



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

MĚŘICÍ SYSTÉM PRO AKUSTICKOU CHARAKTERIZACI MATERIÁLŮ

MEASURING SYSTEM FOR ACOUSTIC CHARACTERISATION OF MATERIALS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Mikuláš Plánka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Stanislav Klusáček, Ph.D.

BRNO 2023

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Kybernetika, automatizace a měření**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Bc. Mikuláš Plánka

ID: 211168

Ročník: 2

Akademický rok: 2022/23

NÁZEV TÉMATU:

Měřicí systém pro akustickou charakterizaci materiálů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem diplomové práce bude návrh a realizace otevřeného měřicího systému pro akustickou charakterizaci materiálů pomocí impedanční trubice B&K 4206. Měřicí systém bude navržen na platformě prostředků firmy National Instruments (NI). Výstup práce bude spočívat také v ověření funkčnosti realizovaného měřicího systému vybraných parametrů akustických vlastností malých zkušebních vzorků izolačních materiálů a jejich srovnání výstupů měřených veličin vůči hodnotám systému B&K PULSE LabShop.

Konkrétní body zadání:

1. Zpracujte rešerši týkající se měření akustické charakterizace materiálů pomocí impedanční trubice, tj. metodiku měření a popis měřených veličin.
2. Realizujte měření vybraných parametrů pomocí impedanční trubice B&K 4206, analyzátoru BK Connect a softwaru PULSE LabShop.
3. Navrhněte a realizujte vlastní otevřený měřicí systém využívající impedanční trubici B&K 4206 a vývojové prostředky NI, tj. například měřicí systém NI PXIe a softwar NI LabVIEW.
4. Porovnejte výsledky měření vlastního navrženého systému s měřicím systémem BK a zhodnoťte výsledky.

Jednotlivé postupy konzultujte s vedoucím práce.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] ČSN ISO 10534-1. Akustika - Určování činitele zvukové pohltivosti a akustické impedance v impedančních trubicích: Část 1: Metoda poměru stojaté vlny. Český normalizační institut, Praha, 1999

Termín zadání: 6.2.2023

Termín odevzdání: 17.5.2023

Vedoucí práce: Ing. Stanislav Klusáček, Ph.D.

doc. Ing. Petr Fiedler, 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

Diplomová práce se zabývá měřením akustických parametrů materiálu pomocí impedanční trubice B&K 4206, konkrétně činitele pohltivosti a odrazivosti. Teoretická část poskytuje základní přehled metodiky měření a popis měření veličin týkající se akustické charakterizace materiálu. Dále je popsán postup měření využívající softwaru PULSE LabShop. Hlavním cílem této práce je návrh a realizace vlastního otevřeného měřicího systému v LabVIEW sloužícího ke stanovení již zmíněných parametrů materiálů. Výstupy měření pomocí vlastní realizace a programu PULSE LabShop jsou v této práci porovnány a zhodnoceny.

KLÍČOVÁ SLOVA

Impedanční trubice, B&K 4206, charakterizace materiálů, akustické parametry, činitel pohltivosti, činitel odrazivosti, akustická impedance, přenosová funkce, LabVIEW, PULSE LabShop.

ABSTRACT

The diploma thesis deals with the measurement of acoustic parameters of the material using the B&K 4206 impedance tube, specifically the absorption and reflection coefficients. The theoretical part provides a basic overview of the measurement methodology and a description of measurement quantities related to acoustic materials characterization. The measurement procedure using the PULSE LabShop software is also described in this work. The main focus of this thesis is the design and implementation of a custom open measurement system created in LabVIEW used to determine the aforementioned materials parameters. The results of the measurements using the custom implementation and the PULSE LabShop software are compared and evaluated in this diploma thesis.

KEYWORDS

Impedance tube, BK 4206, characterization of materials, acoustic parameters, absorption coefficient, reflection coefficient, acoustic impedance, transfer function, LabVIEW, PULSE LabShop.

PLÁNKA, Mikuláš. *Měřicí systém pro akustickou charakterizaci materiálů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2023, 85 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Stanislav Klusáček, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora: Bc. Mikuláš Plánka
VUT ID autora: 211168
Typ práce: Diplomová práce
Akademický rok: 2022/23
Téma závěrečné práce: Měřicí systém pro akustickou charakterizaci materiálů

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/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno15. 5. 2023.....

.....
podpis autora*

* Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Stanislavu Klusáčkovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci. Mé poděkování dále patří zaměstnancům z laboratoře měření firmy Ceitec za toleranci a cenné rady při zpracování diplomové práce. Díky patří rovněž mé rodině a blízkým za jejich vytrvalou podporu při studiu.

