



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

FEM MODEL ULTRAZVUKOVÉHO SENZORU HLADINY OLEJE

NUMERICAL MODEL OF ULTRASONIC OIL LEVEL SENSOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Pavel Chutný

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Vyroubal, Ph.D.

BRNO 2017

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektrotechnická výroba a materiálové inženýrství**

Ústav elektrotechnologie

Student: Bc. Pavel Chutný **ID:** 151645 **Ročník:** 2 **Akademický rok:** 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

FEM model ultrazvukového senzoru hladiny oleje

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se a nastudujte teorii ultrazvukového vlnění a vytvořte konečněprvkový numerický model šíření ultrazvuku na rozhraní vzduch/olej, který by byl použitelný pro návrh ultrazvukových senzorů hladiny oleje v automobilu. Proměřte teplotní závislost rychlosti šíření ultrazvuku ve vybraných typech olejů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 6.2.2017

Termín odevzdání: 25.5.2017

Vedoucí práce: Ing. Petr Vyroubal, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.

předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Diplomová práce ověřuje pomocí numerického modelu fyzikální princip šíření ultrazvuku různými tekutinami. Nejprve je rozebírána problematika ultrazvukových vln. Druhá část teorie se věnuje motorovým olejům. Dále se práce zabývá rovnicemi potřebnými k počítačovému modelování. V praktické části je na všeobecně známých tekutinách (voda, vzduch) odzkoušen numerický model hladinoměru. Výsledky laboratorního měření rychlosti šíření ultrazvuku v oleji v závislosti na teplotě jsou poté aplikovány na navrhnutý numerický model senzoru, který je následně optimalizován.

KLÍČOVÁ SLOVA

ANSYS, Hladinoměr, Kmitavý pohyb, Numerický model, Olej, Teplota, Ultrazvuk

ABSTRACT

This master's thesis verifies physical principle of ultrasound in fluids by numerical model. At first, ultrasound study is ment. In second theoretical part, diferent kind of motor oils are described. Next, equations for numerical simulation are presented. In practical part, numerical model of level sensor is examined in well-knowed fluids (water, air). Results of laboratory measurement on the topic of ultrasound velocity in oil, that dependent on temperature, are aplicated on numerical model of sensor and optimized.

KEYWORDS

ANSYS, Level sensor, Oscillatory motion, Numerical model, Oil, Temperature, Ultrasound

Děkuji za dar života!!!

Bibliografická citace:

CHUTNÝ, P. *FEM model ultrazvukového senzoru hladiny oleje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 82 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Vyroubal, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Numerický model ultrazvukového senzoru hladiny oleje jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrální práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu použité literatury na konci práce.

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

Ve Štěpánovicích dne 25.5.2017

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Vyroubalovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování diplomové práce.

V Brně dne 25.5.2017

.....
podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	7
ÚVOD	9
1. ULTRAZVUKOVÉ VLNĚNÍ	13
1.1. HISTORIE ULTRAZVUKU	13
1.2. DRUHY ULTRAZVUKOVÝCH VLN	15
1.3. RYCHLOST ŠÍŘENÍ ULTRAZVUKU	16
1.4. LOM ULTRAZVUKU	16
1.5. ULTRAZVUKOVÉ SONDY	17
1.6. KMITAVÝ POHYB	19
1.7. FYZIKÁLNÍ VELIČINY POPISUJÍCÍ ULTRAZVUK	20
1.8. NAVIER-STOKESOVA ROVNICE	22
2. MOTOROVÉ OLEJE	26
2.1. DRUHY OLEJŮ	27
2.2. SLOŽENÍ MOTOROVÉHO OLEJE	27
2.3. VSKOZITNÍ KLASIFIKACE OLEJŮ	28
2.4. VÝKONNOSTNÍ KLASIFIKACE OLEJŮ	28
2.5. NEŽÁDOUCÍCH LÁTKY V OLEJE	30
2.6. KONTROLA MNOŽSTVÍ OLEJE	31
3. LABORATORNÍ MĚŘENÍ	34
3.1. ULTRAZVUKOVÉ ZAŘÍZENÍ	34
3.2. MĚŘENÍ TLOUŠTKY	35
3.3. MĚŘENÍ RYCHLOSTI ŠÍŘENÍ ZVUKU V MATERIÁLECH	35
3.4. MĚŘENÍ RYCHLOSTI ŠÍŘENÍ ULTRAZVUKU V OLEJI	36
4. MODELOVÁNÍ V ANSYS	40
4.1. METODA KONEČNÝCH PRVKŮ	40
4.2. AKUSTICKÁ ANALÝZA	41
4.3. PŘÍPRAVA NUMERICKÉHO MODELU	44
4.4. ŠÍŘENÍ ULTRAZVUKU VE VODĚ	47
4.5. ROZHRANÍ VODA/VZDUCH	52
4.6. ROZHRANÍ VZDUCH/VODA	55
4.7. ŠÍŘENÍ ULTRAZVUKU VE VZDUCHU	56
4.8. MODEL S REFERENCÍ	64
4.9. ŠÍŘENÍ ULTRAZVUKU V OLEJI	68
4.10. VYHODNOCOVACÍ OBVOD	71
5. ZÁVĚR	74
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	76
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	78
PŘÍLOHA A: RYCHLOSTI ZVUKU	79
PŘÍLOHA B: ZRYCHLENÍ	80
PŘÍLOHA C: AKUSTICKÝ TLAK	81
PŘÍLOHA D: SENZOR	82

Seznam obrázků

OBRÁZEK 1. CESTA ULTRAZVUKOVÉHO SIGNÁLU (PŘEVZATO Z [8]).....	10
OBRÁZEK 2. ULTRAZVUKOVÝ HLADINOMĚR (PŘEVZATO Z [8]).....	11
OBRÁZEK 3. ZÁVISLOST ŠÍŘENÍ ZVUKU VE VZDUCHU NA TEPLITĚ (PŘEVZATO Z [12] A UPRAVENO).....	16
OBRÁZEK 4. ZÁKLADNÍ DRUHY ZOBRAZENÍ ULTRAZVUKOVÝCH SIGNÁLŮ (PŘEVZATO Z [16]).....	17
OBRÁZEK 5. VELIKOST VÝCHYLKY KMITAJÍCÍ ČÁSTICE V ZÁVISLOSTI NA ČASE (PŘEVZATO Z [9]).....	19
OBRÁZEK 6. ŠÍŘENÍ ULTRAZVUKU (PŘEVZATO Z [14]).....	21
OBRÁZEK 7. TEPLOTA OLEJE V RŮZNÝCH ČÁSTECH MOTORU.....	26
OBRÁZEK 8. MĚRKA K URČENÍ STAVU HLADINY OLEJE.....	32
OBRÁZEK 9. SNÍMAČ HLADINY A TEPLITY OLEJE (PŘEVZATO Z [2]).....	32
OBRÁZEK 10. OVLÁDÁNÍ PŘÍSTROJE EPOCH LT (PŘEVZATO Z [16]).....	34
OBRÁZEK 11. ZÁVISLOST RYCHLOSTI ŠÍŘENÍ ULTRAZVUKU NA TEPLITĚ PRO OLEJ TYPU 5W-30.....	37
OBRÁZEK 12. ZÁVISLOST RYCHLOSTI ŠÍŘENÍ ULTRAZVUKU NA TEPLITĚ PRO OLEJ TYPU 15W-40.....	38
OBRÁZEK 13. ZÁVISLOST RYCHLOSTI ŠÍŘENÍ ULTRAZVUKU NA TEPLITĚ PRO HYDRAULICKÝ OLEJ.....	39
OBRÁZEK 14. TYP ZDROJOVÉHO VLNĚNÍ - SFÉRICKÉ, CYLINDRICKÉ A ROVINNÉ (PŘEVZATO Z [6]).....	42
OBRÁZEK 15. PRVEK FLUID 221 (PŘEVZATO Z [13]).....	43
OBRÁZEK 16. TRANZIENTNÍ ÚLOHA S PARAMETREM.....	44
OBRÁZEK 17. HEX20 (PŘEVZATO Z [6]).....	45
OBRÁZEK 18. NAVRŽENÝ 3D MODEL A JEHO PSUDO 2D ZJEDNODUŠENÍ (PLNÁ NÁDRŽ).....	45
OBRÁZEK 19. ROZMĚRY POUŽÍVANÉ NÁDOBY [MM] - POHLED SHORA.....	47
OBRÁZEK 20. ROZLOŽENÍ OKRAJOVÝCH PODMÍNEK.....	47
OBRÁZEK 21. ZRYCHLENÍ KMITAJÍCÍ ČÁSTICE PRO VLNĚNÍ 50 KHz.....	48
OBRÁZEK 22. AKUSTICKÝ TLAK NA ZAČÁTKU MODELOVÁNÍ (V ČASE $0,5 \cdot 10^{-5}$ s A $1,5 \cdot 10^{-5}$ s).....	48
OBRÁZEK 23. ROZLOŽENÍ AKUSTICKÉHO TLAKU NA KONCI MODELOVÁNÍ.....	49
OBRÁZEK 24. TLAKOVÁ KŘIVKA PRO 50 KHz.....	49
OBRÁZEK 25. PRŮBĚH AKUSTICKÉHO TLAKU V MÍSTĚ PŘILOŽENÍ SONDY.....	50
OBRÁZEK 26. AKUSTICKÝ TLAK V ČASE $3,4 \cdot 10^{-6}$ s.....	50
OBRÁZEK 27. AKUSTICKÝ TLAK V ČASE $9,9 \cdot 10^{-6}$ s.....	51
OBRÁZEK 28. AKUSTICKÝ TLAK V ČASE $1,5 \cdot 10^{-5}$ s.....	51
OBRÁZEK 29. AKUSTICKÝ TLAK V ČASE $1,8 \cdot 10^{-5}$ s.....	51
OBRÁZEK 30. AKUSTICKÝ TLAK V ČASE $2,5 \cdot 10^{-5}$ s.....	52
OBRÁZEK 31. AKUSTICKÝ TLAK V ČASE $3,3 \cdot 10^{-5}$ s.....	52
OBRÁZEK 32. AKUSTICKÝ TLAK VE VODĚ V ČASE $2 \cdot 10^{-5}$ s.....	52
OBRÁZEK 33. AKUSTICKÝ TLAK VE VZDUCHU V ČASE $2 \cdot 10^{-5}$ s.....	53
OBRÁZEK 34. AKUSTICKÝ TLAK VE VODĚ V ČASE $3,4 \cdot 10^{-5}$ s.....	53
OBRÁZEK 35. AKUSTICKÝ TLAK VE VZDUCHU V ČASE $3,4 \cdot 10^{-5}$ s.....	53
OBRÁZEK 36. AKUSTICKÝ TLAK VE VODĚ V ČASE $4,8 \cdot 10^{-5}$ s.....	53
OBRÁZEK 37. AKUSTICKÝ TLAK VE VZDUCHU V ČASE $4,8 \cdot 10^{-5}$ s.....	54
OBRÁZEK 38. AKUSTICKÝ TLAK VE VODĚ V ČASE $6,5 \cdot 10^{-5}$ s.....	54
OBRÁZEK 39. AKUSTICKÝ TLAK VE VZDUCHU V ČASE $6,5 \cdot 10^{-5}$ s.....	54
OBRÁZEK 40. ROZHRANÍ VZDUCH (DOLE) A VODA (NAHOŘE) V ČASE $3,4 \cdot 10^{-4}$ s.....	55
OBRÁZEK 41. ZÁKLADNÍ ROZMĚRY SENZORU [MM].....	56
OBRÁZEK 42. ŘEZ MĚŘICÍM ZAŘÍZENÍM.....	57
OBRÁZEK 43. ZDROJ ULTRAZVUKOVÉHO VLNĚNÍ.....	57
OBRÁZEK 44. ŠÍŘENÍ ULTRAZVUKU VE VZDUCHU V ČASE $3,107 \cdot 10^{-5}$ s.....	58
OBRÁZEK 45. VLNA NA ROZHRANÍ VZDUCH/OLEJ V ČASE $5,3107 \cdot 10^{-5}$	58
OBRÁZEK 46. ULTRAZVUKOVÉ VLNĚNÍ VE VZDUCHU V DOBĚ DETEKCE ODEZVY, V ČASE $9,91 \cdot 10^{-5}$	58
OBRÁZEK 47. HODNOTY TLAKU V MÍSTĚ PIEZOELEKTRICKÉHO KRYSTALU.....	59
OBRÁZEK 48. HODNOTY TLAKU V MÍSTĚ PIEZOELEKTRICKÉHO KRYSTALU U 2D MODELU.....	59
OBRÁZEK 49. ULTRAZVUKOVÉ VLNĚNÍ V ČASE $2 \cdot 10^{-5}$ s.....	60
OBRÁZEK 50. ULTRAZVUKOVÉ VLNĚNÍ V ČASE 10^{-4} s.....	60

OBRÁZEK 51. ULTRAZVUKOVÉ VLNĚNÍ V ČASE $1,6 \cdot 10^{-4}$ s	60
OBRÁZEK 52. ULTRAZVUKOVÉ VLNĚNÍ V ČASE $2 \cdot 10^{-4}$ s	61
OBRÁZEK 53. ULTRAZVUKOVÉ VLNĚNÍ V ČASE $1,6 \cdot 10^{-4}$ s	61
OBRÁZEK 54. HODNOTY TLAKU V MÍSTĚ PIEZOELEKTRICKÉHO KRYSTALU PRO HLADINU 82,8 MM	61
OBRÁZEK 55. VÝŘEZ Z GRAFU NAHOŘE V ČASE DETEKOVÁNÍ ODEZVY	62
OBRÁZEK 56. MINIMÁLNÍ MĚŘENÁ HLADINA OLEJE, KOEFICIENT ABSORPCE 0.8	62
OBRÁZEK 57. OVĚŘOVÁNÍ KOEFICIENTU ABSORPCE BOČNÍCH STĚN	62
OBRÁZEK 58. VÝŘEZ V ČASE DETEKCE	63
OBRÁZEK 59. PLNÝ STAV OLEJE V NÁDRŽI	64
OBRÁZEK 60. ODRAZ VLNĚNÍ NA REFERENČNÍM VÝSTUPKU	65
OBRÁZEK 61. VRACEJÍCÍ SE ODRAŽENÉ VLNY ZPĚT KE ZDROJI VLNĚNÍ	65
OBRÁZEK 62. HLADINA OLEJE 10 MM POD NAPLNĚNÝM STAVEM	66
OBRÁZEK 63. POKLES HLADINY O 50 MM	66
OBRÁZEK 64. GRADIENT VYSLANÉHO IMPULSU A VLNY ODRAŽENÉ OD REFERENČNÍHO VÝSTUPKU	67
OBRÁZEK 65. TLAKOVÝ GRADIENT V MÍSTĚ DETEKTORU	67
OBRÁZEK 66. ŠÍŘENÍ ULTRAZVUKU SKRZE OLEJ	68
OBRÁZEK 67. HLADINA OLEJE NA MINIMÁLNÍM MĚŘITELNÉM STAVU	70
OBRÁZEK 68. ODRAŽENÉ ULTRAZVUKOVÉ VLNĚNÍ	70
OBRÁZEK 69. HLADINA OLEJE NA MAXIMÁLNÍM MĚŘITELNÉM STAVU (VÝŘEZ V ČASE DETEKCE)	71
OBRÁZEK 70. NÁHRADNÍ SCHÉMA ULTRAZVUKOVÉHO MĚNIČ - ZDE PRO VYSÍLANOU FREKVENCÍ 40 KHz (PŘEVZATO Z [1])	71
OBRÁZEK 71. OBVOD DIFERENCIÁLNÍHO ZESILOVAČE (PŘEVZATO Z [1])	72
OBRÁZEK 72. VSTUPNÍ KOMPARÁTOR (PŘEVZATO Z [1])	72

Úvod

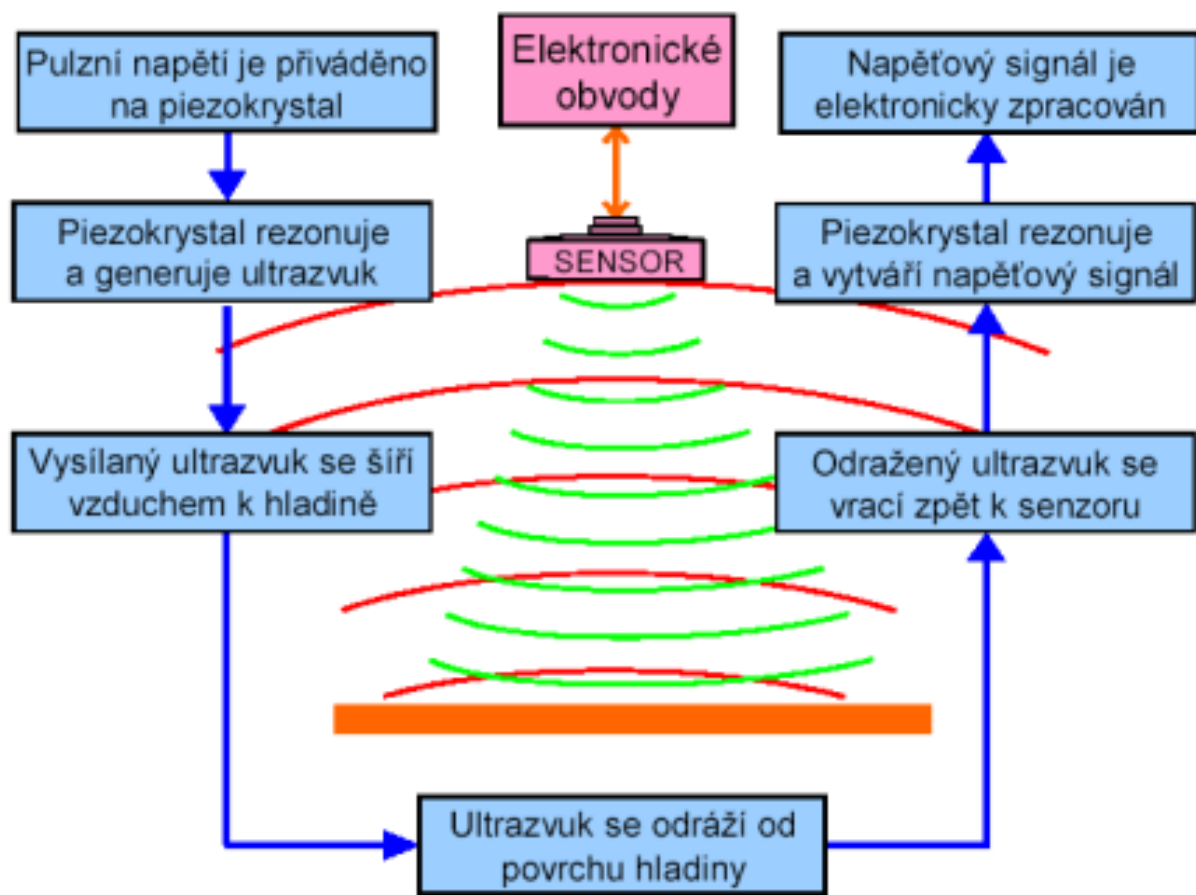
Ke zjišťování výšky hladiny měřeného média (kapalina nebo sypký materiál) lze využít různé typy snímačů. Volba snímače hladiny závisí na vlastnostech měřeného média, dále je třeba uvažovat vliv okolního prostředí (teplota, tlak, korozivní účinky, míchání) a požadovaný způsob zpracování informace. Snímače hladiny, z hlediska technického principu, se rozdělují:

- Mechanické hladinoměry – plovákové hladinoměry, hladinoměry s ponorným tělesem, vibrační a vrtulkové snímače
- Hydrostatické hladinoměry – přímé měření hydrostatického tlaku, měření s probubláváním
- Elektrické hladinoměry – vodivostní, kapacitní, fotoelektrické
- Fyzikální hladinoměry – ultrazvukové, radarové, s radioaktivním zářičem, s měřením přenosu tepla

Tato diplomová práce si klade za cíl seznámit čtenáře s ultrazvukovým senzorem. Nejprve je vysvětlen jeho základní princip měření. Jelikož využívá ultrazvukové vlnění, je tato problematika rozebrána od základních poznatků až po složitý matematický popis za pomoci diferenciálních rovnic, které se využívají při počítačovém modelování šíření ultrazvuku vybraným prostředím.

V praktické části jsou popsány možnosti reálného měření pomocí dostupného ultrazvukového zařízení od firmy Olympus. V rámci laboratorního měření jsou vytvořeny grafy závislosti rychlosti šíření ultrazvuku na teplotě pro daný typ oleje vždy pro nový a použitý stejného druhu. Věrohodnost výsledků počítačového modelování v oblasti ultrazvukového vlnění je nejprve odzkoušena na jednoduchém numerickém modelu hloubkoměru pro velmi dobře známá prostředí (voda, vzduch). Na základě dosažených výsledků je navrhnout numerický model senzoru a optimalizován pro měření hladiny oleje.

Ultrazvukový senzor hladiny je tvořen generátorem a vysílačem ultrazvukového signálu, přijímačem ultrazvuku a zesilovačem signálu a následným elektronickým vyhodnocovacím zařízením. V praxi jsou často konstruovány senzory, u kterých generátor i přijímač ultrazvuku je jedna tatáž součástka, ve většině případů se zde jedná o piezoelektrický krystal.



Obrázek 1. Cesta ultrazvukového signálu (převzato z [11]/[9])

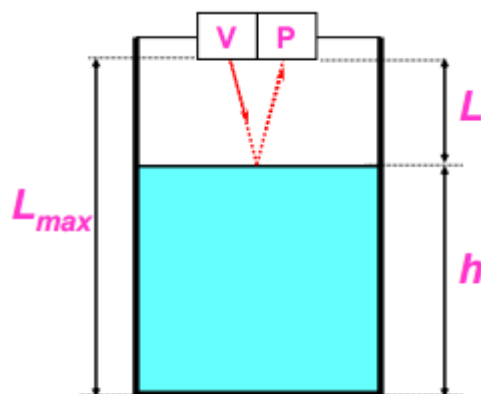
Ultrazvukové hladinoměry využívají znalost šíření rychlosti zvuku prostředím, které se nachází mezi měřicím přístrojem a měřenou hladinou (ve většině případů vzduch, $v = 343 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Vzdálenost L přístroje od hladiny je určena z času t , který uplyne mezi vysláním a detekcí ultrazvukového vlnění.

$$L = \frac{v \cdot t}{2} \quad (1)$$

Vypočítaná dráha, kterou vlnění v čase t urazilo, se musí podělit dvěma, protože tento čas je měřen až do doby detekce odezvy, která je zaznamenána stejným přístrojem, kterým byl impuls vyslán. Z toho vyplývá, že vlnění urazilo měřenou vzdálenost v podstatě dvakrát. Pokud dojde k odečtení změřené vzdálenosti od maximální hloubky nádoby (vzdálenost mezi přístrojem a dnem nádoby), tak se stanoví výška hladiny.

$$h = L_{\text{Max}} - \frac{v \cdot t}{2} \quad (2)$$

Ovlivňujícími veličinami při tomto měření jsou hustota prostředí, teplota, přítomnost míchadla či případná pěna na hladině.



Obrázek 2. Ultrazvukový hladinoměr (převzato z[11])

Úkolem simulačního programu je zjistit, jak se bude systém chovat v případě jasně zadaných vstupních parametrů (počáteční a okrajové podmínky). Při opakovaném zadávání různých vstupních parametrů lze nalézt optimální řešení problému v poměrně krátkém čase a za vynaložení nižších finančních prostředků na optimalizaci než při provádění reálných experimentů, které v jistých případech nelze ani uskutečnit.

I. Teoretická část

1. Ultrazvukové vlnění

S jevem zvaným ultrazvuk se pravděpodobně každý setkal již na základní škole v rámci předmětu Fyzika. Je snad všeobecně známo, že ke svému šíření potřebuje prostředí, ve kterém se vyskytují částice – ve vakuu se šířit nebude. Podle frekvence kmitání částic se vlnění nazývá:

- Hyperzvuk (nad 1 GHz)
- Ultrazvuk (1 GHz – 20 kHz)
- Zvuk – slyšitelné pásmo (20 kHz – 20 Hz)
- Infrazvuk (pod 20 Hz)

Podle použité intenzity se ultrazvuk dělí na aktivní a pasivní. Aktivní ultrazvuk umí obrábět a čistit součásti, vrtat a svařovat materiály a používá se i v lékařské terapii. Pasivní ultrazvuk pak zahrnuje všechny oblasti použití, kde ultrazvukové vlnění dosahuje takovou intenzitu, která nevyvolává žádné fyzikální změny v prostředí, ve kterém se šíří. Pasivní ultrazvuk se svými malými intenzitami je vhodný pro měřicí a diagnostické účely.

Jako zdroj ultrazvuku lze využít generátory aerodynamické, hydrodynamické, elektromagnetické, elektrodynamické, elektrostatické, magnetostrikční a elektrostriční.

1.1. Historie ultrazvuku

Existence zvukových vln, které lidské ucho neslyší, je známa mnoho let. Již v roce 1794 uvedl italský vědec Lazzaro Spallanzani v knize „Opus coli di fisica“ teorii, ve které vysvětluje schopnosti netopýrů létat v kostelních věžích za tmy, aniž narazí na překážku. Tato schopnost podle něho nezávisí na zraku, ale záleží na využití dosud neznámých zvukových vibrací, které člověk neslyší. Tuto geniální myšlenku potvrdili svými výzkumy u netopýrů Gallambos (1942) a Griffin (1944) až o 250 let později. Další cenné zjištění učinil v roce 1880 Galton, který zkonstruoval speciální píšťalu, jejíž zvukovou frekvenci 40 kHz registrovali psi, ale neslyšel je člověk, poněvadž lidské ucho je schopno vnímat frekvenci zvuku pouze pod hranici 16 kHz. V téže roce bratři Pierre a Jacques Curie objevili a popsali piezoelektrický jev, to je vznik volného náboje na povrchu některých krystalů při jejich mechanické deformaci. Tento velmi důležitý objev dovršili o rok později po teoretickém předpokladu Lippmanna (1881), kdy zjistili nepřímý piezoelektrický jev, při kterém se naopak krystal deformuje přivedením elektrického náboje na jeho povrch. Tak byl dán základ pro konstrukci přístrojů, které vytvářejí a registrují vysoké ultrazvukové frekvence.[7]

Dalších 30 let však bylo tomuto důležitému objevu věnováno velmi málo pozornosti. Až v roce 1912 patentoval Richardson po známé námořní katastrofě Titanicu bezpečnostní zařízení, signalizující na principu ultrazvuku volně plující ledovce. V období 1. světové války se stal ultrazvuk především na základě prací Francouze Paula Langevina (1916) detektorem, který užívala britská a francouzská admirálita pod názvem ASDIC (Anti Submarine Detection Investigation Committee) v boji proti německým ponorkám. Tento vynález značně ovlivnil směr vývoje mírového využití ultrazvuku mezi oběma světovými válkami. Stal se základem pro vývoj hloubkoměru, signalizátoru tahu

ryb i námořních bezpečnostních a dorozumívacích zařízení. Ve 2. světové válce bylo uvedeno do praxe značně zdokonalené ultrazvukové detekční zařízení pod názvem SONAR (Sound Navigation and Ranging).[7]

Velký zvrat ve využití ultrazvuku přinesly výzkumy ruského vědce Sokolova, který se stal v roce 1929 zakladatelem ultrazvukové defektoskopie. Nejprve zavedl metodu průchodovou a v roce 1934 metodu impulsní odrazovou. První ultrazvukový impulsní defektoskop pro použití v praxi nedestruktivního zkoušení sestrojil v roce 1940 Američan Firestone.[7]

Rozšíření ultrazvukové zkušební metody bylo ovlivněno významným objevem Jaffeho, který v roce 1955 vyvinul syntetický piezoelektrický materiál. Tyto keramické materiály nahradily přírodní krystaly a umožnily výrobu výkonných a citlivých ultrazvukových měničů. Rozvoj nauky o ultrazvuku v letech následujících byl rychlý a intenzivní. Technika zobrazování ultrazvuku se neustále zlepšovala a vývoj směřoval ke kvantitativnímu hodnocení. V roce 1958 vyvinul Josef Krautkrämer AVG diagram, který se stal základem kvantitativního hodnocení vad v rutinním zkoušení. Firma Krautkrämer se stala počátkem 60. let celosvětovým leaderem a drží tuto pozici až dodnes, i když pod hlavičkou GE.[7]

V průběhu dalších let došlo k množství skokových změn ve využití ultrazvukové techniky, což umožnila digitální technologie, miniaturizace v elektronice a softwarové počítačové systémy. V posledních letech, díky snaze výrobních podniků čím dál tím více vylepšovat kvalitu svých produktů, našel ultrazvuk své opodstatněné místo v průmyslových oblastech díky nedestruktivnímu zkoušení. Nedestruktivní zkoušení ultrazvukem vzniklo z potřeby zjišťovat skryté vnitřní defekty rozměrných odlitků, které bylo obtížné prozařovat rentgenem a u kterých tyto defekty mohly vést k haváriím konečných produktů.[7]

Mimo nedestruktivní zkoušení hraje ultrazvuková diagnostika důležitou roli i v lékařství, kde se nejčastěji používá k vyšetřování orgánů nacházejících se uvnitř trupu a také k určení pohlaví lidského plodu. V dnešní době se ultrazvuk využívá také ke sterilizaci vody či mléka a k čištění předmětů. Čištění ultrazvukem je založeno na principu kavitace, což je mechanické narušování povrchu způsobené prudkým nárazem částic okolní tekutiny na povrch předmětu. Při ultrazvukovém svařování se do místa styku dvou materiálů zavede intenzivní ultrazvukové pole za současného působení malého tlaku. Vzniklé teplo tyto materiály nataví a díky malému tlaku následně dojde ke spojení. Pevnost sváru dosahuje až 95 % pevnosti vlastního svařovaného materiálu.

S rozvojem technologií nachází ultrazvukové vlnění uplatnění i ve sféře senzorů. Například v dnešní době již není žádnou novinkou využívat při parkování senzor, který určuje vzdálenost překážek na základě odraženého ultrazvukového vlnění. Toto měření je založeno na vyhodnocování ultrazvukových ozvěn, které nastanou po vyslání určitého impulsu, který nesmí být příliš dlouhý. K tomuto účelu se obvykle používá ultrazvukové vlnění o frekvenci daleko větší než 50 kHz.[7]

1.2. Druhy ultrazvukových vln

Částice prostředí, kterým postupuje ultrazvukové vlnění, mohou kmitat v různých směrech. Pokud se tak děje ve směru šíření vlny, pak hovoříme o podélném (longitudinálním) vlnění.[7]

V prostředí, kde se podélné vlny šíří, vznikají tahové a tlakové síly, protože částice se střídavě od sebe oddalují a přibližují. Podélné vlnění se může šířit v dostatečně pružném tuhém, kapalném i plynném prostředí.[7]

Druhým typem mechanického vlnění je vlnění příčné (transverzální), při kterém částice kmitají kolmo na směr postupu vlny. Příčné vlnění se může šířit jenom v takovém prostředí, které je schopné přenášet smykové síly, proto se nešíří v kapalinách ani v plynech, ale jenom v tuhých látkách. Rychlost příčné vlny je pro daný materiál vždy menší než rychlost vlny podélné.[7]

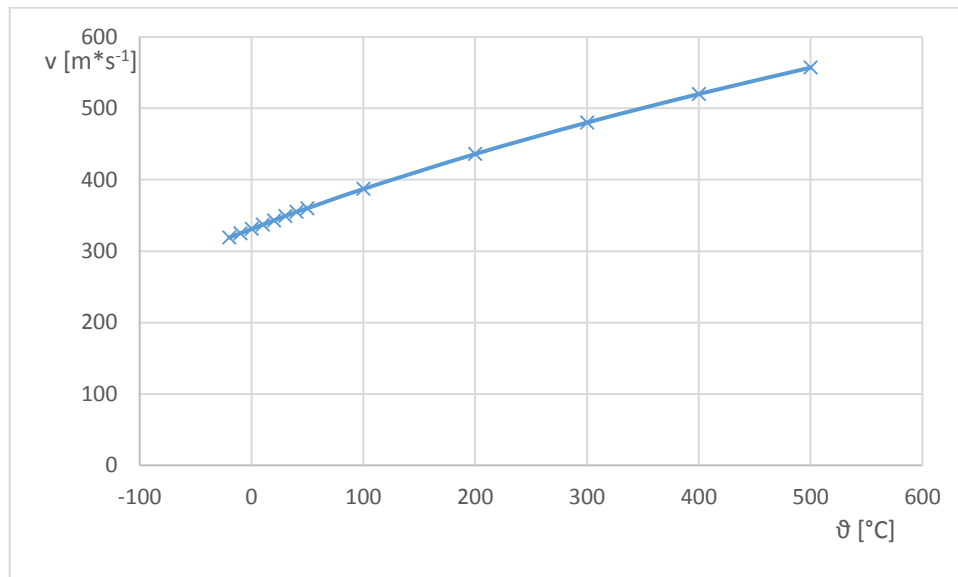
Na povrchu a těsně pod ním asi do hloubky jedné vlnové délky se může šířit tzv. povrchové (Rayleighovo) vlnění, při kterém částice kmitají v rovině kolmé na směr šíření vlny – v této rovině opisují elipsu. Amplituda povrchové vlny s narůstající hloubkou velmi rychle klesá. Její rychlost je 0,8 až 0,9 krát menší než rychlost příčné vlny.[7]

V materiálech, jejichž tloušťka je srovnatelná s vlnovou délkou, mohou vznikat tzv. deskové vlny. Ty se dále dělí na vlny dilatační a ohybové. V obou případech částice na povrchu kmitají stejně jako u povrchové vlny. Avšak částice uprostřed u dilatačního vlnění kmitají stejně jako u povrchových vln, u vlnění ohybového pak stejně jako u transversálních vln. Rychlost deskových vln je závislá na frekvenci a tloušťce materiálu, ve kterém se šíří.[7]

Při šíření vlnění může nastat situace, kdy dojde na jednom místě ke střetu dvou vln, které se šíří různými směry. V tomto případě jsou částice v místě střetu nucené kmitat tak, aby jejich výchylka a směr kmitání byly vektorovým součtem výchylek, které by v tomto místě každá z těchto vln samostatně. Směr a velikost rychlosti šíření obou vln se přitom nezmění. Tento fyzikální jev se nazývá interference vlnění.[7]

1.3. Rychlost šíření ultrazvuku

Rychlost šíření ultrazvuku v tuhých látkách závisí na modulu pružnosti, měrné hmotnosti a Poissonově čísle. Pro daný materiál a druh vlnění je rychlost šíření ultrazvuku konstantní. V kapalných látkách se může šířit pouze podélné vlnění – rychlost je závislá na koeficientu adiabatické stlačitelnosti kapaliny, měrné hmotnosti kapaliny a v menší míře na teplotě.



