

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Ultrazvuk a jeho využití

Bakalářská práce

Vedoucí bakalářské práce: Volodymyr Ryzhenko, Ph.D

Autor práce: Jan Stuchlý

PRAHA 2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jan Stuchlý

Informační a řídicí technika v agropotravinářském komplexu

Název práce

Ultrazvuk a jeho využití

Název anglicky

Ultrasound and its application

Cíle práce

Z dostupných zdrojů popsat fyzikální vlastnosti ultrazvuku, způsoby jeho generování a současný stav jeho praktického využití.

Metodika

1. Na základě studia dostupných materiálů zpracujte přehledovou studii o ultrazvuku, způsobech jeho generování a jeho praktickém využití.
2. Analyzujte problematiku současného stavu použití ultrazvuku.
3. Citujte veškerou použitou literaturu, včetně webových stránek.

Doporučený rozsah práce

30 – 40 stran

Klíčová slova

mechanické vlnění, piezoelektrický jev, sonografie, echolokace

Doporučené zdroje informací

Čech, E. a kol.: Ultrazvuk v lékařské diagnostice a terapii, Avicenum, Praha, 1982, 431 s.

Eliáš, P., Žižka, J.: Dopplerovská ultrasonografie. 1. vyd., Nukleus HK, Hradec Králové, 1998, 252 s.

Haliidday, D., Resnick, R. – Walker, J.: Fyzika, část 2, VUT v Brně, VUTIUM, 2000

Hrazdira, I. a kol.: Úvod do ultrazvukové diagnostiky. 1. vyd., Brno: Masarykova univerzita, 1993, 101 s.

<http://cs.wikipedia.org/wiki/Ultrazvuk>

Petržílka V., Slavík J., Šolc I., Taraba O., Tichý J., Zelenka J.: Piezoelektrina a její technické použití, NČAV, Praha, 1960.

Předběžný termín obhajoby

2016/17 LS – TF

Vedoucí práce

Volodymyr Ryzhenko, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra elektrotechniky a automatizace

Elektronicky schváleno dne 12. 1. 2016

prof. Ing. Jaromír Volf, DrSc.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 2. 3. 2016

prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

Děkan

V Praze dne 18. 03. 2017

Čestné prohlášení

„Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Ultrazvuk a jeho využití“ vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Jsem si vědom, že moje bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí.

Jsem si vědom, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.“

V Praze dne 31.3.2017

.....

Jan Stuchlý

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat za odbornou pomoc a vedení panu V. Ryzhenkovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky a jeho čas při psaní bakalářské práce.

Abstrakt: Cílem této bakalářské práce bylo popsání fyzikálních vlastností ultrazvuku, způsobech jeho generování a jeho současném stavu praktického využití z dostupných zdrojů. V práci je zmíněná stručně historie vývoje, následují fyzikální vlastnosti, možnosti generování a využití. Na závěr jsou uvedeny výhody a nevýhody ultrazvukových senzorů a možné způsoby jejich náhrady v nevhodných podmínkách.

Klíčová slova: mechanické vlnění, piezoelektrický jev, sonografie, echolokace

Ultrasound and its application

Summary: The aim of this Bachelor thesis was to describe physical properties of ultrasound, ways of its generation and its practical use using available resources. The paper briefly covers history of development, describes ultrasound physical properties, its generation and use. At the end the paper summarises the advantages and disadvantages of ultrasonic sensors and states possible ways of their replacement in unfavourable conditions.

Key words: mechanical waves, piezoelectric effect, sonography, echolocation

Obsah

1	Úvod	1
2	Cíl práce	2
3	Metodika práce	3
4	Ultrazvuk	4
4.1	Historie	4
4.1.1	Historie v technice	4
4.1.2	Historie v lékařství	5
4.2	Fyzikální vlastnosti	5
4.2.1	Akustický tlak	6
4.2.2	Ultrazvukový impuls	7
4.2.3	Intenzita ultrazvukového vlnění	7
4.2.4	Způsoby šíření ultrazvukových vln	7
4.3	Druhy ultrazvukových vln	7
4.3.1	Podélné vlny (L – longitudinální)	8
4.3.2	Příčné vlny (T – transverzální)	8
4.3.3	Povrchové vlny (R – Rayleighovy)	8
4.3.4	Deskové vlny (D – Lambovy)	9
4.3.5	Loveovy vlny	9
4.4	Rychlost šíření ultrazvukové vlny	10
4.4.1	Tuhé látky	10
4.4.2	Kapaliny	10
4.4.3	Plyny	10
4.5	Odraz a lom	10
4.5.1	Kolmý dopad na rozhraní	10
4.5.2	Šikmý dopad na rozhraní	11
4.6	Útlum	12
4.7	Vyzařovací směrová a snímací charakteristika	12
4.7.1	Směrová vyzařovací charakteristika	12
4.7.2	Snímací charakteristika	13
4.8	Dopplerův jev	13
4.9	Zdroje ultrazvukových vln	14
4.9.1	Piezoelektrické měniče	14
4.9.2	Magnetostrikční měniče	15

4.9.3	Elektrodynamické měniče	15
4.9.4	Elektrostatické měniče	15
4.9.5	Termomechanické měniče	16
4.9.6	Optické měniče.....	16
5	Praktické využití ultrazvuku.....	17
5.1	Sondy.....	17
5.1.1	Dělení sond dle kontaktu s materiálem	17
5.1.2	Dělení sond dle vysílaného typu vln.....	17
5.1.3	Dělení sond dle počtu měničů.....	18
5.1.4	Dělení sond dle uspořádání měničů.....	18
5.1.5	Zobrazení impulsů	19
5.2	Lékařské využití	19
5.2.1	Sonografie	19
5.3	Technická využití – Ultrazvukové senzory.....	21
5.3.1	Parametry senzorů	21
5.3.2	Ultrazvukové senzory pro měření vzdálenosti.....	22
5.3.3	Ultrazvukové měření výšky hladiny kapalin a pevných látek.....	24
5.3.4	Ultrazvukový senzor pro snímání průtoku	24
5.3.5	Ultrazvukový snímač pro detekci bublin v hadičce malého průměru.....	26
5.3.6	Ultrazvukový snímač pro detekci tenkých listů papíru	27
5.3.7	Ultrazvukové motory.....	28
5.3.8	Čištění ultrazvukem.....	29
5.3.9	Svařování ultrazvukem	29
5.3.10	Defektoskopie – Metody zkoušení.....	30
5.3.11	Ultrazvukové senzory na rozprašovacích tryskách.....	32
6	Výhody a nevýhody ultrazvukových senzorů	33
7	Závěr.....	35
8	Seznam použitých zdrojů	36
9	Seznam obrázků	39

1 Úvod

Za ultrazvuk považujeme mechanické vlnění s frekvencí, jenž je za hranicí lidské slyšitelnosti. Ultrazvuk se uplatňuje v podstatě ve všech přírodních vědách a také zasahuje do mnoha odvětví techniky. Ultrazvuk se rozděluje na aktivní a pasivní dle jeho účinku. Aktivní ultrazvuk pracuje s velkými intenzitami za účelem dosažení fyzikálních a chemických účinků, používá se pro svařování, ve výrobě emulzí, zjemňování struktury zrna odlitků, obrábění, čištění. Pasivní ultrazvuk naopak pracuje s malými intenzitami, které jsou vhodné pro měřicí a diagnostické účely. Stal se tedy důležitým prostředkem v měřicí technice. Využívá se například při nedestruktivních zkouškách materiálu, kde dovoluje pozorovat růst trhlin a odhadovat životnost namáhaných částí. Dále se pasivní ultrazvuk používá při měření tloušťek, měření výšek hladiny a průtoku kapalin. Ultrazvuku se využívá také v lékařském odvětví zejména v diagnostice např. v neurologii, gynekologii atd.

Z počátku se jej využívalo pouze k odhalování vad výrobků a komunikaci ponorek pomocí sonaru. V 50. letech 20. století se jej začalo využívat i v lékařství a od té doby se jeho použití výrazně rozšířilo a nachází uplatnění v mnoha odvětvích.

Tato bakalářská práce je rozdělena na teoretickou část, kde jsou popsány základní vlastnosti ultrazvuku, jako je jeho rychlost šíření, způsob šíření, fyzikální vlastnosti, zdroje a typy ultrazvukových vln. Další část této práce se zaměřuje na využití ultrazvuku zejména v průmyslu a zdravotnictví v posledních letech. Hlavní náplní této části je využití ultrazvukových senzorů, kde jsou popsány základní informace a příklady použití. Jedná se tak například o měření vzdálenosti nebo detekci miniaturních bublin v hadičce aj.

2 Cíl práce

Cílem této práce na téma „Ultrazvuk a jeho využití“ je popsání fyzikálních vlastností a praktického využití ultrazvuku v různých odvětvích v průběhu posledních dvou desetiletí. Práce má seznámit se způsoby generování a rychlostí šíření ultrazvukových vln pro různé prostředí, jež zahrnuje i podmínky pro jejich odraz a útlum.

Dalším cílem je vysvětlení principů jednotlivých praktických využití, například měření vzdálenosti pomocí ultrazvukového senzoru. Nedílnou součástí je popis ultrazvukových sond a metody zobrazení ultrazvukových vln.

Posledním cílem práce je analýza výhod a nevýhod ultrazvukových senzorů, ze kterých je patrné, pro jaké účely jsou vhodné a pro které nikoliv.

3 Metodika práce

Teoretické informace celé bakalářské práce byly získány především z české odborné literatury a internetových článků. Veškerá citovaná a použitá literatura včetně webových stránek, která byla použita při psaní této práce, je uvedena v seznamu literatury.

Ze studia dostupných informací byla popsána fyzikální podstata ultrazvukového vlnění, která byla především čerpána z odborných knih. Samotné využití ultrazvuku v různých odvětvích průmyslu poslední doby bylo čerpáno především z internetových článků, a to z těch, které byly vydané za posledních 15 let. Výsledkem této práce je určení silných a slabých stránek ultrazvukových senzorů.

4 Ultrazvuk

4.1 Historie

Koncem 18. století při studiu letu netopýrů zpozoroval italský biolog Spallanzani, že se zcela bezpečně vyhýbají ve tmě nejrůznějším překážkám. A že tento jev nesouvisí se zrakovými vjemy, ale lidským uchem neslyšitelnými zvukovými vibracemi, které netopýři za letu vydávají. V roce 1847 byl objev magnetrostrikce, umožňující vytváření ultrazvuku do frekvence 200 kHz. [1]

Významným přínosem se stal objev bratrů Jacques a Pierre Curie v roce 1880 piezoelektrického jevu, kdy volný elektrický náboj vzniká při tlakové deformaci na povrchu určitých krystalů. O rok později přišli se zjištěním nepřímého piezoelektrického jevu, který představuje opačný proces, kdy se krystal roztahuje a smršťuje, a to v důsledku střídavého přivádění negativního a pozitivního elektrického náboje na povrch krystalu. Tento objev umožňoval generovat ultrazvukové vlnění ve vyšších frekvencích, než dokázala magnetrostrikce. [1]

4.1.1 Historie v technice

Ultrazvukového vlnění se začalo využívat pro lodní dopravu za účelem registrace ponořených částí ledovce. Toto vlnění bylo z lodi vysíláno horizontálně ve směru plavby. Během první světové války se pomocí ultrazvukových detektorů vyhledávaly ponorky a miny, toto zařízení se nazývalo ASDIC (Anti Submarine Detection and Investigation Committee) a jeho principu se využívalo při konstrukci hloubkoměrů. V období druhé světové války se používalo značně vylepšeného systému pro vyhledávání podmořských plavidel a objektů nazývaného SONAR (Sound Navigation and Ranging). [1]

V roce 1929 se staly objevy vědce Sokolova základem ultrazvukové průmyslové defektoskopie využívající pasivního ultrazvuku. Tato přístrojová technika používající nízkých intenzit se postupem času zlepšovala, což umožnilo rychlý vývoj průmyslového kontrolního odvětví. [1]

Další rozvoj byl ovlivněn Jaffeho objevem, když v roce 1955 vyvinul syntetický materiál. Tyto materiály zcela překonaly a nahradily svými vlastnostmi přírodní krystaly a začala výroba citlivých a výkonných měničů ultrazvukového vlnění. Ultrazvuková měřicí technika se následně rozšířila do mnoha dalších technických odvětví a doposud se rozvíjí. [1]

