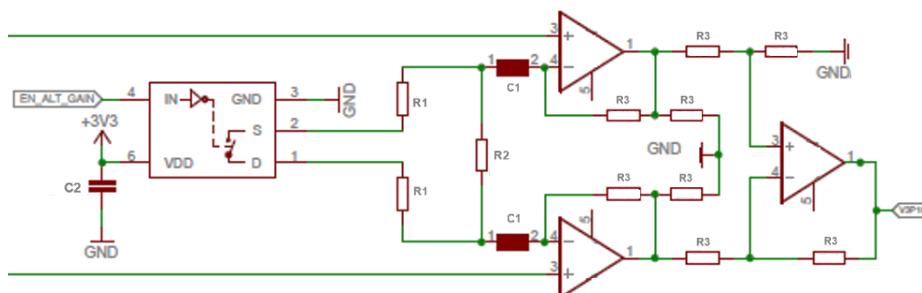


Obrázek 29: Vývojový diagram programu na Arduino

Pro účely zesílení přicházejícího echa byl použit nízkošumový přístrojový zesilovač se zesílením 3,16 u něhož je výhodou jednoduché nastavení zesílení změnou vnějšího odporu, jak lze vidět na obrázku 30.

Aby bylo možné měnit nastavení zesílení, navazuje na přístrojový zesilovač sériové zapojení totožných operačních zesilovačů opět se zesílením 3,16 optimalizovaných pro frekvenci 2 MHz (viz obrázek 31). Přepínači dekodéru, lze vybrat konkrétní zesílení skládající ze součinu zesílení jednotlivých zesilovačů od počátku až k zesilovači jehož výstup je sepnut na výstup do osciloskopu.

Nastavením kombinace logických úrovní na vstupu do dekodéru přepínači na přípravku lze volit zesílení 5 dB, 10 dB, 15 dB, ..., 80dB.



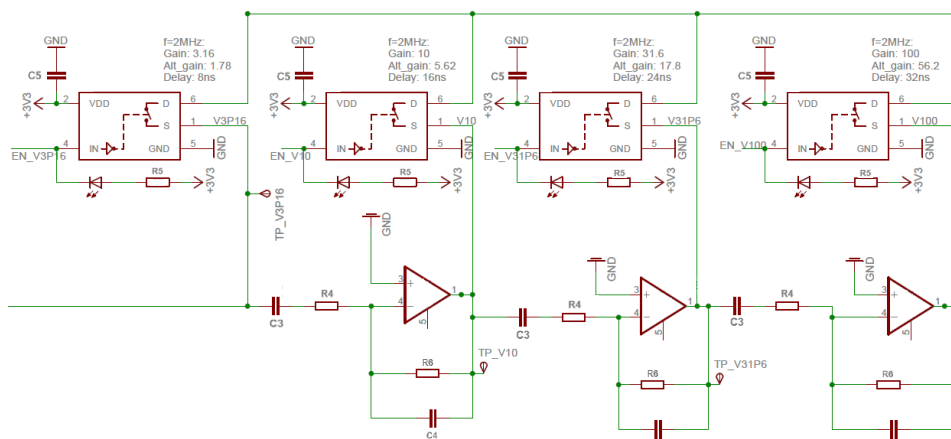
Obrázek 30: Přístrojový zesilovač s přepínatelným vnějším odporem

Stavový diagram programu běžícím na Arduino je zobrazen na obrázku 29. Principiálně jde rozdělit na 3. části, barevně rozlišené rámečky v diagramu.

V první části (modrý rámeček) se ve smyčce čeká na příchod triggerovacího pulzu (jeho hranu).

V následující části (červený rámeček) dochází k odpojení vstupu do zesilovače a vybuzení 10 2MHz pulzů nastavováním log 1 nebo 0 na příslušných pinech driveru H-můstku s časovou prodlevou 250 ns.

Po dokončení buzení impulsů následuje 500 ns prodleva pro utlumení budícího signálu, aby se sepnul na 1 ms vstup do zesilovače echa. Poté se vrací program z měřicí části k čekání na další trigger. impuls.



Obrázek 31: Sériové zapojení op. zesilovačů



Napájecí kabely

Pasivní sonda s uzemňujícím kontaktem připojena na SMA koaxiální konektor (výstup do osciloskopu)

Pravdivostní tabulka kombinací vstup. log. hodnot pro nastavení výsledného zesílení

Přepínače

Manuální tlačítkový trigger

Připojené kabely z řídicí desky manipulátoru pro triggerování při samotném měření

Obrázek 32: Fotografie přípravku s popisem

Protože přípravek nereagoval na triggerování, bylo potřeba proměřit vodivé spoje s ním spojené, přičemž jsem objevil nefunkční komparátor, který nakonec stačilo vyměnit. Dále nahraný program Arduina potřeboval úpravy, protože docházelo k několikanásobnému buzení H-můstku.

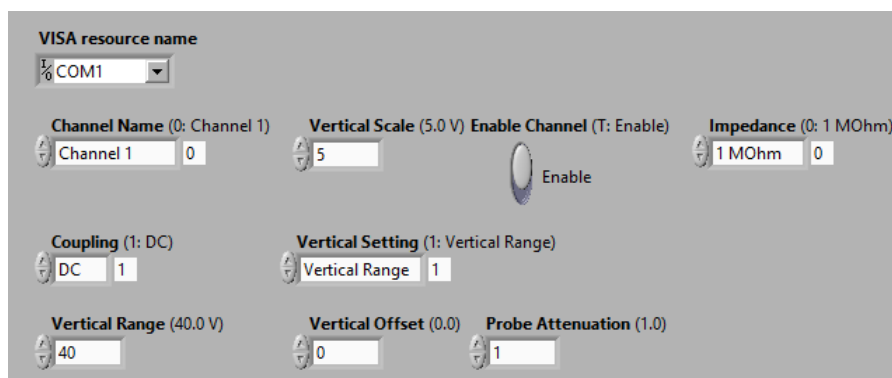
5.6 Osciloskop

Pro účely měření byl využit osciloskop amerického výrobce Keysight typu DSOX3024T se šířkou pásma 200 MHz a obvyklým rozlišením A/D převodníku 8 bitů. Výhodou tohoto osciloskopu je podpora instrumentačních driverů pro prostředí LabVIEW a možnost propojení přes USB rozhraní. Díky tomu je možné nastavovat parametry osciloskopu automatizovaně pomocí programu v LabVIEW (viz. obrázek 34) a získat naměřená data pro další zpracování.

Před každým měřením odrazu od bodu v prostoru je osciloskop automaticky nastaven do tzv. *single* triggerovacího modu s předem nastavenou napětíovou triggerovací úrovní. Osciloskop pak reaguje na triggerovací událost pouze jednou při překročení nastaveného napětí.



Obrázek 33 : Fotografie osciloskopu Keysight DSOX3024T

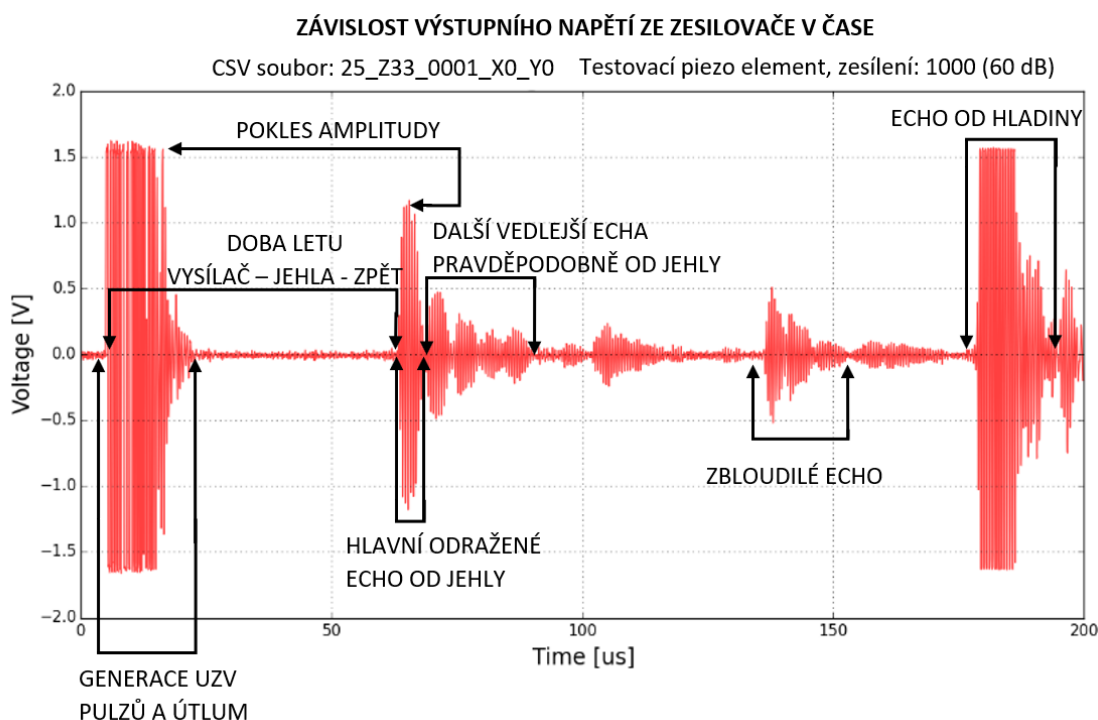


Obrázek 34: Ukázka nastavování parametrů v LabVIEW

5.7 Ukázka naměřeného signálu jednoho měřicího cyklu

Výstupem z jednoho měřicího cyklu je csv soubor s dvojicemi hodnot, v jehož názvu jsou obsaženy informace jako zadaný kód/název měřeného prvku, teplota, souřadnice bodu x, y, z a pořadí naměřeného bodu v ose Z. Zmíněnými naměřenými hodnotami je hodnota napětí a příslušný čas od triggerovací události. Jde o exportované hodnoty z jednoho průběhu na osciloskopu.

Příklad takového průběhu je na obrázku 35, kde byl pro vyzkoušení měření použit dále nespecifikovaný piezo snímač ponořený v isopropyalkoholu s jehlou ve vzdálenosti 33 mm na ose snímače.



Obrázek 35: Ukázka měřeného průběhu

Z naměřeného průběhu na obrázku výše lze vyčíst několik důležitých parametrů popisujících vlastnosti chování daného prostředí v bodě odrazu od jehly. Zajímat nás bude především hodnota amplitudy hlavního odraženého echa od jehly a doba letu od vysílače k jehle a zpět.

Jestliže naměříme hodnoty této napětové amplitudy, která souvisí s intenzitou odraženého ultrazvuku, pro dostatečný počet bodů v okolí vysílače, můžeme tak charakterizovat intenzitu velké části uzv pole, a hlavně vysledovat tvar vyzařovaného uzv svazku v prostoru.