Obrázek 3. Závislost šíření zvuku ve vzduchu na teplotě (převzato z [12] a upraveno)

Rušivý jev nastává při lokálních změnách vlastností vzduchu. Lokální rozdíly teploty vytvářejí teplotní gradienty, ve kterých se zvuková vlna ohýbá. Důsledkem lokálních rozdílů tlaku je proudění, které deformuje, nebo úplně rozbijí zvukovou vlnu.

Rychlost šíření se mimo jiné využívá pro výpočet akustického vlnového odporu, který se významně uplatňuje při přechodu ultrazvuku z jednoho prostředí do druhého – je na něm závislý akustický tlak jak odraženého, tak i procházejícího vlnění.

1.4. Lom ultrazvuku

Pokud ultrazvuková vlna nedopadá na rozhraní kolmo, tak dochází kromě odrazu pod stejným úhlem také ke změně směru šíření procházejícího vlnění. Pro lom platí obecně známý Snellův zákon,

$$\frac{\sin \beta}{v_2} = \frac{\sin \alpha}{v_1} \quad (3)$$

kde v je rychlost šíření ultrazvuku v daném prostředí.

Amplituda akustického tlaku vln vzniklých z původní dopadající podélné vlny závisí na úhlu dopadu této vlny. Pokud nastává lom od kolmice (šíření z akusticky hustšího do

řidšího prostředí), tak po překročení mezního úhlu dopadu pak nastává už pouze totální odraz a žádné vlnění do druhého prostředí neprochází.

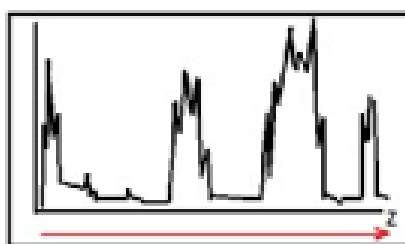
Při šíření vlny se se zvětšující se vzdáleností od sondy zmenšuje akustický tlak. To je způsobené tím, že energie vlny se rozděluje do čím dál většího prostoru a také energetickými ztrátami při šíření. K těmto energetickým ztrátám dochází dvěma způsoby:

1. Rozptylem na mikroskopických rozhraních - zrna struktury v oceli
2. Absorpcí – pohlcování energie vlnění vnitřním třením kmitajících částic

Čím více se vlnová délka blíží k rozměru zrn, tím je útlum větší. Materiály hrubozrnné (litina nebo austenitická ocel), mají výrazně větší útlum než materiály jemnozrnné. Absorpce se výrazně uplatňuje především u látek na bázi umělé hmoty. Obě složky útlumu rostou se zvyšující se frekvencí vlnění. Schopnost materiálu tlumit ultrazvuk se vyjadřuje koeficientem útlumu α , který vyjadřuje pokles akustického tlaku v dB na jednotku délky (dB/mm). Například pro šíření vlnění o frekvenci 2 MHz ve vodě je koeficient útlumu stanoven na hodnotě 0,0005.[7]

1.5. Ultrazvukové sondy

Součástí každého ultrazvukového defektoskopického zařízení je prvek, který zajišťuje vysílání vlnění do zkoumaného materiálu a následně detekuje odražené vlny. Tyto sondy musí umět vysílat vlnění v určitém frekvenčním rozmezí, aby bylo možné zobrazit co nejjemnější struktury, pokud zjišťujeme drobné vady blízko povrchu, nebo zase naopak, aby nám bylo umožněno dosáhnout i větších hloubek při použití vln o nižších frekvencích. Důležitým parametrem při zobrazování je poměr signálu k šumu.



A - zobrazení



B - zobrazení

Obrázek 4. Základní druhy zobrazení ultrazvukových signálů (převzato z [15])

Podle způsobu generování ultrazvuku můžeme sondy rozdělit na[7]:

- sondy využívající piezoelektrický měnič
- sondy s magnetostrikčním měničem
- sondy s elektrodynamickým měničem

Jelikož při praktickém měření je používán ultrazvukový přístroj se sondou s piezoelektrickým měničem, protože si jej lze jednoduše zapůjčit na ústavu elektrotechnologie FEKT VUT v Brně, bude v následujícím textu podrobněji popsán pouze tento typ sondy.

Sonda s piezoelektrickým měničem obsahuje destičku z piezoelektrického materiálu, který jako reakci na elektrické impulzy generuje podélnou ultrazvukovou vlnu, jejichž frekvence souvisí s frekvencí těchto impulzů. Jako základní materiál pro výrobu destičky se používá piezokeramika. Její výhodou je vysoká hodnota piezoelektrického součinitele. Na druhou stranu nevýhodou je vysoký vlnový odpor, který způsobuje, že přenos ultrazvukových impulzů do některých prostředí je obtížný.[7]

Piezokompozitový měnič se vyrábí rozřezáním piezokeramické destičky na pravoúhlé pole elementů, u kterých příčné rozměry musí být malé v porovnání s vlnovou délkou (0,1 – 0,5 mm). Takto vzniklé tyčinky jsou oddělené mezerou, která je vyplněna epoxidem, který však způsobuje jisté omezení v použitelnosti (teplota do 100 °C). Samotné sondy se vyrábějí ve dvou provedeních – čelní a úhlové.[7]

Čelní sonda obsahuje měnič chráněný před mechanickým poškozením tvrdou otěruvzdornou ochrannou vrstvou. Aby nedocházelo ke zkreslení impulsu při jeho průchodu ochrannou vrstvou, bývá její tloušťka rovna $\lambda/4$. Sonda také obsahuje tlumící tělísko, které mechanicky tlumí měnič tak, aby se dosáhlo co možná nejkratších impulsů, avšak na úkor amplitudy vysílaných kmitů. Velmi tlumené sondy se nazývají širokopásmové a mají dobrou hloubkovou rozlišovací schopnost. Naopak úzkopásmové sondy jsou tlumené méně, proto vykazují lepší citlivost, ale současně horší rozlišovací schopnost. Celá sonda bývá uzavřena v kovovém pouzdru s konektorem.[7]

Úhlová sonda nemá ochrannou vrstvu, protože obsahuje plexisklový klín, který zajišťuje potřebný úhel. Tento klín je však nejméně odolnou částí sondy. Už při delším, několikahodinovém zkoušení se opotřebovává, čímž se mění jeho tvar a samozřejmě i úhel výstupu ultrazvukového svazku.[7]

Oba tyto typy sond mohou být buď jednoměničové nebo dvojité. U dvojitých sond je jeden měnič určen výhradně pro vysílání a druhý pouze na příjem odezev z materiálu. Obě jsou umístěné v jednom tělese, přičemž ale akusticky oddělené přepážkou. Výhodou tohoto uspořádání je teoreticky nulové mrtvé pásmo.[7]

1.6. Kmitavý pohyb

Mechanika tekutin je částí obecné mechaniky, podobně jako mechanika tuhých těles. Zabývá se rovnováhou sil za klidu a pohybu kapalin a plynů. Při zkoumání tohoto pohybu se využívá mnoha poznatků a zákonitostí z mechaniky tuhých těles.[2]

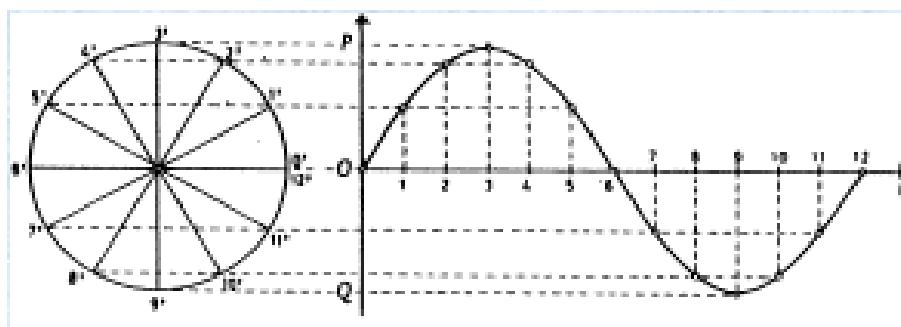
Jelikož se v mechanice zavádí pojem hmotného bodu, tak i v úlohách hydromechaniky se vyskytuje obdobný pojem a to „elementární objem“ kapaliny nebo plynu. Je to objem velmi malý oproti rozměrům kapaliny, ale dostatečně velký vzhledem ke střední délce volné dráhy molekuly. Lze tedy předpokládat, pro počet molekul obsažených v tomto objemu platí statistické střední hodnoty kinetické teorie.[2]

Tekutina je látka, u které je soudržnost mezi molekulami velmi malá a která se oproti tuhým tělesům vždy nevratně deformuje. Nemá vlastní tvar a za působení nepatrných tečných sil se její částice snadno uvedou do pohybu. Tekutiny tečou v proudu omezeném pevnými stěnami nebo tvoří rozhraní (hladiny). Stav tekutiny nacházející se v rovnováze je dán hustotou, tlakem a teplotou.[2]

Kmitavý pohyb je takový pohyb, kdy se elementární objem po úsečce kolem rovnovážné polohy. Jestliže v pravidelných časových intervalech prochází rovnovážnou polohou, lze tuto skutečnost nazývat periodický kmitavý pohyb. Rovnovážná poloha je pak stav s nejmenší potenciální energií. Po skončení pohybu zůstává elementární objem v rovnovážné poloze. Dokud na něj nezačne působit další vnější síla. Za mechanický oscilátor lze označit i ustalující se hladinu tekutiny.[5]

Nejjednodušší kmitavý pohyb je harmonický pohyb. Je to takový pohyb, kdy je okamžitá výchylka z rovnovážné polohy závislá na funkci sinus. Grafem výchylky harmonického pohybu v závislosti na čase je sinusoida. Harmonický kmitavý pohyb je pravoúhlý průmět rovnoměrného pohybu po kružnici. Rovnovážná poloha je ve středu kružnice. Při harmonickém pohybu se periodicky mění potenciální energie kmitání v energii kinetickou a naopak. Celková energie ideálního oscilátoru je konstantní (nedochází ke ztrátám) a je rovna součtu klidové energie oscilátoru s energií kmitání dodané oscilátoru při uvedení do kmitavého pohybu.[5]

Ve skutečnosti však na kmitající objemový element působí vnější síly, tj. zejména odpor prostředí, proto dochází ke ztrátám (ohřev prostředí) a amplituda se postupně zmenšuje, až je nakonec nulová a kmitavý pohyb ustane. Kmitavý pohyb, u kterého se zmenšuje amplituda se nazývá tlumené kmitání.[5]



Obrázek 5. Velikost výchylky kmitající částice v závislosti na čase (převzato z [9])

1.7. Fyzikální veličiny popisující ultrazvuk

Ultrazvukové vlnění je generováno bodovým zdrojem, který vykonává kmitavý pohyb – tj. pohyb, při kterém se částice opakovaně pohybuje tam a zpět kolem rovnovážné polohy. Jakýkoliv pohyb, který se v pravidelných intervalech opakuje, nazýváme pohyb periodický. Při kmitavém pohybu se okamžitá výchylka periodicky mění a vzhledem k rovnovážné poloze nabývá kladných i záporných hodnot. Časová závislost výchylky částice je určena funkcí $x(t)$.

$$x(t) = A * \sin(\omega * t + \varphi) \quad (4)$$

Rychlost kmitání částice kolem rovnovážné polohy, tzv. akustická rychlost, odpovídá změně výchylky za čas,

$$v_a = \frac{\partial s(x, t)}{\partial t} = \omega * A * \cos(\omega * t - \varphi) \quad (5)$$

kde ds je dráha, kterou částice urazí za čas dt . A označuje maximální výchylku částice, φ je fázový úhel a úhlový kmitočet ω závisí na frekvenci f .

$$\omega = 2 * \pi * f \quad (6)$$

Rychlost harmonického pohybu bude největší v rovnovážné poloze, v amplitudě A pak bude nulová. Největší rychlost harmonického pohybu (amplituda rychlosti v_m) závisí na úhlovém kmitočtu ω a maximální výchylce A .

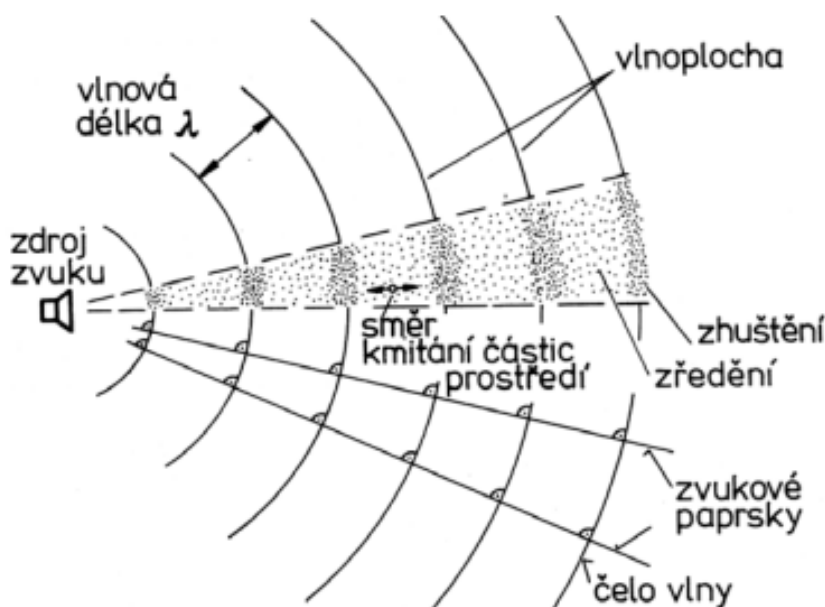
$$v_m = \omega * A \quad (7)$$

Zrychlení kmitající částice kolem rovnovážné polohy je výsledkem derivace akustické rychlosti podle času.

$$a = \frac{\partial v_a(x, t)}{\partial t} = -\omega^2 * A * \sin(\omega * t - \varphi) \quad (8)$$

Zrychlení harmonického pohybu směřuje proti výchylce, největší je v amplitudě A , v rovnovážné poloze je nulové. Zrychlení harmonického pohybu je přímo úměrné okamžité výchylce a v každém okamžiku má opačný směr. Největší možné zrychlení daného harmonického pohybu se označuje jako amplituda zrychlení a_m .

$$a_m = \omega^2 * A \quad (9)$$



Obrázek 6. Šíření ultrazvuku (převzato z [14])

Zhušťování a zředování kmitajících částic prostředí odpovídá zvýšení či snížení tlaku v plynech a kapalinách. To znamená, že tlak v daném místě kolísá okolo střední hodnoty barometrického tlaku ovzduší. Za akustický tlak p je považována odchylka celkového tlaku od hodnoty statického tlaku při vlnění v daném prostředí. Akustický tlak má tvar harmonické funkce.

$$p(t) = p_0 \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi) \quad (10)$$

Jestliže se akustická vlna šíří prostředím rychlostí v , lze vlnovou délku λ vypočítat pomocí periody T nebo frekvence f .

$$\lambda = v \cdot T = \frac{v}{f} \quad (11)$$

Mechanickými kmity pružného prostředí se přenáší mechanická energie kmitajících částic od zdroje prostřednictvím akustických vln. Množství akustické energie procházející za jednotku času myšlenou prostorovou plochou nazýváme akustickým výkonem P .

$$P = F \cdot v = p \cdot S \cdot v \quad (12)$$

Další základní akustickou veličinou, která je přímo vztažená k akustickému výkonu, je akustická intenzita I . Je to vektorová veličina popisující množství a směr toku akustické energie v daném místě prostředí. Vektor akustické intenzity je časově průměrovaný součin okamžitého akustického tlaku $p(t)$ a odpovídá okamžité rychlosti $v(t)$ kmitajících částic prostředí v témže místě:

$$I = p * v_a = \frac{p^2}{v * \rho} \quad (13)$$

Akustická impedance Z popisuje souvislost mezi akustickým tlakem $p(t)$ a kmitáním částic v akustickém médiu v_a .

$$Z = \frac{p}{v_a} = v * \rho \quad (14)$$

Komplexní akustická impedance se skládá z rezistance a reaktance. Rezistance vyjadřuje energii vlnění, která se přemění v jiné formy energie. Reaktance souvisí se stlačitelností akustického media (schopnost přeměňovat kinetickou energii v potenciální a naopak). Vysokou hodnotu akustické impedance mají pevné látky s vysokou hustotou a rychlostí šíření. Vzhledem k podstatě šíření zvuku pružným prostředím lze akustickou impedanci chápat jako odpor prostředí proti snaze vlnění vytvářet oblasti zvýšeného a sníženého tlaku. Akustická impedance zásadně ovlivňuje děje na rozhraní dvou médií (odraz a lom). Pokud je akustická impedance média 1 shodná s akustickou impedancí média 2, nedochází na rozhraní těchto médií k žádnému odrazu. Vlnění prochází oběma médii nezměněno. Jsou-li akustické impedance média 1 a 2 různé, dochází k částečnému odrazu vlnění na rozhraní a k průchodu části vlnění přes rozhraní. Akustická impedance vzduchu je $4,4 \cdot 10^2 \text{ Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ a vody je $1,48 \cdot 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$.

Šíření ultrazvuku v trojrozměrném prostředí popisuje obecná vlnová rovnice.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (15)$$

Pokud se použije Laplaceův diferenciální operátor, pak lze levou stranu rovnice upravit do podoby:

$$\nabla^2 u = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (16)$$

Z fyzikálního hlediska je vlnová rovnice pohybovou rovnicí pro akustickou vlnu. Pravá strana rovnice představuje zrychlení bodu nebo objemového elementu prostředí. Levá strana má význam podílu síly, která působí na hmotný bod nebo objemový element prostředí a jeho hmoty čili je to síla působící na element s jednotkovou hmotou.[14]

1.8. Navier-Stokesova rovnice

V roce 1822 navrhl francouzský inženýr C.M.L.H. Navier jistou soustavu parciálních diferenciálních rovnic jako model popisující viskózní nestlačitelné tekutiny. Navier-Stokesova rovnice popisuje hmotnost, hybnost a energii Newtonské tekutiny. Ve

většině případech je nutno tuto rovnici řešit numericky. K vyřešení rovnice je potřeba dodat počáteční podmínku pro rychlost a okrajové podmínky.

Navier-Stokesova rovnice představuje účinek síly na objem dV , vztažený na jednotku objemu. Navier-Stokesova rovnice v sobě zahrnuje rovnici kontinuity (dole), pohybovou rovnici (dole) a rovnici energie (dole),

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho(\nabla v) = 0 \quad (17)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v(\nabla v) = -\frac{1}{\rho} \nabla p + f + \frac{\eta}{\rho} \nabla^2 v \quad (18)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + v \nabla \varepsilon \right) - \nabla (K_H \nabla T) + p \nabla v = 0 \quad (19)$$

kde v je vektor rychlosti, ε je termodynamická vnitřní energie, p značí tlak, T teplotu, ρ hustotu, η dynamickou viskozitu, K_H je koeficient vedení tepla a f je vnější síla udávaná na jednotku hmotnosti (nejčastěji gravitační síla), která způsobuje zrychlení částice. Vyskytují se zde tedy 4 nezávisle proměnné, prostorové souřadnice x , y , z a čas t , a 6 závislých proměnných, ρ , p , T a 3 složky vektoru rychlosti v . Hustotu lze uvažovat za konstantní za předpokladu, že daná kapalina je nestlačitelná. Z toho vyplývá, že tyto rovnice jsou zjednodušené a platí pouze pro ideální kapalinu, která je definována takto[15]:

- je dokonale nestlačitelná ($\rho = konst.$)
- je bez vnitřního tření, tečné napětí je rovno nule (neviskózní kapalina)
- nevypařuje se, napětí nasycených par je také nulové

Oproti tomu se ve skutečným kapalinám vnitřní tření této kapaliny a stlačitelnost, což nelze při výpočtech opomíjet. Objemová stlačitelnost se vyjadřuje součinitelem stlačitelnosti δ , kdy úbytek objemu vyvolaný stlačením při konstantní teplotě splňuje rovnice,

$$\delta = -\frac{1}{V} \left(\frac{dV}{dp} \right) \quad (20)$$

ve které je vyjádřena změna objemu kapaliny $\Delta V = V - V_0$ připadající na jednotku původního objemu V při změně tlaku $\Delta p = p_0 - p$. [1]

Rychlost libovolného mechanického vlnění (příčného i podélného) u skutečné kapaliny závisí jednak na setrvačných vlastnostech prostředí (souvisejí s kinetickou energií částic prostředí), jednak na jeho vlastnostech elastických (souvisejí s potenciální energií). Rychlost zvukové vlny v v prostředí s modulem objemové pružnosti K a hustotou ρ je dána rovnicí,

$$v = \sqrt{\frac{K}{\rho}} = \sqrt{\frac{dp}{d\rho}} \quad (21)$$

kde modul objemové pružnosti K udává, jak částice prostředí mění svůj objem se změnou tlaku. Jedná se tedy o převrácenou hodnotu součinitele objemové stlačitelnosti. Rozměr modulu objemové stlačitelnosti kapaliny připomíná modul pružnosti v tahu E tuhých látek. Pro vodu je $K = 2,1 \cdot 10^9$ Pa. Obecně závisí na stavových veličinách, tj. tlaku a teplotě.[2]

Pro teoretickou rychlost zvuku ve vzduchu platí za předpokladu izoentropické (adiabatické) stavové změny (při $T = 273,15$ K a $r = 287$ J*Kg⁻¹*K⁻¹) výpočet,

$$v = \sqrt{\frac{K}{\rho}} = \sqrt{\frac{dp}{d\rho}} = \sqrt{\kappa \frac{p}{\rho}} = \sqrt{\kappa r T} = 331[m * s^{-1}] \quad (22)$$

kde $\kappa = 1,4$ izotermický exponent.[1]

Rovnice energie zde dále rozebírána nebude, protože změna teploty T tekutiny za dobu prozařování ultrazvukem je minimální a lze ji proto zanedbat.

Jelikož se tato práce věnuje experimentům, které jsou prováděny na skutečné kapalině, je zapotřebí při výpočtech vycházet z Navier-Stokesovy rovnice v takovém tvaru, který popisuje stlačitelnou tekutinu.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \nabla(\rho v) + Q \quad (23)$$

$$\nabla v_a = -\frac{1}{\rho v^2} \frac{\partial p_a}{\partial t} + \frac{Q}{\rho_0} \quad (24)$$

Následně lze rovnici kontinuity a pohybovou rovnici upravit na souhrnnou Navier-Stokesovu rovnici,

$$\frac{\partial v_a}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_0} \nabla p_a + \frac{4\eta}{3\rho_0} \nabla \left(-\frac{1}{\rho_0 v^2} \frac{\partial p_a}{\partial t} + \frac{Q}{\rho_0} \right) \quad (25)$$

kde Q označuje hmotnostní tok a η je dynamická viskozita.

Dalšími úpravami se dospěje k vlnové rovnici pro změnu tlaku tekutiny,

$$p(\vec{r}, t) = \text{Re}[p(\vec{r})e^{j\omega t}] \quad (26)$$

kde $p(\vec{r}, t)$ označuje tlak v tekutině jako funkci prostoru a času.

Za předpokladu, že tlakové změny v čase mají harmonický charakter, se úpravou vlnové rovnice získá Helmholtzova rovnice pro komplexní tlak,

$$\nabla\left(\frac{1}{\rho_0}\nabla p\right) - \frac{\omega^2}{\rho_0 v^2} p + j\omega\nabla\left[\frac{4\eta}{3\rho_0}\nabla\left(\frac{1}{\rho_0 v^2} p\right)\right] = -j\omega\left(\frac{Q}{\rho_0}\right) + \nabla\left[\frac{4\eta}{3\rho_0}\nabla\left(\frac{Q}{\rho_0}\right)\right] \quad (27)$$

kde $\omega = 2\pi f$ a f je frekvence kolísání tlaku.[18]

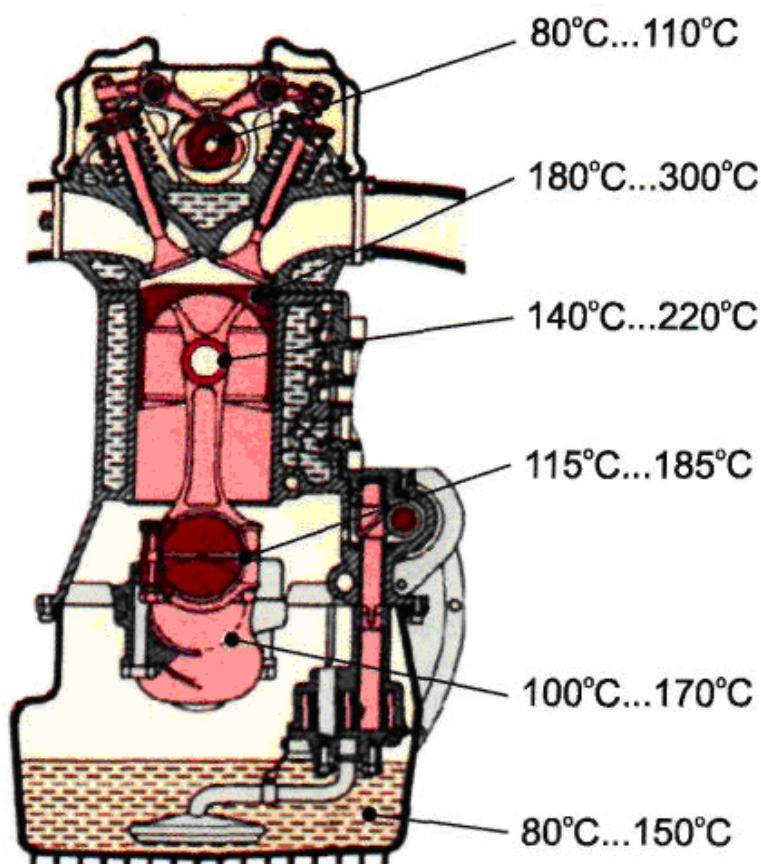
2. Motorové oleje

Na začátku této kapitoly je vhodné pro širší pochopení problematiky uvést, z jakých důvodů je vůbec zapotřebí používat motorový olej pro bezporuchové provozování vozidla. Mazání pístových spalovacích motorů si klade za cíl:

- Zmenšit třecí ztráty a opotřebení pohybujících se částí motoru (mazání)
- Odvést část tepla z motoru (chlazení)
- Zlepšit těsnění jednotlivých součástí motoru, zejména pístu ve válci (dotěsnění)
- Odvést nečistoty z motoru a mazací soustavy
- Konzervovat vnitřní části motoru a zabránit vzniku koroze
- Snížit hlučnost motoru

Z předcházejícího výčtu je zřejmé, že olej postupně ztrácí svoje mazací schopnosti. Namáhání motorového mazacího oleje lze popisovat jako:

- Tepelné
- Chemické
- Mechanické



Obrázek 7. Teplota oleje v různých částech motoru

Teplota oleje motoru je důležitá pro hospodárny provoz vozidel. Správný provozní rozsah teploty oleje mazání motoru je 80 až 100 °C.

2.1. Druhy olejů

V současnosti je na trhu dostupných několik druhů motorového oleje. Dle technologie výroby se motorové oleje dělí na:

- Minerální oleje
- Polosyntetické oleje
- Syntetické oleje

Minerální oleje mají bod tuhnutí přibližně $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Získávají se hlavně z ropy, dalšími zdroji jsou pak černouhelný nebo hnědouhelný dehet a živičné břidlice. Jedná se o směsi uhlovodíků, které jsou charakteristické vysokým bodem varu. V rafineriích se surová ropa rozdestiluje na jednotlivé frakce a frakce vhodná pro výrobu olejů se upravuje rafinačními postupy, při kterých dochází k odstranění nežádoucích nestabilních látek, jako jsou například síra a polyaromatické sloučeniny. Tímto způsobem se zajistí nízký bod tuhnutí oleje. Podle převládajícího typu uhlovodíku se rozdělují na parafinické (nízký bod tuhnutí, nízký viskozitní index), naftenické (nejčastěji používané) a aromatické.

Polosyntetické oleje mají bod tuhnutí až $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kvalita tohoto druhu oleje je výrazně vyšší v porovnání s klasickým minerálním olejem, ovšem i dražší.

Syntetické oleje mají bod tuhnutí až $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jsou připravovány úpravou vhodné chemické sloučeniny tak, aby vykazovaly vlastnosti podobné ropným mazivům. Tyto oleje mají vyšší odolnost proti vysokým teplotám, dále vyšší tekutost při nižších teplotách, mazivost, vyšší viskozitní index, než je tomu u olejů ropných (minerálních).

2.2. Složení motorového oleje

Motorový olej obsahuje základní olej (base oil) a výkonnostní směs přísad – aditiva (package additive). Typ základního oleje určuje, o jaký druh oleje (2.1) se jedná. Základní olej je směs chemických látek. Z hlediska mazání motoru sám o sobě nemá požadované vlastnosti. Je však jakýmsi objemovým nosičem tvořícím asi 90 % objemu oleje. Proto také víceméně určuje jeho hustotu.

Samotná aditiva jsou složena z velkého množství přísad tak, aby motorový olej jako celek plnil všechny požadované funkce:

- Protiotěrové přísady – chemicky reagují s povrchy kovů (v oblastech největšího opotřebení mohou prodloužit životnost mazané součástky)
- Detergentně disperzní přísady – pomáhají zachovat motor čistý (neutralizují kyselé produkty oxidace a hoření, snižováním tvorby kalů usnadňují cirkulaci oleje v mazacím systému)
- Protikoroziční přísady – zabraňují vzniku koroze
- Antioxidanty – chrání olej před oxidací
- Protipěnovostní přísady – zabraňují pění oleje, které omezuje mazací a chladicí schopnosti oleje, zvyšuje hlučnost, opotřebení a spotřebu oleje
- Snižovače bodu tuhnutí – zlepšují tekutost oleje za nízkých teplot a zajišťují tak jeho rychlou cirkulaci

- Zlepšovače viskozitního indexu – omezují změnu viskozity oleje se změnou teploty
- Vysokotlaké přísady – ochrana povrchu třecích ploch zvýšením odolnosti mazacího filmu proti roztržení při vysokých tlacích

2.3. Viskozitní klasifikace olejů

Viskozita (vazkost, vnitřní tření) je odpor, jímž tekutina působí proti silám, které se snaží posunout její nejmenší část. Na stykové ploše dvou vrstev tekutiny pohybujících se různou rychlostí se projevuje viskozita tečným napětím, jímž se snaží rychlejší vrstva urychlovat pomalejší, a ta naopak zdržovat vrstvu rychlejší. Viskozita je jednou z nejdůležitějších vlastností, která ovlivňuje tekutost kapalin. Vlivem teploty a tlaku se může viskozita oleje měnit. Obecně platí, že se viskozita mazacího oleje snižuje se zvyšující se teplotou. Míru této závislosti vyjadřuje viskozitní index (VI).

