

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta



Bakalářská práce

Ultrazvukové senzory vzdálenosti v tekutinách – analýza a měření na reálných čidlech

Autor práce: Vasil Drozd

Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. Zdeněk Bohuslávek, CSc.

PRAHA 2011

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Vasil Drozd

obor Informační a řídicí technika v agropotravinářském komplexu

Vedoucí katedry Vám ve smyslu Studijního a zkušebního řádu ČZU v Praze
čl. 16 určuje tuto bakalářskou práci.

Název práce: **Ultrazvukové senzory vzdálenosti v tekutinách –
analýza a měření na reálných čidlech**

Osnova bakalářské práce:

1. Úvod
2. Cíl práce a metodika
3. Popis vlastností a funkce ultrazvukových senzorů vzdálenosti, zpracování charakteristik UZ čidel (funkce přijímač/vysílač) pro různá prostředí (vzduch, voda)
4. Výběr vhodného čidla pro vodu a měřenou vzdálenost od 50mm do 800mm, stanovení požadavků na budicí impulsy a příjem echa obvody řízenými mikroprocesorem
5. Měření vlastností čidla v okolí kmitočtu 76 kHz ve vodě, poskytnutého firmou Green Ultrasonic Science and Technology
6. Zhodnocení výsledků měření
7. Závěr
8. Seznam literatury
9. Přílohy

Rozsah hlavní textové části: 30 - 40 stran

Doporučené zdroje:

- 1) Obraz, J.: Ultrazvuk v měřicí technice, SNTL, Praha, 1976, 480 s.
- 2) Measure distance using the ultrasonic sensor
na <http://www.emant.com/index.php?tid=100011>
- 3) Ultrasonic Transmitter and Receiver circuit diagram
na http://www.exploreircuits.com/circuit/cir_ultrasonic_transmitter_receiver.htm
- 4) Ultrasonic Sensors for Industry
na <http://www.bannerengineering.com/en-US/products/8/Sensors/30/Ultrasonic>

Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Zdeněk Bohuslávek, CSc.**

Termín zadání diplomové práce: listopad 2009

Termín odevzdání bakalářské práce: duben 2011

na Kolečka
.....
Vedoucí katedry



[Signature]
.....
Děkan

V Praze dne: 30. 11. 2009

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci na téma „Ultrazvukové senzory vzdálenosti v tekutinách – analýza a měření na reálných čidlech“ vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a materiálů, které uvádím v seznamu použité literatury.

V Praze 8. 4. 2011

.....

Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Zdeňku Bohuslávkovi, CSc. za odbornou pomoc, cenné rady a připomínky při vypracování této bakalářské práce.

V Praze 8. 4. 2011

.....

Podpis autora

ABSTRAKT

Tato práce pojednává o ultrazvukových senzorech pro měření vzdálenosti ve vodě a vzduchu. První část práce je zaměřena na teorii. V této části jsou obsaženy základní informace, které jsou nutné pro pochopení principu činnosti a vlastnosti ultrazvukových senzorů vzdálenosti. Druhá část práce je zaměřena na experimentální činnost, která je postavená na návrhu měřicí metody, realizaci měřicích přípravků a provedení reálných měření. Nejdůležitější část měření probíhala ve vodě a to pomocí ultrazvukových sond. Dále bylo provedeno měření ve vzduchu pomocí ultrazvukového měřiče vzdálenosti. Pro měření pomocí ultrazvukových sond ve vodě byl navržen a vyroben elektrický obvod, který zajišťuje měření, tedy buzení ultrazvukové sondy k vyslání impulsu. Poznatky získané v této práci budou použity pro konstrukci ultrazvukového senzoru vzdálenosti ve vodě.

KLÍČOVÁ SLOVA

Ultrazvuk, senzor vzdálenosti, ultrazvuková sonda, vzdálenost ve vodě.

ABSTRACT

This my work deals with ultrasonic sensors used for distance measurement in water and air. The first part focuses on the theory. This section contains basic information needed to understand the operating principles and characteristics of ultrasonic distance sensors. The second part focuses on an experimental activity that is based on the design of the measuring methods, implementation gauging fixtures and execution of real measurements. The most important part of the measurements was made in water by means of ultrasonic probes. Further measurements were taken in air using ultrasonic distance meter. For the measurement of ultrasonic probes in water was an electrical circuit that provides measurement was designed and manufactured, thus generating an ultrasonic probe to the impulse. The knowledge gained in this work will be used for the construction of an ultrasonic distance sensor in the water.

KEY WORDS

Ultrasound, distance sensor, ultrasonic probe, distance in water

OBSAH

1	Úvod.....	1
2	Cíl práce a metodika	2
3	Teoretická část	3
3.1	Ultrazvuk.....	3
3.2	Způsob šíření ultrazvukových vln	4
3.3	Akustický tlak a intenzita	4
3.4	Druhy ultrazvukových vln.....	5
3.4.1	Podélné vlny	5
3.4.2	Ostatní druhy vln	6
3.5	Rychlost šíření ultrazvuku.....	6
3.5.1	Rychlost šíření v kapalinách	6
3.5.2	Rychlost šíření ve vzduchu	7
3.5.3	Rychlost šíření v tuhých látkách.....	8
3.6	Útlum ultrazvukových vln.....	9
3.6.1	Útlum v kapalinách a plynech	9
3.6.2	Útlum v tuhých látkách.....	9
3.6.3	Měření útlumu.....	9
3.7	Odraz a lom ultrazvukových vln	10
3.7.1	Kolmý dopad na rozhraní	10
3.7.2	Šikmý dopad na rozhraní	11
3.8	Zdroje a přijímače ultrazvuku	12
3.8.1	Piezoelektrické měniče	12
3.8.2	Magnetostrikční měniče.....	13
3.9	Ultrazvukové senzory.....	13
3.9.1	Přímé ultrazvukové sondy	14
3.10	Směrová vyzařovací charakteristika sondy	15

3.11	Ultrazvukové senzory pro měření vzdálenosti	16
3.12	Ultrazvukové impulsy	17
3.13	Zobrazení impulsu	17
3.14	Impulsní odrazová metoda	17
4	Experimentální část.....	18
4.1	Definice úkolů a problémů měření.....	19
4.2	Návrh měřicí metody a příslušných přípravků.....	19
4.2.1	Elektrický obvod.....	20
4.2.2	Celkové elektrické zapojení měření.....	21
4.2.3	Astabilní klopný obvod.....	22
4.3	Imerzní sonda Sonotest	23
4.4	Měření pomocí ultrazvukových sond.....	24
4.4.1	Měření v akváriu	25
4.4.2	Měření ve válci	25
4.5	Zpracování charakteristik – měření vzdálenosti ve vodě.....	27
4.6	Zpracování charakteristik – měření útlumu ve vodě.....	29
4.7	Zpracování charakteristik – měření vzdálenosti ve vzduchu	31
5	Zhodnocení výsledků měření.....	33
6	Závěr	35
7	Seznam literatury	37
8	Přílohy.....	38
	Seznam grafů	38
	Seznam tabulek	38
	Použité měřicí přístroje.....	38
	Seznam obrázků.....	39

1 Úvod

Pro měření vzdálenosti je možné použít řadu druhů a typů senzorů s různými vlastnostmi a principy činnosti. Tato práce se zaměřuje na senzory měření vzdálenosti ve vodě a vzduchu, které pracují na principu ultrazvuku. Rozvoj ultrazvukových senzorů vzdálenosti započal za 1. světové války, kdy bylo potřeba zjistit umístění neviditelných podmořských cílů. Od této doby kromě měření vzdálenosti našly ultrazvukové senzory uplatnění prakticky ve všech odvětvích měřicí techniky. Dnes se ultrazvukové senzory využívají pro měření výšky hladiny, průtoku kapalin, v defektoskopii, lékařství, biologii apod.

V této práci se lze setkat s pojmy ultrazvukové senzory a ultrazvukové sondy. Z tohoto důvodu je potřeba si ujasnit skutečný význam těchto pojmů, které jsou často chybně zaměňovány. Ultrazvuková sonda představuje pouze měřicí čidlo, které je tvořené především elektroakustickým měničem, tlumícím tělískem a dalšími prvky, které jsou nutné pro vyslání a příjem požadovaných ultrazvukových impulsů, viz kapitola (3.9.1 Přímé ultrazvukové sondy). Ultrazvukové senzory představují kompletně celá funkční měřicí zařízení. Ultrazvukové senzory jsou tedy tvořeny měřicí ultrazvukovou sondou (čidlem) a elektrickými obvody, které jsou nutné pro vybuzení sondy k vyslání impulsu a vyhodnocení přijímaných impulsů. Dále ultrazvukové senzory mohou být vybaveny obrazovkou nebo displayem pro zobrazení výsledku měření, viz ultrazvukový měřič vzdálenosti, který byl použit v této práci při měření vzdálenosti ve vzduchu.

Tato práce je rozvržena na dvě hlavní části. Část první představuje část teoretickou, kde jsou postupně rozebrány jednotlivé důležité pojmy, faktory, fyzikální podstata ultrazvuku, apod. Tato část je velmi důležitá pro pochopení principu činnosti a vlastnosti ultrazvukových senzorů vzdálenosti. Ve druhé části se tato práce zaměřuje na experimentální stránku a to zejména na návrh měřicí metody a přípravu příslušných přípravků, samotné měření pomocí sond a měřiče a zhodnocení výsledků měření.

Nejdůležitější měření probíhala v akváriu a válci s vodou. Protože je však velmi obtížné opatřit ultrazvukové sondy pro měření vzdálenosti ve vodě, byly pro veškerá měření ve vodě použity sondy, jejichž původní účel je poněkud odlišný. Pro měření ve vodě byly použity dvě obyčejné ultrazvukové sondy o frekvencích 1 MHz a 2,5 MHz, které jsou vyrobeny pro účely defektoskopie. Dále byla použita jedna imerzní sonda o frekvenci 5 MHz, která je vyrobená pro účely diagnostiky ve vodě. Obyčejné sondy pro defektoskopii nejsou určeny pro měření ve vodě, z tohoto důvodu byly tyto sondy zalitý těsnicí

hmotou tak, aby nedošlo k jejich případnému poškození. U sondy imerzní, která je přímo vyrobená pro účely měření ve vodě, poškození nehrozí, proto nebylo nutné provádět jakékoliv úpravy.

Kromě měření ve vodě bylo provedeno měření vzdálenosti ve vzduchu a to pomocí ultrazvukového měřiče vzdálenosti. Toto měření bylo provedeno kvůli srovnání rychlosti šíření ultrazvukových vln v různých prostředích.

2 Cíl práce a metodika

Cílem této práce je seznámit se s principem činnosti a vlastnostmi ultrazvukových senzorů vzdálenosti.

Dále si tato práce klade za cíl zjistit pomocí reálných měření chování ultrazvukových sond při měření vzdálenosti ve vodě. Výsledkem reálných měření by mělo být zjištění, mohou-li se ultrazvukové sondy použít pro měření vzdálenosti ve vodě a to zejména v různě ohraničených prostředích, jako je malé akvárium nebo válec.

Dalším cílem této práce je získání co nejvíce podkladů a informací, které mohou posloužit pro konstrukci plně funkčního ultrazvukového senzoru vzdálenosti pro měření ve vodě.

Veškeré údaje a informace použité při psaní této práce byly získány z odborné literatury a online zdrojů, které uvádím v seznamu použité literatury. A dále z vlastních poznatků, které vznikly samotným měřením pomocí ultrazvukových sond a měřiče vzdálenosti.

3 Teoretická část

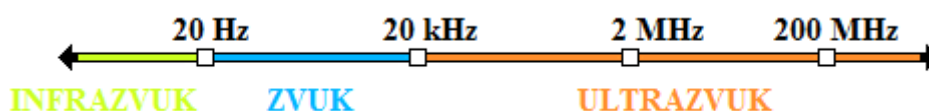
3.1 Ultrazvuk

Ultrazvukem se označují akustické vlny ve frekvenčním rozsahu nad hranicí lidské slyšitelnosti. Ultrazvuk vzniká chvěním hmoty, která toto chvění předává hmotným částicím prostředí, např. vzduch, voda, pevné látky. Tyto částice prostředí mechanicky kmitají kolem rovnovážné klidové polohy s frekvencemi vyššími než 20 kHz a nižšími než 1 GHz. Ultrazvukové vlny se šíří pouze ve hmotě, vzhledem k tomu se ultrazvukové vlny nešíří a platí pro ně stejné fyzikální zákony, jako pro lidské ucho slyšitelné zvukové vlny [1][2].

V prostředí, ve kterém se ultrazvuková vlna šíří, nastává zhušťování a zředování částic. Místa, ve kterých se částice zhušťují a zředují, procházejí prostředím určitou rychlostí, která se označuje jako *rychlost šíření zvuku c* . Sousedící místa maximálně nebo minimálně zhuštěných částic představují *zvukovou vlnu*, kdy vzdálenost těchto míst se označuje jako *délka zvukové vlny λ* . Množství zhuštění nebo zředění za jednu vteřinu se označuje jako *kmitočet f* . Tyto veličiny se dají vyjádřit vztahem $c = \lambda \cdot f$. Rychlost šíření ultrazvuku je závislá na prostředí, ve kterém se vlna šíří. V průběhu šíření ultrazvukové vlny kmitají částice prostředí kolem rovnovážné polohy určitou rychlostí, která je označována jako *akustická rychlost v* , kterou není možné zaměňovat za rychlost šíření zvuku c [2].

Ultrazvuk lze podle účinku rozdělit na aktivní a pasivní. *Aktivní ultrazvuk* pracuje s vysokými intenzitami a projevuje se fyzikálními nebo chemickými účinky. Kvůli vysokým výkonům není aktivní ultrazvuk vhodný pro měřicí a diagnostické účely. Využívá se především při ultrazvukovém čištění, vrtání, svařování, lékařské terapii, tvorbě emulzí a suspenzí apod.

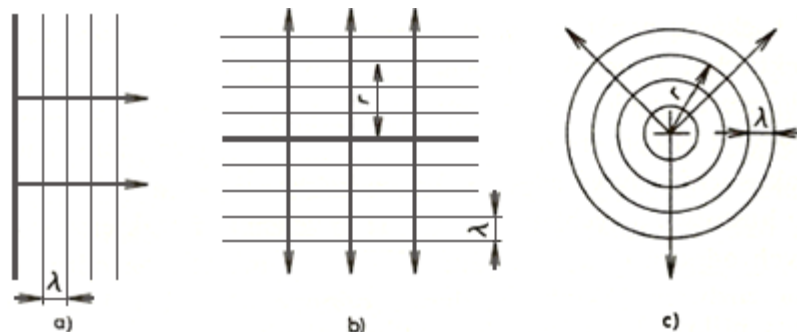
Pasivní ultrazvuk má na rozdíl od aktivního velmi malý a obvyklé nepatrný výkon. Z tohoto důvodu je jeho hlavní využití v ultrazvukové měřicí technice. Využívá se pro měření vzdálenosti, zjišťování vnitřních vad materiálu, diagnostice v lékařství. Na principu pasivního ultrazvuku pracují i ultrazvukové senzory vzdálenosti, které jsou předmětem této práce.



Obr. 3.1 Zvukové spektrum

3.2 Způsob šíření ultrazvukových vln

Ultrazvuková vlna se v neohrazeném prostředí šíří prostorově od svého zdroje. Částice, které spolu sousedí a kmitají ve stejné fázi, tvoří vlnoplochu. Podle tvaru vlnoplochy se rozlišují tři základní tvary vln a to vlna **rovinná**, **válcová** a **kulová** (Obr. 3.2). Tvar vlnoplochy závisí na použitém zdroji. Je-li rovina vlnoplochy kolmá na směr šíření, jde o vlnu rovinnou, jejímž zdrojem je kmitající nekonečná rovina. Je-li zdrojem vln dlouhý válec s malým průměrem, vzniknou kolem něj soustředné vlnoplochy o poloměru r , tyto vlny se označují jako válcové. Je-li zdroj ultrazvuku malých rozměrů (bodový), vytvoří se kolem něj všesměrová kulová vlna, jejíž vlnoplochy mají tvar soustředných koulí se středem v bodovém zdroji. Při velkém poloměru r změní se vlna kulová ve vlnu rovinnou [1], [3].



Obr. 3.2 Tvary vlnoploch [3]
a) vlna rovinná b) vlna válcová c) vlna kulová

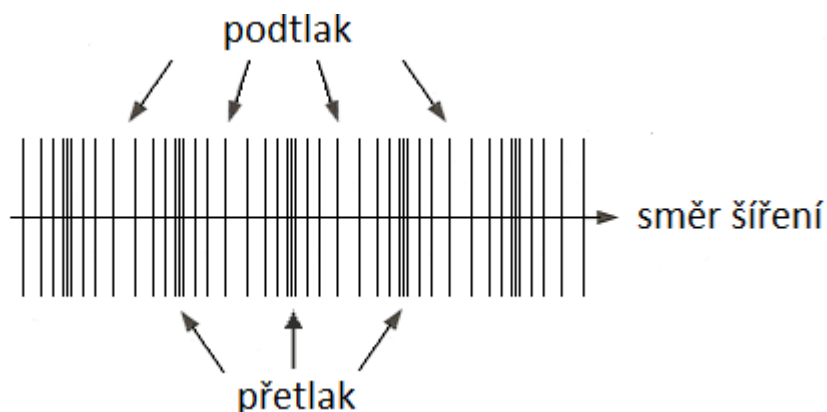
3.3 Akustický tlak a intenzita

Akustický tlak je z pohledu ultrazvukového měření a diagnostiky nejdůležitějším parametrem ultrazvukového pole, protože elektrické napětí, které se zpracovává pro vyhodnocení přijímaných ultrazvukových kmitů, je závislé na akustickém tlaku [3].

Akustický tlak vzniká průchodem ultrazvukové vlny prostředím. Při průchodu vlny prostředím dochází ke zvýšení tlaku (přetlak) v místech zhuštění částic a ke snížení tlaku (podtlak) v místech zředění částic. Oblasti zvýšeného a sníženého tlaku se střídají (Obr. 3.3). Hodnota *akustického tlaku* p je úměrná *akustické rychlosti* v a *akustické impedanci* z , což lze vyjádřit rovnicí (1) podle [1], [2], [3].

$$p = zv \quad [\text{Pa}] \quad (1)$$

Tato rovnice je analogií Ohmova zákona z elektrotechniky. Akustický tlak p odpovídá elektrickému napětí U , akustická rychlost v elektrickému proudu I a akustická impedance z elektrické impedanci Z [1].