5.8 Specifika měřicí soustavy

Při testovacích prostorových měřeních vyplynulo několik faktů, které je potřeba brát v potaz:

- Měřicí metoda má omezení při měření blízkého uzv pole, spočívající ve splnutí budících impulzů s odraženým echem od jehly.
- Rozlišení průběhů intenzity naměřeného pole v prostoru se odvíjí od počtu, a tudíž hustoty naměřených bodů. Pro dostatečné pozorování změn v jedné

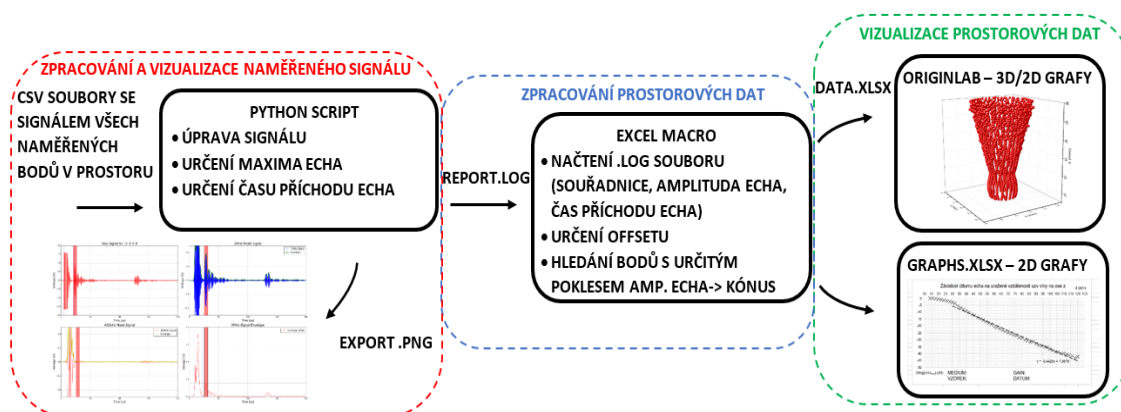
vrstvě v ose Z vzhledem k možnostem manipulátoru, kdy mezi dvěma body je vzdálenost 0,5 mm, docházíme k hustotě přibližně 4 body na mm^2 . Pro takovou čtvercovou vrstvu s délkou hrany 12 mm s body 0,5 mm od sebe dostáváme počet 625 bodů, chceme-li naměřit 60 vrstev s milimetrovou mezerou mezi sebou, dostáváme 37500 bodů k měření. Pro vysílače s rozměry maximálně několika centimetrů tak docházíme k počtu desítkám tisíc bodů. Protože celý proces polohování a měření u jednoho bodu trvá při současné konfiguraci průměrně 1,5 s, měření ze zmíněného příkladu bude trvat přibližně 15 hodin 45 minut, což poukazuje na jednu z nevýhod této měřicí metody.

- Další nevýhodou je množství paměti, které bude zabírat 37500 naměřených bodů. Při průměrné velikosti jednoho csv souboru 250 kB dostáváme data o velikosti 9,375 GB. Pokud chceme, aby nám z měření zůstala veškerá data, pak budou zabírat poměrně velký prostor na uložení.
- Jestliže má osciloskop během celého měření všech bodů nastavenou stejnou základní jednotku napětí na vertikální ose, tak aby změřil i vyšší hodnoty echa, přesnost měření ech s nízkou amplitudou bude při rozlišení A/D převodníku 8 bitů mnohem menší, tím pádem také rozlišitelnost změn a vyhodnocení hranice poklesu amplitudy ve vrstvě prostorového uzv pole o určitou hodnotu.
- Uživatel před počátkem měření musí zvolit vhodné zesílení na přípravku z důvodu odlišného útlumu látek. Pro jednoduché odzkoušení nastavení slouží tlačítko na straně přípravku pro manuální triggerování. Díky manuálnímu nastavení polohy jehly přes LabVIEW prostředí a přepnutí osciloskopu do triggerovacího single modu může uživatel zjistit nejen ideální zesílení přípravku, ale zároveň vhodný prostor a rozpětí souřadnic pro výsledný polohovací soubor s g-kódem.
- Ačkoliv výsledky testovacího měření pro ověření přesnosti pohybu manipulátoru odpovídají technické specifikaci výrobce, ukázalo se, že při nasazení snímače na kovovou konstrukci vzniká mezi snímačem a konstrukcí vzájemná vůle, kvůli které může být snímač posunut až o 2 milimetry určitým směrem. Jedná se o odchylku, která značně ovlivňuje naměřené výsledky a znemožňovala by porovnat mezi sebou jednotlivá měření, protože stejným souřadnicím v prostoru by odpovídala jiná hodnota měřené amplitudy echa, respektive hodnota posunutá o offset daný právě touto vzájemnou vůlí. Protože se nepodařilo zajistit, aby tato konstrukční vada byla odstraněna fyzicky, musel jsem vymyslet řešení, které až z naměřených dat vzniklý offset určí a přiřadí hodnotám amplitudy echa odpovídající souřadnice v prostoru. Díky tomu mohou být jednotlivá měření porovnatelná a opakovatelná, což je velice důležitý parametr každé měřicí soustavy.

V následujících kapitolách je proto podrobněji popsán naznačený způsob zpracování dat a výsledný kvantifikovaný přehled parametrů.

6. ZPRACOVÁNÍ A VIZUALIZACE DAT

Jak vyplývá ze závěru předchozí kapitoly, zpracování dat hraje při použití poskytnuté měřicí aparatury důležitou roli, protože do jisté míry zajišťuje opakovatelnost a porovnatelnost naměřených výsledků. Celý proces zpracování a vizualizace souhrnně znázorňuje obrázek 36, jehož jednotlivé části vyznačené v barevných blocích jsou podrobněji popsány v následujících kapitolách.



Obrázek 36: Diagram procesu zpracování a vizualizace dat

6.1 Zpracování naměřeného signálu v Pythonu

Za účelem zpracování naměřených průběhů signálu ze všech měřených bodů v prostoru byl využit již vytvořený skript v Pythonu, který bylo nutné upravit pro zpracování dat na použité aparatuře.

Principiálně skript načte postupně csv soubory všech měřených bodů, u každého určí maximální amplitudu echa a čas jeho příchodu, z názvu souboru pak vyčte souřadnice, a veškeré tyto parametry vloží do řádků v textovém souboru *report.log*, jehož ukázka je na obrázku 39. Mým úkolem bylo využít část programu generující upravený signál včetně signálové obálky, ze kterého byla vyfiltrována oblast 1,5 až 2,5 MHz obsahující nosnou frekvenci signálu 2 MHz, a navrhnout algoritmus určení maximální amplitudy echa a čas jeho počátku.

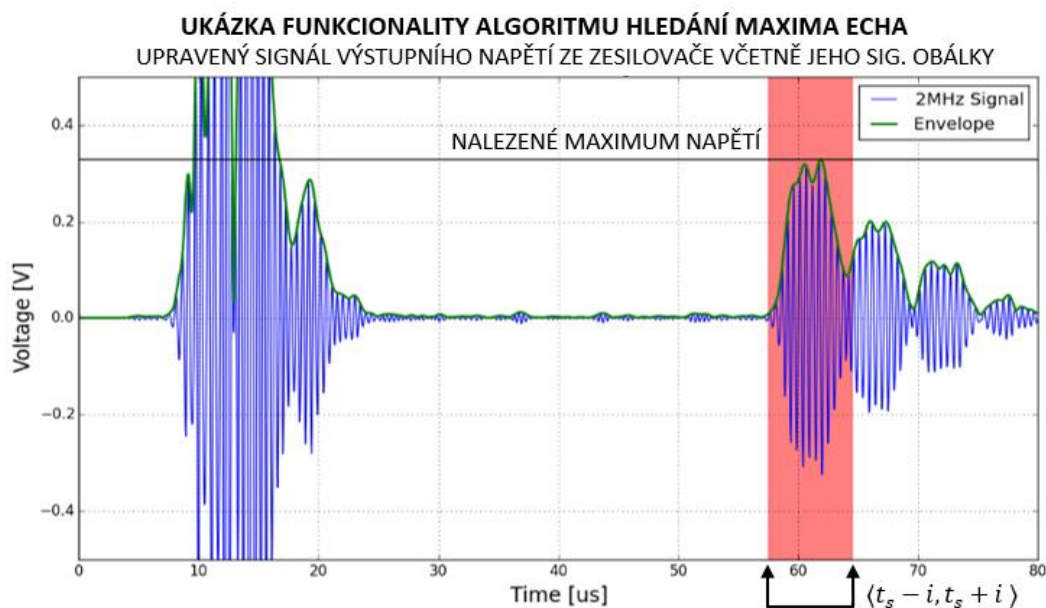
Jako funkční řešení se ukázalo hledat maximální amplitudu echa nalezením maximální hodnoty obálky upraveného signálu v časovém intervalu $\langle t_s - i, t_s + i \rangle$, jehož střed t_s je vypočten z rovnice:

$$t_s = kz_{pos} + (c + t_{ringUp}) [s]. \quad (1.29)$$

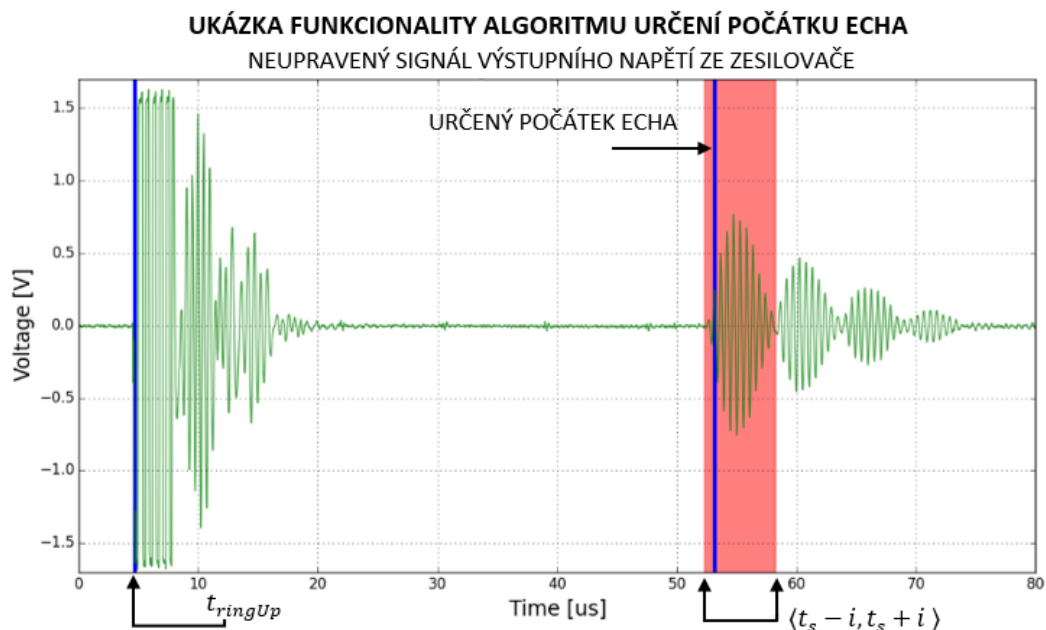
t_{ringUp} je čas počátku prvního vygenerovaného pulzu od triggerovací události osciloskopu, určen jako první přechod amplitudy přes určitou napěťovou úroveň tzv. *threshold* [s], z_{pos} je hodnota z-tové souřadnice měřeného bodu získaná z názvu měřeného souboru [mm], k je empiricky určený koeficient vyjadřující časové posunutí echa při pohybu jehly o jeden milimetr v ose Z [s/mm], c je empiricky určená časová konstanta, vyjadřující dobu trvání generování pulzů a jejich útlum [s]. Empiricky určené konstanty bylo samozřejmě nutné určit zvlášť pro každé použité médium.