V Brně dne: **15. 5. 2023**

Podpis:

Obsah

Úvod	12
1 Teoretická část práce	13
1.1 Akustika	13
1.1.1 Rozdělení akustiky	13
1.1.2 Zvuk	13
1.1.3 Hluk	14
1.1.4 Akustické vlnění	14
1.1.5 Základní pojmy akustiky	15
1.1.6 Bilance akustické intenzity při dopadu zvukové vlny na překážku	17
1.1.7 Činitelé zvuku	17
1.2 Impedanční trubice B&K 4206-T	19
1.3 Druhy měření pomocí impedanční trubice	21
1.4 Metoda přenosové funkce	21
1.4.1 Pracovní kmitočtový rozsah trubice	21
1.4.2 Princip metody	22
1.5 Měřicí postup metody dvou mikrofonů	23
1.5.1 Korekce neshody mikrofonů	23
1.5.2 Výpočet přenosové funkce	24
1.5.3 Výpočet činitele odrazu	25
1.5.4 Výpočet činitele zvukové pohltivosti	26
1.5.5 Výpočet normované akustické impedance	26
1.5.6 Výpočet normované akustické admitance	27
2 Měření pomocí softwaru PULSE LabShop	28
2.1 Hardwarové a softwarové nástroje	28
2.1.1 PC s potřebným softwarem	28
2.1.2 Systém sběru dat LAN XI Module 3160-A-04/2	29
2.1.3 Zesilovač B&K typ 2735	29
2.1.4 Mikrofony B&K typu 4187	30
2.1.5 Mikrofonový kalibrátor typu 4231	30
2.1.6 Vzorčky materiálu použité pro měření	31
2.2 Průběh měření pomocí softwaru PULSE LabShop	32
3 Návrh a realizace měřicího systému	39
3.1 Požadavky na měřicí systém	39
3.2 Software	39

3.3	Použitá zařízení	39
3.3.1	Univerzální napájecí modul GRAS 12AQ	40
3.3.2	Šasi NI PXIe-1082	40
3.3.3	Embedded kontrolér NI PXIe-8133	41
3.3.4	Měřicí karta NI PXI-4461	41
3.4	Realizace vlastního měřicího systému	42
3.4.1	Nastavení parametrů měření	43
3.4.2	Měření pro kontrolu hladiny šumu	44
3.4.3	Výpočet hladiny šumu	44
3.4.4	Měření pro výpočty frekvenčních závislostí	45
3.4.5	Výpočet frekvenčních závislostí z naměřených dat	45
3.4.6	Zobrazení vypočtených závislostí	46
3.5	Návod k použití programu	46
3.5.1	Předběžná měření	46
3.5.2	Volba trubice použité pro měření	46
3.5.3	Instalace vzorku do trubice	46
3.5.4	Kalibrace mikrofónů	47
3.5.5	Nastavení parametrů měření	49
3.5.6	Kontrola hladiny šumu	50
3.5.7	Měření	52
3.5.8	Výpočet a zobrazení dat	53
3.6	Realizace v prostředí MATLAB	54
4	Zhodnocení výsledků měření	55
4.1	Výsledky vlastního měření	55
4.1.1	Měření pomocí velké impedanční trubice	55
4.1.2	Měření pomocí malé impedanční trubice	62
4.2	Porovnání naměřených dat	68
4.2.1	Měření referenčního vzorku	68
4.2.2	Měření vzorku firmy Knauf (černý vzorek)	73
4.3	Celkové zhodnocení metod měření	76
	Závěr	77
	Literatura	78
	Seznam symbolů a zkratek	81

Seznam obrázků

1.1	Druhy akustických vlnění	14
1.2	Bilance akustické intenzity při dopadu zvukové vlny na překážku . . .	18
1.3	Impedanční trubice	20
1.4	Schematický diagram dvou-mikrofonového měření	23
1.5	Schematický diagram dvou-mikrofonového měření - normálního roz- ložení mikrofonů	24
1.6	Schematický diagram dvou-mikrofonového měření - prohozeného roz- ložení mikrofonů	24
2.1	Schematický diagram použitých zařízení při měření	28
2.2	Multifunkční DAQ modul LAN XI Module 3160-A-04/2	29
2.3	Zesilovač 2735	30
2.4	Mikrofonový kalibrátor typu 4231	30
2.5	Referenční vzorky určené pro měření pomocí velké a malé trubice . .	31
2.6	Černý vzorek určen pro měření pomocí velké trubice	31
2.7	Ukázka zapojení kanálů DAQ pro velkou trubici	32
2.8	Hlavní obrazovka měření absorpčního koeficientu	33
2.9	Nastavení parametru měření - záložka Tube	34
2.10	Nastavení parametru měření - záložka Measurement	34
2.11	Nastavení parametru měření - záložka Generator	35
2.12	Nastavení parametru měření - záložka Enviroment	35
2.13	Nastavení parametru měření - záložka Options	36
2.14	Nastavení parametru měření - záložka Front-end	36
2.15	Záložka kalibrace mikrofonu	37
2.16	Záložka měření okolního hluku a signálu	37
2.17	Záložka kalibrace přenosové funkce	38
2.18	Záložka měření absorpčního koeficientu	38
3.1	Schematický diagram zapojení vlastní realizace měření	40
3.2	Univerzální napájecí modul GRAS 12AQ	41
3.3	Šasi NI PXIe-1082	41
3.4	Embedded kontrolér NI PXIe-8133	42
3.5	Měřicí karta NI PXI-4461	42
3.6	Diagram toku dat programu realizovaného ve vývojovém prostředí Labview	43
3.7	Vzorek umístěný uvnitř malé a velké impedanční trubice	47
3.8	Záložka nastavení parametrů měření vlastní realizace měřicího systémů	47
3.9	Záložka nastavení parametrů měření vlastní realizace měřicího systémů	48
3.10	Záložka nastavení parametrů měření vlastní realizace měřicího systémů	49

