

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2024

Bc. Tomáš Hodinka



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

IMPEDANČNÍ TRUBICE PRO MĚŘENÍ ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI A VZDUCHOVÉ PRŮZVUČNOSTI

IMPEDANCE TUBE FOR MEASURING SOUND ABSORPTION COEFFICIENT AND TRANSMISSION LOSS
COEFFICIENT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Hodinka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Šimon Skvaril

BRNO 2024



Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Audio inženýrství**
specializace Zvuková produkce a nahrávání
Ústav telekomunikací

Student: Bc. Tomáš Hodinka

ID: 211586

Ročník: 2

Akademický rok: 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Impedanční trubice pro měření zvukové pohltivosti a vzduchové průzvučnosti

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte konstrukci impedanční trubice pro měření činitele zvukové pohltivosti a vzduchové průzvučnosti akustických materiálů a princip měření metodou přenosové funkce podle ČSN ISO 10534-2. Navrhněte a pomocí dostupných materiálů realizujte impedanční trubici pro obě měření. Při návrhu vycházejte z prostorových a technických omezení a zvažte využití MEMS mikrofonů. Součástí trubice bude i výkonový zesilovač pro budicí reproduktor a případně předzesilovače pro mikrofony. V rámci semestrální práce proveďte kompletní detailní návrh trubice, jak mechanických, tak elektrických částí, proveďte rozbor jejich teoretických vlastností a výpočet ceny. Zvolte vhodný budicí reproduktor, vypočítejte objem jeho ozvučnice, realizujte zesilovač a proveďte měření kmitočtové charakteristiky reproduktoru v ozvučnici.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 5.2.2024

Termín odevzdání: 21.5.2024

Vedoucí práce: Ing. Šimon Skvaril

doc. Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.
předseda rady studijního programu

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

Cílem této práce je návrh a výroba elektrických a mechanických částí, laboratorního přípravku na měření průzvučnosti, impedanční trubice. Jedná se normovanou laboratorní pomůcku, kde na jedné straně uzavřené vzduchotěsné trubice je umístěn zdroj akustického tlaku a na druhé straně měřený materiál. Trubice je dle uspořádání schopna měřit akustickou pohltivost, nebo zvukovou průzvučnost.

Impedanční trubice je zhotovena tak, aby byla robustní, lehká při manipulaci a skladná. V navrhované impedanční trubici bude možné měřit akustickou průzvučnost materiálu do tloušťky 50mm a pohltivost materiálů do 120mm tloušťky. Trubice, společně s navařenými periferními částmi, jsou zkonstruovány z oceli a reproduktorová ozvučnice z překližky.

Společně s konstrukcí impedanční trubice byla zhotovena i kompletní detailní výkresová dokumentace, zhotoven zesilovač vhodný pro měření a veškeré potřebné periferie pro měření.

Klíčová slova

Impedanční trubice, mikrofon, pohltivost, průzvučnost, reproduktor, zesilovač

Abstract

The goal of this thesis is the design and manufacture of the mechanical and electrical components of the impedance tube. The impedance tube is a tool used in laboratories, that has its parameters dictated by norms. On one side of this enclosed airtight tube is a speaker, and on the other the measured material. By switching some additional parts, the tube is capable of measuring not only the acoustic absorption, but also sound penetration.

Impedance tube is made, so that it is robust, easy to manipulate and use, and easy to store. The designed impedance tube can measure the sound penetration of any material, that is up to 50mm in thickness, and the acoustic absorption of materials that are up to 120mm in thickness. Parts of the tube, that are directly welded to the tube itself are made of the same metal that the tube itself is, and the speaker enclosure is made from plywood.

Along with the assembly of the impedance tube, a complete and detailed drawing documentation for future recreation is added, along with a suitable amplifier and all peripherals necessary for measurements.

Keywords

Impedance tube, microphone, absorption, sound penetration, loudspeaker, amplifier

Bibliografická citace

HODINKA, Tomáš. *Impedanční trubice pro měření zvukové pohltivosti a vzduchové průzvučnosti*. Brno, 2024. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Diplomová práce. Vedoucí práce Šimon Skvaril.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	Tomáš Hodinka
VUT ID studenta:	211586
Typ práce:	Diplomová práce
Akademický rok:	2023/2024
Téma závěrečné práce:	Laboratorní úloha pro měření zvukové pohltivosti a vzduchové průzvučnosti

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne: 20.května 2024

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Šimonovi Skvarilovi za možnost realizovat tuto práci a za efektivní a odbornou asistenci. Dále bych rád poděkoval kamarádovi a technologovi Ing. Tomáši Bouchalovi za asistenci při výrobě ocelových částí tohoto projektu.

V Brně dne: 20.května 2024

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	11
1. ÚVOD.....	13
2. VLASTNOSTI ELEKTRODYNAMICKÉHO REPRODUKTORU.....	14
2.1 OBECNÝ POPIS REPRODUKTORU	14
2.1.1 <i>Fungování reproduktoru</i>	14
2.1.2 <i>Stručný přehled typů elektrodynamických reproduktorů</i>	14
2.1.3 <i>Jiné druhy reproduktorů</i>	15
2.2 VLIV OZVUČNICE NA VLASTNOSTI REPRODUKTORU	15
2.2.1 <i>Reproduktor bez ozvučnice</i>	15
2.2.2 <i>Nekonečná ozvučnice</i>	16
2.2.3 <i>Uzavřená ozvučnice</i>	16
2.2.4 <i>Basreflexová ozvučnice</i>	17
2.3 VLASTNOSTI REPRODUKTORU	17
2.3.1 <i>Modulová kmitočtová charakteristika</i>	17
2.3.2 <i>Jmenovitá impedance reproduktoru</i>	17
2.3.3 <i>Kmitočtová závislost impedance reproduktoru</i>	17
2.3.4 <i>Rezonanční kmitočet</i>	18
3. AKUSTICKÉ VLASTNOSTI MATERIÁLŮ.....	19
3.1 INTERAKCE MEZI VLNOU A PŘEKÁŽKOU	19
3.2 POHLTIVOST ZVUKU	19
3.2.1 <i>Tření v blízkosti pevné stěny</i>	19
3.2.2 <i>Převod ztrátového mechanického kmitání na tepelnou energii</i>	19
3.2.3 <i>Relaxační změny</i>	19
3.2.4 <i>Pohlčení vlivem nepružné deformace</i>	20
3.2.5 <i>Porézní materiály</i>	20
3.2.6 <i>Výpočet činitele zvukové pohltivosti α</i>	20
3.3 PRŮCHOD ZVUKU MATERIÁLEM.....	20
3.3.1 <i>Vzduchová průzvučnost</i>	20
3.3.2 <i>Kročejová průzvučnost</i>	21
3.4 ODRAZ ZVUKOVÝCH VLN	21
3.4.1 <i>Obrazová metoda</i>	21
3.4.2 <i>Ray-tracing</i>	21
3.5 DIFRAKCE ZVUKOVÝCH VLN	21
3.6 REZONANCE MATERIÁLŮ	22
4. MĚŘENÍ AKUSTICKÝCH VLASTNOSTÍ MATERIÁLŮ	23
4.1 MĚŘENÍ ZA POMOCI DOZVUKOVÉ MÍSTNOSTI.....	23
4.2 MĚŘENÍ ZA POMOCI IMPEDANČNÍ TRUBICE	23
4.2.1 <i>Metoda poměru stojaté vlny</i>	23
4.2.2 <i>Metoda přenosové funkce</i>	23
5. VOLBA NÍZKOFREKVENČNÍHO ZESILOVAČE	24
5.1 PARAMETRY ZESILOVAČŮ	24

5.1.1	<i>Odstup od šumu</i>	24
5.1.2	<i>Činitel harmonického zkreslení</i>	24
5.1.3	<i>Modulová kmitočtová charakteristika</i>	24
5.1.4	<i>Přeslechy mezi vodiči</i>	24
5.1.5	<i>Výstupní výkon</i>	25
5.2	TŘÍDY ZESILOVAČŮ	25
5.2.1	<i>Zesilovače třídy A</i>	25
5.2.2	<i>Zesilovače třídy B</i>	25
5.2.3	<i>Zesilovače třídy AB</i>	26
5.2.4	<i>Zesilovače třídy D</i>	26
5.3	POŽADAVKY	26
5.4	NÁVRH ZESILOVAČE	26
5.5	REALIZACE ZESILOVAČE	28
6.	VOLBA VHODNÉHO MIKROFONU PRO MĚŘENÍ	30
6.1	DRUHY MIKROFONŮ DLE SMĚROVÉ CHARAKTERISTIKY	30
6.1.1	<i>Mikrofony všesměrové</i>	30
6.1.2	<i>Mikrofony osmičkové</i>	30
6.1.3	<i>Mikrofony kardioidní</i>	30
6.2	DRUHY MIKROFONŮ DLE FYZICKÉ KONSTRUKCE	30
6.2.1	<i>Elektrodynamické mikrofony</i>	30
6.2.2	<i>Elektrostatické mikrofony</i>	31
6.2.3	<i>MEMS mikrofony</i>	31
6.3	MIKROFONY POUŽITÉ PRO MĚŘENÍ IMPEDANČNÍ TRUBICE	31
7.	KONSTRUKČNÍ PROVEDENÍ IMPEDANČNÍ TRUBICE	32
7.1	NORMOVANÉ POŽADAVKY	32
7.1.1	<i>Rozměry</i>	32
7.1.2	<i>Mechanické vlastnosti</i>	33
7.2	TECHNICKÉ POŽADAVKY	34
7.2.1	<i>Robustní konstrukce</i>	34
7.2.2	<i>Snadná vyměnitelnost měřených materiálů</i>	34
7.2.3	<i>Modularita a zaměnitelnost dílů pro měření průzvučnosti a pohltivosti</i>	34
7.3	POSTUP ŘEŠENÍ A PROBLEMATIKA	35
7.3.1	<i>Výběr technických řešení, technické možnosti a první návrh</i>	35
7.3.2	<i>Úprava dle výrobních možností</i>	36
7.3.3	<i>Výsledný návrh</i>	37
7.4	OPTIMALIZACE IMPEDANČNÍ TRUBICE PŘED VÝROBOU	38
8.	REALIZACE IMPEDANČNÍ TRUBICE	39
8.1	KONSTRUKCE REPRODUKTOROVÉ OSVUČNICE	39
8.1.1	<i>Zjištění vhodného objemu osvučnice</i>	39
8.1.2	<i>Určení rozměrů osvučnice</i>	40
8.2	UCHYCENÍ REPRODUKTORU K IMPEDANČNÍ TRUBICI	41
8.3	VLASTNOSTI VNITŘNÍHO POVRCHU IMPEDANČNÍ TRUBICE	42
8.3.1	<i>Nerovnosti způsobené hrubostí</i>	42
8.3.2	<i>Nerovnosti způsobené mikrofony</i>	43
8.4	KONSTRUKCE PÍSTU PRO MĚŘENÍ ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI	44

9.	MĚŘENÍ ELEKTROAKUSTICKÉHO ŘETĚZCE	45
9.1	KMITOČTOVÁ CHARAKTERISTIKA REPRODUKTORU V OZVUČNICI	45
9.2	MĚŘENÉ VLASTNOSTI ZESILOVAČE.....	46
10.	MĚŘENÍ ČINITELE ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI	48
10.1	VLIV PÍSTU NA MĚŘENÉ VÝSLEDKY POHLTIVOSTI.....	48
10.2	MĚŘENÍ POHLTIVOSTI HRANIČNÍCH SITUACÍ.....	51
10.3	SROVNÁNÍ POHLTIVOSTI MĚŘENÝCH MATERIÁLŮ VŮČI BRÜEL & KJÆR TRUBICI	53
11.	MĚŘENÍ VZDUCHOVÉ NEPRŮZVUČNOSTI.....	55
11.1	ZÁVISLOST VÝSLEDKŮ NEPRŮZVUČNOSTI NA HLASITOSTI SIGNÁLU	55
11.2	MĚŘENÉ PRŮBĚHY PRO NEPRŮZVUČNOST.....	57
12.	ZÁVĚR.....	60
	LITERATURA.....	61
	SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	62
	SEZNAM PŘÍLOH.....	63

SEZNAM OBRÁZKŮ

2-1	Funkční popis částí reproduktoru [13].....	14
2-2	Schématické znázornění akustického zkratu[14]	16
2-3	Závislost modulové kmitočtové charakteristiky reproduktoru v závislosti na vnitřním objemu reproduktorové ozvučnice	17
2-4	Příklad kmitočtové závislosti impedance reproduktoru.....	18
3-1	Interakce vlny a překážky [8]	19
3-2	Schématické znázornění difrakce [8].....	22
5-1	Schéma navrženého zesilovače	27
5-2	Deska navrženého zesilovače	28
5-3	Zapojení zesilovače	28
5-4	Závislost maximálního výstupního výkonu na vstupním napájení.....	29
7-1	Detail uchycení měřeného materiálu	35
7-2	Prvotní návrh impedanční trubice	36
7-3	Detail všech spojů trubice (zleva: reproduktor s trubicí, uchycení měřeného prvku mezi trubicí, a ideálně pohltivé zakončení).....	37
7-4	Pohled na celou impedanční trubicí	37
7-5	Návrh impedanční trubice	38
8-1	Impedanční charakteristika reproduktoru Dayton bez závaží (žlutá) a se zatížením pěti gramy (zelená).....	39
8-2	Měřené hodnoty	40
8-3	Boltová oblast s bodově vyznačenými vhodnými poměry stran [8].....	41
8-4	Pohled na uchycení příruby a reproduktoru	42
8-5	Detail na hrubost povrchu trubice	42
8-6	Detail na kabelové vývodky a zátky	43
8-7	Systém pro konzistentní zapuštění mikrofonu do trubice.....	43
8-8	Detail provedení pístového zakončení.....	44
8-9	Náhled na pístové zakončení pro měření červené plstě.....	44
9-1	Modulová kmitočtová charakteristika reproduktoru z jednoho metru.....	45
9-2	Modulová kmitočtová charakteristika reproduktoru v blízkém poli.....	46
9-3	Signál na výstupu zesilovače.....	46
9-4	Signál na vstupu zesilovače.....	47
10-1	Uspořádání pro měření činitele zvukové pohltivosti	48
10-2	Činitel akustické pohltivosti pěnových jehlanů o tloušťce 50mm v nejvzdálenější pozici (277mm od nejbližšího mikrofonu)	49
10-3	Činitel akustické pohltivosti pěnových jehlanů o tloušťce 50mm v nejbližší pozici (170mm od nejbližšího mikrofonu)	49
10-4	Činitel akustické pohltivosti 11mm tlusté hudební plsti u pevného zakončení	50
10-5	Činitel akustické pohltivosti 11mm tlusté hudební plsti u pístového zakončení	51
10-6	Činitel akustické pohltivosti pohltivého zakončení.....	52
10-7	Činitel akustické pohltivosti bez měřeného materiálu.....	52
10-8	Činitel akustické pohltivosti 30mm tlusté polyuretanové pěny v impedanční trubicí od Brüel & Kjær.....	53
10-9	Činitel akustické pohltivosti 30mm tlusté polyuretanové pěny ve zkonstruované impedanční trubicí.....	54
11-1	Trubice sestavena pro měření neprůzvučnosti.....	55
11-2	Vzduchová neprůzvučnost 30mm tlusté polyesterové pěny s koeficientem zesílení na 0,05.....	56
11-3	Vzduchová neprůzvučnost 30mm tlusté polyesterové pěny s koeficientem zesílení na 0,5.....	56

11-4 Vzduchová neprůzvučnost 20 mm tlusté polyesterové pěny	57
11-5 Vzduchová neprůzvučnost 3mm tlusté textilie	58
11-6 Vzduchová neprůzvučnost 9mm tlusté překližky	59

1. ÚVOD

Dle norem ČSN ISO 10534-2 a E2611-19 se pro měření pohltivosti a vzduchové průzvučnosti používá speciální přípravek zvaný impedanční trubice. Impedanční trubice využívá dvou různých metod pro normalizované měření. První metoda je založena na měření poměru stojaté vlny a druhá, na kterou je zaměřena tato práce, využívá metodu přenosové funkce. Účelem této trubice je přesně změřit pohltivost a průzvučnost měřeného materiálu, když na něj kolmo dopadá rovinná zvuková vlna. Zkonstruovaná impedanční trubice by měla být robustní a jednoduchá na provoz.

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a zkonstruováním veškerých mechanických a elektrických částí této trubice, včetně plné výkresové dokumentace, vhodného zesilovače, reproduktoru, ozvučnice a mikrofónů. V impedanční trubici bylo provedeno měření hraničních případů a potenciálních chyb. Tyto měření byly následně analyzovány.

V práci jsou rozebrány důležité teoretické základy kolem reprodukce, akustiky, materiálů, zesilovačů a mikrofónů, ze kterých je čerpáno. Dále je rozebrán proces návrhu a realizace impedanční trubice, reproduktorové ozvučnice a zesilovače. Po úspěšné realizaci všech částí je provedeno měření a analýza všech aspektů systému.

2. VLASTNOSTI ELEKTRODYNAMICKÉHO REPRODUKTORU

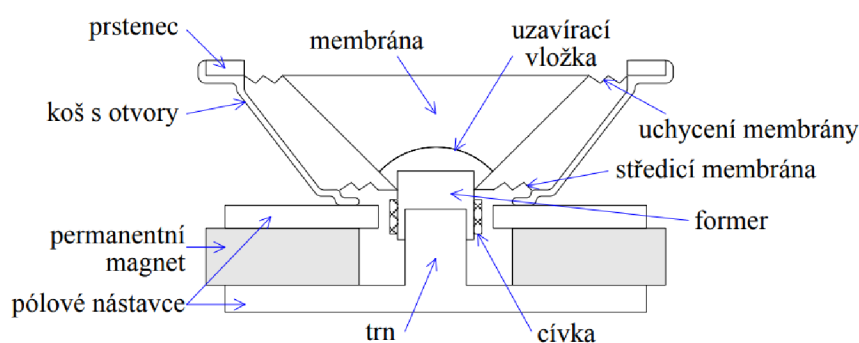
2.1 Obecný popis reproduktoru

Reproduktor je lineární elektromechanický stroj, jehož účelem je převádět analogové elektrické signály z nízkofrekvenčního zesilovače na lineární pohyb. Ideální reproduktor by měl věrně kopírovat (např.) sinusovou křivku, která byla vytvořena v zesilovači. [1][14]

2.1.1 Fungování reproduktoru

Základem fungování elektrodynamického reproduktoru je princip interakce cívky a statického magnetického obvodu. Ve statické části reproduktoru se nachází permanentní prstencový magnet uchycený v pólových nástavcích, na kterých je připevněný koš, který vystředuje kmitací systém. Pólové nástavce neslouží jen k uchycení permanentního magnetu, ale také k zesílení a směrování magnetického pole k cívce. Cívka je součástí kmitacího systému reproduktoru, která dále obsahuje uzavírací vložku, membránu a systém uchycení a vystředění kmitací části vůči statické. Prstencový magnet je orientován svými pólovými nástavci kolmo k cívce.

Když začne cívkou procházet proud v podobě střídavých elektrických kmitů, tak cívka začne vytvářet své vlastní střídavé magnetické pole. Tato pole mezi pólovým nástavcem a cívkou se vzájemně odlačují a přitahují a tím uvádí cívku i kmitací systém do pohybu. [1]



Obrázek 2-1 Funkční popis částí reproduktoru 61

2.1.2 Stručný přehled typů elektrodynamických reproduktorů

Protože z fyzikálních důvodů není možné vyrobit reproduktor, který obsáhne plnohodnotně a proporciálně celé zvukové spektrum od 20 Hz do 20 kHz, bylo nutné přizpůsobit konstrukci reproduktorů pro několik oblastí zvukového spektra. Vyrábí se

subbasové, hlubokotónové, středotónové a vysokotónové reproduktory. [1]

Hlavním dělícím hlediskem mezi těmito reproduktory může být jejich rozměr. Na kvalitní reprodukci nízkých kmitočtů srovnatelné citlivosti je zapotřebí reproduktor s větší plochou membrány. Hlubokotónové reproduktory vyzařují vyšší frekvence jen s malou citlivostí. Existují také reproduktory širokopásmové, které se snaží reprodukovat dvě a více zmíněných kmitočtových pásem, ale obvykle na úkor kvality na hranicích uváděného spektra. U elektrodynamických reproduktorů je možné tento problém minimalizovat snížením výkonu a zmenšením celého systému. Například profesionální sluchátka často používají jediný elektrodynamický reproduktor, který dokáže pokrýt celé slyšitelné spektrum. [1]

2.1.3 Jiné druhy reproduktorů

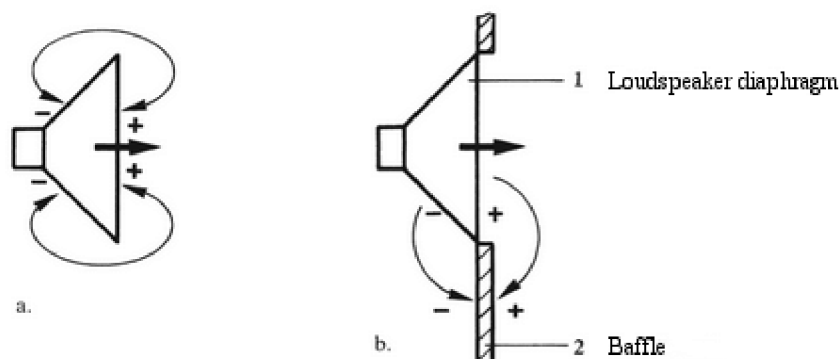
Kromě elektrodynamických, existují i reproduktory elektrostatické, kapacitní a piezoelektrické. V praxi se vzácně používají jako součást reproduktorových soustav společně s elektrodynamickými reproduktory. Piezoelektrické reproduktory se spíše používají ve sdělovacích technologiích, kde není dbáno na kvalitu reprodukce. [1] Elektrostatické reproduktory, zatím existující ve výkonové formě, jsou záležitostí spíše exotickou, ale při použití ve sluchátkách jsou často hodnoceny jako ty nejdělnější.[12]

2.2 Vliv ozvučnice na vlastnosti reproduktoru

Ozvučnice zásadním způsobem ovlivňuje chování reproduktoru. Vnitřní tlakové a akustické vlastnosti ozvučnice ovlivňují impedanční charakteristiku reproduktoru, a tím i modulovou kmitočtovou charakteristiku reproduktoru, což se nejvíce projevuje na nižších kmitočtech. [1]

2.2.1 Reproduktor bez ozvučnice

Reproduktory bez ozvučnice se běžně nepoužívají, protože ve středotónovém, nebo nižším kmitočtovém pásmu nefungují správně. Vyzařování reproduktoru je rušeno akustickým zkratem, kdy se signál z přední a zadní strany akusticky odečítá. Nutným požadavkem je, aby i koš reproduktoru byl pevně umístěný, aby nekmital proti pohybu membrány. Ideální reproduktor by potřeboval absolutně tuhý koš, umístěný v absolutně tuhé stěně. Čím více se konstrukce tomuto ideálu přiblíží, tím lépe reproduktor přednáší detaily v reprodukovaném zvuku. [1]



Obrázek 2-2 Schématické znázornění akustického zkratu[14]

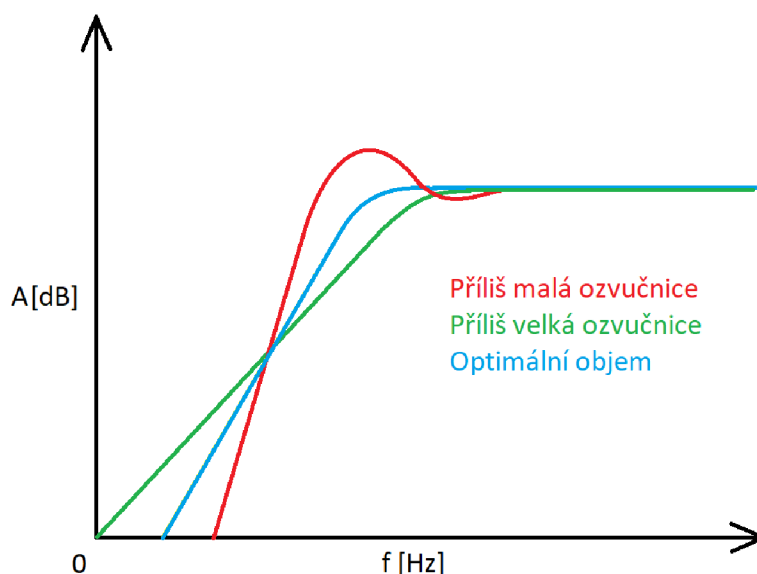
2.2.2 Nekonečná ozvučnice

Pro přesné oddělení zvukových vln, které vyzařuje zadní plocha membrány reproduktoru, by byla ideální dokonale tuhá nekonečná deska. Někdy se v průmyslové výrobě reproduktorů realizuje jako velká ozvučnice, nebo přepážka místnosti, která funguje jako bezdozvuková komora. Používá se pro měření TS parametrů. [1]

2.2.3 Uzavřená ozvučnice

Jedno z nejběžnějších řešení pro oddělení zvukových vln vyzařovaných přední a zadní plochou reproduktoru je uzavřená ozvučnice. Pro uzavřenou ozvučnici by bylo ideální, kdyby se podařilo napodobit nekonečnou ozvučnici s vlastnostmi bezdozvukové komory. Pohltivost zvuku vyzařovaného zadní plochou membrány by se měla blížit bezdozvukové komoře.