Obr. 3.3 Průchod ultrazvukové vlny prostředím [2]

Akustická intenzita I představuje výkon P procházející jednotkou plochy S . Výkon ultrazvukové vlny lze popsat vztahem (2) podle [3].

$$P = I \cdot S = p_{ef} \cdot v_{ef} \cdot S \quad [W] \quad (2)$$

p_{ef} – akustický tlak efektivní [Pa]

v_{ef} – akustická rychlost efektivní [$m \cdot s^{-1}$]

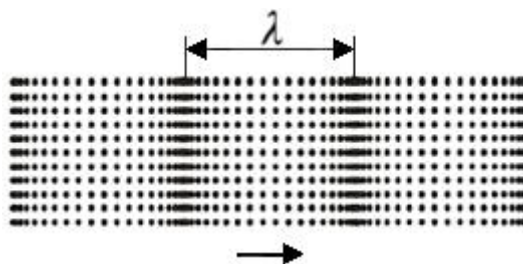
S – plocha [m^2]

3.4 Druhy ultrazvukových vln

Ultrazvukové vlny, které se šíří prostředím, mohou být několika druhů. Podle způsobu pohybu částic prostředí vzhledem ke směru postupu vlny lze ultrazvukové vlny rozdělit na *podélné, příčné, povrchové, deskové a Loveovy*. Protože veškerá reálná měření byla prováděna ve vodě a vzduchu, jsou z pohledu této práce nejdůležitější vlny podélné, které se mohou šířit v těchto prostředích.

3.4.1 Podélné vlny

Jedná se o nejběžnější a nejdůležitější ultrazvukové vlny, které se mohou šířit každým prostředím (plynným, kapalným a tuhým). Při podélné vlně částice prostředí kmitají přímočaře ve směru šíření vlny (Obr. 3.4), přitom dochází ke střídavé změně objemu prostředí. K tomu, aby se podélná vlna mohla šířit prostředím, je zapotřebí dostatečně velkých rozměrů prostředí vzhledem k vlnové délce λ . Podélné vlny se také označují jako longitudinální a značí se indexem L (c_L) podle [1], [4].



Obr. 3.4 Kmitání částic prostředí při šíření podélné vlny [4]

3.4.2 Ostatní druhy vln

Příčné vlny

Příčné vlny jsou významné pro zkoušení materiálu, protože se mohou šířit pouze v tuhém prostředí, které klade odpor namáhání ve smyku. V kapalinách a plynech se tyto vlny nešíří. Částice prostředí kmitají ve směru kolmém ke směru šíření vlny. Příčné vlny se také označují jako transverzální a značí se indexem T (c_T).

Povrchové vlny

Jedná se o zvláštní případ příčných vln, které se mohou šířit na volném povrchu tuhé látky. Částice se pohybují kolem rovnovážné polohy po eliptické dráze v hloubce menší než je vlnová délka λ . Povrchové vlny se také označují se jako Rayleighovy vlny a značí se indexem R (c_R).

Deskové vlny

Jsou to vlny, které se šíří v desce, jejíž tloušťka je srovnatelná s délkou vlny λ . Částice prostředí kmitají po eliptické dráze a vyskytují se jako vlny symetrické nebo asymetrické. Někdy jsou označovány jako vlny Lambovy a značí se indexem D (c_D). Zvláštním případem deskových vln jsou vlny Loveovy [1], [3], [4].

3.5 Rychlost šíření ultrazvuku

Rychlost šíření ultrazvuku závisí na prostředí, ve kterém se ultrazvuková vlna šíří. Z pohledu této práce je nejdůležitější rychlost šíření ve vodě a vzduchu, kde byla prováděna veškerá reálná měření.

3.5.1 Rychlost šíření v kapalinách

Obecně závisí rychlost šíření ultrazvukových vln v čistých kapalinách na teplotě, hustotě a tlaku kapaliny. Protože kapaliny nekladou žádný odpor smykového namáhání, šíří se v nich pouze podélné vlny. Zhušťování a zředování kmitajících částic probíhá adiabaticky (bez tepelné výměny), z tohoto důvodu lze rychlost šíření v kapalinách vyjádřit rovnicí (3).

$$c = \sqrt{\frac{1}{\beta_{ad}\rho}} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (3)$$

β_{ad} – adiabatická stlačitelnost [Pa^{-1}]
 ρ – hustota kapaliny [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

Rychlost šíření ultrazvukových vln v kapalinách se mění s teplotou a pro běžné účely ji lze popsat zjednodušenou rovnicí (4).

$$c(\Theta) = c_0 + b(\Theta - \Theta_0) \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (4)$$

c_0 – rychlost při počáteční teplotě Θ_0 [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
 b – absolutní teplotní součinitel [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

Rychlost šíření ultrazvukových vln ve vodě roste se zvyšující se teplotou až do hodnoty 74 °C při obvyklém atmosférickém tlaku ($1 \cdot 10^5 \text{ Pa}$). Po překročení této teploty, začne rychlost šíření ultrazvuku postupně klesat, viz (Tab. 3.1). Při pokojové teplotě 20 °C je rychlost šíření ultrazvuku ve vodě přibližně $1483 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Θ [°C]	c [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]	Θ [°C]	c [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]	Θ [°C]	c [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]	Θ [°C]	c [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]	Θ [°C]	c [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
0	1402,74	25	1492	45	1536,72	65	1553,76	85	1553,25
10	1447,59	30	1509,44	50	1542,87	70	1555,12	90	1550,79
15	1466,25	35	1520,12	55	1547,7	75	1555,45	95	1547,50
20	1482,66	40	1529,18	60	1551,3	80	1554,81	100	1543,41

Tab. 3.1 Rychlost šíření c v destilované vodě v závislosti na teplotě Θ od 1 do 100 °C. [1]

Dále kromě teploty a hustoty ovlivňuje rychlost šíření ultrazvuku ve vodě ještě tlak. S rostoucím tlakem stoupá rychlost šíření ve vodě zhruba o 0,1 % na 1 MPa. Působení tlaku na rychlost šíření ultrazvuku je tedy poměrně malé. U roztoků a směsí je rychlost šíření závislá nejen na teplotě, tlaku a hustotě, ale ještě na koncentraci roztoků [1], [3].

3.5.2 Rychlost šíření ve vzduchu

Rychlost šíření ultrazvuku ve vzduchu závisí na teplotě, tlaku a vlhkosti vzduchu. Rychlost šíření ultrazvuku v ideálním plynu lze popsat rovnicí (5).

$$c = \sqrt{\frac{\kappa \cdot p}{\rho}} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (5)$$

$\kappa = c_p/c_v$ – poměr měrných tepel
 p – tlak [Pa]

S rostoucí teplotou klesá hustota vzduchu a tím roste rychlost šíření ultrazvuku. Rychlost šíření ultrazvuku ve vzduchu v závislosti na teplotě lze popsat rovnicí (6).

$$c = 331,6 + 0,61t \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (6)$$

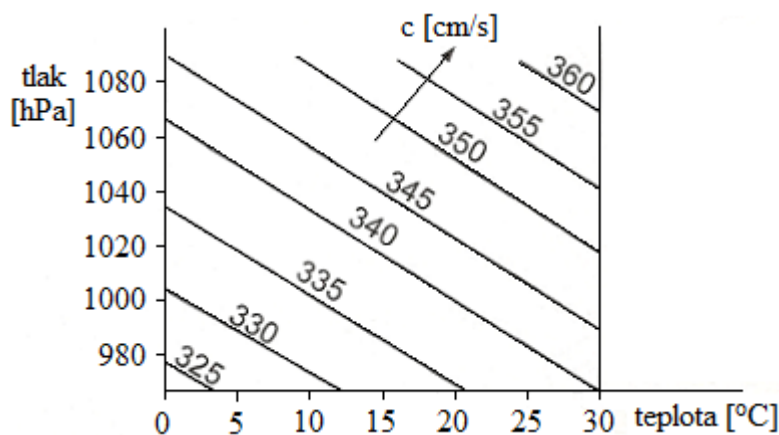
$c = 331,6 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}]$ – rychlost zvuku při $t = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$
 t – teplota $[\text{ } ^\circ\text{C}]$

Závislost rychlosti šíření ultrazvuku ve vzduchu na teplotě je znázorněná v (Tab. 3.2).

$t \text{ [} ^\circ\text{C}]$	-20	0	20	40	60	80
$c \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}]$	319,3	331,6	343,8	355,3	366,5	377,5

Tab. 3.2 Rychlost šíření zvuku ve vzduchu v závislosti na teplotě. [2]

Kromě teploty je rychlost šíření značně závislá na tlaku vzduchu, kdy se stoupajícím tlakem rychlost šíření klesá. Při obvyklém kolísání tlaku atmosféry dochází ke změně rychlosti šíření kolem 5 %. Závislost mezi teplotou, tlakem a rychlostí je znázorněná na (Obr. 3.5).



Obr. 3.5 Vliv teploty a tlaku vzduchu na rychlost šíření. [2]

Dále rychlost šíření závisí na relativní vlhkosti vzduchu, jejíž vliv je daleko nižší než u teploty a tlaku, kdy rozdíl rychlosti mezi suchým a vlhkým vzduchem je přibližně 2 % [1], [2].

3.5.3 Rychlost šíření v tuhých látkách

Tuhé látky ve srovnání s kapalinami a plyny mají daleko vyšší meziatomární vazební síly, a proto jsou schopny snášet smykové namáhání. Z tohoto důvodu jsou tuhé látky jediné, které mohou přenášet všechny druhy ultrazvukových vln. Rychlost šíření ultrazvukových vln v tuhých látkách je závislá na elastických konstantách prostředí a na poměru mezi vlnovou délkou a rozměry prostředí [1], [3].

3.6 Útlum ultrazvukových vln

Průchodem ultrazvukové vlny prostředím dochází k poklesu její energie a akustického tlaku. Původcem tohoto poklesu je útlum, který vzniká v důsledku pohlcování a rozptylu ultrazvuku.

Pohlcování ultrazvuku vzniká jako důsledek vnitřního tření, kdy se mechanická energie kmitajících částic mění v energii tepelnou. Ztráty pohlcováním rostou se zvyšující se frekvencí a jsou velmi závislé na teplotě.

Rozptyl ultrazvukových vln nastává v nehomogenních a polykrystalických prostředích, kdy při dopadu na jednotlivé nehomogenity dochází na jejich rozhraní k odrazu, lomu a ohybu ultrazvuku [3].

3.6.1 Útlum v kapalinách a plynech

V kapalinách a plynech je útlum závislý na ztrátách způsobených viskozitou α_v a na ztrátách α_t , které vznikají vlivem tepelné vodivosti kapalin. Útlum v kapalinách a plynech lze popsat rovnicí (7).

$$\alpha = \alpha_v + \alpha_t = af^2 \quad [\text{dB} \cdot \text{mm}^{-1}] \quad (7)$$

Útlum v kapalinách a plynech je úměrný čtverci frekvence, kdy pro útlum je charakteristické ztrátové číslo a . V kapalinách toto číslo závisí hlavně na ztrátách viskozitních, a proto platí $\alpha_v \gg \alpha_t$. Viskozita značně závisí na teplotě, a proto je útlum kapalin ovlivněn teplotou. U vody a některých dalších kapalin útlum s rostoucí teplotou klesá. Útlum ultrazvukových vln ve vodě při frekvenci 2 MHz je přibližně $5 \cdot 10^{-4} \text{ dB} \cdot \text{mm}^{-1}$. V plynech jsou hodnoty dílčích útlumů přibližně stejné $\alpha_v \approx \alpha_t$.

3.6.2 Útlum v tuhých látkách

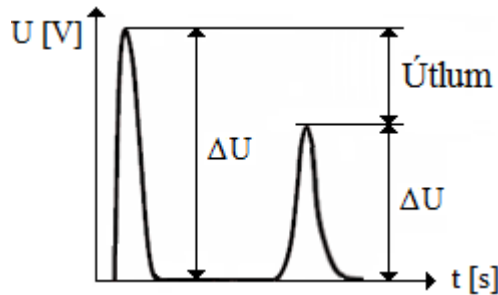
Protože je struktura tuhých látek mnohdy nehomogenní, je činitel útlumu dán součtem útlumu pohlcováním α_p a útlumu rozptylem α_r (8) podle [1], [3].

$$\alpha = \alpha_p + \alpha_r \quad [\text{dB} \cdot \text{mm}^{-1}] \quad (8)$$

3.6.3 Měření útlumu

Nejběžnější metodou měření útlumu ultrazvuku je metodou odrazovou. Informaci o útlumu udává výška přijímaných impulzů (ech). Výška přijímaných ech závisí na prostředí a na místě vyzařovací charakteristiky ultrazvukové sondy, ve kterém se měření provádí. Měření lze provádět v celém rozsahu vyzařovací charakteristiky sondy. Nejsnazší je měřit útlum v blízkém poli sondy, ve kterém je výška přijímaných ech ovlivněna pouze útlumem [1].

V této práci bylo měření útlumu prováděno tak, že se přijímaná echa srovnala na stejnou úroveň a zjišťoval se rozdíl napětí ΔU v závislosti na vzdálenosti sondy od odrazové plochy, viz (Obr. 3.6).



Obr. 3.6 Měření útlumu

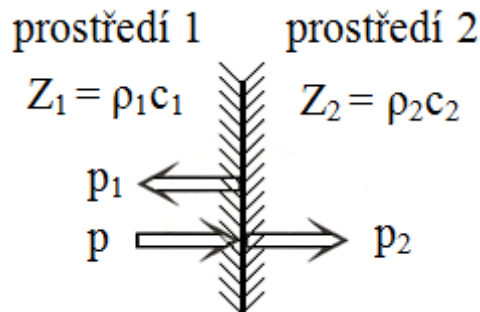
3.7 Odraz a lom ultrazvukových vln

Při měření pomocí ultrazvukových sond se setkáváme s odrazem a lomem ultrazvukových vln. Při kolmém dopadu ultrazvukové vlny na rozhraní dvou prostředí nastává odraz. Při šikmém dopadu ultrazvukové vlny na rozhraní dvou prostředí, nastává kromě odrazu ještě lom ultrazvukové vlny.

3.7.1 Kolmý dopad na rozhraní

S kolmým dopadem na rozhraní dvou prostředí se setkáváme u ultrazvukových sond při měření vzdálenosti nejčastěji. Odrazová plocha by měla být vždy kolmá ke směru šíření vlny. Při měření ultrazvukovou sondou s jedním měničem se příjem odraženého impulsu (echa) očekává vždy v místě vyslání vlny, a proto by měl být úhel odklonu nulový [2].

Dopadne-li ultrazvuková vlna s akustickým tlakem p kolmo na rozhraní dvou prostředí 1 a 2 s akustickými odpory Z_1 a Z_2 , odrazí se část s akustickým tlakem p_1 zpět do prostředí 1 a část s akustickým tlakem p_2 projde do prostředí 2, viz (Obr. 3.7) podle [1].



Obr. 3.7 Kolmý dopad ultrazvukové vlny na rozhraní dvou prostředí [4]

Akustické tlaky dopadajících a odražených vln lze popsat vztahy (9).

$$p = \rho_1 c_1 v \quad p_1 = -\rho_1 c_1 v_1 \quad p_2 = \rho_2 c_2 v_2 \quad (9)$$

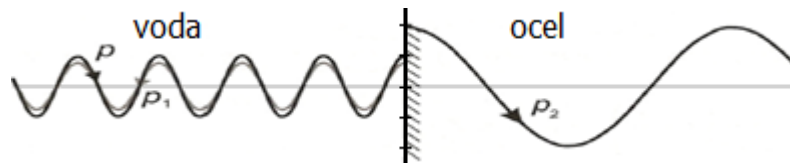
Záporné znaménko v rovnici p_1 značí, že odražená vlna se šíří v záporném směru. Na rozhraní dvou prostředí platí kontinuita akustických tlaků a rychlostí, z čehož plyne rovnost tlaků a rychlostí, kterou lze popsat vztahy (10) podle [1].

$$p_2 = p + p_1 \quad v_2 = v + v_1 \quad (10)$$

Na rozhraní dvou prostředí je možné definovat *koeficient odrazu R*, jako poměr odraženého akustického tlaku p_1 a dopadajícího akustického tlaku p a *koeficient průchodu D*, jako poměr prošlého akustického tlaku p_2 a dopadajícího akustického tlaku p , viz (11) podle [4].

$$R = \frac{p_1}{p} \quad D = \frac{p_2}{p} \quad (11)$$

Na rozhraní dvou prostředí mohou vzniknout tři možnosti, které lze vyjádřit pomocí poměru akustických odporů $m = Z_1 / Z_2$. Pro $m = 1$ nedochází na rozhraní k odrazu. Při průchodu z prostředí akusticky hustšího do prostředí řidšího ($m > 1$) je fáze odraženého akustického tlaku opačná než fáze tlaku dopadající vlny. Při průchodu z prostředí řidšího do prostředí hustšího ($m < 1$) se fáze odražené vlny nemění (Obr. 3.8). Na rozhraní plynu a tuhé látky dochází prakticky ke stoprocentnímu odrazu vlny [3], [4].



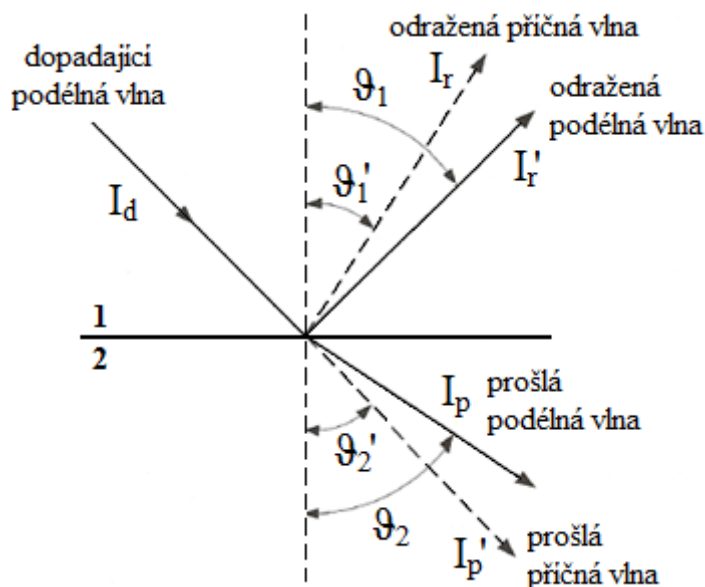
Obr. 3.8 Kolmý dopad na rozhraní voda – ocel [4]

3.7.2 Šikmý dopad na rozhraní

Šikmý dopad na rozhraní nastává u ultrazvukových sond při měření vzdálenosti pouze v případě překážek v dráze šíření vlny nebo při vychýlení sondy. Někdy však může být paprsek odkloněn záměrně.