3.11	Záložka kontrola hladiny šumu vlastní realizace měřicího systémů . . .	51
3.12	Záložka měření vlastní realizace měřicího systémů	52
3.13	Záložka výpočtu a zobrazení vlastní realizace měřicího systémů . . .	53
4.1	Fotografie pořízena při měření s využitím velké impedanční trubice .	56
4.2	Frekvenční závislost přenosových funkcí - velká trubice (referenční vzorek)	56
4.3	Frekvenční závislost činitele odrazivosti - velká trubice (referenční vzorek)	57
4.4	Frekvenční závislost činitele pohltivosti - velká trubice (referenční vzorek)	57
4.5	Nejistota typu A frekvenční závislosti činitele odrazivosti - velká trubice (referenční vzorek)	58
4.6	Nejistota typu A frekvenční závislosti činitele odrazivosti (přiblížený) - velká trubice (referenční vzorek)	59
4.7	Rozptyl frekvenční závislost činitele pohltivosti - velká trubice (referenční vzorek)	60
4.8	Nejistota typu A frekvenční závislosti činitele pohltivosti (přiblížený) - velká trubice (referenční vzorek)	60
4.9	Frekvenční závislost činitele pohltivosti pro nízké frekvence - velká trubice (referenční vzorek)	61
4.10	Fotografie pořízena při měření s využitím malé impedanční trubice . .	62
4.11	Frekvenční závislost přenosových funkcí - velká trubice (referenční vzorek)	63
4.12	Frekvenční závislost činitele odrazivosti - velká trubice (referenční vzorek)	63
4.13	Frekvenční závislost činitele pohltivosti - velká trubice (referenční vzorek)	64
4.14	Nejistota typu A frekvenční závislosti činitele odrazivosti - malá trubice (referenční vzorek)	64
4.15	Rozptyl frekvenční závislost činitele odrazivosti (přiblížený) - malá trubice (referenční vzorek)	65
4.16	Rozptyl frekvenční závislost činitele pohltivosti - malá trubice (referenční vzorek)	66
4.17	Rozptyl frekvenční závislost činitele pohltivosti (přiblížený) - malá trubice (referenční vzorek)	67
4.18	Frekvenční závislost činitele pohltivosti (frekvence 500 Hz - 1500 Hz) - malá trubice (referenční vzorek)	67
4.19	Frekvenční závislost činitele pohltivosti referenčního vzorku (při frekvenci 50 Hz - 1600 Hz) - udáváno výrobcem	69

4.20	Frekvenční závislost činitele pohltivosti referenčního vzorku pro různé metody měření (frekvence 50 Hz - 1600 Hz)	69
4.21	Frekvenční závislost činitele odrazivosti referenčního vzorku pro různé metody měření (frekvence 50 Hz - 1600 Hz)	71
4.22	Frekvenční závislost činitele pohltivosti referenčního vzorku (frekvence 500 Hz - 6300 Hz) - udáváno výrobcem	72
4.23	Frekvenční závislost činitele pohltivosti referenčního vzorku pro různé metody měření (frekvence 500 Hz - 6400 Hz) - velká trubice	72
4.24	Frekvenční závislost činitele odrazivosti referenčního vzorku pro různé metody měření (frekvence 500 Hz - 6400 Hz)	74
4.25	Frekvenční závislost činitele pohltivosti - černý vzorek	75
4.26	Frekvenční závislost činitele odrazivosti - velká trubice (černý vzorek)	75

Úvod

Problematika regulace hluku je stále aktuálním tématem. Pro konstruktéry a výrobce je testování akustických materiálů stěžejním aspektem návrhu výrobku z nejrůznějších průmyslových odvětví. Je velmi důležité předvídat dopad použití konkrétních materiálů pro regulaci hluku v rané fázi vývoje zařízení, výrobku nebo stroje.

Akustické testování materiálů je proces, při kterém se zjišťují akustické vlastnosti materiálů z hlediska pohltivosti, odrazivosti, impedance, admitance a přenosových ztrát.

Ke stanovení akustických vlastností materiálů existují různé metody, jako například metoda měření v dozvukové místnosti. V této práci se však budeme zabývat výhradně metodou měření, která stanovuje akustické parametry materiálu za využití impedanční trubice.

Motivací pro vznik této práce byla obtížná dostupnost softwarových prostředků společnosti B&K. Z tohoto důvodu bude v této diplomové práci vytvořen vlastní otevřený měřicí systém sloužící k akustické charakterizaci materiálu pomocí impedanční trubice.

V diplomové práci bude nejprve zpracována literární rešerše týkající se měření akustických parametrů materiálů pomocí impedanční trubice. Bude zde popsána metoda měření akustických vlastností materiálů na základě přenosové funkce a veličiny měřené na základě této metody. Dále bude v teoretické části blíže popsána impedanční trubice B&K 4206, která bude využita v praktické části.

Rovněž zde budou specifikovány jednotlivé kroky realizace měření parametrů materiálů pomocí impedanční trubice s využitím softwarových prostředků PULSE LabShop. Dále budou popsány jednotlivé části měřicího systému, tedy zařízení použita pro toto měření s využitím tohoto softwaru.