Vnitřní objem uzavřené reproduktorové ozvučnice funguje proti reproduktoru jako vzduchová pružina. Pokud jsou známy parametry používaného reproduktoru, je možno navrhnout ozvučnici objemu, kdy tato vzduchová pružina vypomáhá modulové kmitočtové charakteristice reproduktoru na nízkých kmitočtech. [1]



Obrázek 2-3 Závislost modulové kmitočtové charakteristiky reproduktoru v závislosti na vnitřním objemu reproduktorové ozvučnice 6l

2.2.4 Basreflexová ozvučnice

Basreflexová ozvučnice se snaží využít část zvukové energie vyzařované zadní plochou reproduktorové membrány. Vychází se z principu Helmholtzova rezonátoru. Do uzavřené ozvučnice je vyroben otvor s nátrubkem specifické délky a průměru. Rozměry nátrubku jsou „naladěné“ tak, aby rezonoval na nízkém kmitočtu, kde reproduktor už ztrácí citlivost. [1]

2.3 Vlastnosti reproduktoru

2.3.1 Modulová kmitočtová charakteristika

Modulová kmitočtová charakteristika popisuje důležitou vlastnost reproduktorů. Vyjadřuje, jak silně reproduktor vyzařuje zvukové vlny v celém slyšitelném spektru při konstantní úrovni přiváděného signálu. [1]

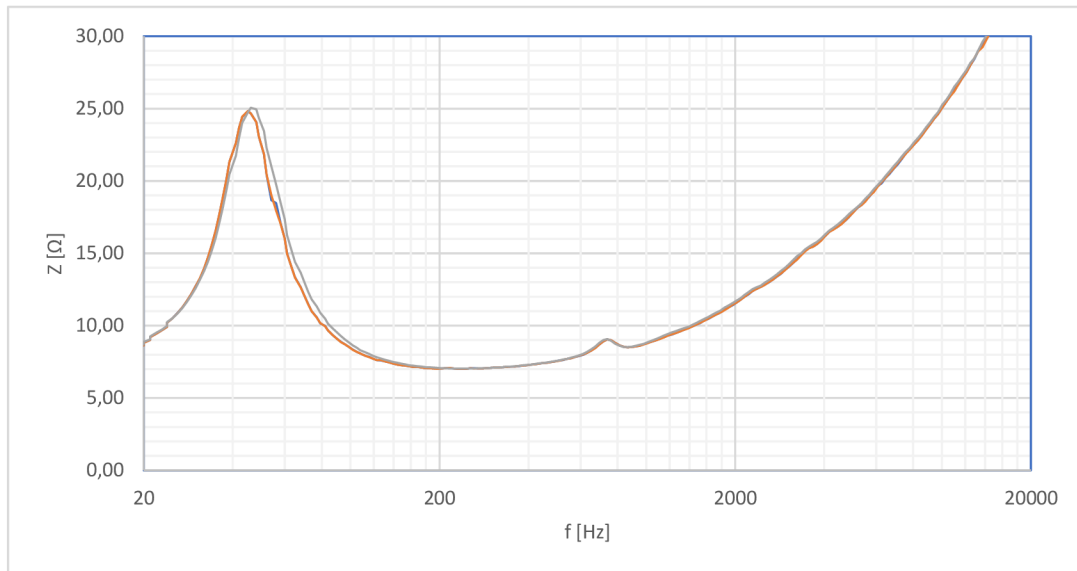
2.3.2 Jmenovitá impedance reproduktoru

Jmenovitá impedance je udána výrobcem. Jedná se o hodnotu odporu, kterým můžeme nahradit odpor reproduktoru, když chceme určit množství elektrické energie, která reproduktorovou cívku prochází. V praxi by impedance reproduktoru neměla na žádném kmitočtu klesnout pod 80% jmenovité. [1]

2.3.3 Kmitočtová závislost impedance reproduktoru

Impedance reproduktoru se mění v závislosti na přiváděném kmitočtu. Tato impedance

závisí (roste) s indukčností cívky, intenzitou magnetického pole v magnetickém obvodu, hmotností kmitacího systému, tuhostí závěsů, rozměrech a dalších vlastnostech ozvučnice a odporu vzduchu, který působí proti pohybu membrány reproduktoru. S rostoucí přenášenou frekvencí roste komplexní charakter impedance. [1]



Obrázek 2-4 Příklad kmitočtové závislosti impedance reproduktoru

2.3.4 Rezonanční kmitočet

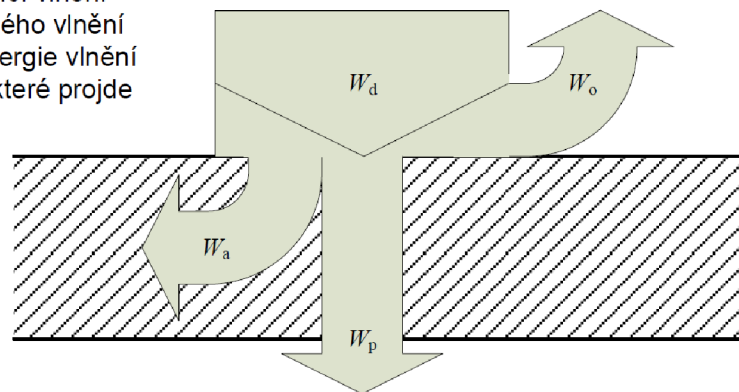
Rezonanční kmitočet je nejnižší hodnota, při níž impedance reproduktoru vykazuje maximální hodnotu. Rezonanční kmitočet se může měnit akustickou zátěží, např. umístěním reproduktoru v ozvučnici. [1]

3. AKUSTICKÉ VLASTNOSTI MATERIÁLŮ

3.1 Interakce mezi vlnou a překážkou

Během dopadu zvukové vlny na přepážku, se část energie od přepážky odrazí, část je překážkou pohlcená (změní se na teplo) a zbytek energie překážkou projde do prostoru.

W_d – energie dopadající vlnění
 W_o – energie odraženého vlnění
 W_a – absorbovaná energie vlnění
 W_p – energie vlnění, které projde překážkou



Obrázek 3-1 Interakce vlny a překážky [8]

3.2 Pohltivost zvuku

Pohltivost je fyzikální děj, kdy je akustická energie přeměněna na jinou, obvykle tepelnou. Zvuk z detailního pohledu vyvolává mikro-komprese a následné mikro-expanze prostředí, ve kterém se šíří. Část energie zvuku se vždy disipuje na teplo. Nejčastější jsou přeměny vznikající třením blízko pevné stěny a přeměny energie kmitající deskou.[8]

3.2.1 Tření v blízkosti pevné stěny

Jedná se o nejčastější a neznámější způsob pohlcení. V situacích, kde se zvuk šíří blízko stěny, se kmitající vzduchové částice a částice překážky mezi sebou třou, a tím se zvuk utlumuje a vytváří teplo. Pro vyšší efektivitu je vyžadována velká plocha.[8]

3.2.2 Převod ztrátového mechanického kmitání na tepelnou energii

Přepážka, na kterou zvuk působí, funguje jako laděný tlumený rezonanční systém. Přepážka je v systému rozkmitána na určitých kmitočtech, tyto kmity jsou tlumeny disipací. Výsledně je část akustického tlaku převedena na teplo.[8]

3.2.3 Relaxační změny

V místech, kde je nejvyšší akustický tlak, dohází k nejvyššímu zahuštění částic (na stěnách, nebo v rozích). Tento tlak je možné snížit akustickým odebráním tepelné

energie, které tam vzniká. Řešením může být osazení těchto míst tepelně vodivými materiály s velkou tepelnou kapacitou.[8]

3.2.4 Pohlcení vlivem nepružné deformace

K této přeměně dochází pouze u látek s nepružnou deformací a pružnou hysterezí. Materiál se vlivem externí síly plasticky zdeformuje, a bez vlivu této síly se nevrátí do původního tvaru. [8]

3.2.5 Porézní materiály

Jedná se o pevnou pórovitou látku, u které je většina objemu vyplněna vzduchem. Porézní materiály jsou vytvořeny tak, aby maximalizovaly svou plochu. Toho dosáhnou tím, že jejich objem tvoří převážně propojené vzduchové dutinky. Póry by neměly být uzavřené, aby zvukové vlny mohly pronikat do materiálu. Dobře fungují výplně elastickým materiálem, který částečně propustí a pohltí zvukovou energii [3]. Tyto materiály mohou mít vláknovou, kanálkovou, či pěnovou strukturu a bývají vyráběny ze skleněných, minerálních, nebo plastických materiálů atp.[8]

3.2.6 Výpočet činitele zvukové pohltivosti α

Tento čítnel se vypočítá z poměru akustické energie pohlcené, vůči energii dopadající na měřenou plochu. Pohlcená energie může být také vyjádřena jako rozdíl energie dopadající a odražené. [8]

$$\alpha = \frac{W_p}{W_d} = \frac{W_d - W_o}{W_d} = 1 - \frac{W_o}{W_d} \quad (3.1)$$

Kde W_p je energie pohlcená, W_d je energie dopadající a W_o je energie odražená.

3.3 Průchod zvuku materiálem

Průzvučnost se dle jejich zdroje dělí na vzduchovou a kročejovu.

3.3.1 Vzduchová průzvučnost

Vzduchová průzvučnost se stanovuje pro dvě místnosti oddělené přepážkou, v jedné místnosti je zdroj zvuku a v druhé se měří hlasitost zvuku, který se přenesl přes přepážku.

Zvuk může projít přepážkou buď přímo, nebo nepřímo. K přímému přenosu dojde, když zvuková vlna dopadne na přepážku, část její energie je pohlcena a odražena a zbytek prochází skrz. Pokud je přepážka uchycena k okolním stěnám, tak i tyto stěny se můžou účastnit průchodu zvuku. Vlny dopadají na přepážku a tato energie se přenáší do okolních zdí, které tuto energii následně vyzáří zpátky do místnosti. K přenosu může docházet i obráceně (od okolních zdí do přepážky) a může docházet i k přenosu jenom přes zdi.

Činitel zvukové průzvučnosti τ se určuje z poměru akustického výkonu přeneseného a dopadajícího. Dopadající akustický výkon může být též vyjádřen jako suma výkonu přeneseného, odraženého a pohlceného.

$$\tau = \frac{W_p}{W_d} = \frac{W_p}{W_p + W_o + W_h} \quad (3.2)$$

Kde W_p je výkon pohlcený, W_d je výkon dopadající, W_o je výkon odražený a W_h je výkon pohlcený. [10] Průzvučnost lze také měřit v impedanční trubici za pomoci metody přenosové funkce.

3.3.2 Kročejová průzvučnost

Kročejový zvuk nevzniká normálním zvukovým zdrojem, ale přímo rázy (např. kroky), které se poté šíří pevnými látkami a produkují zvuk. Zvukovým zdrojem je sledovaný materiál. [3]

3.4 Odraz zvukových vln

V ideálním případě zvuková vlna dopadne na rovinnou plochu, úhel odrazu se rovná úhlu dopadu a odražená akustická energie je rovna množství energie dopadající. V praxi bude vždy část akustické energie pohlcena a část propuštěna skrz překážku. Úhel odrazu od reálných překážek, které nejsou ideálně rovné, také nemusí odpovídat teorii. Rozměr plochy, který určuje odraz akustické vlny je závislý na vlnové délce dopadajícího zvuku. Pokud nerovnosti na překážce dosáhnou rozměrů vlnové délky, probíhá difúzní odraz.[9]

3.4.1 Obrazová metoda

Pro vizualizaci šíření zvuku v místnosti je možno využít Snellova principu, kdy můžeme určit úhly odrazů za pomoci virtuálních zdrojů umístěných na druhé straně odrazivé překážky. Pozice virtuálního zdroje je zrcadlena dle osy přepážky. Pro každý nadcházející odraz se vytváří další zrcadlové zdroje, kterým je přiřazen řád ekvivalentní pořadí odrazu. Vyšší řády jsou vytvořeny dalším zrcadlením nižšího řádu. [9]

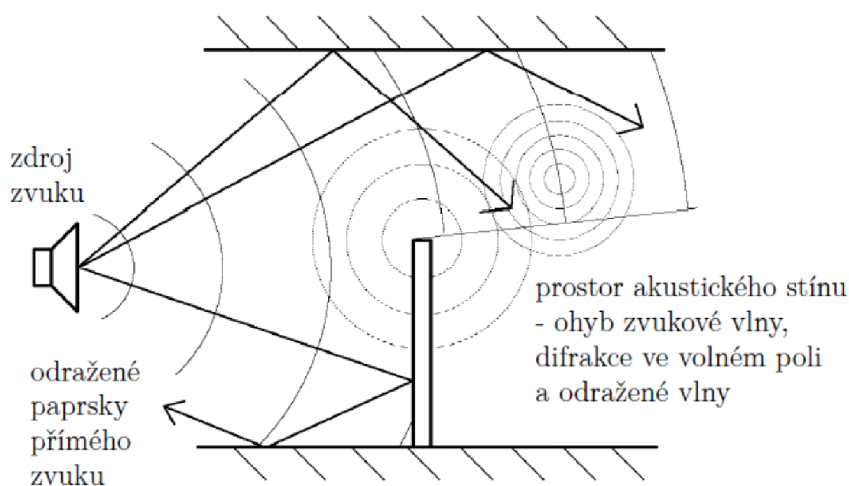
3.4.2 Ray-tracing

Pro tuto metodu vizualizace je zdroj kulového vlnění nahrazen množstvím paprsků pravidelně rozmístěných a vzájemně svírajících stejný úhel. Vybrané množství paprsků určí detailnost a přesnost simulace. V této simulaci u odrazivých ploch lze použít i směrových zdrojů kmitočtově závislé úrovně pohltivosti.[9]

3.5 Difrakce zvukových vln

V praxi se jedná o fenomén, kdy se zvuk zdánlivě ohýbá a šíří za hrany překážek. Pro názornost si můžeme představit zvukovou vlnoplochu jako shromáždění mnoha

bodových zdrojů. Když vlnění dorazí na hranu překážky, stává se z ní nový zdroj kulového vlnění. Tento jev je kmitočtově závislý a roste s poměrem rozměru vlny k rozměru překážky. Čím je vlnová délka zvuku delší než velikost překážky, tím snadněji ji obchází. Pokud je vlnová délka kratší než rozměr překážky, intenzita difrakcí výrazně klesá. [2]



Obrázek 3-2 Schématické znázornění difrakce [8]

3.6 Rezonance materiálů

Rezonance je vlastnost, kterou každý materiál disponuje. Je závislá na fyzikálních vlastnostech materiálu, jako jeho hmotnost, hustota a rozměry. Každý materiál má minimálně jeden základní rezonanční kmitočet a jeho vyšší harmonické. Když nějaký materiál rezonuje, tak ze sebe vytváří sekundární zdroj vlnění. Rezonanci mohou způsobit i rázy relativně malé energie, když se jejich síla pravidelně přičítá pohybu kmitající překážky. V případě, že rezonance není tlumená, může dojít ke zničení zařízení. 61

4. MĚŘENÍ AKUSTICKÝCH VLASTNOSTÍ MATERIÁLŮ

4.1 Měření za pomoci dozvukové místnosti

Dozvuková místnost je normovaná laboratorní pomůcka (dle ČSN ISO 354), která je zkonstruována z materiálů s nízkým koeficientem pohltivosti a přesně stanovenou dobou dozvuku. Rozmístění zvuku by mělo být difúzní, proto jsou v místnosti pro rozptýlení zvuku zavěšeny další odrazivé prvky. Do místnosti se umístí měřený materiál a je měřena doba dozvuku. Výsledkem měření jsou dvě doby dozvuku, ze kterých se vypočítá pohltivost měřeného materiálu. [7]

4.2 Měření za pomoci impedanční trubice

Impedanční trubice je laboratorní zařízení, které je používáno k měření činitele zvukové pohltivosti a průzvučnosti při kolmém dopadu zvukových vln na měřený vzorek. Při porovnání měření v impedanční trubici a měření v dozvukové místnosti tato metoda umožňuje provedení jednoduššího, rychlejšího a levnějšího měření. Vlny dopadající na materiál v dozvukové místnosti budou jiného charakteru, než rovinné a kolmo dopadající vlny v impedanční trubici, a bude nutné brát v úvahu tuto skutečnost při hodnocení výsledků. Průřez impedanční trubicí může být libovolný, ale doporučuje se tvar kruhový nebo čtvercový. [7]

4.2.1 Metoda poměru stojaté vlny

Při této metodě se využívá jednoho podélně pohyblivého mikrofону umístěného uprostřed trubice. Mikrofon se posouvá na specifická místa, kde je schopen měřit akustická maxima a minima stojatého vlnění vyvolaného harmonickým signálem. Z těchto hodnot je následně možné vypočítat pohltivost a odrazivost měřeného materiálu. Pro toto měření se výhradně používá harmonický měřicí signál. [7]

4.2.2 Metoda přenosové funkce

Při měření akustické pohltivosti tato měřicí metoda využívá 2 mikrofóny umístěných dostatečně daleko od zdroje. Cílem je, aby se měřilo pouze rovinné vlnění a ostatní vlny byly eliminovány. Před měřením musí být u mikrofónů zkontrolovány rozdíly v jejich modulové a fázové kmitočtové charakteristice a vykompenzovány potenciální rozdíly. Během měření může být použit šumový, nebo proměnný sinusový signál. Činitel pohltivosti je určen z výsledků měření přenosových funkcí obou mikrofónů, které byly použity pro výpočet komplexního činitele odrazu.

Měření je také možno provést s jedním mikrofónem, kdy je mikrofon přemísťován mezi požadovanými pozicemi a měření se opakuje. Tento postup eliminuje potenciální fázovou neshodu mezi mikrofóny. Tato metoda však vyžaduje speciální budící signál a je časově náročnější. [7]

5. VOLBA NÍZKOFREKVENČNÍHO ZESILOVAČE

Nízkofrekvenční zesilovače jsou audiotechnická zařízení, která umožňují převést slabý linkový signál, se kterým pracují zařízení pro úpravu zvuku (předzesilovače, mixážní zařízení atd.), která ho zesílí na potřebnou (výkonovou) úroveň, která je vhodná pro tvorbu zvuku z reproduktorů.

Zesilovače se můžou dělit dle typu signálu, který je na jejich vstupu a výstupu na napěťové a proudové. Tyto zesilovače pracují se stejným typem signálu na vstupu i výstupu. Existují taky zesilovače, které transformují typ signálu z napěťového na proudový (Trasnskonduktanční) a z proudového na napěťový (Transimpedanční). [6]

5.1 Parametry zesilovačů

5.1.1 Odstup od šumu

Šum je náhodný parazitní signál, který vzniká některými vlastnostmi součástek v zesilovači. Nejčastější je to Johnsonův šum, který vzniká jako důsledek rezistence součástek v obvodu. Šum roste s přímou úměrou k rezistenci. Další druhy šumů jsou výstřelový šum, Flickernoise a Popcorn noise. Tyto šумы jsou náhodné, a tudíž se musí sčítat za pomoci kvadrátu jejich efektivních hodnot.

Odstup signálu od šumu je poměr mezi maximální úrovní žádaného signálu a šumového signálu. U zesilovačů určených pro přímý poslech, je nutné udržet hladinu šumu pod hranici slyšitelnosti. Zatížením zesilovače co nejlépe jeho jmenovitému výkonu se zajistí dostatečný odstup od šumu. Zátěž zesilovače na vyšších výkonech může způsobit přehřátí, harmonické zkreslení a poškození zesilovače. [6]

5.1.2 Činitel harmonického zkreslení

Během zesílení dochází ke změně tvaru a spektra signálu a mohou přibývat nežádoucí vyšší harmonické složky. Tato změna může být způsobena nelinearitou převodní charakteristiky zesilovače, nebo přetížením zesilovacího prvku (tranzistor, elektronka, operační zesilovač). Činitel harmonického zkreslení se vyjadřuje v procentech a znázorňuje zastoupení vyšších harmonických složek na výstupu měřeného zařízení oproti vstupnímu signálu. [6]

5.1.3 Modulová kmitočtová charakteristika

Jedná se o množství přenesené energie v závislosti na kmitočtu. Podobně jako u reproduktorů, je i u zesilovačů důležité, aby dosáhly nejrovnější možné modulové kmitočtové charakteristiky ve slyšitelném pásmu.[6]

5.1.4 Přeslechy mezi vodiči

Vodiče, kterými je veden elektrický proud, vždy kolem sebe zároveň vytváří

elektromagnetické pole. Toto pole potom kapacitně a induktivně může ovlivňovat signál na jiných vodičích. Intenzita tohoto děje roste přímo úměrně s délkou paralelních vodičů a nepřímo úměrně se vzdáleností mezi nimi. Vliv přeslechů se dá snížit navýšením vzdálenosti mezi součástkami a umístěním zemnicího vodiče mezi nimi. Nejčastěji se tato problematika objevuje u stereofonního provedení zesilovačů, kde není pravý a levý kanál dostatečně oddělen a u situací, kdy je výkonová část zesilovače umístěna blízko signálové. [6]

5.1.5 Výstupní výkon

U každého zesilovače by měl být uveden jeho jmenovitý výkon. Tento výkon je měřen u sinusového signálu o kmitočtu 1kHz a měření by mělo být prováděno po dobu 10 minut do specifické zátěže uvedené v katalogu. Výrobci levnějších zařízení často uvádí hodnoty hudebního, či špičkového výkonu bez správného označení, aby byly jejich výrobky prodejnější. [6]

5.2 Třídy zesilovačů

Zesilovače se mohou dělit dle fyzické konstrukce a způsobu fungování do několika tříd. Tyto třídy se liší konstrukcí a způsobem zesílení a jsou značeny písmeny. Mezi nejznámější spadají třídy A, B, AB a D.

5.2.1 Zesilovače třídy A

U zesilovače třídy A proud prochází součástkami na výkonové výstupní části plynule bez spínání aktivních částí. Na bázi zesilovače je přiváděn klidový proud, takže tento zesilovač netrpí zkreslením způsobeným spínáním tranzistorů a jejich charakteristické křivky. Do báze výkonového tranzistoru se přivádí nezesílený signál a ten funguje jako proměnný rezistor. Zesilovač funguje jako napěťový dělič složený z jednoho tranzistoru a jednoho rezistoru, který mění svou hodnotu dle přiváděného signálu. [14] Toto uspořádání umožňuje ze všech uvedených zesilovačů nejnižší zkreslení, ale také nejnižší efektivitu, která v praxi nepřesáhne 25% (v [14] je maximum uvedeno jen 12,5%).

5.2.2 Zesilovače třídy B

Zesilovač třídy B využívá dvou tranzistorů na vytvoření napěťového děliče. Jeden je NPN a druhý PNP, a každý tranzistor spíná a zesiluje jednu půlvlnu, kladnou nebo zápornou, ze střídavého elektrického signálu. Když je na bázích nulové napětí, jsou oba tranzistory vypnuty. Když není dobře nastaven spínací bod tranzistorů, amplitudy na sebe nenavazují a způsobuje to „schodky“ v signálu na výstupu, což se spektrálně odráží jako vysoké THD. Efektivita zesilovače třídy B může teoreticky však dosáhnout až 78,5%. [14]

5.2.3 Zesilovače třídy AB

Třída AB se snaží zkombinovat výhody obou výše uvedených tříd zesilovačů tím, že přivede klidový proud do uspořádání typu B. Tím se eliminuje THD způsobený spínáním tranzistorů. V praxi má tato třída trochu nižší efektivitu než třída B a trochu vyšší zkreslení, než třída A. [14]

5.2.4 Zesilovače třídy D

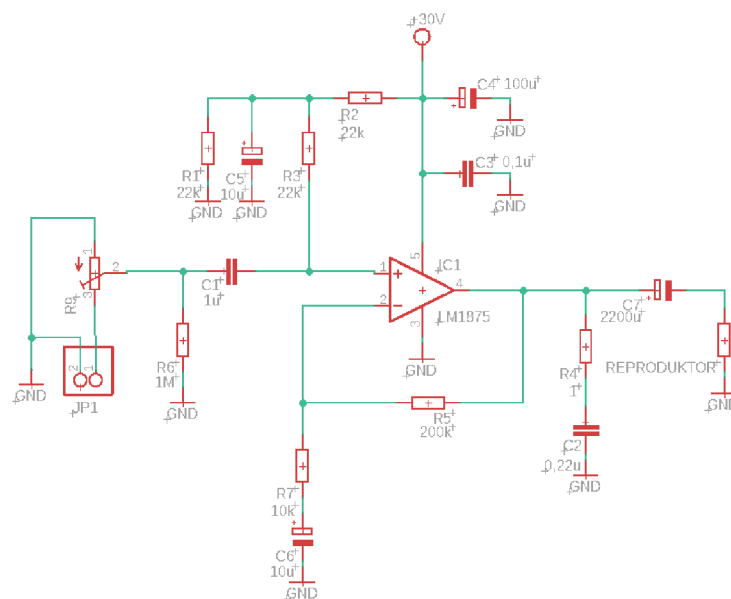
Zesilovače třídy D fungují na jiném principu než předcházející uvedené třídy, závislé na pracovních bodech tranzistorů. U této třídy je analogový signál modulován za pomoci pilového, či trojúhelníkového signálu na sérii impulzů, u kterých šířka impulzu reprezentuje amplitudu signálu. Tento signál potom budí dvojici nebo čtveřici MOSFET tranzistorů. Jedná se o nejúčinnější, ale nejsložitější zesilovač z uvedených. [14]

5.3 Požadavky

Je požadováno, aby zesilovač měl co nejnižší zkreslení a zároveň dodal dostatečný výkon do reproduktoru. 2,5 palcový reproduktor používaný pro měření bude vyžadovat více než 5W a tudíž je perforován zesilovač typu AB.