Daný algoritmus funguje za předpokladu, že je správně nastaven počátek osy Z, kdy se jehla dotýká pouzdra snímače.

Pro určení času počátku echa byl aplikován podobný princip jako v předchozím případě, nicméně nakonec není využito signálu upraveného nýbrž původního. U upraveného signálu totiž kvůli šířce numerického filtru do jisté míry splývá echo s útlumovou částí generovaných impulzů i ve větších vzdálenostech. Stejně jako v předchozím případě se i při hledání počátku echa určuje interval hledání podle vztahu 1.29, nicméně v konstantě c tentokrát není obsaženo posunutí signálu z principu vlastnosti aplikovaného filtru. Čas počátku echa je časem prvního překročení absolutní hodnoty původního signálu zvolené napěťové úrovně – tresholdu v intervalu hledání. Ukázky funkcionality zmíněných algoritmů nalezneme v grafech na obrázcích 37 a 38.



Obrázek 37: Ukázka funkcionality algoritmu hledání maxima echa



Obrázek 38: Ukázka funkcionality algoritmu hledání počátku echa

TestName	PartID	Temperature	MeasNo	Vpp_echo_max	XPosition	YPosition	ZPosition	RingUp	StartEcho
65	5W30	25	001	0.131509074712	-6	-6	7	4.62	17.02
65	5W30	25	002	0.443233502711	-5,5	-6	7	5.02	17.02
65	5W30	25	003	0.139403085308	-5	-6	7	5.02	17.02
65	5W30	25	004	0.135675156166	-4,5	-6	7	5.02	17.02
65	5W30	25	005	0.132210558708	-4	-6	7	5.02	17.02

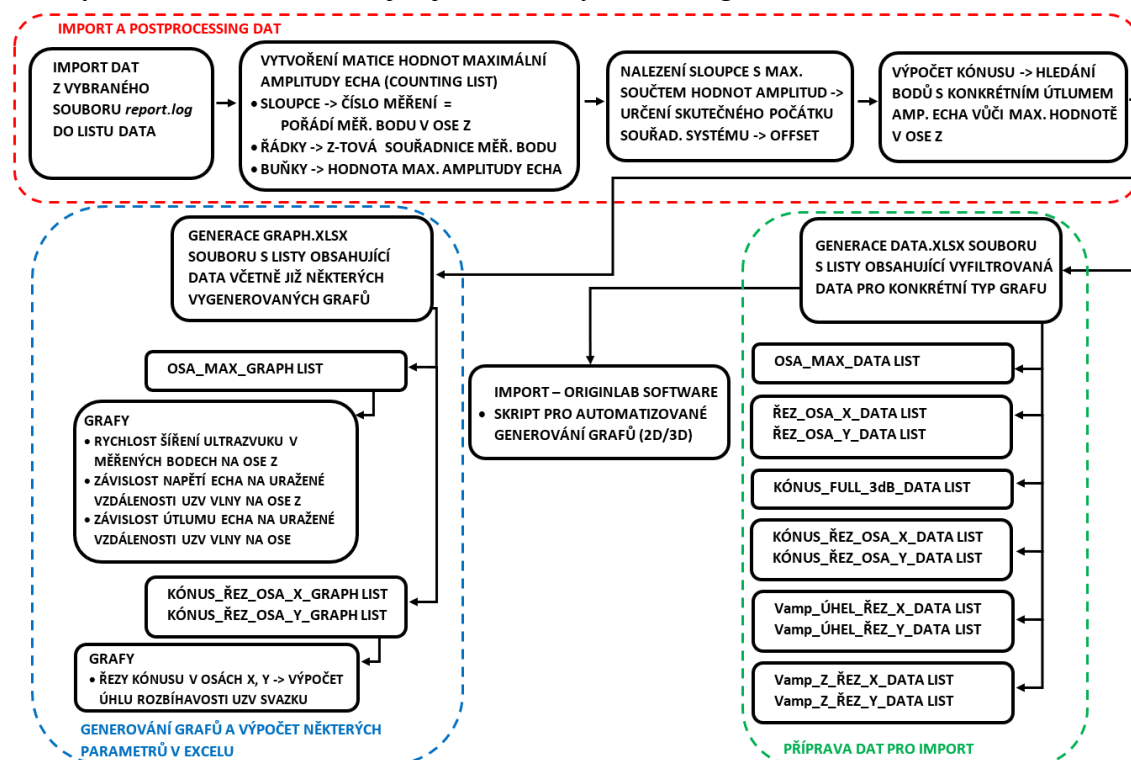
Obrázek 39: Ukázka generovaného souboru *report.log* se zpracovanými daty

6.2 Excel makro pro zpracování prostorových dat

Jestliže máme vygenerovaný soubor *report.log*, který obsahuje veškeré informace důležité pro prostorový popis celého uzv pole, je nutné provést další postprocessing těchto dat pro získání konkrétních parametrů a závislostí naměřených dat. V návaznosti na závěr kapitoly 5.8, ve které zmiňuji vznik vůle při nasazení snímače na kovovou úchytnou konstrukci, způsobující různou absolutní pozici snímače při měření, je důležité zmínit, že dalším úkolem postprocessingu je právě taková úprava dat, aby byla měření opakovatelná a vůči sobě porovnatelná.

Protože řešení mělo splňovat požadavek na použití softwaru, který nevyžaduje jeho pokročilou znalost a výsledná jim vygenerovaná data budou v jednoduše editovatelném formátu, rozhodl jsem se řešení naprogramovat jako makro ve vývojovém prostředí aplikace Microsoft Excel, které se nazývá Visual Basic Editor a podporuje psaní kódu v programovacím jazyce Visual Basic for Applications (VBA) umožňující automatizaci procesů v Excelu.

Výsledné řešení znázorňuje zjednodušený řídicí diagram makra na obrázku 40.



Obrázek 40: Řídicí diagram makra pro zpracování prostorových dat v Excelu

Důvodem zakomponování části, která tvoří list s daty pro import do jiného datového softwaru, byly omezené možnosti generování 3D grafů v Excelu. Za tímto účelem je využít profesionální software pro datovou analýzu Origin 2017 společnosti

OriginLab, který podporuje širokou škálu šablon 2D a 3D grafů. Zároveň umožňuje nadefinovat rovnice křivek pro proložení nelineární technikou nejmenších čtverců, která je založena na Levenbergově-Marquardtově algoritmu, čehož bude dále využito.

V diagramu nepopsané části makra spojené s generováním jednotlivých datových listů budou zmíněny při ukázkách jednotlivých grafů v následující kapitole.

6.3 Přehled generovaných grafů a parametrů

V následujících podkapitolách si na jednom konkrétním prostorovém měření ukážeme, jaké výstupy generuje navržený způsob zpracování dat.

Zdrojovými daty bude jedno prostorové měření kolem snímače, na který je nahlíženo jako na tzv. *black box*, což je typ měření společný pro všechna měření v rámci této bakalářské práce. Znamená to, že máme pouze omezené informace o měřeném snímači a účelem měřicí aparatury je zanalyzovat jeho výstup ve formě generovaného uzv pole. Popsanou situaci znázorňuje obrázek 41.



Obrázek 41: Schéma popisující známé informace o snímači během měření

Měřené body ve všech dále zmíněných případech měření tvoří krychli, jejíž jedna čtvercová vrstva v horizontálních osách X, Y má délku hrany 12 mm s body vzdálenými 0,5 mm od sebe. Takovéto vrstvy jsou vertikálně naskládány s milimetrovou mezerou v intervalu vzdáleností od měřeného vzorku 7 – 60 mm. Vzdálenost 7 mm se ukázala jako dostatečná pro rozlišení echa od generovaných pulzů.

Pro měření je použit poskytnutý vzorek č. 65 piezoelektrického snímače, který je přišroubován zespodu nádržky naplněné syntetickým motorovým olejem Quartz, třídy viskozity 5W-30, německého výrobce Total.

6.3.1 Grafy a parametry generované z bodů na nalezené ose snímače

Makrem vygenerovaný list s názvem OSA_MAX_GRAPH obsahuje naměřené informace v bodech, které byly zmíněným algoritmem na obrázku 40 určeny jako osa snímače, která prochází počátkem souřadnicového prostoru pro všechny měřené body. Mezi tyto informace kromě souřadnic bodů patří:

- Maximální hodnoty napětíové amplitudy echa ve voltech.
- Přepočítané amp. echa na hodnoty napětíového útlumu A_U daného vztahem:

$$A_U = 20 \log \left(\frac{U}{U_{max}} \right) [dB]. \quad (1.30)$$

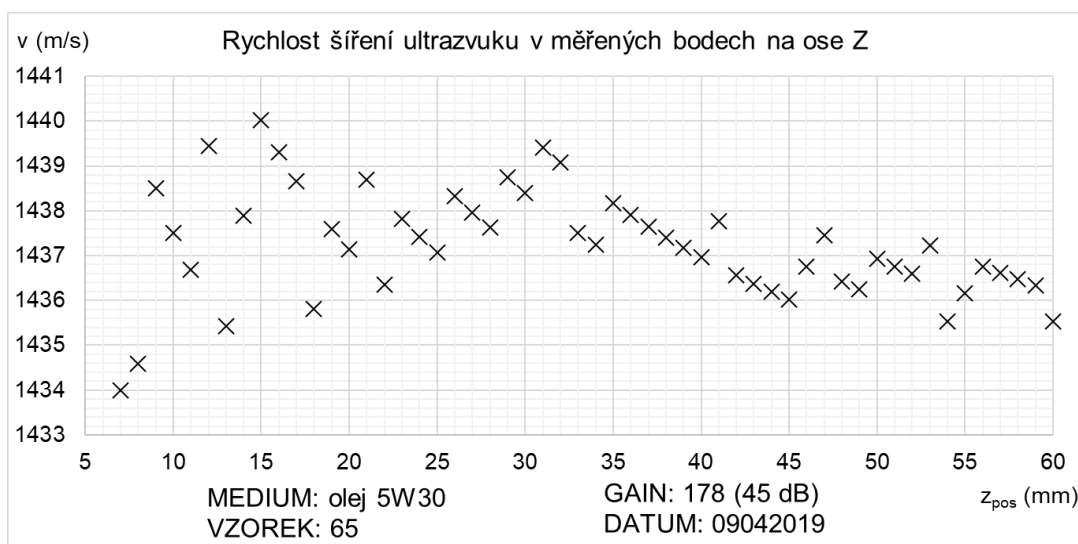
$U [V]$ je porovnávaná hodnota amplitudy echa s nalezenou hodnotou maximální $U_{max} [V]$ v ose snímače.