4.1.2 Historie v lékařství

Zcela odlišně a nezávisle se vyvíjela ultrazvuková diagnostika, jejíž vývoj byl náročnější a delší vzhledem ke složitosti konstrukci diagnostických přístrojů a k rozvoji vhodných registračních a zobrazovacích metod. [1; 2]

Významným přínosem pro diagnostiku byla impulsní odrazová metoda. Ze začátku, (hovoříme o roce 1940) se jednalo o jednorozměrný obraz A. V roce 1950 zveřejnil Ludwig práci, zabývající se rychlostí průchodu ultrazvuku různými lidskými tkáněmi, což vedlo k pozdějšímu prokázání ultrazvukové diferenciaci odlišných tkání, a to i nádorových. [1; 2]

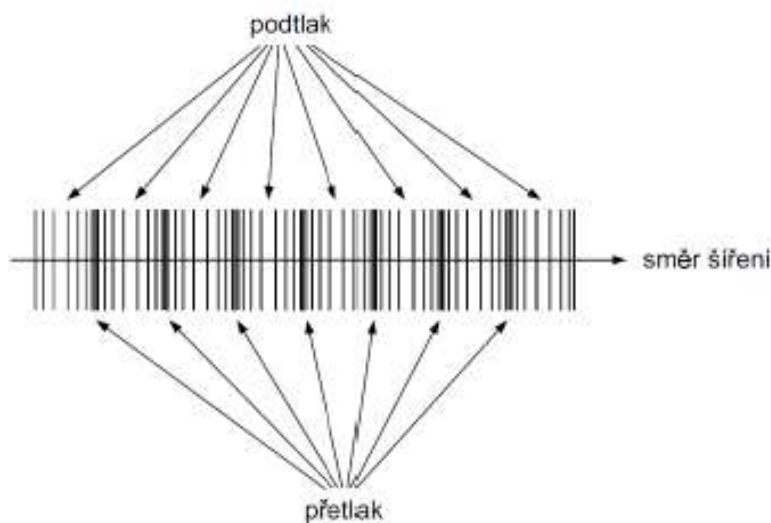
Dalším důležitým pokrokem v ultrazvukové diagnostice byl v padesátých letech dvacátého století dvourozměrný obraz B. Postupem času se zavedla metoda odstupňované šedi, která znamenala důležitý pokrok v rozlišovací schopnosti tohoto obrazu. V 70. letech se začalo využívat duplexního zobrazení (jedná se o kombinaci dvojrozměrného dynamického zobrazení a pulzní dopplerovské metody měření rychlosti). V současné době již existuje i trojrozměrné zobrazení. [1; 2]

4.2 Fyzikální vlastnosti

Za ultrazvuk považujeme mechanické vlnění s frekvencí nad 20 kHz, jenž je za hranicí lidské slyšitelnosti a zároveň je hodnotou spodní hranice ultrazvuku, a to do hodnoty 1 GHz, kterou považujeme za horní hranici. Podle účinků rozlišujeme ultrazvuk na aktivní a pasivní. [3; 4]

Chvěním hmoty vzniká zvuk, toto chvění se předává hmotným částicím prostředím např. vzduchu. Zvukové vlny se mohou šířit pouze hmotou nikoli vzhledem k prázdnému. Ve vzduchu nastává zředování a zhušťování částic. Vzduchem se tato místa posouvají určitou rychlostí, tuto rychlost nazýváme rychlostí šíření zvuku c . Samotné částice se ovšem nepřemísťují, pouze kmitají okolo svých rovnovážných poloh. Základem pro šíření zvuku je elasticita hmoty. [3; 4]

Obr. 1 Zhušťování a zředování částic vzduchu při vzniku ultrazvukové vlny



Zdroj: [3]

Zvukovou vlnu tvoří dvě sousední místa minimálně nebo maximálně zhuštěných částic. Vzdálenost mezi těmito místy je λ tzv. délka zvukové vlny. Kmitočtem f se nazývá počet zředění nebo zhuštění za jednu sekundu. Z uvedených veličin platí vztah: [3]

$$c = \lambda \cdot f \quad (1)$$

4.2.1 Akustický tlak

Tlak, který vzniká při šíření ultrazvukové vlny, se nazývá akustický tlak. V důsledku postupného rozkmitávání a pohybu sousedních částic s fázovým zpožděním vznikají oblasti, v nichž se částice k sobě přibližují a od sebe oddalují. Tím se v těchto oblastech vyskytuje zvýšený tlak, který se střídá s oblastmi sníženého tlaku. Hodnotu akustického tlaku lze vyjádřit vzorcem

$$p = z \cdot v \quad (2)$$

Rovnice je obdobou Ohmova zákona. Tlak p se podobá elektrickému napětí, měrná akustická impedance z elektrické impedanci, a rychlost v proudu. Akustická impedance je obecně komplexní, jelikož mezi rychlostí a akustickým tlakem může být fázový posun. Pouze v případě kulové nebo rovinné vlny se akustická měrná impedance považuje za reálnou a

nazývá se akustický vlnový odpor. Poměr vlnových odporů, charakterizují daná dvě sousední prostředí, má vliv na propustnost a odraz ultrazvuku na rozhraní. [5]

4.2.2 Ultrazvukový impuls

Impuls akustického tlaku je soubor kmitů, které se liší od konstantní hodnoty po dobu krátkého časového intervalu, jehož délka trvání je srovnatelná s délkou zakmitávajícího přechodného jevu. Šíření impulsu především závisí na strmosti náběhu a strmosti odběhu. [5]

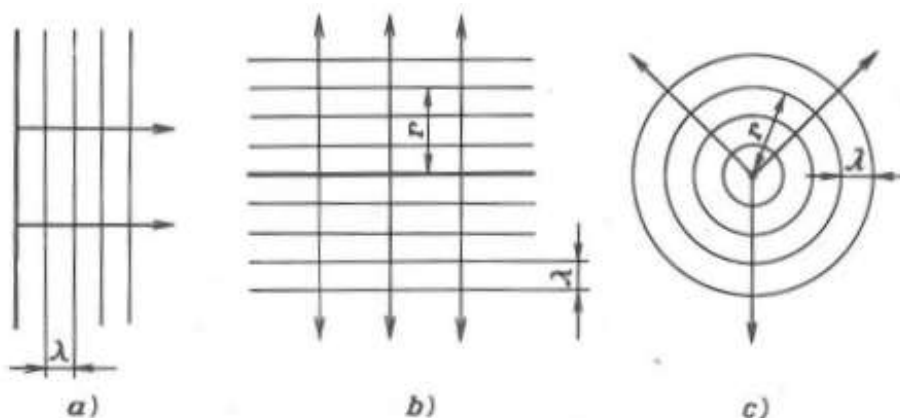
4.2.3 Intenzita ultrazvukového vlnění

Intenzita ultrazvukového vlnění I představuje měřítko akustické energie, která prochází jednotkou plochy kolmo orientovanou na paprsek ultrazvukového vlnění. [5]

4.2.4 Způsoby šíření ultrazvukových vln

Ultrazvuková vlna se šíří v neohrazeném prostředí do prostoru od svého zdroje. Jestliže sousedící částice dosahují kmitů stejné fáze, vzniká vlnoplocha. Vlnoplochy mohou nabývat různých tvarů. Mezi základní tvary patří rovinné, válcové a kulové vlny. [6]

Obr. 2 Tvary vlnoploch: a) rovinná vlna, b) válcová vlna, c) kulová vlna



Zdroj: [6]

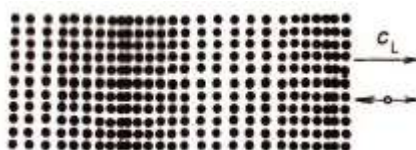
4.3 Druhy ultrazvukových vln

Ultrazvukových vln známe několik druhů, vzájemně se lišících způsobem pohybu částic prostředí ke směru postupu vlny. [6]

4.3.1 Podélné vlny (L – longitudinální)

Nejznámější a zároveň nejběžnější ultrazvukové vlny jsou vlny podélné. Při podélné vlně částice prostředí přímočaře kmitají ve směru šíření vlny. Prostředí při tomto pohybu se střídavě zhušťuje a zředňuje, přitom dochází i ke střídavé změně jeho objemu. Tyto vlny se mohou šířit jak pevným, tak i kapalným či plynným prostředím. Proto jde o druh vln, se kterými se nejčastěji setkáme. Podmínkou, aby se v prostředí šířila čistě podélná vlna, jsou dostatečně velké rozměry vůči délce vlny λ . [5; 6]

Obr. 3 Podélné vlny



Zdroj: [5]

4.3.2 Příčné vlny (T – transverzální)

Příčné vlny se také jako vlny podélné mohou šířit pouze v prostředí s mnohem většími rozměry, než je délka vlny, ale jen v takovém, které klade odpor namáhání ve smyku. A tím je prostředí tuhé. V plynech a kapalinách se tyto vlny šířit nemohou, jen některé plasty a kapaliny s velkou viskozitou mohou tyto vlny přenášet. Znakem příčných vln jsou částice kmitající po přímkové dráze a kolmo na směr šíření. Při jejich šíření nevzniká zředění ani zhuštění, ale částice se navzájem posouvají, a proto nemění objem prostředí při šíření příčné vlny. [5; 6]

V rovině kolmé na směr šíření vlny a v jednom ze dvou možných směrů je příčná vlna polarizována. Při změně natočení zdroje příčných vln se změní i rovina kmitání částic. [5; 6]

Obr. 4 Příčné vlny



Zdroj: [5]

4.3.3 Povrchové vlny (R – Rayleighovy)

Jedná se o zvláštní příčné vlny, které se mohou šířit na volném povrchu pevné látky. Částice kmitají po eliptické dráze kolem rovnovážné polohy, na které působí síla, skládající se

ze dvou vektorů. Jedním z nich je vektor kolmý na směr šíření, ten má mnohokrát větší velikost než vektor s tímto směrem rovnoběžný. Složením obou vektorů vzniká výsledný pohyb částic po velmi protáhlé elipse. [5; 6]

Obr. 5 Povrchové (Rayleighovy) vlny

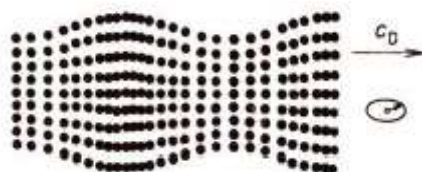


Zdroj: [5]

4.3.4 Deskové vlny (D – Lambovy)

V prostředích jako jsou dráty nebo desky, jejichž rozměry jsou alespoň v jednom směru stejné s délkou vlny, se mohou šířit sférické Lambovy vlny, v defektoskopii známé jako vlny deskové. Vyskytují se dva typy těchto vln, asymetrické neboli ohybové a symetrické neboli dilatační. Částice prostředí v obou případech kmitají po eliptické dráze kolmo na směr šíření, a tedy i k povrchu, liší se ovšem kmitáním částic na neutrální ose. U ohybové vlny je pohyb jen příčný, u dilatační se jedná pouze o pohyb podélný. [5; 6]

Obr. 6 Deskové (Lambovy) vlny

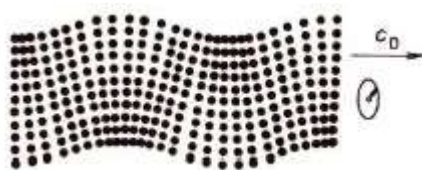


Zdroj: [5]

4.3.5 Loveovy vlny

Loveovy vlny jsou zvláštním případem Lambových vln. Částice prostředí kmitají pouze příčným pohybem v rovině rovnoběžné s povrchem. Nacházejí se ve velmi tenkých vrstvách prostředí tuhého, které je pevně spojeno na jedné straně s jiným tuhým prostředím. [5; 6]

Obr. 7 Loveovy vlny



Zdroj: [5]

4.4 Rychlost šíření ultrazvukové vlny

Rychlost c šíření ultrazvukového vlnění je závislá na vlastnostech prostředí, jedná se především o modul pružnosti ve smyku a v tahu, Poissonova čísla, hustoty a adiabatické stlačitelnosti. [7]