5.4 Návrh zesilovače

Pro napájení reproduktoru, který je použit během měření v impedanční trubici, je navržen jednoduchý monofonní zesilovač, který využívá jednoho operačního zesilovače LM1875.[21] Z dostupných řešení byl tento operační zesilovač vybrán kvůli kombinaci dostatečného výkonu 20W a nízkého zkreslení (max THD = 0,1%) v celém výkonovém rozsahu, s nejnižším (THD = 0,02) na jmenovitém výkonu. Pro nejnižší THD je plánováno použít 8Ω reproduktor. Zesilovač bude napájen asymetrickým 30V napětím z laboratorního zdroje.



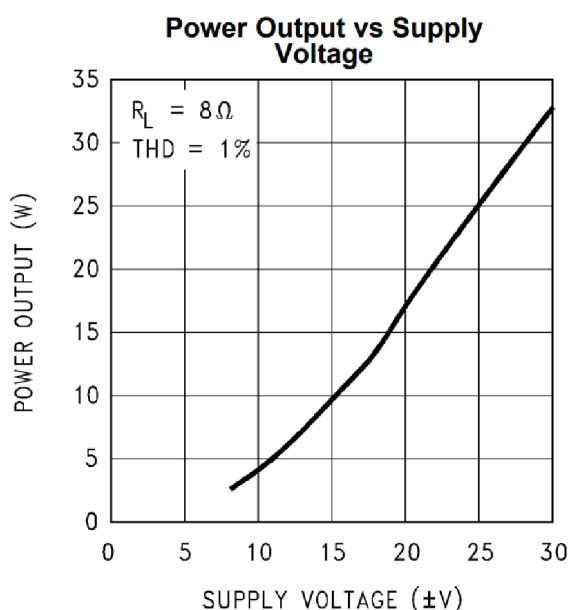
Obrázek 5-1 Schéma navrženého zesilovače

V tomto zapojení rezistory R1 a R2 tvoří napěťový dělič, aby byl přes R3 přiváděn na vstup operačního zesilovače klidový proud. Kondenzátory C3 a C4 slouží k filtraci a vyhlazení vstupního napájení. Kondenzátor C5 slouží k vyhlazení signálu napěťového děliče. Do JP1 je přiveden vstupní signál, který je nastavitelně tlumen na potenciometru R9. Rezistoru R6 představuje vstupní impedanci zesilovače a C1 blokuje stejnosměrné složky. Kondenzátor C6 odděluje stejnosměrnou složku ze zpětné vazby. Rezistory R5 a R7 tvoří zesilovací část tohoto neinvertujícího zesilovače. Které mají zesílení A dle vzorce.

$$A = 1 + \frac{R5}{R7} = 21 \quad (5.1)$$

Rezistor R4 a kondenzátor C2 pomáhají proti vysoko kmitočtovým zákmitům a kondenzátor C7 filtruje stejnosměrnou složku od výstupu.

Pro napájení zesilovače byl zvolen zdroj 19,5V stejnosměrného proudu. Z katalogové charakteristiky (Obrázek 5-4 Závislost maximálního výstupního výkonu na vstupním napájení) se jedná o hraničně slabý zdroj, který umožní maximální výkon zhruba 4W, ale tento výkon je dostatečný, pro daná měření není vyšší výkon potřeba. Obrázek vykresluje charakteristiku pro symetrické stejnosměrné napájení. Použitý zesilovač se umístí na 9,75V. Volba slabšího zdroje, snižuje pravděpodobnost přehřívání výkonového stupně zesilovače. Zesilovače typu AB převádí značnou část energie na teplo i když žádný signál nezesilují. Tento převod energie na teplo se výrazně navyšuje s napájecím napětím. [21]



Obrázek 5-4 Závislost maximálního výstupního výkonu na vstupním napájení

6. VOLBA VHODNÉHO MIKROFONU PRO MĚŘENÍ

6.1 Druhy mikrofonů dle směrové charakteristiky

6.1.1 Mikrofony všesměrové

Všesměrové neboli tlakové mikrofony disponují kulovou směrovou charakteristikou. Akustický tlak dopadá pouze na jednu stranu membrány mikrofonu, druhá strana je kompletně uzavřena uvnitř kapsle. Tím tento mikrofon nerozezná, z jakého směru akustický tlak přichází.

6.1.2 Mikrofony osmičkové

Tyto mikrofony přijímají zvuk z obou stran bez použití jakéhokoliv akustického zpoždění. Když na membránu těchto mikrofonů dopadá zvukový tlak kolmo, bez ohledu na to, ze které strany přichází, tak mají nevyšší citlivost. Když uvažujeme akustickou osu mikrofonu jako 0° , tak tato citlivost klesá s rostoucím úhlem dopadu. Pod úhlem 90° se citlivost mikrofonu blíží nule.

6.1.3 Mikrofony kardioidní

Kardioidní mikrofony, podobně jako osmičkové, využívají obou stran membrány. Mikrofony kardioidní však využívají „labyrintového“ systému, který zpozdí akustický tlak dopadající na zadní stranu membrány mikrofonu. V případě kardioidního mikrofonu je toto zpoždění nastaveno tak, že zvuk dopadá na zadní stranu membrány zpožděn o 180° . Díky tomu by měl ideální kardioidní mikrofon dvojnásobnou citlivost v ose membrány vpředu mikrofonu a nulovou vzadu.

6.2 Druhy mikrofonů dle fyzické konstrukce

6.2.1 Elektrodynamické mikrofony

Většina elektroakustických zařízení jsou reciproké, což znamená, že mohou fungovat jako reproduktory i mikrofony. Elektrodynamický mikrofon využívá stejného fyzikálního principu jako reproduktor, jen místo transformace elektrického napětí na akustický tlak, převádí tlak na napětí. Elektrodynamický mikrofon patří mezi měniče, které konvertují rychlost pohybu cívky v permanentním magnetickém poli na výstupní napětí. Samotná výchylka membrány mikrofonu nevytváří žádné napětí.

Elektrodynamické mikrofony mají jednoduchou a levnou konstrukci a vysokou odolnost jak vůči vysokému akustickému tlaku, tak i potenciálním rázům a pádům během manipulace. Mikrofon nepotřebuje žádné externí napájení, ale úroveň jeho výstupního napájení je nízká a často má nižší dynamický rozsah než mikrofony na jiném principu.

6.2.2 Elektrostatické mikrofony

Elektrostatická zařízení mají těž reciproké vlastnosti. U těchto mikrofonů je výchylka membrány přímo úměrná výstupnímu napětí. Často jsou označovány jako kapacitní mikrofony. Membrána mikrofonu funguje jako jedna z elektrod kondenzátoru, a když se vlivem akustické energie vychýlí, tak se kapacita mezi elektrodami změní, a tím i výstupní elektrické napětí. Tento systém spoléhá na předpětí kapacitních desek, tudíž musí být do mikrofonu přiváděno externí, fantomové napětí.

6.2.3 MEMS mikrofony

Zkratka MEMS znamená Micro-Electro-Mechanical-System. MEMS mikrofony pracují na stejném principu jako elektrostatické. Jedná se o moderní úpravu této technologie s cílem minimální ceny a rozměru. Mikrofony se skládají minimálně ze 4 propojených částí: tištěného spoje, čipu ASIC, krytu a samotného MEMS snímače. Na malém tištěném spoji je umístěn kapacitní snímač a ASIC čip. Tyto dvě součástky jsou zakryty, aby nedocházelo k fyzickému poškození součástek. Veškeré kontakty tištěného spoje jsou umístěny na obnažené straně tištěného spoje. Tyto mikrofony se svými rozměry mohou pohybovat v rozsahu setin až jednotek milimetrů.

ASIC je integrovaný čip, který konvertuje vstupní předpětí na signál potřebný pro MEMS snímač. Součástí ASIC čipu může být integrovaný předzesilovač a jiné pomocné obvody. Tištěný spoj a kryt zakrývají citlivé součástky uvnitř a dle potřeby je v jednom z nich umístěn otvor pro příjem zvuku.

Samotný MEMS snímač může být proveden dvěma různými způsoby, podle toho, kterou stranou zvuk přijímá. V situaci, kdy přijímá zvuk skrz kryt, může být samotný kapacitní snímač vytvořen z odleptané vrstvy na tištěném spoji a tenké membrány umístěny nad ní. V případě příjmu přes otvor v tištěném spoji, se používá obvyklejší provedení membrány a pevné desky umístěné za ni.[19]

6.3 Mikrofony použité pro měření impedanční trubice

Impedanční trubice je zkonstruována tak, aby podporovala měřicí tlakový mikrofon Audix TM1 i MEMS mikrofony. Tyto mikrofony se usazují do speciálních držáků zhotovených z kabelových vývodků. Tyto vývodky jsou upravené, našroubované a přilepené shora do obrobene pracovní plochy impedanční trubice. Při měření, do neobsazených držáků, vkládáme zátky. Tyto zátky byly vyrobeny na 3D tiskárně a jsou stejného průměru, jako měřicí mikrofony.

7. KONSTRUKČNÍ PROVEDENÍ IMPEDANČNÍ TRUBICE

7.1 Normované požadavky

Požadavky na konstrukci impedanční trubice byly brány ze dvou norem, mezinárodní a české. Vzhledem k tomu, že normy se svými požadavky doplňují a nevylučují, byl tento návrh vytvořen tak aby vyhovoval oběma normám.[15][17]

7.1.1 Rozměry

Většina rozměrů trubice je přímo odvozená z vlnové délky nejvyššího kmitočtu, který bude měřen. Další důležité hodnoty, které jsou rozhodné pro rozmístění mikrofonů, je poréznost měřeného materiálu a nejnižší měřený kmitočet. Požadovaný kmitočtový rozsah, který bude v trubici měřen, je 100 – 3000Hz.

Mezinárodní norma uvádí, jak z nejvyššího měřeného kmitočtu lze vypočítat maximální vnitřní průměr trubice dle vztahu

$$d_{max} = \frac{K * c}{f_{max}} = \frac{0,586 * 343}{3000} = 0,067m \quad (7.1)$$

kde konstanta $K = 0,586$, rychlost zvuku $c = 343m/s$ a f_{max} nejvyšší kmitočet, který bude měřen. Dle dostupných technických možností je vybrána trubice o vnitřním průměru $d = 63,4mm$ a tloušťce $6,3mm$. [15]

Vypočítaný, navrhovaný průměr vyhovuje i podmínkám české normy, která je vyjádřena dle vztahu.[17]

$$\begin{aligned} f_{max} * d_{max} &< 0,58 * c \\ 3000 * 0,0634 &< 0,58 * 343 \\ 190 &< 198 \end{aligned} \quad (7.2)$$

Mezinárodní norma také určuje minimální a maximální vzdálenost mikrofonů dle hraničních kmitočtů. Vzdálenost mezi mikrofony musí být větší, než 1% vlnové délky. Při použití takto stanoveného kmitočtu a rychlosti zvuku dostaneme vztah

$$s_{min} = 0,01 * \left(\frac{c}{f_{min}}\right) = 0,01 * \left(\frac{343}{100}\right) = 0,0343 m \quad (7.3)$$

kde f_{min} představuje nejnižší měřený kmitočet. [15] Nejvyšší vzdálenost mezi mikrofony by měla být méně než půlka nejkratší vlnové délky.

$$s_{max} = \frac{c}{2 * f_{max}} = \frac{343}{2 * 3000} = 0,0572 m \quad (7.4)$$

Rozmístění mikrofonů bylo zvoleno $s = 45\text{mm}$.

Česká norma požaduje, aby vzdálenost mezi mikrofony vyhovovala vztahu:

$$\begin{aligned} f_{max} * s &< 0,45 * c \\ 3000 * 0,045 &< 0,45 * 343 \\ 135 &< 154 \end{aligned} \quad (7.5)$$

Toto rozmístění však odporuje podmínce, která vyžaduje, aby rozmístění mikrofonů nepřesahovalo 5% nejnižší vlnové délky, která je měřena.[17] Z těchto důvodů je vytvořena třetí pozice pro mikrofon, ve vzdálenosti 180mm. Toto rozmístění si můžeme ověřit za pomoci vztahu:

$$\begin{aligned} s &> 0,05 * \frac{c}{f_{min}} \\ 0,18 &> 0,05 * \frac{343}{100} \\ 0,18 &> 0,172 \end{aligned} \quad (7.6)$$

Tyto dvě umístění mají relativně široké společné pásmo (400 – 800Hz), takže by neměl vzniknout problém z „hluchých“ míst v měřeném kmitočtovém pásmu.

Důležitým rozměrem jsou vzdálenosti mikrofonů od zdroje rovinných akustických vln a od měřeného vzorku. Vzdálenosti se určují z násobku vnitřního průměru d . Vzdálenost nejbližšího mikrofonu t_{min} od zdroje akustického tlaku je minimálně trojnásobkem vnitřního průměru.[15]

$$t_{min} = 3 * d = 3 * 63,4 = 0,1902m \quad (7.7)$$

Minimální vzdálenost nejbližšího mikrofonu k měřené ploše l_{min} je závislá na nerovnostech měřeného povrchu. A pohybuje se v rozsahu půlky průměru trubice (pro nerovnější povrchy) až dvojnásobku. [15]

$$l_{min} = 2 * d = 2 * 63,4 = 0,1268m \quad (7.8)$$

Výsledné rozměry t a l byly zvoleny náležitě: $t = 250\text{mm}$ a $l = 150\text{mm}$. Tyto vzdálenosti jsou vázány ke středové ose mikrofonu nejbližší příslušné plochy.

7.1.2 Mechanické vlastnosti

V normách jsou uvedeny mechanické podmínky, kterým impedanční trubice musí vyhovovat. Impedanční trubice musí být izolována od vnějších rezonancí, osově rovná a konstantního průřezu. Trubice musí být vzduchotěsná a při měření průzvučnosti musí mít obě komory stejný vnitřní objem.[15]

Nutnost izolace trubice od vnějších otřesů a rezonancí je řešena umístěním na silentbloky. Tyto silentbloky jsou uchyceny pomocí šroubů tak, aby nevznikla nestabilita trubice v případě nerovnosti konstrukce či povrchu, na kterém bude umístěna.

Podélná rovnost trubice je zajištěna použitím jednoho delšího polotovaru, který je přesně nařezán a obvodově obroben u spojů, aby trubice do sebe zapadly a posuvně spojily.

Vzduchotěsnost bude zaručena použitím vhodných těsnění na kontaktních plochách trubice. Samotná trubice je navržena takovým způsobem, že na ni bude možno použít více různých těsnění libovolné tloušťky. Obě komory trubice jsou svými rozměry navrženy tak, aby se svými rozměry zrcadlily.

7.2 Technické požadavky

V technických aspektech musí navrhovaná trubice neměla splňovat pouze normované požadavky, ale jako budoucí laboratorní zařízení pro studenty musí splňovat několik dalších požadavků, jako odolnost a jednoduchost práce.

7.2.1 Robustní konstrukce

Trubice je vyrobena tak, aby během transportu a standardní páce byla minimalizována pravděpodobnost fyzického poškození. Pro tento účel je trubice a ostatní části, které k ní budou připojeny (navářeny) vyrobeny z konstrukční oceli. Reproduktorová ozvučnice je vyrobena z tuhé vícevrstvé překližky pokryté textilií podobnou zátěžovým kobercům. Veškeré nesvařované spoje využívají šroubových spojení.

7.2.2 Snadná vyměnitelnost měřených materiálů

Materiály, u kterých bude měřena průzvučnost, a u kterých bude měřena pohltivost, mají velice rozdílný způsob uchycení v měřícím přípravku.

Materiály, u kterých bude měřena průzvučnost budou stlačeny mezi obrobenými plochami dvou trubic. V případě měkkého materiálu by bylo využito ocelového prstence vyrobeného ze stejného materiálu jako impedanční trubice. Měřený materiál by poté musel být vzduchotěsně vlepen do prstence. Pro orientační měření měkkého materiálu v impedanční trubici však prstenec není potřeba a materiál může být uchycen mezi plochy stejně, jako materiály tvrdší.

Pro měření akustické pohltivosti nejde použít stejný princip. Důvodem menší pevnost některých materiálů. Vnitřní objem trubice musí být zachován při měření všech materiálů. Aby byl kompenzován prostor, který měřený materiál zabírá, bylo navrženo zakončit trubici pohyblivým pístem, který tento požadavek dokáže splnit. Píst musí být vzduchotěsný a vyroben z těžkého hladkého materiálu, aby se minimalizoval vliv na měření.

7.2.3 Modularita a zaměnitelnost dílů pro měření průzvučnosti a pohltivosti

Uchycení pístu pro měření pohltivosti a druhé trubice pro měření průzvučnosti je identické. Kromě pístu jsou všechny díly používané pro měření pohltivosti použity i pro průzvučnost.

7.3 Postup řešení a problematika

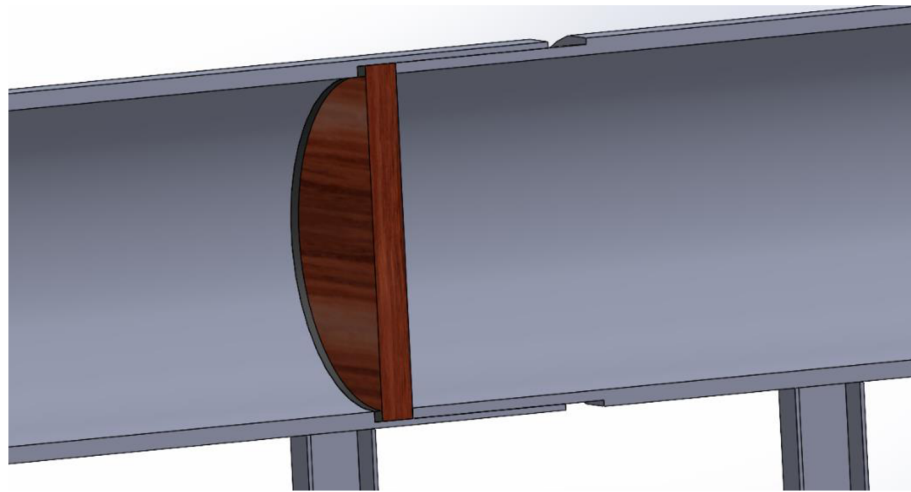
Návrhy trubice byly vytvořeny v 3D CADu SOLIDWORKS.

7.3.1 Výběr technických řešení, technické možnosti a první návrh

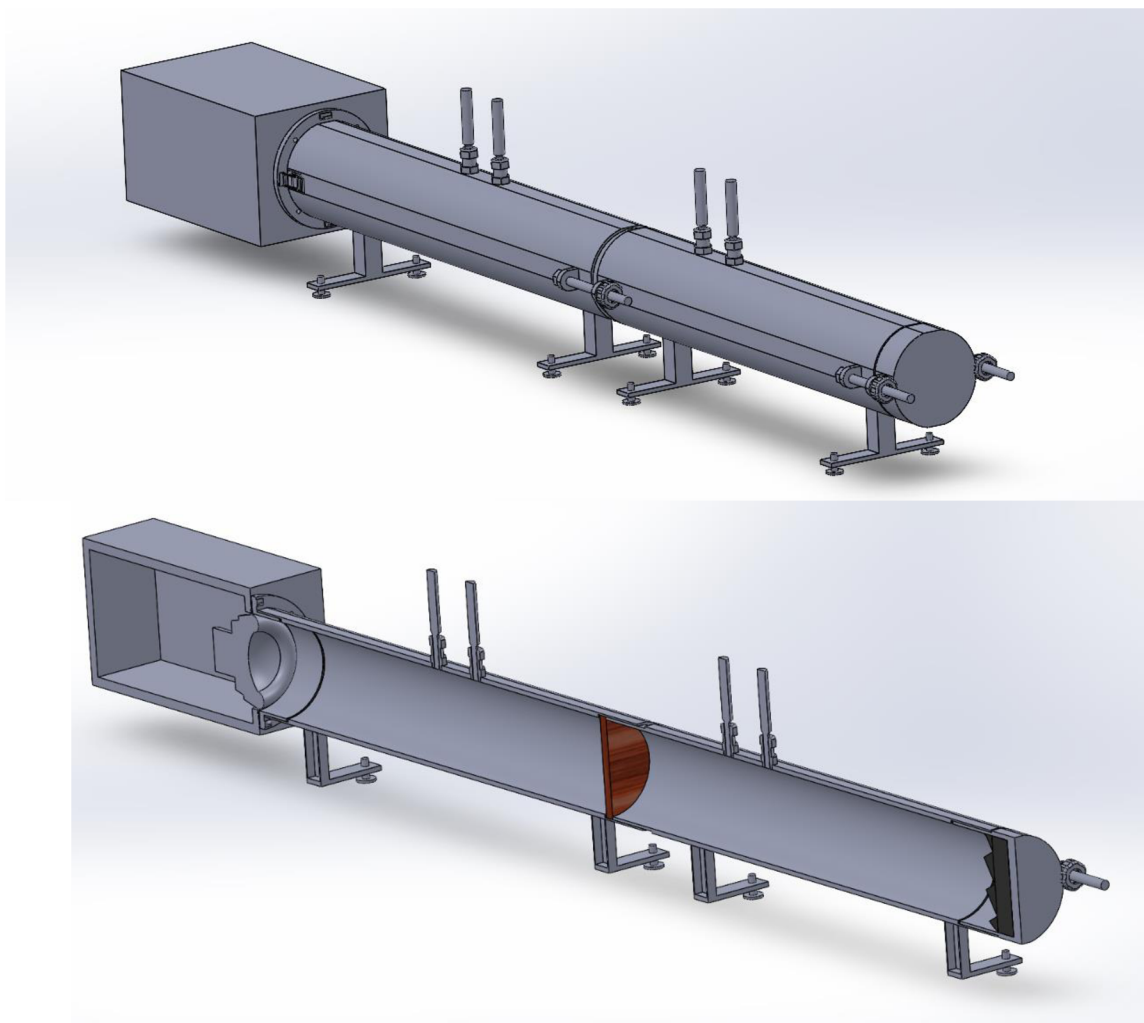
Prvotní návrh využíval výsledků z bakalářské práce Adama Rašky [20] zaměřené na konstrukci impedanční trubice pro měření zvukové pohltivosti a rozměrových požadavků dle norem.[15][17]

První návrh řešení byl zaměřen na konstrukci z oceli. Měla být zhotovena komora pro uchycení třípalcového reproduktoru, která navazuje na systém dvou trubic, které se po vzájemném zasunutí upevní pomocí bočních šroubů. Vhodným těsněním bude zaručena vzduchotěsnost. Měřený vzorek je uchycen mezi trubice dle obrázku 7-1

Detail uchycení měřeného materiálu. Obdobně bylo provedeno uchycení reproduktoru a zakončení s ideálním absorbérem použité pro měření průzvučnosti. Vzduchotěsnost je zaručena dotažením dvou bočních šroubů. Uchycení reproduktoru je provedeno na odděleném dílu, který je vytvořen svařením příruby a trubice. Trubice je uložena na stojanech a vyrovnaní trubice s podložkou je zajištěno pomocí šroubovacích nožek. Efektivní kmitočtový rozsah této trubice byl 70 – 2300Hz.