Tabulka 1. Viskozitní klasifikace podle normy SAE

Třída SAE	Teplota [°C]	Hraniční čerpatelnost [°C]	Dynamická viskozita [Mpa*s]	Kinematická viskozita pro 100 °C [mm ² /s]
0W	-30	-35	3250	3,8
5W	-25	-30	3500	3,8
10W	-20	-25	3500	4,1
15W	-15	-20	3500	5,6
20W	-10	-15	4500	5,6

Tabulka 2. Použití olejů podle normy SAE

Třída SAE	Teploty	Doporučené požadavky - použití
0W	do -40 °C a níže	Pro extrémní klimatické podmínky. Zbytečně velký rozsah. U nás prakticky nevyužitelný. Přispívá k úspoře paliva
5W	do -30 °C	Celoroční oleje použitelné i za velmi nízkých teplot, tzv. EC (Energy Conserving) - úsporné oleje
10W	do -25 °C	Zimní olej jen pro zimní období
15W	do -20 °C	Celoroční motorové oleje s velmi dobrými nízkoteplotními vlastnostmi
20W	do -15 °C	Celoroční motorové oleje s dobrými nízkoteplotními vlastnostmi. Vyhovují pro mírnější podmínky.

2.4. Výkonnostní klasifikace olejů

Vždy po určité době se přehodnocují požadavky na motorové oleje, a tak oleje, které splňují i nejnovější přísnější kritéria jsou pak vyráběna pod novějším označením. Pro označení výkonnosti kategorie motorových olejů se používá výkonnostní klasifikace dle americké normy API (Association des Constructeurs Européens d'Automobiles) a evropské normy ACEA (American Petroleum Institut).

Výkonnostní klasifikace API označuje oleje pro benzínové motory písmenem S (Service) a dieselové motory písmenem C (Commercial). U obou motorů pak druhé písmeno značí výkonnostní stupeň. V zásadě platí, že čím je toto písmeno dále v abecedě, tím je motorový olej kvalitnější. Klasifikace API odráží vývoj automobilových olejů na americkém kontinentě a u vyšších tříd plně nevyhovuje podmínkám pro evropské motory.

Tabulka 3. Výkonnostní třída API pro benzínové motory

Označení	Status	Použití oleje
SN	Současná	Zavedená v říjnu 2010 pro motory vyrobené po roce 2011 a starší. Vhodná tam, kde je potřeba poskytnout vyšší ochranu pístů, při vyšších teplotách, kde je požadovaná přísnější kontrola kalu a kompatibility s těsněními. Klasifikace SN zaručuje vyšší ochranu turbodmychadla a motoru provozovaném na ethanol. SN zároveň hovoří o vyšší kontrole emisí a nižší spotřebě paliva.
SM	Současná	Pro všechny současné motory. Kategorie zavedena 30. listopadu 2004. Oleje klasifikace SM obsahují aditiva pro kontrolu deposit, pro snížení oxidace oleje, snížení opotřebení a aditiva zlepšující vlastnosti oleje za nízkých teplot.
SL	Současná	Pro všechny současné motory i starší motory. Kategorie zavedena roku 2001.
SJ	Současná	Pro motory z roku 1996 a mladší.
SH	Zastaralá	Pro motory z roku 1996 a starší. Olej obsahuje aditiva pro kontrolu deposit, pro snížení oxidace oleje, snížení opotřebení a aditiva proti korozi.
SG	Zastaralá	Pro motory z roku 1989 -1993. Olej obsahuje aditiva pro kontrolu deposit, pro snížení oxidace oleje, snížení opotřebení a aditiva proti korozi.
SF	Zastaralá	Pro motory z roku 1980 -1989. Obsahuje aditiva pro zvýšení oxidační stability a aditiva proti opotřebení, aditiva pro kontrolu tvorby usazenin za nízké i vysoké teploty, pro ochranu proti opotřebení a korozi.
SE	Zastaralá	Pro motory z roku 1971 - 1979. Obsahuje aditiva zabraňující oxidaci oleje, aditiva pro kontrolu tvorby usazenin za nízké i vysoké teploty, pro ochranu proti opotřebení a korozi.
SD	Zastaralá	Pro motory z roku 1968 - 1970. Obsahuje aditiva pro kontrolu tvorby usazenin za nízké i vysoké teploty, pro ochranu proti opotřebení a korozi.
SC	Zastaralá	Pro motory z roku 1964 - 1967. Obsahuje aditiva pro kontrolu tvorby usazenin za nízké i vysoké teploty, pro ochranu proti opotřebení a korozi.
SB	Zastaralá	Pro starší motory vyžadující minimální ochranu aditiv. Lze použít pouze je-li výslovně požadováno výrobcem.
SA	Zastaralá	Pro starší motory, bez nároku na výkon a ochranu. Lze použít pouze je-li výslovně požadováno výrobcem.

Tabulka 4. Výkonnostní třída API pro dieselové motory

Označení	Status	Použití oleje
CI-4	Současná	Zavedena v září 2002. Pro vysoko-rychlostní čtyřdobé motory, u kterých je vyžadováno splnění výfukových emisních norem roku 2004 zavedených v roce 2002. CI-4 oleje mají speciální složení a trvanlivost pro užití v motorech s recirkulací výfukových zplodin (EGR). Jsou určeny pro použití v motorech, které používají palivo s hmotnostním obsahem síry do 0,5 %. Může být použit místo CD, CE, CF-4, CG-4 a CH-4 olejů.
CH-4	Současná	Zavedena v roce 1998. Pro vysoko-rychlostní čtyřdobé motory, u kterých je vyžadováno splnění výfukových emisních norem z roku 1998. CH-4 oleje mají

		speciální složení pro užití s palivem s hmotnostním obsahem síry do 0,5 %. Může být použit místo CD, CE, CF-4 a CG-4 olejů.
CG-4	Současná	Zavedena v roce 1995. Pro vysoce zatížené, vysoko rychlostní, čtyřdobé motory užívající palivo s hmotnostním obsahem síry do 0,5 %. CG-4 oleje jsou požadovány pro motory splňující emisní normy z roku 1994. Může být použit místo CD, CE a CF-4 olejů.
CF-4	Současná	Zavedena v roce 1990. Pro vysoko-rychlostní, čtyřdobé, atmosfericky plněné motory a motory s turbodmychadlem. Může být použit místo CC a CD olejů.
CF-2	Současná	Zavedena v roce 1994. Pro vysoce zatížené, dvoudobé motory. Může být použit místo CD-II olejů.
CF	Současná	Zavedena v roce 1994. Pro off-road motory s nepřímým vstřikováním a motory používající palivo s hmotnostním objemem síry nad 0,5 %. Může být použit místo CD olejů.
CE	Zastaralá	Zavedeno v roce 1987. Pro vysoko-rychlostní, čtyřdobé, atmosfericky plněné motory a motory s turbodmychadlem. Může být použit místo CC a CD olejů.
CD-II	Zastaralá	Zavedeno v roce 1987. Pro dvoudobé motory.
CD	Zastaralá	Zavedeno v roce 1955. Pro určité atmosfericky plněné motory a motory s turbodmychadlem.
CC	Zastaralá	Pro motory z roku 1961.
CB	Zastaralá	Pro středně zatížené motory z roku 1949 až 1960.
CA	Zastaralá	Pro lehce zatížené motory z roku 1940 až 1950.

Výkonnostní stupeň u výkonnostní klasifikace motorových olejů ACEA je vyjádřen pro daný typ motoru číslem (čím vyšší číslo, tím kvalitnější olej), písmeno před číslem značí typ motoru:

- A – benzínové motory
- B – dieselové motory osobních automobilů, dodávek a lehkých užitkových vozidel
- E – dieselové motory těžkých užitkových vozidel
- C – zážehové a vznětové motory osazené částicovými filtry

2.5. Nežádoucích látky v oleje

Do motorového oleje se činností spalovacího motoru dostává spousta nežádoucích látek – palivo, voda, glykol, nečistoty a otěry.

Palivo proniká do klikové skříně, kde se nachází motorový olej, netěsností kolem pístních kroužků. Maximální přípustnou hranici udává většina výrobců motorů kolem 4 % paliva v motoru. Pokud množství paliva překročí tuto mez, znamená to ve většině případů závadu na motoru, zpravidla na vstřikování paliva. Ve většině případů je jediným, ale o to závažnějším důsledkem snížená viskozita motorového oleje. Příliš nízká viskozita olejů už znamená příliš tenký mazací film, který má malou únosnost. Celistvost mazacího filmu se potom lehce poruší. Výsledkem je, že se zvyšuje opotřebení motoru, které je tím větší, čím je vyšší obsah paliva v oleji a tím i nižší viskozita. Pokles viskozity je možné připustit odhadem až o 30 %.[3]

Spolu s palivem se do oleje dostává i vodní pára, která je do motoru nasávána vzduchem ve formě vzdušné vlhkosti a je i jedním z produktů spalování. Je-li motor studený, horké spaliny s vodní párou přicházejí ve studené klikové skříni do styku se studeným motorovým olejem, přičemž dochází ke kondenzaci vodní páry. Kapalná voda se hromadí v motorovém oleji, který se intenzivně promíchává a vytváří se emulze vody v oleji (voda a olej jsou dvě navzájem neslučitelné látky). Emulgovaná voda v oleji vytváří korozivní prostředí pro celý motor a takový provoz motoru jednoznačně škodí. Naštěstí se zde jedná o děj vratný, po ujetí dostatečné vzdálenosti (50 km), po kterou je olej díky motoru v chodu udržován na vyšší teplotě se voda z oleje odpaří. Voda v oleji i po odpaření zanechává stopy. Voda může způsobit např. vysrážení některých aditiv ve formě úsad či kalu nebo hydrolýzu a znehodnocení jiných přísad. Jestliže je motorový olej trvale vystaven účinkům vody při častých studených startech, je velmi pravděpodobné, že se tím postupně mění kvalita oleje a podstatně se zkracuje také jeho životnost.[3]

Glykoly se do motorového oleje dostávají v rámci nemrznoucí kapaliny chladicího systému. Přítomnost nemrznoucí kapaliny (glykolu) v oleji je jednou z nejnepříjemnějších závad, která se může vyskytnout na mazací soustavě. Podmínkou dalšího provozu automobilu je odstranění glykolu z celého olejového systému. V žádném případě nestačí pouhá výměna motorového oleje. Při výměně oleje vždy zůstává část oleje v motoru a glykol z tohoto zbytku dokáže částečně znehodnotit i novou olejovou náplň. Vždy je potřeba vyčistit celý olejový systém, a to nejlépe mechanicky, a nespoléhat pouze na proplachové přípravky. Už při nízkých koncentracích chladicí kapaliny v oleji dochází k nevratným a k závažným změnám v motorovém oleji, které zabraňují jeho správné funkci. Rychlost, s jakou dojde ke znehodnocení oleje, závisí na množství proniklé nemrznoucí kapaliny. Olej ztrácí tekutost, objevují se v něm nerozpustné úsady a kaly, a pokud je i v tomto stavu stále provozován, nakonec téměř úplně ztuhne a neodvratně dojde k zadření motoru.[3]

Nejčastějším zdrojem nečistot v motorovém oleji je nasávaný vzduch, který není nikdy absolutně čistý, ale obsahuje i prachové částice. Tyto částice jsou velmi tvrdé (křemičitý prach) a způsobují opotřebení mazaných částí motoru. I při kvalitním mazání a normální úrovni tření a opotřebení lze v motorovém oleji nalézt otěrové částice kovů. Při zvýšené úrovni tření mohou vznikat otěrové částice o velikosti desítek mikrometrů, při havarijním opotřebení dokonce až stovek mikrometrů.[3]

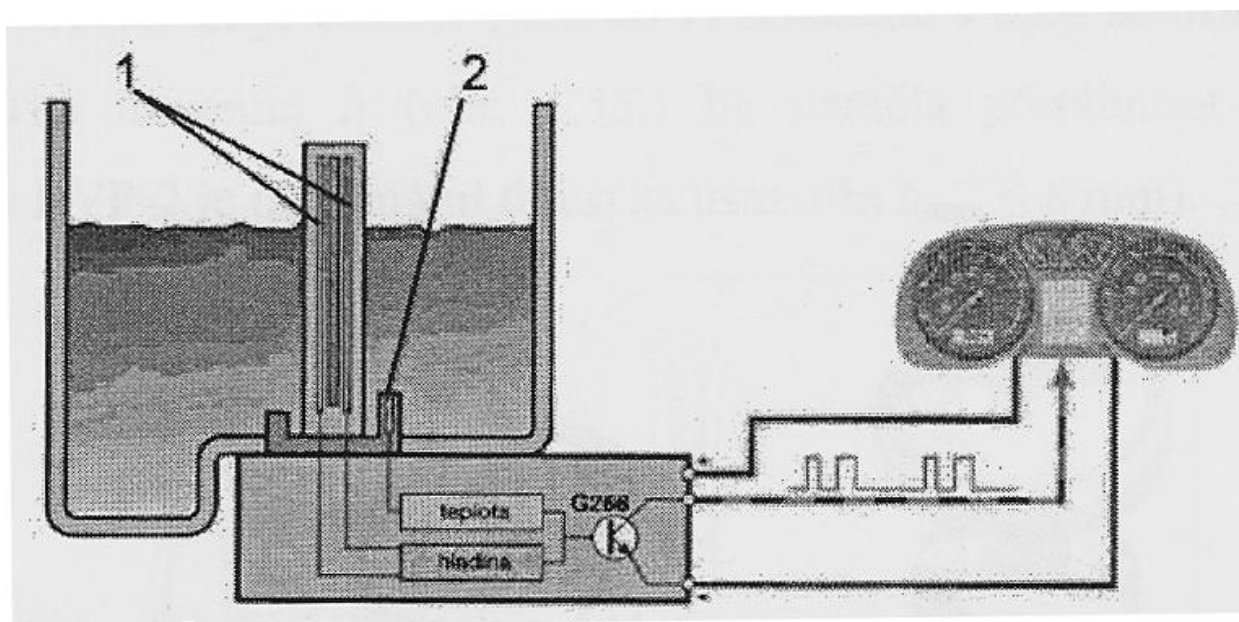
2.6. Kontrola množství oleje

Kontrola množství oleje v klikové skříni nebo nádrži je v podstatě kontrolou výše hladiny. Výše hladiny se nejčastěji měří tyčovou měrkou oleje, která je vsunuta do klikové skříně bloku motoru nebo do nádrže. Stav oleje se musí pohybovat mezi značkami pro minimum a maximum na měrci oleje. Při kontrole množství oleje v motoru musí stát vozidlo na rovině. Pokud se množství oleje kontroluje po jízdě, tak je doporučováno chvíli počkat, aby olej stačil stéci do spodní části motoru.



Obrázek 8. Měrka k určení stavu hladiny oleje

Jiný způsob měření využívá snímač teploty oleje (označení 2 v **Obrázek 9**). Snímač množství oleje (označení 1 v **Obrázek 9**) se krátkodobě ohřeje na teplotu vyšší, než je teplota oleje. Dle délky doby chladnutí se v řídicí jednotce panelu vyhodnocuje, zda je hladina motorového oleje dostatečná. Delší doba chladnutí signalizuje nedostatečné naplnění, krátká doba naopak normální hladinu oleje.



Obrázek 9. Snímač hladiny a teploty oleje (převzato z [3])

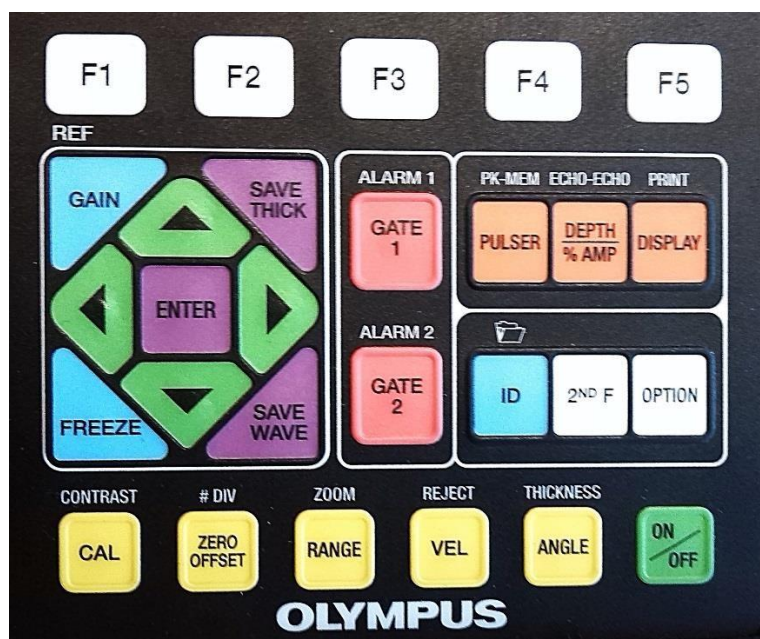
Snímač LubCos Level (Lubrication Condition Sensor) umožňuje spolehlivé posouzení stavu hydraulických hladin. Kombinace nepřetržitého měření výšky hladiny kapaliny v nádrži, teploty a relativní vlhkosti kapaliny, se současným stanovením parametrů, specifických pro danou kapalinu (relativní permitivita, specifická vodivost a teplota kapaliny), poskytuje detailní informace o stavu oleje. Pomocí těchto parametrů může snímač dokumentovat stárnutí oleje, rozpoznat typ a směs oleje. Pokud je snímač také kalibrován, lze z naměřených hodnot odhadnout i předpokládanou zbývající životnost oleje. Tak mohou být při nadměrném zatěžování oleje zavčas detekovány známky opotřebení nebo při nižším zatěžování patřičně prodlouženy intervaly výměny oleje (viz Datasheet [10]).

II. Praktická část

3. Laboratorní měření

3.1. Ultrazvukové zařízení

V rámci reálného měření byl použit přístroj od firmy Olympus – **EPOCH LT**. K dispozici jsou sondy s frekvencí 4 MHz nebo 20 MHz. Vlastní zařízení se ovládá pomocí klávesnice, která je zachycena na následujícím obrázku:



Obrázek 10. Ovládání přístroje EPOCH LT (převzato z [16])

- **ON/OFF** zapnutí či vypnutí přístroje
- **ANGLE** nastavení tloušťky měřeného materiálu
- **VEL** nastavení rychlosti šíření vlnění v daném materiálu
- **RANGE** nastavení rozsahu detektoru
- **CAL** automatická kalibrace
- **FREEZE** zmrazení aktuálního průběhu
- **GAIN** nastavení zesílení ultrazvukového svazku
- **F1 – F5** změna nastavení požadovaného parametru
- **GATE 1,2** vymezení oblasti měření
- **PULSER** nastavení generátoru impulsů
- **DEPTH** nastavení amplitudy
- **DISPLAY** nastavení režimu zobrazení
- **ID** hledání záznamů uložených v paměti
- **OPTION** volba základních parametrů

Pomocí softwarového nastavení lze upravit některé hodnoty zobrazující se nad klávesami [F1] až [F5] podle vlastních požadavků. Tyto hodnoty detektor EPOCH LT automaticky vyvolá při stisknutí odpovídající klávesy [F]. Upravovat lze následující parametry:

- Zesílení
- Potlačení nežádoucích signálů
- Posun nulové hodnoty
- Úhel
- Frekvence
- Rozsah
- Tloušťka
- Rychlost

Po zapnutí přístroje lze pro zajištění vyšší přesnosti provést kalibraci popsanou v návodu[17]. Následně se na vzorek nanese destilovaná voda, která slouží jako kontaktní vrstva pro přenos signálu. V rámci seznamování se s možnostmi měření dostupného přístroje bylo uskutečněno zkušební změření tloušťky a rychlosti šíření zvuku v zadaném materiálu dle laboratorního návodu[16].

3.2. Měření tloušťky

Při provádění měření tloušťky je nutné znát rychlost ultrazvuku v proměřovaném materiálu. Stisknutím kláves [2nd F] a [DEPTH%AMP] se aktivuje volitelný režim metodou echo-echo. Po přiložení sondy na proměřovaný prvek by se měla objevit alespoň dvě echa, tedy počáteční a koncové, případná další echa mezi nimi jsou vadová. Pokud se nastaví šířka brány nad koncové echo, tak se na displeji zobrazí vzdálenost této hrany od přiložené sondy, tedy měřená tloušťka materiálu. Při prvním měření se doporučuje proměřit pomocí ultrazvuku tu tloušťku daného materiálu, kterou lze změřit rovněž i posuvným měřidlem a následně oba naměřené údaje porovnat, díky čemuž lze zjistit, zda používaný přístroj je nastaven k proměřování správně.

3.3. Měření rychlosti šíření zvuku v materiálech

Při měření rychlosti šíření ultrazvuku daným prostředím je nutné znát naopak tloušťku proměřovaného materiálu. Stisknutím kláves [2nd F] a [DEPTH%AMP] se aktivuje volitelný režim metodou echo-echo. Po přiložení sondy na proměřovaný prvek by se měla objevit alespoň dvě echa, tedy počáteční a koncové, případná další echa mezi nimi jsou vadová. Poté se musí nastavit šířka nad koncové echo, čímž se na displeji zobrazí přístrojem vypočítaná tloušťka materiálu, která se ale liší od reálné naměřené tloušťky. Následně se tedy upravuje hodnota rychlosti šíření ultrazvuku až do doby, než si jsou rovny vypočítaná tloušťka na displeji a reálně změřená tloušťka, například pomocí posuvného měřidla.

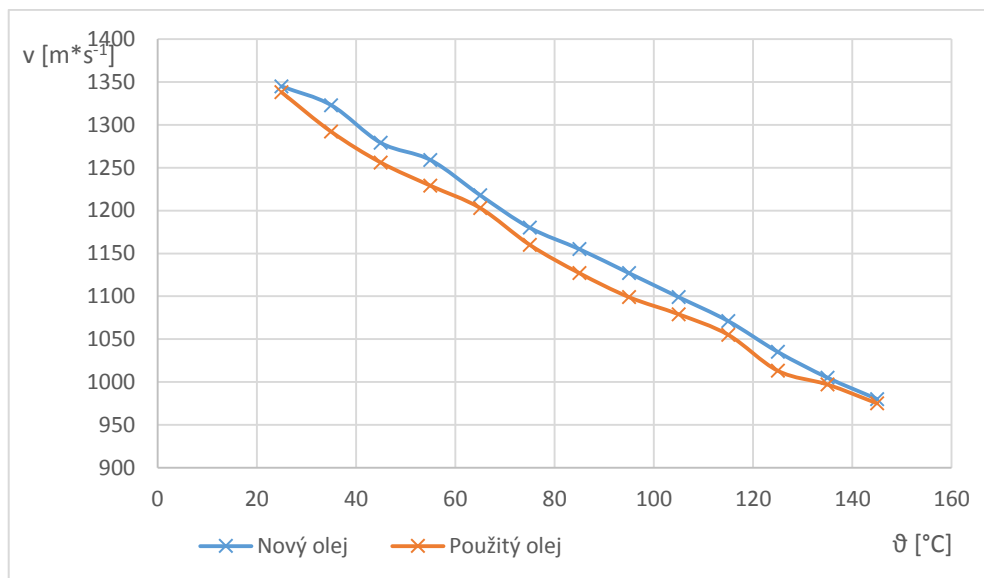
3.4. Měření rychlosti šíření ultrazvuku v oleji

Při měření rychlosti šíření ultrazvuku v oleji se vycházelo z předpokladu, že podobně jako v dobře známých tekutinách (voda, vzduch), tak i zde bude docházet ke změně rychlosti ultrazvuku s rostoucí teplotou. Tato domněnka se záhy potvrdila, a tak bylo zapotřebí ještě určit teplotní rozsah měření. Zde se vycházelo ze standardního měření teploty motorových kapalin při běžném provozu vozidla. I když se při zapnutém motoru může teplota oleje dostat až ke 300 °C, standardní teplotní provozní rozsah je stanoven v rozmezí 80 -130 °C, přičemž z důvodu delší životnosti oleje je snahou se pohybovat spíše u spodní hranice rozmezí. Při měření rychlosti se využívalo znalosti průměru kádinky, která obsahovala proměřovaný typ oleje. Pomocí posuvného měřidla byl průměr kádinky stanoven na hodnotě 2,3 cm. Vlastní měření probíhalo v laboratorních podmínkách při pokojové teplotě 25 °C a vlhkosti 22 %.

Následuje výčet výsledků měření, při kterém se prokázalo mimo jiné nepatrné snížení rychlosti šíření ultrazvuku v oleji, který byl již použit oproti oleji novému. V teplotním rozsahu mezi 25 - 145 °C se veškeré naměřené hodnoty pohybovaly v intervalu 975 - 1388 m*s⁻¹.

Tabulka 5. Naměřené hodnoty pro olej 5W-30

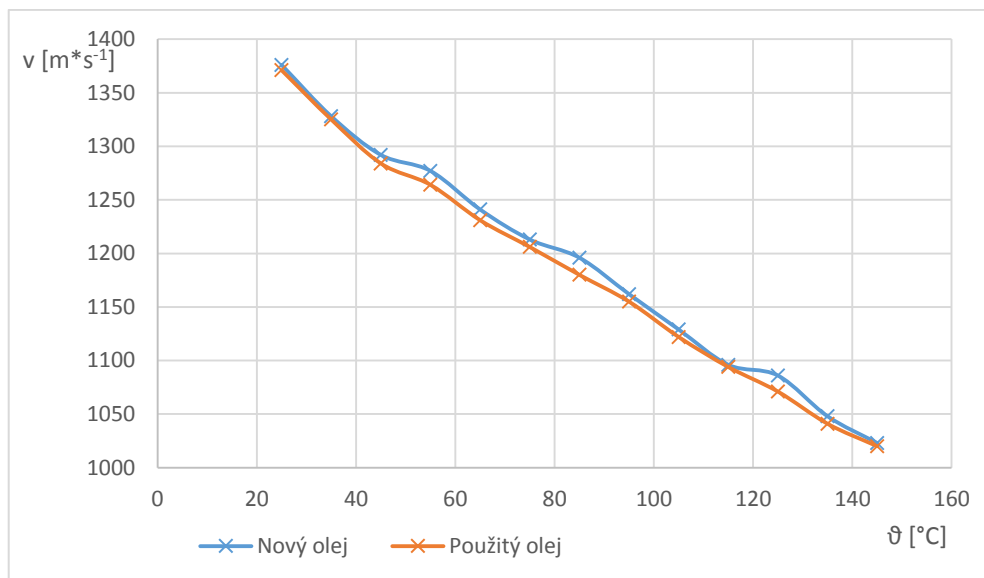
5W-30	Nový olej	Použitý olej
θ [°C]	v [m*s ⁻¹]	v [m*s ⁻¹]
25	1345	1338
35	1323	1292
45	1279	1256
55	1259	1229
65	1218	1203
75	1180	1160
85	1155	1127
95	1127	1099
105	1099	1079
115	1071	1055
125	1035	1013
135	1005	997
145	980	975



Obrázek 11. Závislost rychlosti šíření ultrazvuku na teplotě pro olej typu 5W-30

Tabulka 6. Naměřené hodnoty pro olej 15W-40

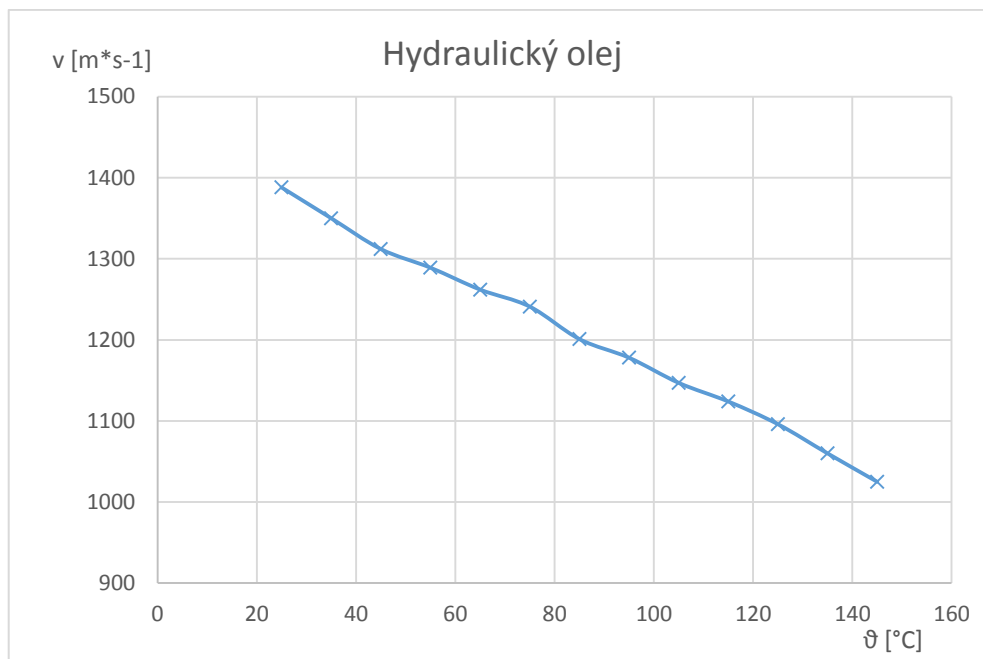
15W-40	Nový olej	Použitý olej
θ [°C]	v [m*s ⁻¹]	v [m*s ⁻¹]
25	1376	1371
35	1328	1325
45	1292	1284
55	1277	1264
65	1241	1231
75	1213	1206
85	1196	1180
95	1162	1155
105	1129	1122
115	1096	1094
125	1086	1071
135	1048	1041
145	1023	1020



Obrázek 12. Závislost rychlosti šíření ultrazvuku na teplotě pro olej typu 15W-40

Tabulka 7. Naměřené hodnoty pro hydraulický olej

Hydraulický olej	
θ [°C]	v [m*s ⁻¹]
25	1388
35	1350
45	1312
55	1289
65	1262
75	1241
85	1201
95	1178
105	1147
115	1124
125	1096
135	1060
145	1025



Obrázek 13. Závislost rychlosti šíření ultrazvuku na teplotě pro hydraulický olej

4. Modelování v ANSYS

4.1. Metoda konečných prvků

Počátky MKP sahají do roku 1943, kdy matematik Richard Courant vyslovil myšlenku diskretizovat spojité těleso. Jeho práce byla po deseti letech znovuobjevena inženýry, kteří na matematickém základě vyvinuli první aplikace používající MKP – každému elementu jsou stanoveny jeho vlastnosti a při řešení je popis struktury převeden na matematické rovnice. Obdržené výsledky lze následně srovnávat s experimentálně získanými hodnotami.[4]

Obecný postup je takový, že se nejprve provede experiment, ze kterého se získají výsledky, které závisí na vstupních parametrech. Proto jsou poté tyto vstupní parametry zadány do vlastností jednotlivých elementů a po proběhnutí počítačové simulace by se mělo dojít ke stejným výsledkům. Pokud se tak stane, pak nastává fáze, kdy se je snahou upravovat vstupní parametry tak, aby se při počítačové simulaci dospělo k co nejlepším výsledkům. Na závěr bádání se provede opět reálné měření s novými vstupními parametry, kterým se ověřuje správnost výsledků počítačové simulace.

Vždy je potřeba mít na mysli, že MKP je metodou přibližnou v takovém smyslu, že pokud by se počet prvků (hustota sítě) přiblížil k nekonečnu, pak by konečno-prvkové řešení konvergovalo k řešení analytickému.

MKP modely jsou popsány diferenciálními rovnicemi druhého řádu, jejichž maticový zápis je standardně typu

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{B}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}\mathbf{q} = \mathbf{f} \quad (28)$$

a jedná se o základní pohybovou rovnici

Pohybová rovnice celého vázaného systému bez tlumení,

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_s & \mathbf{0} \\ \rho_0 \mathbf{A}^T & \mathbf{M}_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{u}} \\ \ddot{\mathbf{p}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_s & -\mathbf{A} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_s \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (29)$$

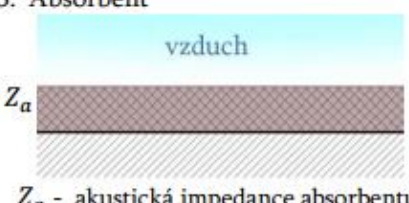
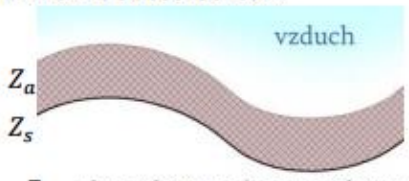
kde s je index pro strukturu a a je index pro akustický subsystém. Sloupcový vektor deformačních parametrů v uzlech struktury označuje $\mathbf{u}$ a $\mathbf{p}$ obsahuje hodnoty akustického tlaku v uzlových bodech. Nesymetrické matice hmotnosti a tuhosti jsou označeny písmeny $\mathbf{M}$ a $\mathbf{K}$ a $\mathbf{A}$ je vazební matice systému. Pokud je uvažováno i tlumení, pak rovnice navíc obsahuje pod $\mathbf{f}_s$ místo nuly sloupcový vektor tlumení $\mathbf{f}_F$ a navíc přibude člen prvního řádu.[14]

4.2. Akustická analýza

Akustická analýza, která je dostupná v prostředí *ANSYS Multiphysics* a *ANSYS Mechanical Programs* po nainstalování *ACT Extensions*, obvykle zahrnuje modelování šíření ultrazvuku v kapalném médiu, které se nachází uvnitř nějaké nádoby. Typickými sledovanými veličinami je měnící se tlak a rychlost šíření. Program počítá s tím, že použitá kapalina je stlačitelná, ale povoluje pouze relativně malé změny tlaku v porovnání s hodnotou průměrného tlaku. V těchto analýzách není také zahrnuto žádné proudění kapaliny. Výsledný tlak je vypočítán z průměrného tlaku, nikoliv z tlaku absolutního. Šíření zvuku skrz pružné médium způsobuje měřitelnou změnu tlaku, rychlosti, teploty a hustoty. Akustická energie se při šíření ztrácí změnou v teplo. Velikost těchto ztrát souvisí s viskozitou média a s vedením tepla. Schopnost pohlcovat akustickou energii (koeficient α) a schopnost odrážet akustickou energii (koeficient τ) jsou 2 základní parametry materiálů při modelování šíření ultrazvuku.[6]

Pokud dochází k modelování šíření ultrazvuku různými prostředními, tj. vlnění prochází z jednoho prostředí do druhého, pak v akustické analýze nastavujeme 3 základní okrajové podmínky, které s využitím Helmholtzovy rovnice (nahore) upravují parametry přechodu: Dirichletova a Neumanova podmínka, u kterých se ještě rozlišuje, zda je materiál homogenní nebo nehomogenní, a Robinova podmínka. V programu je automaticky přednastavena podmínka Neumanova, která počítá s pružným rozhraním.