Dalším bodem práce bude návrh a realizace vlastního otevřeného měřicího systému, který využívá vývojového prostředí LabVIEW společnosti National Instruments a měřicí nástroje stejné společnosti. V této části budou definovány požadavky na tento měřicí systém. Dále bude popsáno fungování realizovaného systému a vytvořen uživatelský návod pro práci s navrženým softwarem.

Za pomoci navrženého a realizovaného systému budou naměřeny a vypočteny parametry činitele odrazivosti a pohltivosti materiálu, které budou porovnány a zhodnoceny společně s daty naměřenými a vypočtenými pomocí softwarových prostředků PULSE LabShop.

1 Teoretická část práce

Tato část práce je zaměřena na teorii vztahující se k akustice, která je potřebná k pochopení dané problematiky. Dále v této kapitole bude představeno zařízení B&K 4206, popsán princip fungování tohoto zařízení a metody měření a výpočtů vybraných parametrů.

1.1 Akustika

Akustika je vědní disciplína, která se zabývá fyzikálními ději související se vznikem, detekcí a šířením zvukového vlnění. O existenci vlnění hmotného prostředí, kterému se ve fyzice či běžné řeči říká zvuk, se můžeme přesvědčit pouhým sluchem. Zjednodušeně lze tedy říct, že se akustika zabývá vznikem, šířením a vnímáním zvuku. [1]

1.1.1 Rozdělení akustiky

Akustiku lze klasifikovat do následujících kategorií:

1. Fyzikální akustika - zabývá se vznikem a šířením zvuku, dále odrazivostí a pohltivostí různých materiálů,
2. Hudební akustika - zabývá se zvukem z hudebního hlediska,
3. Fyziologická akustika - zkoumá vznik a vnímání zvuku živých organismů,
4. Stavební akustika - studuje kvalitu prostředí v místnostech či sálech pro potřebu poslechu hudby či mluvené řeči,
5. Elektroakustika - zkoumá využití elektronických zařízení pro záznam, reprodukci a vznik zvuku. [1]

Tato práce se bude zabývat zejména kategoriemi: fyzikální akustika a elektroakustika, kde se budou zkoumat parametry různých materiálů s využitím záznamu a vzniku zvuku za pomoci elektrických zařízení. [1]

1.1.2 Zvuk

Zvuk vzniká mechanickým vlněním v pružném prostředí a to ve frekvenčním rozsahu od 16 Hz až 20 kHz. V tomto frekvenčním intervalu se jedná o slyšitelný zvuk, tedy zvuku, který je schopen zaznamenat lidský sluchový orgán. V případě, že je frekvence kmitů nižší než 16 Hz, jedná se o signál z frekvenčního pásma infrazvuku. Frekvence mechanického vlnění přesahující hodnotu 20 kHz spadá do kategorie ultrazvuku. [1]

1.1.3 Hluk

Za hluk lze označit každý nepříjemný či nežádoucí zvuk. To, jak lidé vnímají vystavení hluku, je velmi subjektivní. Parametr, který určuje účinek zvuku, je hladina akustického tlaku. V prostředí s velice nízkými hladinami se člověk necítí dobře. Hladina 20 dB je pro většinu lidí tzv. hluboké ticho. Při hladinách okolo 65 dB se začínají projevovat účinky hluku ve změnách vegetativních reakcí. Od 85 dB může docházet k trvalému poškození sluchového orgánu. Při hladinách nad 160 dB obvykle dochází k protržení bubínku sluchového ústrojí. [1]

Eliminace hluku

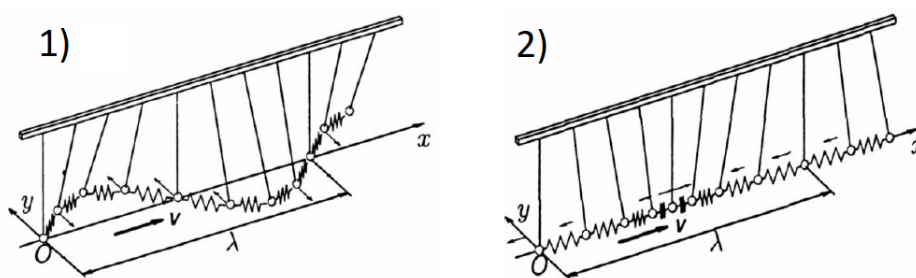
Existují následující možnosti eliminace hluku:

- Metoda eliminující hluk ve zdroji,
- Metoda dispozice,
- Metoda izolace,
- Metoda eliminující hluk pomocí zvukové pohltivosti materiálu,
- Metoda eliminující hluk pomocí osobních ochranných pomůcek. [1]

Tato práce se zabývá metodou využívající zvukové pohltivosti materiálů, kde se pomocí impedanční trubice měřil právě parametr činitele akustické pohltivosti materiálu. [1]

1.1.4 Akustické vlnění

Zvuk se může šířit ve formě akustického vlnění prostřednictvím kapalin, plynů nebo pevných látek. Pro plyny a kapaliny existuje pouze podélné vlnění. V případě, že částice kmitají ve směru, kterým vlnění postupuje jedná se o podélné vlnění. U pevných látek se vyskytují vlny podélné i příčné. V případě příčného vlnění částice kmitají kolmo na směr postupu vlnění. Druhy vlnění jsou zobrazeny na obrázku 1.1. [1]