4.4.1 Tuhé látky

Tuhé látky mají na rozdíl od kapalin a plynů vyšší meziatomární vazební síly, díky kterým jsou schopny snášet i namáhání smykem, a proto dokáží přenášet veškeré druhy ultrazvukových vln. Rychlost šíření podélných vln c_L závisí na rozměrech prostředí a vlnové délce λ . [6]

4.4.2 Kapaliny

Rychlost šíření závisí na hustotě prostředí, teplotě a tlaku. Kvůli velké viskozitě nekladou kapaliny až na malé výjimky žádný odpor smykovému namáhání, tzn., že se v kapalinách šíří vlny pouze podélné. Zhušťování a zředování kmitajících částí probíhá adiabaticky, což znamená, že nedochází k výměně tepla s okolím. [6]

Rychlost šíření ve směsích nebo roztocích závisí na koncentraci jednotlivých složek a výše uvedených závislostí. [6]

4.4.3 Plyny

Závislost rychlosti šíření ultrazvuku v plynném prostředí závisí na tlaku a teplotě. S rostoucím obsahem vodních par skoro lineárně roste i rychlost šíření. Ve víceatomových plynech dochází k disperzi rychlosti neboli závislosti na frekvenci. [6]

4.5 Odraz a lom

Ultrazvukové šíření vln je ovlivněno každým rozhraním, u kterého dochází k odrazu a lomu který nastává při šikmém dopadu. [6]

4.5.1 Kolmý dopad na rozhraní

Při dopadu ultrazvukové vlny kolmo na rozhraní dvou prostředí projde část akustického tlaku p_2 do prostředí 2 a část p_1 se odrazí zpět do prostředí 1 (viz. Obr. 8). [8]

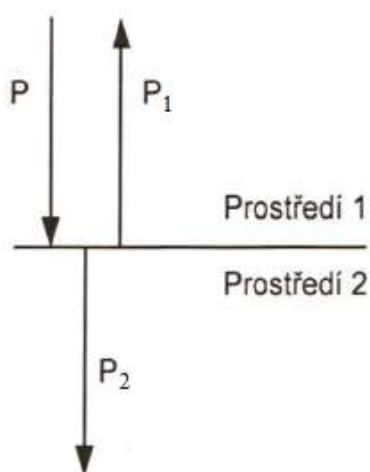
Podmínka pro vznik odrazu a lomu je taková, že rozměry prostředí nebo překážky musí být větší, než je vlnová délka vlnění. Na rozhraní plynu a tuhé látky prakticky dochází k úplnému odrazu vlny, díky této vlastnosti se dají lokalizovat i velmi malé nečistosti vyplněné plynem. [1; 7]

4.5.2 Šikmý dopad na rozhraní

Během šikmého dopadu vlny na rozhraní dvou prostředí se vlna odráží a láme. V tuhém prostředí se vyskytují obecně dvě vlny, které vznikají při lomu a odrazu ultrazvukového vlnění a tím jsou příčné a podélné. Tímto jevem vzniká jiný druh vlny, než má vlna dopadající, a mluvíme zde o transformaci vlny. Změna směru šíření ultrazvukové vlny vůči směru dopadající vlny se nazývá lom. [5]

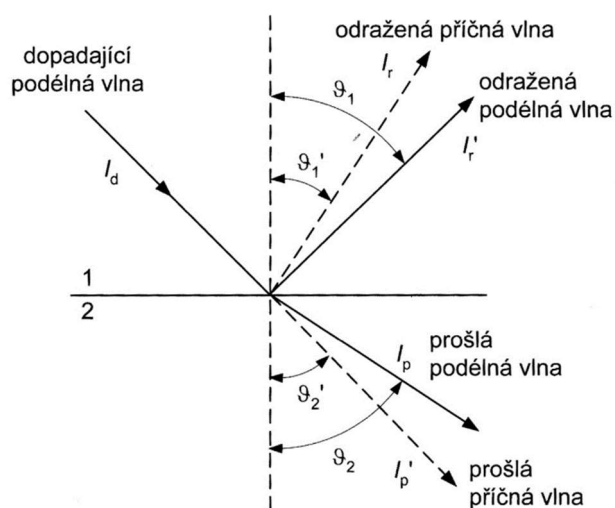
Odraz a průchod vlny prostředím udává poměr amplitud dopadající vlny a vlny odražené a závisí na jednotlivých úhlech vln, poměru jejich rychlosti šíření a poměru hustot prostředí, a také na poměru jejich akustických odporů. [5]

Obr. 8 Kolmý dopad na rozhraní



Zdroj: [4]

Obr. 9 Odraz vlny při šikmém dopadu na rozhraní



Zdroj: [3]

4.6 Útlum

Při průchodu ultrazvukové vlny prostředím se její energie zmenšuje a tím i její akustický tlak. Důsledkem poklesu je rozptyl a pohlcování ultrazvuku a jedná se tak o útlum ultrazvukové vlny. [5]

Za vznikem absorpce neboli pohlcování ultrazvukových vln je vnitřní tření kmitajících částic, relaxační a tepelné jevy a plastické tečení. Absorpce také vzniká při přeměně mechanické energie kmitajících částí na tepelnou energii. Ztráty se zvyšují se stoupající frekvencí a zároveň jsou silně závislé na teplotě. [5]

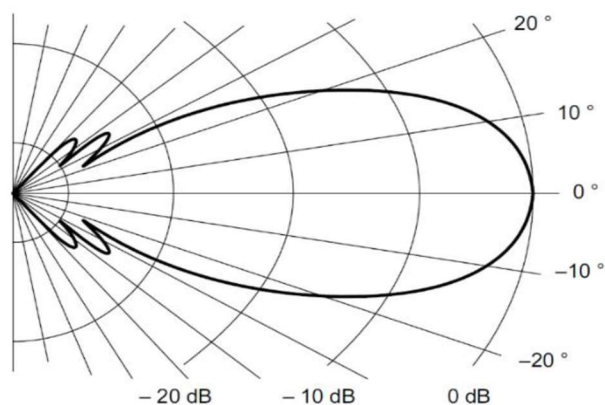
K rozptylu ultrazvukových vln dochází v nehomogenních a polykrystalických prostředích (tuhých i kapalných). Ultrazvuk dopadající na rozhraní jednotlivých nehomogenit se odráží, láme a ohýbá. Důsledkem je změna akustické impedance, ke které dochází na každém rozhraní. Nehomogenity jsou většinou náhodně orientované, a proto se ultrazvuková vlna rozptyluje do všech směrů. Ohyb vln závisí na frekvenci a velikosti nehomogenity i proto se rozptyl ultrazvuku mění podle délky vlny a poměru rozměrů nehomogenit. Při rozptylu se mechanická energie kmitajících částí nemění v jiný druh energie, ale ztrácí se ze směřovaného ultrazvukového pole. [5]

4.7 Vyzařovací směrová a snímací charakteristika

4.7.1 Směrová vyzařovací charakteristika

Závislost vyzařování na směru je dáno grafem, který udává závislost mezi úhlem natočení měřicího mikrofону od osy senzoru při konstantní vzdálenosti a hladiny akustického tlaku. [3]

Obr. 10 Směrová vyzařovací charakteristika ultrazvukového senzoru

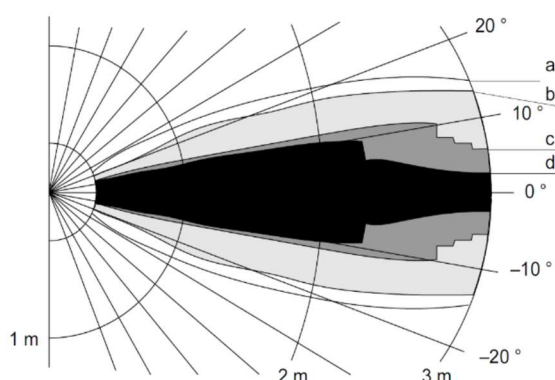


Zdroj: [3]

4.7.2 Snímací charakteristika

Tvar snímací charakteristiky se odvíjí od druhu, tvaru a rozměrů snímaného předmětu a vzniká z vyzářovací charakteristiky při snímání odrazu. Obrázek č. 11 zobrazuje a) rovinnou čtvercovou desku o rozměrech 700×700 mm, b) předmět o rozměrech 100×100 mm, c) trubku potaženou textilií (plstí) o průměru 160 mm, d) dřevěnou tyčku o průměru 25 mm. [3]

Obr. 11 Snímací charakteristika ultrazvukového senzoru pro různé druhy snímaných předmětů



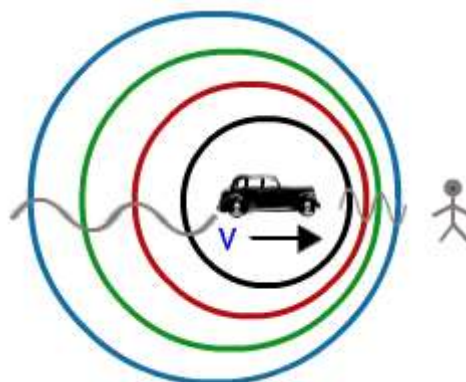
Zdroj: [3]

4.8 Dopplerův jev

Dopplerův jev představuje jev, při kterém dochází ke změně vlnové délky a frekvence vysílaného signálu oproti přijímanému, způsobené nenulovou vzájemnou rychlostí vysílače a přijímače. Tento jev byl poprvé popsán v roce 1842 Christianem Dopplerem. Při pohybu zdroje směrem k přijímači dopadne vyšší počet kmitů než v případě, že se zdroj od přijímače vzdaluje. [9; 10]

Jedním z příkladů, kdy lze Dopplerův jev pozorovat, je měnící se výška sirény na automobilech vlivem vzdalování a přibližování k pozorovateli. Pozorovatel, ke kterému se přibližuje automobil, vnímá zvuk jako vyšší, naopak když se automobil vzdaluje, vnímá zvuk jako nižší. [9]

Obr. 12 Dopplerův jev



Zdroj: [11]

Dopplerova jevu využívá řada měřicích přístrojů a zařízení, např. radary pro měření rychlosti vozidel nebo lékařské sonografy. [9]

4.9 Zdroje ultrazvukových vln

Ke generování ultrazvukových vln se používají piezoelektrické měniče, u kterých je jejich podstatou piezoelektrický jev. Dále se používají magnetostrikční generátory, které potřebují k vytvoření ultrazvukové vlny feromagnetickou tyčinku umístěnou v magnetickém poli elektromagnetu napájeného střídavým proudem. Generace ultrazvukových vln se dosahuje také za pomoci elektrodynamických, elektrostatických, termomechanických a optických měničů. Samozřejmě existují i mechanické generátory, ale ty mají spíše historický význam a jedná se o speciální píšťaly a sirény. [12]

4.9.1 Piezoelektrické měniče

Ultrazvukové vlny se přijímají a vysílají pomocí elektroakustických měničů, jenž mění elektrickou energii na mechanickou a naopak. Látky s piezoelektrickými vlastnostmi jako je například křemen, turmalín atd. jsou tvořeny krystaly. Jejichž krystalová mřížka je tvořena ionty, které jsou uspořádány takovým způsobem, kdy při deformaci krystalu dochází k posunu negativních a pozitivních iontů tak. Při tom na celém krystalu vznikne elektrický náboj. Tento jev označujeme za přímý piezoelektrický jev. Opakem přímého piezoelektrického jevu je nepřímý piezoelektrický jev, a to proto, že elektrické napětí vzniklé na krystalu je přímo úměrné namáhání v krystalu, a to znamená, že v elektrickém poli dochází k deformaci krystalu. [5]

4.9.2 Magnetostrikční měniče

Magnetostrikční měniče využívají jevu magnetostrikce, jevu obdobnému elektrostrikci. Tento jev se objevuje u feromagnetických materiálů a u některých práškových nekovových materiálů (feritů). Do magnetického pole se vloží tyč magnetostrikčního materiálu, přičemž dochází k její deformaci. Ta se projevuje ve změně tvaru nebo i objemu. Tato změna je velmi malá. Magnetostrikční měniče se využívají pro nízké ultrazvukové frekvence. Tyto měniče jsou použity například u svařování ultrazvukem. [5]

4.9.3 Elektrodynamické měniče

Činnost elektrodynamického měniče je založena na vzájemném silovém působení magnetického pole permanentního magnetu a magnetického pole vznikajícího průchodem proudu vodičem. Pracuje-li měnič jako vysílač, využívá síly vzniklé ve vodiči, kterým prochází elektrický proud, je-li umístěn v magnetickém poli. Elektrodynamické měniče tedy využívají tzv. Lorentzovu sílu vznikající při magnetoinduktivních jevech. Tato vektorová síla se dá vyjádřit vztahem:

$$F = Q \cdot v \cdot B \quad (3)$$

kde Q je elektrický náboj, v je rychlost pohybujícího náboje a B představuje velikost a směr magnetické indukce, působící na materiál. Lze vyvolat vznik příčné i podélné vlny, jenž závisí na volbě směru magnetické indukce.