Obrázek 7-1 Detail uchycení měřeného materiálu

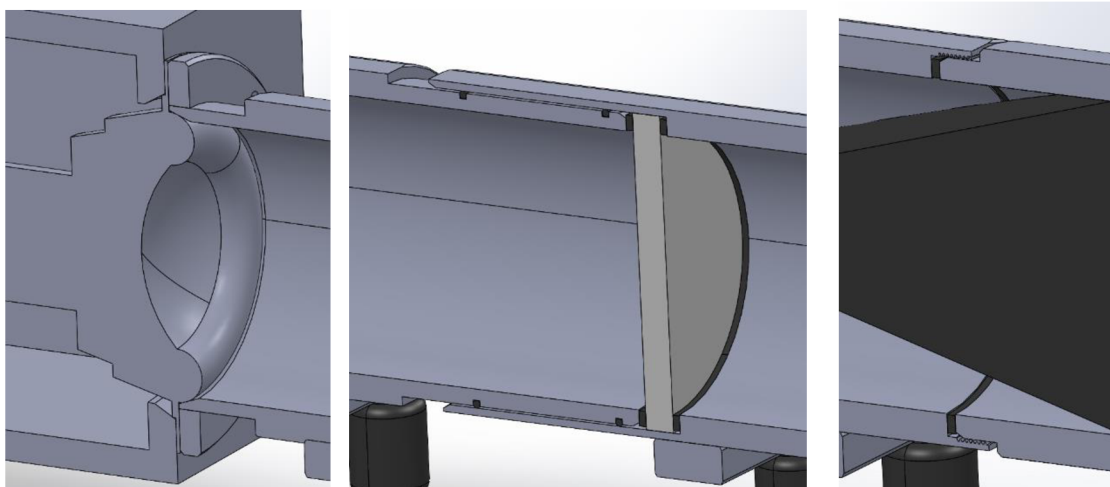


Obrázek 7-2 Prvotní návrh impedanční trubice

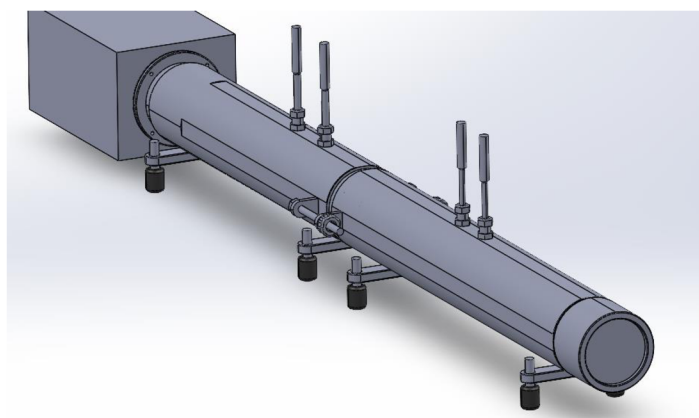
7.3.2 Úprava dle výrobních možností

V průběhu konzultací s firmou, která participovala při výrobě trubice byl návrh upraven, aby vyhovoval výrobním standardům a možnostem. Dále byl návrh zjednodušen a upraven, aby trubice byla co nejjednodušší a vešla se do finančního rozpočtu.

Trubice je navržena tak, aby mohla být vyrobena z nerezavějící oceli, nebo normální oceli s povrchovou úpravou bez velkých změn v návrhu. Uchycení misky s ideálním absorbérem použité pro měření průzvučnosti bylo změněno na levnější provedení za pomoci závitu, protože výroba oddělené misky pro pohltivost je levnější než používání stejného uchycení, jako spoje mezi trubicemi. Byly přidány drážky pro těsnění kolem obvodu spoje trubic, aby v případě použití normální oceli s povrchovou úpravou bylo minimalizováno poškození povrchové úpravy.



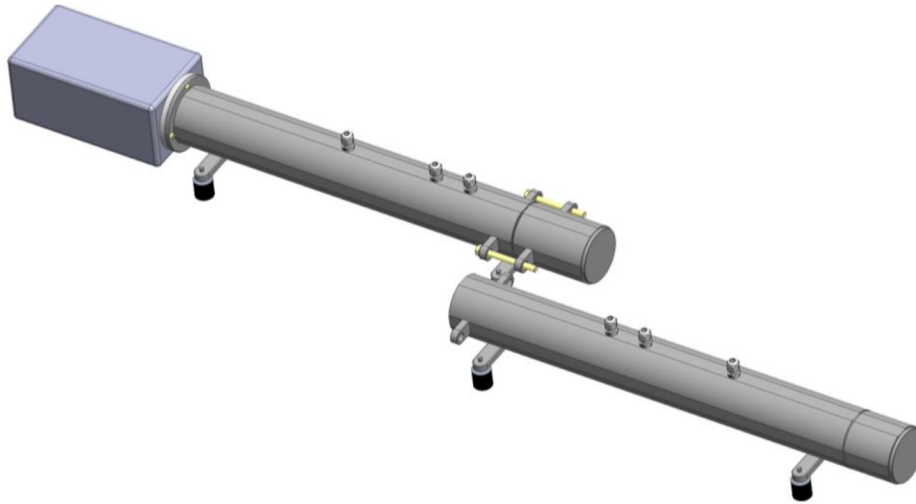
Obrázek 7-3 Detail všech spojů trubice (zleva: reproduktor s trubicí, uchycení měřeného prvku mezi trubicí, a ideálně pohltivé zakončení)



Obrázek 7-4 Pohled na celou impedanční trubicí

7.3.3 Výsledný návrh

Oproti původnímu návrhu došlo ke změně vnitřního průměru (ze 73 na 61,9 mm), a tím vznikla nutnost přepracování všech rozměrů v návrhu, aby trubice více odpovídala profesionální měřicí impedanční trubicí používané u Brüel & Kjær, která má vnitřní průměr 63,5 mm. Byl přidán třetí mikrofon, aby trubice vyhovovala české normě. Upravená trubice funguje v kmitočtovém rozsahu 100 – 3000Hz. Byla přidána dodatečná vrstva materiálu pro uchycení reproduktoru bez narušení struktury trubice. Zvolený reproduktor je dvou a půl palcový Dayton PC68-8.



Obrázek 7-5 Návrh impedanční trubice

7.4 Optimalizace impedanční trubice před výrobou

Po obeznámením s rozpočtem projektu a během vyjednávání s výrobcem o neoptimálnějším konstrukčním řešení, bylo provedeno několik závěrečných úprav pro nutné snížení složitosti a ceny výrobku.

První je změna výrobního materiálu na konstrukční ocel. S touto změnou se změnily i rozměry trubice, protože nebyla dostupná žádná ocelová trubice stejných rozměrů jako navrhovaná nerezová. Vnitřní průměr byl změněn na 63,4mm a tloušťka 6,3mm. S těmito změnami byl proveden závěrečný přepočítání všech rozměrů na ty uvedeny v kapitole 7.1.1.

Další byla standardizace dílů. Všechny ocelové díly trubice byly zkonstruovány ze dvou polotovarů. Tyto polotovary byly trubice a 5mm tlustý ocelový plát. Všechny navařené díly na trubici jsou výpalky z tohoto ocelového plátu.

Poslední změna byla změna zakončení trubice pro měření pohltivosti ze systému mnoha misek různých hloubek na jeden posuvný píst.

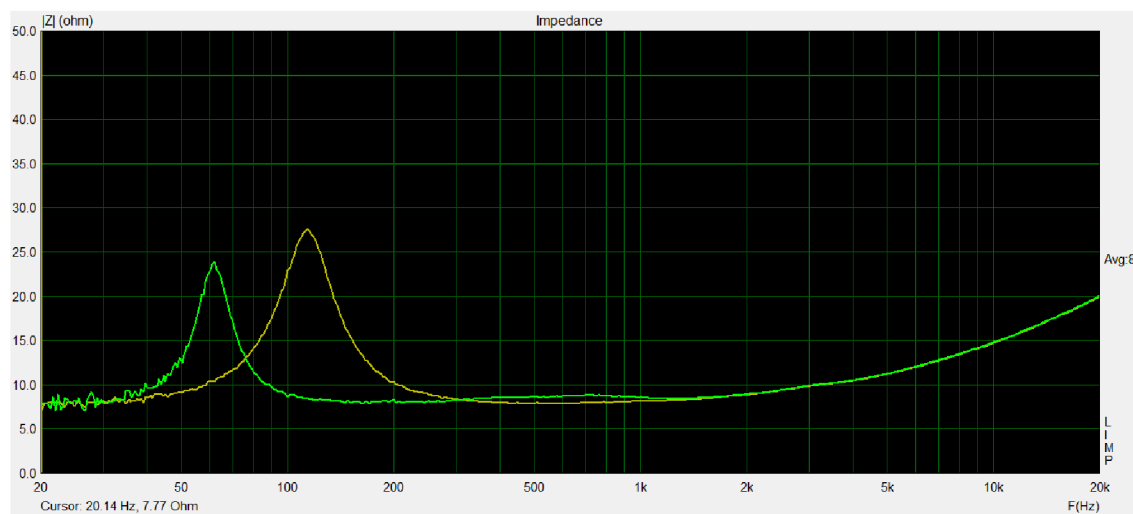
8. REALIZACE IMPEDANČNÍ TRUBICE

8.1 Konstrukce reproduktorové ozvučnice

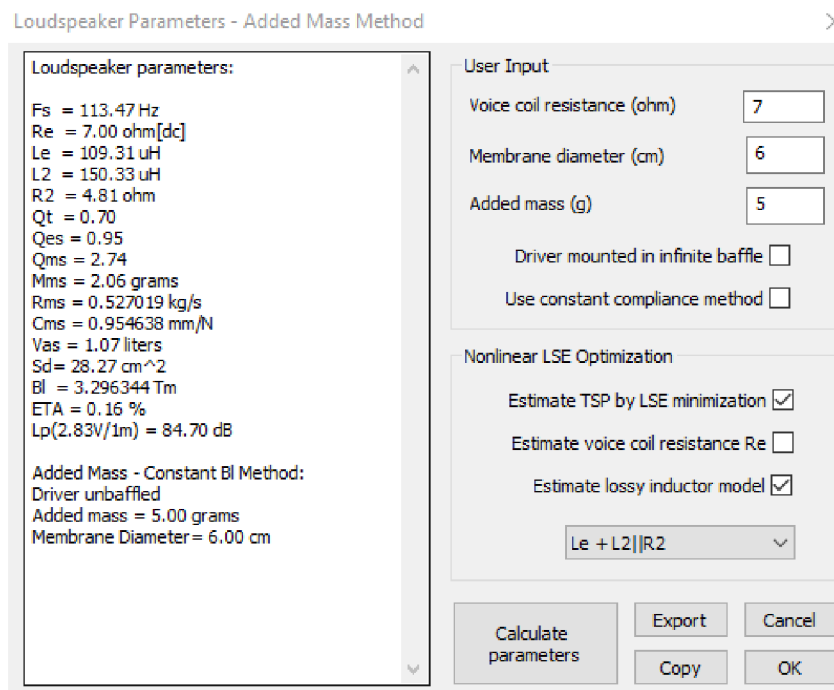
8.1.1 Zjištění vhodného objemu ozvučnice

Pro správné zkonstruování reproduktorové ozvučnice je potřeba prvně znát reálné a přesné vlastnosti měřeného reproduktoru. Nejefektivnější způsob zjištění těchto vlastností je využití existujícího programu určeného pro takové měření.

Měření bylo provedeno pomocí programu Arta. Tento program umožňuje měřit reproduktor pomocí metody přidané hmotnosti, kdy se provádí 2 měření impedanční charakteristiky reproduktoru. Jedno bez zátěže a jedno se závažím přesné známé hodnoty uchyceným na membráně reproduktoru (obrázek 8-1 Impedanční charakteristika reproduktoru Dayton bez závaží (žlutá) a se zatížením). Z těchto charakteristik program vypočítá Thiele/Small parametry. Hodnota, která je důležitá pro zkonstruování reproduktorové ozvučnice je V_{as} . Tato hodnota určuje optimální objem ozvučnice pro daný reproduktor.



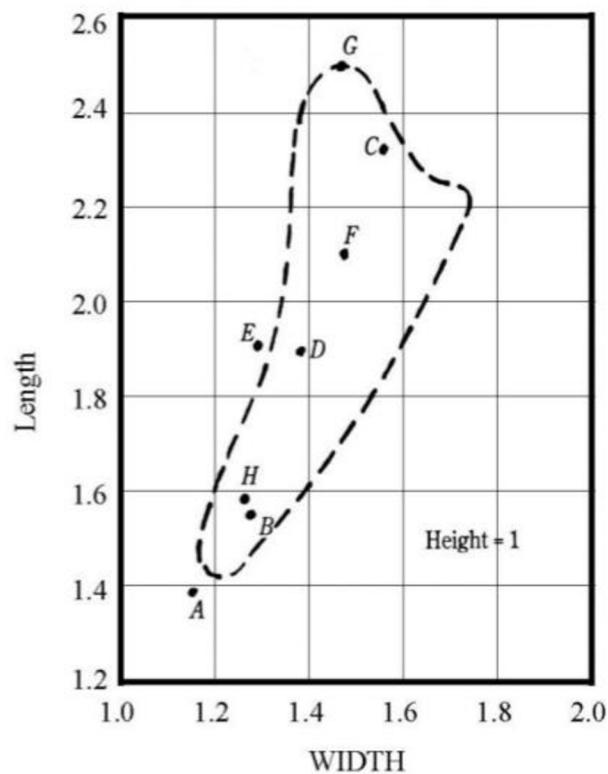
Obrázek 8-1 Impedanční charakteristika reproduktoru Dayton bez závaží (žlutá) a se zatížením pěti gramy (zelená)



Obrázek 8-2 Měřené hodnoty

8.1.2 Určení rozměrů ozvučnice

Po zjištění vhodného vnitřního objemu reproduktorové ozvučnice byly vypočítány vnitřní rozměry ozvučnice. Tyto rozměry byly vybrány v poměru dle Sepmeyera 1:1,28:1,54. Tento poměr stran je vhodný pro minimalizaci vlastních kmitů v uzavřeném prostoru. Z tohoto poměru byly určeny vnitřní rozměry ozvučnice 84x108x129[mm]. Celá ozvučnice byla zkonstruována z 9mm tlusté sedmivrstvé břízové překližky. V obrázku 8-3 Boltova oblast s bodově vyznačenými vhodnými poměry stran 61 je tento poměr v bodě B.



Obrázek 8-3 Boltova oblast s bodově vyznačenými vhodnými poměry stran 61

8.2 Uchycení reproduktoru k impedanční trubici

Uchycení reproduktoru musí splňovat dva účely. Musí to být vzduchotěsný rozebíratelný spoj a musí adaptovat uchycení reproduktoru, aby neinterferoval s tělem impedanční trubice. Řešením bylo vytvořením 8mm silné hliníkové příruby s osmi otvory. Čtyři zapuštěné pro uchycení reproduktoru a ozvučnice a 4 závitové pro uchycení trubice. Řešení za pomoci této příruby také poskytuje určitou úroveň modularity. V případě potřeby použití jiného reproduktoru, tak se nemusí vytvářet nová trubice, ale jen nová příruba.



Obrázek 8-4 Pohled na uchycení příruby a reproduktoru

8.3 Vlastnosti vnitřního povrchu impedanční trubice

8.3.1 Nerovnosti způsobené hrubostí

Ocelová bezešvá trubice, ze které je laboratorní přípravek vyroben není zevnitř dokonale hladká. Hrubost povrchu se pohybuje v řádu desetin milimetru. Tato hrubost je běžná a disponuje jí každá trubice pro průmyslové využití. Je to způsobeno technologií výroby. Společně s velice specifickými požadavky na rozměry trubice by bylo značně drahé a složité získat trubku s ideální hrubostí vnitřního povrchu.



Obrázek 8-5 Detail na hrubost povrchu trubice

8.3.2 Nerovnosti způsobené mikrofony

Pro měření akustických vlastností materiálů musely být do trubice vyvrtány otvory pro měřicí mikrofony a pro systémy jejich uchycení. Jako nejvhodnější řešení vzduchotěsného uchycení mikrofonu do impedanční trubice byly vybrány kabelové vývodky. Jsou vešroubovány do trubice závitem M16 a závit je seříznut a zabroušen na ideální délku, aby vývodky vytvářely minimální nerovnosti uvnitř trubice.

Měření je provedeno jedním mikrofonem, který je umístěn postupně do všech vývodek, které jsou na trubici. Pro uchování vzduchové těsnosti přípravku musely být vytvořeny i 3D tisknuté „zátky“, které vyplní pozice, kde není mikrofon. Tyto zátky jsou přesné délky, aby jejich dolní plocha lícovala se spodkem kabelové vývodky. Tyto zátky jsou zakončeny dvěma rozšířeními. Jedno slouží pro konzistentní umístění v trubici a druhé pro jednoduché vyjmutí.



Obrázek 8-6 Detail na kabelové vývodky a zátky

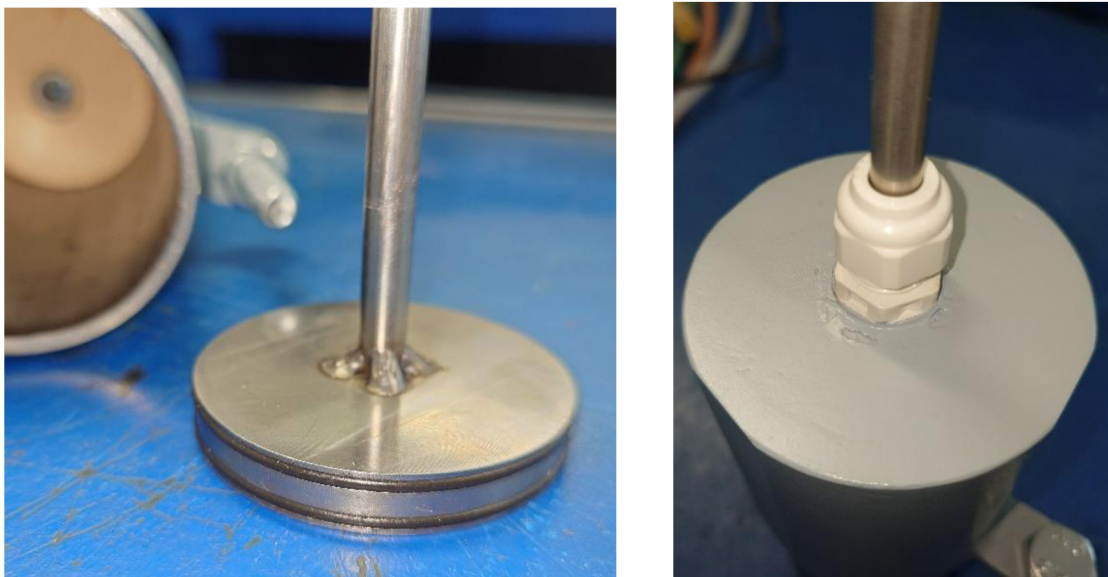
Konzistentní hloubka uchycení mikrofonu je zajištěno pomocí smršťovací bužírky, která je uchycena na mikrofonu.



Obrázek 8-7 Systém pro konzistentní zapaštění mikrofonu do trubice

8.4 Konstrukce pístu pro měření zvukové pohltivosti

Pro zajištění stejného objemu uvnitř trubice během měření zvukové pohltivosti bylo zkonstruováno posuvné pístové zakončení. Válec, ve kterém je píst umístěn je vyroben ze stejného polotovaru jako ostatní části impedanční trubice. Do pístu je vyvrtán otvor, do kterého byla nalisována 8mm hlazená ocelová tyč a zavařena. Tato tyč je souosá s trubicí a slouží k posuvu pístu. Tyč je v zadní části trubice středěná kabelovou vývodkou vlepenou do dřevěného zakončení, které též bylo vlisováno a vlepeno do trubice. Samotný píst je vyroben z 10mm tlusté oceli se zapuštěním o hloubce 1,5mm pro 2mm tlusté těsnění. Toto těsnění pomáhá proti odírání dvou ocelových částí o sebe a zamezuje zadírání.



Obrázek 8-8 Detail provedení pístového zakončení

Spojení pístového zakončení se zbytkem impedanční trubice je uděláno obrobením vnějšího průměru identicky, jako u měření průzvučnosti.



Obrázek 8-9 Náhled na pístové zakončení pro měření červené plstě

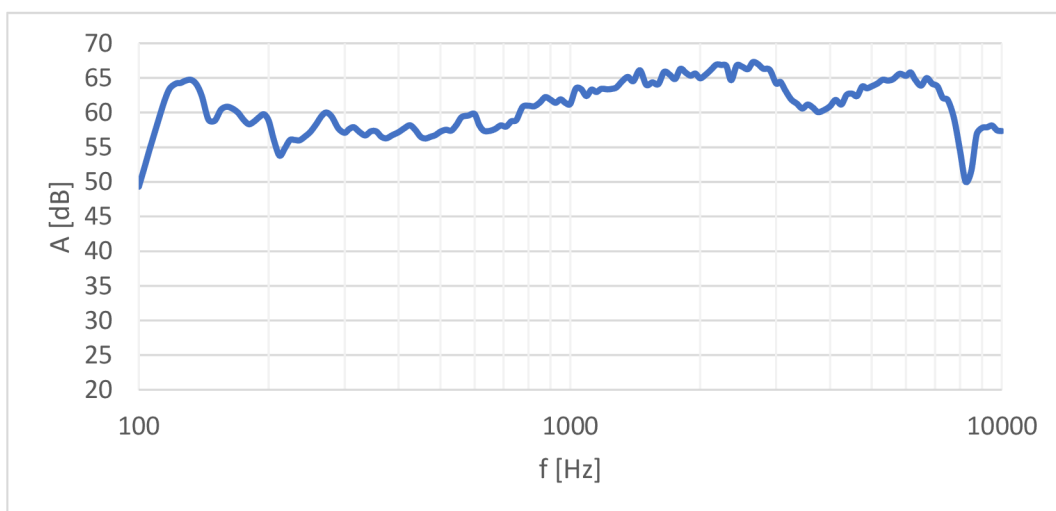
9. MĚŘENÍ ELEKTROAKUSTICKÉHO ŘETĚZCE

9.1 Kmitočtová charakteristika reproduktoru v ozvučnici

Pro přesnost měření v impedanční trubici je nutné znát modulovou kmitočtovou charakteristiku měřeného reproduktoru pro případné kompenzování. Byly provedeny dvě měření v bezdozvukové komoře. Jedno standardní z jednoho metru a jedno v blízkém poli. Reprodukter je umístěn uprostřed ozvučnice a s hliníkovou přírubou jako na obrázku 8-4

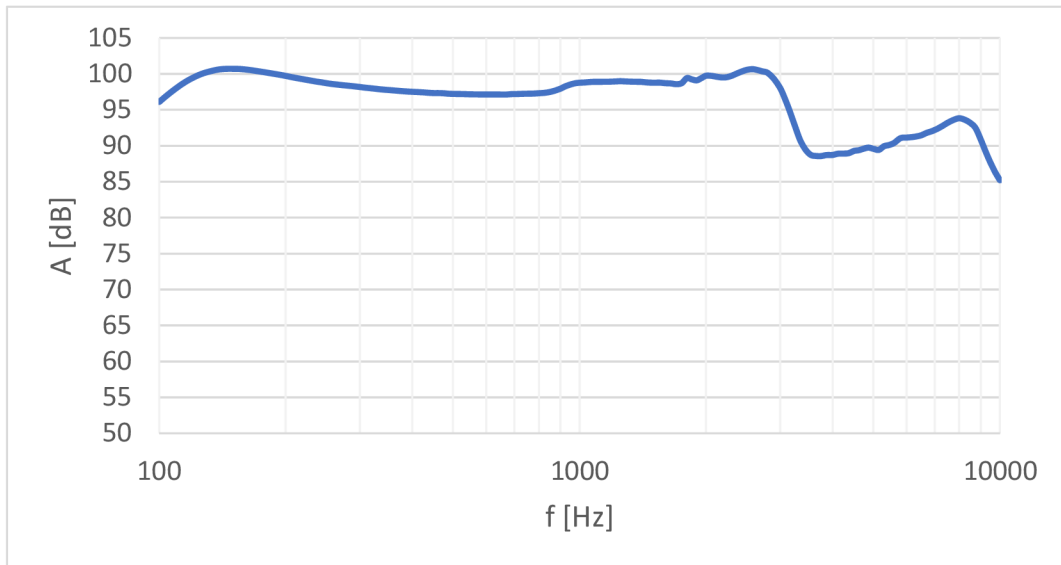
Měření reproduktoru z jednoho metru je standardní pro většinu využití. Z této charakteristiky vidíme klasický pokles citlivosti o zhruba 6 dB na kmitočtech pod 1000 Hz. Jedná se pravděpodobně o jev známý jako „Baffle step“, kdy reproduktor začíná vyzařovat všesměrově a nejen dopředu. Kmitočet tohoto jevu je závislý na fyzických rozměrech reproduktorové ozvučnice. Společně s výrazným zvlněním způsobeným difrakcemi od ostrých hran ozvučnice a hliníkového nástavce, není měření z jednoho metru ideální.