Obr. 1.1: 1) Příčné vlnění, 2) Podélné vlnění [2]

Charakteristickým rysem akustického vlnění je zhušťování a zředování kmitajících bodů kolem míst, kde je intenzita pohybu nulová. Tento proces se šíří po ose x rychlostí v . Mezi jednotlivými zhušťováními a zředěními je vzdálenost reprezentovaná vlnová délka λ . [2]

V případě, že se vlny dotknou překážky nebo rozhraní dvou různých prostředí, dojde zde k odrazu nebo průchodu vlnění. Pokud jsou dvě či více vln na stejném místě, dojde k jejich interferenci neboli skládání, což se lze vyjádřit aritmetickým součtem výchylek těchto vlnění. [2]

1.1.5 Základní pojmy akustiky

V této kapitole budou blíže popsány významné pojmy a veličiny související s akustikou.

Rychlost zvuku c [$m \cdot s^{-1}$] je veličina, která udává rychlost šíření zvukové vlny v prostředí. Tato veličina udává vzdálenost ve směru šíření, kterou zvuková vlna urazí za jednu vteřinu. Rychlost zvuku se neliší pro frekvenci zvukového vlnění, liší se však pro různé materiály, plyny či kapaliny. Obecně se dá říct, že se zvuk šíří větší rychlostí v pevných látkách a kapalinách než v plynech. Rychlost šíření zvuku ve vzduchu odpovídá hodnotě $c = 343 m \cdot s^{-1}$ při teplotě 20°C . [2]

Akustický tlak p_a [Pa] je projev akustické energie. Vlivem vlnění dochází ke změnám akustického tlaku v místě průchodu akustického vlnění. Měří se tlak superponovaný na tlak atmosferický. Jedná se o skalární, přímo měřitelnou veličinu vlnového charakteru. Atmosferický tlak obvykle nabývá hodnot kolem 10^5 Pa. Lidské ucho dokáže rozeznat hodnoty akustického tlaku v rozmezí $2 \cdot 10^{-2}$ Pa (práh slyšitelnosti) až $2 \cdot 10^2$ Pa (práh bolesti). [3]

Akustická rychlost u [$m \cdot s^{-1}$] je rychlost částic vzduchu pohybujících se kolem své rovnovážné polohy vlivem působení akustického tlaku. Akustická rychlost je vektorová veličina s vlnovým charakterem. Akustickou rychlost je možno měřit speciální sondou μ -flow. Akustická rychlost se pohybuje v rozmezí $5 \cdot 10^{-8} m \cdot s^{-1}$ (práh slyšitelnosti) až $1,6 \cdot 10^{-1} m \cdot s^{-1}$ (práh bolesti). [3]

Akustický výkon W [W] je výkon, který je vyzářený zdrojem zvuku. Závisí na intenzitě zdroje zvuku a na velikosti plochy. Jedná se o měřítko celkové zvukové energie, která prochází danou plochou. Akustický výkon je základní veličinou, která je používána při popisu zdroje akustického vlnění (zvuku). Výpočet akustického výkonu je dán vzorcem [2, 3]:

$$W = \int_{(S)} \vec{I} \cdot d\vec{S}, \quad (1.1)$$

kde $d\vec{S}$ je vektor o velikosti dS ležící ve směru normály na plochu. $S [m^2]$ je plocha, pro kterou stanovujeme akustický výkon. [2, 3]

Intenzita zvuku $I [W.m^{-2}]$ je měřítkem akustické energie procházející jednotkou plochy S , která je kolmá na směr šíření zvukových vln [2]:

$$I = \frac{W}{S}. \quad (1.2)$$

Hladina akustického tlaku L_{Pa} (SPL) [dB] je definována vztahem

$$L_{Pa} = 10 \cdot \log \frac{p^2}{p_0^2}, \quad (1.3)$$

kde p_0 je práh akustického tlaku $p_0 = 20^{-6}$ Pa. [3]

Hladina akustické intenzity L_I [dB] je definována vztahem

$$L_I = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0}, \quad (1.4)$$

kde I_0 je práh akustické intenzity $I_0 = 10^{-12}$ $W.m^{-2}$. [3]

Hladina akustické rychlosti L_u [dB] je definována vztahem

$$L_u = 10 \cdot \log \frac{u^2}{u_0^2}, \quad (1.5)$$

kde u_0 je práh akustické rychlosti $u_0 = 5 \cdot 10^{-8}$ $m.s^{-1}$. [3]

Akustická impedance $Z [Pa \cdot s \cdot m^{-1}]$ je možné zjednodušeně charakterizovat jako odpor vznikající při průchodu akustické vlny přes prostředí. Jedná se o důležitou veličinu pro popis interakce mezi vlnou a prostředím, ve kterém se šíří. Akustická impedance vyjadřuje vztah mezi akustickým tlakem p_a při průchodu akustické vlny a akustickou rychlostí u . Výsledkem této veličiny je hodnota udávaná komplexním číslem a to z důvodu fázového posunu mezi akustickým tlakem a rychlostí. Akustickou impedanci lze vypočítat dle vztahu [2]:

$$Z = \frac{p_a}{u} = R + jX. \quad (1.6)$$

Reálná část akustické impedance r vyjadřuje akustický odpor při průchodu vlny prostředím a imaginární část x reprezentuje akustickou reaktanci. [2]