Tabulka 8. Hraniční podmínky (převzato z [13])

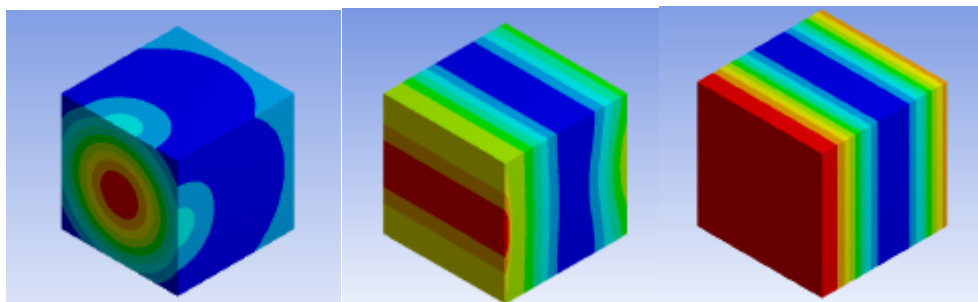
Typ rozhraní	Hraniční podmínky	Rychlost částic vzduchu
1. Tuhé: 	Dirichletova podmínka stejně rychlosti $\frac{\partial p}{\partial n} = 0$	$v_n = 0$
2. Pružné 	Neumanova podmínka stejně rychlosti $\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} = -\ddot{w}$	$v_n = \dot{w}$
3. Absorbent 	$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} = -\frac{1}{Z_a} \dot{p}$ Robinova podmínka $A \cdot p + B \cdot v_n = C$	$v_n = \frac{p}{Z_a}$ nebo pro admitanci A_n $\frac{v_n}{p} = A_n$
4. Pružné s absorbentem 	$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} = -\left(\frac{1}{Z_a} - \frac{1}{Z_s}\right) \frac{\partial p}{\partial t}$	$v_n = \frac{p}{Z_a} + \frac{p}{Z_s}$

Pro akustickou oblast fyziky jsou dostupné 4 různé typy analýz:

- Modal Analysis (frekvenční oblast) – popisuje rozložení frekvencí uvnitř struktury
- Harmonic Response Analysis (frekvenční oblast) – používá harmonické funkce
- Transient Analysis (časová oblast) – simulace šíření vlnění
- Response Spectrum – počítá odpověď struktury na časově dlouhé a náhodné jevy (zemětřesení, vibrace raketového motoru)

Pro modelování senzoru hladiny oleje je vhodné využít transientní analýzu (Transient Analysis), protože se zjišťuje, za jakou dobu senzor zachytí odezvu na vyslané vlnění, z čehož se následně vypočítá vzdálenost referenčního bodu. V tranzientních úlohách lze zdrojové vlnění zadat třemi různými způsoby:

- Typ zdrojového vlnění
- Povrchové normálové zrychlení
- Povrchové zrychlení



Obrázek 14. Typ zdrojového vlnění - sférické, cylindrické a rovinné (převzato z [6])

Pokud se označí jako zdroj bod, pak bude docházet ke sférickému vlnění. V případě, že se vybere hrana, bude vlnění cylindrické. A při zvolení plochy nastane rovinné vlnění. Normálové zrychlení může být aplikováno na vnější povrch, což by mělo simulovat přiloženou sondu. Při tomto typu zadání je potřeba zadat do tabulky požadované zrychlení virtuální částice, která generuje ultrazvukové vlnění. Při povrchovém zrychlení zadáváme hodnoty jednotlivě pro zrychlení v ose x , y a z .

Při zadávání akustických okrajových podmínek lze dále nastavovat také impedanci prostředí nebo koeficient útlumu α na zvoleném povrchu. Pro simulování tenké struktury, která se nachází uvnitř použitého materiálu, lze vložit „impedanční list“, u kterého se nastaví požadovaná hodnota resistance. Pokud je znám průběh akustického tlaku v čase na určité ploše, je možné tuto plochu vybrat a tyto hodnoty zde zadat jako okrajovou podmínku.

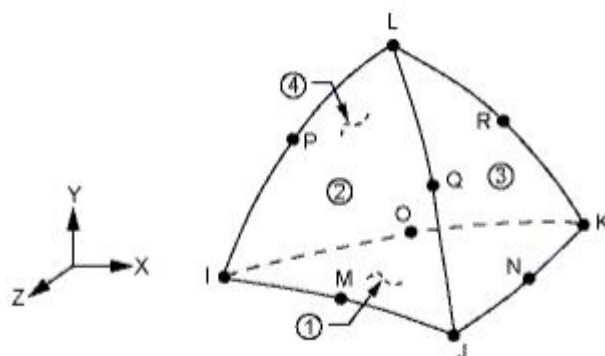
V případě, že se modeluje pouze určitá oblast zájmu prostředí, ve kterém se ultrazvuk šíří, je potřeba zadat na krajních plochách modelu, kde ve skutečnosti žádná změna prostředí nenastává, koeficient absorpce tak, aby nedocházelo ke zpětnému odrazu. Existují 3 typy absorpčních podmínek:

Tabulka 9. Typy absorpčních podmínek

Typ podmínky	Modální úloha	Harmonická úloha	Tranzientní úloha
PML	Ne	Ano	Ne
Radiace	Ano	Ano	Ano
Absorpce	Ano	Ano	Ano

Absorpční podmínka radiace je založena na Robinově hraniční podmínce ($A^*p - B^*v_n = 0$) a lze ji aplikovat na jakýkoliv tvar povrchu. Naopak fluidní absorpční prvky (Absorpce) vytváří pouze kulový povrch ve vzdálenost D od zadaného středu. Pro vzdálenost větší jak D od zadaného středu se pak nastaví parametry tekutiny, ve které se daný model nachází (například vzduch), čímž se splní Sommerfeldovova vyzařovací podmínka (vlnění se šíří do nekonečna). Fluidní absorpční vrstva je tvořena z prvků FLUID 130. Tento prvek je definován čtyřmi uzly.

Při řešení je používán také prvek FLUID 221, který se řadí mezi kapalinové prvky, i přesto, že se jedná o strukturální řešič. Je to dáno rozšířením pro akustiku. Izoparametrický prvek FLUID 221 obsahuje 10 uzlů a umožňuje výpočet Eulerovským způsobem. Tento prvek se vyskytuje ve dvou variantách. V základní variantě je prvku předepsán pouze jediný parametr, tlak p . Používá se pro modelování kapaliny, kde je vyloučen kontakt s poddajným tělesem. Pokud je prvek v kontaktu s poddajným tělesem, je potřeba použít modifikovanou variantu, ve které jsou každému prvku předepsány čtyři stupně volnosti, tlak p a odpovídající složky posunutí u_x , u_y , u_z . V uzlech, které jsou společné pro obě varianty prvku, se stupně volnosti odeberou.[13]



Obrázek 15. Prvek FLUID 221 (převzato z [13])

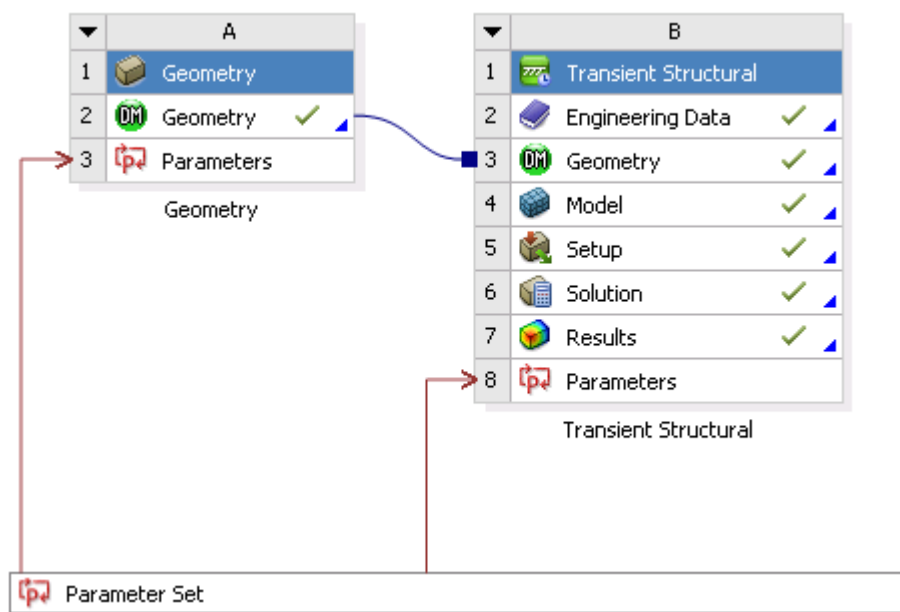
Knihovna programu ANSYS obsahuje dva základní typy prvků – lineární a kvadratické. U lineárních prvků se uzly vyskytují pouze ve vrcholech, zatímco kvadratické prvky mají uzly i uprostřed hran. Při modelování šíření vlnění je zapotřebí, aby vzdálenost vytvořená 12 lineárními prvky byla menší než vlnová délka definované vlny. Jelikož se v této práci využívají spíše kvadratické prvky, protože u nich je podmínka stanovena pouze na 6 elementů na vlnovou délku, je maximální velikost kvadratického prvku dána vztahem:

$$I_{MAX} \leq \lambda / 6 \quad (30)$$

4.3. Příprava numerického modelu

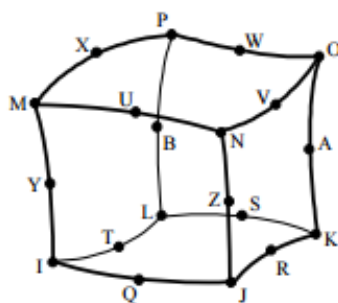
Při simulování šíření ultrazvuku zvoleným prostředím v programu ANSYS je nejprve zapotřebí nainstalovat balíček *Acoustics ACT Extension* a následně při každém spuštění vždy zatrhnout políčko *Acoustics*.

Z oddílu *Analysis Systems* se vybere typ úlohy, která je nejvhodnější pro daný druh simulace. Pro zobrazení šíření ultrazvuku v čase se používá *Transient Analysis*. Zde se musí nejprve načíst vytvořená geometrie (nejčastěji v programu SOLIDWORKS). Pokud daná geometrie neobsahuje vhodnou plochu, která by se při následném nastavování dala označit za vysílač a přijímač ultrazvukového vlnění (sondu), je potřeba v záložce *Geometry* provést rozdělení plochy. Nejprve se vybere požadovaná plocha a v hlavní liště v nabídce *Create* se zvolí *New Plane*. Následně se v záložce *Sketching* pomocí tlačítka *line* nakreslí v dané ploše vhodná dělicí čára. V podzáložce *Dimension* se vybere *Horizontal* nebo *Vertical*. Klikne se na vytvořenou čáru a protilehlou hranu, mezi nimiž bude vytvořena požadovaná plocha. Ta vznikne příkazem *Face Split* z nabídky *Tools*, když se do pole *Target Face* vloží plocha původní a do pole *Tool Geometry* jeden z koncových bodů vytvořené dělicí úsečky. V případě, že bude zkoumána různá hladina kapaliny, lze vytvořit geometrii s parametrem, podle kterého lze následně zvolit výšku měřené kapaliny v nádobě.



Obrázek 16. Tranzientní úloha s parametrem

Dvojklikem na *Model* se otevře okno, kde se nastavují všechny parametry nutné pro správný výsledek simulace. Pomocí odkazu *Mesh* se zde zvolí dostatečně jemná síť konečných prvků, tak aby byla splněna podmínka maximální vzdálenosti dvou sousedních uzlů. Vytvořená síť konečných prvků má vliv na přesnost, konvergenci a rychlost řešení. Na vytvořené geometrické modely byly aplikovány převážně prvky Hex20 a v menší míře také Wed15 (šestiuzlový klín – prizmatický prvek), když se vytvořilo řádově desetitisíce prvků a uzlů.

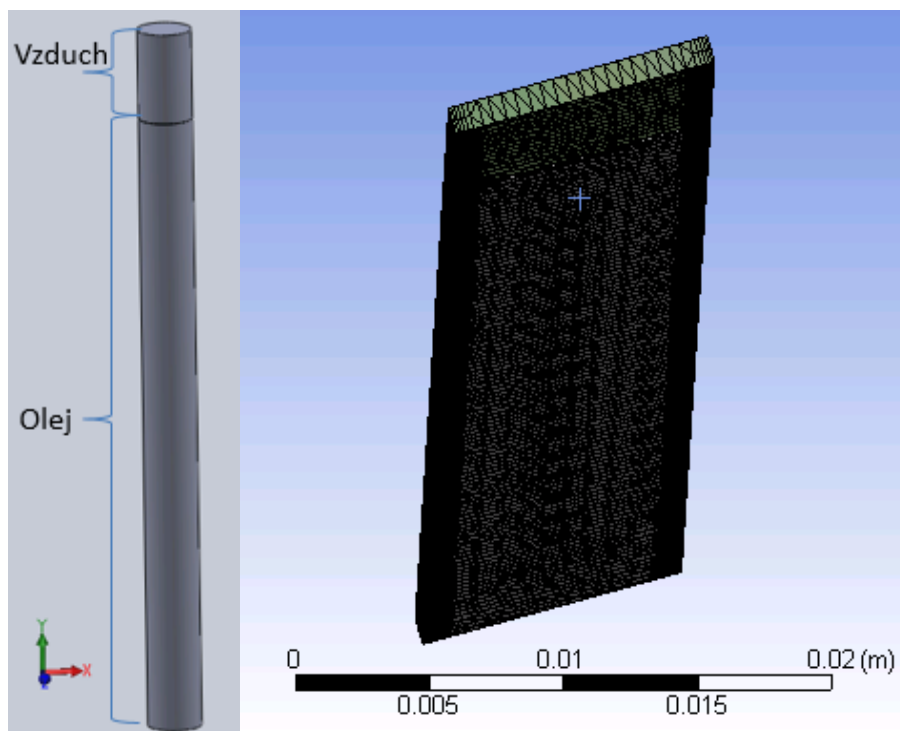


Obrázek 17. Hex20 (převzato z [6])

Jak je na obrázku (nahore) vidět, prvek Hex20 patří do skupiny kvadratických elementů (obsahují uzly i uprostřed hran). Naopak prvek Wed15 má pouze 6 uzlů, to znamená, že všechny musí ležet pouze ve vrcholech tohoto klínu a lze tedy zařadit mezi elementy lineární. Prvek Hex20 byl použit z důvodu splnění podmínky o maximální vzdálenosti mezi uzly.

Tabulka 10. Hodnoty parametrů výpočtové sítě u jednotlivých geometrií

Gemotrie	Voda	Vzduch	Reference	3D
Počet uzlů	102200	47145	44534	69553
Počet prvků	13391	18644	17487	29581



Obrázek 18. Navržený 3D model a jeho psudo 2D zjednodušení (plná nádrž)

Pro vytvoření 2D úlohy, která má být počítána na 3D geometrickém modelu, je zapotřebí rozevřít nabídku *Mesh Control* (nachází se v horní liště) a vybrat odkaz *Inflation*. Pomocí tohoto odkazu lze totiž zadat okrajovou podmínku na boční stěny

geometrie tak, aby na výška elementu, ze kterých je daná síť vytvořena, byl roven právě šířce této boční stěny a celý model tak obsahoval pouze jednu vrstvu elementů.

V oddílu *Analysis Settings* je nutné nastavit časy, ve kterých je vypočítané zrychlení ultrazvuku. Kliknutím pravým tlačítkem na odkaz *Transient* dojde ke vložení položek *Acoustic Body*, *Acoustic Normal Surface Acceleration* a *Acoustic Absorption Function*.

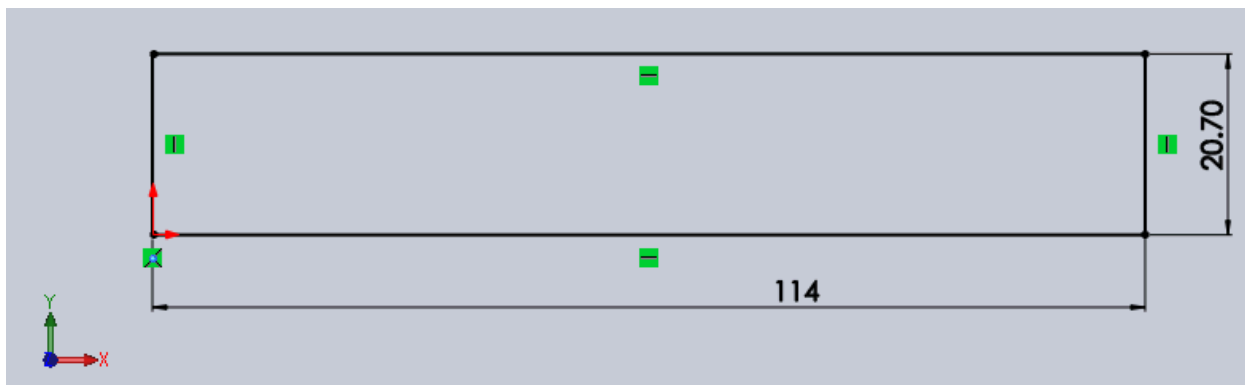
- Do položky *Acoustic Body* se vloží model, který představuje simulované prostředí, kterým se bude ultrazvuk šířit. Pro zajištění správných výsledků je zde nutné zadat hodnotu rychlosti šíření ultrazvuku a další parametry dle **Tabulka 11. Fyzikální vlastnosti**.
- Do položky *Acoustic Normal Surface Acceleration* se vloží plocha, na kterou by byla v reálných podmínkách přiložena ultrazvuková sonda. Pro zajištění správných výsledků je zde nutné zadat hodnoty zrychlení kmitající částice, která generuje ultrazvukové vlnění, v časech, které byly nastaveny v oddílu *Analysis Settings*.
- Do položky *Acoustic Absorption Surface* se vloží plochy, na kterých se bude ultrazvukové vlnění namísto odrazu pohlcovat (současně se nastaví i hodnota koeficientu absorpce).

Tabulka 11. Fyzikální vlastnosti vybraných tekutin při pokojové teplotě

Fyzikální veličina	Voda	Vzduch	Olej
Hustota ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	998	1.2	900
Rychlost zvuku v [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	1481	343	1300
Dynamická viskozita η [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]	1.00E-03	1.80E-05	3.16E-2
Objemová viskozita μ [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]	2.47E-03	1.1E-05	7.1E-3
Tepelná vodivost τ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	0.6	0.026	0.44
Specifické teplo C_p [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$]	4180	1001	2000
Specifické teplo C_v [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$]	4.078	0.720	2

4.4. Šíření ultrazvuku ve vodě

Jako prostředí, které vykazuje vlastnosti vody a kterým se bude šířit simulované ultrazvukové vlnění, byla zvolena tenká vrstva o vnitřních rozměrech nádoby použité při laboratorním měření. Toto prostředí bylo následně vytvořeno v programu SOLIDWORKS.



Obrázek 19. Rozměry používané nádoby [mm] - pohled shora

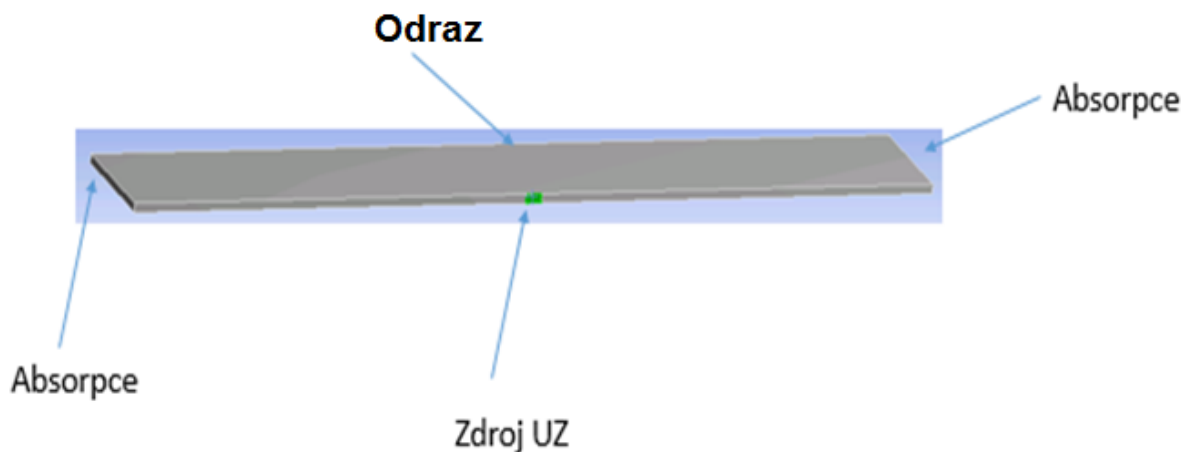
I přesto, že při laboratorním měření se prokázalo, že měření se sondou s frekvencí 20 MHz je přesnější než sondou s frekvencí 4 MHz, pro počítačovou simulaci se ukázalo jako optimální použít frekvenci 500 kHz z důvodů vysokých nároků na výpočetní rychlost i paměť při vyšších frekvencích. Výpočet maximální vzdálenosti mezi dvěma uzly pro frekvenci $f = 500$ kHz:

$$l_{MAX} = \lambda/6 = v/(6 \cdot f)$$

$$l_{MAX} = 1481/(6 \cdot 5 \cdot 10^5) [m]$$

$$l_{MAX} = 4,9 \cdot 10^{-4} m$$

Po vytvoření dostatečně jemné sítě byly aplikovány okrajové podmínky, na boční stěny koeficient absorpce 0,9 a hodnoty zrychlení kmitající částice, která slouží jako zdroj ultrazvukového vlnění, v určených časech.



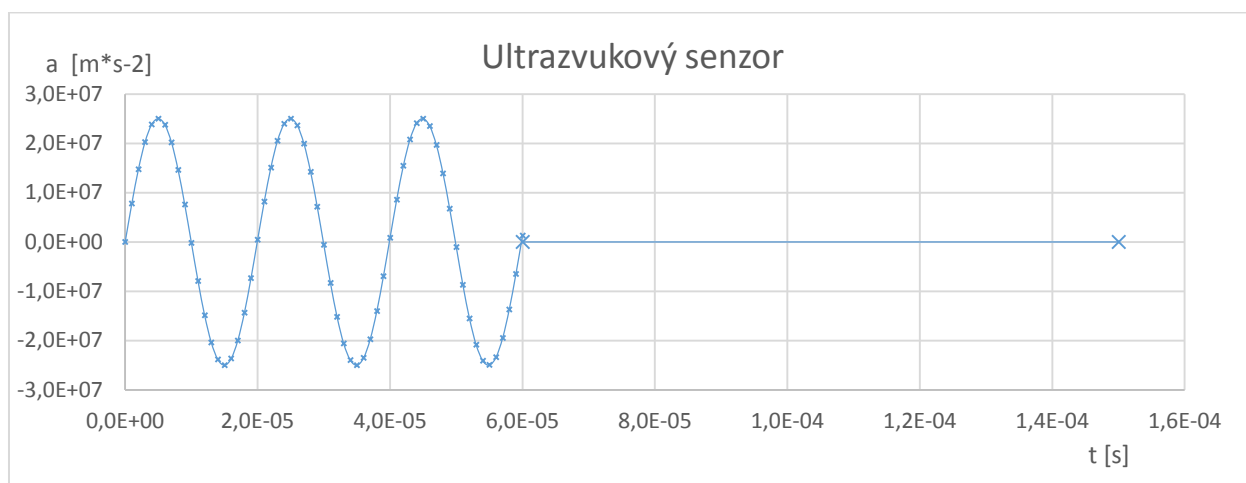
Obrázek 20. Rozložení okrajových podmínek

Při zadávání zrychlení kmitající částice, která generuje ultrazvukové vlnění, v určených časech je vždy poslední hodnota nulová. Poslední časová hodnota totiž určuje celkovou délku simulace. Pro úplnost je zde uveden příklad výpočtu zrychlení pro frekvenci 50 kHz v čase 10^{-6} s (maximální zrychlení částice bylo zvoleno $a_m = 2,5 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ a fázový posun φ je nulový):

$$a = a_m \cdot \sin(\omega t - \varphi), \text{ kde } \omega = 2\pi f$$

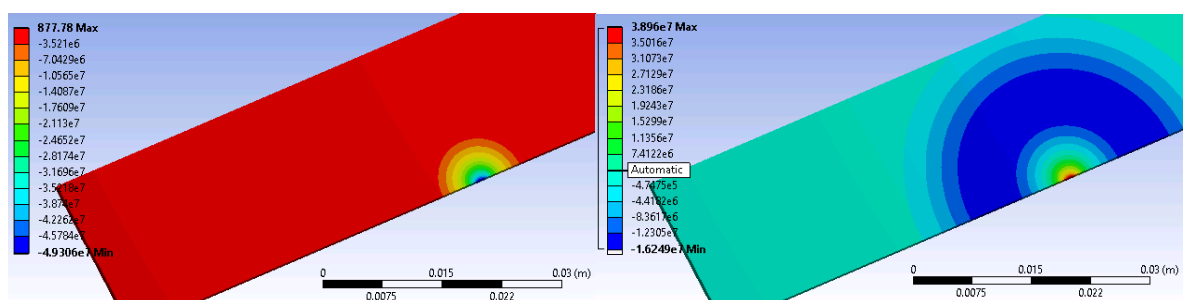
$$a = 2,5 \cdot 10^8 \cdot \sin(2\pi \cdot 5 \cdot 10^4 \cdot 10^{-6} - 0) [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}]$$

$$a = 7\,745\,412 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

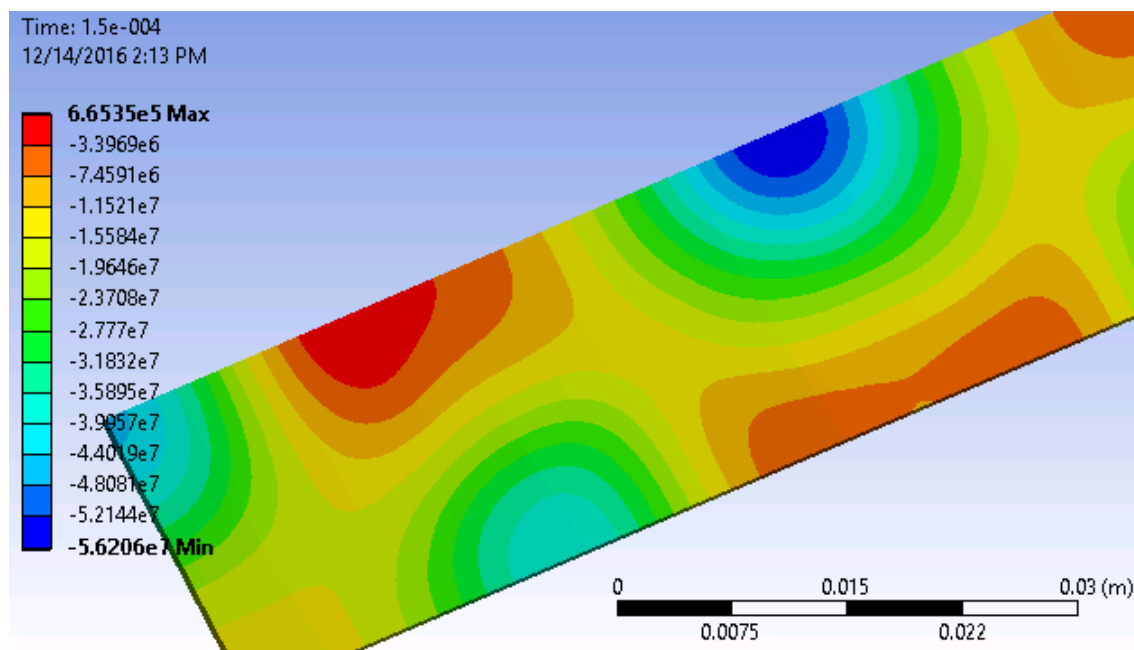


Obrázek 21. Zrychlení kmitající částice pro vlnění 50 kHz

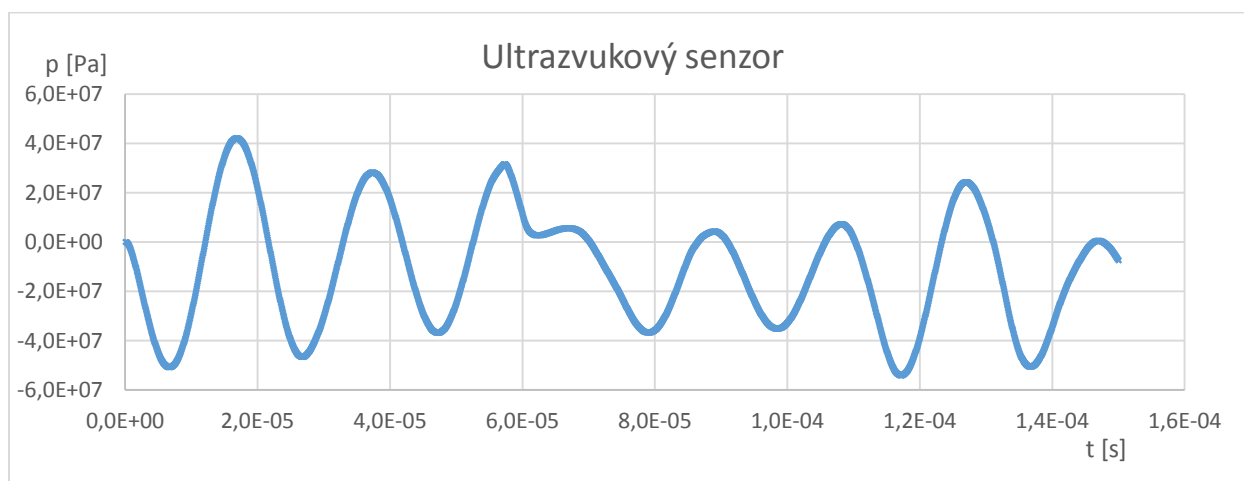
Po proběhnutí výpočtu je zapotřebí zobrazit výsledky, ze kterých se následně dopočítá vzdálenost místa, ve kterém došlo ke zpětnému odrazu, od umístění použité sondy. Nejprve je zobrazen akustický tlak v různých časech a poté výsledná tlaková křivka pro místo, kde bylo zvoleno umístění senzoru.