- Časové hodnoty t_{RingUp} [s] a $t_{StartEcho}$ [s] určující dobu šíření uzv vlny.
- Vypočtená rychlost šíření v ultrazvuku v měřených bodech pro použité médium daná vztahem:

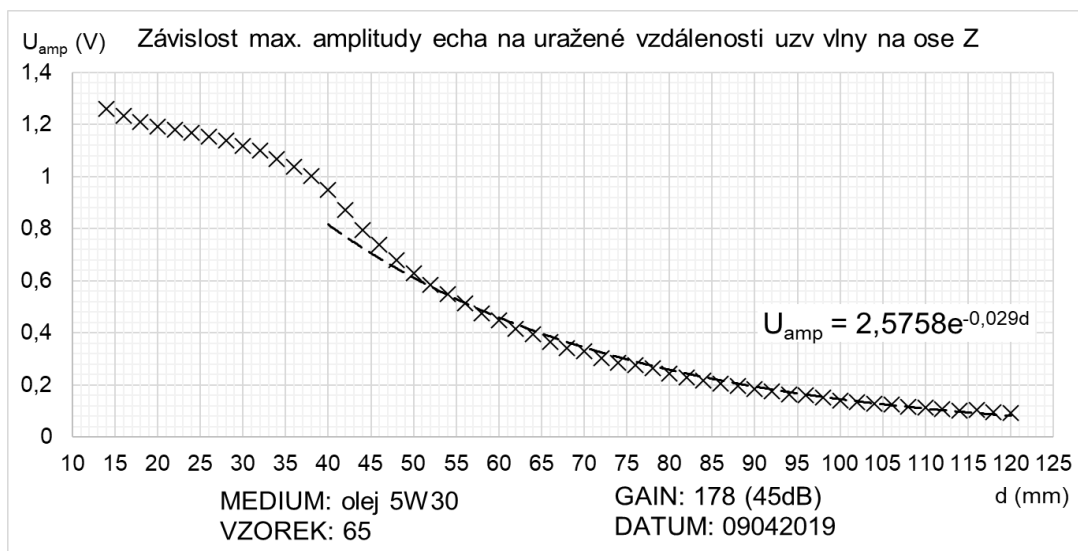
$$v = \frac{2z_{pos}}{(t_{StartEcho} - t_{RingUp}) - t_{const}} \quad [m.s^{-1}]. \quad (1.31)$$

z_{pos} [m] je hodnota z-tové souřadnice polohy jehly, t_{const} [s] je empiricky určená časová konstanta, která přibližně odpovídá času šíření uzv vlny obalem snímače. Informace o naměřené rychlosti je především doplňkového charakteru, často se však vyskytuje ve vztazích pro popis chování ultrazvuku v různých médiích, a proto je vhodné znát její konkrétní hodnotu.

Předešlý výčet informací je vyneseno do závislosti v automaticky generovaných grafech na následujících obrázcích.



Obrázek 42: Graf naměř. rychlostí ultrazvuku v bodech na ose Z (olej 5W30)



Obrázek 43: Graf závislosti max. amplitudy na uražené vzdálenosti (olej 5W30)

V grafu na obrázku 42 vidíme soubor naměřených hodnot rychlostí v různých vzdálených bodech na ose od snímače, u kterého viditelně nevystupuje nějaká konkrétní závislost a jde o náhodné rozložení měřené hodnoty v jistém intervalu.

Za předpokladu, že budeme považovat rychlost šíření v jednotlivých bodech za konstantní, můžeme brát naměřené hodnoty za rovnocenné a lze tak charakterizovat jejich rozptýlení od průměrné hodnoty například pomocí výběrové směrodatné odchylky s_x ze souboru n hodnot:

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1.32)$$

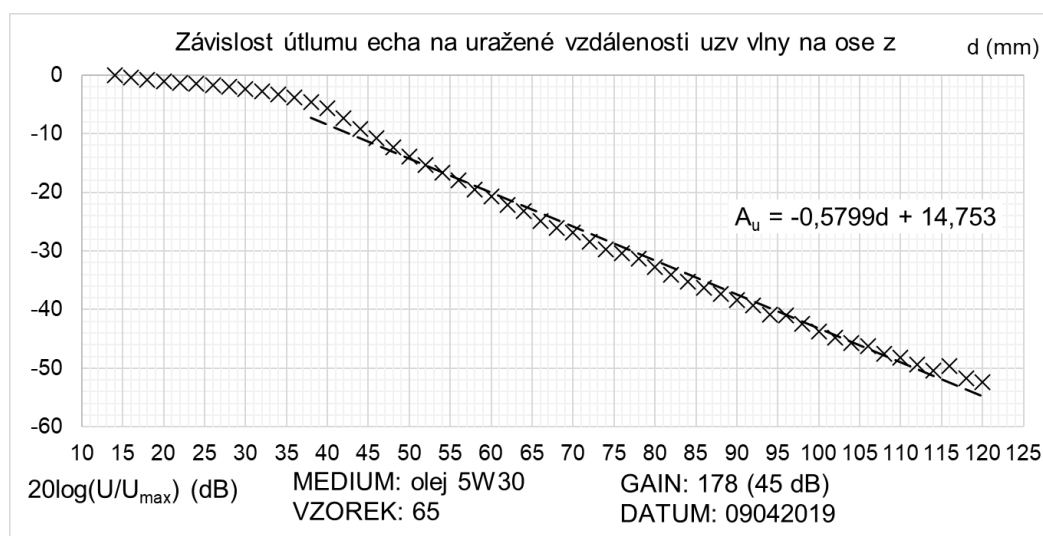
$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (1.33)$$

V Excelu lze pro vztah 1.32 použít vzorec STDEVA. Získáváme tak výsledek pro konkrétní měření ve formátu:

$$x = (\bar{x} \pm s_x) [\text{jednotky}] \quad (1.34)$$

$$v = (1437,2 \pm 1,2) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Ověření exponenciálního průběhu amplitudy echa v závislosti na uražené vzdálenosti d , která odpovídá dvojnásobku velikosti z_{pos} , vidíme v grafu na obrázku 43. Oblast grafu, ve které nedochází k exponenciálnímu poklesu amplitudy, lze považovat za oblast blízkého pole a především oblast, kdy může být zesilovač v saturaci. Jako vhodnější průběh pro určení činitele tlumení α na ose snímače, viz. vztah 1.12, se ukázal průběh závislosti napět'ového útlumu v decibelech na uražené vzdálenosti uzv vlny v grafu na obrázku 44. Výpočtem logaritmu ve vztahu 1.30 jsme získali průběh s lineární klesající částí. Směrnice přímky, kterou proložíme lineární část, odpovídá hledanému činiteli útlumu $\alpha = 0,58 \text{ dB/mm}$ uražené vzdálenosti na ose.



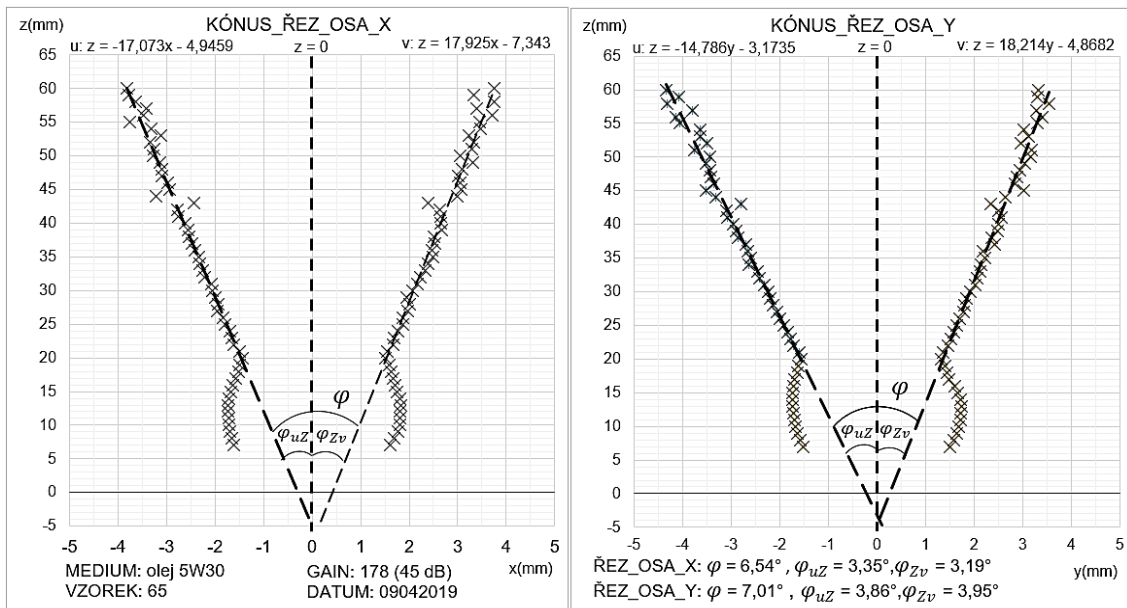
Obrázek 44: Graf závislosti útlumu na uražené vzdálenosti (olej 5W30)

6.3.2 Grafy a parametry generované z řezů určeného kónusu

Jedním z hlavních parametrů pro popis měřeného uzv pole je úhel rozbíhavosti, který je podrobněji popsán v kapitole 3.1.2 o vzdáleném poli. Jestliže v ose Z vyfiltrujeme body s konkrétním poklesem amplitudy echa vůči maximální amplitudě, která by se měla nacházet na ose snímače, a tento proces provedeme pro všechny vrstvy na ose Z, měli by tyto body vytvářet geometrický útvar laloku jako je na obrázku 12. Část vzniklého laloku jejíž hranice se postupně rozšiřují, lze nahradit kuželem (kónusem) s vrcholem ve středu snímače a s úhlem rozbíhavosti, který hledáme.

Algoritmus určování bodu v prostoru s konkrétním útlumem, jsem převzal z makra sloužící k tomuto účelu. Princip ve zkratce spočívá v tom, že se v každé naměřené vrstvě hledají dvojice sousedních bodů, kdy jeden bod má amplitudu vyšší, než je 3 dB limit a druhý nižší. Algoritmus takové body hledá ve dvou cyklech, přičemž jeden cyklus odpovídá porovnávání vedlejších bodů podle souřadnice x a druhý podle y. Výsledná souřadnice se v obou cyklech vypočte jako interpolovaná hodnota z nalezených odpovídajících souřadnic a amplitud.

Jestliže provedeme řezy všech vypočtených bodů podle os X a Y, získáme grafy na obrázku 45.



Obrázek 45: Grafy bodů s poklesem amplitudy 3dB v řezech osami X a Y

Výpočtem úhlu, který svírají přímky u, v , získané proložením úseků ve kterých se hranice 3 dB postupně rozšiřuje, můžeme určit úhel rozbíhavosti kónusu φ . Tento úhel vypočteme jako vzájemný úhel normálových vektorů $\mathbf{n}_u, \mathbf{n}_v$ daných přímk. Složky těchto vektorů odpovídají hodnotám koeficientů v obecných rovnicích přímek, které získáme převedením všech členů rovnice v grafu na jednu stranu. Výsledný úhel rozbíhavosti kónusu φ pak popisuje vztah [18]:

$$\varphi = \arccos \left(\frac{|\mathbf{n}_u \cdot \mathbf{n}_v|}{|\mathbf{n}_u| \cdot |\mathbf{n}_v|} \right) [^\circ]. \quad (1.35)$$

Porovnáním velikostí úhlů φ_{uz} a φ_{zv} můžeme zároveň zjistit do jaké míry je kónus symetrický a jestli není viditelně nakloněný.