Jejich výhodou se stává použitelnost ve vysokých teplotách, a to až do 1100 °C. Nerovností a případnou barvou na povrchu se citlivost příliš neovlivňuje, na druhou stranu jsou ovšem méně citlivé než piezoelektrické měniče. [5; 13]

4.9.4 Elektrostatické měniče

Činnost je založena na principu deskového kondenzátoru, jehož jedna deska (elektroda) je pohyblivá. Pohyblivá elektroda je tvořena membránou, vzdálenou od pevné elektrody. Elektrostatické měniče lze použít do frekvence 100 MHz pro příjem i vysílání velmi krátkých impulzů. Výhodou těchto měničů je rovnoměrná frekvenční charakteristika, a to až do vysokých frekvencí. [5]

4.9.5 Termomechanické měniče

Na povrchu tuhého prostředí vzniká vlivem náhlého ohřátí mechanické napětí, kdy ultrazvukový impuls vznikne po době asi $10\mu\text{s}$ ohřevu. Tento impuls se vyznačuje strmým náběhem. Vytvořit takový tepelný náraz lze za pomoci elektromagnetických vln (mikrovlnami), svazkem elektronů, laserem atd. Právě laser se jeví jako velmi vhodný, umožňuje vytvářet velmi krátké impulsy, díky kterým je schopen vygenerovat v materiálu ultrazvukové impulsy o frekvenci až 200 MHz. [5]

Výhodou těchto měničů je bezkontaktní zkoušení materiálu do vzdálenosti až několika metrů, ovšem jejich výroba je velmi nákladná. [5]

4.9.6 Optické měniče

Optické měniče se používají hlavně k úplnému zobrazení ultrazvukového pole. Pracují na principu vychylování světla na částicích prostředí, kmitajících vlivem ultrazvuku. Pomocí tohoto principu lze zobrazit na povrchu tuhého prostředí Reyleighovy vlny, které se právě mohou šířit na povrchu pevných látek. Při šíření těchto vln se povrch deformuje, tím dochází ke změně úhlu dopadu světelných paprsků. Předpokladem pro toto zobrazení je hladký povrch, který odráží paprsky světla jedním směrem. Na nerovných (hrubých) površích se může využívat různých modulací světla. K těmto modulacím dochází vlivem kmitání určité malé plochy, tvořící ohnisko, ve kterém je světlo koncentrováno. Pro zobrazení celého ultrazvukového pole má největší význam šlírová (clonková) metoda, která funguje na principu zakřívování trajektorií světelných paprsků při průchodu nehomogenní látkou a na filtraci paprsků, šířících se vybraným směrem. [5; 14]

5 Praktické využití ultrazvuku

Ultrazvuku využívají netopýři k orientaci v prostoru, jedná se o tzv. echolokaci. Echolokace jim umožňuje vyhýbat se překážkám a orientovat se v prostoru pomocí odrazu ultrazvukového vlnění od překážek.

Využívá se v mnoha oborech. V technice se setkáváme s jeho použitím při měření vzdálenosti, detekci předmětů, měření průtoků, rychlosti, mapování oblastí, měření tloušťky materiálu, defektoskopie (hledání vad v materiálu), čištění materiálu, svařování atd. V lékařství se nejčastěji využívá ultrasonografie, díky níž lze zobrazit vnitřek těla. S využitím ultrazvuku se také pracuje v námořnictví, kde mluvíme o sonaru a echolotu.

5.1 Sondy

Ultrazvuková sonda je elektroakustické zařízení, obsahující jeden nebo více měničů pro přeměnu elektrické energie na energii mechanickou. Zde je sonda použita jako vysílač a při přeměně mechanické energie na elektrickou považujeme sondu za přijímač. Elektrický signál z přijímače se označuje jako ultrazvukový signál. [7]

5.1.1 Dělení sond dle kontaktu s materiálem

Kontaktní sonda: Sonda je přímo přikládána k povrchu materiálu (předmětu), proto je označována jako kontaktní. [7]

Imerzní sonda: Imerzní sondy se využívají pro bezkontaktní zkoušení, kdy sonda není v přímém kontaktu s materiálem. [7]

5.1.2 Dělení sond dle vysílaného typu vln

Přímé sondy: Přímé sondy vysílají ultrazvukové vlny (obvykle podélné, velmi výjimečně příčné) kolmo k ose povrchu. [7]

Úhlové sondy: Jsou založeny na lomu vln a sním spojené transformace vln příčných na podélné a naopak. Tyto sondy tedy vysílají ultrazvukové vlny do materiálu pod určitým úhlem. Důsledkem dopadu vlny na rozhraní vznikají dvě ultrazvukové vlnění a je nutné zamezit šíření vln současně, jinak by mohlo docházet k chybám měření. [6]

Rayleighovy sondy povrchových vln: Tyto sondy patří do skupiny úhlových sond, ale pro úhel 90° je nazýváme jako sondy povrchových vln. [4]

5.1.3 Dělení sond dle počtu měničů

Jednoměničové sondy: Obsahují pouze jeden měnič pro vysílání ultrazvukových vln i příjem odražených ultrazvukových vln. [4]

Dvuměničové sondy: Dvuměničové sondy, nazývané také jako dvojité, mají jeden měnič určený k vysílání ultrazvukových vln a druhý slouží pouze k příjmu odražených vln od protilehlého povrchu. [4]

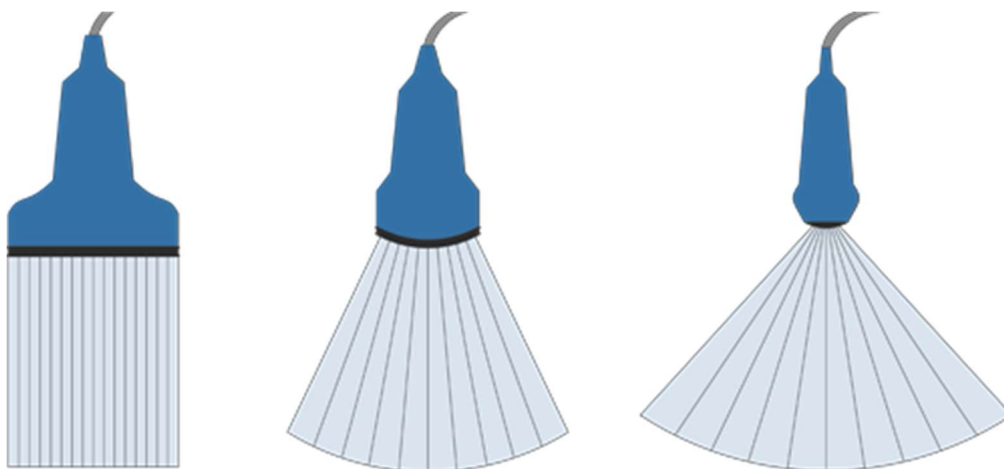
Víceměničové sondy: Jak už název vypovídá, obsahují více měničů (8, 16, 32, 64,...) pro příjem a vysílání ultrazvukových vln. [4]

5.1.4 Dělení sond dle uspořádání měničů

Lineární sonda: Měniče jsou uspořádány v jedné řadě vedle sebe kopírující přímku, a jedná se o nejjednodušší typ sond. Jejich vyzařovací úhel je lineární a používá se k zobrazení povrchových orgánů nebo cév. [15; 16]

Konvexní sonda: V konvexní sondě jsou měniče stejně jako u lineární sondy v jedné řadě, avšak kopírující konvexní oblouk. Jejich vyzařovací úhel má tvar podobný výseče z mezikruží a mluvíme zde o nejběžnějších používaných sondách. [15; 16]

Obr. 13 Typy sond: Lineární, konvexní, sektorová



Zdroj: [17]

Sektorová sonda: Ultrazvukový paprsek je postupně vychylován, vyzářovací úhel je ve tvaru široké kruhové výseče (vějíře). Těmto sondám se také říká fázově řízené nebo podle anglického originálu „phased array“. [15; 16]

5.1.5 Zobrazení impulsů

Zobrazení A (Amplitude): Je nejjednodušším typem zobrazení a zároveň je jednorozměrné. Je charakterizováno sledem výchylek časové základny osciloskopu. Místo odrazu odpovídá poloze výchylky a její amplituda velikosti odražení akustické energie. [6; 18]

Zobrazení B (Brightness): Jedná se o dvojrozměrné zobrazení a existuje několik druhů. Jedním z nich je **statické zobrazení B**, kde vzniká obraz velmi pomalým ručním posunem a nakláněním jednoměničové sondy. Tímto způsobem však není možno zachytit a posoudit obrazy pohyblivých částí. Proto vznikla metoda **zobrazení M** (původně TM – Time Motion), která při registraci pohybující se struktury A – obrazem zobrazila na obrazovce tzv. plavoucí echo, z něhož je rozeznatelná jen hranice pohybu. V současné době se využívá **dynamické zobrazení B** s rychlým snímáním a širokou stupnicí šedi. Jeho podstata spočívá ve vytvoření série obrazů umožňující sledování pohybu. [6; 18]

Zobrazení C: Jde o plošné zobrazení stavu prostředí a ke zkoušení materiálu se používá deskových nebo povrchových vln. [6; 18]

3D zobrazení: Během snímání se sonda lineárně posunuje a naklání nebo rotuje. Údaje v jednotlivých rovinách se ukládají do výkonného počítače, který provede vyhodnocení a rekonstrukci obrazu. [6; 18]

5.2 Lékařské využití

Ultrazvukové vyšetření je v současnosti jedním ze základních operací využívající se v prenatalní péči. S vývojem nových technologií se posunula podoba ultrazvukového zobrazení, kdy se k prezentaci ultrazvuku využívá 3D eventuálně 4D obrazu. [19]

5.2.1 Sonografie

Lékařská sonografie je zobrazovací diagnostická technika, pracující na principu registrace odraženého ultrazvuku od tkáně. Obvykle se využívá piezoelektrické sondy. [20]

Od doby prvního využití ultrazvukového zobrazení došlo ke zdokonalení rozlišovacích schopností, a s rozvojem výpočetních mikroprocesorů i k vývoji nových možností zobrazení a prezentace ultrazvukových dat. [19]

Trojrozměrné ultrazvukové vyšetření

Pokusy o 3D zobrazení začaly na konci 80. let dvacátého století, kdy zpracování objemu dat trvalo cca 45 minut, nyní však zpracovávání jednoho objemu trvá necelou sekundu. [19]

Při zpracování jednoho načteného objemu mluvíme o trojrozměrném ultrazvukovém vyšetření, eventuálně můžeme mluvit i o 4D zobrazení, kdy získáváme dojem pohybu způsobený rychlým načítáním po sobě jdoucích objemů. Při tomto způsobu zobrazení lze dopočítat i roviny (pohledy), které nejsou z technických důvodů při standardních řezech nastavitelné. [19]

Díky moderním ultrazvukovým přístrojům a jejich rozlišovacím schopnostem se rychleji diagnostikují většiny větších nebo závažnějších vad např. srdce. Samotná načtená data lze dále zpracovávat a prezentovat různými způsoby jako je např. „surface mode“, kdy přístroj zobrazí povrchovou strukturu a je tak možné získat poměrně věrné zobrazení obličeje nenarozeného plodu. [19]

Obr. 14 3D ultrazvukové zobrazení plodu



Zdroj: [21]