Obrázek 22. Akustický tlak na začátku modelování (v čase $0,5 \cdot 10^{-5}$ s a $1,5 \cdot 10^{-5}$ s)

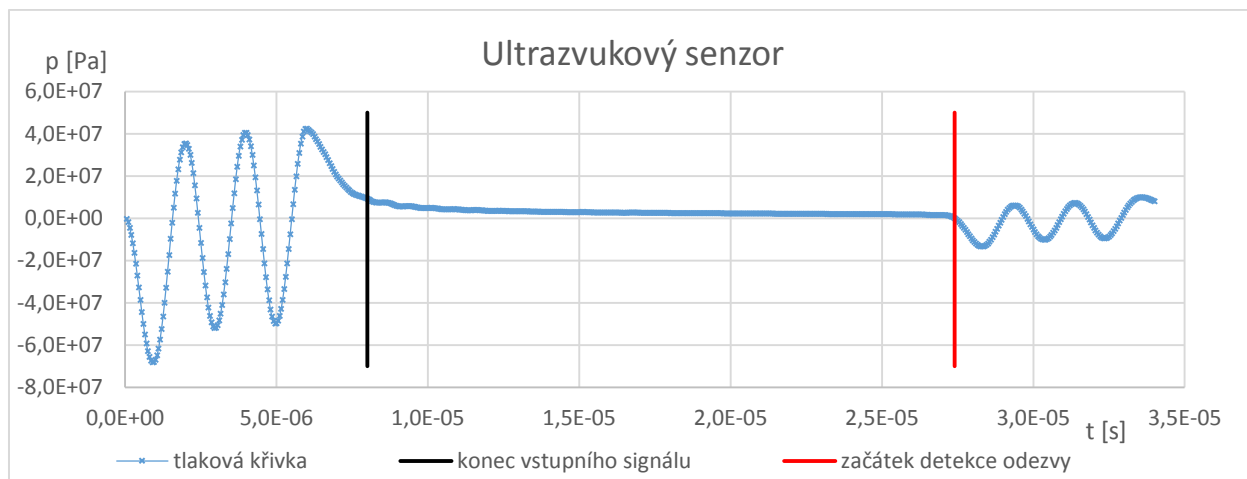


Obrázek 23. Rozložení akustického tlaku na konci modelování



Obrázek 24. Tlaková křivka pro 50 kHz

Jelikož je však tato frekvence na použité rozměry krabičky příliš nízká, ze získané křivky průběhu akustického tlaku kvůli mrtvé zóně nelze vyčíst, kdy došlo k prvnímu zaznamenání odraženého signálu (překrývá se se signálem vysílaným). Z tohoto důvodu byla za optimální zvolena frekvence ultrazvukového vlnění 500 kHz, u které pro používaný model k mrtvé zóně nedochází.



Obrázek 25. Průběh akustického tlaku v místě přiložení sondy

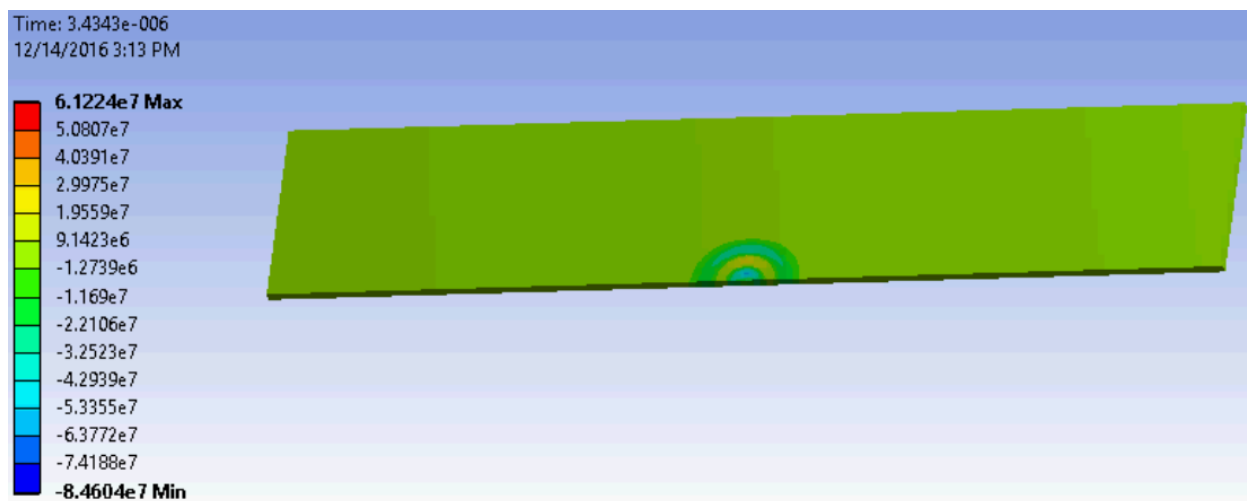
Výpočet místa odrazu:

$$t = 2,74 \cdot 10^{-5} \text{ s}$$

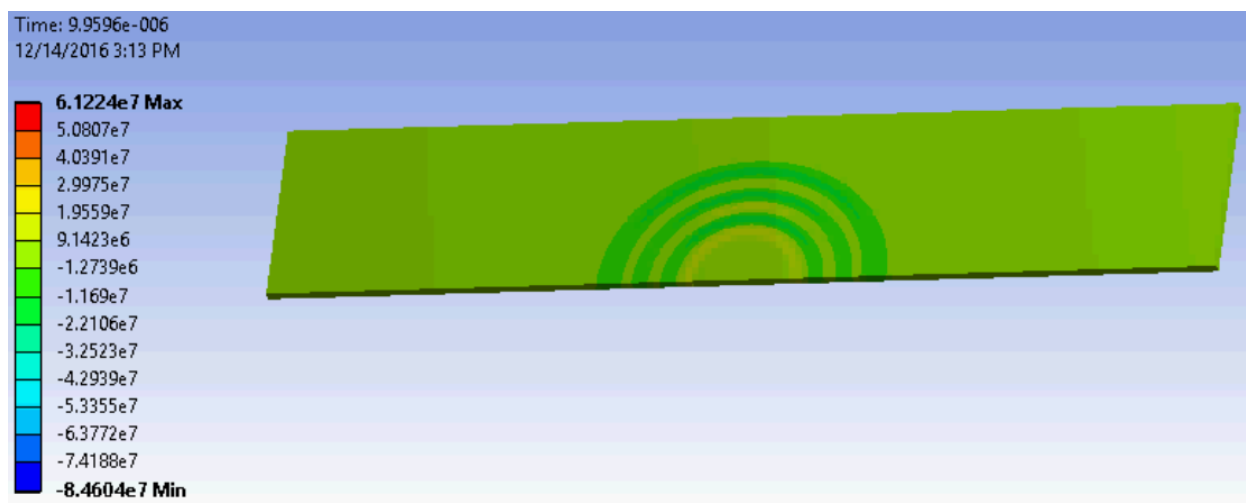
$$s = v \cdot t / 2$$

$$s = 1481 \cdot 2,74 \cdot 10^{-5} / 2 \text{ [m]}$$

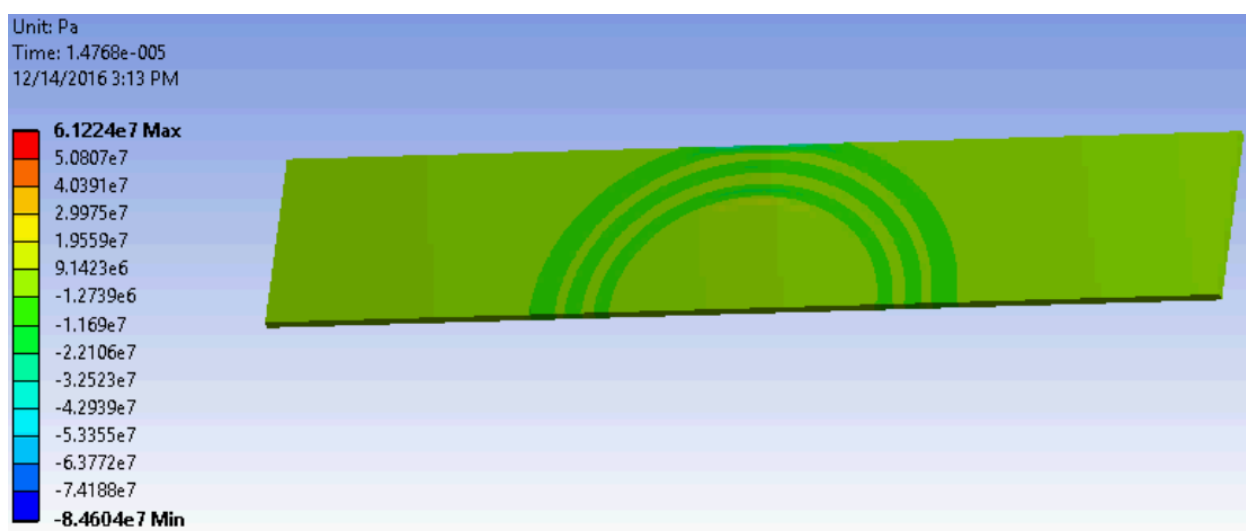
$$s = 2,029 \cdot 10^{-2} \text{ m} = 20,29 \text{ mm}$$



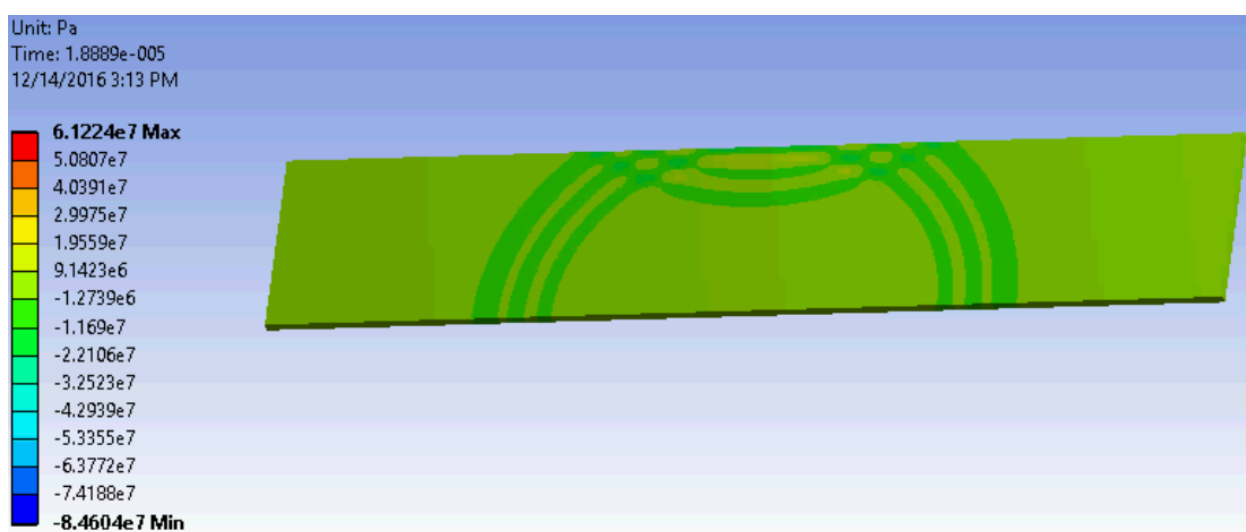
Obrázek 26. Akustický tlak v čase $3,4 \cdot 10^{-6} \text{ s}$



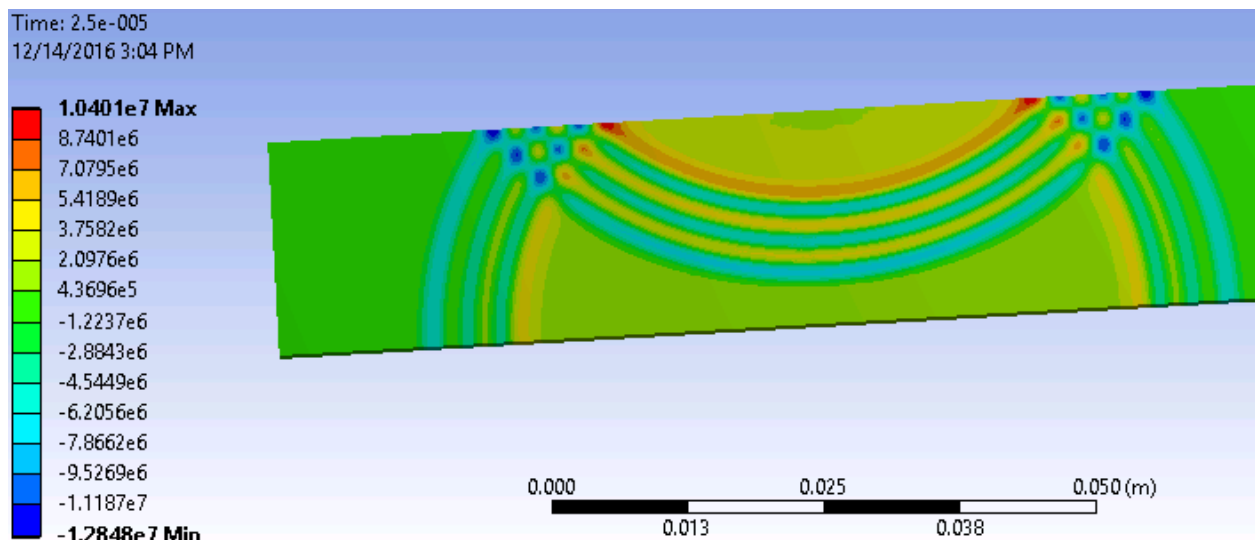
Obrázek 27. Akustický tlak v čase $9,9 \cdot 10^{-6}$ s



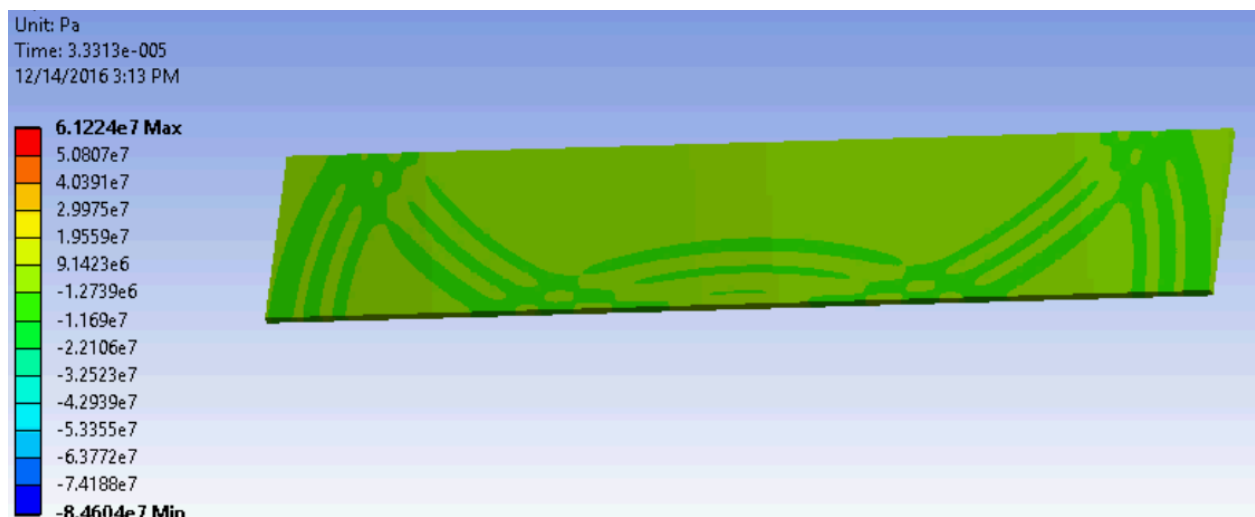
Obrázek 28. Akustický tlak v čase $1,5 \cdot 10^{-5}$ s



Obrázek 29. Akustický tlak v čase $1,8 \cdot 10^{-5}$ s



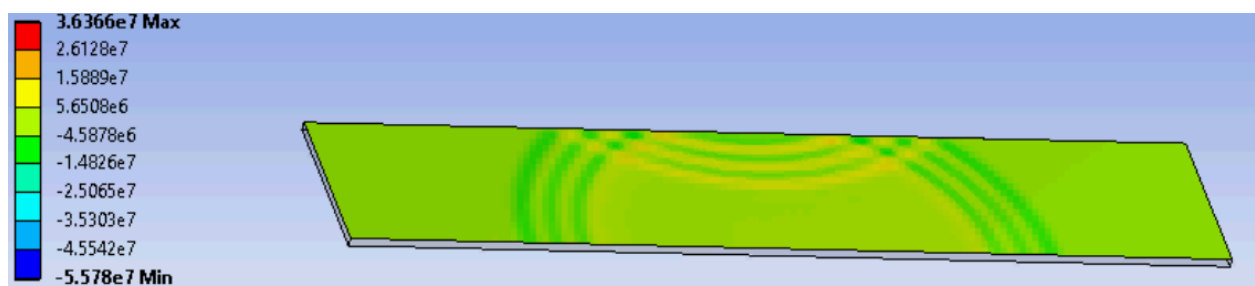
Obrázek 30. Akustický tlak v čase $2,5 \cdot 10^{-5}$ s



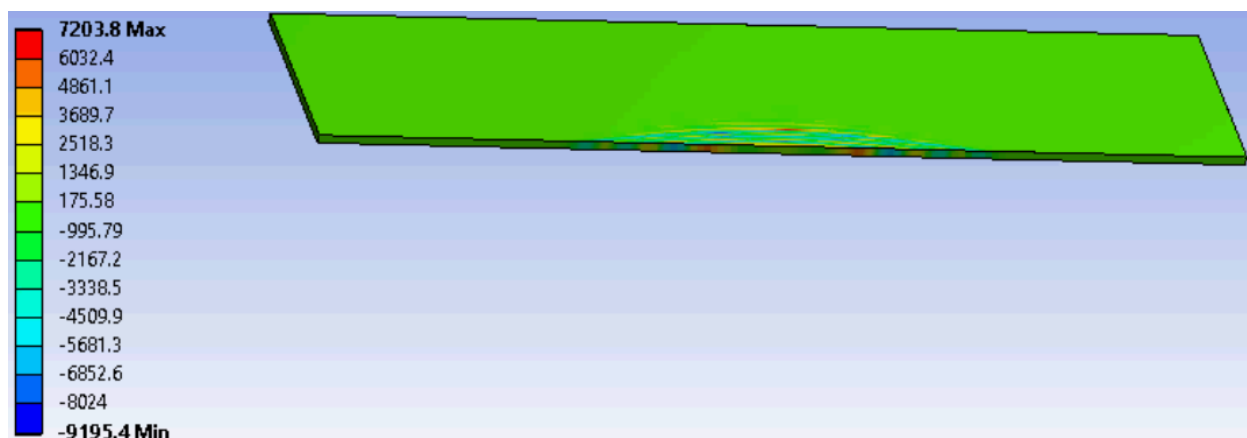
Obrázek 31. Akustický tlak v čase $3,3 \cdot 10^{-5}$ s

4.5. Rozhraní voda/vzduch

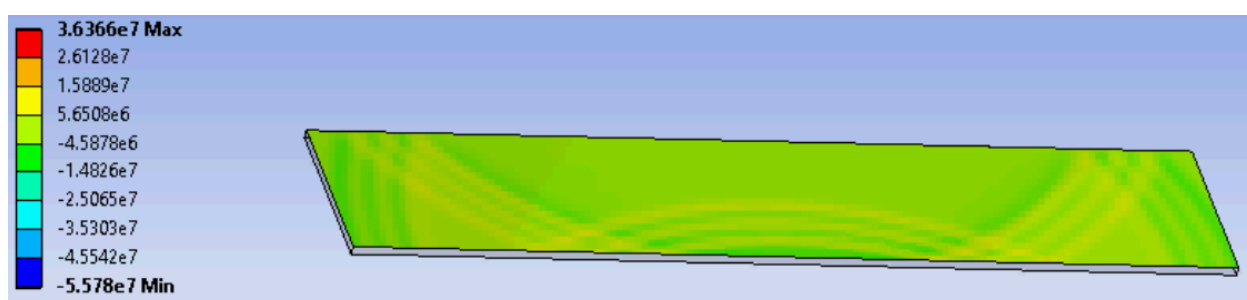
Při simulaci přestupu ultrazvukového vlnění z vody do vzduchu byl nastaven ideální kontakt rozhraní.



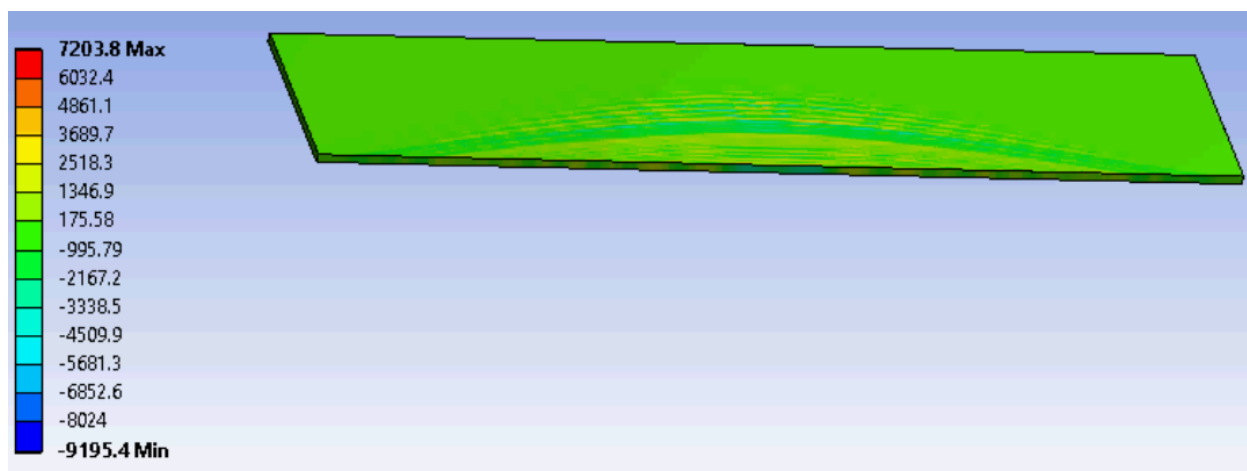
Obrázek 32. Akustický tlak ve vodě v čase $2 \cdot 10^{-5}$ s



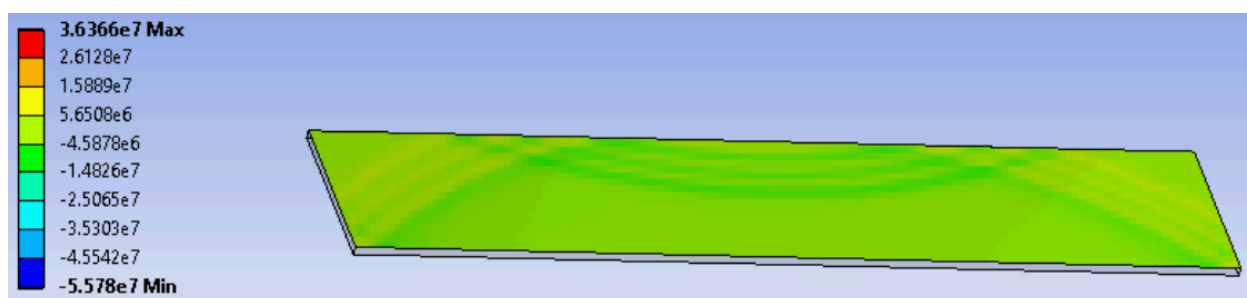
Obrázek 33. Akustický tlak ve vzduchu v čase $2 \cdot 10^{-5}$ s



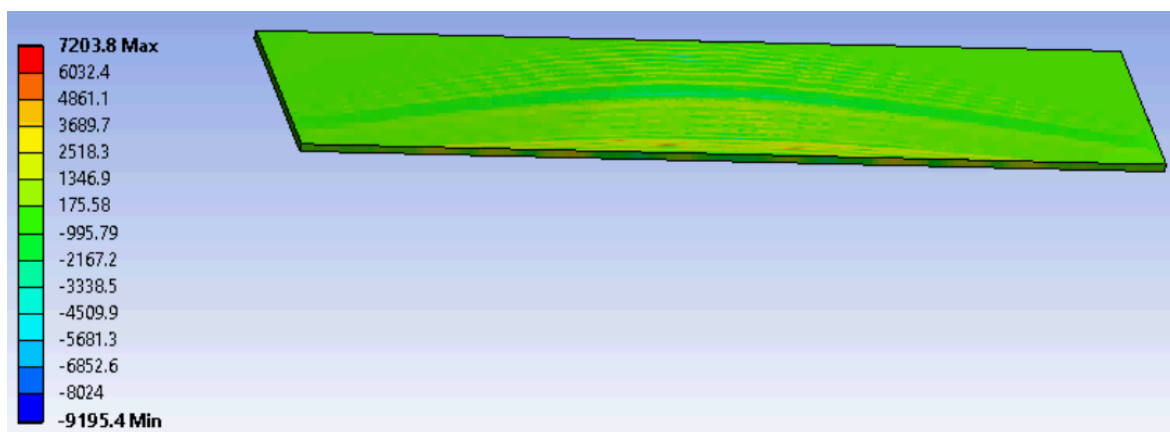
Obrázek 34. Akustický tlak ve vodě v čase $3,4 \cdot 10^{-5}$ s



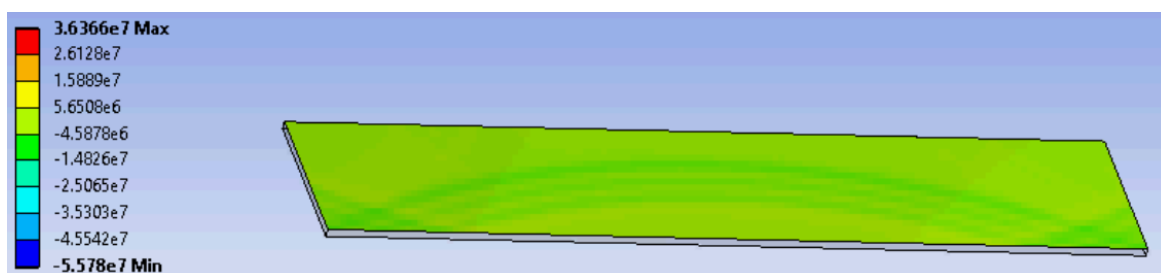
Obrázek 35. Akustický tlak ve vzduchu v čase $3,4 \cdot 10^{-5}$ s



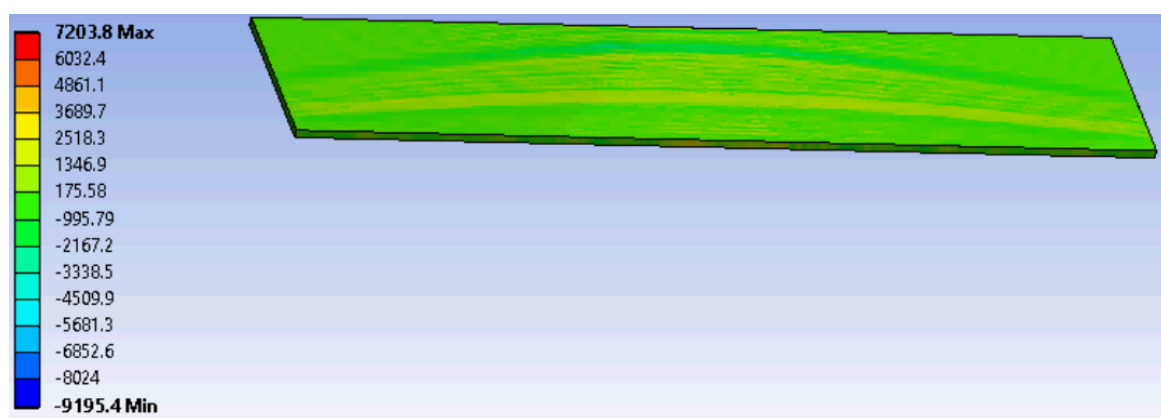
Obrázek 36. Akustický tlak ve vodě v čase $4,8 \cdot 10^{-5}$ s



Obrázek 37. Akustický tlak ve vzduchu v čase $4,8 \cdot 10^{-5}$ s



Obrázek 38. Akustický tlak ve vodě v čase $6,5 \cdot 10^{-5}$ s



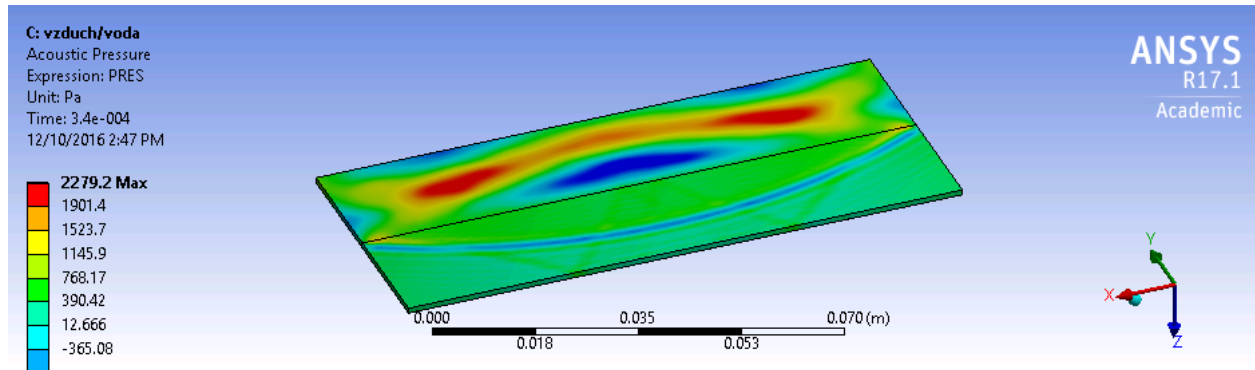
Obrázek 39. Akustický tlak ve vzduchu v čase $6,5 \cdot 10^{-5}$ s

Z obrázků je patrné, že rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou akustického tlaku ve vodě je mnohem větší než ve vzduchu. To je dáno tím, že ultrazvuk, který se nejprve šíří ve vodě, se na rozhraní voda/vzduch odráží zpět do vodního prostředí a pouze minimální část jeho energie přechází skrz rozhraní a dále se šíří ve vzduchu. Šíření ultrazvuku ve vodě je proto přiléhajícím prostředím vzduchu jen velmi málo ovlivňováno. To je dáno zejména tím, že akustická impedance vzduchu je výrazně menší oproti akustické impedanci vody. Poměr intenzity odraženého a dopadajícího vlnění R lze vyjádřit jako čtverec poměru rozdílu a součtu akustických impedancí obou prostředí.

$$R = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2 \quad (31)$$

4.6. Rozhraní vzduch/voda

Stejně jako v předchozím případě, i při simulaci přestupu ultrazvukového vlnění ze vzduchu do vody byl nastaven ideální kontakt rozhraní.

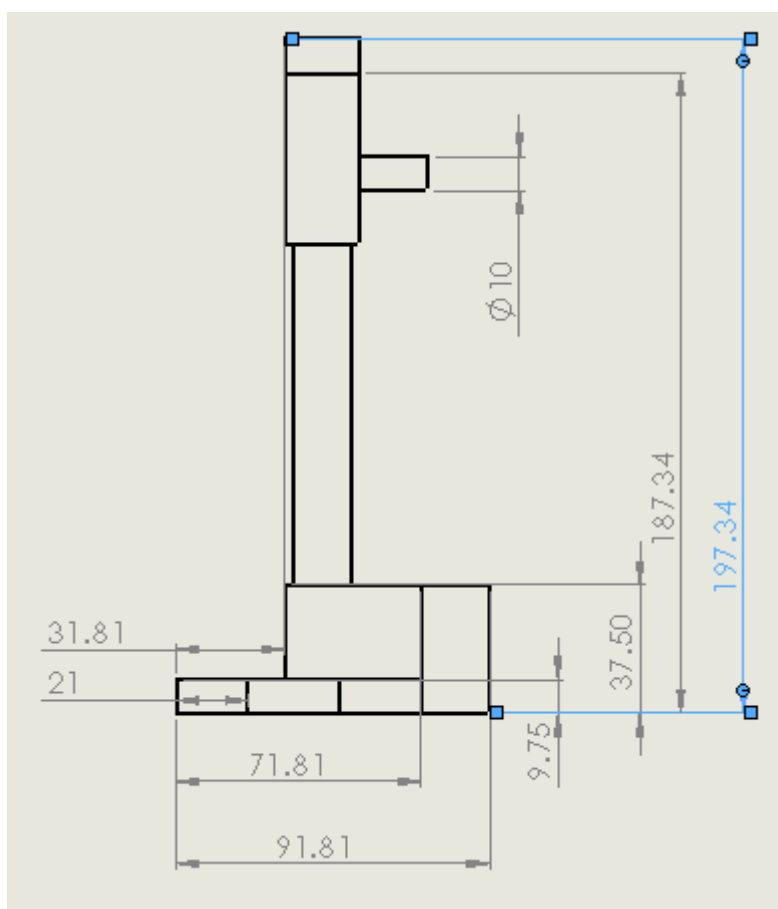


Obrázek 40. Rozhraní vzduch (dole) a voda (nahore) v čase $3,4 \cdot 10^{-4}$ s

Při simulování šíření ultrazvuku ze vzduchu do vody lze zřetelně pozorovat, jak dojde při přechodu do vody k výraznému zvýšení rychlosti vlnění. Po určitém čase, kdy se původní vlna, která se odrazila zpět do vzduchu, opět dostane na rozhraní, dochází k interakci nově prošlého vlnění do vody a vlnění, které do vody přes rozhraní prošlo již dříve. Jelikož je zaznamenán mnohem větší přestup vlnění ze vzduchu do vody než obráceně, lze na konci vytvořené simulace pozorovat daleko větší rozdíl mezi maximálním a minimálním tlakem ve vodě a nikoliv ve vzduchu (Obrázek 40), i přesto, že sonda byla přiložena ke vzduchovému prostředí.