Dosazením konkrétních hodnot do vztahu 1.22 pro výpočet teoretické délky N úseku tzv. blízkého pole jehož tvar lze přibližně nahradit válcem, získáváme hodnotu:

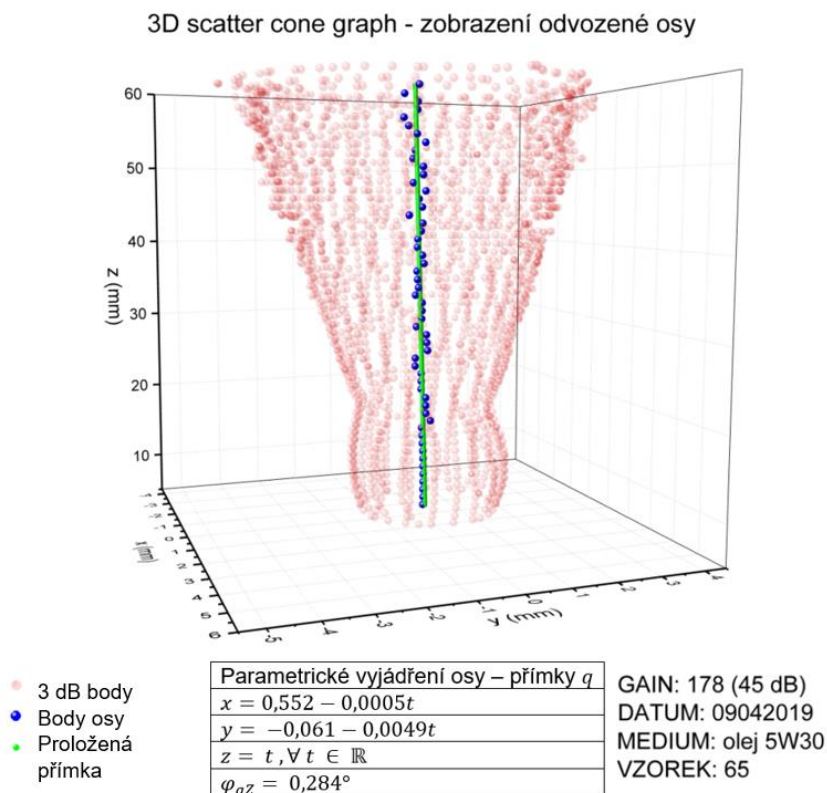
$$N_{teor} = \frac{a^2}{\lambda} = \frac{a^2}{\frac{v}{f}} = \frac{(0,005)^2}{\frac{1437}{2 \cdot 10^6}} = 34,5 \text{ mm}.$$

Vzhledem k tomu, že hodnota naměřené amplitudy odpovídá intenzitě uzv vlny, která urazí přibližně dvojnásobnou vzdálenost, než je vzdálenost jehly od snímače, získáváme naměřenou délku přibližně $N = 40 \text{ mm}$, kterou lze považovat za řádově odpovídající.

6.3.3 Grafy a parametry generované softwarem Origin

Další způsoby zpracování a vizualizace poskytuje možnost importovat makrem generovaný list DATA do softwaru Origin 2017 pro který byl napsán jednoduchý skript v interním skriptovacím jazyce LabTalk pro automatizaci úkonů. Skript pouze otvírá jednotlivé importované listy s daty a generuje výsledné grafy na základě uložených šablon.

Příkladem takového grafu je prostorový graf kónusu s jeho dopočtenou osou na obrázku 46.



Obrázek 46: Prostorový graf kónusu s vypočtenou osou (olej 5W30)

Určením přibližné osy kónusu, můžeme vypočítat úhel, který svírá osa snímače s vertikální osou Z a získat další důležitý parametr popisující do jaké míry je celkové uzv pole nakloněno. Souřadnice bodů tvořící osu snímače jsou vypočteny způsobem, kdy v každé vrstvě Z je určen jeden střed, jehož souřadnice x je průměrem všech x-ových souřadnic v dané vrstvě a stejně tak souřadnice y je průměrem všech y-ových souřadnic.

Protože Origin 2017 podporuje možnost nadefinovat si rovnice křivek pro proložení vybraných dat, nadefinoval jsem si parametrické vyjádření přímky q v prostoru ve tvaru [18]:

$$q: X = A + tu, \quad t \in \mathbb{R}. \quad (1.36)$$

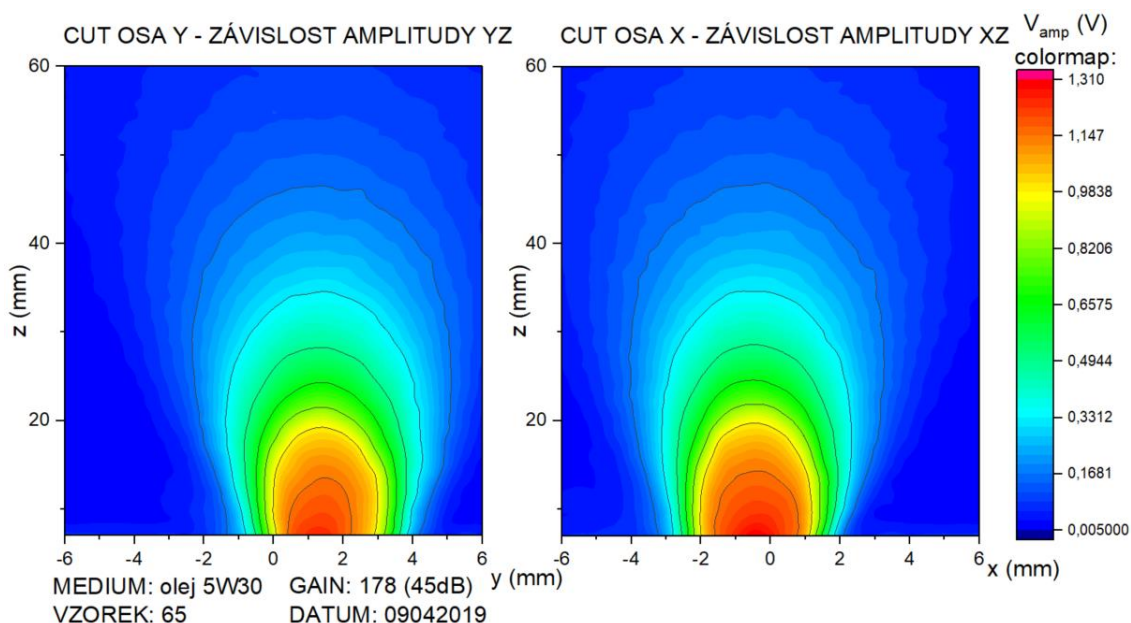
Rovnice 1.36 vede v našem případě k soustavě 3 rovnic ve tvaru [18]:

$$\begin{aligned} x &= a_1 + tu_1 \\ y &= a_2 + tu_2 \\ z &= t, t \in \mathbb{R}, \end{aligned} \quad (1.37)$$

kde x, y, z jsou souřadnice bodu X , který se nachází na přímce, $u = (u_1, u_2, 1)$ je směrový vektor a $A[a_1, a_2, 0]$ je bod v prostoru, kterým tato přímka prochází. Absolutní hodnotu úhlu φ_{qz} , který svírá získaná přímka q s osou Z vypočteme obdobně jako ve vztahu 1.35 [18]:

$$\varphi_{qz} = \arccos\left(\frac{|u_q \cdot u_z|}{|u_q| \cdot |u_z|}\right) [^\circ]. \quad (1.38)$$

Posledním zmiňovaným typem grafu v této části jsou vrstevnicové grafy průběhu měřené amplitudy v řezech osami X a Y na obrázku 47. Názorně na nich lze vidět původní naměřený offset maximální hodnoty amplitudy, který je v ose Y přes 1 mm.



Obrázek 47: Vrstevnicové grafy rozložení amplitudy v řezech osami X, Y

7. MĚŘENÍ

Cílem této kapitoly je pomocí generovaných průběhů a parametrů popsanych v předchozí kapitole vyhodnotit naměřená data z jednotlivých typů měření, kterými bych chtěl otestovat především opakovatelnost měření celého měřicího systému a charakterizovat chování uzv pole u poskytnutých vzorků snímačů v různých médiích.

7.1 Nastavení aparatury před měřením

Protože první naměřené výsledky poukazovaly na to, že výsledný kónus je výrazně prostorově nakloněn z důvodu fyzického naklonění snímače vůči jehle, bylo potřeba navrhnout takový postup před začátkem každého měření, který by dané naklonění omezilo.

Jako fungující řešení se ukázalo použití poskytnuté přesné vodováhy výrobce Holey s přesností 0,02 mm/m pro horizontální vyrovnání celého přípravku nasazeného na nosnou konstrukci a vertikální vyrovnání jehly. Nosná konstrukce je nasazena na pohybové soustavě manipulátoru pomocí 4 šroubů, kdy mezi konstrukcí a otvorem na pohybovou soustavu je našroubovaná vyrovnávací matice, umožňující konečné dorovnání. Popisovaný proces popisují fotografie na obrázku 48.



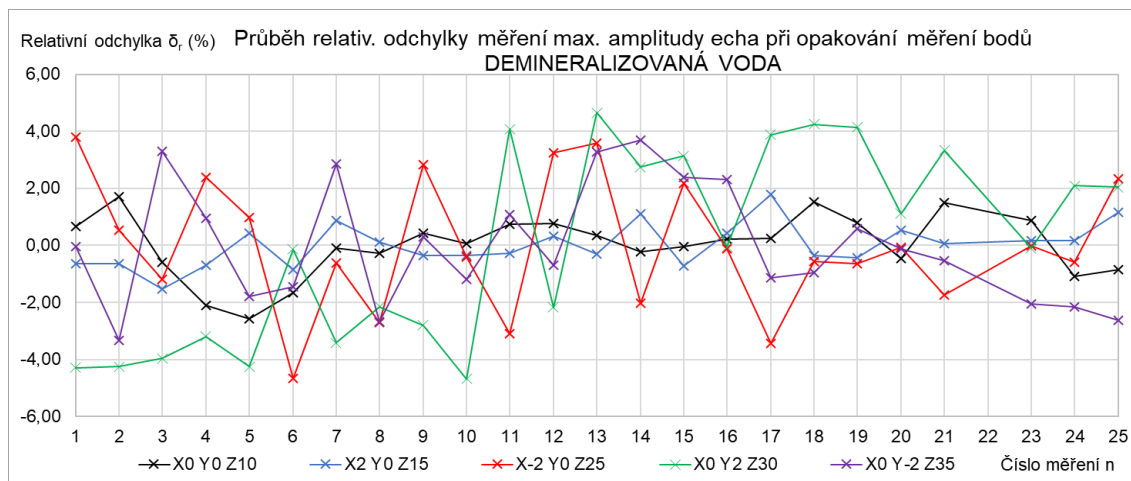
Obrázek 48: Fotografie procesu vyrovnávání přípravku pomocí vodováhy

7.2 Opakovatelnost a nejistoty měření

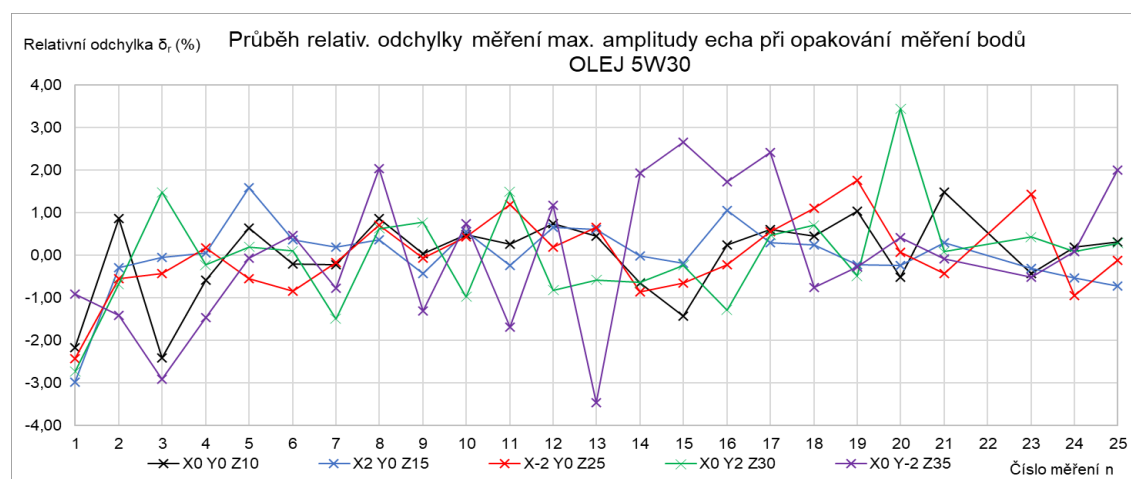
Vzhledem k tomu, že celková doba jednoho prostorového měření trvá přibližně 16 hodin, nebylo časově možné opakovat tato měření například 10 krát pro další statistické zpracování.