5.3 Technická využití – Ultrazvukové senzory

Ultrazvukový senzor se skládá ze sondy a dalších funkčních prvků, se kterými je možné zobrazit vzdálenost nebo tvar zjišťovaného předmětu. [3; 22; 23]

Ultrazvukové senzory se především používají tam, kde nelze použít optické senzory. Jedná se například o prашná prostředí, detekci průhledných a lesklých předmětů, nejsou omezeny barvou předmětu. Využívají se k měření sypkých materiálů a materiálů s nepravidelným povrchem, měření hladiny kapalin a pastovitých látek. Vzhledem k používání v horších podmínkách (továrny, nárazníky automobilů) jsou ultrazvukové senzory odolné. Na druhou stranu jsou ultrazvukové senzory dražší než optické. Nedokáží detekovat tlumící materiály, mají širší detekční paprsek a delší dobu odezvy. [3; 22; 23]

Obr. 15 Typy ultrazvukových senzorů

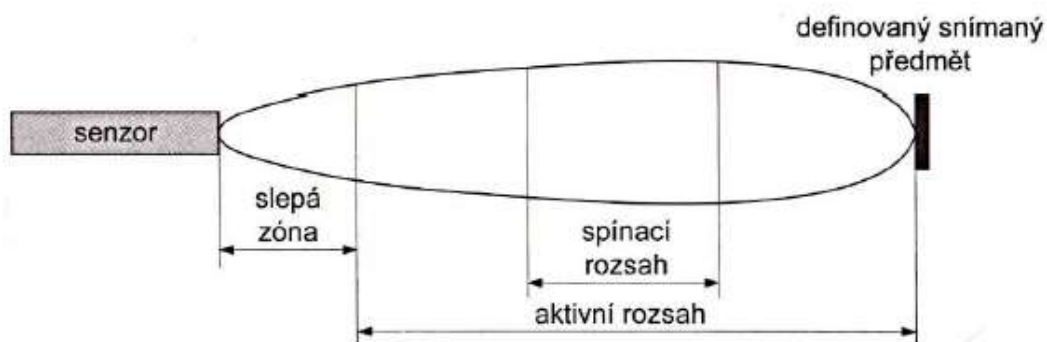


Zdroj: [24]

5.3.1 Parametry senzorů

Základní informace o jednotlivých senzorech nám poskytuje jejich vyzařovací charakteristika, definovaná vyzařovacím úhlem a dosahem. Dosah senzoru se mění s velikostí frekvence, čím větší bude frekvence, tím menší dosah bude senzor mít. [3]

Obr. 16 Definice rozsahů ultrazvukového senzoru



Zdroj: [3]

Popis jednotlivých částí vyzařovací charakteristiky:

Aktivní rozsah: Je maximální dosah senzoru, uvnitř kterého může senzor zjistit přítomnost normou definovaného objektu. [3; 22]

Slepá zóna: Jedná se o oblast mezi senzorem a aktivním rozsahem. V této oblasti senzor ještě nemůže vyhodnocovat echo z důvodu dokmitávání membrány měniče. Zónu necitlivosti lze pomocí úpravy zmenšit, např. nahradit jeden měnič dvěma. [3; 22]

Spínací rozsah: Je zvolená část v aktivní zóně, ve které dochází k aktivaci výstupu při detekci předmětu. [3; 22]

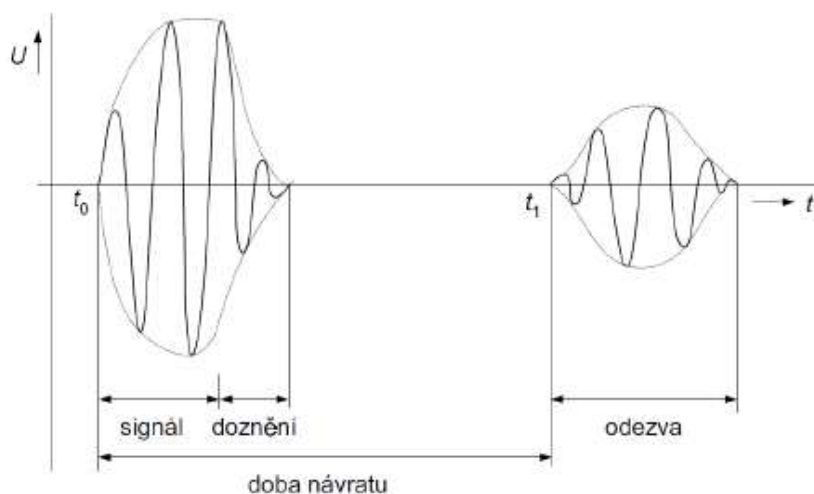
5.3.2 Ultrazvukové senzory pro měření vzdálenosti

Senzory pracují na principu měření času odezvy odražené ultrazvukové vlny (echa) podobně jako sonar. Při dopadu ultrazvukové vlny na překážku dochází k odrazu signálu, který se vrací zpět k ultrazvukovému měniči (nejčastěji piezoelektrickému). Při dopadu na měnič se generuje napěťový puls. Za změřenou dobu mezi vyslanou ultrazvukovou vlnou a přijatou odraženou vlnou a předpokladu znalosti rychlosti šíření ultrazvukových vln v daném prostředí lze vypočítat vzdálenost měřeného objektu od měniče podle vzorce. [25]

$$s = v \cdot \frac{t}{2} \quad (4)$$

Nejčastějším provedením pro zjišťování vzdálenosti se používá senzor, který je vybaven pouze jedním měničem, a mluvíme zde o jednoduchém systému. Nevýhodou tohoto systému je doba, kterou musí měnič čekat mezi příjmem možného echa z důvodu dokmitávání měniče. Teprve když je hodnota přijaté odezvy větší než amplituda dokmitávajícího měniče, může být odezva zjištěna. Z tohoto důvodu senzory nedokáží měřit objekty v blízké vzdálenosti od senzoru. Hovoříme zde o mrtvé zóně. Samotná doba dokmitávání měniče (doznění) je závislá na různých faktorech, jako jsou: celková kmitající hmota, vnitřní tlumení materiálu pro zrušení akustické vazby a mechanický závěs. Zónu necitlivosti lze podstatně zúžit použitím dvousystémového měniče, tzn. pro příjem a vysílání se používají dva samostatně oddělené měniče nastavené na stejnou frekvenci. [3]

Obr. 17 Zjednodušený časový průběh budícího napětí jednosystémového měniče



Zdroj: [3]

S aplikací těchto senzorů se například setkáváme v automobilovém průmyslu jako asistent parkování. V průmyslu k detekci různých předmětů například na výrobní lince.

Vliv teploty: Rychlost šíření ultrazvukových vln ovlivňuje teplota prostředí, ve kterých se šíří. S rostoucí teplotou roste i rychlost šíření. Současné ultrazvukové snímače tuto chybu kompenzují, ale některé vlivy zcela odstranit nelze. Příkladem může být sluneční záření, které ohřívá vestavěné čidlo teploty v senzoru nad teplotu okolí a dochází tak ke zkreslení. Ultrazvukové senzory bývají běžně vyráběny do teploty 100°C výjimečně do 150°C. [26]

Vliv tlaku: Šíření ultrazvukových vln lze pouze v látkovém prostředí, proto nelze použít ultrazvukových snímačů ve vakuu. Snímače také nelze využívat v prostředích, kde se pohybuje tlak ve stovkách kilopascalů z konstrukčních důvodů. [26]

Vliv transportního média: Vlastnosti plynů, par mezi senzorem a měřeným předmětem ovlivňují přesnost a spolehlivost měření. Například plynný CO₂ tlumí ultrazvuk až tak, že odražené vlny nelze přijímat. Těkavé výpary uhlovodíku (benzínu) vytvářejí prostředí o různých hustotách, a proto zde může docházet k odrazům od jednotlivých vrstev a vznikat tak falešné odrazy. [26]

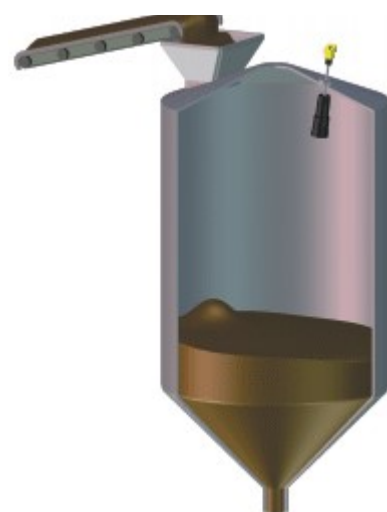
Pára, prach a proudění transportního média: Pára tlumí ultrazvukové vlny. Pokud se tedy vyskytuje mezi měřeným předmětem a senzorem pára, je nutné použití výkonnějšího senzoru. Prach na činnosti senzoru nemá velký vliv, vzhledem k vibracím vytvářejícího měniče se membrána senzoru sama čistí. [26]

5.3.3 Ultrazvukové měření výšky hladiny kapalin a pevných látek

Piezoelektrický měnič vysílá ultrazvukové impulsy směrem k měřené výšce hladiny média, v tomto případě jde například o vodu, agresivní chemické látky nebo výšky siláže v sýpkách. Tyto impulsy se odráží od látky zpět směrem k vysílači a ten vyhodnocuje dobu mezi vysláním impulsu a přijetím echa. Maximální vzdálenost, kterou sensor může změřit, je dána jeho parametry, v praxi se pohybujeme mezi dvěma až stem metry. Přesnost měření při referenčních podmínkách se pohybuje v řádu desetin procent a rozlišovací schopnost je až jeden milimetr. Vysílaný impuls je velmi úzký a lze tak měřit i výšku hladiny v úzkém profilu. [26]

Příklady použití: Velkou předností těchto snímačů je, že při snímání nemusí být senzor v přímém dotyku s měřeným médiem. Proto je lze použít při měření výšky hladin v chemickém a petrochemickém průmyslu. Nejznámější způsob využití je v oboru vodárenství a čištění odpadních vod, kde se měří především výška hladiny v měrném žlabu. Uplatnění těchto senzorů se vyskytuje i ve stavebním nebo palivovém průmyslu při skladování sypkých látek v silu. Při plnění sila sypké látky tvoří násypný kužel a při vyprazdňování ze spodu nádoby je povrch velmi nepravidelný a zároveň je prostředí velmi prašné. [26]

Obr. 18 Měření výšky hladiny v silu



Zdroj: [26]

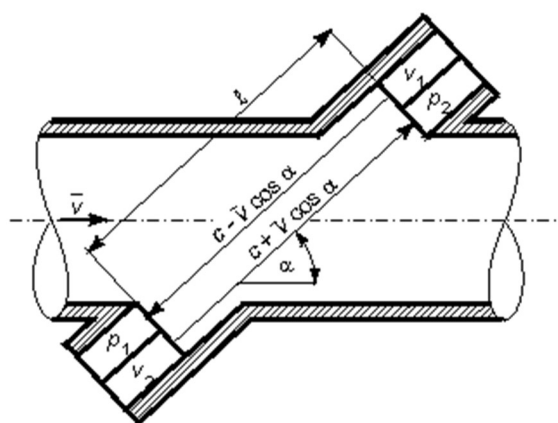
5.3.4 Ultrazvukový senzor pro snímání průtoku

Ultrazvukové průtokoměry rozdělujeme do dvou hlavních skupin. Jednou z nich jsou průtokoměry, využívající Dopplerova jevu, a druhou z nich jsou průtokoměry s vyhodnocováním doby průchodu signálu. Dále je lze rozdělit podle typu montáže. Provedení, kdy snímač je pevnou součástí trubice, se říká in-line a provedení, kdy se snímač přiloží ke

stěně potrubí se nazývá clamp-on, a jde o bezkontaktní měření. Příložné průtokoměry neovlivňují měřený průtok z důvodu, že nezasahují do proudícího média. Jsou vhodné k měření průtoku kalů a znečištěných tekutin. Ultrazvukových průtokoměrů zejména využívá potravinářský a farmaceutický průmysl z důvodu hygienických faktorů, kdy při jejich použití nehrozí kontaminace média a nemůže docházet k usazování kalů v průtokoměru. [27; 28]