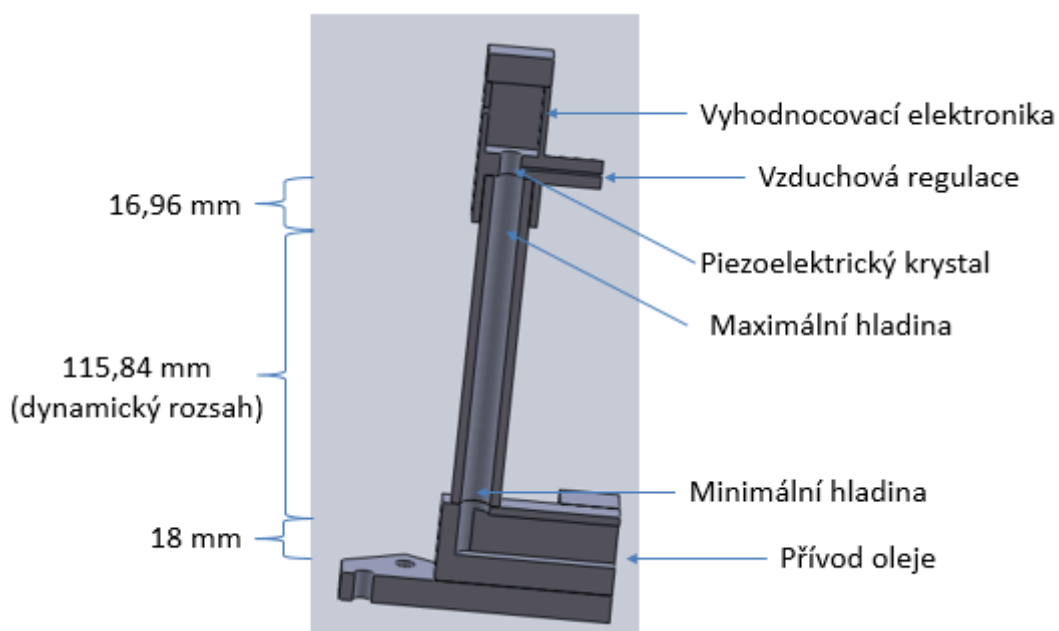
4.7. Šíření ultrazvuku ve vzduchu

Hlavním motivem celé této práce je počítačové ověření šíření ultrazvukových vln mezi piezoelektrickým krystalem (zdroj ultrazvuku a současně detektor odezvy) a hladinou motorového oleje v nádrži. Jelikož je ultrazvukový senzor navrhován pro měření hladiny především motorového oleje, musí být jeho konstrukce a vyhodnocovací elektronika dostatečně odolná vůči provozním a klimatickým jevům jako jsou vibrace, tlak, teplota, prašnost, vlhkost atd. Navrhované zařízení by mělo být pevně spojené a utěsněno s olejovou nádrží tak, aby zde byl zaručen fyzikální princip spojených nádob. Tímto způsobem by se mělo zamezit jistým rušením, která jsou přítomna ve vlastní nádrži (mimo jiné čerpání a stékání oleje), která by měla mít negativní vliv na ultrazvukové proměřování.



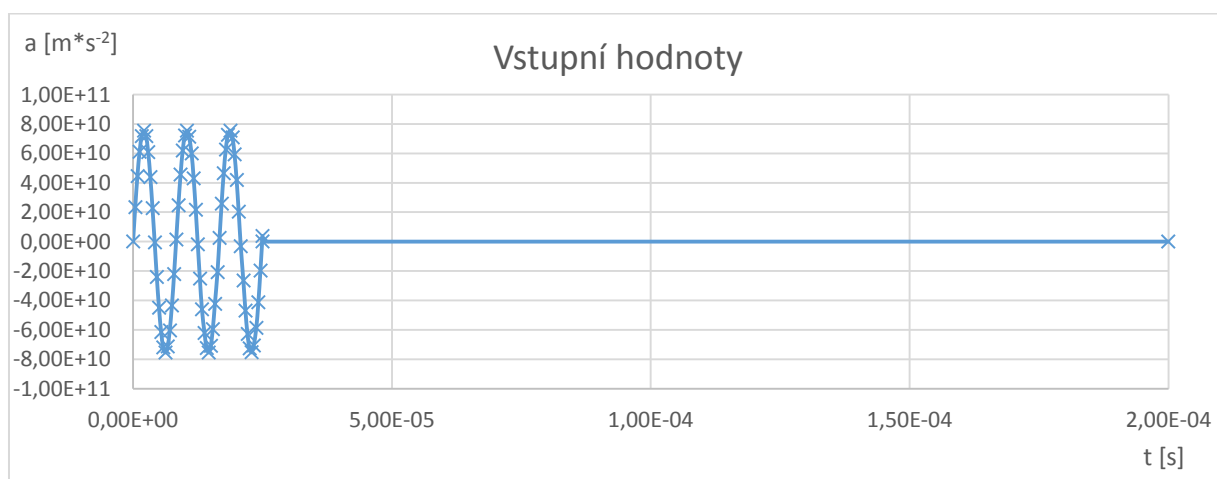
Obrázek 41. Základní rozměry senzoru [mm]

Z hlediska ultrazvukového vlnění je důležitý měřicí rozsah, tj. nejvyšší a nejnižší možná naměřená hladina. S problematikou ultrazvuku, respektive s použitou frekvencí, souvisí také vzduchový prostor mezi nejvyšší přípustnou hladinou oleje a zdrojem ultrazvuku, tedy piezoelektrickým krystalem. Vzdálenost mezi nimi, pro zaručení správného měření, musí být vždy větší než vypočtená mrtvá zóna dle zvolené frekvence použitého ultrazvukového vlnění.

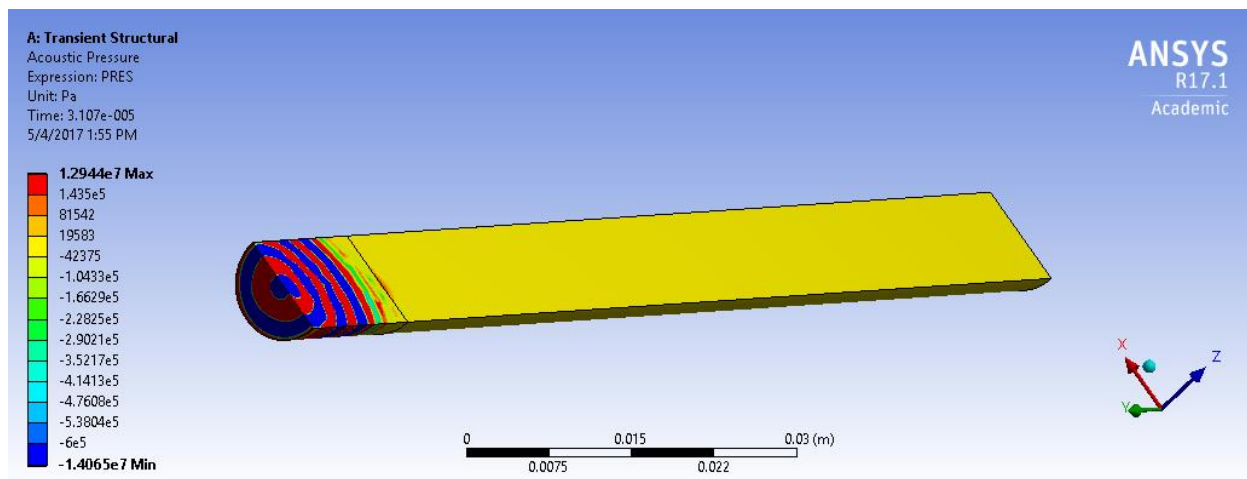


Obrázek 42. Řez měřicím zařízením

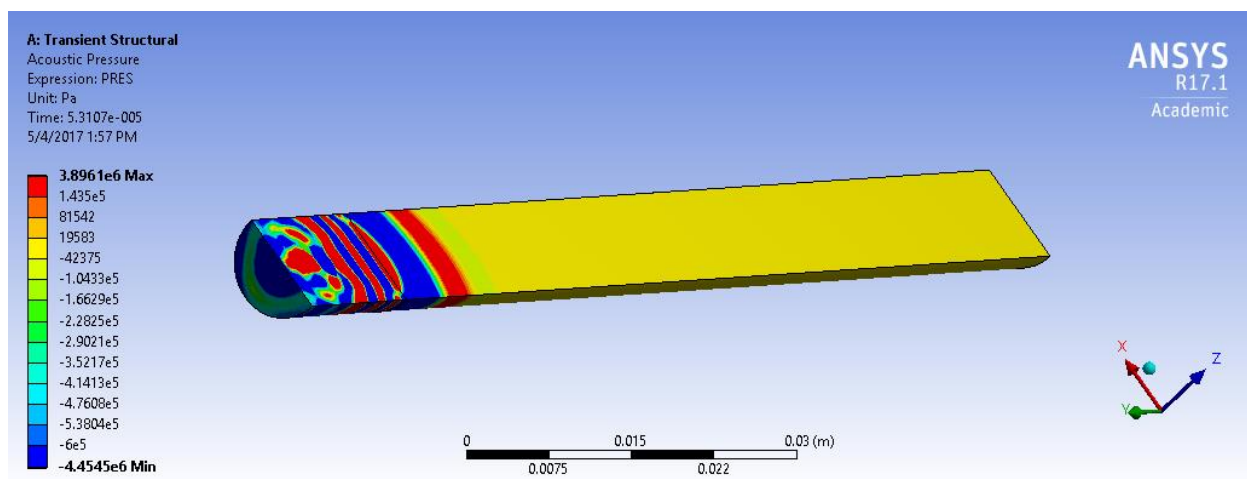
Nejprve byl proveden řez tímto prostředím a simulace byla odzkoušena na klasické 3D geometrii. Byla zvolena maximální výška hladiny a dle mrtvé zóny (musí být menší než 16,96 mm, tj. vzdálenost mezi zdrojem vlnění a maximální výškou hladiny) byla vypočtena frekvence vlnění i s rezervou 120 kHz.



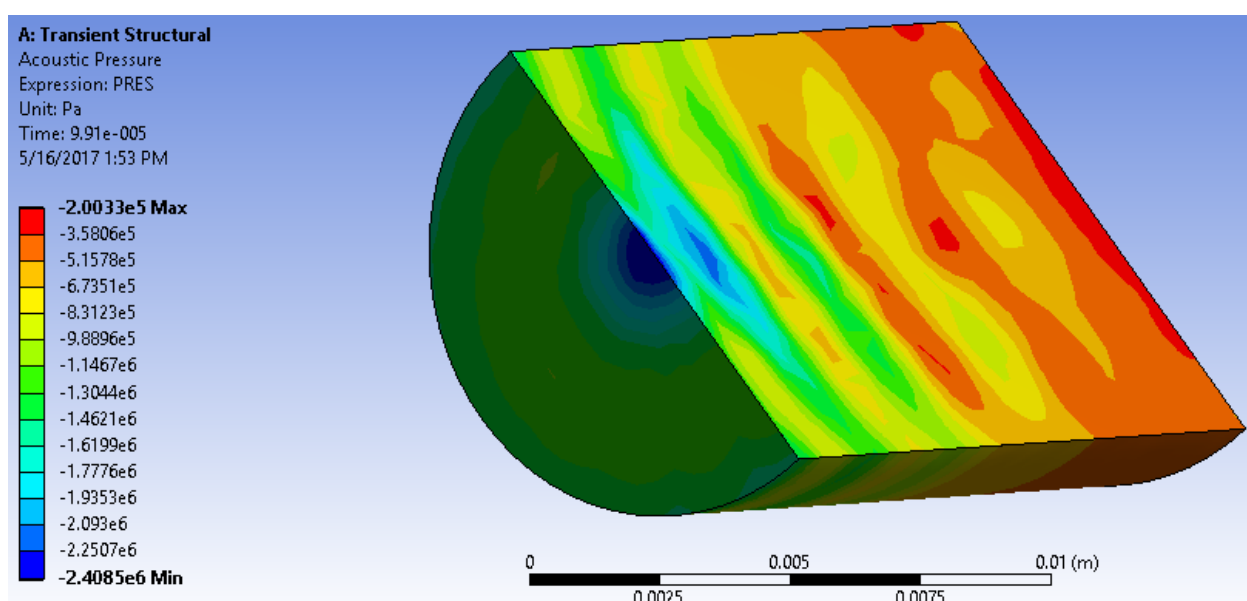
Obrázek 43. Zdroj ultrazvukového vlnění



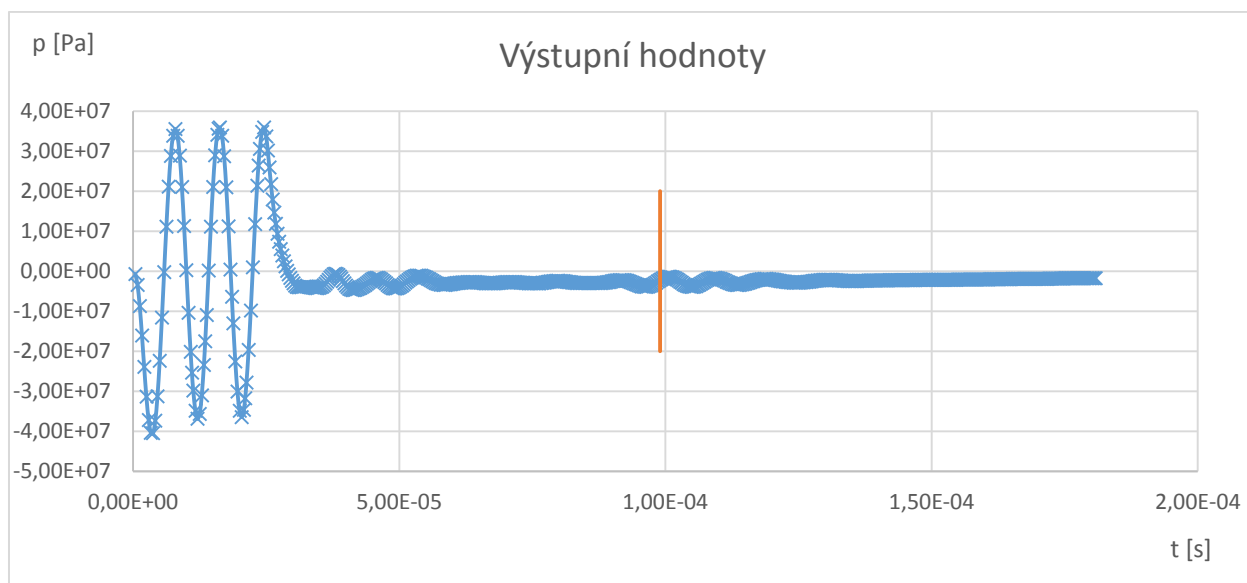
Obrázek 44. Šíření ultrazvuku ve vzduchu v čase $3,107 \cdot 10^{-5}$ s



Obrázek 45. Vlna na rozhraní vzduch/olej v čase $5,3107 \cdot 10^{-5}$

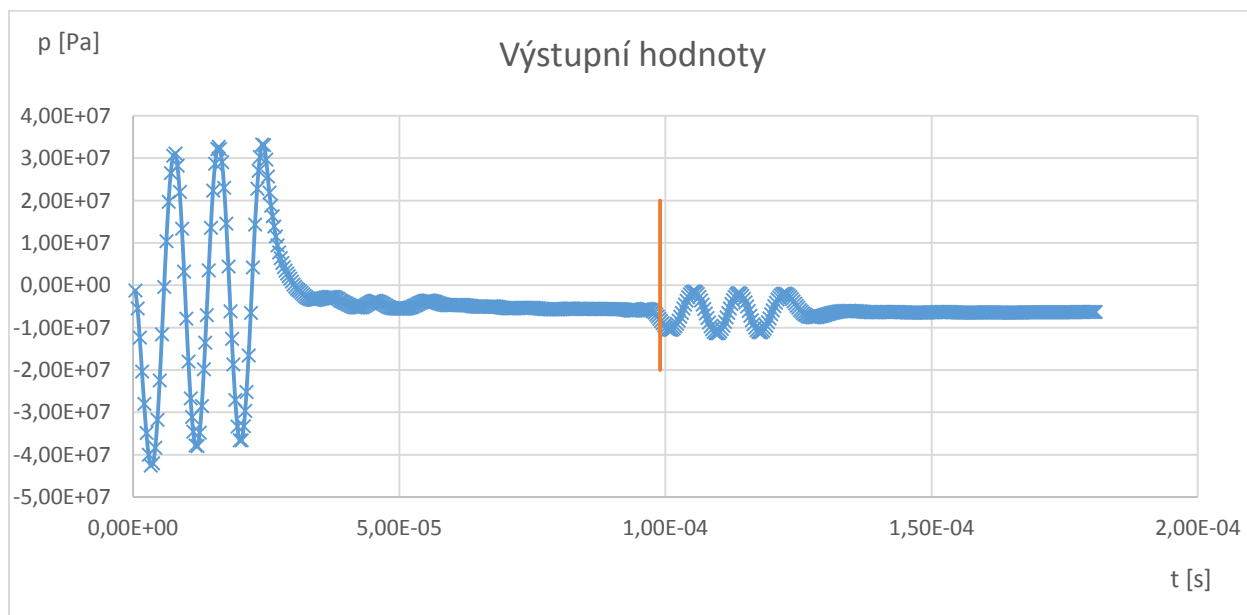


Obrázek 46. Ultrazvukové vlnění ve vzduchu v době detekce odezvy, v čase $9,91 \cdot 10^{-5}$



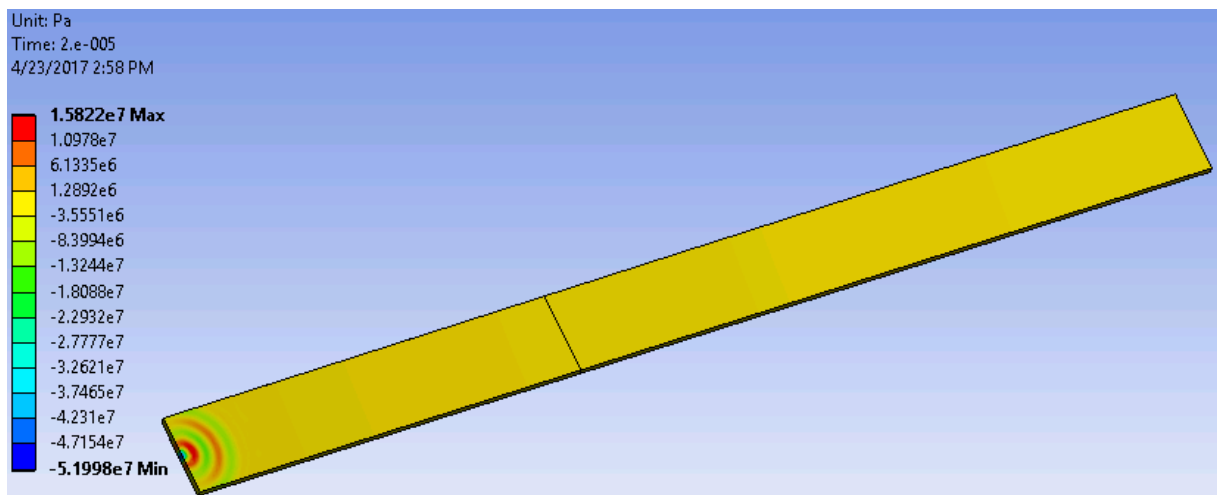
Obrázek 47. Hodnoty tlaku v místě piezoelektrického krystalu

Z grafu (nahore) je patrné, že odezvě ve správném čase (vyznačena opět červenou čarou) předchází ještě různě vysoké kolísání tlaku vzápětí po vyslání signálu. Je to dáno zejména předchozími rychlými změnami tlaku díky vysílanému impulsu, ale nepatrný vliv zde vykazuje také odraz od bočních stěn, pro které byl zvolen koeficient absorpce roven hodnotě 0,9. Výpočet šíření ultrazvuku v senzoru při plné nádrži na klasické 3D geometrii byl docela časově náročný a při použití zjednodušeného 2D modelu vycházely téměř shodné výsledky co se času detekce odezvy týká (srovnej nahore a, tudíž pro detekci nižší než maximální výšky hladiny, pro kterou se čas mezi impulsem a detekci samozřejmě prodlužoval, byl používán už pouze 2D model.

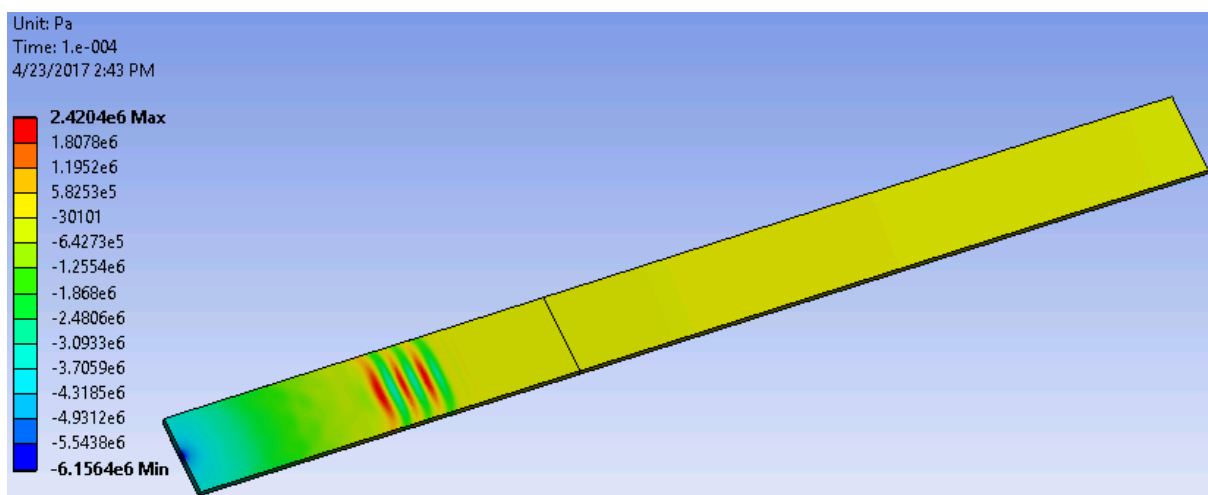


Obrázek 48. Hodnoty tlaku v místě piezoelektrického krystalu u 2D modelu

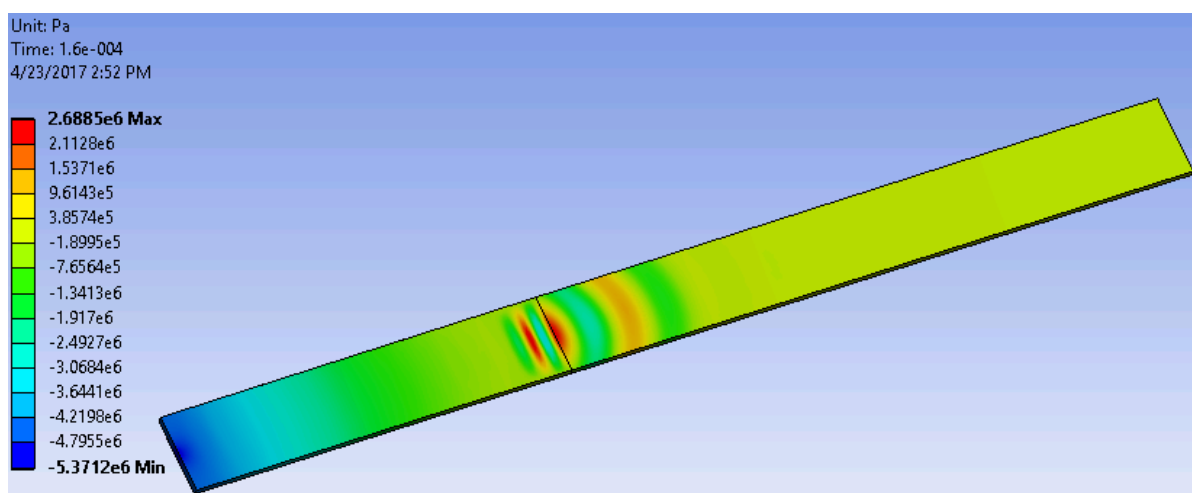
V následující části jsou představeny výsledky modelování nádrže naplněné zhruba ze dvou třetin (hladina je ve výšce 82,8 mm ode dna senzoru), následně pak hladina oleje na minimální hodnotě měřeného rozsahu.



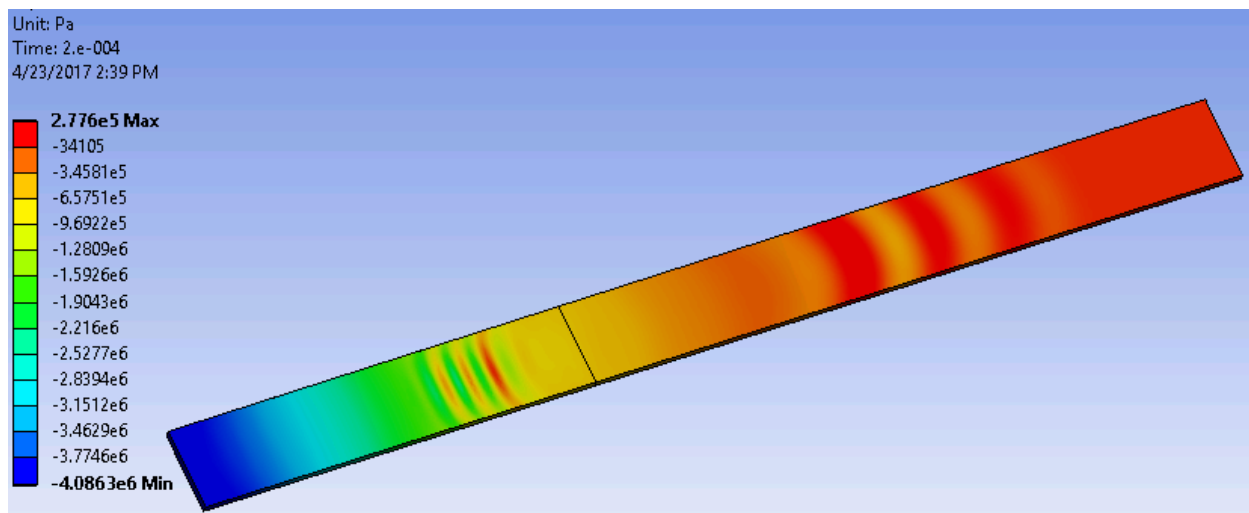
Obrázek 49. Ultrazvukové vlnění v čase $2 \cdot 10^{-5}$ s



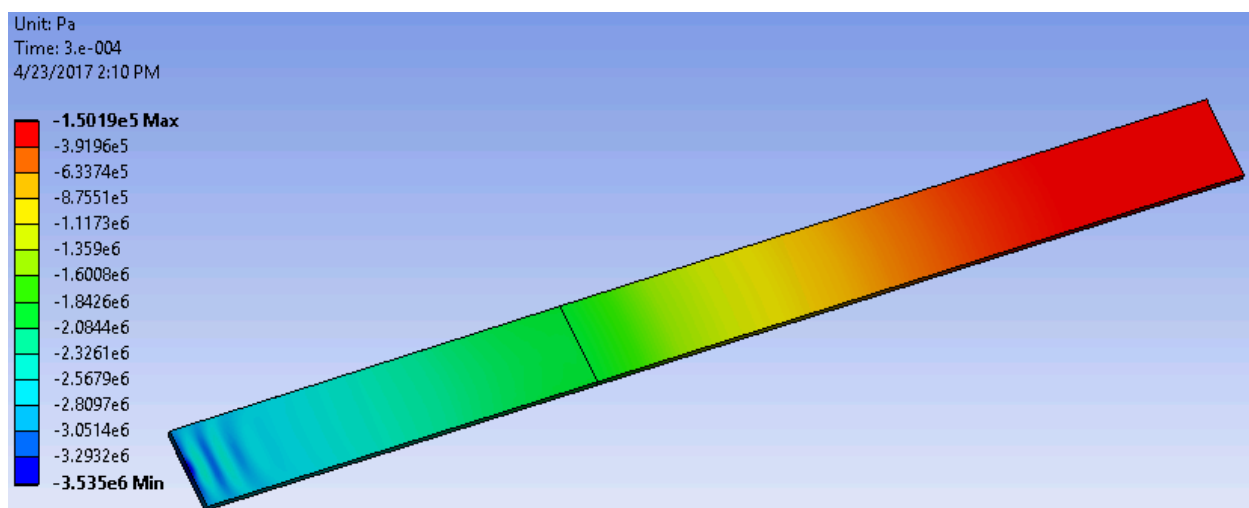
Obrázek 50. Ultrazvukové vlnění v čase 10^{-4} s



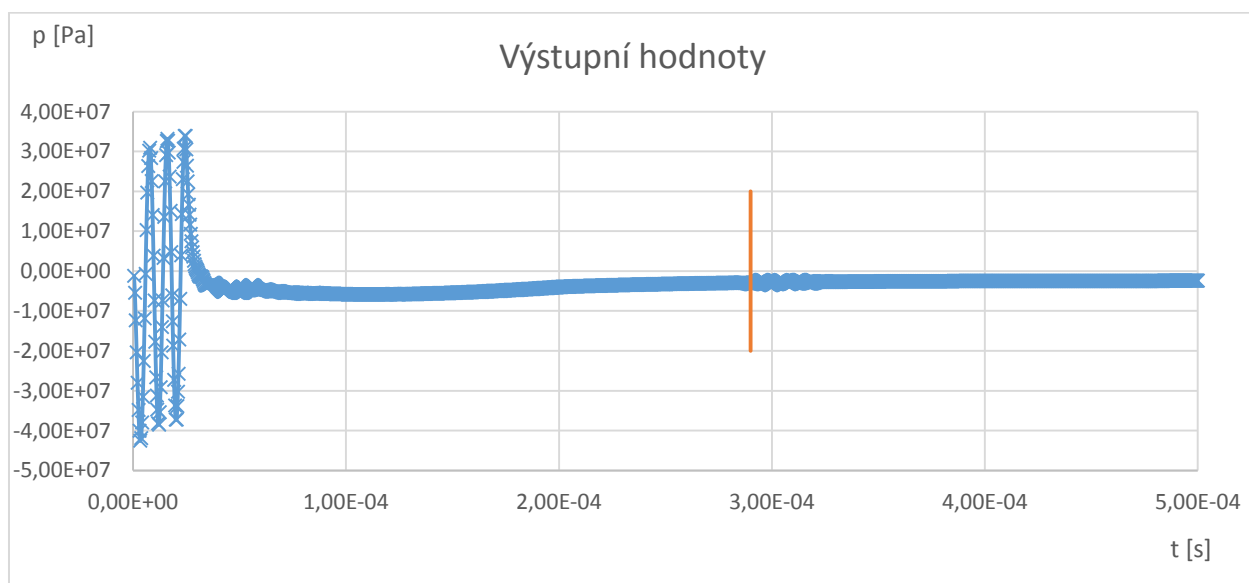
Obrázek 51. Ultrazvukové vlnění v čase $1,6 \cdot 10^{-4}$ s



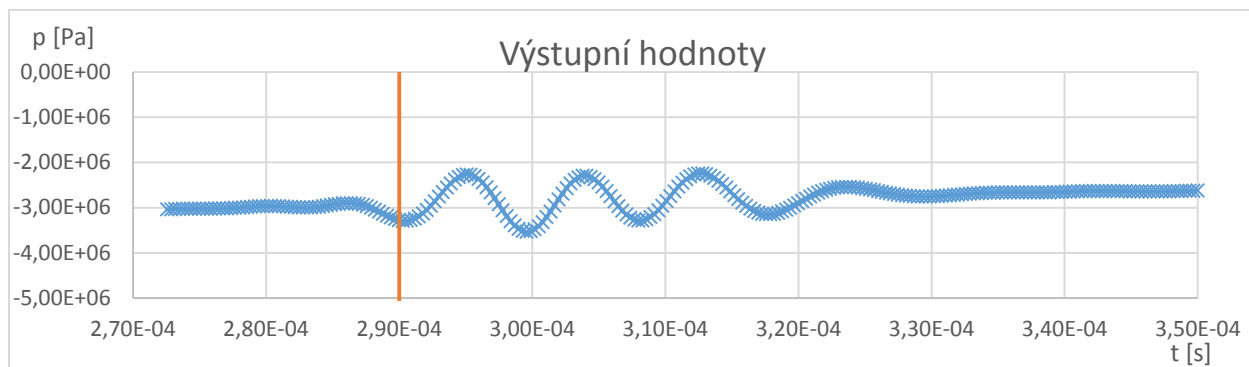
Obrázek 52. Ultrazvukové vlnění v čase $2 \cdot 10^{-4}$ s