Další způsob výpočtu akustické impedance:

$$Z = \rho \cdot c, \quad (1.7)$$

kde ρ [$kg \cdot m^{-3}$] je hustota prostředí a c [$m \cdot s^{-1}$] je rychlost šíření akustické vlny v prostředí. [4]

Vlnová délka λ [m] je vzdálenost, kterou vlnění urazí za jednu periodu. Vlnovou délku je možné vypočítat pomocí následujícího vztahu:

$$\lambda = c \cdot T = \frac{c}{f}, \quad (1.8)$$

kde T [s] je perioda kmitání a f [Hz] je frekvence kmitání. [2]

1.1.6 Bilance akustické intenzity při dopadu zvukové vlny na překážku

Když zvuková vlna dopadne na překážku (například povrch stěny), její energie se rozdělí na dílčí části. Na obrázku 1.2 můžeme vidět bilanci akustické intenzity při dopadu zvukové vlny na překážku. Bilance je tvořena z následujících částí:

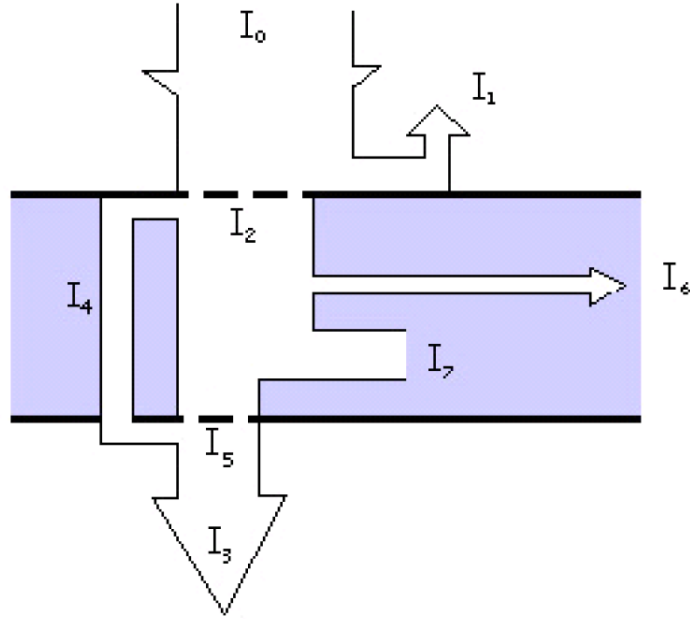
- I_0 ...celková intenzita zvukové vlny dopadající na překážku,
- I_1 ...intenzita odražené části zvukové vlny,
- I_2 ...intenzita pohlcené části zvukové vlny,
- I_3 ...celková intenzita části zvukové vlny vyzářené za překážku,
- I_4 ...intenzita zvukové vlny, která prošla skrze póry překážky,
- I_5 ...intenzita zvukové vlny vyzářené v důsledku ohybového kmitání překážky do druhého prostoru,
- I_6 ...intenzita zvukové vlny vedené do jiných částí konstrukcí překážky,
- I_7 ...intenzita přeměněné části zvukové vlny na teplo. [5]

1.1.7 Činitelé zvuku

Podle bilance akustické intenzity dopadu zvukové vlny na překážku, z obrázku 1.2, lze odvodit definice činitelů zvuku.

Činitel zvukové pohltivosti α [-] charakterizuje schopnost tělesa pohlcovat zvukové vlny. Činitel zvukové pohltivosti lze vyjádřit rovnicí [5]:

$$\alpha = \frac{I_2}{I_0}, \quad (1.9)$$



Obr. 1.2: Bilance akustické intenzity při dopadu zvukové vlny na překážku [5]

kde I_2 je intenzita pohlcené části zvukové vlny a I_0 je celková intenzita zvukové vlny dopadající na překážku.

Ze zákona o zachování energie vyplývá, že činitel zvukové pohltivosti α může nabývat hodnot z intervalu $< 0; 1 >$. V případě, že překážka pohltí veškerou akustickou energii, je činitel zvukové pohltivosti $\alpha = 1$. Materiály nejvhodnější k pohlcování akustické energie jsou zejména porézní materiály a materiály s vláknitou strukturou. [5]

V případě, že je veškerá energie odražena od povrchu překážky, je činitel zvukové pohltivosti $\alpha = 0$. Činitel akustické pohltivosti je kromě materiálu překážky výrazně závislý na frekvenci, ovlivňuje jej také tloušťka materiálu či teplota.

Dalším činitelem je **činitel zvukové odrazivosti** β [-], který je dán poměrem I_1 intenzity odražené části zvukové vlny a I_0 celkové intenzity zvukové vlny dopadající na překážku [5]:

$$\beta = \frac{I_1}{I_0}, \quad (1.10)$$

Obdobně jako u činitele zvukové pohltivosti může činitel zvukové odrazivosti nabývat hodnot z intervalu $< 0; 1 >$. Činitel odrazivosti zvuku $\beta = 1$ charakterizuje překážku s dokonalou odrazivostí. [5]

Naopak v případě, že dojde k pohlcení veškeré akustické energie překážkou je

činitel akustické odrazivosti $\beta = 0$. [5]

Na základě zákona o zachování energie platí následující vztah mezi činitelem akustické pohltivosti a akustické odrazivosti [5]:

$$\alpha + \beta = 1. \quad (1.11)$$

Ve většině případech dochází k částečnému pohlcení a částečnému odrazu, v závislosti na překážce.