Při šikmém dopadu ultrazvukové vlny na rozhraní dvou prostředí dochází k jejímu odrazu a lomu. Lom ultrazvukové vlny představuje změnu směru jejího šíření vzhledem ke směru vlny dopadající. Podélná zvuková vlna se na rozhraní dvou prostředí rozdělí na část odraženou a na část prošlou. Je-li prostředím pevná látka, vzniknou u odražené i prošlé vlny vedle podélných složek také složky příčné. Jev, kdy vzniká vlna jiného druhu než vlna dopadající, se označuje jako transformace vlny. Tyto podélné i příčné složky se odrážejí a lámou pod různými úhly, viz (Obr. 3.9), které lze spočítat ze Snellova zákona, viz (12) podle [2], [3].

$$\frac{c_1}{\sin\theta_1} = \frac{c'_1}{\sin\theta'_1} = \frac{c_2}{\sin\theta_2} = \frac{c'_2}{\sin\theta'_2} \quad (12)$$



Obr. 3.9 Šikmý dopad na rozhraní dvou prostředí [2]

3.8 Zdroje a přijímače ultrazvuku

Jako zdroje a přijímače ultrazvuku se používají elektroakustické měniče. Elektroakustické měniče převádějí elektrickou energii na mechanickou a naopak mechanickou na elektrickou. Pro měření pomocí ultrazvukových sond mají smysl pouze piezoelektrické a magnetostrikční měniče, ve kterých dochází k přeměně energie na úrovni molekul pomocí elastických a elektromagnetických vazeb [1].

3.8.1 Piezoelektrické měniče

Základem piezoelektrických měničů jsou piezoelektrické krystaly. Tyto krystaly mají takovou vlastnost, že při přiložení napětí změní svoje geometrické rozměry. Tento jev se označuje jako *nepřímý piezoelektrický jev* a využívá se ho při vyslání ultrazvukové vlny. Opakem tohoto jevu je *přímý piezoelektrický jev*, kdy při působení vnější síly na krystal vzniká náboj, který je měřitelný jako napětí. Přímý jev se využívá při příjmu ultrazvukové vlny. Elektrické napětí vzniklé na krystalu je přímo úměrné vnějšímu namáhání [1], [2].

Piezoelektrické krystaly jsou nejčastěji z olovnatých titanátů nebo zirkonátů. Jelikož je výrobně obtížné piezoelektrické makrokrystaly pěstovat, dává se v technické praxi přednost piezokeramice. Piezokeramika vzniká lisováním jemného prášku a následným vypálením v peci [1], [2].

Vztah mezi mechanickým a elektrickým chováním piezoelektrických látek popisují piezoelektrické konstanty. Mezi nejdůležitější patří piezoelektrický koeficient d_{ik} a piezoelektrická deformační konstanta h_{ik} (13).

Piezoelektrický koeficient d_{ik} popisuje nepřímý piezoelektrický jev, kdy udává změnu rozměru měniče Δl v závislosti na napětí U_V na elektrodách měniče. Tato konstanta se bere jako rozhodující, použije-li se měnič jako vysílač (13).

Piezoelektrická deformační konstanta h_{ik} popisuje přímý piezoelektrický jev a je dána napětím naprázdno U_P na elektrodách měniče při deformaci Δl . Tato konstanta rozhoduje o tom, zda se měnič použije jako přijímač (13) podle [3].

$$d_{ik} = \frac{\Delta l}{U_V} \text{ [mV}^{-1}\text{]} \quad h_{ik} = \frac{U_P}{\Delta l} \text{ [Vm}^{-1}\text{]} \quad (13)$$

3.8.2 Magnetostrikční měniče

Magnetostrikční měniče se využívají pro nízké ultrazvukové frekvence. Kvůli složitější výrobě a úzkému frekvenčnímu pásmu jsou však tyto měniče nahrazovány měniči piezoelektrickými a to i na frekvencích do 100 kHz. Tyto měniče vysílají a přijímají dlouhé impulsy, které mají pomalu stoupající náběh, který neumožňuje přesně určit počátek impulsů. Z tohoto důvodu má výsledné měření malou přesnost. Magnetostrikční měniče se používají především při zkoušení betonu, těžké keramiky a jiných materiálů s velkým útlumem [3].

3.9 Ultrazvukové senzory

Doplníme-li ultrazvukovou sondu o další funkční prvky, vznikne ultrazvukový senzor, kterým je možno měřit. Ultrazvukové senzory lze rozdělit podle druhu použité ultrazvukové sondy. Ultrazvuková sonda slouží pro vysílání a příjem ultrazvukových vln.

Ultrazvukové sondy se rozdělují podle druhu použitého elektroakustického měniče. V současné době se nejčastěji využívají sondy s piezoelektrickým měničem. Sondy s magnetostrikčním měničem pro nízké frekvence se příliš nevyužívají a jsou nahrazovány právě sondami piezoelektrickými.

Dále lze ultrazvukové sondy dělit podle druhu vysílaných a přijímaných vln na sondy pro vlny podélné, příčné, povrchové atd. Podle provedení se sondy rozdělují na sondy přímé a sondy úhlové. Podle technického provedení se rozlišují sondy pro impulsové a spojitě vysílání [1].

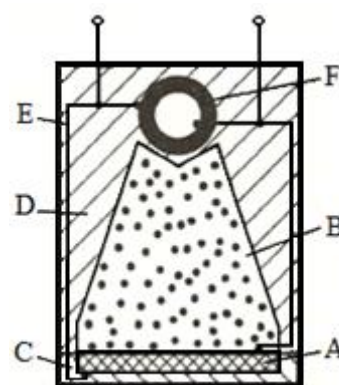
V našem případě byla veškerá reálná měření ve vodě prováděna pomocí přímých impulsových sond s piezoelektrickými měniči pro podélné vlny, které jsou v praxi nejpoužívanější.

3.9.1 Přímé ultrazvukové sondy

Přímé sondy vysílají a přijímají ultrazvukové impulsy kolmo na snímanou plochu nebo s minimálním úhlem odklonu. Přímé sondy lze rozdělit na jednoměničové a dvouměničové. **Jednoměničové sondy** (jednoduché) mají jeden společný měnič, který jak vysílá, tak i přijímá ultrazvukové vlny. **Dvouměničové sondy** (dvojité) představují dvě oddělené sondy ve společném krytu, kdy jedna pouze vysílá a druhá pouze přijímá. Mnohem častěji se lze setkat s jednoměničovým provedením [1].

Nevýhodou jednoměničové ultrazvukové sondy je, že po vyslání impulsu musí nečinně čekat po dobu, kdy měnič dokmitává. Tato doba se označuje jako **mrtvý čas**. Odezva může být zjištěna teprve tehdy, když je hodnota přijaté odezvy větší než amplituda doznívajícího měniče. Následkem mrtvého času mají jednoměničové sondy těsně u sondy nefunkční oblast. V této oblasti nemůže být detekována žádná odezva, a proto je označována jako **mrtvá zóna**. Mrtvou zónu lze snížit použitím dvouměničové sondy [2].

Mezi nejdůležitější parametry ultrazvukových sond patří citlivost při dobré rozlišovací schopnosti a malá mrtvá zóna. Přímé sondy mají elektroakustický měnič v těsné blízkosti prostředí, odděluje jej pouze tenká ochranná vrstva (Obr. 3.10 C). Potřebnou šířku pásma lze získat použitím vhodného měniče (Obr. 3.10 A) a tlumením na zadní straně. Na zadní straně měniče je umístěno tlumicí tělísko (Obr. 3.10 B), které je tvarované tak, aby se chovalo jako nekonečné prostředí, které nevrací žádné odrazy zpět do měniče. Tlumicí tělísko by mělo být co nejlépe přizpůsobeno na akustický odpor měniče. Nejčastěji se vyrábí ze zrnitého wolframového prášku spojeného pryskyřicí. Mezi měnič a tělísko jsou vloženy tenké přizpůsobovací vrstvy, které při správném naladění zvyšují tlumení. Obdobně je naladěna ochranná krycí vrstva. Tím se dosahuje značné šířky pásma a tedy i dobré rozlišovací schopnosti, která je však na úkor citlivosti. Sondy s vysokou citlivostí mají nižší rozlišovací schopnost [3].



Obr. 3.10 Jednoměničová přímá sonda [3]

A - měnič B - tlumicí tělísko C - ochranná krycí vrstva D - vnější tlumicí prostředí
E - elektrické příklady F - přizpůsobovací elektrický člen

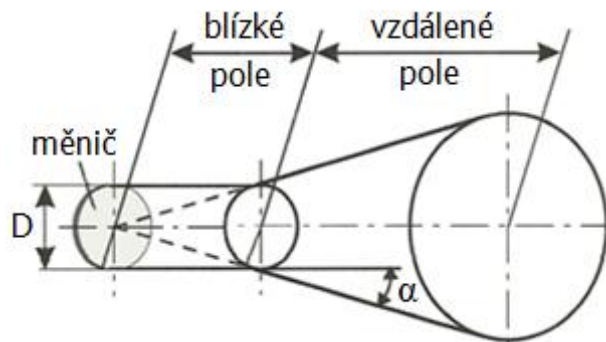
3.10 Směrová vyzařovací charakteristika sondy

Zvukové pole každé sondy je prezentováno směrovou vyzařovací charakteristikou. Zvukové pole sondy lze rozdělit na pole blízké a pole vzdálené. **Pole blízké** (Fresnelova zóna) představuje vzdálenost od elektroakustického měniče do posledního maxima tlaku. Tvar blízkého pole sondy s kruhovým měničem je přibližně válcový a má stejný průměr jako měnič. **Pole vzdálené** (Fraunhoferova zóna) následuje od posledního maxima, kdy se okraj akustického svazku kuželovitě rozšiřuje a akustický tlak klesá úměrně se vzdáleností od zdroje a osy, viz (Obr. 3.11) podle [2], [4].

Na konci blízkého pole se nachází oblast fokusace (ohnisková vzdálenost), v této oblasti je největší koncentrace zvuku, a proto je zde největší citlivost a akustický tlak. V oblasti fokusace lze naměřit největší možné echo. Délku blízkého pole l_0 lze popsat vztahem (14).

$$l_0 = \frac{D^2 \cdot f}{4 \cdot c} \quad [\text{m}] \quad (14)$$

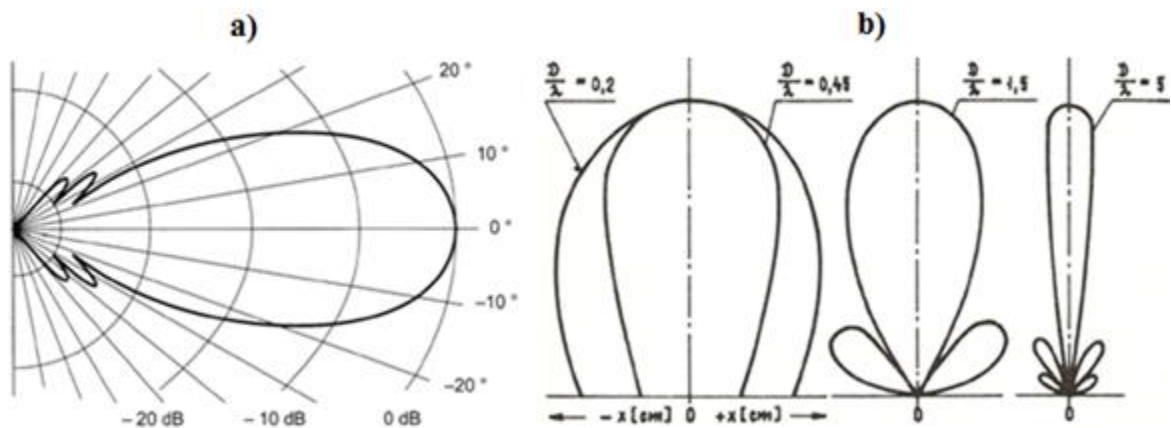
D – průměr měniče f – frekvence c – rychlost šíření vln v daném prostředí



Obr. 3.11 Rozdělení zvukového pole sondy [4]

Směrová vyzařovací charakteristika sondy představuje graf, který udává závislost hladiny akustického tlaku p na úhlu natočení měřícího mikrofону od osy sondy při konstantní vzdálenosti. Měření směrové charakteristiky probíhá tak, že se otáčí měřící mikrofón kolem ultrazvukové sondy. Směrovou charakteristiku stačí naměřit v jedné rovině a pro následný zápis se využívá polárních souřadnic, kdy nulový úhel se nachází v ose sondy, viz (Obr. 3.12a) podle [2].

Tvar směrové vyzařovací charakteristiky sondy s kruhovým měničem závisí na poměru D/λ tedy na poměru průměru měniče D k jeho tloušťce. Čím vyšší je hodnota D/λ , tím více se směrová vyzařovací charakteristika ultrazvukové sondy zúžuje, viz (Obr. 3.12b). Tvar a poloha postranních laloků směrové vyzařovací charakteristiky závisí na způsobu tlumení měniče sondy. Skutečná směrová charakteristika sondy je zachycená v (Příloha 9).



Obr. 3.12 Směrové vyzařovací charakteristiky ultrazvukových sond [2], [5]

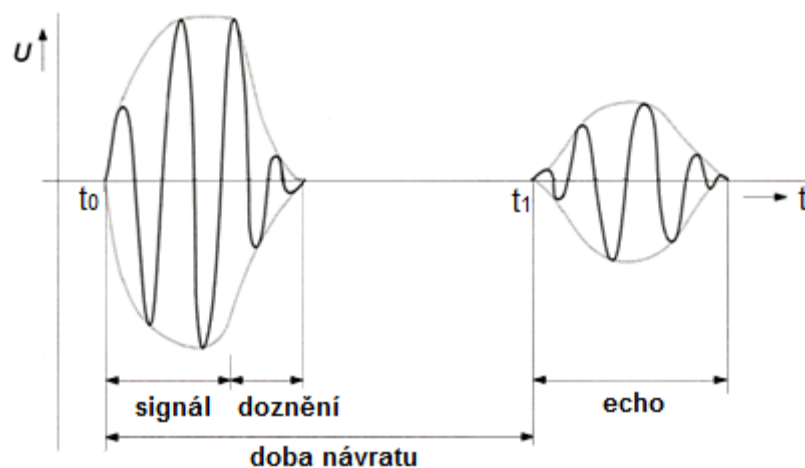
Hlavní lalok vyzařovací charakteristiky je definován úhlem α viz (Obr. 3.11), který lze popsat Fraunhoferovou formulí (15).

$$\sin \alpha = 1,22 \frac{\lambda}{D} \quad (15)$$

Z této formule vyplývá důležitý závěr. Volbou frekvence elektroakustického měniče lze ovlivnit směrovou vyzařovací charakteristiku [5].

3.11 Ultrazvukové senzory pro měření vzdálenosti

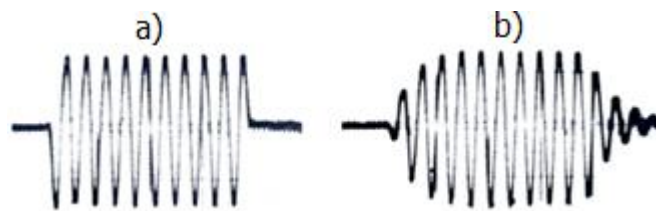
Ultrazvukové senzory pro měření vzdálenosti pracují na principu měření času odezvy echa. Elektroakustický měnič vyšle v čase t_0 ultrazvukový impuls, který se šíří prostředím rychlostí zvuku c . Dopadne-li vyslaný ultrazvukový impuls na odrazovou plochu, část vlnění se odrazí (echo) a dojde po době návratu zpět k sondě. Echo, které se vrátí v čase t_1 se detekuje stejným měničem v případě jednoměničové sondy nebo druhým měničem v případě dvouměničové sondy. Vyhodnocovací elektronika senzoru zjišťuje vzdálenost odrazové plochy pomocí měření doby mezi vysláním a přijetím impulsu, viz (Obr. 3.13) podle [2].



Obr. 3.13 Princip činnosti senzoru vzdálenosti s jednoměničovou sondou [2]

3.12 Ultrazvukové impulsy

Ultrazvukové sondy pro svá měření využívají ultrazvukové impulsy. Impuls představuje soubor kmitů, které se liší od nuly po dobu krátkého časového úseku. U impulsu je důležitá především jeho šířka, která závisí na tvaru impulsu. U obdélníkových impulsů lze šířku jednoznačně určit (Obr. 3.14a). U impulsu s přechodovým jevem (Obr. 3.14b) se bere šířka impulsu jako časový rozdíl mezi dvěma okamžiky t_1 a t_2 , ve kterých je soustředěno 90 % energie impulsu. Použitelnost impulsů pro ultrazvukové měření silně závisí na strmotech čela a týla impulsů [3].

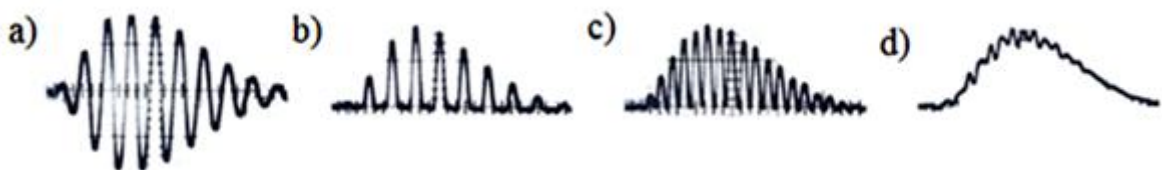


Obr. 3.14 Ultrazvukové impulsy [1]

3.13 Zobrazení impulsu

Pro zobrazení impulsů se nejčastěji používají obrazovky osciloskopů. Impulsy se mohou na obrazovce zobrazit v původním tvaru (Obr. 3.15a), nebo po usměrnění a filtraci. Usměrněný impuls má jednu polaritu, a to buď nad, nebo pod nulovou osou. Usměrnění může být jednocestné (Obr. 3.15b) nebo dvoucestné (Obr. 3.15c). Filtrací usměrněného impulsu vznikne obalová křivka, která se označuje jako videoimpuls (Obr. 3.15d).

V našem případě byly všechny impulsy zobrazovány na obrazovce digitálního osciloskopu v původním neusměrněném a neodfiltrovaném tvaru.