Průtokoměry s vyhodnocením doby průchodu signálu: Samotný průtokoměr je tvořen měřicí trubicí, ve které je uloženo několik párů nebo jeden pár přijímače a vysílače. Průtokoměry jsou často konstruovány tak, kdy ultrazvukový signál je vysílán ve směru i proti směru proudění kapaliny. Doby mezi přijetím a vysláním impulzu pro dvojici vysílače a přijímače lze vyčíslit jako podíl jejich vzdálenosti L a příslušné rychlosti. Z rozdílu naměřených časů lze dopočítat rychlost i objem proudícího média. [27; 28]

Obr. 19 Průtokoměry s vyhodnocením doby průchodu signálu



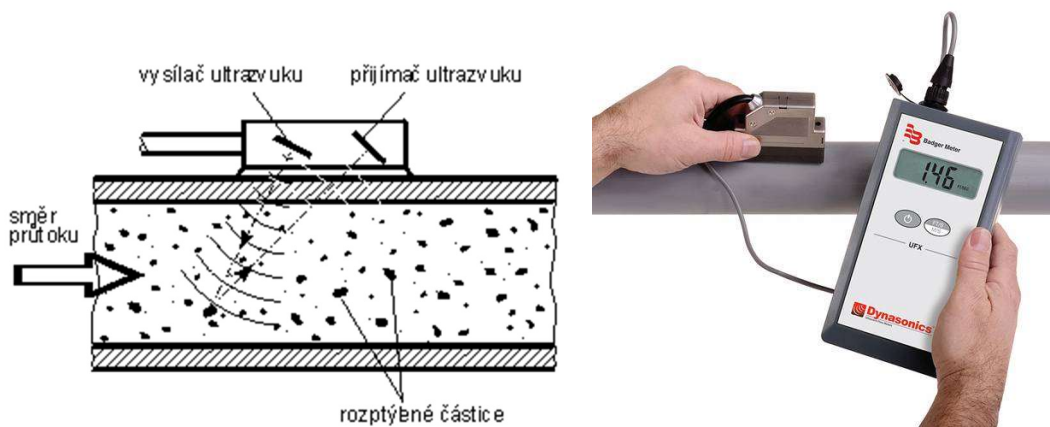
Zdroj: [27]



Zdroj: [29]

Průtokoměry využívající Dopplerův jev: Tento typ průtokoměrů lze použít pouze tam, kde se vyskytují v měřené veličině částice, odrážející zvuk, např. plynné bubliny nebo pevné částice v kapalině. Průtokoměr je tvořen z vysílače a přijímače ultrazvukového vlnění, které mohou být umístěny jak na jedné straně, tak i na obou stranách trubice. Ultrazvukový signál je vyslán o známé frekvenci do proudící kapaliny, následný odražený signál od částice nebo bubliny je zachycen přijímačem a je vyhodnocována změna frekvence. Rozdíl mezi oběma frekvencemi je úměrný rychlosti proudícího média. [27; 28]

Obr. 20 Průtokoměr založený na Dopplerově jevu



Zdroj: [27]

Zdroj: [30]

5.3.5 Ultrazvukový snímač pro detekci bublin v hadičce malého průměru

S rostoucími nároky na kvalitu a spolehlivost výroby se v různých oborech požaduje dodávka kapaliny, neobsahující žádné vzduchové bubliny. Například v lékařství v infuzních pumpách, kdy při výskytu bublin v roztoku by mohlo dojít k ohrožení života pacienta. V průmyslu je nutné kontrolovat, zda v mazacím systému proudí olej nebo vzduch. Využívají se i tam, kde je nutnost přesného dávkování kapalin, anebo tam, kde by přítomnost bublin znehodnotila další návazný proces. [31]

Velmi vhodnou metodou detekování bublin v kapalině je metoda, založená na šíření ultrazvukových vln. Měřicí člen přístroje má umístěný přijímač a vysílač naproti sobě. Vysílač generuje vysokofrekvenční impulsy, které prochází hadičkou. Jeli v hadičce kapalina, celý signál projde skrze hadičku a kapalinu k přijímači. Obsahuje-li hadička bubliny anebo je bez kapaliny, ultrazvuková vlna neprojde k přijímači nebo je velmi ztlumená. Tato metoda se považuje za velmi spolehlivou a bezpečnou z těchto důvodů: 1) kontakty snímačů nejsou v kontaktu s kapalinou, 2) snadná instalace a případná výměna hadičky, 3) nezávislost na vlastnostech kapaliny (na změnách hustoty, teploty, barvy). [31]

Snímače průtoku kapalin Sonoflow: jsou založeny na principu, kdy na obou koncích krátkého potrubí jsou nainstalované vysílače a přijímače. Elektronika přepíná měniče tak, aby se střídavě vysílal impuls nejprve po směru šíření a následně proti šíření směru proudící kapaliny. Ze známých rozměrů potrubí a rozdílů doby přijetí signálů (rychlosti proudění) je poté vypočítán objemový průtok. [31]

Obr. 21 Snímač průtoku Sonoflow

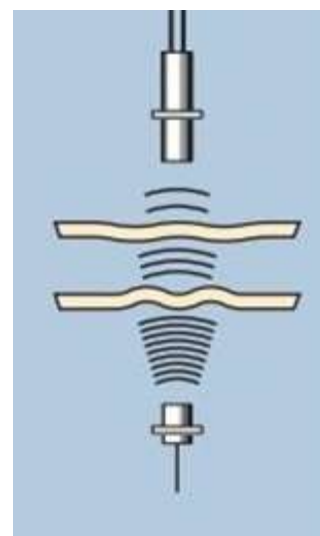


Zdroj: [32]

5.3.6 Ultrazvukový snímač pro detekci tenkých listů papíru

V automatizovaných aplikacích pracujících s papírem, kartónem, tenkými plastovými nebo kovovými fóliemi se hlídá nejen jejich přítomnost, ale i fakt, zda jde o jeden nebo více listů. Příkladem použití jsou tiskařské stroje, tiskárny, stroje pro kompletaci listů, ohýbání listů, výrobu pokovených obalů, solárních panelů atd. Tyto senzory například hlídají, zda stroj nevzal místo jednoho listu papíru více slepených listů k sobě. [33]

Obr. 22 Ultrazvukový snímač pro detekci tenkých listů papíru



Princip spočívá v měření vibrací listů papíru. Samotný papír při dodání energie lze velmi snadno rozvibrovat, čehož se využívá u generování zvuku v podobě reproduktorů s papírovou membránou, u kterých se využívá mechanické kmitání kmitavé cívky, která je s membránou spojena. Jestliže se ovšem membrána vystaví akustickému zvuku, rozkmitá se, a její vibrace se prostřednictvím cívky převede na elektrický signál. Podobného principu se využívá i při detekci listů. Pomocí vysílání ultrazvukového signálu na list, popřípadě listy papíru se energie přemění a rozvibruje je dle fyzikálních vlastností papíru. Tyto vzniklé vibrace generují určitý zvuk o frekvenci a intenzitě, která pomocí snímání identifikuje počet listů či jejich tloušťku. [33]

Ultrazvukový senzor, který může být využit pro tuto aplikaci je Microsonic dbk+4/3CDD/M18 E+S, jehož dosah je $40 \text{ mm} \pm 3 \text{ mm}$ a pracuje na frekvenci 400kHz. [33]

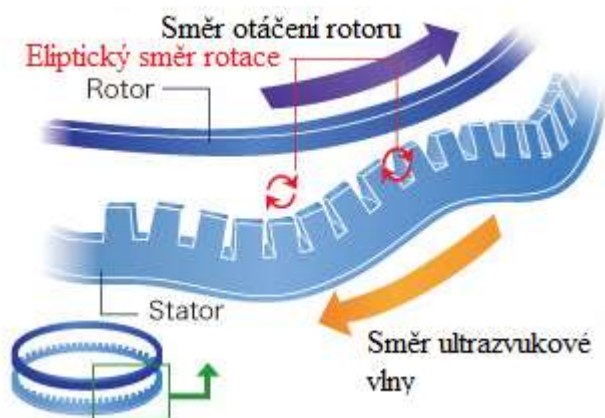
5.3.7 Ultrazvukové motory

Ultrazvukové motory pracují na principu piezoelektrického jevu. Používají se například tam, kde nelze uplatnit motory využívající elektromagnetické indukce. Ultrazvukové motory se volí v těch aplikacích, kde je potřeba přesného krokování, přesného kontinuálního běhu a také tam, kde je velmi častý rozběh a zastavení motoru. Tyto motory poskytují při malých rozměrech poměrně velký výkon. V ultrazvukových motorech se skrývají lineární i rotační miniaturní pohony se schopností velmi přesného řízení pohybu, rychlosti a pozice natočení. Nejpřesnější ultrazvukové motory dokáží krokovat natočení až v desítkách pikometrů. [34]

Ultrazvukové motory využívají vibrační piezoelektrického materiálu, který tvoří stator. Ten je připojen ke zdroji napětí o vysoké frekvenci, pomocí níž se piezoelektrický materiál střídavě smršťuje a roztahuje a začne jakoby poskakovat. Ale jelikož je upevněn, začne udělovat pohyb rotoru (k tomu uzpůsobený volný díl). Rotor tento pohyb předává vnějšímu připojenému mechanismu. [34]

Ultrazvukové motory se vyrábí ve dvou typech. Jedním z nich je lineární motor, který vytváří konečný přímý pohyb. Druhým typem je motor rotační, který vytváří nekonečný rotační pohyb. [34]

Obr. 23 Princip ultrazvukového motoru



Zdroj: [35]

Ultrazvukový motor je například využíván u objektivů při automatickém zaostřování. Této technologii využívá řada značek, první z nich byla společnost Canon.

5.3.8 Čištění ultrazvukem

Klasické čištění, jenž je součástí většiny výrobních procesů, se vykonává velmi pracně, málo efektivně a často se nedosahuje požadovaného hygienického stavu nástrojů, popřípadě materiálu. [36; 37]

Využití ultrazvuku s porovnáním s jinými způsoby čištění výrazně zkracuje dobu čištění, zvyšuje efektivitu a lze využít i k čištění otvorů v malých prostorech, slepých otvorech a tvarově složitých předmětů. [36; 37]

Ultrazvukový měnič vysílá mechanické kmity s frekvencí kolem 20 kHz až 40 kHz směrem k čištěnému předmětu skrze čistící roztok. V důsledku absorpce ultrazvukových vln materiálem nastává přeměna mechanické energie na tepelnou. Vlivem změny teplot v místě dotyku mezi nečistotou a čištěným předmětem dochází k částečnému oddělení nežádoucí nečistoty, a tak se dostává čistící médium ke stykovým místům nečistoty s předmětem. V čistícím médiu vlivem podtlaku vznikají miniaturní bubliny, v jejich blízkosti narůstá prudce teplota, tlak a zrychlení (tento jev se nazývá kavitace). Teplota se pohybuje v řádech tisíce stupňů a tlak dosahuje stovky megapascalů. Tyto jevy velice agresivně narušují mechanickou vazbu nečistoty na povrch čištěného předmětu a ve spojení s vhodným čistícím médiem dochází k jejich odplavování. [36; 37]

Obr. 24 Ultrazvuková čistička



Zdroj: [38]

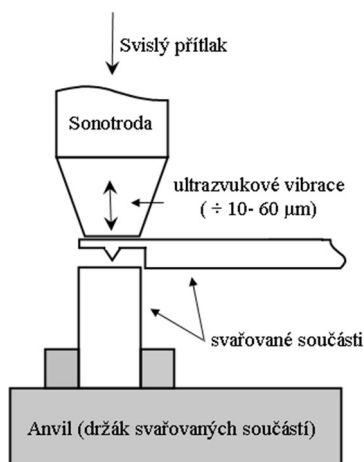
Využití: Strojírenská technika, elektronika (mytí osazených desek plošných spojů), sklárny, optika, potravinářský průmysl (mytí lahví) atd. [36; 37]