Za tímto účelem jsem navrhl typ měření max. amplitudy echa v 5 konkrétních bodech s počtem 25 opakování. Měření probíhá způsobem, kdy po jednom naměřením amplitudy se manipulátor přesune do polohy koncových snímačů a přejde k měření dalšího bodu. Jde tedy o napodobení situace počátku měření, které by mělo ukázat celkové působení nejistot spojených s pohybem manipulátoru, přesností koncových snímačů, funkcionalitou generování a zesilování uzv pulzů zesilovačem, tvarem kulové jehly nebo nastavením citlivosti osciloskopu. Pro znázornění naměřených výsledků slouží grafy na obrázcích 49-51. Jednotlivé grafy představují popsane měření se stejným vzorkem

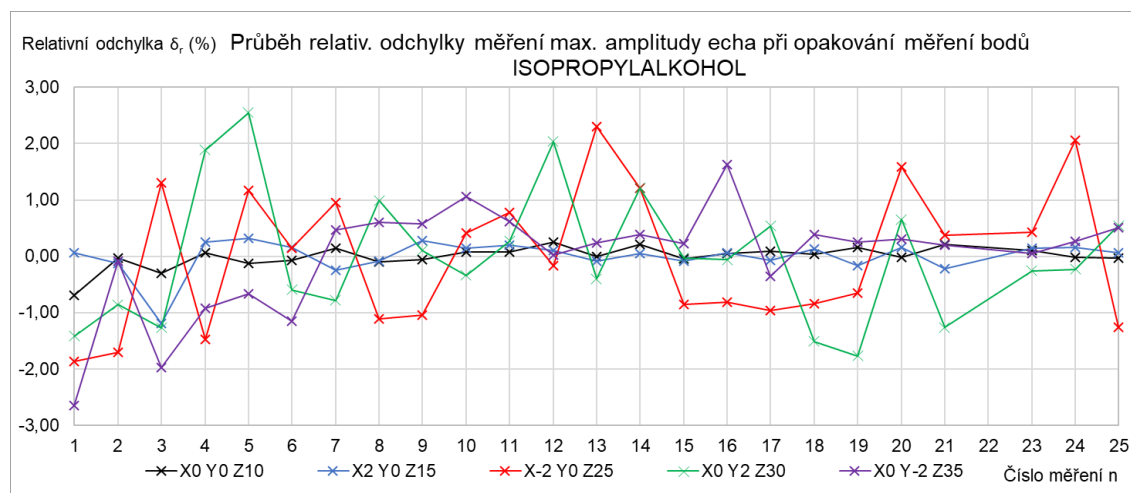
snímače a zesílením v různých médiích: demineralizovaná voda, olej 5W30 a isopropylalkohol s čistotou min. 99,9 %. Na ose Y je relativní odchylka měřené hodnoty od aritmetického průměru dané řady. Hodnoty označené křížkem jsou spojeny rovnými čarami pouze za účelem zpřehlednění naměřených dat.



Obrázek 49: Výsledky opak. měření v demineralizované vodě (gain 178)



Obrázek 50: Výsledky opakovaného měření v oleji 5W30 (gain 178)



Obrázek 51: Výsledky opakovaného měření v isopropylalkoholu (gain 178)

V grafech 49 – 51 vidíme, že největší oscilace a rozptyl hodnot relativní odchylky se projevuje u měření s demineralizovanou vodou, nejnížší naopak u měření s isopropylalkoholem. Zároveň si můžeme všimnout nižších oscilací a rozptylu u černé a modré řady bodů ve všech 3 měřeních, což jsou body nacházející se v blízkém poli snímače. Pro naměřené hodnoty v bodě X0 Y2 Z30 v jednotlivých médiích provedeme další analýzu ve formě analytického výpočtu nejistot, které si nejprve nadefinujeme.

Nejistota měření je označení pro parametr, který souvisí s výsledkem měření a charakterizuje rozsah hodnot, které je možné racionálně přiřadit k měřené veličině. Obecně se nejistota skládá z několika dílčích nejistot (složek). Podle způsobu stanovení se nejistoty dělí nejčastěji na 2 typy [20]:

- Nejistota typu A - $u_A(x)$ je stanovena statistickou analýzou opakované série měření. Mírou nejistoty typu A je výběrová směrodatná odchylka výběrového průměru $s_{\bar{x}}$:

$$u_A(x) = s_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (1.39)$$

kde n je počet opakování měření, $\bar{x}$ je aritmetický průměr naměřených hodnot (viz vztah 1.33).

- Nejistota typu B - $u_B(x)$ je obecně stanovena jinak než statistickým zpracováním naměřených údajů. Určení její velikosti vychází z kvantifikace možných zdrojů, které mohou nejistotu tohoto typu způsobovat. Mohou to být například vlivy vázané na použité přístroje nebo vlivy okolního prostředí a jejich změny. Výpočet nejistoty typu B se musí provést pro každý zdroj nejistot podle vztahu:

$$u_B(x) = \frac{D_{max}}{\chi}, \quad (1.40)$$

kde hodnota D_{max} je získána z technické dokumentace přístroje nebo je určena ze zkušenosti odhadem. V intervalu $\pm D_{max}$ se pak nachází s největší pravděpodobností měřená veličina x_m . Koeficient χ se volí podle typu rozdělení náhodné veličiny, pro rovnoměrné rozdělení hodnotu $\chi = \sqrt{3}$.

Vyjádření celkové nejistoty se získá geometrickým součtem standardních nejistot typu A a B ve formě kombinované standardní nejistoty $u_C(x)$ podle vzorce:

$$u_C(x) = \sqrt{u_A^2(x) + u_B^2(x)}. \quad (1.41)$$

Pravděpodobnost, že skutečná hodnota měřené náhodné veličiny x_m leží v intervalu udaném kombinovanou nejistotou $u_C(x)$, je pro normální rozložení 68%.

Posledním zmiňovaným vyjádřením je rozšířená nejistota $U(x)$ definovaná vztahem:

$$U(x) = k_r u_C(x). \quad (1.42)$$

Koeficient rozšíření $k_r = 2$ pro normální rozložení odpovídá 95% pravděpodobnosti, že měřená hodnota x_m se nachází v pásmu, jehož šířku udává rozšířená nejistota $U(x)$, pro hodnotu koeficientu $k_r = 3$ je to pravděpodobnost 99,7%.

Posledním neznámým parametrem ve vztazích pro výpočet nejistot je parametr D_{max} charakterizující interval, ve kterém se nachází měřená veličina. Budeme-li vycházet z datasheetu [21] k použitému osciloskopu, výrobce uvádí hodnotu vertikální chyby na napěťové ose jako součet relativní chyby z měřeného rozsahu $\delta_R = 2 \%$ a relativní chyby z nastaveného offsetu $\delta_O = 1 \%$. V konkrétním případě měření byl nastaven rozsah osciloskopu na hodnotu $U_R = 2 \text{ V}$ s odpovídajícím offsetem $U_O = 1,6 \text{ V}$, aby v naměřeném průběhu byly veškeré potřebné informace. Konkrétní nejistota typu B se vypočte z následujícího vztahu:

$$u_B(U) = \frac{D_{max}}{\chi} = \frac{\delta_R U_R + \delta_O U_O}{\chi} [V] \quad (1.43)$$

$$u_B(U) = \frac{0,02 \cdot 2 + 0,01 \cdot 1,6}{\sqrt{3}} = 0,03 \text{ V}.$$

Výsledná nejistota typu B osciloskopu je tedy výrazně závislá na jeho nastavení. Protože se však jedná o chybu systematickou, nikoliv náhodnou, neprojeví se na opakovatelnosti a porovnatelnosti jednotlivých měření při stejném nastavení. Pro vyjádření míry opakovatelnosti naměřených výsledku si zavedeme parametr variační koeficient v_x definovaný vztahem [20]:

$$v_x = \frac{s_x}{\bar{x}}. \quad (1.44)$$

s_x představuje výběrovou směrodatnou odchylku (viz. vztah 1.32), $\bar{x}$ hodnotu aritmetického průměru (viz. vztah 1.33). Variační koeficient nám ukáže, z jaké části se podílí směrodatná odchylka naměřených hodnot na aritmetickém průměru naměřených hodnot.

Dosažením naměřených hodnot amplitudy echa do vztahů (1.39) – (1.44) získáme přehled nejistot měření amplitudy echa U_{AMP} , vyplněn v tabulce 3.

Tabulka 3: Vypočtené parametry nejistot při opakovaném měření bodu X0 Y2 Z30 v různých mediích (n = 25, vzorek č. 65, zesílení 178, teplota 22,5° C)

Médium	Olej 5W30	Demi. voda	Isopropylalkohol
$\bar{U}_{AMP} [V]$	0,2108	0,1370	0,1680
$u_A(U_{AMP}) [V]$	0,0005	0,0009	0,0004
$u_B(U_{AMP}) [V], \chi = \sqrt{3}$	0,03		
$u_C(U_{AMP}) [V]$	0,03		
$U(U_{AMP}) [V], k_r = 2$	0,06		
$v_{U_{AMP}} [\%]$	1,196	3,352	1,149
$U [V]$	$0,21 \pm 0,06$	$0,14 \pm 0,06$	$0,17 \pm 0,06$

Z tabulky 3 vyplývá, že hlavním zdrojem nejistot je nejistota $u_B(U_{AMP})$ měření napětí na osciloskopu. Její velikost určující ve výsledku celkovou nejistotu $U(U_{AMP})$ je daná nastavením takového rozsahu, ve kterém se musí vyskytnout velikosti všech měřených amplitud, protože je po celou dobu měření konstantní. Její velikost je nutné brát nutně v potaz například při porovnání naměřených hodnot s hodnotami teoretickými. Vypočtené nejistoty typu A společně s hodnotami variačních koeficientů poukazují na to, že jsou měřené hodnoty opakovatelné. Procentuální velikost směrodatné odchylky

naměřených hodnot vůči aritmetickému průměru se pohybuje u oleje a isopropylalkoholu kolem 1,2 % a u demineralizované vody kolem 3,4 %.