Obr. 3.15 Zpracování ultrazvukových impulsů [3]

3.14 Impulsní odrazová metoda

Impulsní odrazová metoda měření je nejvíce používaná v ultrazvukové měřicí technice, protože poskytuje největší množství informací. Touto metodou můžeme měřit vzdálenost, útlum, velikost a charakter odrazové plochy nebo rychlost šíření vln. Vzdálenost odrazové plochy lze zjistit podle zpoždění odraženého impulsu (echa), které se vrátí do sondy. Velikost a útlum se zjistí podle výšky odraženého echa. Dále lze podle doby průchodu echa určit rychlost šíření vln a podle tvaru echa lze usuzovat o charakteru odrazové plochy [1].

4 Experimentální část

Experimentální část spočívá v návrhu měřicí metody a příslušných přípravků, samotném měření, zpracování naměřených hodnot a zhodnocení výsledků měření. Hlavním cílem této experimentální části bylo zjištění chování a vlastností ultrazvukových sond při měření vzdálenosti ve vodě. Reálná měření byla provedena jak ve vodě pomocí ultrazvukových sond, tak i ve vzduchu pomocí ultrazvukového měřiče vzdálenosti. Veškerá měření probíhala v laboratoři automatizace na katedře elektrotechniky a automatizace technické fakulty ČZU v Praze.

Samotné měření pomocí ultrazvukových sond ve vodě probíhalo ve dvou částech. První část měření spočívala v odměření charakteristik ultrazvukových sond v malém akváriu s vodou o rozměrech 32×17×24 cm. Ve druhé části probíhala měření ve válci s vodou o délce 50 cm a průměru 10 cm. V obou dvou případech byly sondy ponořeny do vody o pokojové teplotě. Pro měření pomocí ultrazvukových sond byla použita impulsní odrazová metoda měření, kde veškeré impulsy byly zobrazovány v původním neupraveném tvaru na obrazovce digitálního osciloskopu. Na obrazovce digitálního osciloskopu byla na vodorovné ose zobrazována doba průchodu vlny (vzdálenost) a na ose svislé byla vidět výška (velikost) amplitudy impulsů.

Pro naše měření ve vodě byly použity ultrazvukové sondy o frekvencích 1 MHz, 2,5 MHz, 5 MHz (Obr. 4.1), a pro měření ve vzduchu byl použit ultrazvukový měřič vzdálenosti o frekvenci 40 kHz. Sondy o frekvencích 1 MHz a 2,5 MHz jsou sondy určené pro zjišťování vnitřních vad materiálu. Sonda 5 MHz představuje imerzní sondu, která je přímo určená pro diagnostiku ve vodě. Tato sonda byla zapůjčena společností ATG s.r.o. pro naše studijní účely. Všechny tři sondy jsou přímé s elektroakustickým měničem pro podélné vlny.

Ultrazvukový měřič vzdálenosti, který byl použit pro měření vzdálenosti ve vzduchu, představuje kompletní měřicí zařízení (senzor) s vlastními budíci a vyhodnocovacími elektrickými obvody a obrazovkou pro zobrazení výsledku měření, viz (Příloha 9).



Obr. 4.1 Sondy použité při měření (1 MHz, 2,5 MHz, 5 MHz)

4.1 Definice úkolů a problémů měření

Před samotným měřením bylo stěžejní vyřešit několik zásadních překážek. Jako první bylo velmi důležité zajistit vhodné ultrazvukové sondy. Tato fáze byla velice náročná, protože výrobci téměř nenabízí ultrazvukové sondy pro měření ve vodě. Toto bylo vyřešeno úpravou dvou obyčejných sond pro účely defektoskopie o frekvencích 1 MHz a 2,5 MHz a zapůjčením jedné imerzní sondy o frekvenci 5 MHz od společnosti ATG. Úprava obyčejných sond pro defektoskopii spočívala v zalití těsnící hmotou, která tak zabrání jejich poškození.

Pro samotné měření bylo zásadní vyřešit otázku buzení elektroakustických měničů ultrazvukových sond. Pro tento účel byl navržen a vyroben elektrický obvod, který je toto schopen zajistit, viz (4.2.1 Elektrický obvod).

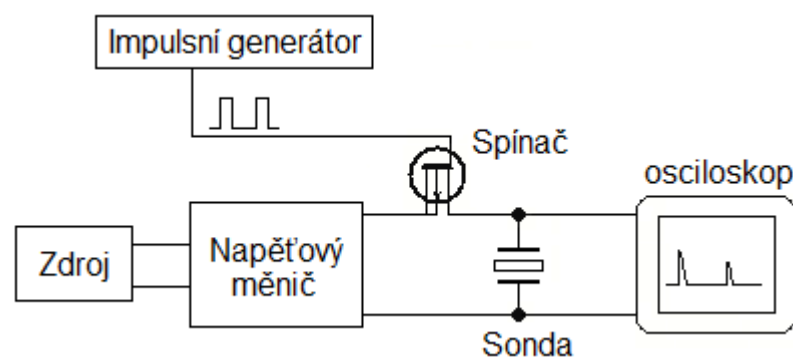
Dále bylo velmi důležité vyřešit otázku uchycení a pojezdu sond ve vodě a to jak při měření v akváriu, tak při měření ve válci. Tento problém, jak se později ukázalo, byl dosti zásadní. Přesnost měření ultrazvukovými sondami, především kvalita a velikost amplitudy odražených ech, je silně závislá na úhlu odklonu sondy. Z tohoto důvodu by měla být odrazová plocha co nejvíce kolmá ke směru šíření vlny. Pro měření v akváriu bylo toto vyřešeno výrobou mechanického pojezdu s možností pevného uchycení sondy a zaaretování v určité pozici, viz (Příloha 8). Pro měření ve válci byl tento problém vyřešen výrobou pevného uchycení sondy na víku válce. Samotná změna vzdálenosti byla realizována pohybem odrazové plochy, která byla uchycena na tenkém silonu, viz (Příloha 9).

4.2 Návrh měřicí metody a příslušných přípravků

Pro měření byla použita impulsní odrazová metoda. Na (Obr. 4.2) je zobrazeno blokové schéma celého obvodu, který byl použit pro měření touto metodou.

Pro toto měření byl navržen napěťový měnič, který je schopen vybudit ultrazvukovou sondu k vyslání ultrazvukového impulsu. Vyslaný ultrazvukový impuls se šíří prostředím, dopadne-li na odrazovou plochu, část vlnění se odrazí a dojde zpět k sondě (echo). Buzení sondy probíhá vybíjecím napětím kondenzátoru o velikosti 110 V. Vybíjení kondenzátoru, který se vybíjí do elektroakustického měniče ultrazvukové sondy, je ovládáno pomocí spínače, který je řízen impulsním generátorem. Na tomto generátoru jsou nastaveny obdélníkové impulsy s dobou trvání nízké úrovně $t_0 = 1,96$ ms a vysoké úrovně $t_1 = 1$ μ s o napětí 5 V. Vysoká úroveň t_1 představuje dobu, po kterou je sepnut spínač, čímž dochází k vybíjení kondenzátoru do elektroakustického měniče sondy a tedy vybudování sondy k vyslání ultrazvukového impulsu. Na základě znalosti dob t_0 a t_1 lze dopočítat frekvenci,

se kterou bylo opakováno měření, tedy vysílání ultrazvukových impulsů. V našem případě bylo vysílání impulsu opakováno s frekvencí přibližně 510 Hz. Podle potřeby je však možné tuto opakovací frekvenci snížit nebo zvýšit. Zvýšení nebo snížení je možné, protože byl použit impulsní generátor s možností plynulé změny doby trvání nízké úrovně t_0 a vysoké úrovně t_1 . Je však potřeba brát v potaz vzdálenost odrazové plochy, aby nedocházelo k vysílání impulsu ještě před přijetím odraženého echa. Dále je důležité počítat s mrtvým časem, kdy měnič dokmitává. Vysílané impulsy a přijímaná echa se zobrazují v původním neupravovaném tvaru na obrazovce digitálního osciloskopu. Napěťový měnič je napájen ze zdroje stejnosměrného napětí o velikosti +12 V.

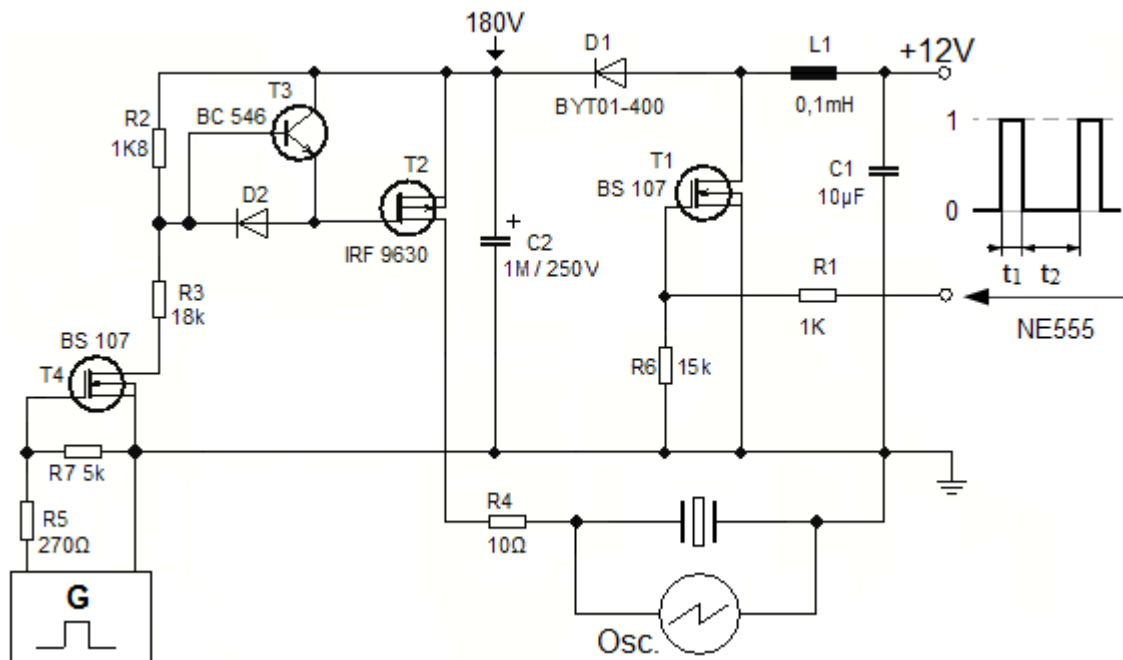


Obr. 4.2 Blokové schéma měření

4.2.1 Elektrický obvod

Elektrický obvod lze rozdělit na část silovou a část řídicí. Část silová představuje napěťový měnič, který je schopen z napájecího napětí +12 V vygenerovat budící napětí o hodnotě až 170 V. Pro samotné buzení elektroakustických měničů sond však bylo použito nižší napětí o velikosti 110 V. Řízení napěťového měniče má na starosti časovač NE555, který je zapojený jako astabilní klopný obvod a chová se jako generátor pravoúhlých impulsů o malé stříždě.

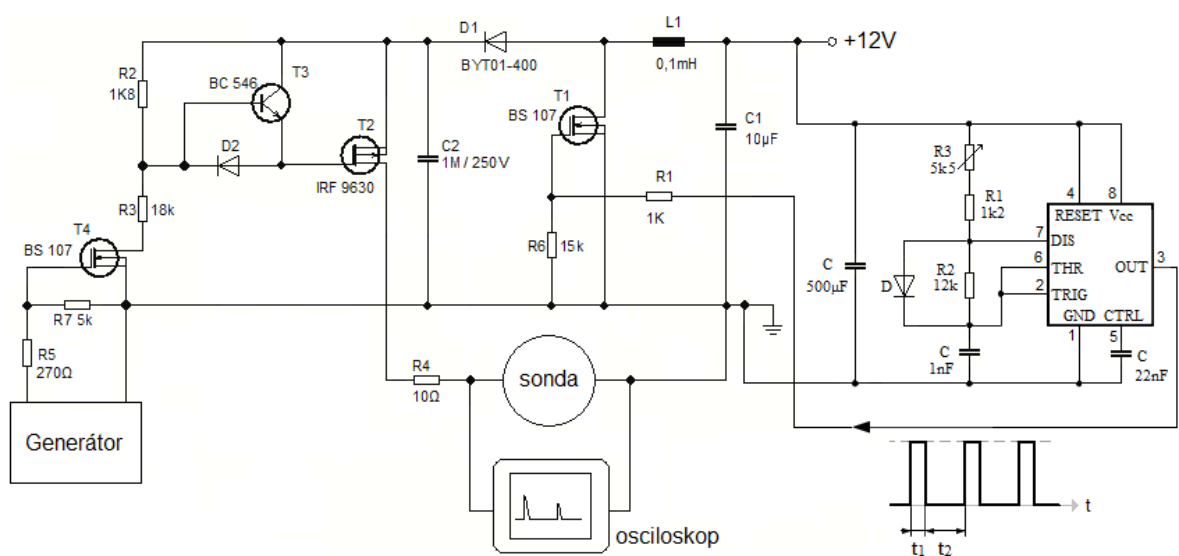
Část řídicí má na starosti řízení měření, tedy vybíjení kondenzátoru do akustického měniče sondy. Tato část je tvořena spínačem (tranzistor IRF 9630), který je ovládán impulsním generátorem. Pro řízení spouštění měření, tedy vybíjení kondenzátoru do elektroakustického měniče sondy, byl použit digitální impulsní generátor s nastavenými impulsy s dobou trvání nízké úrovně $t_0 = 1,96$ ms a vysoké úrovně $t_1 = 1$ μ s o napětí 5 V. Doba trvání vysoké úrovně t_1 představuje dobu, po kterou je sepnut spínač (tranzistor IRF 9630) a během které dochází k vybíjení kondenzátoru do elektroakustického měniče a tedy k vybuzení sondy k vyslání ultrazvukového impulsu, viz (Obr. 4.3).



Obr. 4.3 Schéma elektrického obvodu

4.2.2 Celkové elektrické zapojení měření

Elektrické schéma celého zapojení měření je zobrazeno na (Obr. 4.4). Řízení elektrického měniče je realizováno časovačem NE555. Řízení měření, tedy buzení sondy k vyslání ultrazvukového impulsu je zajištěno digitálním impulzním generátorem typu TR0360/G-008, který ovládá spínač. Zobrazování vysílaných impulsů a přijatých ech zajišťuje digitální osciloskop typu Tektronix TDS 2012B. Napájení napěťového měniče bylo realizováno zdrojem napětí typu DIAMETRAL R124R50 0,9-24V/0-2A.

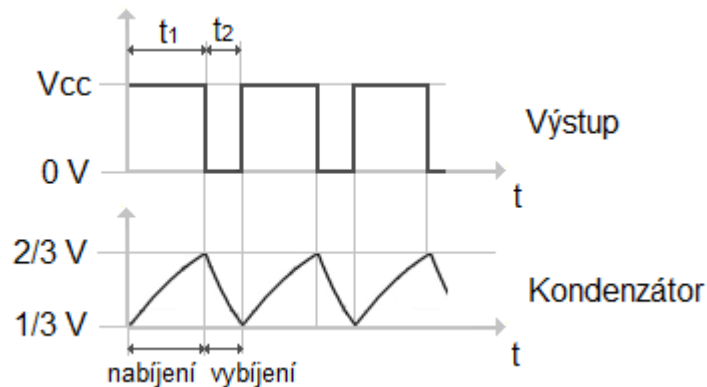


Obr. 4.4 Elektrické schéma celého zapojení měření

4.2.3 Astabilní klopný obvod

Pro řízení napěťového měniče byl použit časovač NE555, který je zapojený jako astabilní klopný obvod (multivibrátor) a chová se jako generátor pravoúhlých impulsů. Zapojení se označuje jako astabilní, protože signál na výstupu nemá ani jeden stabilní stav. Na výstupu multivibrátoru (OUT) se pravidelně střídají napěťové úrovně L a H (low a high).

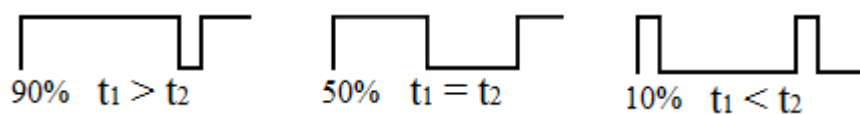
Po zapnutí je výstup ve vysoké úrovni (na úrovni V_{cc}) a přes sériově zapojené rezistory R_1 a R_2 začne být nabíjen kondenzátor C. Dosáhne-li napětí na kondenzátoru $2/3$ napájecího napětí (V_{cc}) dojde k překlopení vnitřního klopného obvodu, výstup se překloupí na nízkou úroveň a kondenzátor se začne vybíjet. Nyní je kondenzátor vybíjen pouze přes rezistor R_2 a pin č.7 a to až do doby, kdy napětí na kondenzátoru klesne pod úroveň $1/3$ napájecího napětí V_{cc} . V tu chvíli dojde opět k překlopení vnitřního klopného obvodu a stejně tak i výstupu zpět do vysoké úrovně a celý cyklus se opakuje, viz (Obr. 4.5) podle [7]. Vnitřní schéma časovače NE555 je znázorněno v (Příloha 3).



Obr. 4.5 Průběhy napětí na astabilním klopném obvodu

Pro naše měření bylo zapotřebí docílit pravoúhlých impulsů o malé střídě. Střída představuje poměr mezi dobou nabíjení t_1 a celkovou dobou periody T . Střída se udává v procentech a označuje se jako D , viz rovnice (16).

$$D = \frac{t_1}{T} = \frac{t_1}{t_1 + t_2} \quad [\%] \quad (16)$$



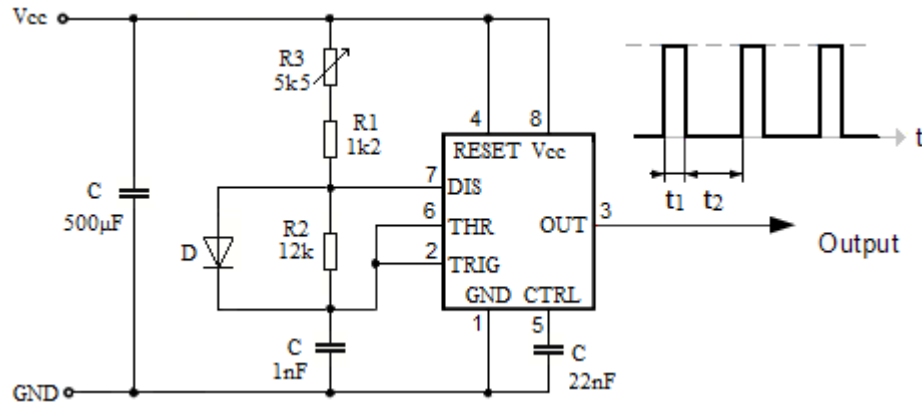
Obr. 4.6 Střída [7]

Standardní zapojení časovače NE555 jako astabilní klopný obvod neumožňuje dosáhnout nízké střídy. Protože nabíjení kondenzátoru C probíhá přes rezistory R_1 a R_2 , je doba nabíjení t_1 delší nebo rovná době vybíjení t_2 , které probíhá pouze přes rezistor R_2 . Z tohoto důvodu je střída výstupního signálu větší nebo rovná 50 % a pro naše účely nejsou tyto impulzy vhodné.