Pro eliminaci rušivých interferencí způsobených vnější konstrukcí ozvučnice je reproduktor přeměřen v blízkém poli. Během měření v blízkém poli je mikrofon umístěn v ose reproduktoru co nejbližše membráně, bez toho, aniž by se kapsle mikrofonu dotkla membrány během měření. Toto měření dokáže odstranit většinu parazitních vlastností způsobených vnějším reproduktorové ozvučnice. Během tohoto měření vidíme značně rovnější modulovou kmitočtovou charakteristiku. Je patrné, že modulová kmitočtová charakteristika reproduktoru v rozsahu 100 – 3000 Hz, ve kterých je měření provedeno je relativně vyrovnaná. Z kmitočtové charakteristiky mezi 100 až 200 Hz je patrné, že zkonstruovaná ozvučnice je o něco menší, než by bylo ideální pro měřený reproduktor.



Obrázek 9-1 Modulová kmitočtová charakteristika reproduktoru z jednoho

metru



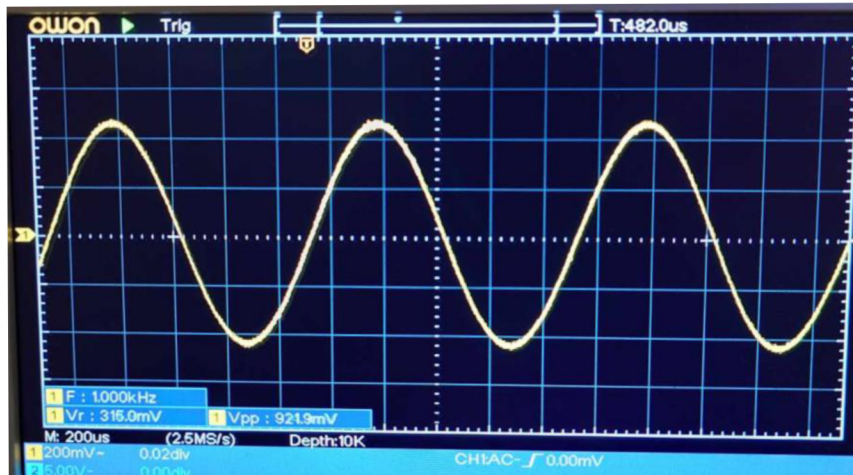
Obrázek 9-2 Modulová kmitočtová charakteristika reproduktoru v blízkém poli

9.2 Měřené vlastnosti zesilovače

Měřená vstupní impedance zesilovače v optimálním nastavení pro měření je 90kohm. Dále bylo provedeno měření vstupního a výstupního napětí zesilovače během hraničního vybudování. Z hodnot těchto měření je poté možné spočítat výstupní výkon a zesílení. Měření bylo prováděno sinusovým signálem o kmitočtu 1kHz.



Obrázek 9-3 Signál na výstupu zesilovače



Obrázek 9-4 Signál na vstupu zesilovače

Z měřených napětí na výstupu U_2 a vstupu U_1 a zátěže $Z = 6\Omega$ na výstupu zesilovače je poté vypočítán výstupní výkon P dle vztahu

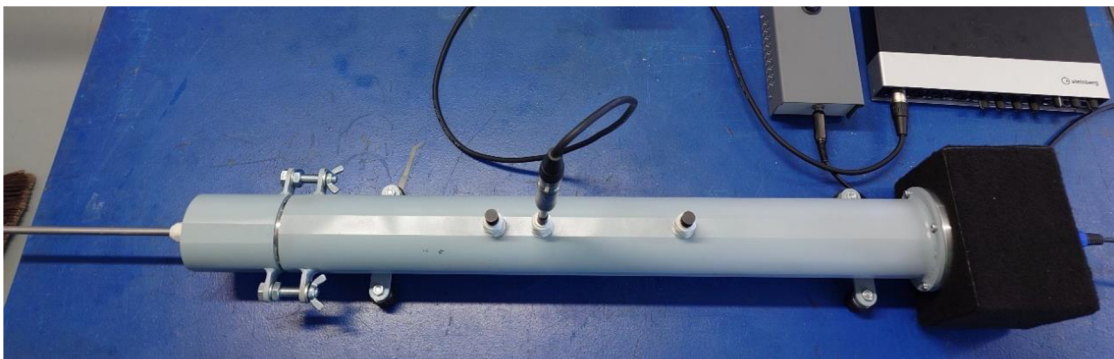
$$P = \frac{U_2^2}{Z} = \frac{5,072^2}{6} = 4,288W \quad (9.1)$$

a úroveň zesílení A ze vztahu

$$A = 20 * \log \frac{U_2}{U_1} = 20 * \log \frac{5,072}{0,315} = 24,1dB \quad (9.2)$$

10. MĚŘENÍ ČINITELE ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI

Pro měření činitele zvukové pohltivosti metodou přenosové funkce je potřebné získat tlaková data na dvou různých pozicích mikrofону. Měřená impedanční trubice má tři mikrofonní pozice, za účelem pokrytí širšího kmitočtového spektra. Funkčně se jedná o dva mikrofonní páry, které mají jeden společný mikrofon pro obě měření. Každý pár měří jinou část kmitočtového spektra a během grafického znázornění jsou obě charakteristiky vykresleny. Mikrofon je postupně umístěn do všech tří pozic. Všechny měřené signály jsou následně zpracovány programem vytvořený v rozhraní Matlab. Tento program je vyvíjen jako další diplomová práce studentem Jindřichem Kovandou, která byla zpracována společně s touto.



Obrázek 10-1 Uspořádání pro měření činitele zvukové pohltivosti

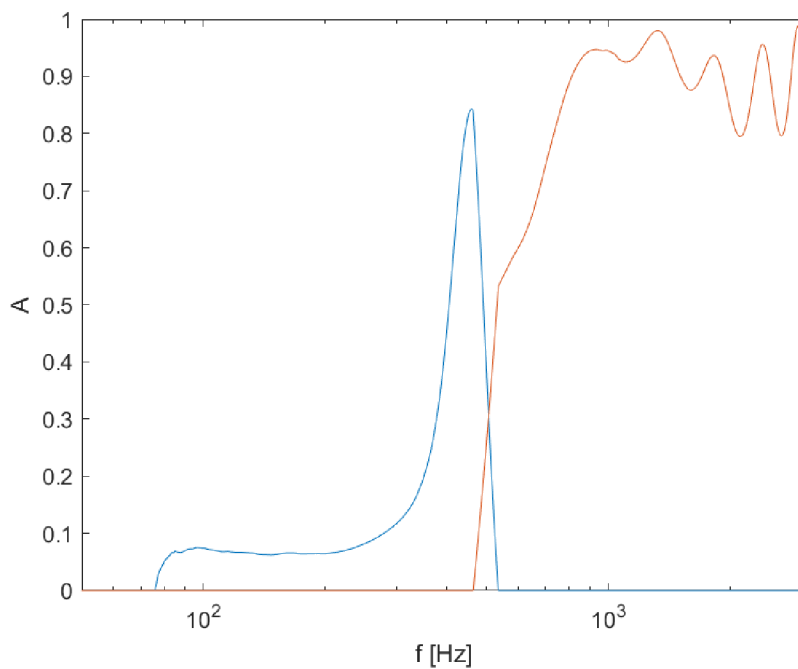
10.1 Vliv pístu na měřené výsledky pohltivosti

Píst zajišťuje, aby během každého měření na impedanční trubici byl stejný objem bez ohledu na tloušťku měřeného materiálu. Měřicí program byl vytvořen s možností kompenzace různých rozměrů trubice. Měření bylo prováděno na dvou hraničních pozicích pístu. Pro srovnávací měření je použit kruhový výstřížek pěnových jehlanů o tloušťce 50mm.

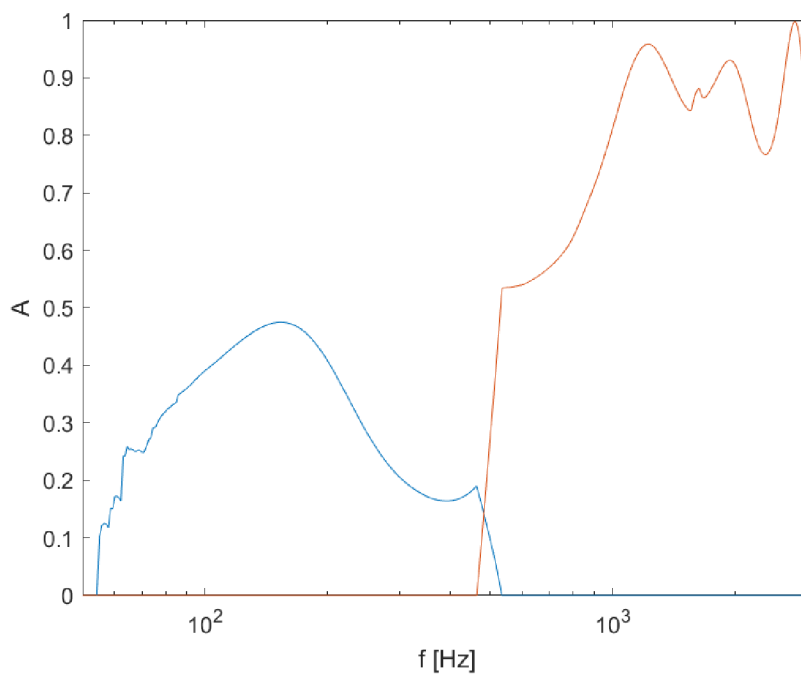
Z grafických znázornění 10-2 Činitel akustické pohltivosti pěnových jehlanů o tloušťce 50mm v nejdálkovéjší pozici (277mm od nejbližšího mikrofónu) a 10-3

Činitel akustické pohltivosti pěnových jehlanů o tloušťce 50mm v nejbližší pozici (170mm od nejbližšího mikrofónu) je patrné, že pozice pístu ovlivňuje pohltivost materiálu na nízkých kmitočtech. Tato zvýšená pohltivost měřeného materiálu je pravděpodobně způsobena netěsnostmi mezi pístem a vnitřní stěnou. Průvzdušná mezera kolem pístu pravděpodobně vytváří z prostoru za pístem basovou past, která navyšuje pohltivost. Nejlepší řešením tohoto problému by bylo přebrousit (ofrézovat) vnitřní stěnu trubice. Tohle řešení je nákladné a technicky obtížné (bylo by

nutné vyrobiť speciální přípravek). Další možností je odzkoušet elastičtější těsnění, které by lépe kopírovalo nerovnosti vnitřní stěny.

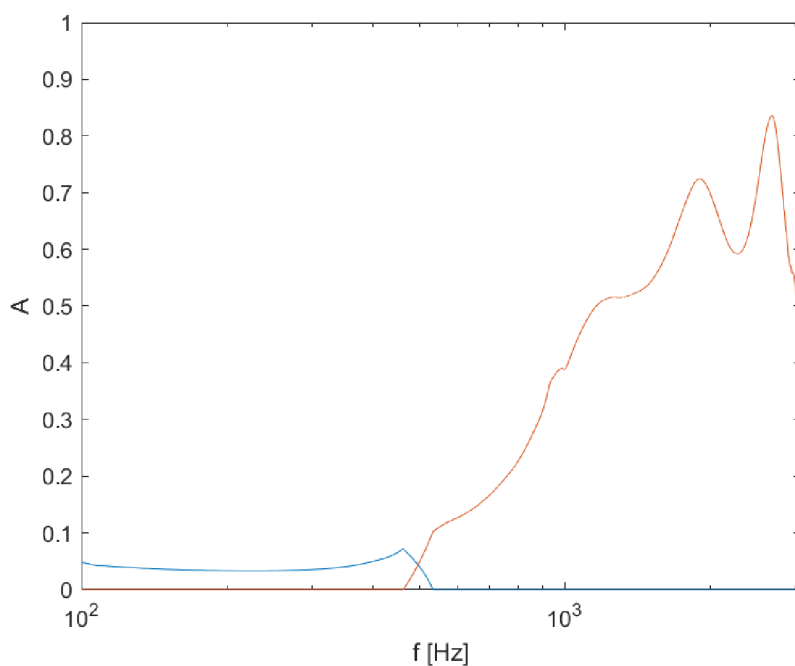


Obrázek 10-2 Činitel akustické pohltivosti pěnových jehlanů o tloušťce 50mm v nejvzdálenější pozici (277mm od nejbližšího mikrofonu)

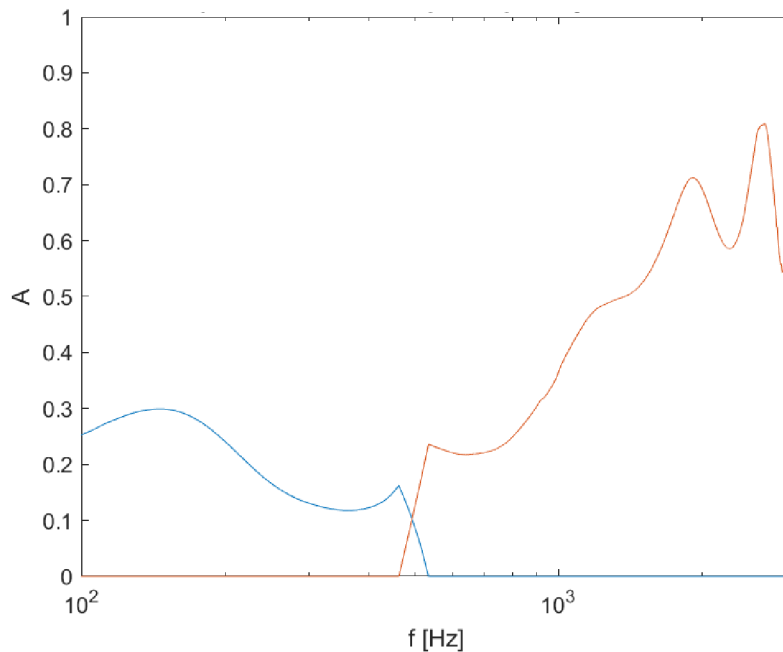


Obrázek 10-3 Činitel akustické pohltivosti pěnových jehlanů o tloušťce 50mm v nejbližší pozici (170mm od nejbližšího mikrofonu)

Dále bylo provedeno kontrolní měření, které porovnává pohltivost materiálu v trubici zakončené vzduchotěsnou miskou s pístem umístěným tak, aby vnitřní rozměry odpovídaly misce. Grafická znázornění 10-4 Činitel akustické pohltivosti 11mm tlusté hudební plsti u pevného zakončení a 10-5 Činitel akustické pohltivosti 11mm tlusté hudební plsti u pístového zakončení potvrzují předpoklady uvedené v kapitole 48. Nejpřesnějších výsledků měření je dosaženo při dokonalém vzduchotěsném zakončení trubice.



Obrázek 10-4 Činitel akustické pohltivosti 11mm tlusté hudební plsti u pevného zakončení



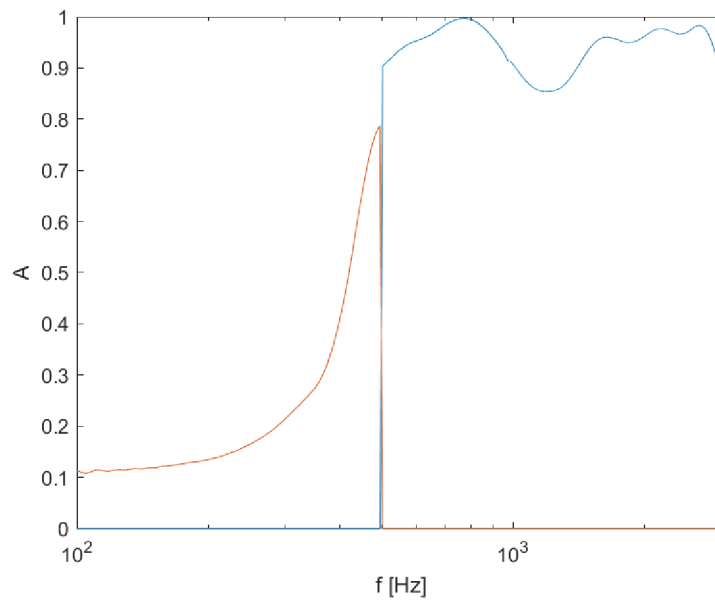
Obrázek 10-5 Činitel akustické pohltivosti 11mm tlusté hudební plsti u pístového zakončení

10.2 Měření pohltivosti hraničních situací

Pro lepší znalost nepřesností impedanční trubice je dobré změřit pohltivost při hraničních situacích, a to ideální pohltivosti a ideální odrazivosti. Toto měření bylo provedeno se vzduchotěsnou miskou.

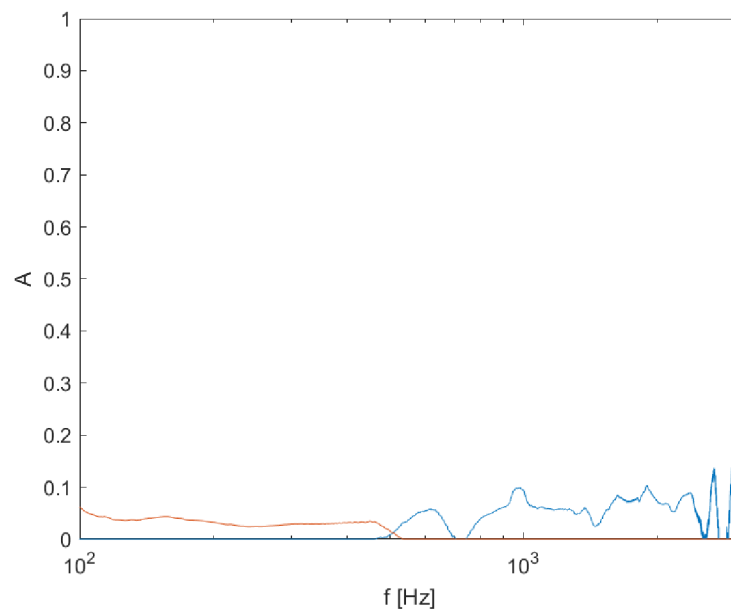
Pro měření ideálně pohltivého materiálu byla použita stejná kombinace materiálu jako u ideálně pohltivého zakončení pro měření průzvučnosti. Tato kombinace činí 30 mm pěny na kterou jsou ještě umístěny 50 mm vysoké jehlany. Z charakteristiky 10-6

Činitel akustické pohltivosti jde vidět, že je zakončení trubice ideálně pohltivé na kmitočtech vyšších než 500Hz, ale nemá dostatečný rozměr na pohlcení kmitočtů nižších.



Obrázek 10-6 Činitel akustické pohltivosti pohltivého zakončení

Pro měření ideální odrazivosti bylo použito samotné ocelové zakončení misky. Výsledná charakteristika činitele akustické pohltivosti charakteristiky 10-7 Činitel akustické pohltivosti bez měřeného materiálu se pohybuje mezi 0 až 0,1. Na kmitočtech nižších 500Hz je možné výsledek přisoudit chybě měření. Na vyšších kmitočtech se mohou přisoudit nerovnostem v trubici. Ocelové zakončení a obvod trubice má určitou úroveň hrubosti a mikrofony a mikrofonní uchycení není dokonale rovné.

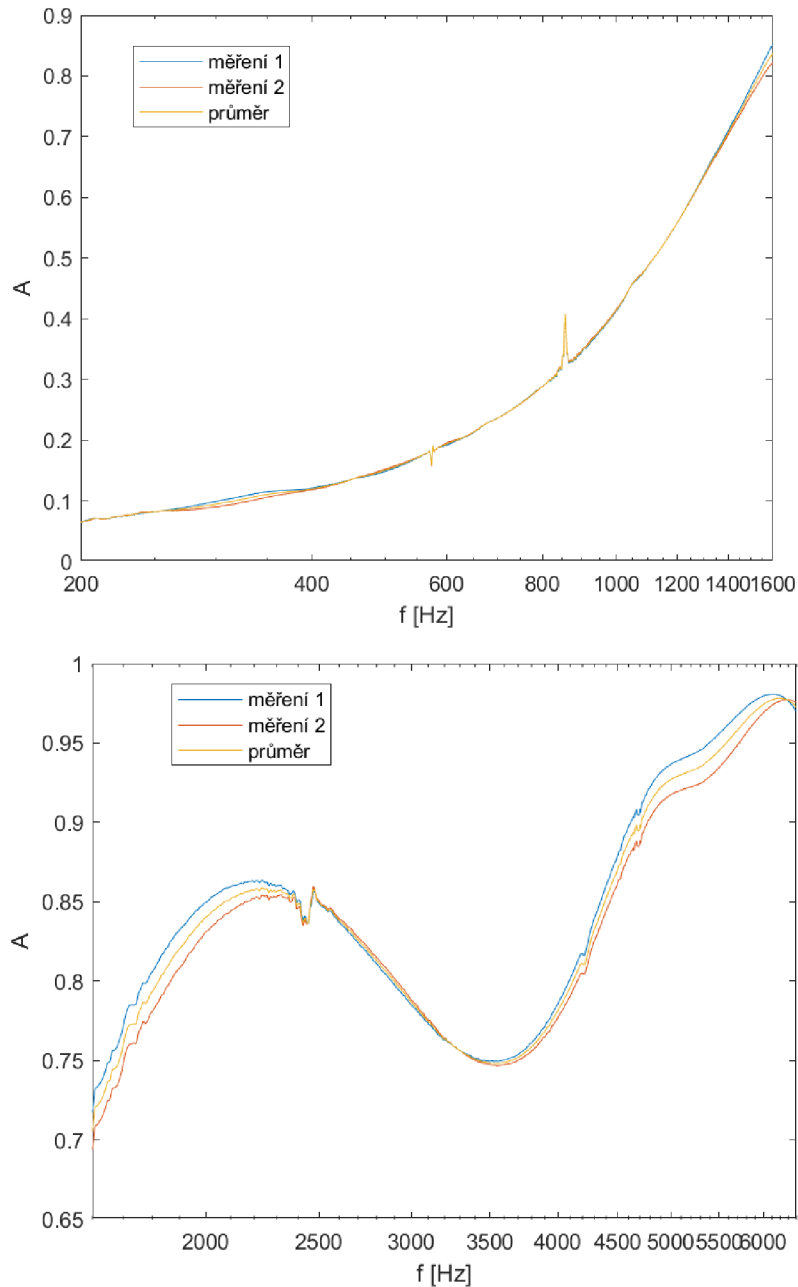


Obrázek 10-7 Činitel akustické pohltivosti bez měřeného materiálu

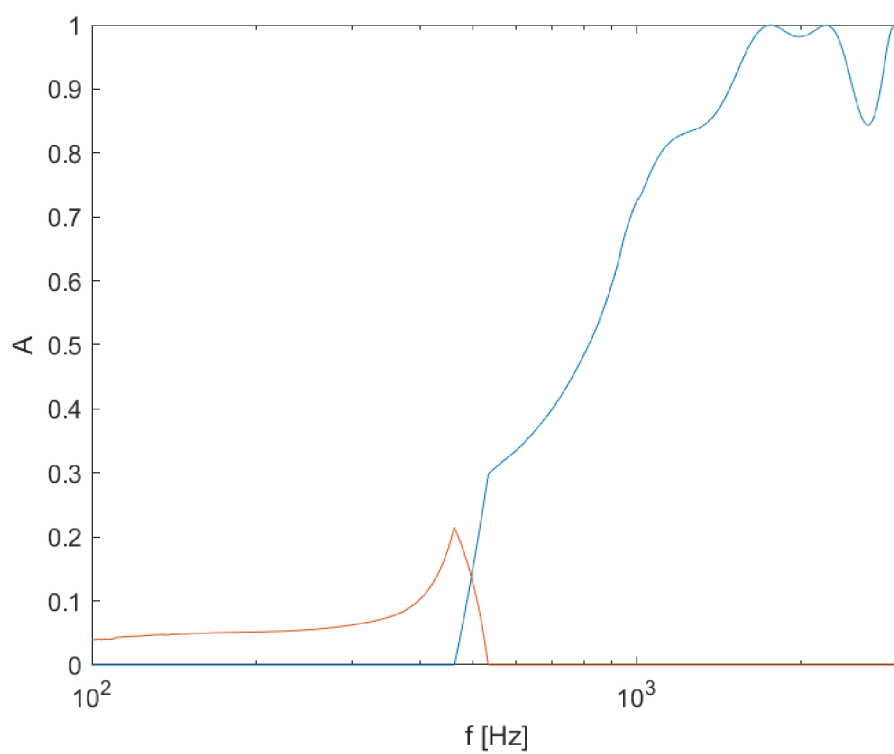
10.3 Srovnání pohltivosti měřených materiálů vůči Brüel & Kjær trubici

Pro zjištění opravdové přesnosti měřených výsledků v impedanční trubici, tak byly měřeny materiály i v impedanční trubici od Brüel & Kjær.

Zkonstruovaná impedanční trubice naměřila podobnou charakteristiku jako trubice od Brüel & Kjær, ale naměřená pohltivost zkonstruované trubice je zhruba o 0,2 vyšší.



Obrázek 10-8 Činitel akustické pohltivosti 30mm tlusté polyuretanové pěny v impedanční trubici od Brüel & Kjær



Obrázek 10-9 Činitel akustické pohltivosti 30mm tlusté polyuretanové pěny ve zkonstruované impedanční trubici

11. MĚŘENÍ VZDUCHOVÉ NEPRŮZVUČNOSTI

Měření vzduchové neprůzvučnosti využívá uchycení měřeného materiálu mezi dvěma trubicemi. Zakončení druhé trubice musí být vzduchotěsné ideálně pohltivé. Neprůzvučnost je logaritmická jednotka závislá na podílu tlaků mezi komorami impedanční trubice. Je značena jako TL a značí kmitočtovou závislost útlumu v druhé komoře oproti první.