Z bilance na obrázku 1.2 je zřejmé, že se část překážkou pohlcené energie transformuje na teplo, další část se šíří formou vibrací do jiných konstrukcí překážky.

S tímto souvisí **činitel zvukové průzvučnosti** τ [-] a **činitel přenosové ztráty** ϵ [-], které jsou definovány následujícími vztahy [5]:

$$\tau = \frac{I_3}{I_0} = \frac{I_4 + I_5}{I_0}, \quad (1.12)$$

$$\epsilon = \frac{I_7}{I_0}, \quad (1.13)$$

kde I_3 je celková intenzita části zvukové vlny vyzářené za překážku, I_0 je celková intenzita zvukové vlny dopadající na překážku, I_4 je intenzita zvukové vlny, která prošla skrze póry překážky, I_5 je intenzita zvukové vlny vyzářené v důsledku ohybového kmitání překážky do druhého prostoru a I_7 je intenzita přeměněné části zvukové vlny na teplo. [5]

V případě, že je zanedbána intenzita zvuku I_6 , tedy intenzitu zvukové vlny vedené do jiných částí konstrukcí překážky, lze použít následující vztahy [5]:

$$\beta + \tau + \epsilon = 1, \quad (1.14)$$

$$\alpha = \tau + \epsilon. \quad (1.15)$$

1.2 Impedanční trubice B&K 4206-T

V této práci byla pro měření použita impedanční trubice 4206-T vyráběné firmou Brüel & Kjær, kterou můžeme vidět na obrázku 1.3.

Tato impedanční trubice dokáže měřit veškeré parametry potřebné k určení akustické specifikaci materiálu. Těmito parametry jsou:

- Činitel zvukové odrazivosti,
- Činitel zvukové pohltivosti,
- Činitel přenosových ztrát,
- Akustická impedance,



Obr. 1.3: Impedanční trubice B&K 4206-T [6]

- Akustická admitance. [6]

Na obrázku 1.3 lze vidět, že kruhová trubice má dva druhy průměrů:

- průměr 100 mm - tento rozměr se používá pro měření ve frekvenčním rozsahu od 50 Hz do 1,6 kHz,
- průměr 29 mm - používá se pro měření ve frekvenčním rozsahu od 500 Hz do 6,4 kHz. [6]

Velká trubice je vybavena třemi místy pro umístění mikrofonů. V závislosti na zvoleném místě se mění také frekvenční rozsah, který je možné měřit (blíže popsáno v kapitole 1.4.1). Malá trubice je vybavena pouze dvěma pozicemi pro umístění mikrofonu. [6]

Firma B&K rovněž vyrábí akustické trubice o průměru 63,5 mm uzpůsobené pro frekvenční rozsah od 100 Hz do 3,2 kHz, ten však není součástí balíčku typu 4206-T. [6]

Velká trubice je vybavena reproduktorem společně s frekvenčním váhovým modulem, který umožňuje výběr ze tří módů [6]:

- High-pass - používá se pro měření při vysokých frekvencích s malým průměrem trubice.
- Linear - používá se pro měření s velkým průměrem trubice.
- Low-Pass - používá se pro vyšší přesnost při měření pod 100Hz. [6]

Dle potřeby měření je zvolena doplňková trubice s vhodným průměrem, která je instalována na hlavní trubici s reproduktorem.

Více informací o impedanční trubici lze nalézt v katalogu. [6]

1.3 Druhy měření pomocí impedanční trubice

Pomocí impedanční trubice můžeme měřit různé parametry materiálů, které byly již zmíněny v předchozí kapitole, z nichž hlavními jsou činitel pohltivosti a činitel přenosových ztrát. Na základě toho jaký parametr chceme měřit, volíme druh měření.

Pro určení činitele pohltivosti existují dvě metody:

- metoda poměru stojaté vlny (popsáno v normě ČSN ISO 10534-1),
- metoda přenosové funkce (popsáno v normě ČSN ISO 10534-2 [8]).

Diplomová práce je výhradně zaměřena na měření činitele pohltivosti materiálů a to pomocí metody přenosové funkce. Tato metoda bude podrobně popsána v následujících kapitolách.

1.4 Metoda přenosové funkce

Tato kapitola a následující podkapitoly vychází z normy ČSN ISO 10534-2 [8]. V této normě je podrobně popsán postup metody přenosové funkce při měření pomocí impedanční trubice, ale také požadavky na samotnou konstrukci impedanční trubice.

1.4.1 Pracovní kmitočtový rozsah trubice

Tato podkapitola je věnována výpočtu pracovního frekvenčního rozsahu jednotlivých trubice. Norma ČSN ISO 10534-2 [8] udává výpočet kmitočtového rozsahu trubice následovně:

$$f_d < f < f_h \quad (1.16)$$

kde f_d [Hz] je dolní pracovní kmitočet trubice, f [Hz] je provozní kmitočet trubice a f_h [Hz] je horní pracovní kmitočet trubice.