5.3.9 Svařování ultrazvukem

Při svařování ultrazvukem jsou spojované materiály vystaveny účinkům ultrazvukového vlnění (14 kHz až 20 kHz) za současného působení tlaku. Mechanické kmity jsou přenášeny vlnovcem (sonotrodou). Sonotroda má za úkol soustředit tlakovou sílu a mechanické kmity do místa svaru. Během svařování působí tlaková síla a mechanické kmity ve vzájemně kolmých směrech. Působením tepla, které vznikne třením na styčných plochách (kontakt zde představuje akustický odpor) nebo absorpcí ultrazvukové energie v materiálu v místě svaru dochází nejprve

ke změknutí a poté k tavení. Toto způsobí vzájemné promíchání styčných materiálů až vznikne pevná vazba. Přítlačná síla se nechává působit ještě chvíli po ukončení ultrazvukových kmitů, aby spoj přešel z plastického do pevného stavu. Celá doba svařování trvá dvě až tři sekundy. Tímto způsobem lze svařovat kovy i plasty od 5 mikrometrů do 3 milimetrů. [39]

Obr. 25 Princip svařování ultrazvukem



Zdroj: [39]

5.3.10 Defektoskopie – Metody zkoušení

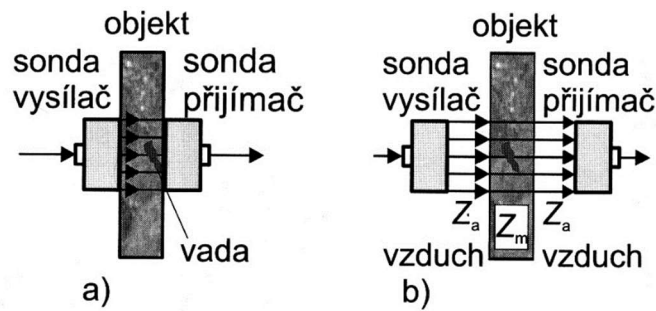
Metody zkoušení se rozdělují na tři základní typy: 1) průchodová metoda, která se dále dělí na spojitou a impulzovou metodu. 2) odrazová metoda, která se také dělí stejně jako metoda průchodová. 3) dle akustické vazby. Zde se vyskytují tři typy způsobů: a) kontaktní akustická vazba, b) imerzní akustická vazba, c) vzduchová vazba (bezkontaktní). [7]

Metody spojitě a impulzové se liší časovým průběhem budícího elektrického signálu, který je přiveden z generátoru na vysílající sondu, a odpovídajícího přijatého signálu na přijímací sondě. V dnešní době se již spojitě průchodové a odrazové metody nevyužívá. [7]

Impulzová průchodová metoda:

Na obou stranách jsou proti sobě umístěny sondy, přijímací a vysílací. K indikaci vady dochází v místě, kde se vyskytuje pokles akustického tlaku. Aby se však předešlo chybným měřením v důsledku útlumu vln materiálem, tak se nejprve změří část materiálu bez vad. [7]

Obr. 26 Průchodová metoda a) kontaktní vazba, b) bezkontaktní vazba



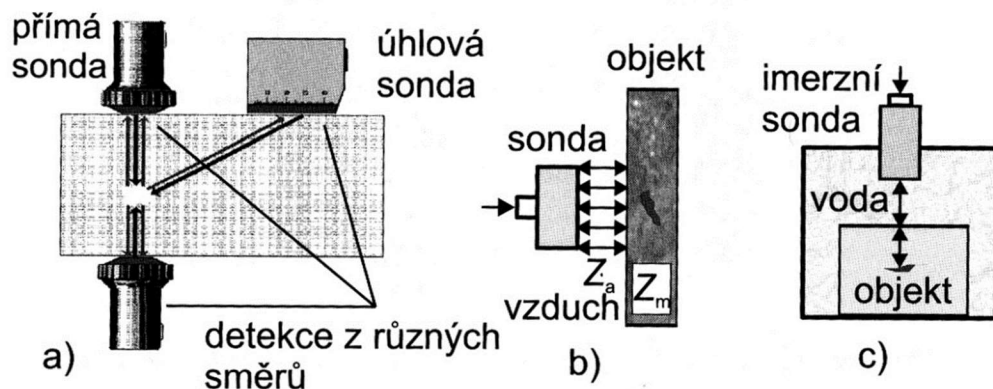
Zdroj: [7]

Nevýhodou této metody je, že nelze identifikovat polohu vady materiálu. Chyby měření vznikají v důsledku rozdílných akustických vazeb mezi sondami a měřeným materiálem. Předností kontaktní metody je, že slepá zóna vyřazovací charakteristiky sond zde není, a je tak použitelná pro zkoušení tenkých plechů. U bezkontaktní metody se používají nižší frekvence vzhledem k útlumu způsobené vzduchem. [7]

Impulzová odrazová metoda:

Při impulzové odrazové metodě je sonda umístěna na jedné straně zkoušeného materiálu. Ultrazvukový impuls je vyslán do materiálu, který se na konci materiálu odráží zpět k sondě. [7]

Obr. 27 Odrazová impulzová metoda: a) kontaktní vazba, b) bezkontaktní vazba, c) imerzní vazba



Zdroj: [7]

Výhodou této metody je lokalizování vad necelistvosti materiálu. Jedná se o nejrozšířenější metodu nedestruktivního zkoušení ultrazvukem. [7]

Při kontaktní vazbě se obvykle využívá vazebního prostředku (např. oleje). [7]

5.3.11 Ultrazvukové senzory na rozprašovacích tryskách

V zemědělství se ultrazvukových senzorů využívá k aplikaci postřiků v ovocných sadech. Pokud je postřik prováděn souvisle mezi stromy, dochází tak k plýtvání pesticidů v případě, kdy je mezi sousedícími plodinami mezera. Z důvodu šetření pesticidů a snížením nákladů se využívá senzorů, které v případě nedetekování rostliny přeruší aplikaci postřiku. Samotné senzory pro tento způsob použití jsou robustní, jsou navrhovány s vysokou třídou krytí IP a odolností proti chemickým látkám, které jsou obsaženy v pesticidech. [40]

Senzory jsou umístěny z boku nádrže a jejich dosah se pohybuje v rozmezí od 35 centimetrů do 6 metrů, a pracují na frekvenci 80 kHz. [41; 40]

Obr. 28 Ultrazvukový senzor při aplikaci pesticidů



Zdroj: [40]

6 Výhody a nevýhody ultrazvukových senzorů

Výhody:

- **Detekce téměř libovolných předmětů:** Ultrazvukové senzory detekují transparentní a lesklé předměty. Měřené předměty mohou mít jakýkoliv barevný povrch. Dokáží pracovat s předměty vyznačující se nepravidelností povrchu. Měření sypkých materiálů, kapalin a pastovitých materiálů také není problémem.
- **Senzory mohou pracovat v prašném prostředí a nevadí jim sněžení ani déšť.**
- **Odolné.** Vyrábí se v provedení vodotěsném, kdy sondy, elektronika a krystal jsou uzavřeny v plastu. Konektor pro připojení je opatřen těsněním. Senzory jsou běžně vyráběny a testovány na teploty od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+90\text{ }^{\circ}\text{C}$. Samotné senzory jsou také nárazu odolné, protože neobsahují žádné mechanické části, které by mohli být poškozené při nárazu.
- **Přesnost:** Senzor, použitý k snímání překážky a jeho poloha je fixní, má přesnost v rozmezí $\pm 1\text{ mm}$. Ale například u automobilů se přesnost pohybuje až kolem několika centimetrů.
- **Není třeba speciální údržby:** Aktivní plocha měniče kmitá a zabraňuje tak usazování suchého prachu a nečistot.
- **Bezkontaktní snímání:** Senzor není v kontaktu s měřenou veličinou, tudíž neovlivňuje její vlastnosti (např. snímání průtoku kapaliny) a zároveň nedochází k jeho poškození.

Nevýhody:

- **Nedetekuje tlumící materiály:** Tuto vlastnost lze vyřešit například použitím optických senzorů. Ovšem o tomto parametru se nemusí vždy hovořit jako o nevýhodě, jelikož se dá využít ke specifickým účelům.
- **Širší detekční paprsek:** Nevýhodou širšího detekčního paprsku je možnost detekce i jiných předmětů, než je požadováno. A to z důvodu malých rozměrů snímaného předmětu. Dostatečným nahrazením jsou optické senzory, například využití laserového paprsku, kdy širší detekčního paprsku je minimální s použitím vhodné volby optické čočky.

- **Omezení rychlostí proudění zvuku (delší doba odezvy):** Pokud je potřeba zaznamenávat velmi rychlé změny a rychlost ultrazvukové vlnění není dostatečná. Využívá se především optických senzorů, které jsou oproti ultrazvukovým mnohem rychlejší.
- **Dražší oproti jiným senzorům:** Ultrazvukové senzory jsou nákladnější na pořízení oproti jiným senzorům, ale na druhou stranu se mohou využívat v prostředích, které jiným senzorům dělají značné potíže.
- **Špatná detekce předmětů v blízkosti senzoru:** Další nepochybnou nevýhodou ultrazvukových senzorů je slepá zóna, která je cca dvacet centimetrů před samotným senzorem. Důvodem toho je, že v tomto případě se odražená vlna vrací v době, kdy ještě dokmitává měnič, a signál je silnější než odražený. To je možné odstranit použitím víceměničových senzorů.
- **Špatná detekce předmětu ve větší vzdálenosti:** U běžných senzorů tento problém nastává v situaci, kdy je vzdálenost větší než tři metry. Jedním z řešení, avšak cenově nákladnější, je nahrazení senzorů za výkonnější. Druhým způsobem odstranění této problematiky je použití senzorů na jiných fyzikálních principech.
- **Špatná detekce šikmého povrchu:** Tento problém nastává v případě, kdy je úhel odrazu větší než sedmdesát stupňů, kdy se ultrazvukové vlnění odrazí tak, že výsledné echo se nevrátí zpět k původnímu zdroji vyslané vlny.
- **Špatná detekce kapaliny s pěnou:** Ultrazvukové vlnění je pohlceno pěnou nebo se od ní odráží. V těchto případech se spíše využívá mechanických senzorů v provedení plováků.
- **Šíření vln je silně závislé na teplotě:** Senzor vystavený přímému slunečnímu záření může podávat chybné informace z důvodu ohřátí zabudovaného snímače teploty, sloužícího ke kompenzaci nad teplotu okolí. Následně pak dochází ke zkreslení. Proto je vhodné používat senzor tam, kde snímač nebude vystaven přímému záření anebo bude vhodně umístěn.

7 Závěr

Zvolené téma, zabývající se ultrazvukem a jeho využitím, v současné době je velmi široké a obsáhlé. Proto jsou v této práci uvedeny pouze základní principy a informace, týkající se fyzikálních vlastností a samotného využití ultrazvuku v průmyslu a lékařství, aby případný čtenář získal určitý přehled. Práce analyzuje problematiku ultrazvukových senzorů, jelikož se jedná o nejčastější využití ultrazvukových vln. Práce může posloužit jako pomůcka pro určení vhodného použití senzorů a vyvarování se nežádoucím situacím, které by například mohly zapříčinit chybu měření.

Ultrazvukový senzor, jak již bylo zmíněno v práci, se skládá ze sondy a dalších funkčních prvků, se kterými je možné například zobrazit vzdálenost zjišťovaného předmětu. Ultrazvukové senzory se především používají tam, kde nelze použít optické senzory. Samotné metody, používající se při měření, jsou většinou založeny na stejném principu (vyslání vlny a její přijetí měniči) už od doby, kdy se začínalo s aplikací ultrazvukových senzorů. Co se ovšem výrazně změnilo je samotná elektronika obsahující senzor, kdy je využíváno moderních a výkonnějších procesorů při vyhodnocování signálu. Samozřejmě, že pro každé použití se hodí jiný typ ultrazvukového senzoru. Ty se mohou lišit ve frekvenci, dosahu, úhlu a přesnosti snímání. Užití těchto senzorů se objevuje v mnoha odvětvích, a to např. i v zemědělství, kde se ultrazvukového senzoru využívá při aplikaci postřiků v ovocných sadech.

Na závěr práce jsou popsány výhody a nevýhody při použití ultrazvukových senzorů, ze kterých jsou patrné jejich silné a slabé stránky. Veškeré poznatky, ze kterých práce vychází, jsou z odborné literatury a technických webů, které většinou odkazují na odborné články v časopisech.

Cíl práce byl splněn, vzhledem k rozsahovému omezení. Možným rozšířením této práce by mohlo být samotné testování určitých senzorů a případné vytvoření laboratorní úlohy pro vysokoškolské nebo středoškolské použití.