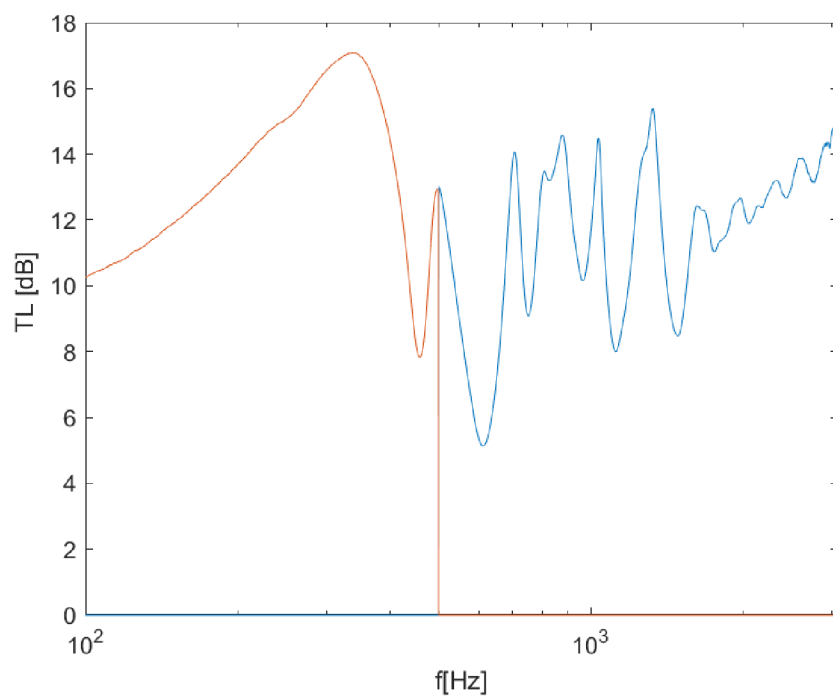


Obrázek 11-1 Trubice sestavena pro měření neprůzvučnosti

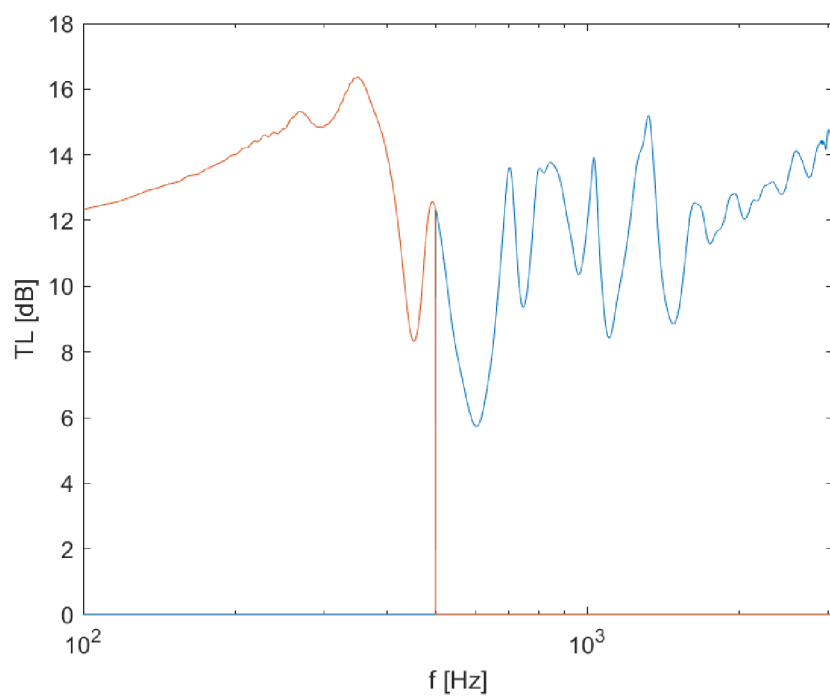
11.1 Závislost výsledků neprůzvučnosti na hlasitosti signálu

Měření je zaměřeno na sledování potenciálních parazitních vlastností trubice na výsledky měření a pro určení vhodné úrovně zesílení v programu. Úroveň zesílení je neměnná v zesilovači a gain na zvukové kartě Steinberg UR44 je uprostřed potenciometru. Jediná změna zesílení se ovládá na koeficientu v měřicím programu, který má rozsah 0 (bez signálu) až 1 (maximální úroveň). Pro srovnávací měření byla použita 30mm tlustá polyesterová pěna. Měření bylo provedeno na hodnotách 0,05 a 0,5.

Z průběhů 11-2 Vzduchová neprůzvučnost 30mm tlusté polyesterové pěny s koeficientem zesílení na 0,05 a 11-3 Vzduchová neprůzvučnost 30mm tlusté polyesterové pěny s koeficientem zesílení na 0,5 lze vidět, že se kmitočtová charakteristika útlumu mění pouze na nižších kmitočtech. Pohltivost měřeného materiálu na nižších kmitočtech vzrostla až o 2 dB a navýšením výkonu na desetinásobek. Vzhledem k tomu, že měření nebylo provedeno s ideálně pohltivým zakončením, je výsledkům na nižších kmitočtech těžké posuzovat příčinu tohoto nárůstu.



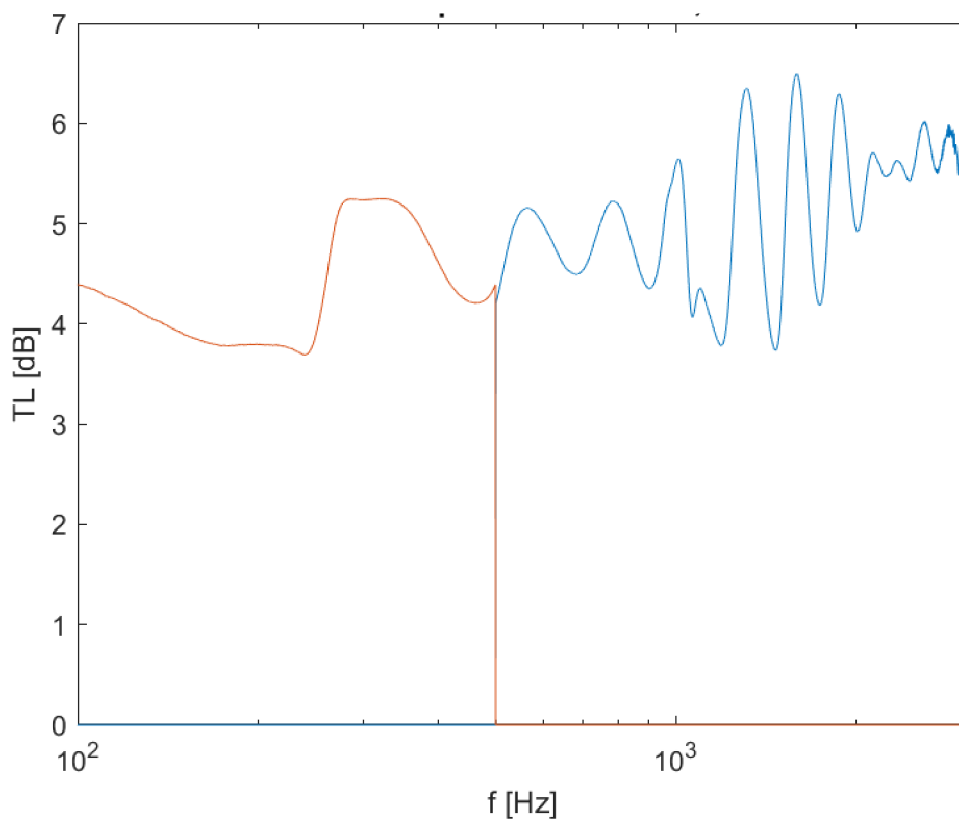
Obrázek 11-2 Vzduchová neprůzvučnost 30mm tlusté polyesterové pěny s koeficientem zesílení na 0,05



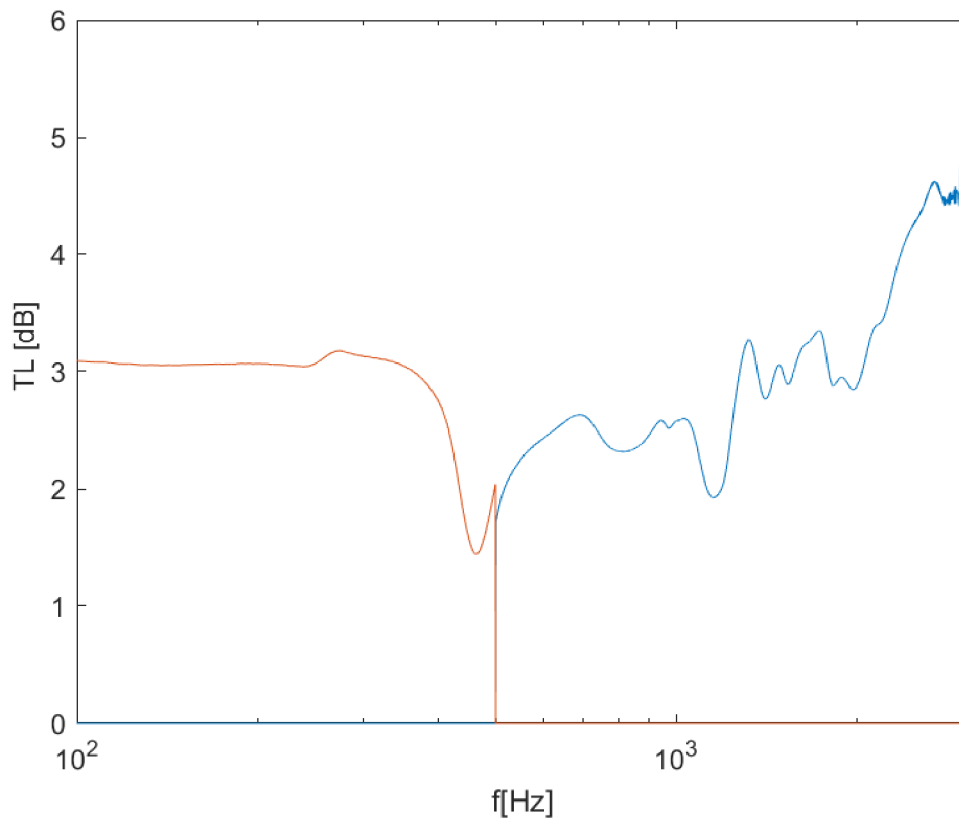
Obrázek 11-3 Vzduchová neprůzvučnost 30mm tlusté polyesterové pěny s koeficientem zesílení na 0,5

11.2 Měřené průběhy pro neprůzvučnost

Z grafických znázornění v předchozí kapitole společně s 11-4 Vzduchová neprůzvučnost 20 mm tlusté polyesterové pěny a 11-5 Vzduchová neprůzvučnost 3mm tlusté textílie je patrné, že měřené průběhy kmitočtové závislosti vzduchové průzvučnosti odpovídají realitě pouze přibližně. Na vyšších kmitočtech lze vidět očekávaný nárůst pohltivosti společně s rostoucím kmitočtem, ale průběh je výrazně zvlněn. Důvod pro toto zvlnění je pravděpodobně kombinace vlastností měřeného materiálu a stojatého vlnění uvnitř trubice. Toto zvlnění je viditelné i u měření pohltivosti, ale protože se nepracuje s výrazným útlumem, tak poněkud méně výrazné, což je také patrné při porovnání charakteristik 11-4 Vzduchová neprůzvučnost 20 mm tlusté polyesterové pěny a 11-5 Vzduchová neprůzvučnost 3mm tlusté textílie. Další bod nepřesnosti je nerealisticky vysoká pohltivost na nízkých kmitočtech. Ta je pravděpodobně nejvíce způsobená nedostatečně pohltivým zakončením, jak je možno pozorovat na charakteristice 10-6 Činitel akustické pohltivosti pohltivého zakončení. Pro napravení tohoto rozdílu bude potřeba použít materiál s mnohem větší pohltivostí, například jehlan z bezdozvukové komory.

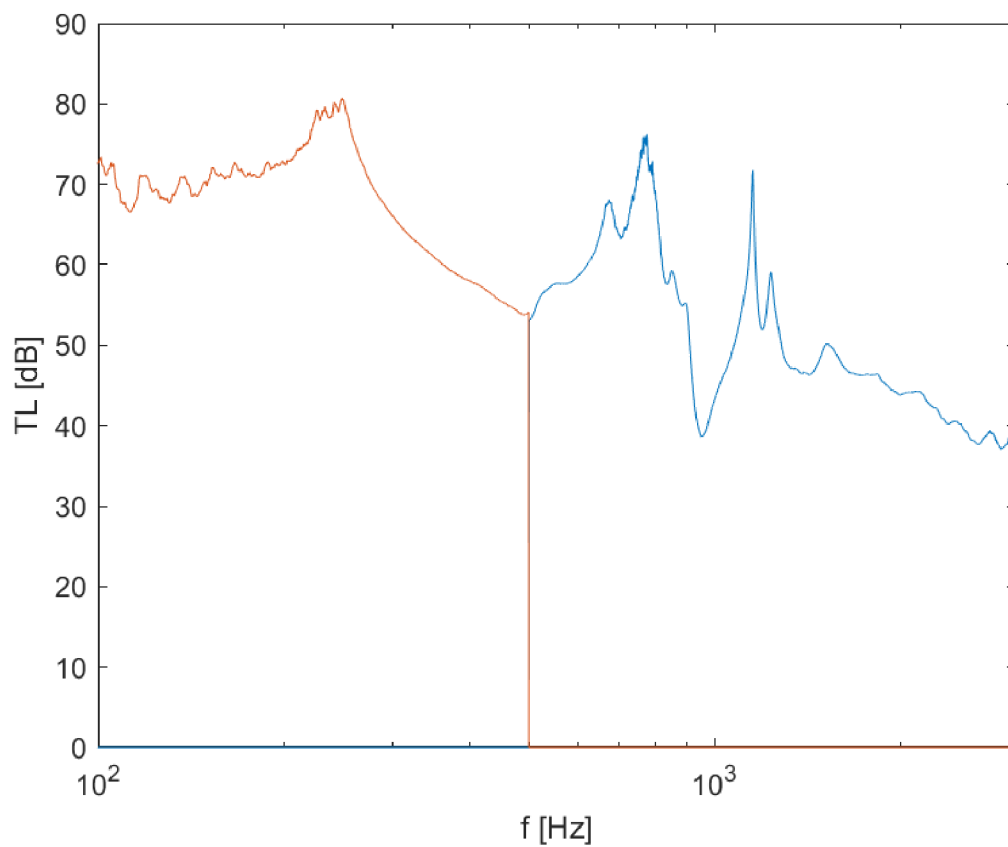


Obrázek 11-4 Vzduchová neprůzvučnost 20 mm tlusté polyesterové pěny



Obrázek 11-5 Vzduchová neprůzvučnost 3mm tlusté textilie

Zhotovená trubice má teoreticky schopnost měřit i neprůvzdušné tvrdé materiály. Výsledky však nikdy nemůžou být brány jako plně relevantní, protože jediný způsob, jak tyto materiály propouští zvuk přímo, je vlastní rezonancí. Tato rezonance je uchycením v trubici prakticky eliminována. Výsledky z těchto měření mohou spíše pomoci nahlédnout na potenciální vnitřní rezonance, parazitní vlastnosti trubice, nebo průduchy ve spoji. Z obrázku 11-6 Vzduchová neprůzvučnost 9mm tlusté překližky jde vidět, že trubice těsní správně s útlumem 70dB na nízkých kmitočtech, poté se jeví nějaké rezonance způsobené uchycením materiálem mezi kmitočty 500 až 1200 Hz.



Obrázek 11-6 Vzduchová neprůzvučnost 9mm tlusté překližky

12. ZÁVĚR

V rámci diplomové práce byl úspěšně proveden návrh a zkonstruování všech mechanických i elektrických částí Impedanční trubice podle zadání. Za pomoci strojírenského 3D CAD programu SOLIDWORKS byl zpracován detailní model a výkresová dokumentace navrhované impedanční trubice. Výsledná konstrukce impedanční trubice vyhovuje oběma normám ČSN ISO 10534-2 a E2611-19. Dokumentace byla konzultována a předána výrobní firmě a trubice úspěšně zhotovena. Byly provedeny dokončovací práce: byl vyčištěn a vyleštěn vnitřní prostor trubice, dokončeny povrchové úpravy, vypočítána a zhotovena ozvučnice reproduktoru včetně povrchové úpravy, sestavení trubice a ověření její funkčnosti, odzkoušeny požadované postupy měření, porovnání trubice s jiným zařízením.

Impedanční trubice je zkonstruována z tažené bežešvé konstrukční oceli. Všechny části impedanční trubice jsou svařeny a hotové svařence jsou spojovány pomocí šroubů. Konstrukce je navržena a provedena s důrazem na vzduchotěsnost a vysokou tuhost systému pro maximální eliminaci tlakových úniků, či rezonancí. Impedanční trubice je umístěna na silentblocích, aby byly eliminovány přenosy vibrací mezi trubicí a okolím. Trubice je navržena pro velký rozsah rozměrů měřených materiálů, jak pro pohltivost (do 120mm), tak i průzvučnost (do 50mm). Výsledky měření v impedanční trubicí vychází relativně správně, ale při porovnání s trubicí od Brüel&Kjær výsledky disponují určitou, malou úrovní zkreslení.

Závěrem je možné říci, že trubice je použitelná pro všechna běžná měření. Zhotovená impedanční trubice má všechny předpoklady pro úspěšné a dostatečně přesné měření. Nalezené odchylky nejsou závažné a trubice je funkční a může sloužit k účelu, ke kterému byla zhotovena.

LITERATURA

- [1] TOMAN, Kamil. *Reproduktory a reprosoustavy II.* [Česko: s.n.], c2010. ISBN 978-80-254-9510-0.
- [2] LUKEŠ, Jaroslav. *Věrný zvuk: Určeno pro prac. v nízkofrekvenční elektrotechn. a radioamatéry.* Praha: SNTL, 1962. Řada elektrotechnické literatury.
- [3] BINKO, Jaroslav a Ivan KAŠPAR. *Fyzika stavebního inženýra: vysokoškolská učebnice pro stavební fakulty.* Praha: SNTL, 1983.
- [4] HORÁK, Zdeněk a František KRUPKA. *Fyzika: příručka pro vysoké školy technického směru. 2., přeprac. vyd.* Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1976. Řada teoretické literatury.
- [5] SELF, Douglas. *Audio power amplifier design. Sixth edition.* New York: Focal Press, Taylor & Francis Group, 2013. ISBN 978-0-240-52613-3
- [6] KUBÁNEK, David. *Základní principy nízkofrekvenčních zařízení.* Brno, 2020.
- [7] SCHIMMEL, Jiří. *Měření parametrů akustických prvků.* Brno, 2022.
- [8] SCHIMMEL, Jiří. *Geometrická akustika.* Brno, 2022.
- [9] SCHIMMEL, Jiří. *Akustické reflexní a difúzní prvky.* Brno, 2022.
- [10] SCHIMMEL, Jiří. *Zvuková izolace prostoru.* Brno, 2022.
- [11] https://www.sse-najizdarne.cz/dokumenty/studijni_materialy/ov/uc_text_zesil.pdf
- [12] <https://crinnacle.com/rankings/headphones/>
- [13] BALÍK, Miroslav. *Reproduktorové soustavy: Reproduktory.* Brno, 2020
- [14] Akustický zkrat https://www.researchgate.net/figure/a-Acoustical-short-circuit-and-b-its-prevention-using-a-baffle-translated_fig10_315775979
- [15] ASTM E2611-19: Standard Test Method for Normal Incidence Determination of Porous Material Acoustical Properties Based on the Transfer Matrix Method, 2019-10
- [16] ČSN ISO 10534-1 (730501) Akustika – Určování činitele zvukové pohltivosti a akustické impedance v impedančních trubcích – Část 1: Metoda poměru stojaté vlny 1999-01
- [17] ČSN ISO 10534-2 (730501): Akustika – Určování činitele zvukové pohltivosti a akustické impedance v impedančních trubcích – Část 2: Metoda přenosové funkce, 2000-04
- [18] <https://www.bksv.com/en/transducers/acoustic/acoustic-material-testing-kits/transmission-loss-and-impedance-tube-kits-4206>
- [19] <https://mynewmicrophone.com/what-is-a-mems-micro-electro-mechanical-systems-microphone/>
- [20] ROŠKA, Adam. *Impedanční trubice pro měření činitele zvukové pohltivosti.* Brno, 2022
- [21] <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm1875.pdf?ts=1702410742969>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	Vysoké učení technické v Brně
CAD	Computer aided design (počítačem podporované projektování)

Symboly:

c	rychlost zvuku	(m/s)
f	kmitočet	(Hz)
d	vnitřní průměr	(m)

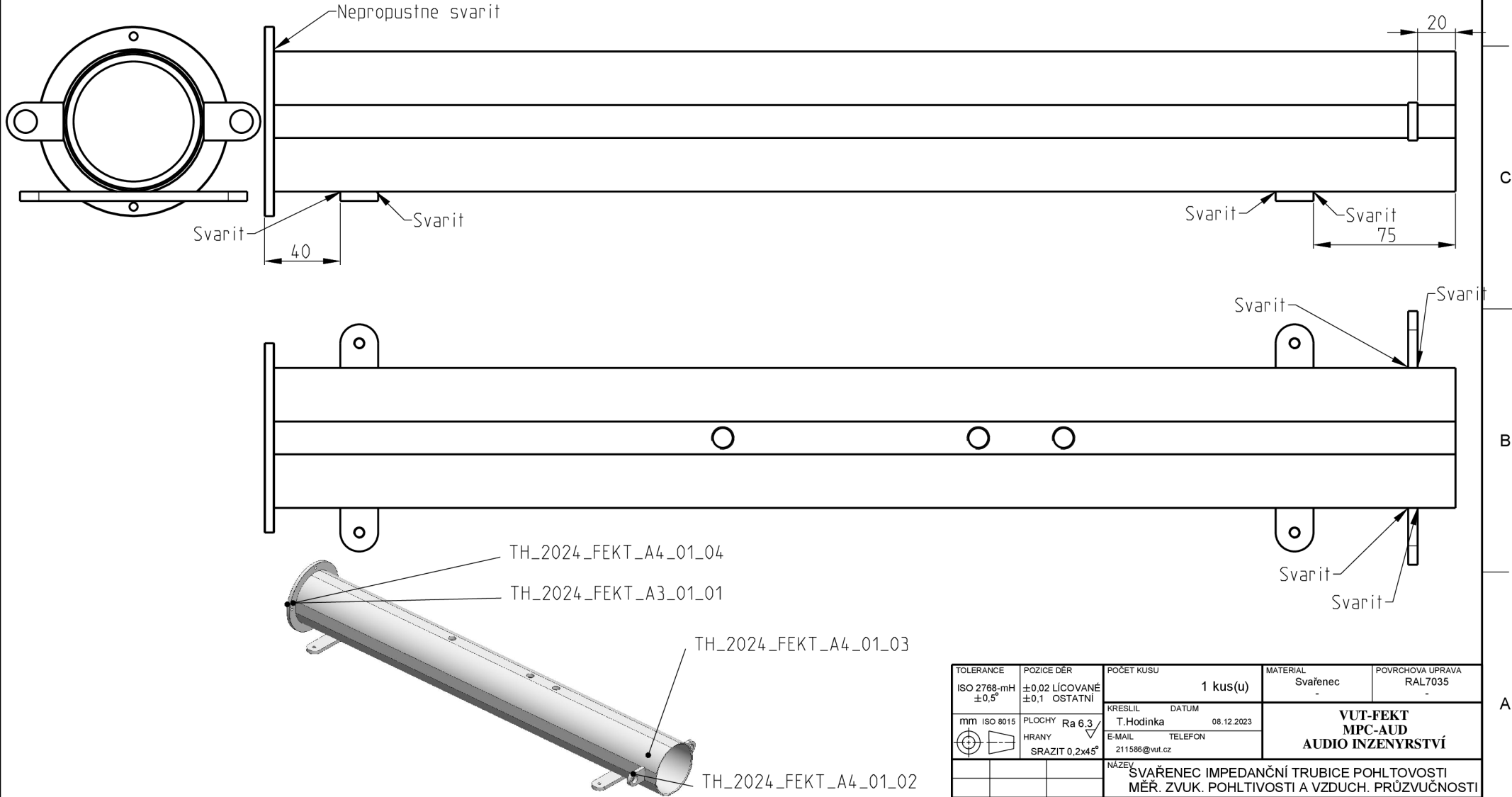
SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A - VÝKRESOVÁ DOKUMENTACE SVAŘENCŮ	64
PŘÍLOHA B - VÝKRESOVÁ DOKUMENTACE DÍLŮ	65