Pro dosažení nízké střídy bylo zapotřebí oddělit cesty, které slouží k nabíjení a vybíjení kondenzátoru C. Tohoto se docílilo zapojením oddělovací diody paralelně k vybíjecímu odporu R_2 . Tím došlo k tomu, že kondenzátor C se nabíjí přes odpor R_1 a diodu D a vybíjí přes odpor R_2 . Dobu nabíjení t_1 , vybíjení t_2 a celkovou periodu T lze pro astabilní klopný obvod s oddělenými cestami popsat vztahy (17) podle [6], [7].

$$t_1 = 0,693 \cdot C \cdot R_1 \quad t_2 = 0,693 \cdot C \cdot R_2 \quad T = t_1 + t_2 \quad (17)$$

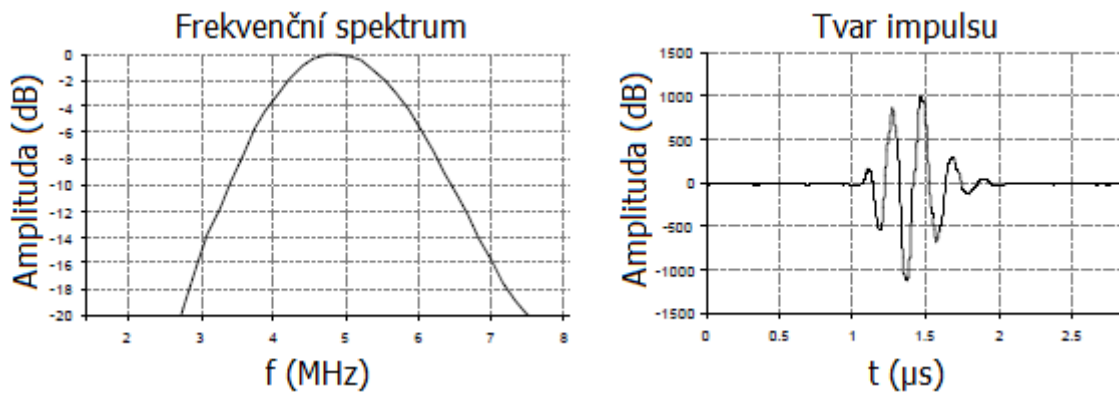
V našem případě byl kromě diody do základního zapojení astabilního klopného obvodu přidán proměnný odpor R_3 , tím vzniknul laditelný generátor, který umožňuje plynule měnit tvar (střídu) výstupních impulzů, viz (Obr. 4.7). Výpočty odporu R_1 a R_2 na základě zvolených hodnot t_1 , t_2 , a C jsou uvedeny v (Příloha 2).



Obr. 4.7 Použité zapojení časovače NE555

4.3 Imerzní sonda Sonotest

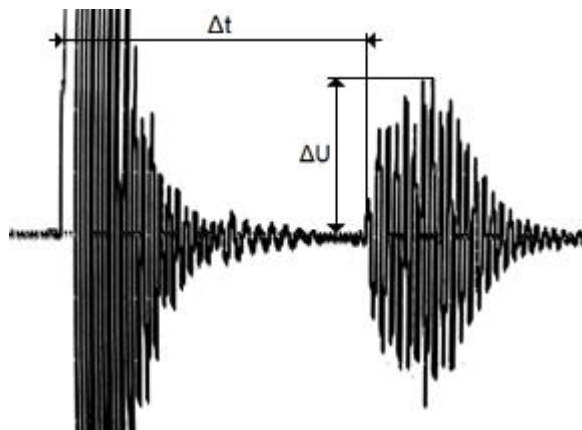
Pro naše studijní účely byla společností ATG s.r.o. zapůjčena ultrazvuková imerzní sonda Sonotest typu SLIM 5-15, která je vytvořená pro účely diagnostiky ve vodě. Jedná se o středně tlumenou sondu o frekvenci 5 MHz, jejíž měnič má průměr 15 mm. Délka blízkého pole této sondy činí 190 mm. Tato ultrazvuková sonda má elektroakustický měnič z metaniobátu olova a je opatřena konektorem UHF, viz (Příloha 8). Frekvenční spektrum a tvar impulsu této imerzní sondy je znázorněn na (Obr. 4.8).



Obr. 4.8 Frekvenční spektrum a tvar impulsu – sonda SLIM 5-15 5 MHz [9]

4.4 Měření pomocí ultrazvukových sond

Při měření byly zjišťovány dvě hodnoty, a to hodnota Δt a hodnota ΔU . Hodnota Δt představuje časový rozdíl mezi vysláním ultrazvukového impulsu a přijetím odraženého echa. Na základě této hodnoty a znalosti rychlosti šíření ultrazvuku ve vodě se dá velmi jednoduchým výpočtem $L = c \cdot \Delta t$ zjistit vzdálenost odrazové plochy od ultrazvukové sondy. Hodnota ΔU představuje výšku (velikost) amplitudy přijatého echa. Na základě srovnání výšky ech v závislosti na vzdálenosti sondy od odrazové plochy lze zjistit útlum ultrazvukových vln. Odečet hodnot Δt probíhal na vodorovné ose obrazovky osciloskopu a odečet hodnot ΔU na svislé ose obrazovky s využitím kurzorové techniky měření na osciloskopu, viz (Obr. 4.9).



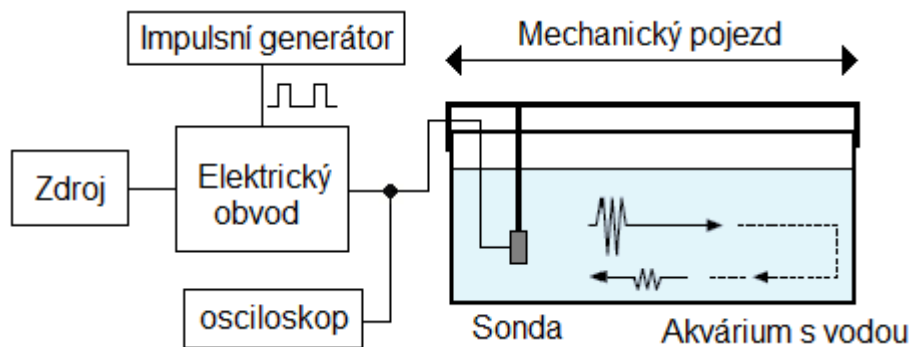
Obr. 4.9 Odečítání hodnot na reálných impulsích

Na (Obr. 4.9) jsou zobrazeny ultrazvukové impulsy, které byly zaznamenány při měření na ultrazvukové sondě o frekvenci 1 MHz. První impuls představuje impuls vyslaný elektroakustickým měničem sondy po jejím vybuzení. Druhý impuls představuje přijaté echo, které se odrazilo od odrazové plochy a došlo zpět k sondě.

4.4.1 Měření v akváriu

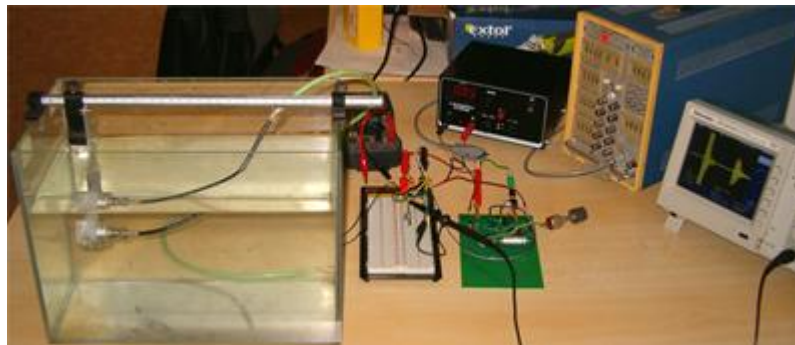
Měření v akváriu bylo prováděno v rozsahu 1 cm až 20 cm, větší rozsah měření nebyl možný z důvodu malých rozměrů akvária. Pomocí mechanického pojezdu bylo prováděno měření v intervalech po 1 cm. Při tomto měření se pohybuje sonda, která je pevně uchycena na mechanickém pojezdu. Ultrazvuková sonda je uchycená na pojezdu tak, aby byl směr šíření vlny co nejvíce kolmý na odrazovou stěnu akvária. Pro zajištění přesného odečtu měřených hodnot je mechanický pojezd vybaven možností pevného zaaretování v určité pozici.

Pro pochopení a názornost měření v akváriu slouží blokové schéma, viz (Obr. 4.10) a skutečná fotografie z měření, viz (Obr. 4.11).



Obr. 4.10 Blokové schéma měření v akváriu

Na (Obr. 4.11) je vidět reálné měření v akváriu. Na obrazovce osciloskopu lze pozorovat vyslaný impuls a odražené echo s časovým rozdílem Δt , který odpovídá vzdálenosti, ve které je umístěná sonda od odrazové stěny akvária.



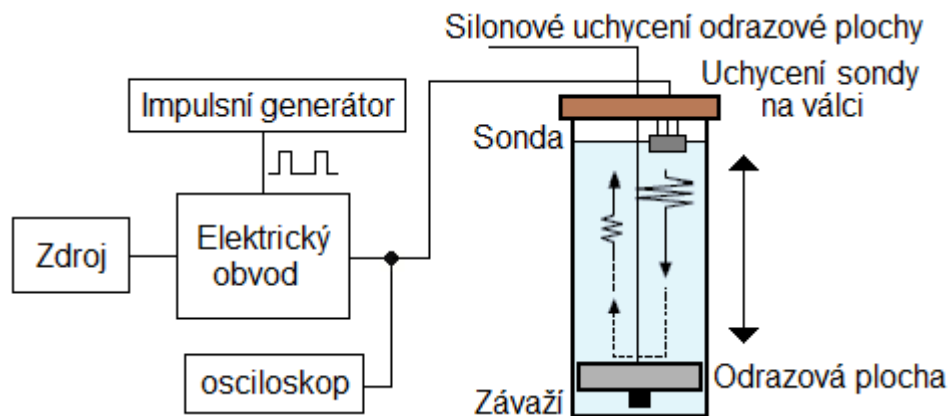
Obr. 4.11 Měření v akváriu

4.4.2 Měření ve válci

Měření ve válci bylo prováděno v rozsahu 2 cm až 33 cm, větší rozsah opět nebyl možný z důvodu malých rozměrů válce a poměrně velkých rozměrů odrazové plochy umístěné ve válci. Stejně jako při měření v akváriu bylo i měření ve válci prováděno v intervalech po 1 cm. Oproti měření v akváriu, kde se pohybuje sonda, je při měření ve válci sonda pevně

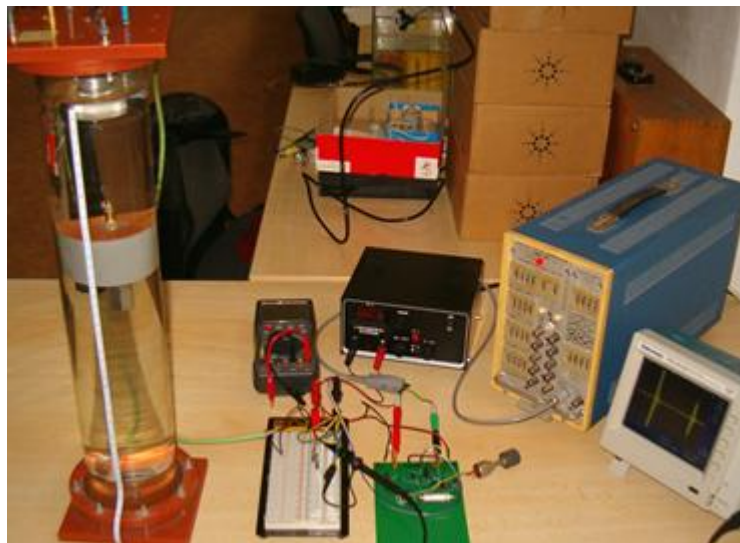
uchycená na víku válce a v pohybu je odrazová plocha. Odrazová plocha je vyrobená z plastu a má tvar válce o průměru, který je o málo menší než vnitřní průměr válce. Protože je odrazová plocha plastová, je zatížena závažím, které je nutné pro ponoření ve vodě. Uchycení odrazové plochy je realizováno na tenkém silonu, aby nedocházelo k ovlivňování vysílaných a přijímaných impulsů. Zaaretování pro přesný odečet měřených hodnot bylo prováděno na víku válce.

Pro pochopení a názornost měření ve válci slouží blokové schéma (Obr. 4.12) a fotografie, která zachycuje skutečné měření (Obr. 4.13).



Obr. 4.12 Blokové schéma měření ve válci

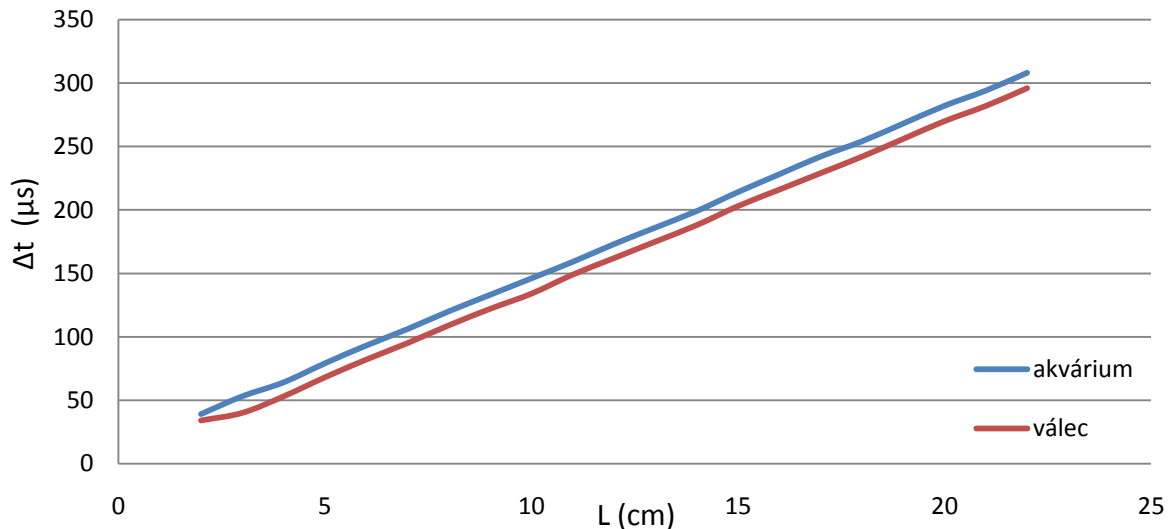
Při této vzdálenosti sondy od odrazové plochy lze na obrazovce osciloskopu pozorovat tento časový rozdíl Δt mezi vysláním impulsu a přijetím echa (Obr. 4.13).



Obr. 4.13 Měření ve válci

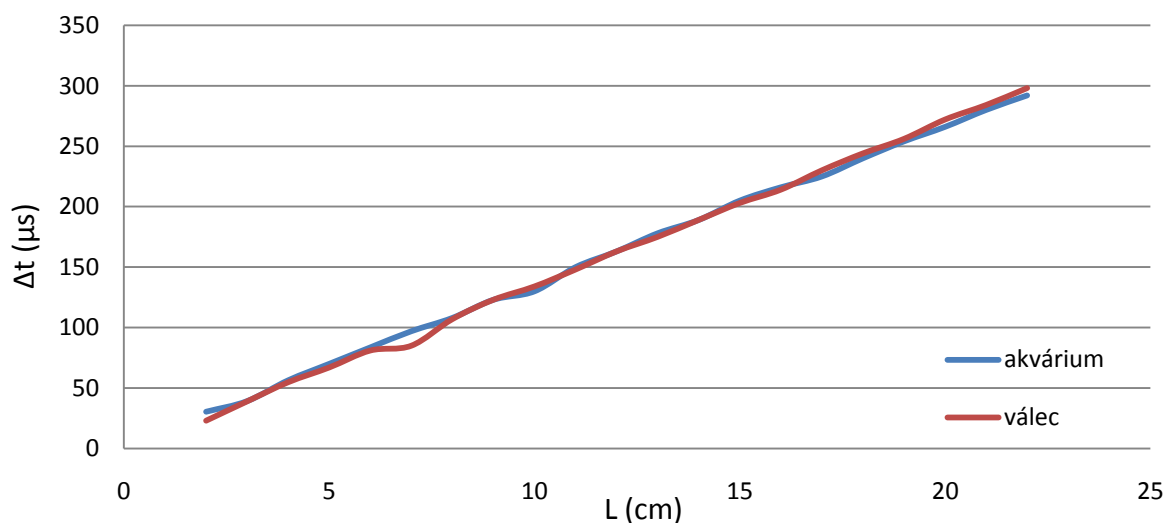
4.5 Zpracování charakteristik – měření vzdálenosti ve vodě

První měření byla provedena sondou o frekvenci 1 MHz. Jedná se o měření vzdálenosti v akváriu a válci s vodou. Výsledky měření jsou zobrazeny na (Graf 1). Na první pohled je patrné, že časové rozdíly Δt mezi vysláním impulsu a přijetím echa jsou v akváriu nepatrně vyšší. Z tohoto poznatku lze předpokládat, že stěny válce mírně ovlivňují rychlost šíření ultrazvuku při měření sondou o frekvenci 1 MHz. Hodnota L představuje vzdálenost ultrazvukové sondy od odrazové plochy.