8 Seznam použitých zdrojů

- [1]. Mudr. Evžen Čech, CSc. a spolupracovníci. *Ultrazvuk v lékařské diagnostice a terapii*. Praha : Avicenum - zdravotnické nakladatelství, 1982. 08-085-82.
- [2]. Ultrazvuk/Diagnostické aplikace ultrazvuku. *Wikiskripta*. [Online] 15. 12 2015. [Citace: 13. 3 2017.] http://www.wikiskripta.eu/index.php/Ultrazvuk/Diagnostick%C3%A9_aplikace_ultrazvuku.
- [3]. Martinek, Radislav. *SENZORY V PRŮMYSLOVÉ PRAXI*. Praha : BEN - technická literatura, 2004. ISBN 80-7300-114-4.
- [4]. Regazzo, Richard a Regazzová, Marcela. *Ultrazvuk - základy ultrazvukové defektoskopie*. Praha : BEN - technická literatura, 2013. ISBN 978-80-7300-466-8.
- [5]. Ing. Jaroslav Obraz, CSc. *Zkoušení materiálu ultrazvukem*. Praha : SNTL Nakladatelství technické literatury, 1989. ISBN 80-03-00097-1.
- [6]. —. *Ultrazvuk v měřicí technice*. Praha : SNTL - nakladatelství technické literatury, 1984. L13-B2-III-84f/22807.
- [7]. Kreidl, Marcel a Šmíd, Radislav. *Technická diagnostika*. Praha : BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-158-6.
- [8]. David, Jakub. Ultrazvukové vlnění. *Lékařské přístroje a zařízení*. [Online] [Citace: 13. 3 2017.] <https://sites.google.com/site/lpz2011123/zobrazovaci-metody/ultrazvuk/ultrazvukove-vlneni>.
- [9]. Dopplerův jev a rázová vlna. *Fyzweb*. [Online] [Citace: 13. 3 2017.] http://fyzweb.cz/materialy/aplety_hwang/Doppler/.
- [10]. Horák, Zdeněk a Krupka, František. *Fyzika: příručka pro vysoké školy technického směru*. Praha : SNTL - nakladatelství technické literatury, 1976. L11-C3-IV-41/17693.
- [11]. Doppler Shift Formula. *Tutorvista*. [Online] [Citace: 18. 3 2017.] <http://formulas.tutorvista.com/physics/doppler-shift-formula.html>.
- [12]. Ultrazvukové vlnění. *Wikiskripta*. [Online] 18. 2 2017. [Citace: 13. 3 2017.] http://www.wikiskripta.eu/index.php/Ultrazvukov%C3%A9_vln%C4%9Bn%C3%AD.
- [13]. Elektroakustická zařízení. *Roznovskastredni*. [Online] [Citace: 13. 3 2017.] <https://www.roznovskastredni.cz/~fuchs/download/Akustika.pdf>.
- [14]. Clonkové metody pro výzkum transparentních objektů. *ottp.fme.vutbr.cz*. [Online] [Citace: 13. 3 2017.] <http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/1200.htm>.
- [15]. Co se skrývá v ultrazvukové vyšetřovací sondě. *www.lf.upol.cz*. [Online] [Citace: 13. 3 2017.] http://www.lf.upol.cz/fileadmin/user_upload/LF-kliniky/hippokrat/Pracoviste/Biofyzika/01_Co_se_skriva_v_ultrazvukove_vysetrovaci_sonde.pdf.
- [16]. Biomedicínská technika. *Popular*. [Online] [Citace: 13. 3 2017.] <http://popular.fbmi.cvut.cz/biomedicina/Stranky/Ultrazvuk-5---Jake-typy-sond-existuji.aspx>.

- [17]. Lékařské využití - sonografie. *jtarchitekt*. [Online] [Citace: 18. 3 2017.] http://www.jtarchitekt.cz/lekarske_vyuziti.html.
- [18]. Prof. MUDr. Ivo Hrazdira, DrSc. Úvod do ultrasonografie. *www.med.muni.cz*. [Online] 2008. [Citace: 13. 3 2017.] http://www.med.muni.cz/dokumenty/pdf/uvod_do_ultrasonografie1.pdf.
- [19]. Mudr. Vlašín, Pavel. Nové možnosti využití ultrazvuku v prenatální péči. *Zdravotní medicína*. [Online] 5. 5 2008. [Citace: 13. 3 2017.] <http://zdravi.euro.cz/clanek/priloha-lekarske-listy/nove-moznosti-vyuziti-ultrazvuku-v-prenatalni-peci-358802>.
- [20]. Lékařská ultrasonografie. *wikipedia*. [Online] 6. 12 2016. [Citace: 13. 3 2017.] https://cs.wikipedia.org/wiki/L%C3%A9ka%C5%99sk%C3%A1_ultrasonografie#3D_m.C3.B3d.
- [21]. 3D/4D Ultrasound. *Gyn medico*. [Online] [Citace: 18. 3 2017.] <https://www.gynmedico.cz/sluzby/3d4d-ultrasound/?lang=en>.
- [22]. Ultrazvukové senzory. *Senzory pro průmysl*. [Online] [Citace: 13. 3 2017.] <http://www.senzory-pro-prumysl.cz/index.php/ultrazvukove-senzory>.
- [23]. Ultrazvukové snímače. *ajp-tech*. [Online] [Citace: 13. 3 2017.] <http://www.ajptech.cz/produkty/prumyslova-automatizace/baumer-senzory/snimace/ultrazvukove/>.
- [24]. Přehled ultrazvukového senzoru. *Pepperl Fuchs*. [Online] [Citace: 26. 3 2017.] http://www.pepperl-fuchs.cz/czech_republic/cs/16122.htm.
- [25]. Senzory polohy. *www.ib.cvut.cz*. [Online] [Citace: 13. 3 2017.] https://www.ib.cvut.cz/sites/default/files/Studijni_materialy/SZS/Senzory%20polohy.pdf.
- [26]. Ing. Šilhavý, Martin. Ultrazvukové měření výšky hladiny kapalin a pevných látek. *Automa*. [Online] 5 2005. [Citace: 13. 3 2017.] http://automa.cz/cz/casopis-clanky/ultrazvukove-mereni-vysky-hladiny-kapalin-a-pevných-latek-2001_05_33552_999/.
- [27]. Měření průtoku a proteklého množství. *uprt.vscht.cz*. [Online] [Citace: 17. 3 2017.] <http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/F4/F4k45-prut.htm>.
- [28]. Kadlec, Karel. Bezdotykové snímače provozních veličin. *Automa*. [Online] 11 2016. [Citace: 13. 3 2017.] http://www.automa.cz/cz/web-clanky/bezdotykove-snimace-provoznich-velicin-prednosti-a-omezeni-cast-1-0_9184/.
- [29]. Ultrazvukové průtokoměry. *Krohne*. [Online] [Citace: 18. 3 2017.] <http://cz.krohne.com/cs/vyrobky/mereni-prutoku/ultrazvukove-prutokomery/optisonic-7300/>.
- [30]. DYNASONICS ULTRASONIC FLOW METERS. *Shop cross*. [Online] [Citace: 18. 3 2017.] <https://www.shopcross.com/product/dynasonics-dufx1-flow-meter-small-pipe-transducer-03-30-fps>.
- [31]. Ing. Dostalík, Martin. Speciální případy použití ultrazvukových snímačů. *Automa*. [Online] 6 2009. [Citace: 13. 3 2017.] <http://www.automa.cz/SiteContent.aspx?params=L1NpdGVDb250ZW50LmFzcHg%2fcmlkPTcwMTg5JmFwcD1NYWluJmdycD1Db250ZW50Jm1vZD1NYWdhemluZXMmc3RhPU1h>

Z2F6aW5lQXJ0aWNsZUNvbnRlbnRXZWImcHN0PU1hZ2F6aW5lQXJ0aWNsZUNvbnRlbnRXZWImcDE9WWVhcl9TVFJJTkdfNTZVVmlWbkxIQlZZem4xZkd6.

[32]. Sonoflow CLAMP-ON sensor. *Sonotek*. [Online] [Citace: 18. 3 2017.] <http://www.sonotec.eu/products/non-invasive-fluid-monitoring/flow-rate-measurement/sonoflow-clamp-on-sensor/>.

[33]. Vojáček, Antonín. Novinka - Ultrazvukový snímač pro detekci tenkých listů papíru. *automatizace.hw.cz*. [Online] 24. 1 2010. [Citace: 13. 3 2017.] <http://automatizace.hw.cz/novinka-ultrazvukovy-snimac-pro-detekci-tenkych-listu-papiru>.

[34]. —. Ultrazvukové motory. *automatizace.hw.cz*. [Online] 28. 2 2007. [Citace: 18. 3 2017.] <http://automatizace.hw.cz/clanek/2007022801>.

[35]. Ultrasonic Motor (USM). *Canon*. [Online] [Citace: 18. 3 2017.] http://www.canon.com/technology/canon_tech/explanation/cp_tech.html.

[36]. Redakce_serveru_HW. Čištění ultrazvukem. *vyvoj.hw.cz*. [Online] 17. 5 2000. [Citace: 13. 3 2017.] <http://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/cisteni-ultrazvukem.html>.

[37]. Princip čištění ultrazvukem. *Ultrasonic cleaner*. [Online] [Citace: 13. 3 2017.] <http://www.ultrasonic-cleaner.cz/page/o-ultrazvuku/6>.

[38]. Digitální ultrazvuková čistička. *EkonoDent*. [Online] [Citace: 19. 3 2017.] <http://www.ekonodent.cz/ostatni-pristroje/digitalni-ultrazvukova-cisticka-db-4820>.

[39]. Ultrazvukové svařování plastů. *Ultratech*. [Online] 2014. [Citace: 18. 3 2017.] <http://ultratech.cz/ultrazvukove-aplikace/ultrazvukove-svarovani-plastu/>.

[40]. Ultrazvukové senzory na rozprašovacích tryskách. *Pepperl + Fuchs*. [Online] [Citace: 22. 3 2017.] http://www.pepperl-fuchs.cz/czech_republic/cs/23811.htm.

[41]. Ultrasonic sensor UC6000-30GM70-2E2R2-V15. *Pepperl + Fuchs*. [Online] [Citace: 22. 3 2017.] https://www.pepperl-fuchs.com/global/en/classid_186.htm?view=productdetails&prodid=51811.

9 Seznam obrázků

- Obr. 1 Zhušťování a zředňování částic vzduchu při vzniku ultrazvukové vlny*
Obr. 2 Tvary vlnoploch: a) rovinná vlna, b) válcová vlna, c) kulová vlna
Obr. 3 Podélné vlny
Obr. 4 Příčné vlny
Obr. 5 Povrchové (Rayleighovy) vlny
Obr. 6 Deskové (Lambovy) vlny
Obr. 7 Leveovy vlny
Obr. 8 Kolmý dopad na rozhraní
Obr. 9 Odraz vlny při šikmém dopadu na rozhraní
Obr. 10 Směrová vyzářovací charakteristika ultrazvukového senzoru
Obr. 11 Snímací charakteristika ultrazvukového senzoru pro různé
Obr. 12 Dopplerův jev
Obr. 13 Typy sond: Lineární, konvexní, sektorová
Obr. 14 3D ultrazvukové zobrazení plodu
Obr. 15 Typy ultrazvukových senzorů
Obr. 16 Definice rozsahů ultrazvukového senzoru
Obr. 17 Zjednodušený časový průběh budícího napětí jednosystémového měniče
Obr. 18 Měření výšky hladiny v silu
Obr. 19 Průtokoměry s vyhodnocením doby průchodu signálu
Obr. 20 Průtokoměr založený na Dopplerově jevu
Obr. 21 Snímač průtoku SonoFlow
Obr. 22 Ultrazvukový snímač pro detekci tenkých listů papíru
Obr. 23 Princip ultrazvukového motoru
Obr. 24 Ultrazvuková čistička
Obr. 25 Princip svařování ultrazvukem
Obr. 26 Průchodová metoda a) kontaktní vazba, b) bezkontaktní vazba
Obr. 27 Odrazová impulzová metoda: a) kontaktní vazba, b) bezkontaktní vazba, c) imerzní vazba
Obr. 28 Ultrazvukový senzor při aplikaci pesticidů