Příloha A - Výkresová dokumentace svařenců

- A.1 Výkres svařence trubky pro měření pohltivosti**
- A.2 Výkres svařence miskového zakončení**
- A.3 Výkres svařence trubky pro měření průzvučnosti**
- A.4 Výkres svařence válce pro pístové zakončení**

QTY	DESCRIPTION	PART NUMBER	MATERIAL	HEAT. TREAT / NOTE
1	TRUBKA IMPEDANČNÍ POHLTIVOSTI	TH_2024_FEKT_A3_01_01	OCEL	-
2	PODPĚRA	TH_2024_FEKT_A4_01_02	OCEL	-
2	STOJAN	TH_2024_FEKT_A4_01_03	OCEL	-
1	PŘÍRUBA	TH_2024_FEKT_A4_01_04	OCEL	-



1:5

TOLERANCE ISO 2768-mH ±0,5°	POZICE DĚR ±0,02 LICOVANÉ ±0,1 OSTATNÍ	POČET KUSU 1 kus(u)	MATERIAL Svařenec	POVRCHOVÁ UPRAVA RAL7035
mm ISO 8015	PLOCHY Ra 6,3 HRANY SRAZIT 0,2x45°	KRESLIL T. Hodinka	DATE 08.12.2023	
E-MAIL 211586@vut.cz		TELEFON		NÁZEV VUT-FEKT MPC-AUD AUDIO INŽENÝRSTVÍ
ČÍSLO VÝKRESU TH_2024_FEKT_A3_01_00				
REV	DÁTUM	UPRAVIL	LIST 1 OF 1	REV A

8

7

6

5

4

3

2

1

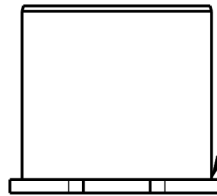
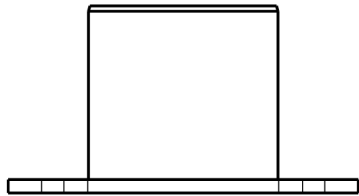
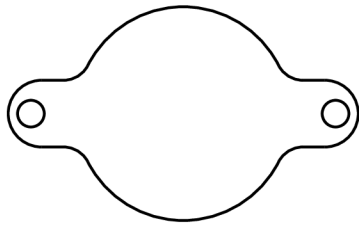
D

C

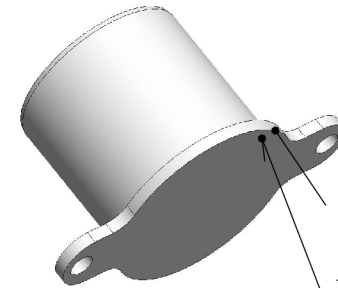
B

A

QTY	DESCRIPTION	PART NUMBER	MATERIAL	HEAT. TREAT / NOTE
1	TRUBKA IMPEDANČNÍ POHLTIVOSTI 1	TH_2024_FEKT_A3_02_01	OCEL	-
1	PŘÍRUBA 2	TH_2024_FEKT_A4_02_02	OCEL	-



Nepropustne svarit

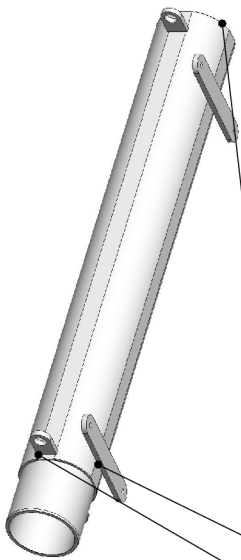
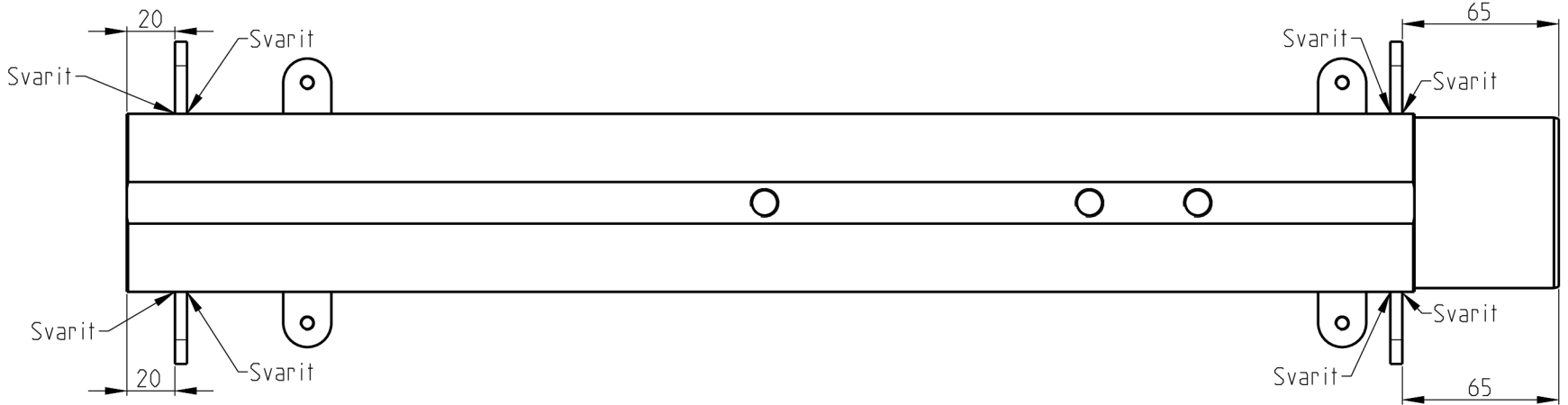
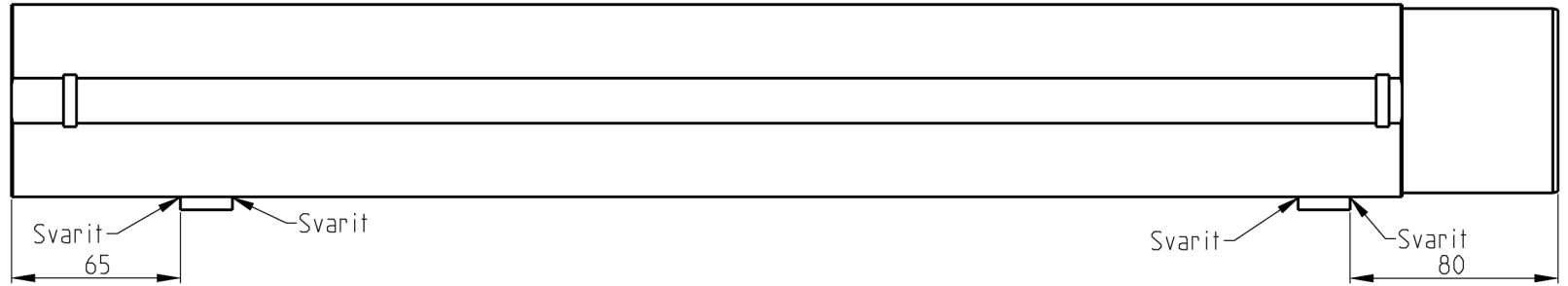
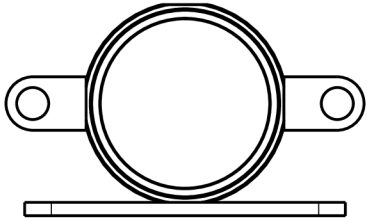


TH_2024_FEKT_A4_02_02

TH_2024_FEKT_A3_02_01

TOLERANCE	POZICE DĚR	POČET KUSU	MATERIAL	POVRCHOVÁ UPRAVA
ISO 2768-mH ±0,5°	±0,02 LICOVANÉ ±0,1 OSTATNÍ	1 kus(u)	Svařenec	RAL7035
mm ISO 8015	PLOCHY Ra 6,3 HRANY SRAZIT 0,2x45°	KRESLIL T. Hodinka DATUM 08.12.2023	VUT-FEKT MPC-AUD AUDIO INŽENYRSTVÍ	
		E-MAIL 211586@vut.cz TELEFON		
		NÁZEV	MÍSKA PRO MĚŘENÍ POHLTIVOSTI MĚŘ. ZVUK. POHLTIVOSTI A VZDUCH. PRŮZVUČNOSTI	
		ČÍSLO VÝKRESU	LIST	REV
REV	DÁTUM	UPRAVIL	TH_2024_FEKT_A3_02_00	1 OF 1 A

QTY	DESCRIPTION	PART NUMBER	MATERIAL	HEAT. TREAT / NOTE
1	TRUBICE PRO MĚŘENÍ PRŮZVUČNOSTI	TH_2024_FEKT_A3_03_01	OCEL	-
4	PODPĚRA	TH_2024_FEKT_A4_01_02	OCEL	-
2	STOJAN	TH_2024_FEKT_A4_01_03	OCEL	-



TH_2024_FEKT_A3_03_01

TH_2024_FEKT_A4_01_03

TH_2024_FEKT_A4_01_02

1:5

TOLERANCE	POZICE DĚR	POČET KUSU	MATERIAL	POVRCHOVA UPRAVA
ISO 2768-mH ±0,5°	±0,02 LICOVANÉ ±0,1 OSTATNÍ	1 kus(u)	Svařenec	RAL7035
mm ISO 8015	PLOCHY Ra 6,3 HRANY SRAZIT 0,2x45°	KRESLIL T. Hodinka	VUT-FEKT MPC-AUD AUDIO INŽENÝRSTVÍ	
		DATUM 13.12.2023		
		E-MAIL 211586@vut.cz		
		TELEFON		
		NÁZEV SVAŘENEC IMPEDANČNÍ TRUBICE PRŮZVUČNOSTI MĚŘ. ZVUK. POHLTIVOSTI A VZDUCH. PRŮZVUČNOSTI		
		ČÍSLO VÝKRESU TH_2024_FEKT_A3_03_00	LIST 1 OF 1	REV A
REV	DÁTUM	UPRAVIL		

8

7

6

5

4

3

2

1

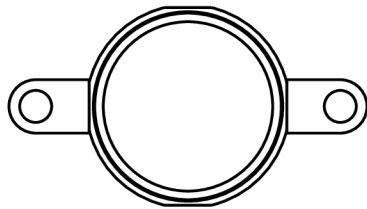
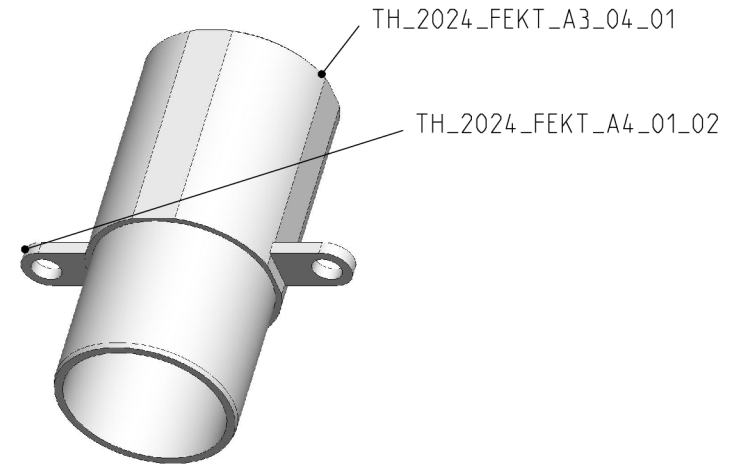
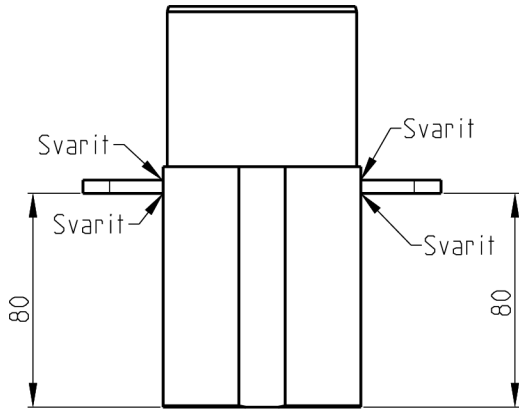
D

C

B

A

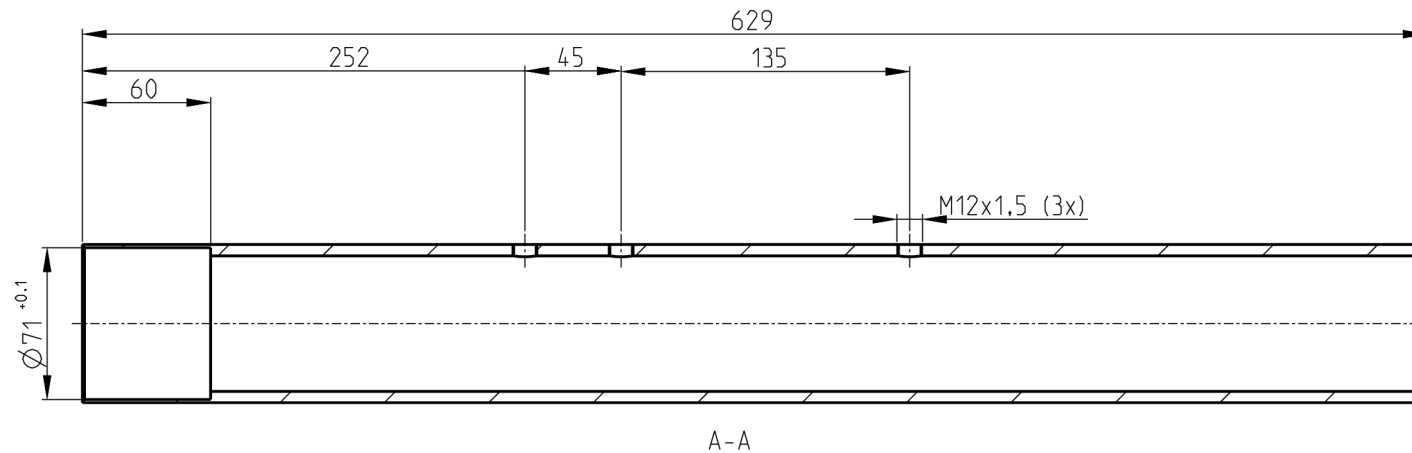
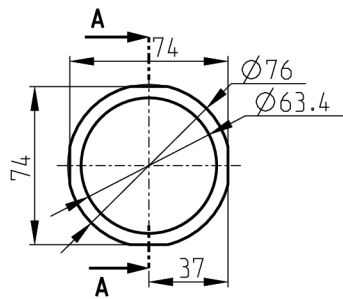
QTY	DESCRIPTION	PART NUMBER	MATERIAL	HEAT. TREAT / NOTE
1	TRUBICE PÍSTU	TH_2024_FEKT_A3_04_01	OCEL	-
2	PODPĚRA	TH_2024_FEKT_A4_01_02	OCEL	-



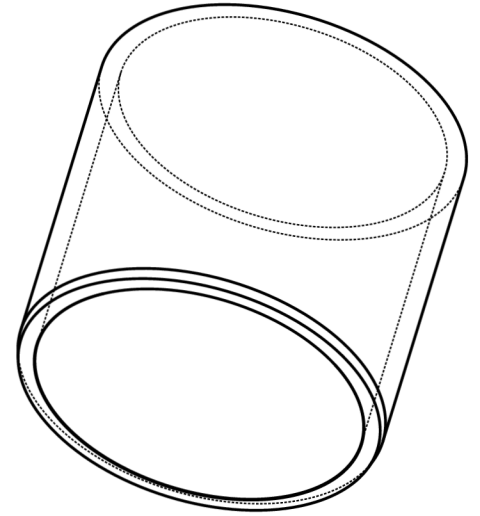
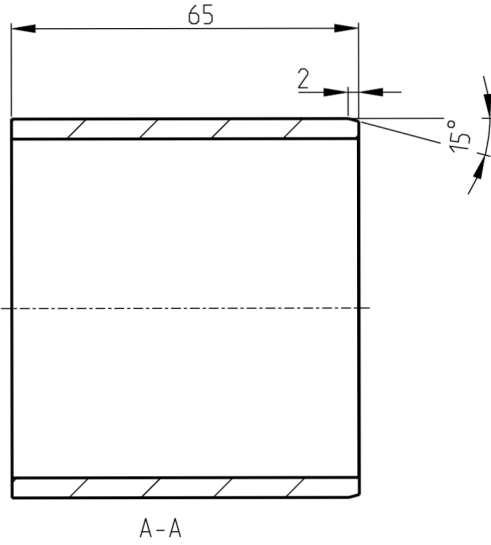
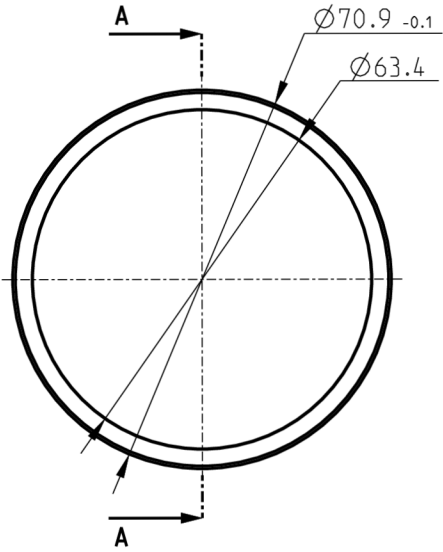
TOLERANCE	POZICE DĚR	NO OF PIECES	MATERIAL	TREATMENT
ISO 2768-mH ±0,5°	±0,02 LÍCOVANÉ ±0,1 OSTATNÍ	- kus(u)	Svařenec	RAL7035
mm ISO 8015	PLOCHY Ra 6,3 HRANY SRAZIT 0,2x45°	DRAWN BY DATE T. Hodinka 21.02.2024	Mechatronic Design & Solutions s.r.o. Metelkova 1852, 664 34, Kuriřm, Czech Rep.	
		E-MAIL TELEFON 211586_vut.cz -		
		NAME SESTAVA PÍSTU MĚŘ. ZVUK. POHLTIVOSTI A VZDUCH. PRŮZVUČNOSTI		
		DRAWING NO	SHEET	REV
		TH_2024_FEKT_A3_04_00	1 OF 1	A
REV	DATE	CHANGED BY		

Příloha B - Výkresová dokumentace dílů

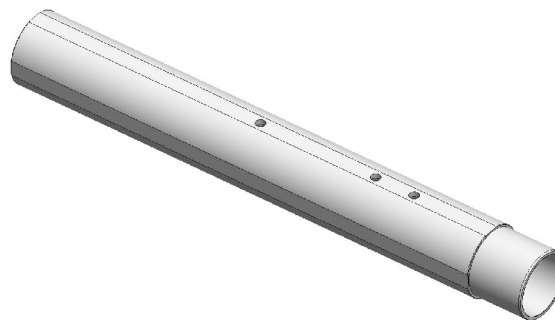
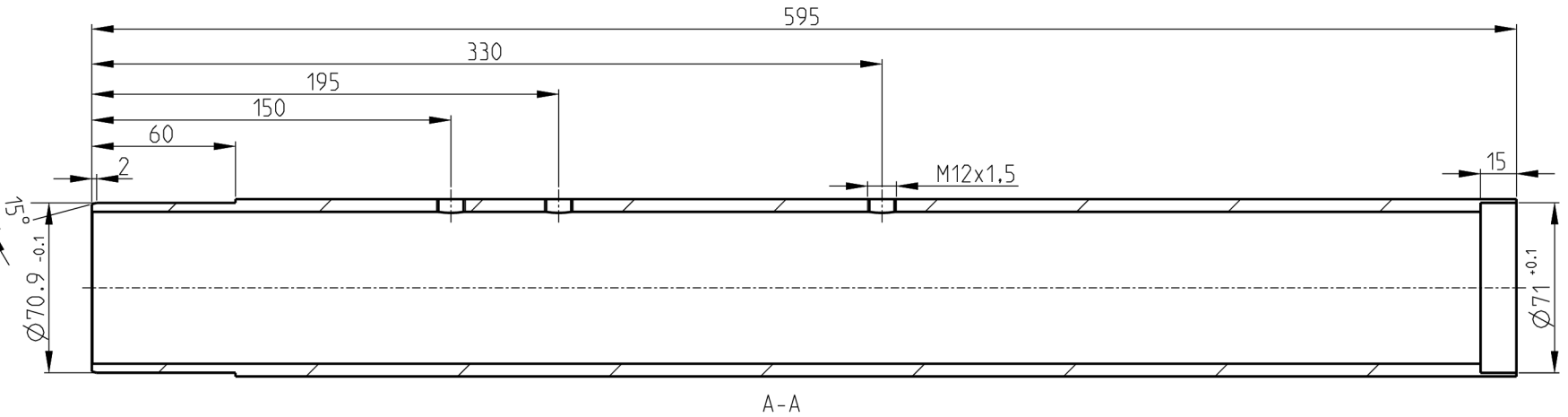
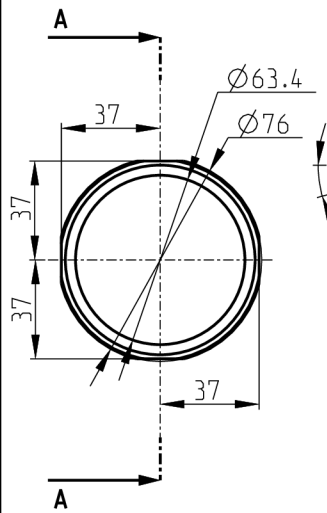
- B.1 Trubka pro měření pohltivosti
th_2024_fekt_a3_01_01**
- B.2 Trubka misky pro měření průzvučnosti
th_2024_fekt_a3_02_01**
- B.3 Trubka pro měření průzvučnosti
th_2024_fekt_a3_03_01**
- B.4 Trubka pístového zakončení
th_2024_fekt_a3_04_01**
- B.5 Příruba pro uchycení ozvučnice
th_2024_fekt_a4_00_01**
- B.6 Podpěra na uchycení šroubů
th_2024_fekt_a4_01_02**
- B.7 Stojan trubice th_2023_fekt_a4_01_03**
- B.8 Příruba navařená na trubici
th_2024_fekt_a4_01_04**
- B.9 Uzávěr misky th_2024_fekt_a4_02_02**



TOLERANCE ISO 2768-mH $\pm 0.5^\circ$	POZICE DĚR ± 0.02 LÍCOVANÉ ± 0.1 OSTATNÍ	POČET KUSU 1 kus(u)	MATERIAL OCEL 11 353	POVRCHOVÁ UPRAVA -
mm ISO 8015 	PLOCHY Ra 6.3 HRANY SRAZIT 0,2x45°	KRESLIL T. Hodinka	VUT-FEKT MPC-AUD AUDIO INŽENÝRSTVÍ	
		DATUM 21.02.2024	NÁZEV TRUBKA IMPEDANČNÍ POHLTIVOSTI MĚŘ. ZVUK. POHLTIVOSTI A VZDUCH. PRŮZVUČNOSTI	
		E-MAIL 211586@md-solutions.cz	ČÍSLO VÝKRESU TH_2024_FEKT_A3_01_01	REV A
REV	DÁTUM	UPRAVIL	LIST 1 OF 1	REV A



TOLERANCE ISO 2768-mH $\pm 0.5^\circ$	POZICE DĚR $\pm 0,02$ LÍCOVANÉ $\pm 0,1$ OSTATNÍ	POČET KUSU 1 kus(u)	MATERIAL OCEL 11 353	POVRCHOVÁ UPRAVA - -
mm ISO 8015 PLOCHY Ra 6.3 HRANY SRAZIT 0,2x45°	KRESLIL T.Hodinka	DATUM 21.02.2024	VUT-FEKT MPC-AUD AUDIO INŽENYRSTVÍ	
	E-MAIL 211588@vut.cz	TELEFON		
NÁZEV TRUBKA IMPEDANČNÍ POHLTIVOSTI 1 MĚŘ. ZVUK. POHLTIVOSTI A VZDUCH. PRŮZVUČNOSTI		ČÍSLO VÝKRESU TH_2024_FEKT_A3_02_01	LIST 1 OF 1	REV A
REV	DATUM	UPRAVIL		



1:5

TOLERANCE ISO 2768-mH ±0,5°	POZICE DĚR ±0,02 LÍCOVANÉ ±0,1 OSTATNÍ	POČET KUSU 1 kus(u)	MATERIAL OCEL 11 353	POVRCHOVÁ UPRAVA -
mm ISO 8015	PLOCHY Ra 6,3 HRANY SRAZIT 0,2x45°	KRESLIL T. Hodinka	DATUM 21.02.2024	
		E-MAIL 211588@vit.cz	TELEFON	
		NÁZEV TRUBICE PRO MĚŘENÍ PRŮZVUČNOSTI MĚŘ. ZVUK. POHLTIVOSTI A VZDUCH. PRŮZVUČNOSTI		
		ČÍSLO VÝKRESU TH_2024_FEKT_A3_03_01	LIST 1 OF 1	REV A
REV	DÁTUM	UPRAVIL		