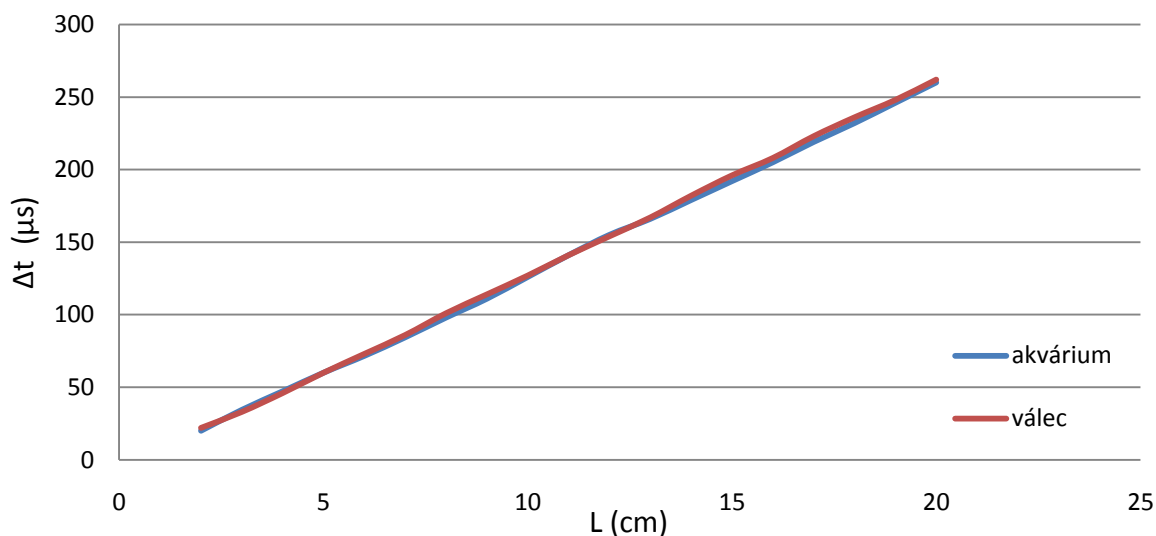
Graf 1 Měření vzdálenosti v akváriu a válci s vodou – sonda 1 MHz.

Na (Graf 2) je zobrazeno stejné měření pouze s jinou sondou o jiné frekvenci, tedy 2,5 MHz. Na grafu je vidět, že hodnoty Δt pro akvárium a válec jsou u sondy o frekvenci 2,5 MHz velmi podobné.



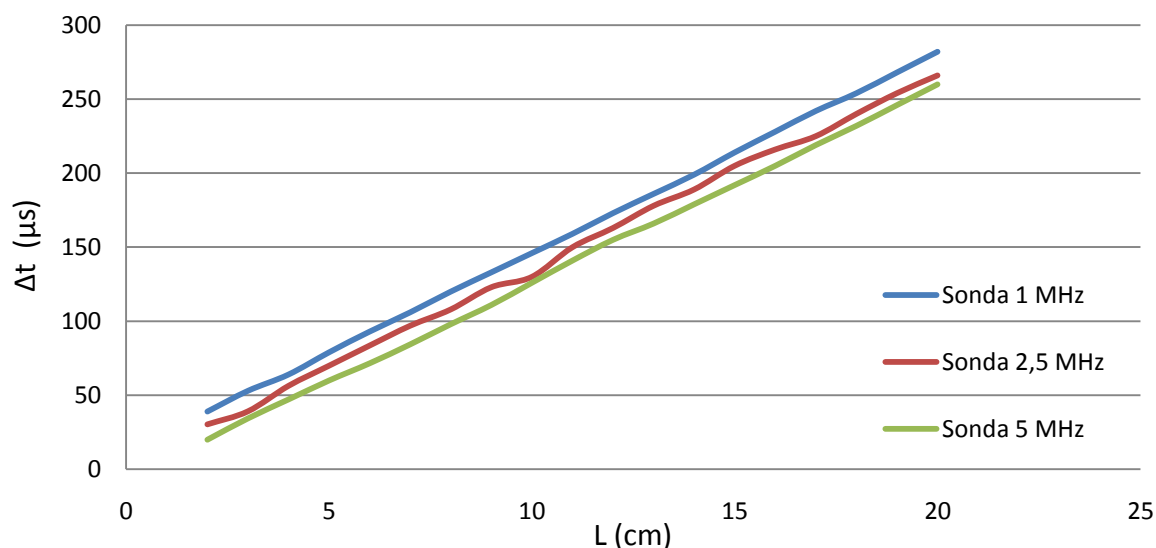
Graf 2 Měření vzdálenosti v akváriu a válci s vodou – sonda 2,5 MHz

Toto měření bylo zopakováno i u třetí zapůjčené sondy o frekvenci 5 MHz. Z (Graf 3) je patrné, že hodnoty Δt pro akvárium a válec jsou téměř totožné.



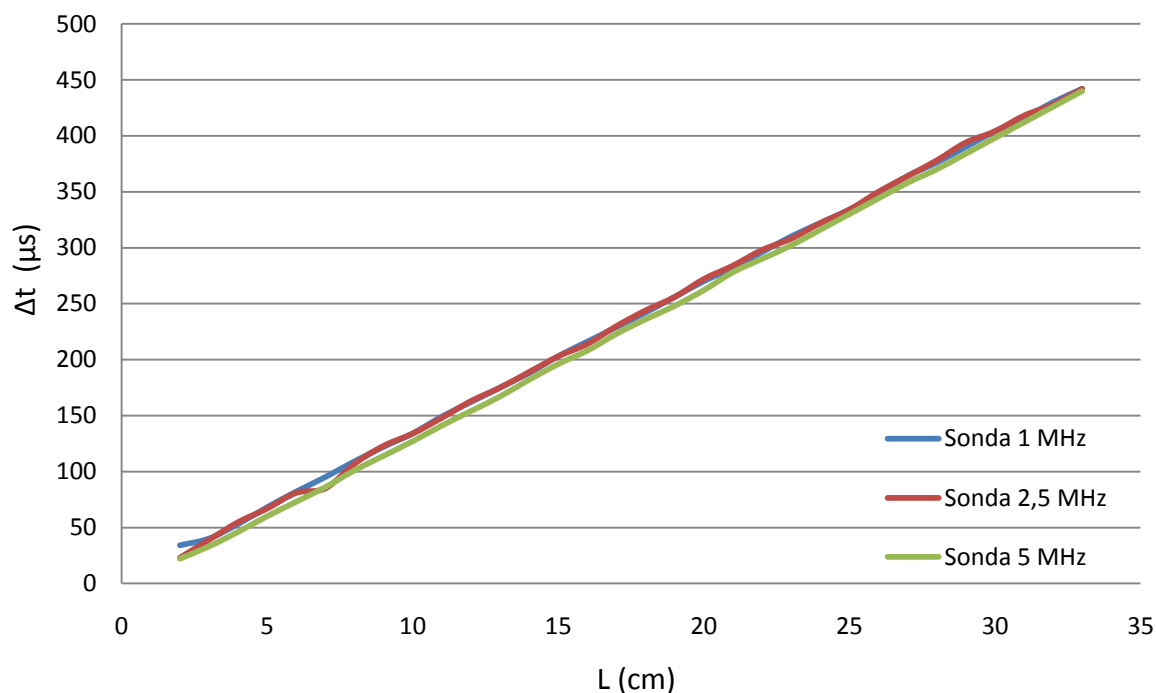
Graf 3 Měření vzdálenosti v akváriu a válci s vodou – sonda 5 MHz

Na (Graf 4) je provedeno srovnání hodnot Δt všech tří sond při měření vzdálenosti v akváriu. Z tohoto grafu je zřejmé, že rychlost šíření vln v akváriu je nejvyšší u ultrazvukových vln vyslaných sondou o frekvenci 5 MHz, kde jsou hodnoty Δt pro jednotlivé vzdálenosti nejnižší.



Graf 4 Srovnání tří sond při měření vzdálenosti v akváriu

Stejné srovnání tří sond bylo provedeno i u měření vzdálenosti ve válci. Z (Graf 5) je patrné, že rozdíly hodnot Δt nejsou tak znatelné jako v případě měření v akváriu.

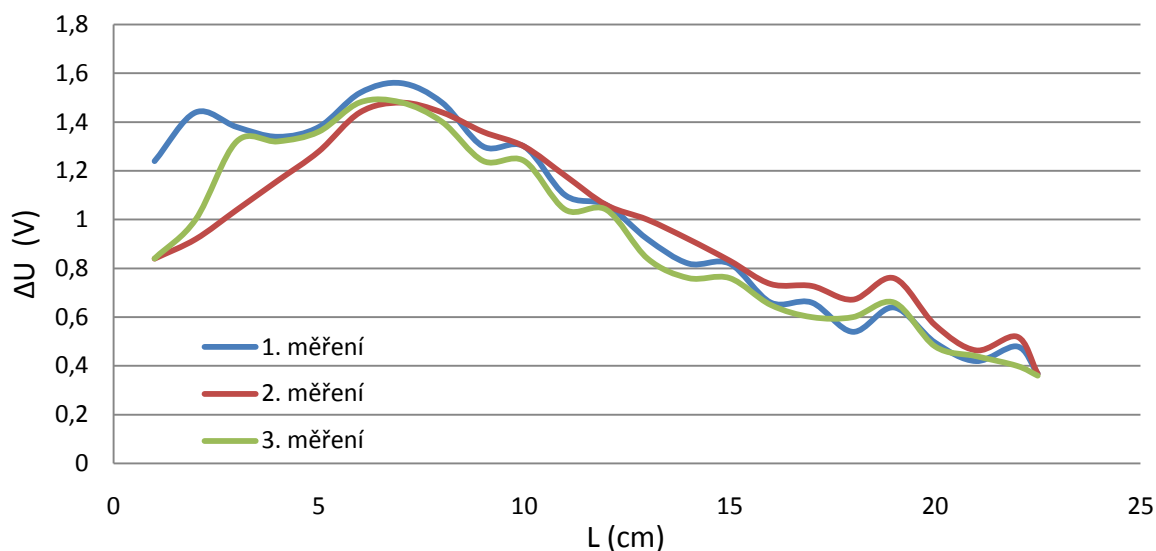


Graf 5 Srovnání tří sond při měření vzdálenosti ve válci

4.6 Zpracování charakteristik – měření útlumu ve vodě

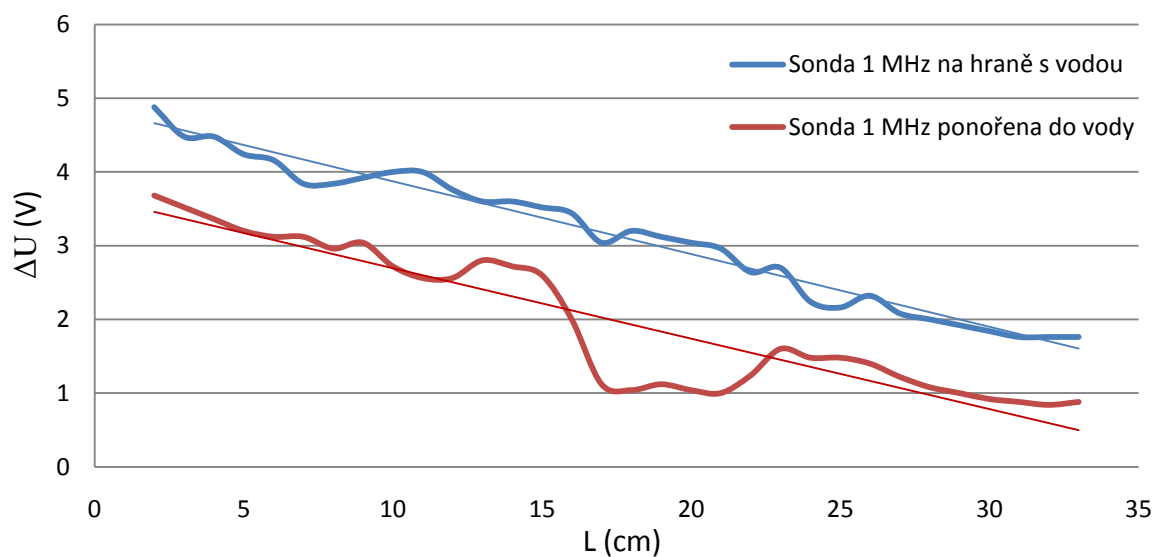
Další část měření spočívala v odměření útlumu ultrazvukových vln ve vodě. První měření bylo provedeno na sondě o frekvenci 1 MHz. Jelikož přesnost měření útlumu velmi silně závisí na přesném umístění sondy vůči odrazové ploše, bylo toto měření provedeno třikrát po sobě pro vyloučení případné chyby, viz (Graf 6).

Z (Graf 6) je patrné, že výška přijímaných ech ΔU s rostoucí vzdáleností postupně roste a to až do hodnoty kolem 7 cm. Po překročení vzdálenosti 7 cm dochází k postupnému klesání výšky ech ΔU . Lze tedy předpokládat, že v okolí 7 cm je oblast fokusace sondy, ve které je největší koncentrace zvuku a sonda je v této oblasti nejcitlivější. Z tohoto důvodu lze ve vzdálenosti cca 7 cm od odrazové plochy naměřit největší možná echa. Na základě znalostí výšky ech ΔU v závislosti na vzdálenosti sondy od odrazové plochy lze určit útlum ultrazvukových vln. Čím menší je výška přijímaných ech, tím větší je útlum ultrazvukových vln.



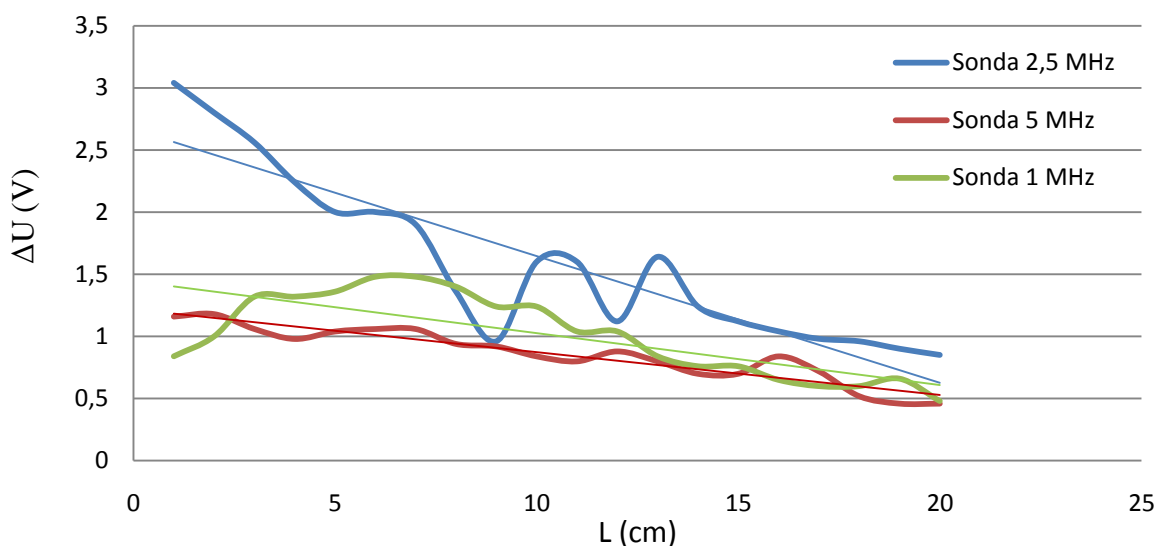
Graf 6 Měření útlumu v akváriu - sonda 1 MHz

Během měření útlumu ve válci s vodou se sondou o frekvenci 1 MHz došlo k zásadnímu poznatku a to, že velikost amplitudy, neboli výška přijímaných ech, velmi silně závisí na rozsahu ponoření sondy ve vodě. Hodnoty ech při plně ponořené sondě a sondě umístěné na hraně s vodou jsou velmi odlišné. Měření bylo zjištěno, že při plně ponořené sondě mají přijímaná echa mnohem menší výšku (velikost amplitudy). V konečném důsledku může být tato informace velmi důležitá a to především při měření větších vzdáleností. Na (Graf 7) je znázorněno srovnání výšky ech při ponořené sondě a sondě umístěné na hraně s vodou.



Graf 7 Měření útlumu ve válci s vodou - sonda 1 MHz

Závěrem bylo provedeno srovnání útlumu ultrazvukových vln všech tří sond při měření v akváriu. Z (Graf 8) je zřejmé, že s rostoucí vzdáleností klesá výška přijímaných ech, a tím tedy roste útlum ultrazvukových vln. Dále je patrné, že největší útlum postihuje ultrazvukové vlny vyslané sondou o frekvenci 2,5 MHz. Vysoké zákmity (výchyly) v grafech jsou dány mírným vychýlením sondy od kolmého směru šíření vlny vůči odrazové ploše. Pro názornost poklesů výšky ech jsou grafy doplněny o lineární spojnice trendu.



Graf 8 Srovnání tří sond při měření útlumu v akváriu

Měření útlumu ultrazvukových vln ve válci pomocí sond o frekvencích 2,5 MHz a 5 MHz nebylo realizováno, protože přijímaná echa měla malou amplitudu, a tak by výsledné měření nemělo požadovanou přesnost.

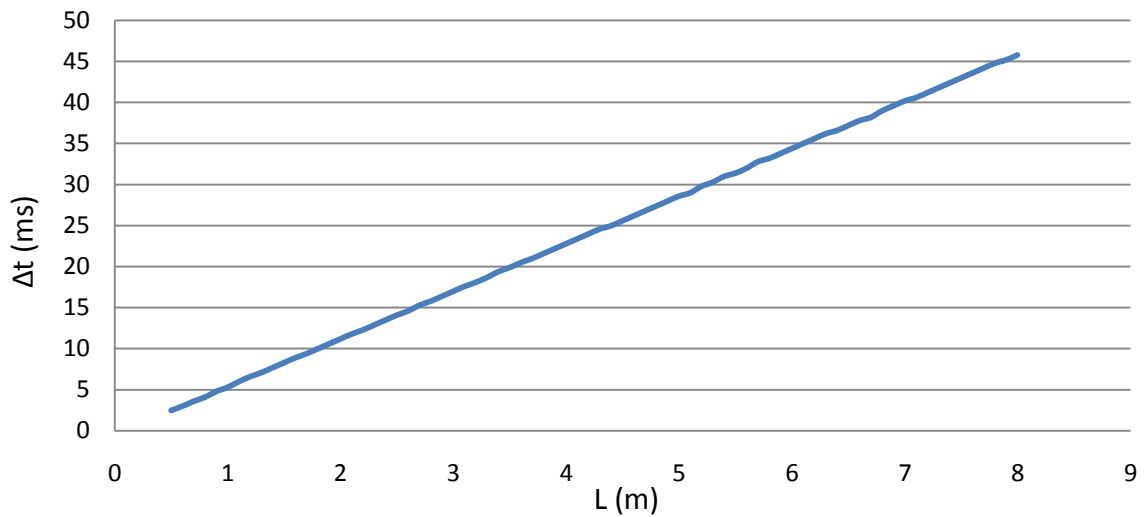
4.7 Zpracování charakteristik – měření vzdálenosti ve vzduchu

Kromě měření ve vodě bylo provedeno i měření ve vzduchu. Důvodem tohoto měření bylo srovnání rychlostí šíření ultrazvukových vln v různých prostředích. Pro měření ve vzduchu byl použit ultrazvukový měřič vzdáleností značky Power Profi typu KH2934 (Příloha 9). Tento přístroj je schopen měřit vzdálenost v rozsahu 0,5 m až 12 m s přesností $\pm 0,5 \%$. Tento ultrazvukový měřič vzdálenosti naměřenou hodnotu zobrazuje přímo na vlastní display.