7.3 Prostorová měření

Vzhledem k zmíněnému trvání a množství dat u jednoho prostorového měření, byl počet pokusů měření značně omezen. U prvních měření se navíc projeví chyby spojené s přílišným nakloněním snímače v přípravku nebo občasným výpadkem generování a zesilování uzv pulzů, takže je nebylo možné použít k následnému porovnání. Nakonec se podařilo na jednom vzorku snímače provést vždy 3 opakování měření a to ve 3 médiích při stejných podmínkách. Cílem bylo ověření opakovatelnosti z hlediska určení koncových parametrů uzv pole a porovnání chování uzv pole v jednotlivých médiích.

7.3.1 Opakovatelnost určení koncových parametrů

Ačkoliv počet 3 měření je nízký pro statistický popis naměřených výsledků, lze z charakteru výsledných hodnot, které se mezi sebou liší maximálně v řádu jednotek procent, považovat i určení koncových parametrů za opakovatelné. Souhrn koncových parametrů charakterizujících chování uzv pole v oleji 5W30 je vyplněn v tabulce 4. Protože ostatní materiály dopadly z hlediska opakovatelnosti obdobně, jejich souhrn zde neuvádím.

Tabulka 4: Souhrn koncových parametrů uzv pole pro měření v oleji 5W30 (vzorek č. 65, zesílení 178, teplota 22,5 °C)

Číslo měření	1	2	3
$(\bar{v} \pm s_v) [m \cdot s^{-1}]$	$1437,2 \pm 1,2$	$1437,3 \pm 1,7$	$1437,2 \pm 1,2$
$\alpha_U [dB \cdot mm^{-1}]$	0,590	0,588	0,580
$\varphi_{REZX} [^\circ]$	6,55	6,83	6,70
$\varphi_{REZY} [^\circ]$	7,01	6,81	6,97
$\varphi_{OSA} [^\circ]$	0,28	0,32	0,26

α_U je činitel útlumu napětí amplitudy echa na ose snímače, určený jako kladná hodnota směrnice přímky, proložená lineárním úsekem útlumové charakteristiky (viz. obrázek 42). φ_{REZX} a φ_{REZY} jsou úhly rozbíhavosti kónusu v řezu osami X, Y. φ_{OSA} popisuje úhel, který svírá osa snímače s vertikální osou Z v prostoru.

7.3.2 Porovnání chování uzv pole v různých médiích

Pro popis a porovnání chování generovaného uzv pole v médiích slouží souhrnná tabulka 5 s naměřenými a teoretickými parametry. Teoretická hodnota úhlu rozbíhavosti kónusu určeného pro body s poklesem 3 dB odraz. metodou je dána vztahem φ_{TEOR} [19]:

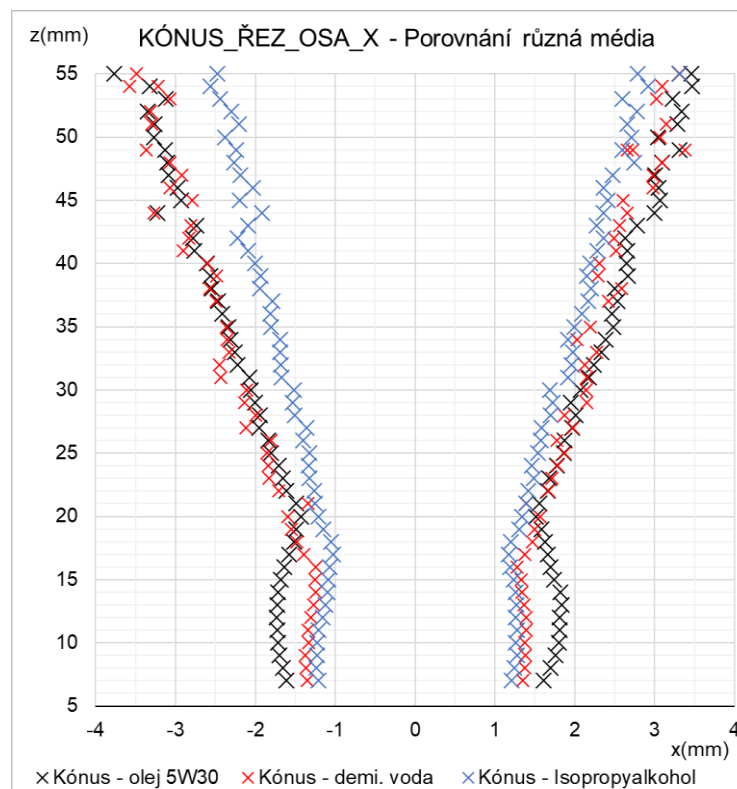
$$\varphi_{TEOR} = \arcsin\left(\frac{0,37v}{fa}\right) [^\circ]. \quad (1.45)$$

v je rychlost šíření ultrazvuku v médiu $[m \cdot s^{-1}]$, f je frekvence ultrazvuku $[Hz]$, a je průměr vysílače $[m]$.

Tabulka 5: Souhrnný přehled naměřených a teoretických hodnot parametrů uzv pole v různých médiích

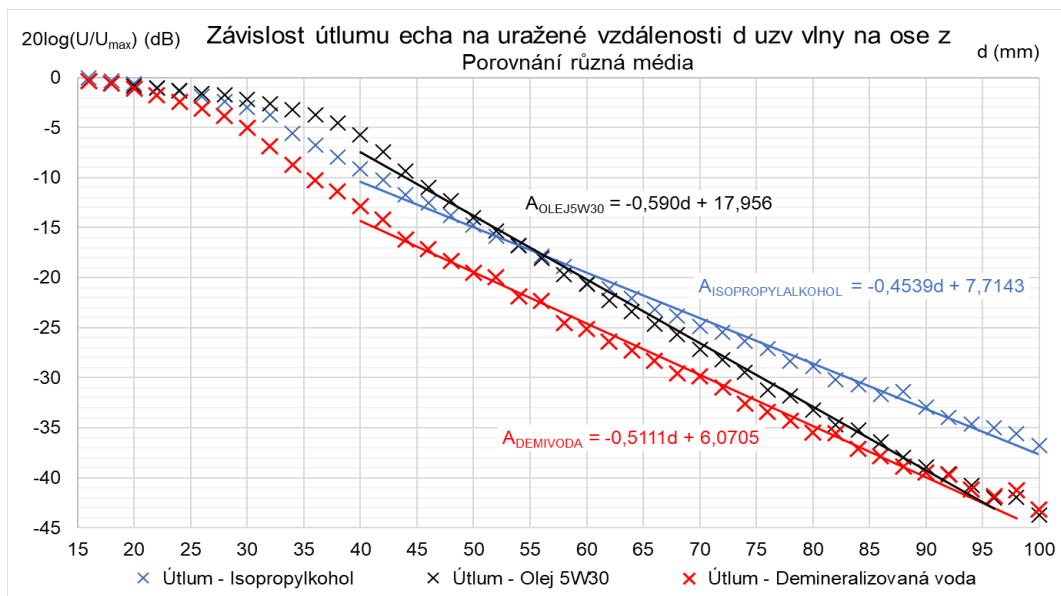
Médium	Olej 5W30	Demi. voda	Isopropylalkohol
$(\bar{v} \pm s_v) [m.s^{-1}]$	$1437,2 \pm 1,2$	$1491,7 \pm 1,1$	$1157,9 \pm 0,9$
$v_{TEOR} [m.s^{-1}]$	$\sim 1400 (20^\circ C) [8]$	$1490 (23^\circ C)$	$1170 (20^\circ C)$
$\alpha_U [dB.mm^{-1}]$	0,636	0,511	0,454
$\varphi_{\check{R}EZ X} [^\circ]$	6,55	6,71	4,95
$\varphi_{\check{R}EZ Y} [^\circ]$	7,01	6,63	4,96
$\varphi_{TEOR} [^\circ]$	6,09	6,27	4,91
$\varphi_{OSA} [^\circ]$	0,28	0,32	0,22

Z tabulky 5 vyplývá, že naměřené hodnoty úhlů rozbíhavosti kónusu odpovídají hodnotám teoretickým. Ověřili jsme tudíž, že naměřené hodnoty nejsou pouze opakovatelné, ale zároveň přibližně odpovídají zkoumané realitě. Srovnání chování poskytují následující grafy naměřených hodnot.

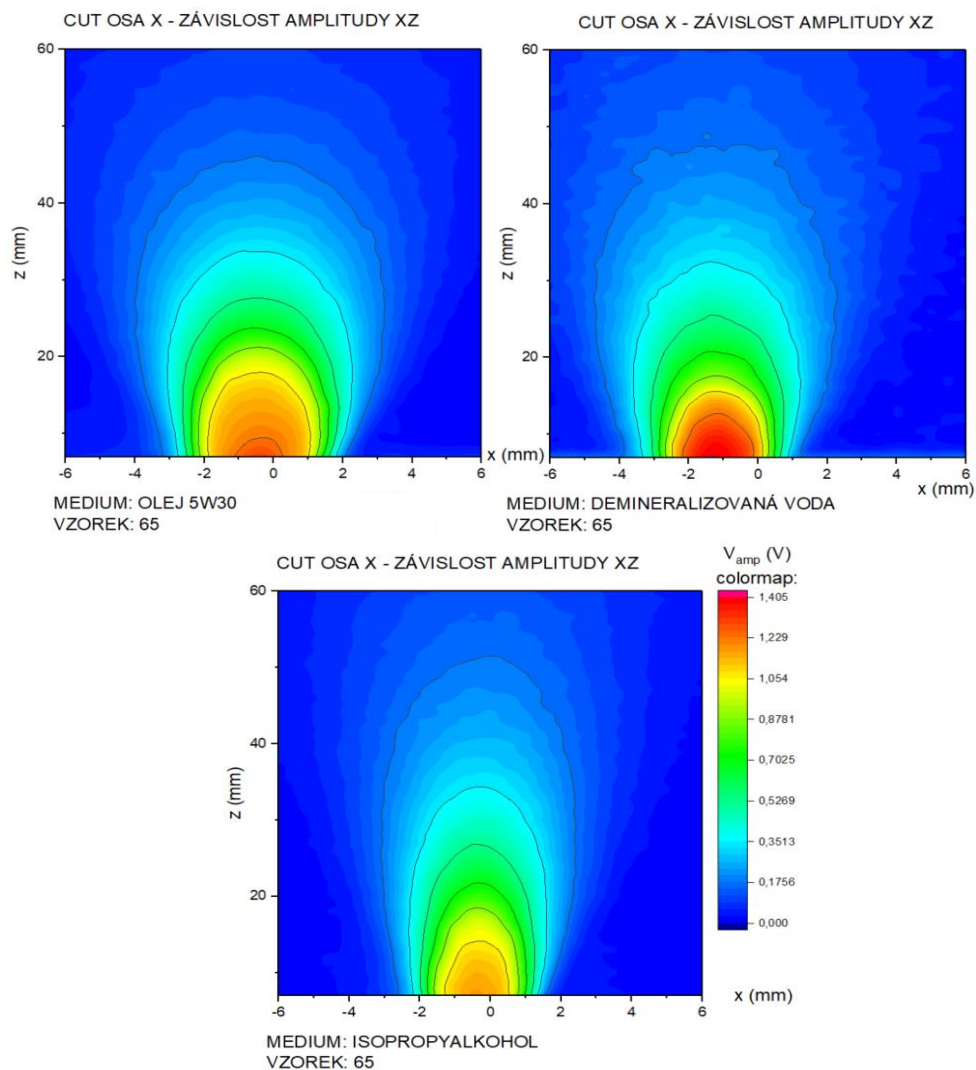


Obrázek 52: Graf porovnání naměřených řezu kónusu v různých médiích.