8

7

6

5

4

3

2

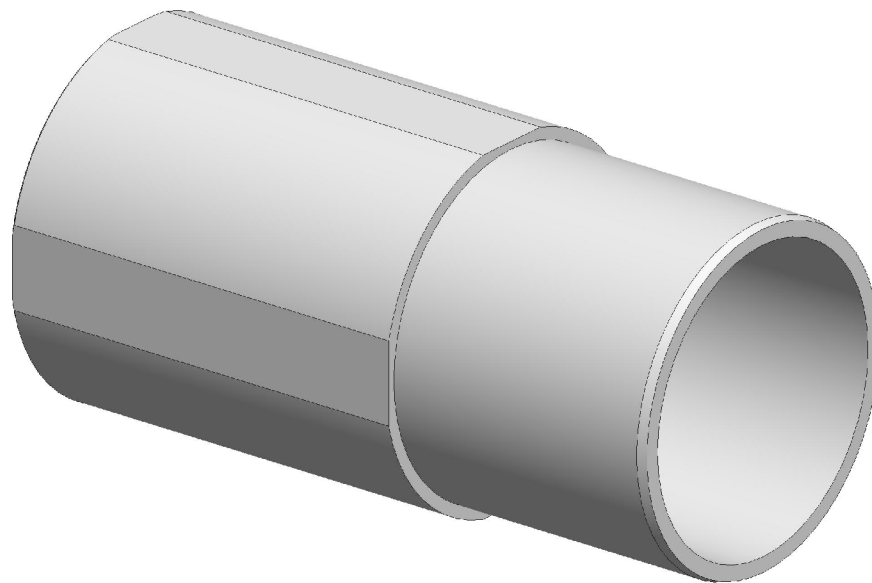
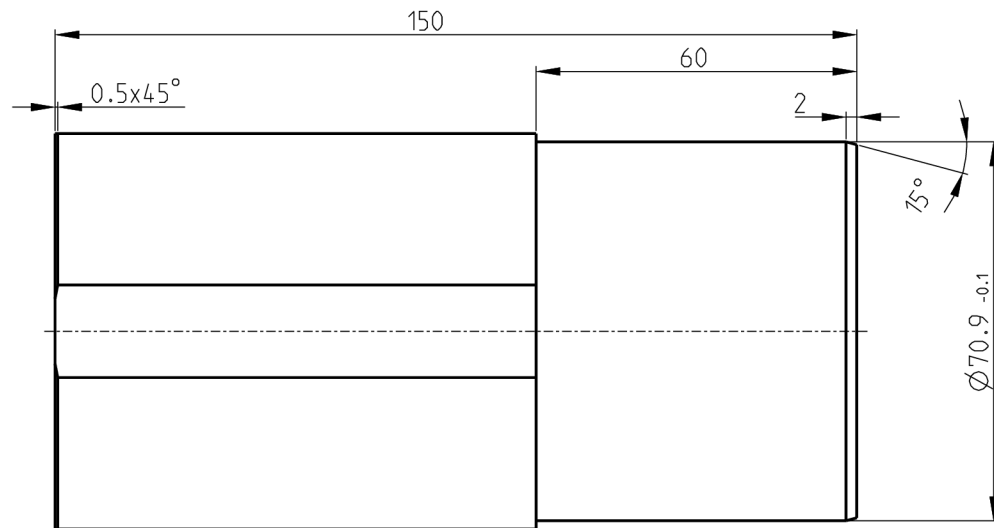
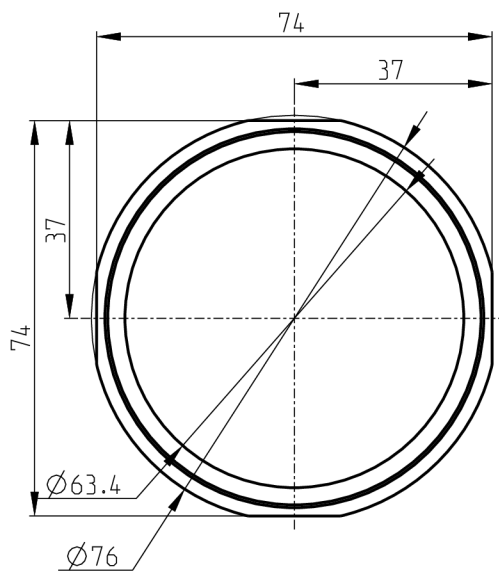
1

D

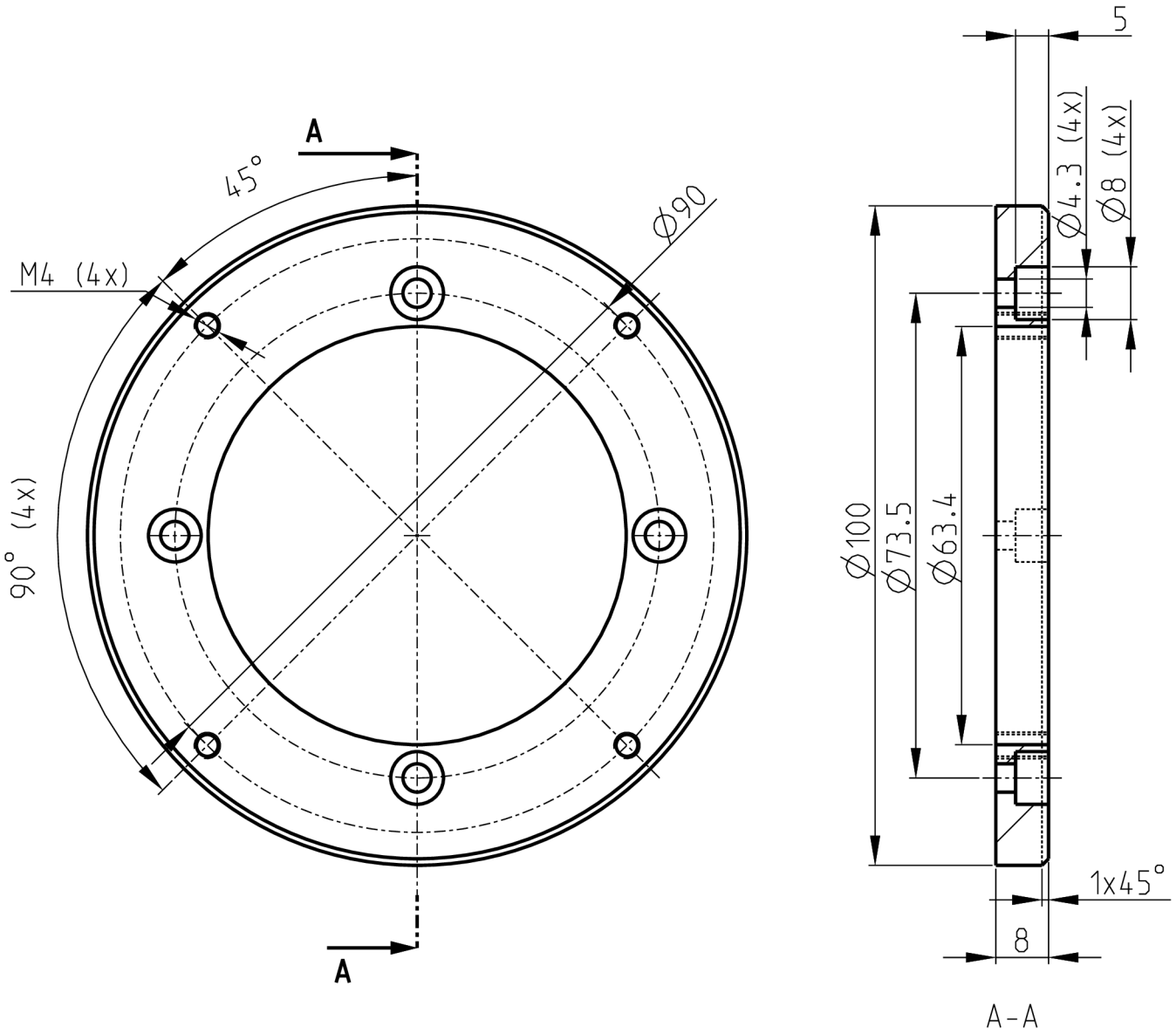
C

B

A

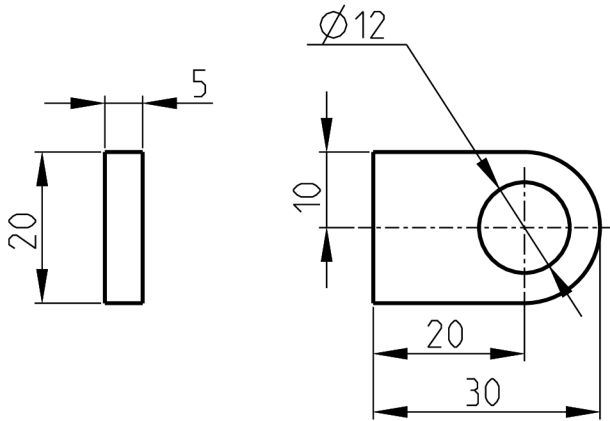
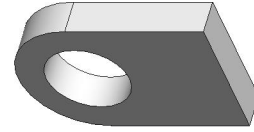


TOLERANCE ISO 2768-mH ±0,5°	POZICE DĚR ±0,02 LÍCOVANÉ ±0,1 OSTATNÍ	POČET KUSU 1 kus(u)	MATERIAL OCEL 1.0060	POVRCHOVÁ UPRAVA -
mm ISO 8015	PLOCHY Ra 6,3 HRANY SRAZIT 0,2x45°	KRESLIL T. Hodinka	DATUM 08.12.2023	
		E-MAIL 211586@vut.cz	TELEFON	
VUT-FEKT MPC-AUD AUDIO INŽENYRSTVÍ				
NÁZEV TRUBICE PÍSTU MĚŘ. ZVUK. POHLTIVOSTI A VZDUCH. PRŮZVUČNOSTI				
-		ČÍSLO VÝKRESU TH_2024_FEKT_A3_04_01	LIST 1 OF 1	REV A
REV	DÁTUM	UPRAVIL		



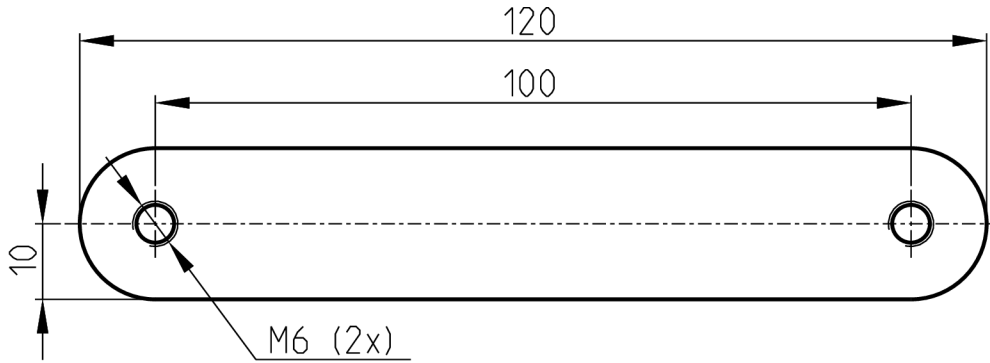
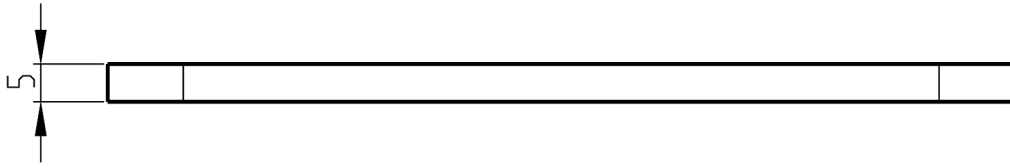
POCET KUSU	1 kus(u)	MATERIAL	DURAL 3.2315	POVRCHOVA UPRAVA	Elox -
KRESLIL	T.Hodinka	DATUM	08.12.2023	VUT - FEKT MPC-AUD AUDIO INZENYSTVI	
E-MAIL	211584@vut.cz	TELEFON			
NÁZEV		PŘÍRUBA PRO UCHYCENÍ OZVUČNICE MĚR. ZVUK. POHLTIVOSTI A VZDUCH. PRŮZVUČNOSTI			
ČÍSLO VÝKRESU	TH_2024_FEKT_A4_00_01	LIST	1 OF 1	REV	A

TOLERANCE	ISO 2768-mH ±0,5°	POZICE DĚR	±0,02 LÍCOVANÉ ±0,1 OSTATNÍ			
mm ISO 8015		PLOCHY	Ra 6,3			
		HRANY	SRAZIT 0,2x45°	REV	DATUM	UPRAVIL



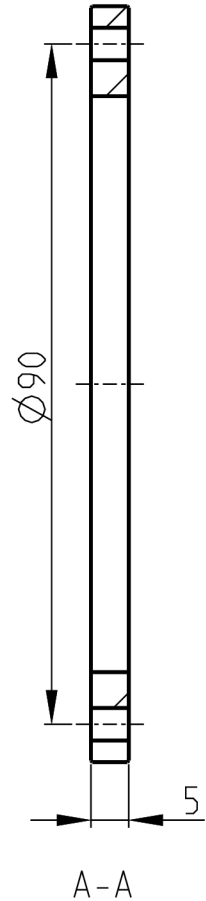
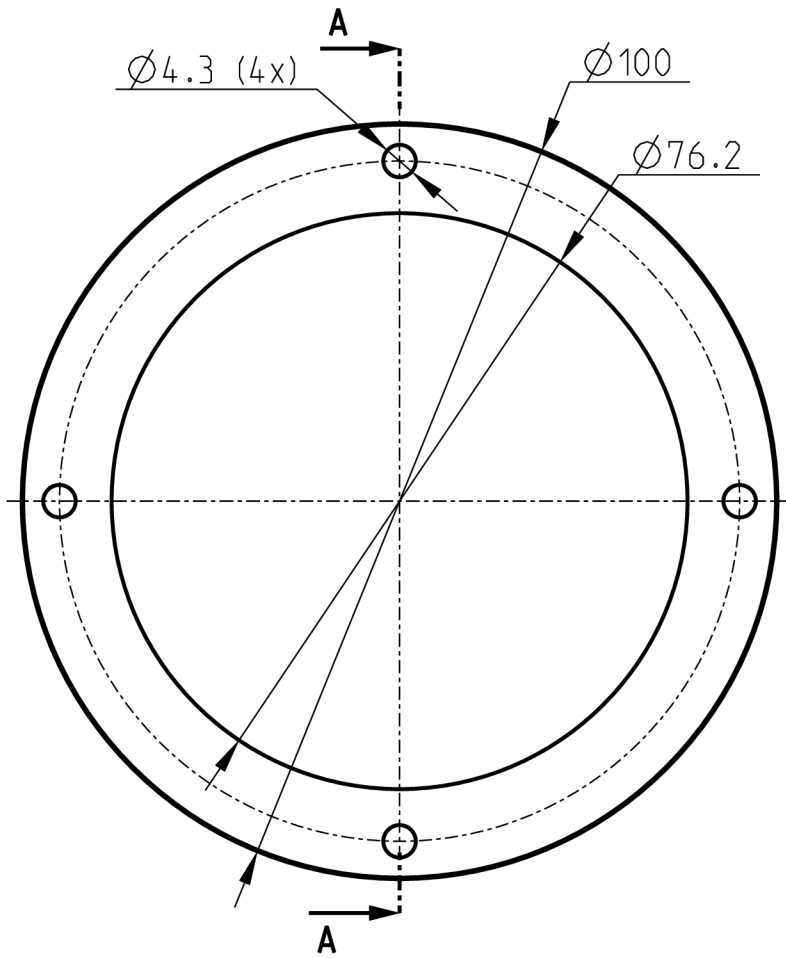
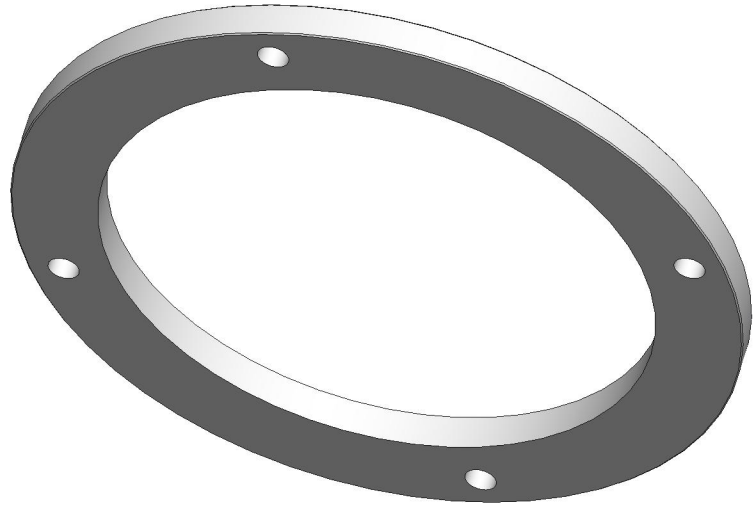
POCET KUSU	8 kus(u)	MATERIAL	OCEL 11 353	POVRCHOVA UPRAVA	- -
KRESLIL	T.Hodinka	DATUM	21.02.2024	VUT - FEKT MPC-AUD AUDIO INZENYSTVI	
E-MAIL	211586@vut.cz	TELEFON			
NÁZEV		PODPĚRA MĚŘ. ZVUK. POHLTIVOSTI A VZDUCH. PRŮZVUČNOSTI			
ČÍSLO VÝKRESU		LIST	REV		
TH_2024_FEKT_A4_01_02		1 OF 1	A		

TOLERANCE	ISO 2768-mH	POZICE DĚR	±0,02 LÍCOVANÉ ±0,1 OSTATNÍ			
mm	ISO 8015	PLOCHY	Ra 6,3			
		HRANY	SRAZIT 0,2x45°	REV	DATUM	UPRAVIL



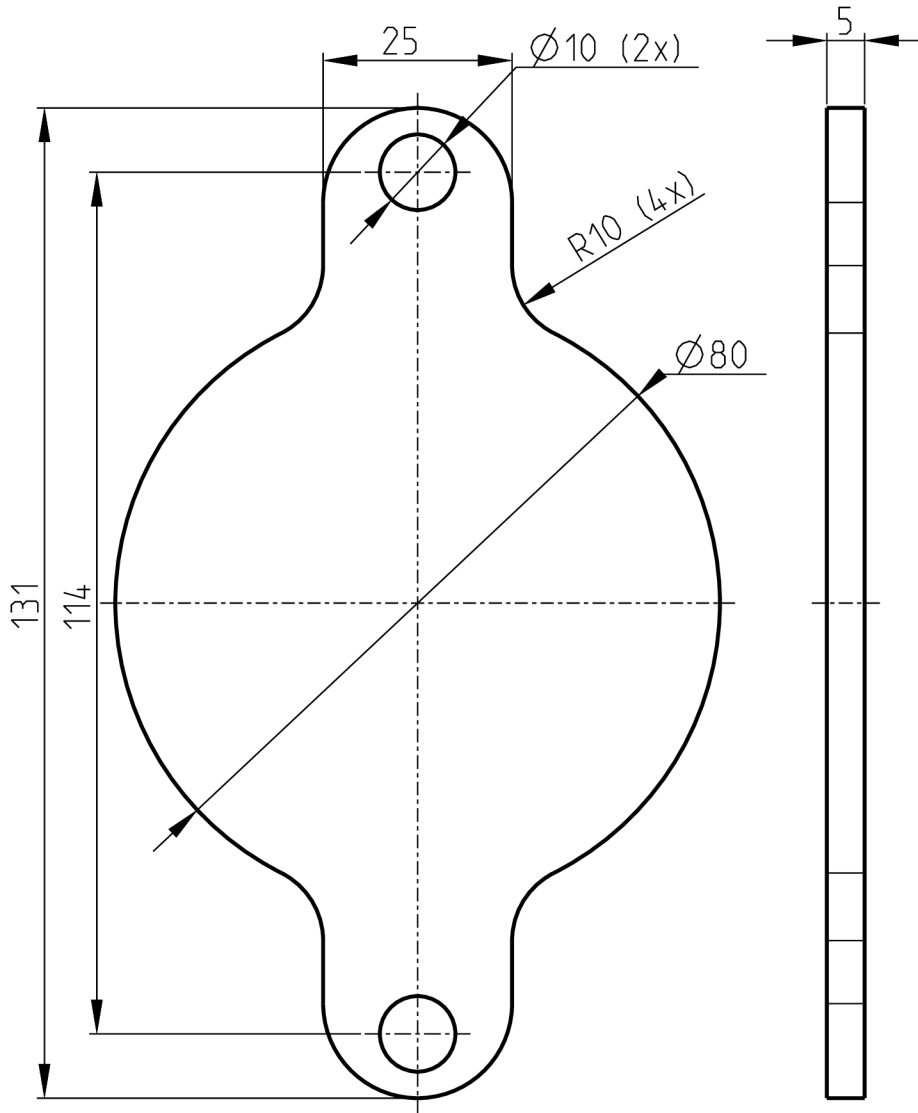
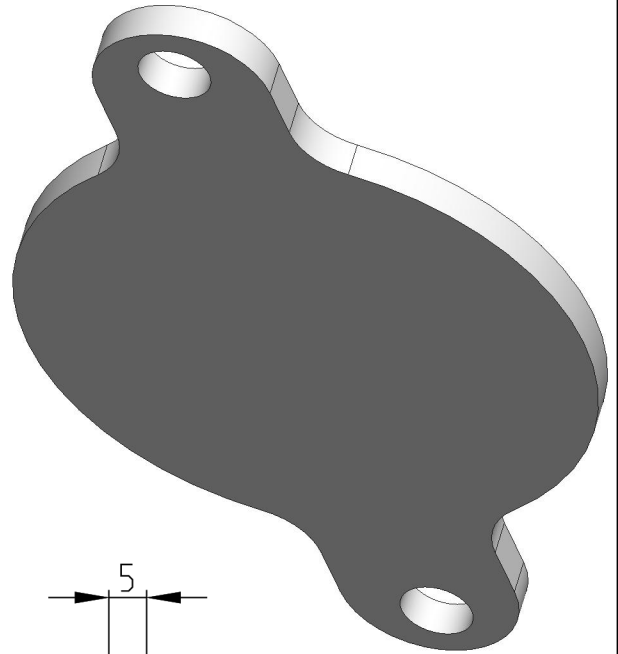
POCET KUSU 4 kus(u)	MATERIAL OCEL 11 353	POVRCHOVA UPRAVA -
KRESLIL T.Hodinka	DATUM 21.02.2024	VUT - FEKT MPC-AUD AUDIO INZENYSTVI
E-MAIL 211586@vut.cz	TELEFON	
NÁZEV STOJAN MĚŘ. ZVUK. POHLTIVOSTI A VZDUCH. PRŮZVUČNOSTI		
ČÍSLO VÝKRESU TH_2024_FEKT_A4_01_03	LIST 1 OF 1	REV A

TOLERANCE ISO 2768-mH ±0,5°	POZICE DĚR ±0,02 LÍCOVANÉ ±0,1 OSTATNÍ			
mm ISO 8015	PLOCHY Ra 6,3 HRANY SRAZIT 0,2x45°	REV	DATUM	UPRAVIL



POCET KUSU	1 kus(u)	MATERIAL	OCEL 11 353	POVRCHOVA UPRAVA	-
KRESLIL	T.Hodinka	DATUM	21.02.2024	VUT - FEKT MPC-AUD AUDIO INZENYSTVI	
E-MAIL	211586@vut.cz	TELEFON			
NÁZEV		PŘÍRUBA MĚŘ. ZVUK. POHLTIVOSTI A VZDUCH. PRŮZVUČNOSTI			
ČÍSLO VÝKRESU		LIST	REV		
TH_2024_FEKT_A4_01_04		1 OF 1	A		

TOLERANCE	ISO 2768-mH	POZICE DĚR	±0,02 LÍCOVANÉ ±0,1 OSTATNÍ			
mm	ISO 8015	PLOCHY	Ra 6,3	-		
		HRANY	SRAZIT 0,2x45°	REV	DATUM	UPRAVIL



POCET KUSU	2 kus(u)	MATERIAL	OCEL 11 353	POVRCHOVA UPRAVA	- -
KRESLIL	T.Hodinka	DATUM	21.02.2024	VUT - FEKT MPC-AUD AUDIO INZENYSTVI	
E-MAIL	211586@vut.cz	TELEFON			
NÁZEV		PŘÍRUBA 2 MĚŘ. ZVUK. POHLTIVOSTI A VZDUCH. PRŮZVUČNOSTI			
ČÍSLO VÝKRESU		LIST	REV		
TH_2024_FEKT_A4_02_02		1 OF 1	A		

TOLERANCE	ISO 2768-mH	POZICE DĚR	±0,02 LÍCOVANÉ ±0,1 OSTATNÍ			
mm	ISO 8015	PLOCHY	Ra 6,3			
		HRANY	SRAZIT 0,2x45°	REV	DATUM	UPRAVIL