Měření ve vzduchu pomocí ultrazvukového měřiče vzdálenosti bylo prováděno v rozsahu 0,5 m až 8 m po intervalech 10 cm. Větší rozsah měření nebyl možný kvůli malé amplitudě přijímaných ech. Měření probíhalo tak, že se odečetla vzdálenost L naměřená přímo na přístroji a na osciloskopu byl odečten časový rozdíl mezi vysláním impulsu a přijetím echa Δt . Na základě znalosti vzdálenosti a doby průchodu vlny lze jednoduše dopočítat rychlost

šíření ultrazvukové vlny prostředím. Tento ultrazvukový měřič je napájen z 9 V baterie a frekvence jeho elektroakustického měniče je 40 kHz.

Výsledky měření pomocí ultrazvukového měřiče vzdálenosti jsou zobrazeny na (Graf 9). Stejně jako v případě měření ve vodě, tak i při měření ve vzduchu roste doba Δt přímo úměrně se vzdáleností odrazové plochy. Jako odrazová plocha byla použita dřevěná deska o rozměrech cca 50×50 cm.



Graf 9 Měření vzdálenosti ve vzduchu ultrazvukovým měřičem vzdálenosti

5 Zhodnocení výsledků měření

Nejdůležitějším zjištěním celého měření je, že všechny tři sondy jsou schopny měřit vzdálenost ve vodě a to bez sebemenších problémů. U jednotlivých sond se výsledky měření mírně liší, což je způsobeno hlavně rozdílností sond. Jednotlivé sondy se vzájemně liší především svou frekvencí a velikostí elektroakustického měniče, způsobem tlumení, ale i účelem, pro který byly sondy vytvořeny. Sondy o frekvencích 1 MHz a 2,5 MHz jsou sondy vytvořeny pro účely defektoskopie, tedy pro zkoušení materiálů. Sonda o frekvenci 5 MHz je imerzní sonda, která je přímo vytvořena pro diagnostiku ve vodě.

Velmi důležitým poznatkem celého měření bylo zjištění důležitosti pevného uchycení sond. Pro všechna měření bylo velmi důležité zajistit nepohyblivost a správnou polohu sondy během měření. Každý nepatrný odklon nebo pohyb se sondou při měření způsoboval značné výchylky na obrazovce osciloskopu.

Ze všech měření vzdálenosti je patrné, že doba Δt , která představuje rozdíl mezi vysláním impulsu a přijetím echa, roste přímo úměrně se vzdáleností sondy od odrazové plochy. U sondy s frekvencí 1 MHz jsou doby Δt při měření v akváriu o něco vyšší než při měření ve válci. U sond o frekvencích 2,5 MHz a 5 MHz jsou doby Δt při měření v akváriu a válci téměř totožné. Při měření vzdálenosti v akváriu má ze všech tří sond nejnižší hodnoty Δt pro jednotlivé vzdálenosti imerzní sonda o frekvenci 5 MHz. Lze tedy předpokládat, že rychlost šíření ultrazvuku v akváriu je nejvyšší u sondy o frekvenci 5 MHz. U měření vzdálenosti ve válci se hodnoty Δt pro všechny tři sondy příliš nemění, jako je tomu v případě měření v akváriu.

Při měření útlumu ultrazvukových vln došlo ke zjištění, že s rostoucí vzdáleností sondy od odrazové plochy klesá velikost amplitudy přijímaných ech a tím roste útlum ultrazvukových vln. Během měření útlumu ultrazvukových vln v akváriu bylo zjištěno, že sonda s frekvencí 1 MHz má oblast největší citlivosti ve vzdálenosti 7 cm od odrazové plochy. V této oblasti byla naměřena echa o nejvyšší amplitudě.

Při měření útlumu ve válci sondou 1 MHz došlo k velmi důležitému poznatku. Velikost amplitudy neboli výška přijímaných ech velmi silně závisí na tom, zda je sonda celá ponořená ve vodě, nebo zda je umístěná na hraně s vodou. Je-li sonda umístěná na hraně s vodou, je amplituda přijímaných ech znatelně větší. Toto umístění je tedy pro měřicí účely vhodnější a to především při měření velkých vzdáleností, kde útlum ultrazvukových vln je značný. Při plně ponořené sondě ve vodě pravděpodobně dochází k ještě většímu zatlu-

mení sondy, a proto přijímané impulsy mají viditelně menší amplitudu. Srovnáním jednotlivých útlumů zjištěných při měření v akváriu, bylo zpozorováno, že k největšímu útlumu dochází u impulsů vysílaných sondou o frekvenci 2,5 MHz.

Na závěr byl proveden výpočet skutečných rychlostí šíření ultrazvuku c ve vodě a vzduchu. Na základě znalostí naměřených hodnot Δt a jím odpovídajícím vzdálenostem L lze jednoduše dopočítat rychlost šíření ultrazvukových vln c . Výpočet rychlosti šíření ultrazvuku byl proveden pro několik vybraných hodnot z každého provedeného měření.

Pro rychlost šíření ultrazvuku c ve vodě při pokojové teplotě se udává hodnota kolem $1483 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Měřením a výpočtem byly zjištěny rychlosti šíření ultrazvuku ve vodě, které se pohybují od 1369 do $1587 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, viz (Příloha 7). Pro rychlost šíření ve vzduchu při teplotě $20 \text{ }^\circ\text{C}$ se udává hodnota kolem $343,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Měřením a výpočtem byly zjištěny rychlosti pohybující se od 348 do $361 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Je tedy zřejmé, že skutečně naměřené rychlosti přibližně odpovídají rychlostem teoretickým. Nejvíce se hodnoty teoretických a skutečných rychlostí liší při šíření ultrazvuku v akváriu. Veškeré výchyly ať už při měření ve vodě nebo ve vzduchu jsou pravděpodobně způsobené nepřesností měření a odečtu.

6 Závěr

Cílem této práce bylo seznámení se s principem činnosti a vlastnostmi ultrazvukových senzorů vzdálenosti. Kromě teoretických základů bylo dále potřeba zjistit chování ultrazvukových sond při měření vzdálenosti ve vodě, a zejména zda jsou ultrazvukové sondy vhodné pro měření vzdálenosti ve vodě a to především v různě ohraničených prostředích, jako je válec o malém průměru nebo akvárium o malých rozměrech.

Tuto práci jsem rozdělil na dvě samostatné části. Část první je postavená na teorii, která je nutná pro pochopení principu činnosti ultrazvukových senzorů pro měření vzdálenosti. Při zpracování této teoretické části jsem použil výhradně odbornou literaturu, kterou uvádím v seznamu použité literatury. V části druhé byla prováděna experimentální činnost spočívající v návrhu měřicí metody a příslušných přípravků, v samotném měření a zhodnocení výsledků měření.

Při zpracování této práce byla celkově nejnáročnější část experimentální, a to zejména příprava měření a samotné měření. Příprava spočívala v zajištění ultrazvukových sond, výrobě mechanických měřících přípravků, návrhu a výrobě elektrického obvodu a jeho oživení. Samotné měření bylo již náročné pouze časově kvůli důležitosti pečlivosti a jemného zacházení.

Z provedených měření lze konstatovat, že všechny tři sondy jsou použitelné pro měření vzdálenosti ve vodě a to jak ve válci, tak i v akváriu. Tvar ohraničení prostředí nijak významně neovlivňuje výsledek měření. Při srovnání všech sond lze říci, že pro účely měření vzdálenosti je nejvhodnější sonda vyrobená pro účely defektoskopie o frekvenci 1 MHz. Při měření touto sondou měla přijímaná echa největší amplitudu, a to jak při měření v akváriu, tak při měření ve válci. Naopak imerzní sonda o frekvenci 5 MHz, která je ošetřena proti poškození ve vodě, je pro účely měření vzdálenosti ve vodě nejméně vhodná. Při měření touto sondou měla přijímaná echa malou amplitudu, což při měření větších vzdáleností může být dost zásadní problém. Malá amplituda přijímaných ech u imerzní sondy je pravděpodobně způsobená velkým ztlumením této sondy.

Elektrický obvod, který byl použit pro měření, tedy buzení elektroakustických měničů ultrazvukových sond pracuje bez sebemenších problémů. Pro další měření je však vhodné vyřešit několik nedostatků, jako je zesílení přijímaných ech nebo usměrnění a filtraci všech zobrazovaných impulsů, které nebylo v této práci realizováno. Usměrnění a filtrace

zobrazovaných impulsů může velkou měrou přispět ke zjednodušení a zpřesnění odečítání měřených hodnot.

Díky provedenému měření bylo možné porovnat teoretickou rychlost šíření ultrazvukových vln c v různých prostředích s rychlostí skutečně naměřenou. V našem případě byly skutečně naměřené rychlosti šíření vln velmi podobné rychlostem uváděných v teoretické části této práce.

Významným poznatkem celé této práce bylo zjištění důležitosti měřících přípravků, které zajistí nepohyblivé uchycení sondy v pozici, která je optimální pro měření. Každé minimální vychýlení se mnohonásobně projeví na přesnosti měření.

Závěrem bych chtěl vyzdvihnout několik hlavních předností ultrazvukových senzorů vzdálenosti. Vzhledem k tomu, že ultrazvukové senzory vzdálenosti pracují na principu měření doby mezi vysláním a přijetím impulsu, je jejich hlavní předností možnost detekování všech objektů, které odrážejí zvuk a to bez ohledu na jejich barvu. Dále jsou tyto senzory schopny bezkontaktně měřit vzdálenost průhledných objektů jako je sklo, fólie, plexisklo atd. Mezi další výhody patří schopnost měřit v prašných, znečištěných, vlhkých a tmavých prostředích.

Veškeré poznatky získané v této práci jsou základem pro další činnost a budou použity pro konstrukci ultrazvukového senzoru vzdálenosti pro měření ve vodě.

7 Seznam literatury

- [1] OBRAZ, J.: *Ultrazvuk v měřicí technice*, 1.vydání, Praha, SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1976, 480s, Typové číslo L13-B2-IV-31f/22402
- [2] MARTINEK, R.: *Senzory v průmyslové praxi*, 1.vydání, Praha, BEN - technická literatura, 2004, 200s, ISBN 80-7300-114-4
- [3] OBRAZ, J.: *Zkoušení materiálu ultrazvukem*, 1.vydání, Praha, SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1989, 460s, ISBN 80-03-00097-1
- [4] KREIDL, M., ŠMÍD, R.: *Technická diagnostika*, 1.vydání, Praha, BEN - technická literatura, 2006, 408s, ISBN 80-7300-158-6
- [5] DRASTICH, A.: *Zobrazovací systémy v lékařství*, 1. Vydání, Praha, SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1982, 330s, Číslo publikace 412 - 33336
- [6] HÁJEK, J.: *ČASOVACÍ 555 – praktická zapojení*, dotisk 2. vydání, Praha, BEN - technická literatura, 1999, 127s, ISBN 80-901984-1-4
- [7] NE555 a 556 - Základní zapojení [online]. 17. srpna 2008. Dostupné z: [http://pandatron.cz/?490&555 a 556 - zakladni zapojeni](http://pandatron.cz/?490&555_a_556_-_zakladni_zapojeni)
- [8] Datový list NE555. Dostupné z: <http://www.ges.cz/-ne555n-ges05001852.html>
- [9] Katalog ultrazvukových sond Sonotest: Dostupné z: <http://www.sonatest-plc.com/products/catalogue/transducers/transducers%20catalogue.html>

8 Přílohy

Příloha 1: Úplné elektrické schéma měření

Příloha 2: Výpočet hodnot pro zapojení časovače NE555

Příloha 3: Vnitřní schéma časovače NE555 a význam jednotlivých pinů

Příloha 4: Naměřené hodnoty – akvárium

Příloha 5: Naměřené hodnoty – válec

Příloha 6: Naměřené hodnoty – vzduch

Příloha 7: Vypočtené skutečné rychlosti šíření vln k vybraným hodnotám Δt .

Příloha 8: Fotografie z měření

Příloha 9: Fotografie z měření, směrová charakteristika, UZ měřič vzdálenosti

Seznam grafů

Graf 1 Měření vzdálenosti v akváriu a válci s vodou – sonda 1 MHz.....	27
Graf 2 Měření vzdálenosti v akváriu a válci s vodou – sonda 2,5 MHz.....	27
Graf 3 Měření vzdálenosti v akváriu a válci s vodou – sonda 5 MHz.....	28
Graf 4 Srovnání tří sond při měření vzdálenosti v akváriu.....	28
Graf 5 Srovnání tří sond při měření vzdálenosti ve válci	29
Graf 6 Měření útlumu v akváriu - sonda 1 MHz	30
Graf 7 Měření útlumu ve válci s vodou - sonda 1 MHz	30
Graf 8 Srovnání tří sond při měření útlumu v akváriu.....	31
Graf 9 Měření vzdálenosti ve vzduchu ultrazvukovým měřičem vzdálenosti.....	32

Seznam tabulek

Tab. 3.1 Rychlost šíření c v destilované vodě v závislosti na teplotě Θ od 1 do 100 °C. [1] 7

Tab. 3.2 Rychlost šíření zvuku ve vzduchu v závislosti na teplotě. [2]..... 8

Použité měřicí přístroje

Osciloskop Tektronix TDS 2012B

Digital Pulse Generátor TR0360/G-008

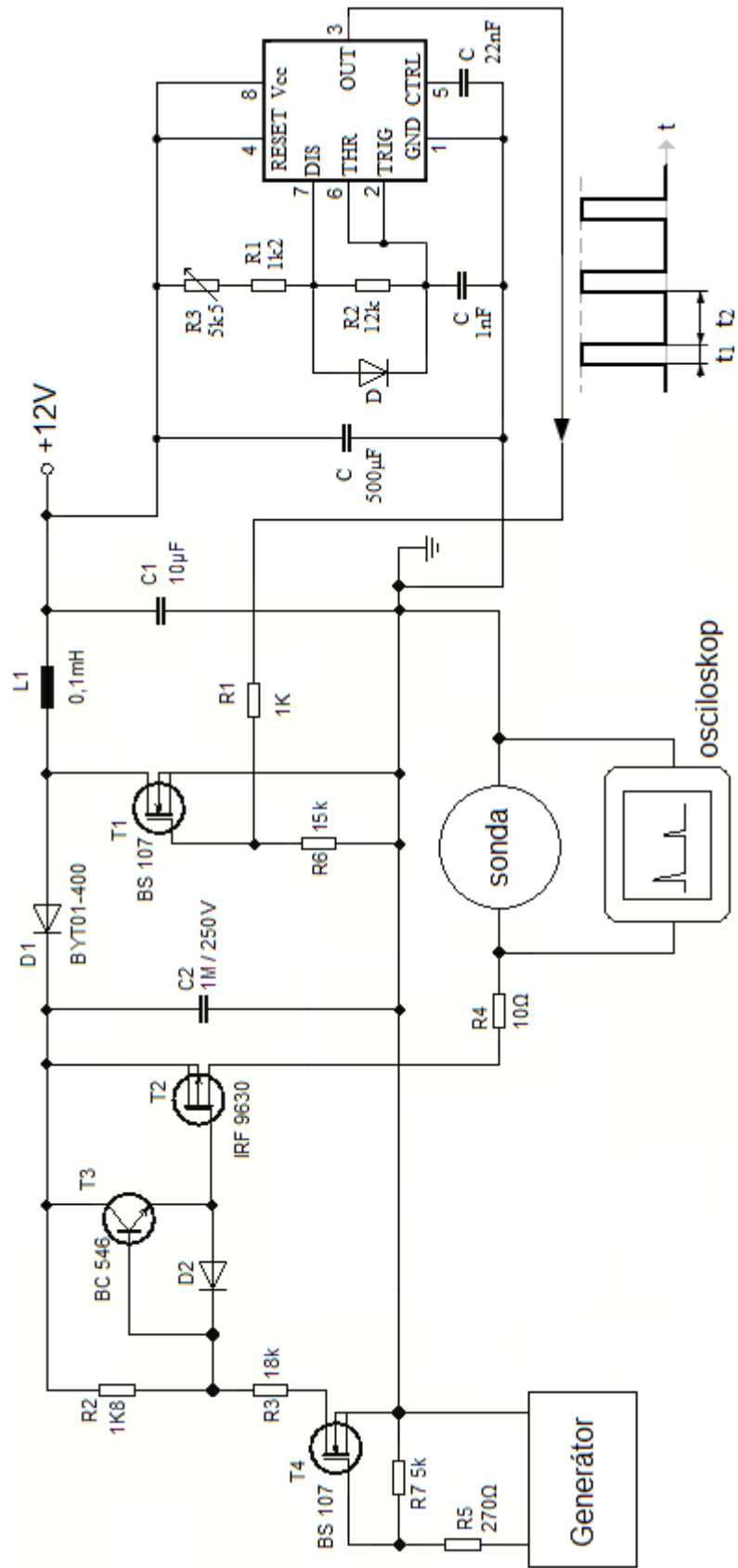
Zdroj napětí DIAMETRAL R124R50E 0,9-24V / 0-2A

Multimetr METEX M-3890D USB

Seznam obrázků

Obr. 3.1 Zvukové spektrum	3
Obr. 3.2 Tvary vlnoploch [3]	4
Obr. 3.3 Průchod ultrazvukové vlny prostředím [2]	5
Obr. 3.4 Kmitání částic prostředí při šíření podélné vlny [4]	6
Obr. 3.5 Vliv teploty a tlaku vzduchu na rychlost šíření. [2]	8
Obr. 3.6 Měření útlumu	10
Obr. 3.7 Kolmý dopad ultrazvukové vlny na rozhraní dvou prostředí [4]	10
Obr. 3.8 Kolmý dopad na rozhraní voda – ocel [4]	11
Obr. 3.9 Šikmý dopad na rozhraní dvou prostředí [2]	12
Obr. 3.10 Jednoměničová přímá sonda [3]	14
Obr. 3.11 Rozdělení zvukového pole sondy [4]	15
Obr. 3.12 Směrové vyzařovací charakteristiky ultrazvukových sond [2], [5]	16
Obr. 3.13 Princip činnosti senzoru vzdálenosti s jednoměničovou sondou [2]	16
Obr. 3.14 Ultrazvukové impulsy [1]	17
Obr. 3.15 Zpracování ultrazvukových impulsů [3]	17
Obr. 4.1 Sondy použité při měření (1 MHz, 2,5 MHz, 5 MHz)	18
Obr. 4.2 Blokové schéma měření	20
Obr. 4.3 Schéma elektrického obvodu	21
Obr. 4.4 Elektrické schéma celého zapojení měření	21
Obr. 4.5 Průběhy napětí na astabilním klopném obvodu	22
Obr. 4.6 Střída [7]	22
Obr. 4.7 Použité zapojení časovače NE555	23
Obr. 4.8 Frekvenční spektrum a tvar impulsu – sonda SLIM 5-15 5 MHz [9]	24
Obr. 4.9 Odečítání hodnot na reálných impulsech	24
Obr. 4.10 Blokové schéma měření v akváriu	25
Obr. 4.11 Měření v akváriu	25
Obr. 4.12 Blokové schéma měření ve válci	26
Obr. 4.13 Měření ve válci	26