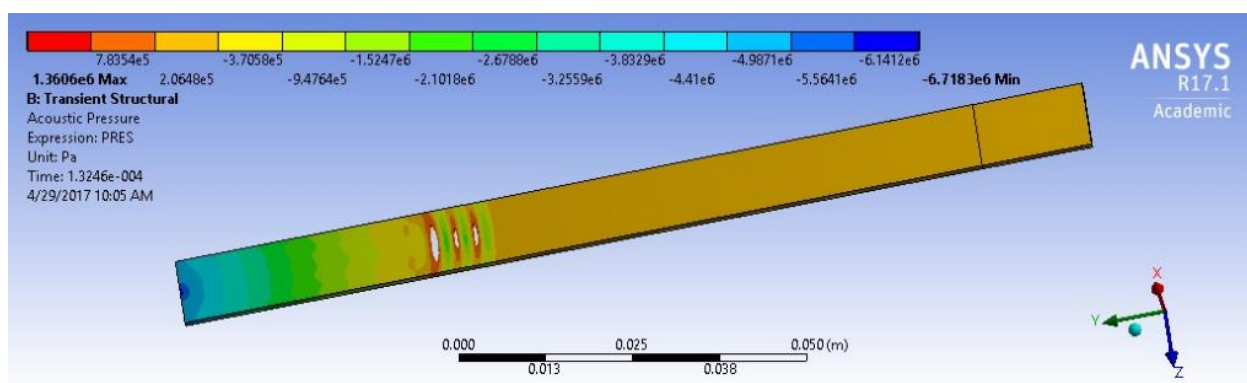
Obrázek 53. Ultrazvukové vlnění v čase $1,6 \cdot 10^{-4}$ s



Obrázek 54. Hodnoty tlaku v místě piezoelektrického krystalu pro hladinu 82,8 mm

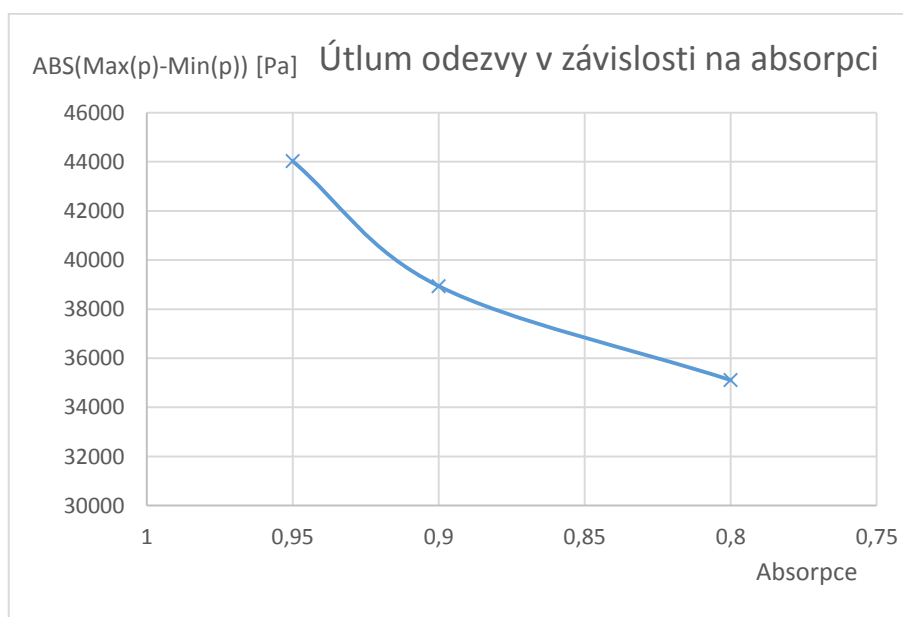


Obrázek 55. Výřez z grafu nahoře v čase detekování odezvy

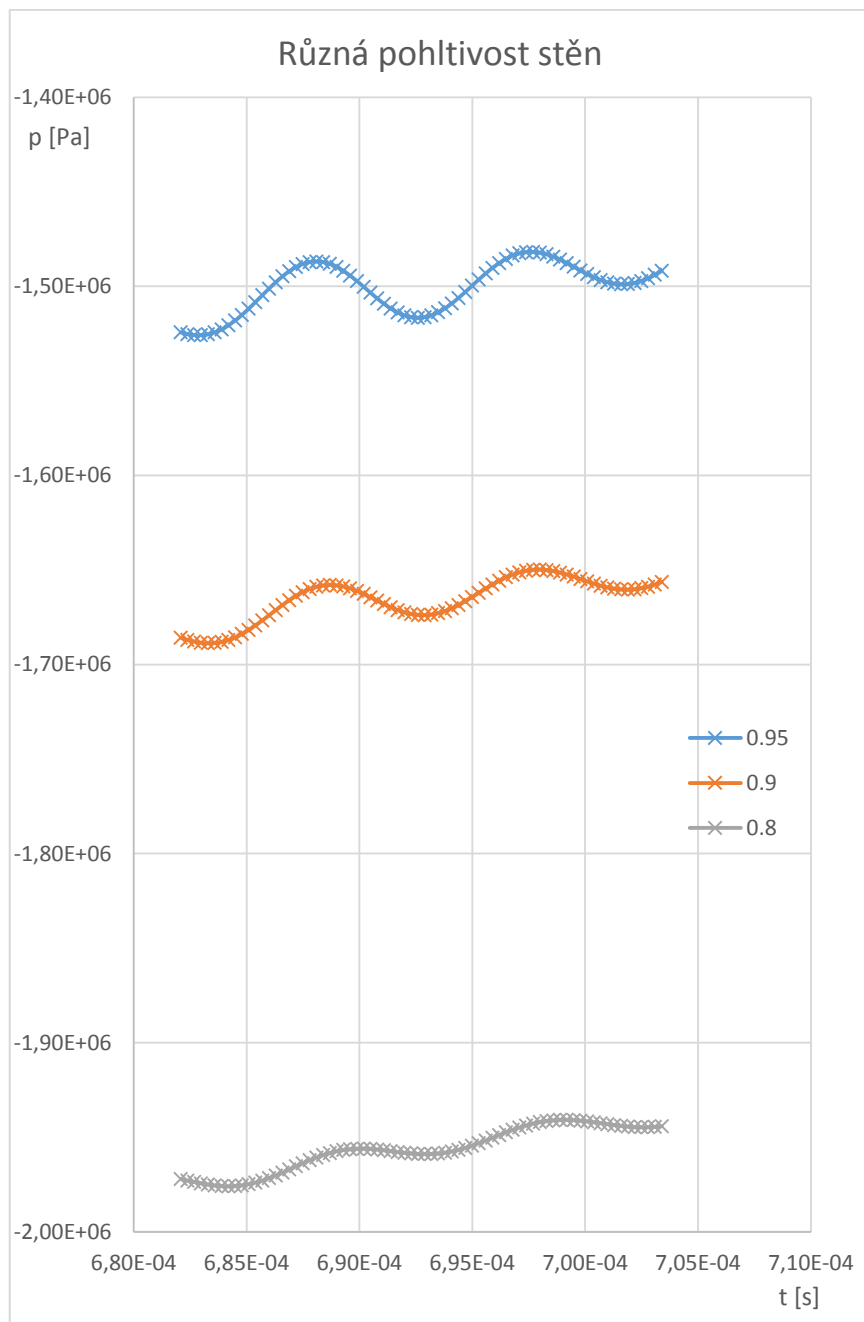


Obrázek 56. Minimální měřená hladina oleje, koeficient absorpce 0,8

Při detekování hladiny oleje na minimální měřené hodnotě byl při detekování odraženého signálu zaznamenán již značný útlum vlnění. Vystala zde tedy otázka, zda změnou hodnoty koeficientu absorpce by se velikost útlumu dala ovlivnit. Ovšem při nastavení koeficientu absorpce na hodnotu 0,8 je (jak je z obrázku nahoře patrné) zaznamenáno již docela vysoké příčné zvlnění postupující vyslané vlny dané vyšší mírou interference s vlnami odraženými od bočních stěn. Navíc, v klasickém 3D modelu by bylo toto zvlnění zřejmě ještě výraznější.



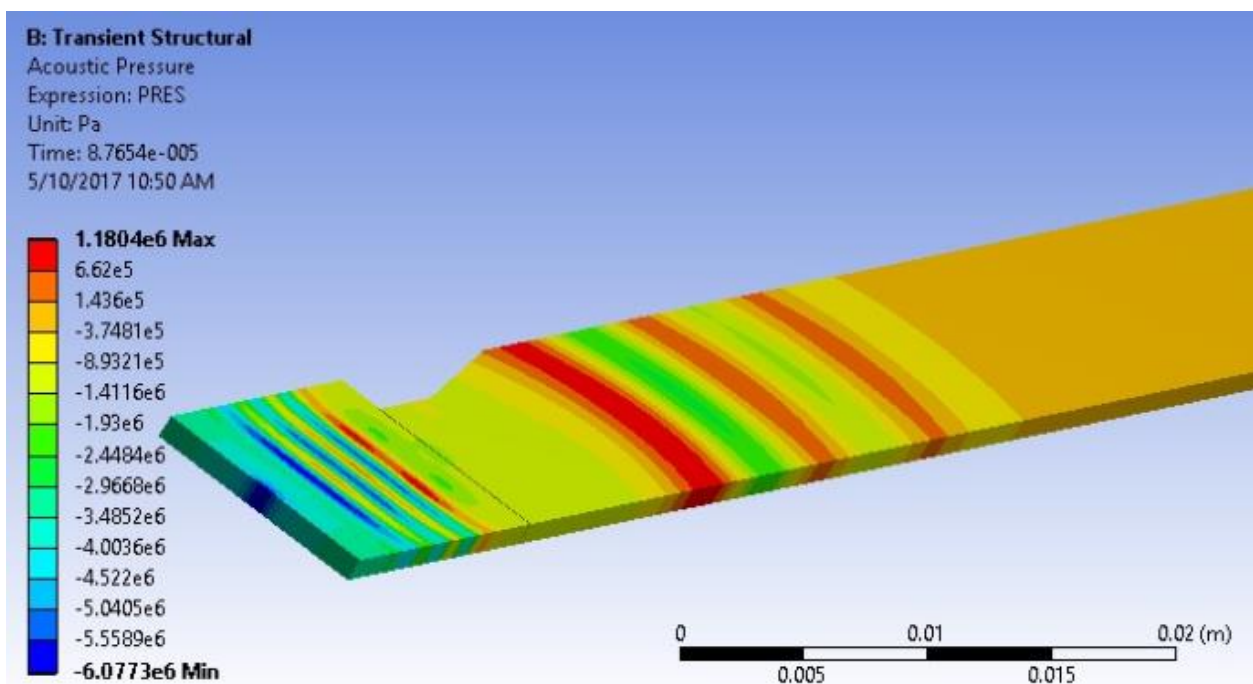
Obrázek 57. Ověřování koeficientu absorpce bočních stěn



Obrázek 58. Výřez v čase detekce

4.8. Model s referencí

U klasických návrhů senzorů využívajících pravoúhlé nádoby bez výstupků, od kterých by eventuálně docházelo k referenčním odrazům, se jeví velkou nevýhodou potřeba proměřování teploty tekutiny, ve které dochází k šíření ultrazvuku, z důvodu silné závislosti rychlosti šíření na teplotě. Nezbytnost teplotního čidla lze obejít při sestrojení modelu se referenčním výstupkem. Pokud je známa vzdálenost tohoto výstupku od zdroje ultrazvukového vlnění, lze z časů jednotlivých odezev (od výstupku a od hladiny oleje) vypočítat za pomoci jednoduché trojčlenky vzdálenost hladiny oleje od detektoru odraženého vlnění, aniž by bylo nutné znát rychlost šíření ultrazvuku v dané tekutině.

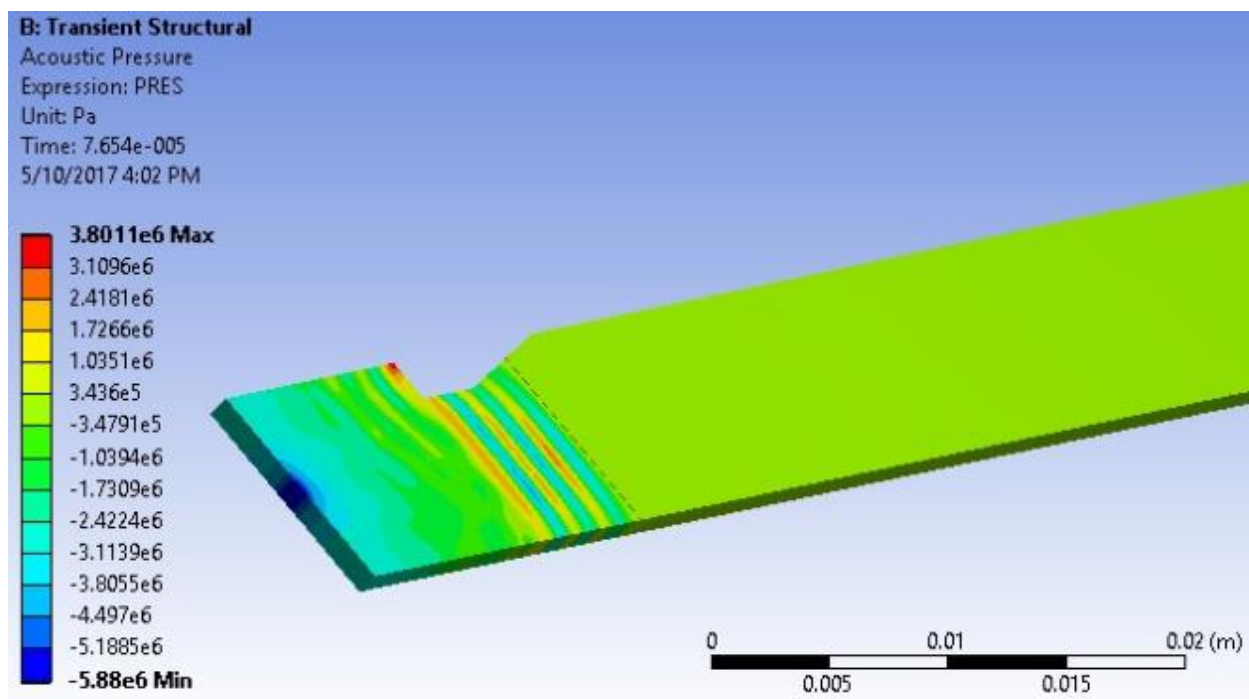


Obrázek 59. Plný stav oleje v nádrži

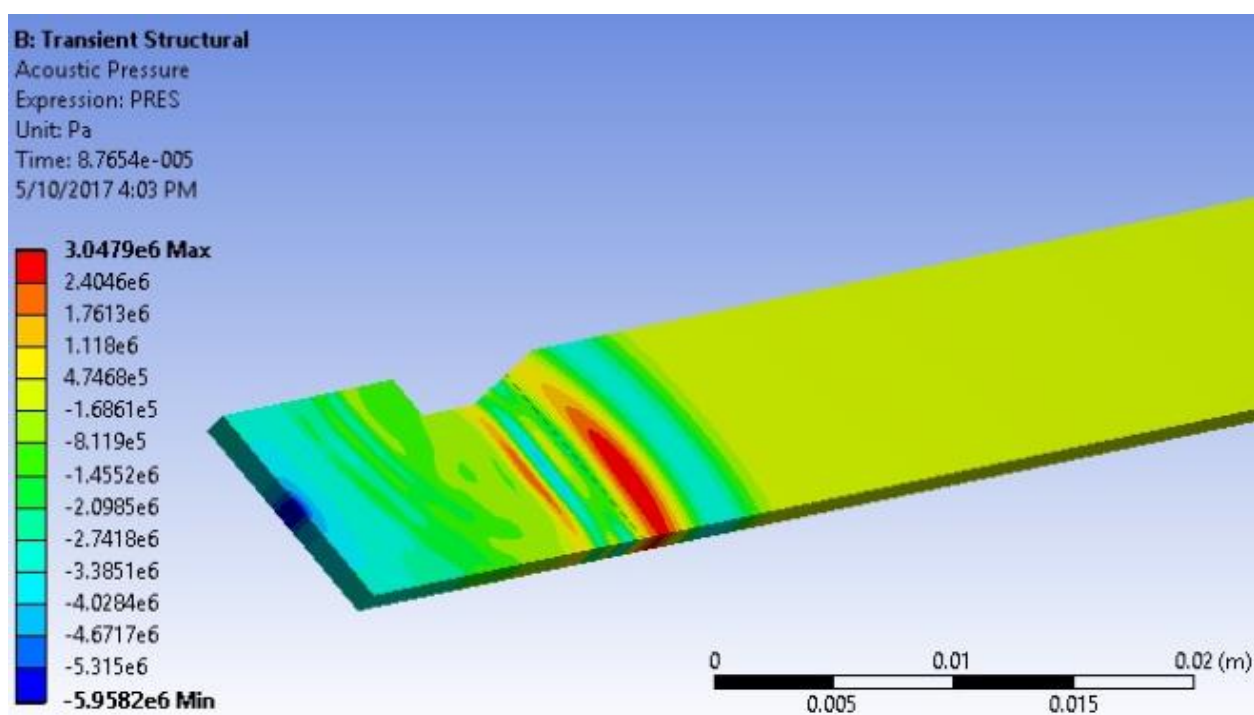
Pokud je uvažován stav oleje v maximální měřitelné výši, pak dochází k téměř shodnému odrazu a následné detekci vlnění jako u klasického modelu bez reference (nahore). V případě, že hladina oleje je nižší, lze piezoelektrickým krystalem detekovat, jak odezvu od výstupku reference (zde nesmí být nastavena okrajová podmínka s vysokým koeficientem útlumu), tak následně odraz od hladiny oleje (dole). Vzdálenost referenčního výstupku od detektoru vlnění lze vypočítat na základě Pythagorovy věty,

$$s_1 = \sqrt{s^2 + w^2}$$
$$s_1 = \sqrt{16,96^2 + 3^2} [mm]$$
$$s_1 = 17,22 [mm]$$

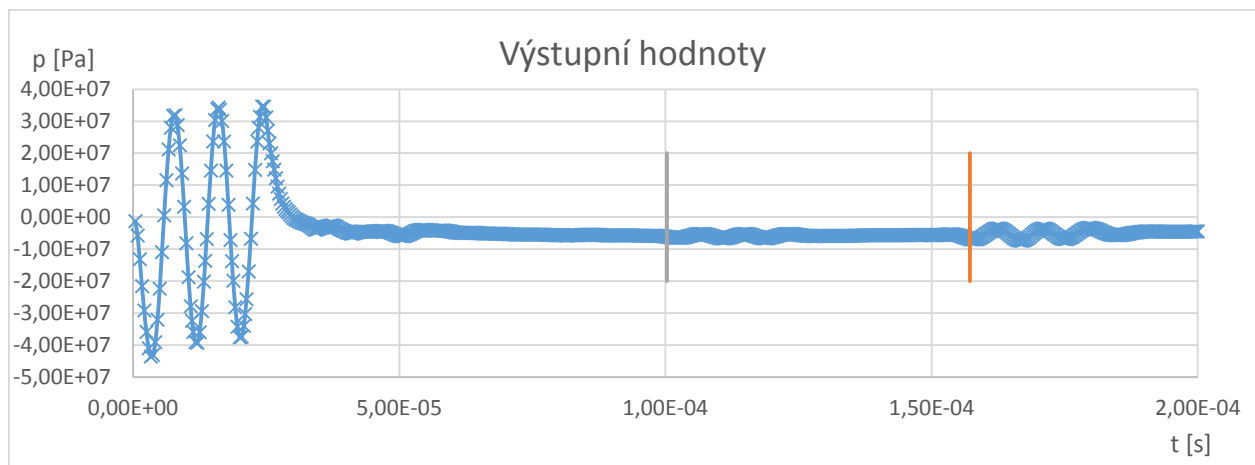
Kde s je vzdálenost mezi je vzdálenost mezi piezoelektrickým krystalem a maximální možnou detekovatelnou hladinou (odpovídá plné nádrži) a w je příčná vzdálenost mezi středem referenčního výstupku a podélnou osou válcové nádoby.



Obrázek 60. Odraz vlnění na referenčním výstupku



Obrázek 61. Vracející se odražené vlny zpět ke zdroji vlnění



Obrázek 62. Hladina oleje 10 mm pod naplněným stavem

Při poklesu hladiny o 10 mm oproti poloze referenčního výstupku lze tuto vzdálenost vypočítat následovně:

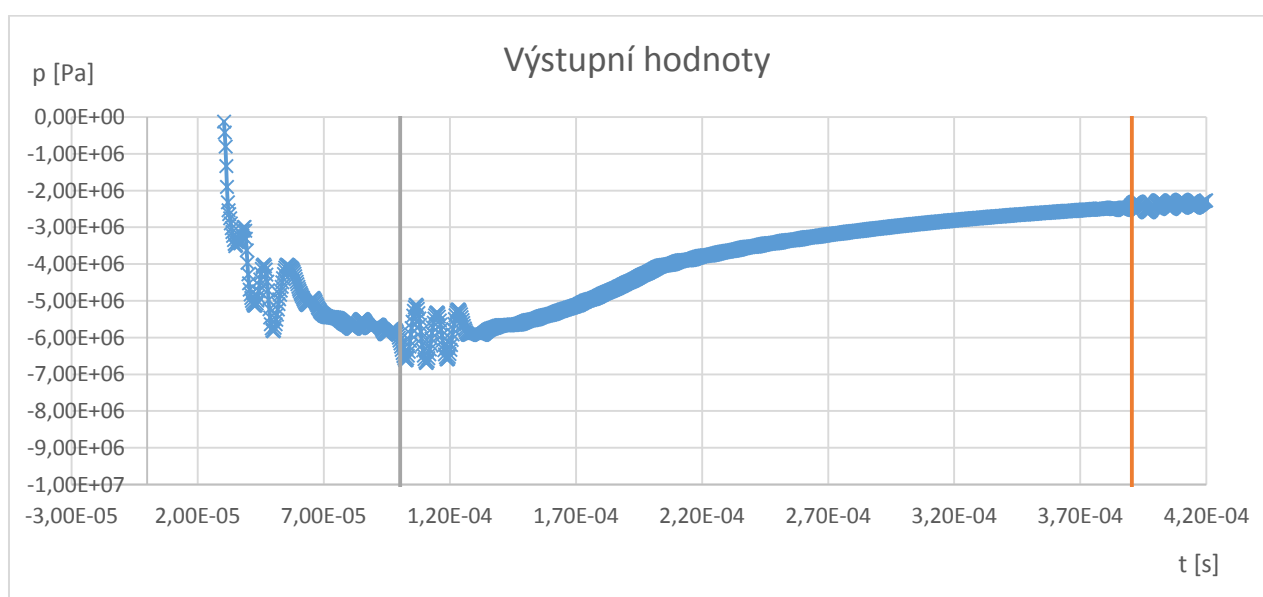
$$\frac{s_1}{t_1} = \frac{s_2}{t_2}$$

$$s_2 = t_2 * \frac{s_1}{t_1}$$

$$s_2 = 1,57 * 10^{-4} * \frac{17,22}{10^{-4}} [mm]$$

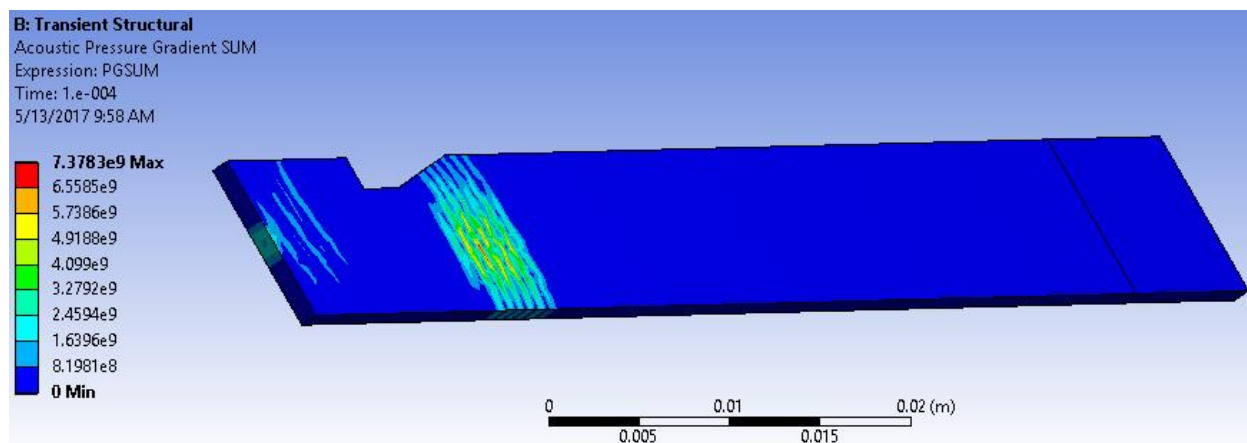
$$s_2 = 27 [mm]$$

Při poklesu hladiny o 50 mm oproti poloze referenčního výstupku již dochází k vyššímu útlumu vlny odražené od hladiny oleje, z tohoto důvodu není na grafu dole zobrazen počáteční impuls.

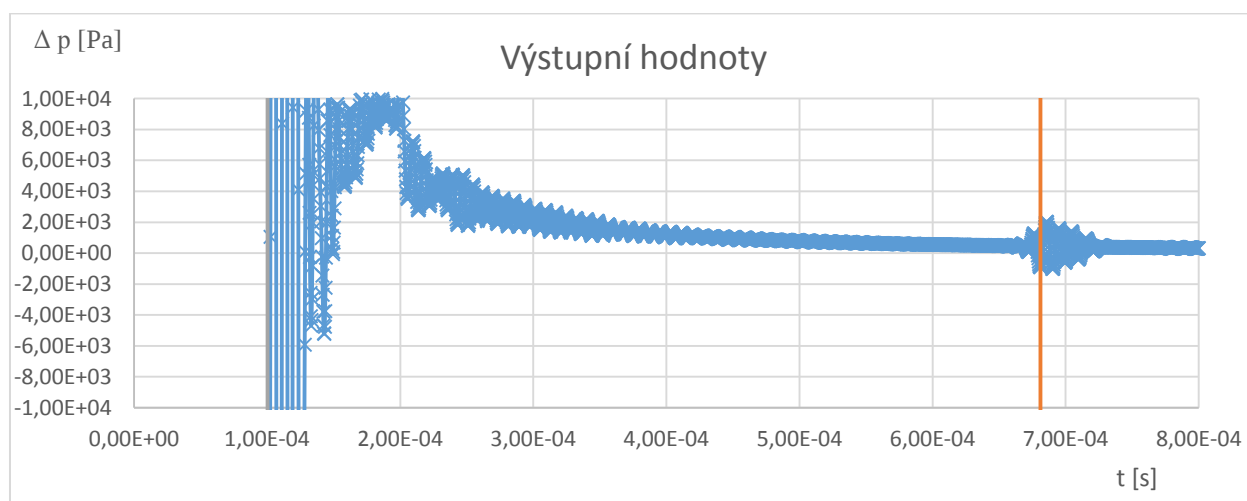


Obrázek 63. Pokles hladiny o 50 mm

Při proměřování prázdné nádrže, tedy přesněji řečeno stavu, kdy výška hladiny oleje v nádrži odpovídá spodní hranici měřicího rozsahu sestaveného senzoru, lze pozorovat opravdu značný útlum detekované vlny odražené od zmiňované hladiny. Z tohoto důvodu je vhodnější namísto aktuálního tlaku v daném místě sledovat raději změnu (gradient) tlaku mezi dvěma následujícími časovými kroky.



Obrázek 64. Gradient vyslaného impulsu a vlny odražené od referenčního výstupku

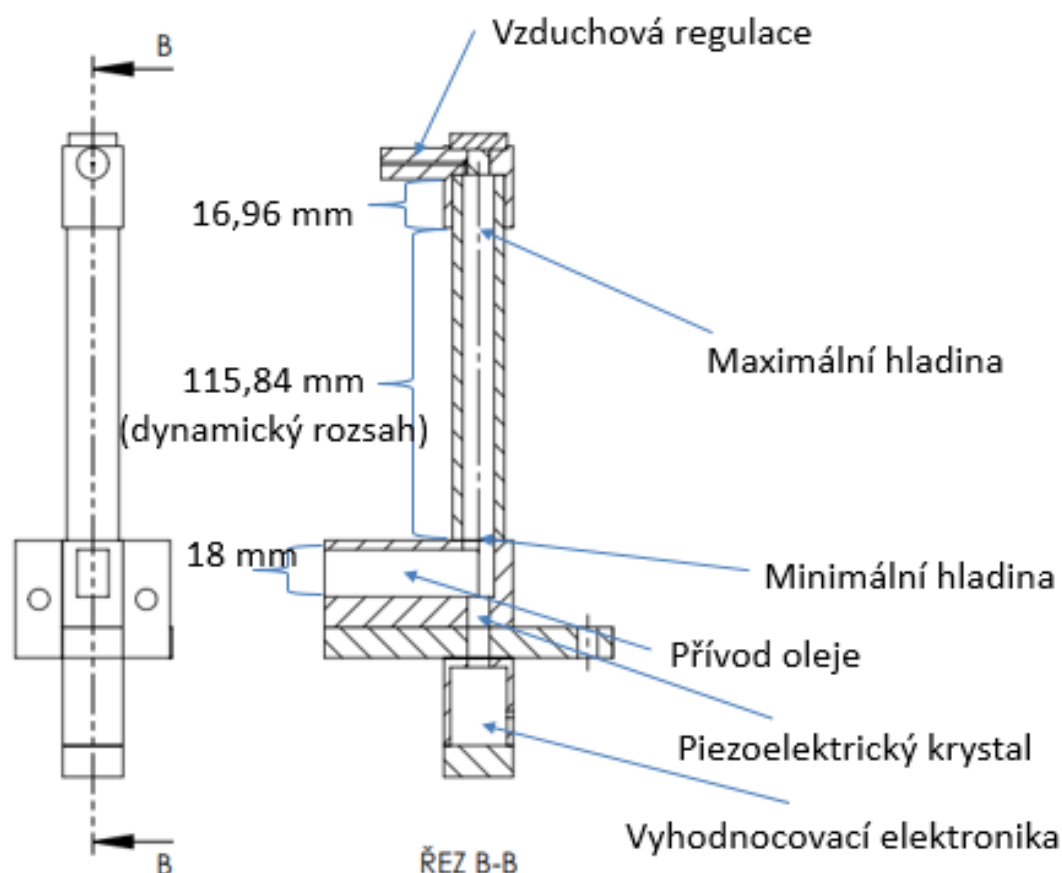


Obrázek 65. Tlakový gradient v místě detektoru

V grafu nahoře je zobrazen časový průběh gradientu v místě detekce odražených signálů, pro lepší názornost začínající až v době první odezvy odpovídající signálu odraženému od referenčního výstupku (čas 10^{-4} s). Červeně je zde zvýrazněn čas, ve kterém dochází k detekci vlny odražené od hladiny oleje. Lze vidět, že amplitudy jednotlivých odezev jsou výrazně rozdílné, což je dáno útlumem ultrazvukového vlnění.

4.9. Šíření ultrazvuku v oleji

U předchozích konstrukčních návrzích ještě vyvstává otázka, zda nebudou výsledky měření ovlivňovány výpary ze zahřátého oleje. Toto měřicí zařízení je tedy primárně určeno k proměření hladiny oleje před nastartováním vozidla, kdy poskytne uživateli velice přesné informace o množství motorového oleje v nádrži. Pro měření hladiny oleje zahřátého na provozní teplotu (90 °C) by bylo vhodnější vhánět ultrazvukové vlnění přímo do oleje namísto vzduchu, který může být nasycen olejovými parami. Pro tento případ je zde ještě možnost umístit piezoelektrický krystal na dno konstrukčního návrhu (dole).



Obrázek 66. Šíření ultrazvuku skrze olej

Pro případ, že by se v praxi skutečně ukázalo, že olejové páry nad hladinou zamezují možnosti určovat výši hladiny při vyšších teplotách pomocí šíření ultrazvuku vzduchem nad hladinou, se tato kapitola zabývá možností určovat výši hladiny za pomoci šíření ultrazvuku motorovým olejem. Po teoretické stránce to znamená pouze změnit hodnotu fyzikálních veličin a konstant tak, aby tyto parametry odpovídaly olejovému prostředí. Další možností by bylo vytvořit přímo model s olejovými výpary, ale touto variantou se tato práce zabývat nebude.