Z grafu na obrázku 52 je patrné největší kolísání určených bodů s poklesem 3 dB u demineralizované vody, což se dalo předpokládat vzhledem k největší nejistotě typu A při určování maximální amplitudy echa, viz tabulka 3. Z grafu na obrázku 53 vyplývá největší činitel útluhu na uražené vzdálenosti u oleje a obrázek 54 charakterizuje celkový průběh naměřených amplitud v řezu. Zatímco olej a voda se chová podobně, u isopropylalkoholu je vidět, že kónus je více soustředěný v ose snímače.



Obrázek 53: Graf porovnání útlumu echa na ose snímače různých mediích



Obrázek 54: Porovnání rozložení amp. echa v řezu osou X v různých mediích

ZÁVĚR

Bakalářskou práci lze v základu rozdělit na 2 hlavní části: teoretickou a praktickou. Teoretická část slouží jako přehled pro pochopení řešené uzv problematiky.

Kapitola 1 se proto zabývá zavedením základních fyzikálních veličin pro popis ultrazvuku a kapitola 2 na základě těchto veličin popisuje základní děje ke kterým dochází během interakce ultrazvuku s prostředím. Blíže zkoumaný je jev útlumu uzv vlnění, který zahrnuje celou skupinu dalších jevů jako absorpce nebo rozptyl. Snahou bylo nalézt teoretické vztahy těchto jevů především pro kapaliny nebo plyny a potvrdit je naměřenými výsledky praktického experimentu. Problematika chování kapalného nebo plynného prostředí pro ultrazvuk při změně teploty nebo vlhkosti je poměrně složitá a komplexní, z naměřených výsledků [7] například vyplývá odlišné nebo opačné chování kapalin vzhledem k existenci nebo absenci mezimolekulárních sil, jako je například hydrogenová vazba u vody. Jako hlavní důvod poklesu útlumu motorového oleje se zvyšující se teplotou uvedli autoři textu [8], ze kterého naměřené závislosti pochází, změnu jeho viskozity.

Následující kapitola 3 přináší odvození vztahů pro popis pole generovaného kruhovým měničem a vysvětluje tak závislosti mezi parametry měniče a vzniklého pole. Vzhledem k našemu používání měničů piezoelektrických, je tento jev teoreticky rozebrán dále s následujícím přehledem piezoelektrických materiálu a popisem částí piezoelektrického snímače.

Na závěr teoretické části byly vybrány a popsány 3 odlišné metody měření uzv pole v prostoru.

Náplní praktické části bakalářské práce byl podrobnější popis, zprovoznění a otestování měřicího systému dostupného v laboratoři společnosti Continental, kterému chyběla dokumentace.

Konkrétnímu popisu částí měřicího systému se věnuje kapitola 5. Snahou bylo veškeré procesy jednotlivých funkčních bloků znázornit v přehledných schématech, tak aby v případě dalšího vývoje nebo jen užívání měřicí aparatury bylo v krátkém čase komukoliv jasné, jak co funguje. Závěr kapitoly popisuje specifika a nedostatky měřicího systému.

Kapitola 6 popisuje způsob zpracování dat, který jsem navrhl. Jsou zde nejprve popsány navržené algoritmy pro hledání maximální amplitudy echa a určení rychlosti šíření ultrazvuku implementované do již vytvořeného skriptu v Pythonu, který měl na začátku práce naimplementovanou část úpravy signálu. Generovaná data ze skriptu potom do finální podoby upravuje navržené makro v Excelu, které automaticky generuje grafy a parametry popisující uzv pole, jejichž přehled je v kapitole ukázán na konkrétním případě měření. Makro mimo jiné generuje zpracovaná data pro další analýzu nebo vizualizaci v jiném softwaru. Znázorněna je analýza v programu Origin 2017.

Kapitola 7 se věnuje provedeným testovacím měřením a hodnocení jejich výsledků. V jejím úvodu je popsán proces nastavení měřicího systému před každým měřením, který eliminuje možné zdroje chyb. Pro určení nejistot bylo provedeno opakované měření v několika bodech v prostoru. Z analýzy vyplývá, že podíl směrodatné odchylky naměřených hodnot vzhledem k aritmetickému průměru se pohybuje u měření v oleji 5W30 a isopropylalkoholu kolem 1,2 % a u demineralizované vody kolem 3,4 %. Jako hlavní zdroj nejistot určování max. amplitudy echa byla vzhledem k velikosti uvedena nejistota typu B osciloskopu, vyplývající z poměrně velkého nastaveného měřicího rozsahu. Protože se jedná o nejistotu systematického charakteru, neprojevila se

na opakovatelnosti měření, která tak byla dokázána. Její velikost je nutné brát v potaz například při porovnání naměřených hodnot s hodnotami teoretickými. Jako návrh na vylepšení měřicího systému bych navrhoval nahrazení osciloskopu s vertikálním rozlišením 8 bitů například měřicí kartou s vyšším rozlišením A/D převodníku, pro snížení nejistoty typu B. Výsledky prostorových měření uzv pole provedené na jednom vzorku poskytnutého snímače ve 3 médiích při 3 opakováních potvrdily, že i výsledné parametry jako úhel rozbíhavosti kónusu φ se v opakovaných měření liší pouze v jednotkách procent, a navíc odpovídají hodnotám teoretickým.

Měřicí systém byl vyvinut do stavu, kdy měří opakovatelné výsledky, které odpovídají fyzikální realitě. Během bakalářské práce bylo provedeno přibližně 15 prostorových měření, při kterých systém pracoval nepřetržitě i 48 hodin v kuse, v žádném však nevykázal chybu, která by měření přerušila. Navržený automatizovaný způsob zpracování dat byl otestován přibližně na 120 GB generovaných dat měřicí soustavou, přičemž splňuje požadavek na to, aby výsledná vizualizovaná data, byla ve formátu, který nevyžaduje specializovaný software.

Měřicí systém bude i na dále používán ve společnosti Continental a tato bakalářská práce tak představuje přínos použitý dále v technické praxi.

Literatura

- [1] OBRAZ, Jaroslav. Ultrazvuk v měřicí technice. 1. Praha: SNTL, 1976. Řada strojírenské literatury.
- [2] REGAZZO, Richard a Marcela REGAZZOVÁ. Ultrazvuk: základy ultrazvukové defektoskopie. Praha: BEN - technická literatura, 2013. Senzory neelektrických veličin. ISBN 978-80-7300-466-8.
- [3] ŠVEHLA, Štefan a Zdenko FIGURA. Ultrazvuk v technológii. Bratislava: Alfa, 1984. Edícia elektrotechnickej literatúry (Alfa).
- [4] NOVÝ, Richard. Hluk a chvění. Vyd. 3. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04347-9.
- [5] KOČIŠ, Štefan a Zdenko FIGURA. Ultrasonic Measurements and Technologies. 1. Bratislava: Chapman & Hall and Ister Science Limited, 1996. ISBN 978-1-4612-8509-0.
- [6] Laugier, Pascal & Haiat, Guillaume. (2010). Introduction to the Physics of Ultrasound. 10.1007/978-94-007-0017-8_2.
- [7] MOKHTAR, M. a H. YOUSSEF. Ultrasonic Absorption in Liquids. I. In: The Journal of the Acoustical Society of America. 1958, 30(6), s. 549-551. DOI: 10.1121/1.1909680. ISSN 0001-4966.
Dostupné také z: <http://asa.scitation.org/doi/10.1121/1.1909680>
- [8] THANH, Pham Van et al. Effect of Temperature on Ultrasonic Velocities, Attenuations, Reflection and Transmission Coefficients between Motor Oil and Carbon Steel Estimated by Pulse-echo Technique of Ultrasonic Testing Method. VNU Journal of Science: Mathematics - Physics, [S.l.], v. 31, n. 4, dec. 2015. ISSN 2588-1124.
Dostupné také z: <https://js.vnu.edu.vn/MaP/article/view/124>
- [9] HOBBIE, Russell K. Intermediate physics for medicine and biology. 4th ed. New York, NY: Springer, c2007. ISBN 978-0-387-30942-2.
- [10] AZHARI, Haim. Basics of biomedical ultrasound for engineers. Hoboken, N.J.: IEEE, 2010. ISBN 978-0-470-46547-9.
- [11] NAKAMURA, K. Ultrasonic transducers: materials and design for sensors, actuators and medical applications. Philadelphia: Woodhead Publishing, 2012. Woodhead publishing series in electronic and optical materials, no. 29. ISBN 978-0-85709-630-2.
- [12] ARNAU, Antonio. Piezoelectric transducers and applications. 2nd ed. New York: Springer, 2008. ISBN 978-3-540-77507-2.
- [13] UCHINO, Kenji. Advanced piezoelectric materials: science and technology. Philadelphia: Woodhead Publishing, 2010. Woodhead Publishing in materials. ISBN 978-1-84569-534-7.
- [14] FIALKA, J., Měření parametrů piezoelektrických aktivních prvků snímačů akustické emise, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta

- elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 156s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.
- [15] VACHUTKA, Jaromír. Přímé a nepřímé měření parametrů ultrazvukového pole [online]. Brno, 2009. Master's thesis. Masaryk University, Faculty of Science. Thesis supervisor MUDr. Pavel Grec, CSc. Dostupné také z: <https://theses.cz/id/q2eblk/>
- [16] KHOKHLOVA, Vera A., Svetlana M. SHMELEVA, Leonid R. GAVRILOV, Eleanor MARTIN, Neelaksh SADHOO a Adam SHAW. Infrared mapping of ultrasound fields generated by medical transducers: Feasibility of determining absolute intensity levels. In: The Journal of the Acoustical Society of America. 2013, 134(2), s. 1586-1597. DOI: 10.1121/1.4812878. ISSN 0001-4966. Dostupné také z: <http://asa.scitation.org/doi/10.1121/1.4812878>
- [17] MELDE, K., T. QIU a P. FISCHER. Fast spatial scanning of 3D ultrasound fields via thermography. In: Applied Physics Letters. 2018, 113(13). DOI: 10.1063/1.5046834. ISSN 0003-6951. Dostupné také z: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.5046834>
- [18] POLÁK, Josef. Přehled středoškolské matematiky. 10. vydání. Praha: Prometheus, 2015. ISBN 978-80-7196-458-2.
- [19] Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications: Olympus Guideline. Waltham: Olympus, 2004. ISBN 0-9735933-0-X.
- [20] NĚMEČEK, Pavel. Nejistoty měření. Praha: Česká společnost pro jakost, 2008. Kvalita - quality - Qualität. ISBN 978-80-02-02089-9.
- [21] InfiniiVision 3000T X-Series Oscilloscopes - Data Sheet [online]. 1. USA: Keysight Technologies, 2008 [cit. 2019-05-01]. ISBN 5992_0140EN. Dostupné také z: <https://www.keysight.com/en/pcx-x205216/infiniivision-3000t-x-series-oscilloscopes?nid=-32541.0.00&cc=GB&lc=eng>