Příloha 1: Úplné elektrické schéma měření



Příloha 2: Výpočet hodnot pro zapojení časovače NE555

Zvolené hodnoty:

$t_1 = 5\mu\text{s} = 5 \times 10^{-6}\text{s}$ – doba nabíjení kondenzátoru

$t_2 = 8\mu\text{s} = 8 \times 10^{-6}\text{s}$ – doba vybíjení kondenzátoru

$C = 1\text{nF} = 1 \times 10^{-9}\text{F}$

Potřebné hodnoty:

Celková doba periody

Frekvence

Střída D

Rezistor R_1

Rezistor R_2

Výpočty:

Celková doba periody:

$$T = t_1 + t_2 \quad T = 5 \times 10^{-6}\text{s} + 8 \times 10^{-6}\text{s} = 13 \times 10^{-6}\text{s}$$

Frekvence:

$$f = \frac{1}{T} \quad f = \frac{1}{13 \cdot 10^{-6}} = 76,9\text{kHz}$$

Střída D:

$$D = \frac{t_1}{T} \quad D = \frac{5 \cdot 10^{-6}}{13 \cdot 10^{-6}} = 0,38 = 38\%$$

Rezistor R_1 :

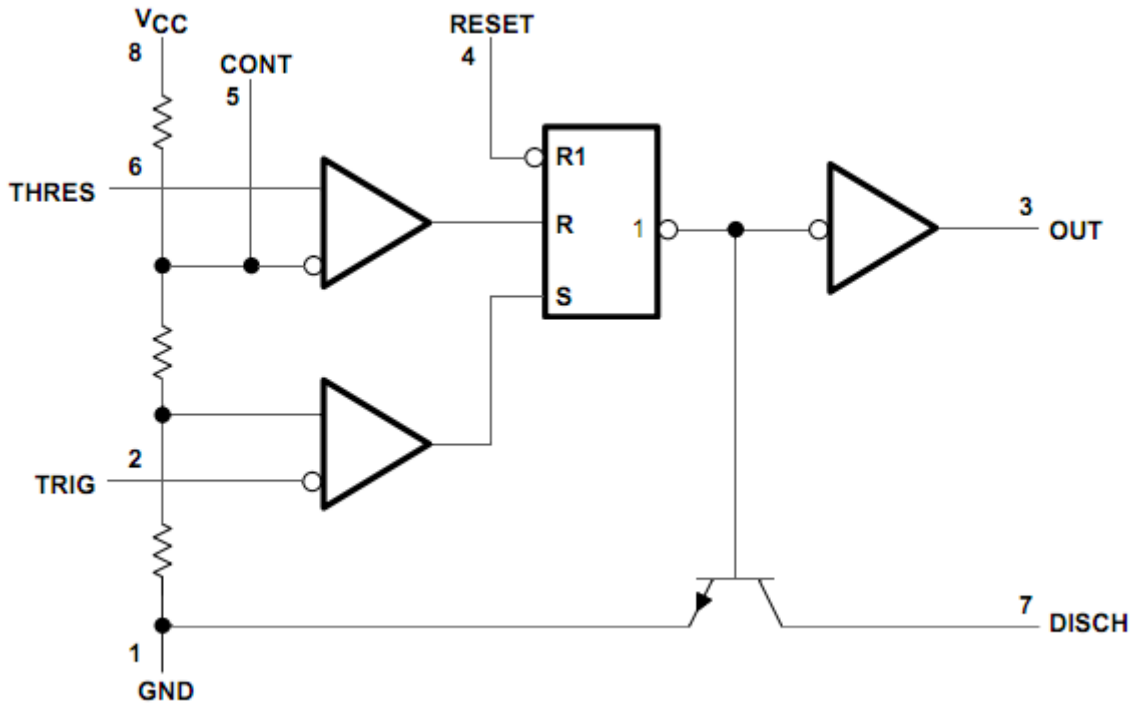
$$t_1 = 0,693 \times R_1 \times C \quad R_1 = \frac{t_1}{0,693 \cdot C} = \frac{5 \cdot 10^{-6}}{0,693 \cdot 1 \cdot 10^{-9}} = 7,2\text{k}\Omega$$

Rezistor R_2 :

$$t_2 = 0,693 \times R_2 \times C \quad R_2 = \frac{t_2}{0,693 \cdot C} = \frac{8 \cdot 10^{-6}}{0,693 \cdot 1 \cdot 10^{-9}} = 11,5\text{k}\Omega$$

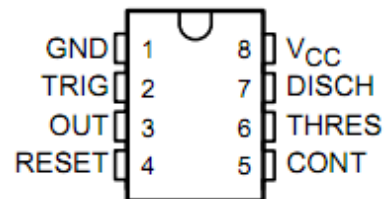
Příloha 3: Vnitřní schéma časovače NE555 a význam jednotlivých pinů

Vnitřní schéma časovače NE555 [9]



Význam jednotlivých pinů časovače NE555 [9]

PIN	Označení	Popis
1	GND	Uzemnění obvodu (ground).
2	TRIG	Spouštění (trigger).
3	OUT	Výstup obvodu (output).
4	RESET	Nulovací vstup.
5	Vcc	Napájecí napětí (4,5 - 15 V)
6	DISCH	Vybíjení (discharge).
7	THRES	Práh (threshold).
8	CONT	Řídící napětí (Control).



Příloha 4: Naměřené hodnoty – akvárium

L (cm)	Měření vzdálenost			Měření útlumu		
	1 MHz	2,5 MHz	5 MHz	1 MHz	2,5 MHz	5 MHz
	Δt (us)	Δt (us)	Δt (us)	ΔU (V)	ΔU (V)	ΔU (V)
1	23	13,8	8,8	0,84	3,04	1,16
2	39	30,4	20	1	2,8	1,18
3	53	39,2	34,4	1,32	2,56	1,06
4	64	56,4	47,2	1,32	2,24	0,98
5	79	70	60	1,36	2	1,04
6	93	83,6	71,6	1,48	2	1,06
7	106	97	84,4	1,48	1,9	1,06
8	120	108	98	1,4	1,36	0,94
9	133	123	111	1,24	0,96	0,92
10	146	130	126	1,24	1,6	0,84
11	159	150	141	1,04	1,6	0,8
12	173	163	155	1,04	1,12	0,88
13	186	178	166	0,84	1,64	0,8
14	199	189	179	0,76	1,24	0,7
15	214	205	192	0,76	1,12	0,7
16	228	216	205	0,65	1,04	0,84
17	242	225	219	0,6	0,98	0,72
18	254	240	232	0,6	0,96	0,52
19	268	254	246	0,66	0,9	0,46
20	282	266	260	0,48	0,85	0,46

Příloha 5: Naměřené hodnoty – válec

L (cm)	Měření vzdálenosti			Útlum - 1 MHz ve válci	
	1 MHz	2,5 MHz	5 MHz	S hranou vody	Ponořená ve vodě
	Δt	Δt	Δt	ΔU	ΔU
2	34	23	22	4,88	3,68
3	40	39	33	4,48	3,52
4	53	54,8	46	4,48	3,36
5	68	67	60	4,24	3,2
6	82	81	73	4,16	3,12
7	95	85	86	3,84	3,12
8	109	107	101	3,84	2,96
9	122	123	114	3,92	3,04
10	134	134	127	4	2,72
11	149	148	141	4	2,56
12	162	163	154	3,76	2,56
13	175	175	167	3,6	2,8
14	188	189	182	3,6	2,72
15	203	203	196	3,52	2,6
16	216	214	208	3,44	2
17	229	230	223	3,04	1,12
18	242	244	236	3,2	1,04
19	256	256	248	3,12	1,12
20	270	272	262	3,04	1,04
21	282	284	278	2,96	1
22	296	298	290	2,64	1,24
23	310	308	302	2,7	1,6
24	322	322	316	2,24	1,48
25	334	334	330	2,16	1,48
26	348	350	344	2,32	1,4
27	364	364	358	2,08	1,22
28	376	378	370	2	1,08
29	390	394	384	1,92	1
30	404	404	398	1,84	0,92
31	416	418	412	1,76	0,88
32	430	428	426	1,76	0,84
33	442	442	440	1,76	0,88

Příloha 6: Naměřené hodnoty – vzduch

Ultrazvukový měřič vzdálenosti – měření ve vzduchu					
L (m)	Δt (ms)	L (m)	Δt (ms)	L (m)	Δt (ms)
0,6	3	3,1	17,6	5,6	32
0,7	3,6	3,2	18,1	5,7	32,8
0,8	4,1	3,3	18,7	5,8	33,2
0,9	4,8	3,4	19,4	5,9	33,8
1	5,3	3,5	19,9	6	34,4
1,1	6	3,6	20,5	6,1	35
1,2	6,6	3,7	21	6,2	35,6
1,3	7,1	3,8	21,6	6,3	36,2
1,4	7,7	3,9	22,2	6,4	36,6
1,5	8,3	4	22,8	6,5	37,2
1,6	8,9	4,1	23,4	6,6	37,8
1,7	9,4	4,2	24	6,7	38,2
1,8	10	4,3	24,6	6,8	39
1,9	10,6	4,4	25	6,9	39,6
2	11,2	4,5	25,6	7	40,2
2,1	11,8	4,6	26,2	7,1	40,6
2,2	12,3	4,7	26,8	7,2	41,2
2,3	12,9	4,8	27,4	7,3	41,8
2,4	13,5	4,9	28	7,4	42,4
2,5	14,1	5	28,6	7,5	43
2,6	14,6	5,1	29	7,6	43,6
2,7	15,3	5,2	29,8	7,7	44,2
2,8	15,8	5,3	30,3	7,8	44,8
2,9	16,4	5,4	31	7,9	45,2
3	17	5,5	31,4	8	45,8

Příloha 7: Vypočtené skutečné rychlosti šíření vln k vybraným hodnotám Δt .

Měření ve válci s vodou						
	1 MHz		2,5 MHz		5 MHz	
L (cm)	Δt (us)	c ($m \cdot s^{-1}$)	Δt (us)	c ($m \cdot s^{-1}$)	Δt (us)	c ($m \cdot s^{-1}$)
20cm	134	1492	134	1492	127	1574
30cm	203	1477	203	1477	196	1554
40cm	270	1481	272	1470	262	1526

Měření v akváriu s vodou						
	1 MHz		2,5 MHz		5 MHz	
L (cm)	Δt (us)	c ($m \cdot s^{-1}$)	Δt (us)	c ($m \cdot s^{-1}$)	Δt (us)	c ($m \cdot s^{-1}$)
20	146	1369	130	1538	126	1587
30	214	1401	205	1463	192	1562
40	282	1418	266	1503	260	1538

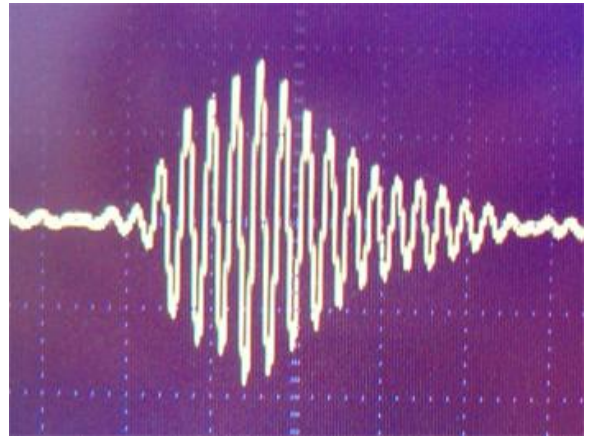
Měření ve vzduchu pomocí měřiče vzdálenosti					
L (m)	Δt (ms)	c ($m \cdot s^{-1}$)	L (m)	Δt (ms)	c ($m \cdot s^{-1}$)
3	8,3	361	8	22,8	350
4	11,2	357	10	28,6	349
6	17	352	12	34,4	349

Příloha 8: Fotografie z měření

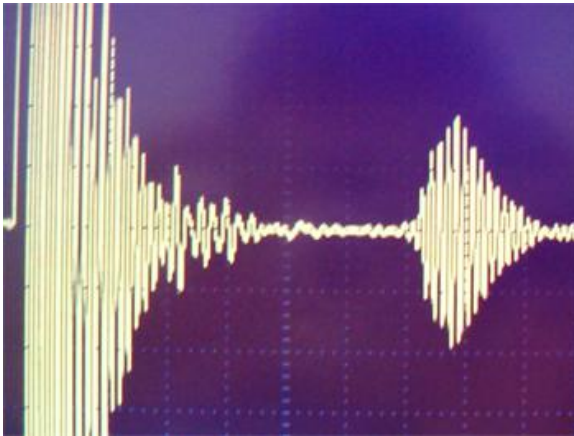
Vyslaný impuls



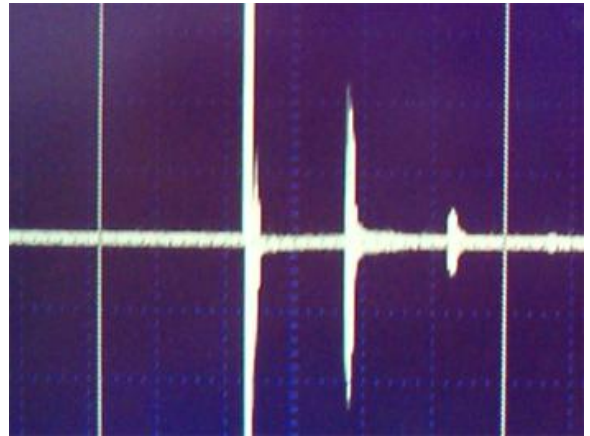
Přijaté echo



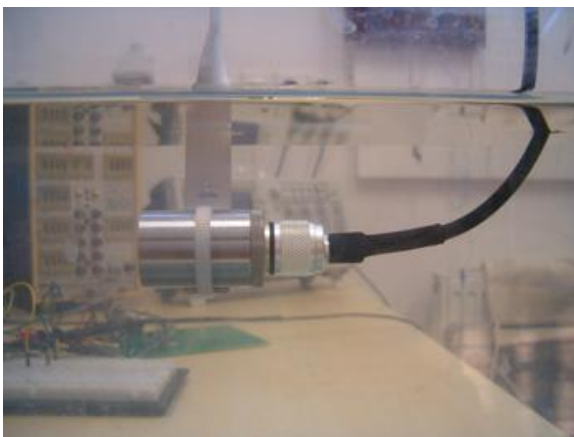
Vyslaný impuls a přijaté echo



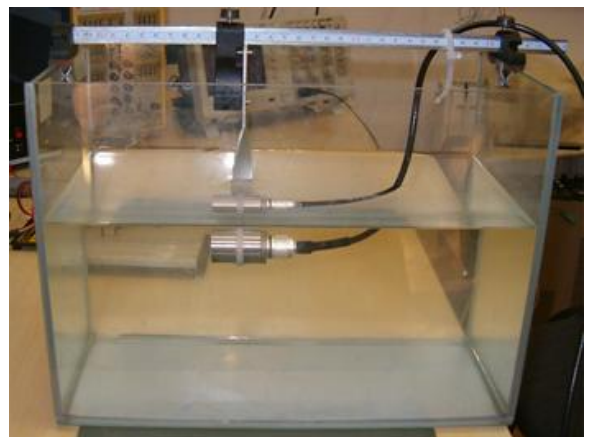
Vyslaný impuls, měřené echo, parazitní echo



Imerzní sonda ve vodě

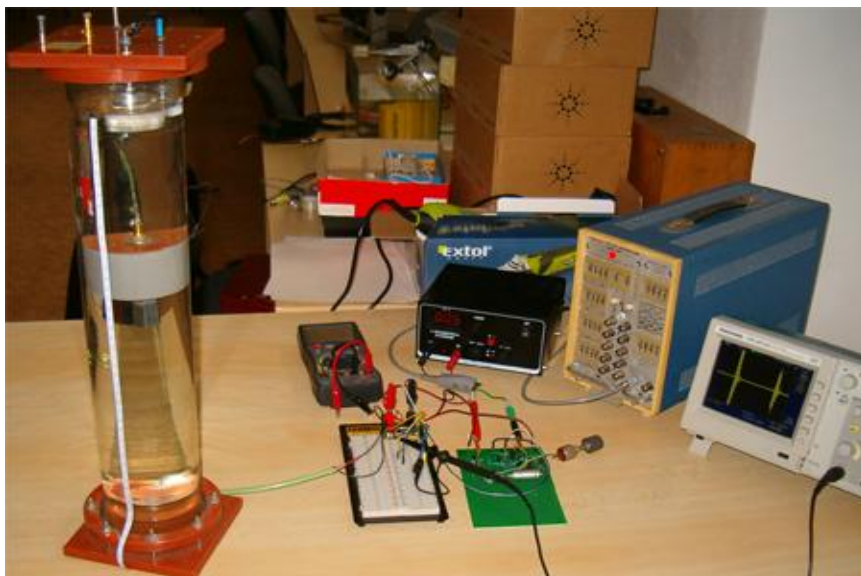


Mechanický pojezd se sondou



Příloha 9: Fotografie z měření, směrová charakteristika, UZ měřič vzdálenosti

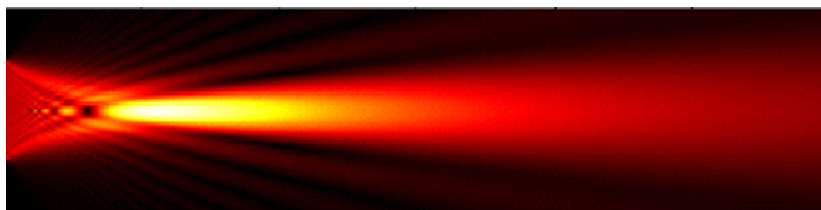
Měření ve válci



Uchycení sondy



Skutečná směrová vyzářovací charakteristika ultrazvukové sondy [10]



UZ měřič vzdálenosti