Jelikož se ultrazvuk šíří v oleji rychleji než ve vzduchu a jeho rychlost se spíše blíží rychlosti šíření ve vzduchu, je zapotřebí znovu vypočítat frekvenci vlnění tak, aby detekce odražené vlny neprobíhala ještě současně s vysíláním koncové části původního impulsu. V následujícím výpočtu označuje:

- s – vzdálenost detektoru od minimální měřitelné hladiny
- v – rychlost šíření ultrazvuku v oleji (zde pro teplotu 100 °C)
- t – vyčítaná doba uplynutá mezi vysláním a detekcí odraženého impulsu
- T – perioda vlnění (vysílány vždy celkem tři periody)
- f – počítaná frekvence vlnění, kterou je nutné používat

$$s = 0,018[m]$$

$$v = 1100[m * s^{-1}]$$

$$t = \frac{2 * s}{v}$$

$$t = \frac{2 * 0,018}{1100}[s]$$

$$t = 3,273 * 10^{-5}[s]$$

$$T = \frac{t}{3}$$

$$T = \frac{3,273 * 10^{-5}}{3}[s]$$

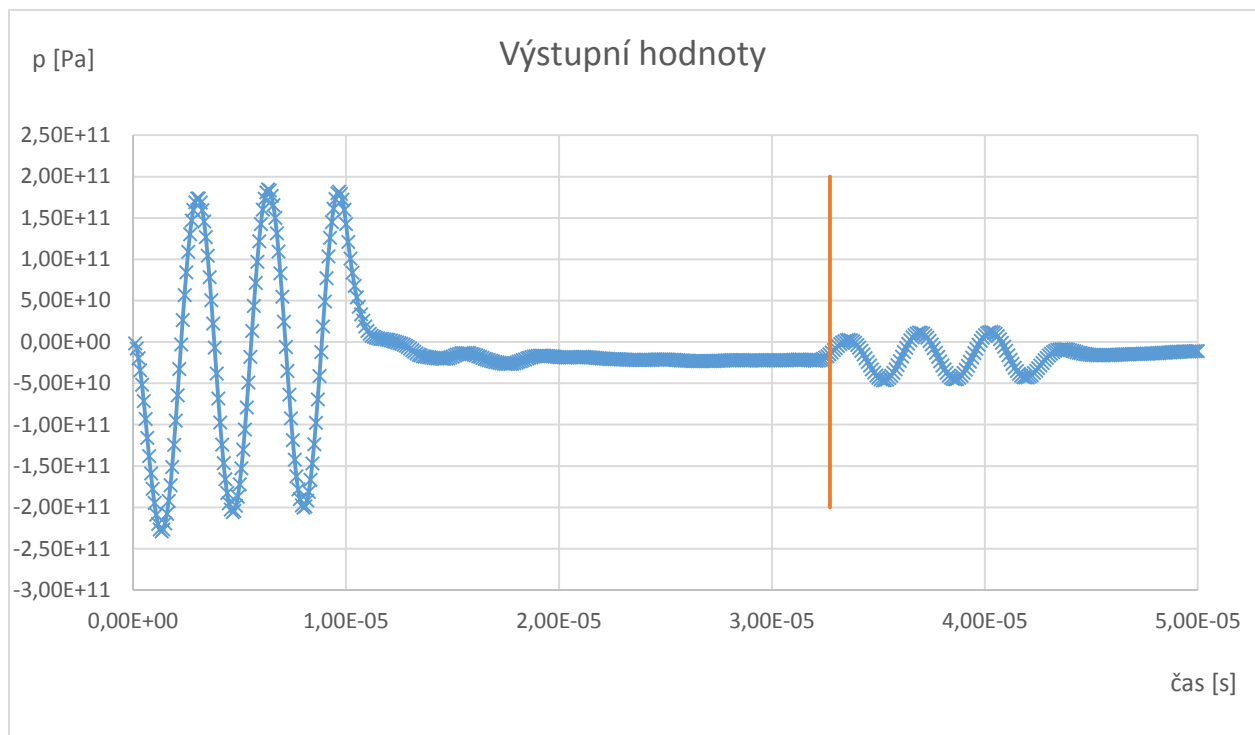
$$T = 1,091 * 10^{-5}[s]$$

$$f = \frac{1}{T}$$

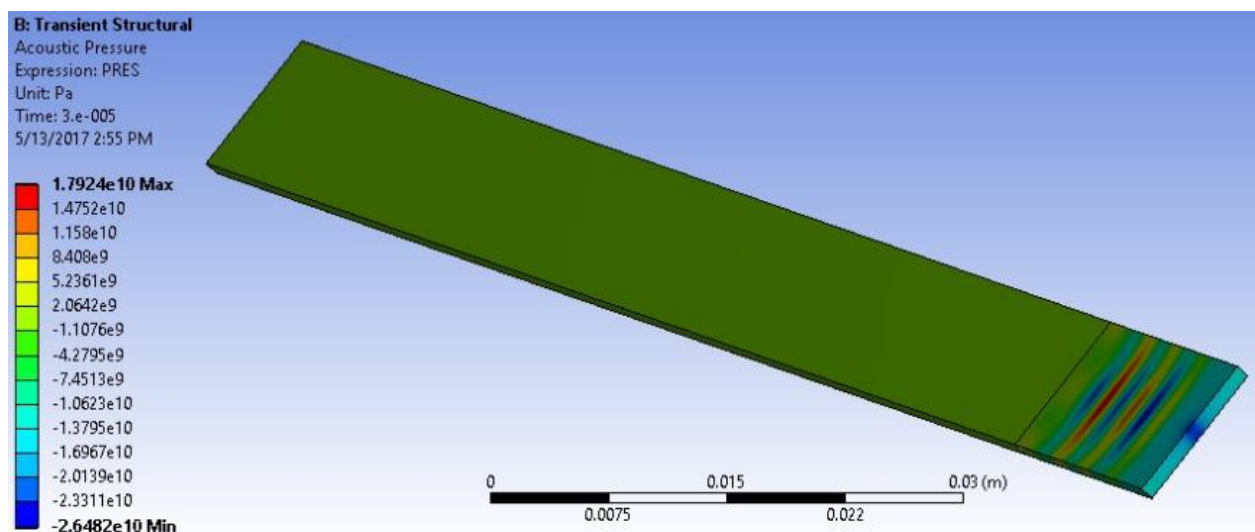
$$f = \frac{1}{1,091 * 10^{-5}}[Hz]$$

$$f = 91667[Hz]$$

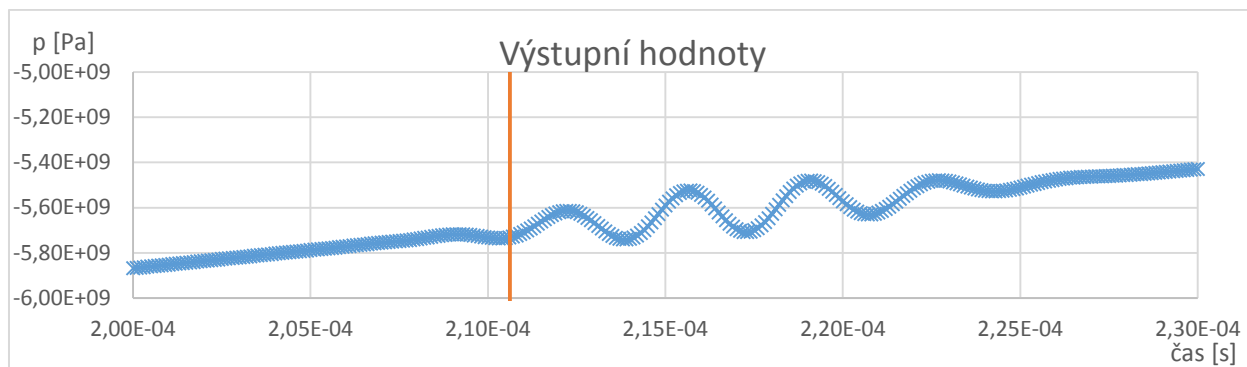
V praxi se doporučuje používat ultrazvukové vlnění o vyšší frekvenci, než je vypočítaná minimální frekvence f (je potřeba totiž ještě chvíli počkat na ustálení rozvířené hladiny vzniklé vysláním daného impulsu). Při numerickém modelování tedy byla použita frekvence vlnění 300 kHz.



Obrázek 67. Hladina oleje na minimálním měřitelném stavu



Obrázek 68. Odražené ultrazvukové vlnění

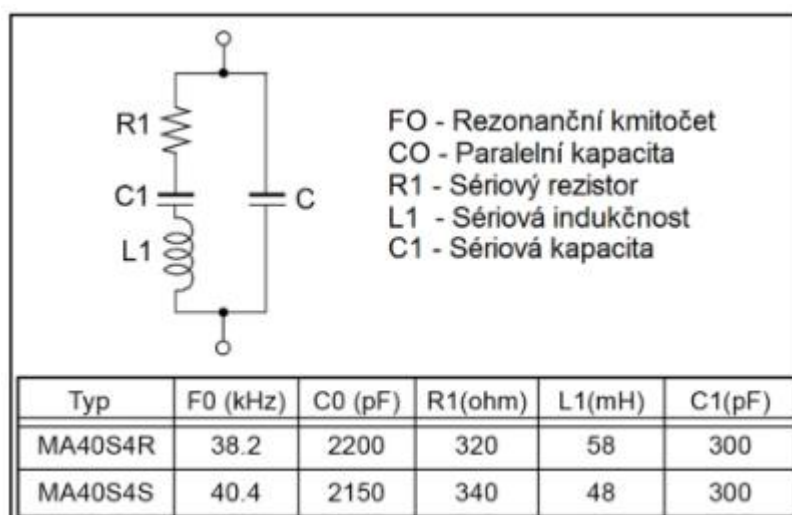


Obrázek 69. Hladina oleje na maximálním měřitelném stavu (výřez v čase detekce)

Z výše uvedených grafů (**Obrázek 67** a **Obrázek 69**) je patrné, že zvolená frekvence 300 Hz vyhovuje měřicímu rozsahu, který byl zvolen v rámci návrhu proměřování skrze vzduch, i při měření výšky hladiny šířením vln v olejovém prostředí. **Obrázek 68** pak jasně ukazuje, že oproti šíření ultrazvuku v oleji, zde na rozhraní dochází z velké části spíše k odrazu zpět do oleje a tím pádem i k detektoru než k přechodu vlnění do vzduchu na hladinou oleje.

4.10. Vyhodnocovací obvod

Úkolem použitého elektronického zařízení je nejprve vyslat impuls o nastavené frekvenci, která byla pro daný senzor předem vypočtena, v délce tří period. Následně pak detekované vlnění odražené od hladiny oleje přijatelně zesílit pomocí zesilovače a ve vyhodnocovacím zařízení určit dobu, která uplynula mezi vyslaným a detekovaným impulsem. Z této doby pak jednoduše určit vzdálenost senzoru od hladiny či přímo výšku hladiny oleje v nádrži (viz Úvod). Ze znalosti rozměrů nádrže lze pak ještě z výšky hladiny určit i celkové množství oleje v nádrži.



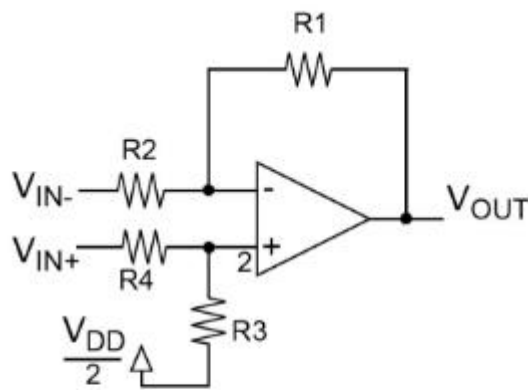
Obrázek 70. Náhradní schéma ultrazvukového měnič - zde pro vysílanou frekvenci 40 kHz (převzato z [1])

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 * C_1}}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{5,8*10^{-2} * 3*10^{-10}}} [Hz]$$

$$f_0 = 38,2[kHz]$$

Jakmile je ultrazvukový signál vytvořen a vyslán z ultrazvukového vysílače, následuje jeho zachycení a detekce času jeho návratu času návratu odraženého signálu. Přijatý ultrazvukový signál je velmi slabý (zvláště v případech, kdy se hladina oleje nachází blízko minimálního měřitelného stavu) a je potřeba ho zesílit tak, aby mohl být detekován pomocí komparátoru. K tomuto účelu slouží operační zesilovač, zapojený nejlépe v konfiguraci rozdílového zesilovače. Správná volba vhodného typu prvního operačního zesilovače v obvodu ultrazvukového přijímače dokáže eliminovat nutnost použití dalších zesilovačů a filtrů. Obvod operačního zesilovače zesiluje napětí z ultrazvukového přijímače, který je připojen mezi dva vstupní piny. Výstupní šum a nežádoucí rušení jsou potlačeny vhodným nastavením odpovídajících vstupních klidových proudů pomocí rezistorů R₂, R₄ a R₁, R₃. [1]

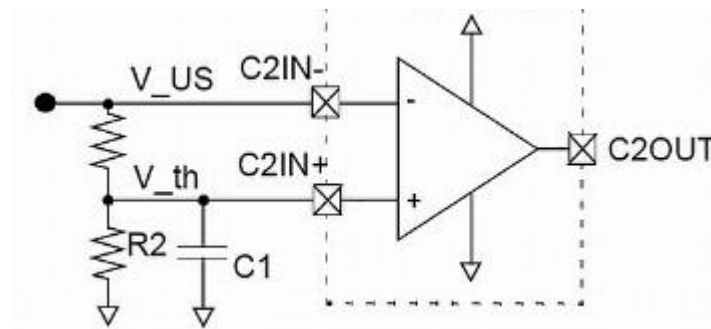


$$R_1 = R_3$$

$$R_2 = R_4$$

$$V_{OUT} = (R_1/R_2) * (V_{IN+} - V_{IN-})$$

Obrázek 71. Obvod diferenciálního zesilovače (převzato z [1])



Obrázek 72. Vstupní komparátor (převzato z [1])

Vstupní komparátor je obvod využívaný v mnoha komunikačních aplikacích. Detekce signálu probíhá komparací prahového napětí V_{th} se zesíleným vstupním

signálem. V okamžiku, kdy je zachycen a zesílen ultrazvukový pulz, klesne hodnota napětí na vývodu C2IN- pod hodnotu C2IN+, což způsobí překlopení na výstupním vývodu komparátoru. Častým problémem ultrazvukových senzorů je nesprávné nastavení prahového napětí. Je-li hodnota příliš nízká, bude použitelný dosah přijímače zbytečně omezován (sníží se dynamický rozsah měření). Pokud je naopak příliš vysoká, bude komparátor překlápěn i vlivem špičkových hodnot šumu na vedení, což může zcela degradovat funkci detekce odraženého signálu.[1]

Pro měření doby, která uplynula mezi vysláním a detekcí ultrazvukového vlnění lze s výhodou použít časovač, u kterého je běh povolen pouze tehdy, je-li na vývodu C2OUT (nahore) nízká úroveň. V okamžiku detekce ultrazvukového signálu a změny hodnoty C2OUT se časovač zastaví.[1]

Pro shrnutí následuje výčet součástek, které lze k sestavení jednoduchého vyhodnocovacího obvodu použít. Ultrazvukový měřič hladiny oleje může být snadno konstruován například s pomocí mikrokontroléru PIC16F690, operačního zesilovače MCP6022 a součástek Murata MA40S4R/S ve funkci ultrazvukových měničů. Dva I/O vývody mikrokontroléru PIC zajistí dostatek energie pro přímé generování ultrazvukového signálu. Pro jeho vytvoření a následnou detekci odrazu mohou být s výhodou využity časovače Timer0 a Timer1. Zesílení přijatého signálu proběhne pomocí MCP6022 v obvodu přijímače a vlastní detekci provede komparátor, který je integrovaný přímo v PIC16F690.[1]

5. Závěr

V této práci jsou obsaženy základní znalosti z oblasti ultrazvukového vlnění, ze kterých lze vycházet při sestavování numerického modelu ultrazvukového senzoru. Získané praktické zkušenosti s přístrojem EPOCH LT byly využity při laboratorním proměřování jednotlivých druhů olejů. Při tomto měření byla naměřena rychlost šíření ultrazvuku u vybraných olejů (vždy nově zakoupený ve srovnání s olejem získaným vypuštěním nádrže při servisní výměně oleje, který již nevyhovuje provozním požadavkům) v závislosti na teplotě oleje. Teplotní rozsah byl zvolen v rozmezí od 25 do 145 °C, protože tuto hodnotu by motorový olej při provozu běžně přesahovat neměl (zkracuje se tím životnost daného oleje). Minimální rychlost šíření ultrazvuku v oleji naměřená v rámci provedeného laboratorního měření je $975 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, maximální rychlost pak $1388 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Při modelování v prostředí ANSYS se vycházelo z vlastní navrhnuté konstrukce senzoru. Měřicí rozsah senzoru byl navrhnut na 99,84 mm. Senzor využívá fyzikálního principu spojených nádob a není tak ovlivňován procesy probíhajícími ve vlastní olejové nádrži. K modelování různé výšky hladiny oleje byla sestrojena speciální geometrie zachovávající vnitřní rozměry senzoru, ve kterém je výška hladiny měřena. Tato geometrie navíc obsahuje parametr, kterým lze jednoduše zadávat měřenou výšku hladiny oleje.

Časová odezva vyslaného ultrazvukového impulsu odraženého od hladiny odpovídá vypočteným hodnotám, a to i v případě zjednodušeného 2D modelu. Problém je zaznamenán při snížení absorpčního koeficientu stěn pod hodnotu 0,8, kdy již dochází ke značné interferenci s vlnou odraženou od hladiny a je zde patrný vysoký útlum této vlny, zvláště při nižším stavu hladiny oleje.

Důležitým faktorem pro správný výpočet je použitá frekvence vlnění, která záleží zejména na rozměrech navrženého modelu. Z hlediska výkonu počítače je při numerickém modelování snaha používat co nejnižší frekvence, které však neodporují fyzikálním principům (např. mrtvá zóna). Použitá frekvence záleží především na rychlosti šíření ultrazvuku v daném prostředí, ale i na minimální detekovatelné vzdálenosti hladiny od piezoelektrického krystalu, který vysílá ultrazvukový impuls a následně detekuje vlnění odražené od měřené hladiny. V rámci této práce bylo numericky modelováno ultrazvukové vlnění o frekvenci 50 kHz (nedostatečné), 120 kHz (pro vzduch), 300 kHz (pro olej) a 500 kHz (pro vodu).

Při modelování šíření ultrazvuku ve vzduchovém prostředí, které se nachází mezi piezoelektrickým krystalem a hladinou oleje byl zkoumán vliv koeficientu pohltivosti bočních stěn i útlum v závislosti na vzdálenosti, kterou vyslaný impuls musí urazit tak, aby byl následně zpětně detekován. I přes značný útlum vlnění při odrazu od minimálního měřitelného stavu hladiny se ukázalo, že navržený dynamický rozsah (115,84 mm) lze bez problémů ultrazvukovým senzorem proměřovat. Absorpční koeficient pro bezproblémové určení výše olejové hladiny byl stanoven na hodnotě 0,9.

Pro zahřátý olej na vyšší teploty (100 °C a výše) se však u tohoto modelu může objevit komplikace v podobě olejových par nad hladinou, které budou mít negativní vliv na šíření ultrazvukového vlnění ve vzduchu. Z tohoto důvodu byl ještě sestrojen

alternativní model, u kterého je sonda umístěna na dně měřicího válce a který využívá šíření ultrazvukového vlnění v oleji. Při těchto simulacích byla použita rychlost šíření ultrazvuku v oleji, která byla zjištěna v rámci laboratorního měření.

Dalším vylepšením konstrukčního modelu je geometrie s parametrem. Její nespornou výhodou je možnost měřit výšku hladiny tekutiny i v případech, kdy není známa rychlost šíření ultrazvuku v dané tekutině.

Ke konci jsou ještě zmíněny elektronické prvky potřebné ke správnému vyslání impulsu a následnému kvalitnímu zpracování přijaté odezvy. Je diskutabilní, zda je výhodné používat vysílač i přijímač jako jednu součástku a muset tak brát ohled na přítomnost mrtvé zóny. U samostatného přijímače však může nastávat přenos vysílaného signálu do obvodu přijímače přes materiál DPS, zvláště v případech, kdy jsou obě tyto součástky umístěny těsně vedle sebe.

Seznam použité literatury

- [1] Curtis, K. Použití ultrazvukových měničů pro měření vzdálenosti [online]. Odborný časopis DPS 6/2015 [cit. 2017-5-19]. Dostupné z: <http://www.dps-az.cz/mereni/id:20858/pouziti-ultrazvukovych-menicu-pro-mereni-vzdalenosti>
- [2] DRÁBKOVÁ, Sylva. *Mechanika tekutin* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2008 [cit. 2017-05-16]. ISBN 978-80-248-1508-4. [cit. 2017-5-16]. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/wp-content/uploads/2016/03/Drabkova-Mechanikatekutin.pdf>
- [3] DZURENDA, J. *Oleje spalovacích motorů* [online].. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 50 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Ondřej Maršálek. [cit. 2016-2-13]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=53515
- [4] HÁJEK, P. *Počátky aplikace metody konečných prvků v biomechanice* [online].. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 63 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zdeněk Florian, CSc. [cit. 2016-11-28]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=53268
- [5] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Brno: VUTIUM, 2000. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 80-214-1868-0.
- [6] *Introduction to Acoustics* - prezentace. Vydavatel: ANSYS, 2014
- [7] KOPEC, Bernard. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí: (nauka o materiálu IV)*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 978-80-7204-591-4.
- [8] KRISTEK, M. *Ultrazvuk v diagnostice materiálů* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 26 s. Bakalářská práce. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc. [cit. 2016-12-1]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=105598
- [9] LANK, Vladimír a Miroslav VONDRA. *Fyzika v kostce: pro střední školy*. Praha: Fragment, 2007. Maturita v kostce. ISBN 9788025302286.
- [10] *LubCos Level – Datasheet*. Vydavatel: ARGOHYTOS [online]. [cit. 2017-2-17]. Dostupné z: http://www.argo-hytos.com/fileadmin/user_upload/Datasheet_LubCos_Level_10010_EN_US.pdf
- [11] *Měření výšky hladiny* – prezentace [online]. [cit. 2016-12-8]. Dostupné z: <http://moodle.vscht.cz/mod/resource/view.php?id=5578>
- [12] MIKULČÁK a kolektiv. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro střední školy*. Praha: SPN Praha, 1988 [online]. [cit. 2016-10-16]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/tabulky/rychlost-zvuku-pevne.htm>

- [13] PLÁŠIL, Pavel. *Interakce konstrukce ocelové nádrže a kapaliny při seizmické události* [online]. Brno, 2013. 96 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební mechaniky. Vedoucí práce doc. Ing. Vlastislav Salajka, CSc. [cit.2017-5-17]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=76491
- [14] PRNKA, J. *Výpočtové modelování hluku v kabině letounu VUT 100 Cobra* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 78 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Švancara, PhD. [cit. 2016-11-28]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=29721
- [15] SŮKAL, J. *Stanovení poklesu tlaku napájecího čerpadla v závislosti na kmitání hladiny v napájecích nádržích*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 39 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Simona Fialová, Ph.D.
- [16] ŠKARABELOVÁ, L. *Piezoelektrina v technické praxi*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 49 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc..
- [17] *Uživatelský manuál EPOCH LT*. 2005 Olympus NDT, USA
- [18] VYROUBAL, P. *Finite Element Approach of Interior Permanent Magnet Motor Acoustics Noise*. BUT, Faculty of electrical engineering and communication, Department of electrical and electronic technology. 7 s.

Seznam symbolů a zkratek

A	[m]	maximální výchylka kmitání
a	[m*s ⁻²]	zrychlení kmitající částice
a _m	[m*s ⁻²]	amplituda zrychlení
C _p	[J*kg ⁻¹ *m ⁻³]	specifické teplo (konstantní tlak)
C _v	[J*kg ⁻¹ *m ⁻³]	specifické teplo (konstantní objem)
C ₁	[F]	kapacita
f	[s ⁻¹], [kg*m*s ⁻²]	frekvence vlnění, vnější síla
f ₀	[s ⁻¹]	rezonanční frekvence
h	[m]	výška hladiny
I	[Pa*m*s ⁻¹]	akustická intenzita
j	[]	imaginární jednotka
K	[Pa]	modul objemové pružnosti
K _H	[J*kg ⁻¹ *m ⁻³]	koeficient vedení tepla
L	[m]	vzdálenost sondy od hladiny
L _{max}	[m]	vzdálenost sondy ode dna nádrže
L ₁	[H]	indukčnost cívky
P	[kg*m ² *s ⁻³]	akustický výkon
p	[Pa]	akustický tlak
p ₀	[Pa]	atmosferický tlak
Q	[kg*s ⁻¹]	hmotnostní tok
r	[J*kg ⁻¹ *K ⁻¹]	plynová konstanta
S	[m ²]	plocha
s	[m]	dráha
T	[s], [K]	perioda, termodynamická teplota
t	[s]	čas
V	[m ⁻³]	objem
v	[m*s ⁻¹]	rychlost ultrazvukového vlnění
v _a	[m*s ⁻¹]	rychlost kmitající částice
v _m	[m*s ⁻¹]	maximální rychlost kmitající částice
x	[m]	okamžitá výchylka kmitající částice
x, y, z	[m]	prostorové souřadnice
Z	[Pa*s*m ⁻¹]	akustická impedance
α	[°]	úhel dopadu vlnění
β	[°]	úhel odrazu vlnění
δ	[Pa ⁻¹]	součinitel stlačitelnosti
ε	[J]	termodynamická vnitřní energie
η	[Pa*s]	dynamická viskozita
κ	[]	izotermický exponent
λ	[m]	vlnová délka
μ	[Pa*s]	objemová viskozita
ρ	[kg*m ⁻³]	hustota
τ	[W*m ⁻¹ *K ⁻¹]	tepelná vodivost
φ	[rad]	fázový úhel
ω	[s ⁻¹]	úhlový kmitočet
θ	[°C]	teplota
∇	[]	Laplaceův diferenciální operátor

Příloha A: Rychlosti zvuku

V následující tabulce jsou popsány rychlosti ultrazvuku v různých běžných materiálech. Tyto hodnoty jsou pouze orientační - skutečná rychlost zvuku v těchto materiálech se může výrazně lišit z celé řady příčin, jako je složení, upřednostňovaná orientace krystalové mřížky, poréznost a teplota. [16]

Tabulka 12. Rychlost šíření ultrazvuku v pevných látkách

Materiál	v [m/s]
Hliník	5100
Měď	3500
Mosaz	3400
Ocel	5000
Olovo	1300
Platina	2800
PVC	2380
Sklo	5200
Stříbro	2700

Tabulka 13. Rychlost šíření ultrazvuku v kapalinách

Kapalina	v [m/s]
Aceton	1174
Benzín	1170
Ethanol	1207
Methanol	1103
Rtuť	1450
Voda	1481

Příloha B: Zrychlení

Při simulování šíření ultrazvuku prostředím je nejprve nutné zadat jeho zrychlení pro zvolené časy. Následující tabulka zobrazuje použité hodnoty pro modelování šíření ultrazvuku ve vodě:

Tabulka 14. Zrychlení ultrazvuku pro 500 kHz

Krok	t [s]	a [mm*s ⁻²]	Krok	t [s]	a [mm*s ⁻²]
1	0	0	32	3,10E-06	-8,34E+11
2	1,00E-07	7,75E+11	33	3,20E-06	-1,52E+12
3	2,00E-07	1,47E+12	34	3,30E-06	-2,06E+12
4	3,00E-07	2,03E+12	35	3,40E-06	-2,40E+12
5	4,00E-07	2,38E+12	36	3,50E-06	-2,50E+12
6	5,00E-07	2,50E+12	37	3,60E-06	-2,35E+12
7	6,00E-07	2,37E+12	38	3,70E-06	-1,98E+12
8	7,00E-07	2,01E+12	39	3,80E-06	-1,40E+12
9	8,00E-07	1,46E+12	40	3,90E-06	-6,94E+11
10	9,00E-07	7,55E+11	41	4,00E-06	8,41E+10
11	1,00E-06	-2,10E+10	42	4,10E-06	8,54E+11
12	1,10E-06	-7,94E+11	43	4,20E-06	1,54E+12
13	1,20E-06	-1,49E+12	44	4,30E-06	2,07E+12
14	1,30E-06	-2,04E+12	45	4,40E-06	2,40E+12
15	1,40E-06	-2,39E+12	46	4,50E-06	2,50E+12
16	1,50E-06	-2,50E+12	47	4,60E-06	2,35E+12
17	1,60E-06	-2,37E+12	48	4,70E-06	1,96E+12
18	1,70E-06	-2,00E+12	49	4,80E-06	1,39E+12
19	1,80E-06	-1,44E+12	50	4,90E-06	6,74E+11
20	1,90E-06	-7,34E+11	51	5,00E-06	-1,05E+11
21	2,00E-06	4,20E+10	52	5,10E-06	-8,74E+11
22	2,10E-06	8,14E+11	53	5,20E-06	-1,56E+12
23	2,20E-06	1,51E+12	54	5,30E-06	-2,09E+12
24	2,30E-06	2,05E+12	55	5,40E-06	-2,41E+12
25	2,40E-06	2,39E+12	56	5,50E-06	-2,50E+12
26	2,50E-06	2,50E+12	57	5,60E-06	-2,34E+12
27	2,60E-06	2,36E+12	58	5,70E-06	-1,95E+12
28	2,70E-06	1,99E+12	59	5,80E-06	-1,37E+12
29	2,80E-06	1,42E+12	60	5,90E-06	-6,54E+11
30	2,90E-06	7,14E+11	61	6,00E-06	1,26E+11
31	3,00E-06	-6,30E+10	62	3,40E-05	0,00E+00

Příloha C: Akustický tlak

Následující tabulka obsahuje vypočítané hodnoty akustického tlaku při modelování šíření ultrazvuku ve vodě v kritickém časovém intervalu od $2,5 \cdot 10^{-5}$ s do $3,00 \cdot 10^{-5}$ s. Výsledný čas, který byl odečten u první záporné hodnoty akustického tlaku je $2,74 \cdot 10^{-5}$ s.

Tabulka 15. Akustický tlak

t [s]	p [Pa]	p [s]	p [Pa]	t [s]	p [Pa]
2,50E-05	1,86E+06	2,67E-05	1,45E+06	2,84E-05	-1,33E+07
2,50E-05	1,87E+06	2,67E-05	1,42E+06	2,84E-05	-1,31E+07
2,51E-05	1,87E+06	2,68E-05	1,40E+06	2,85E-05	-1,26E+07
2,51E-05	1,87E+06	2,68E-05	1,40E+06	2,85E-05	-1,19E+07
2,52E-05	1,88E+06	2,69E-05	1,41E+06	2,86E-05	-1,11E+07
2,52E-05	1,87E+06	2,69E-05	1,42E+06	2,86E-05	-1,01E+07
2,53E-05	1,87E+06	2,70E-05	1,44E+06	2,87E-05	-9,00E+06
2,53E-05	1,86E+06	2,70E-05	1,44E+06	2,87E-05	-7,75E+06
2,54E-05	1,85E+06	2,71E-05	1,43E+06	2,88E-05	-6,41E+06
2,54E-05	1,84E+06	2,71E-05	1,39E+06	2,88E-05	-5,00E+06
2,55E-05	1,82E+06	2,72E-05	1,31E+06	2,89E-05	-3,57E+06
2,55E-05	1,81E+06	2,72E-05	1,18E+06	2,89E-05	-2,13E+06
2,56E-05	1,79E+06	2,73E-05	990696	2,90E-05	-728540
2,56E-05	1,78E+06	2,73E-05	723550	2,90E-05	613048
2,57E-05	1,78E+06	2,74E-05	373946	2,91E-05	1,86E+06
2,57E-05	1,78E+06	2,74E-05	-64593,5	2,91E-05	2,99E+06
2,58E-05	1,78E+06	2,75E-05	-595818	2,92E-05	3,97E+06
2,58E-05	1,79E+06	2,75E-05	-1,22E+06	2,92E-05	4,79E+06
2,59E-05	1,80E+06	2,76E-05	-1,94E+06	2,93E-05	5,42E+06
2,59E-05	1,81E+06	2,76E-05	-2,74E+06	2,93E-05	5,85E+06
2,60E-05	1,82E+06	2,77E-05	-3,61E+06	2,94E-05	6,07E+06
2,60E-05	1,83E+06	2,77E-05	-4,55E+06	2,94E-05	6,09E+06
2,61E-05	1,84E+06	2,78E-05	-5,53E+06	2,95E-05	5,89E+06
2,61E-05	1,84E+06	2,78E-05	-6,55E+06	2,95E-05	5,49E+06
2,62E-05	1,84E+06	2,79E-05	-7,57E+06	2,96E-05	4,89E+06
2,62E-05	1,83E+06	2,79E-05	-8,58E+06	2,96E-05	4,12E+06
2,63E-05	1,81E+06	2,80E-05	-9,55E+06	2,97E-05	3,19E+06
2,63E-05	1,78E+06	2,80E-05	-1,05E+07	2,97E-05	2,12E+06
2,64E-05	1,74E+06	2,81E-05	-1,13E+07	2,98E-05	950174
2,64E-05	1,69E+06	2,81E-05	-1,20E+07	2,98E-05	-298292
2,65E-05	1,64E+06	2,82E-05	-1,26E+07	2,99E-05	-1,59E+06
2,65E-05	1,58E+06	2,82E-05	-1,30E+07	2,99E-05	-2,90E+06
2,66E-05	1,53E+06	2,83E-05	-1,33E+07	3,00E-05	-4,18E+06
2,66E-05	1,49E+06	2,83E-05	-1,34E+07	3,00E-05	-5,41E+06

Příloha D: Senzor