Podmínky pro určení horní hranice pracovního kmitočtu kruhové trubice jsou definovány vztahy:

$$f_h < \frac{0,58 \cdot c_0}{d}, \quad (1.17)$$

$$f_h < \frac{0,45 \cdot c_0}{s}, \quad (1.18)$$

kde je d [m] vnitřní průměr použité trubice, s [m] je vzdálenost mezi mikrofony a c_0 [m/s] reprezentuje rychlost zvuku vypočtená podle vzorce 1.28.

Dolní kmitočtová mez f_d závisí na vzdálenosti mezi mikrofony a přesností analyzátoru. Všeobecným pravidlem pro výpočet dolní hranice kmitočtového rozsahu je, že vzdálenost mikrofونů od sebe by měla překročit 5 % vlnové délky odpovídající příslušnému dolnímu kmitočtu.

Z tohoto vyplývá vztah:

$$f_d > 0,05 \cdot \frac{c_0}{s} \quad (1.19)$$

Při dosazení do předchozích vztahů (a předpokladu, že je teplota okolí 20 °C) rozsahy možných měřitelných frekvencí u příslušných použitých trubíc vycházejí následovně:

- Malá trubice, kde je vzdálenost mezi mikrofony $s=0,02$ m a průměr trubice $d=0,029$ m odpovídá frekvenčnímu rozsahu 857 Hz - 6860 Hz.
- Velká trubice, kde je vzdálenost mezi mikrofony $s=0,05$ m a průměr trubice $d=0,1$ m odpovídá frekvenčnímu rozsahu 343 Hz - 1989 Hz.
- Velká trubice, kde je vzdálenost mezi mikrofony $s=0,1$ m a průměr trubice $d=0,1$ m odpovídá frekvenčnímu rozsahu 171,5 Hz - 1543 Hz.

Z tohoto vyplývá, že za využití této metody lze měřené vzorky testovat ve frekvenčním rozsahu, který pro velkou trubici odpovídá zaokrouhlené hodnotě 180 Hz - 1980 Hz a pro malou trubici 860 Hz - 6860 Hz. Vypočtené hodnoty rozsahů neodpovídají hodnotám rozsahu udávaným výrobcem trubice (viz. kapitola 1.2).

1.4.2 Princip metody

Do tuhé, hladké, přímé, utěsněné trubice je na jednom konci upevněn zkušební vzorek. Za pomocí reproduktoru na druhém konci jsou uvnitř trubice buzeny rovinné vlny (náhodného signálu, pseudonáhodného sledu nebo přelívaného tónu). Buzený signál je měřen na dvou místech mezi reproduktorem a vzorkem. Ze signálů naměřených mikrofony se následně vypočítá komplexní akustická přenosová funkce, která je poté použita pro výpočet komplexního činitele odrazu při kolmém dopadu, na základě něhož lze stanovit činitel zvukové pohltivosti a akustickou impedanci zkušební vzorku. Tyto veličiny jsou funkcí kmitočtu.

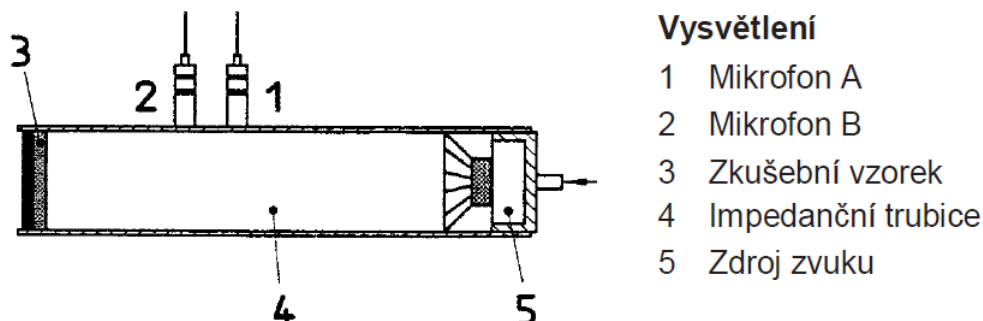
Měření lze provést dvěma metodami:

1. Metoda dvou mikrofونů - metoda vyžadující korekční postup k minimalizaci rozdílu v amplitudových a fázových charakteristikách mezi mikrofony.
2. Metoda jednoho mikrofону - metoda nevyžaduje korekci neshody mikrofону, ale může být náročnější na čas a výpočty.

Pro účely této práce byla zvolena metoda dvou mikrofونů, která bude blíže specifikována v následující kapitole.

1.5 Měřicí postup metody dvou mikrofonů

V této kapitole budou shrnuty postupy a výpočty metody dvou mikrofonů. Na obrázku 1.4 můžeme vidět rozložení při dvou-mikrofonovém měření.



Obr. 1.4: Schematický diagram dvou-mikrofonového měření [8]

1.5.1 Korekce neshody mikrofonů

Aby bylo měření činitele pohltivosti korektní, je třeba uvažovat korekci neshody mikrofonů, která je řešena dvojím měřením, tedy vzájemným prohozením mikrofonů na dvou místech měření.

Po prvním měření se vypočte přenosová funkce mikrofonů v normálním rozložení H_{12}^I . Měření v konfiguraci I je uvedeno na obrázku 1.5.

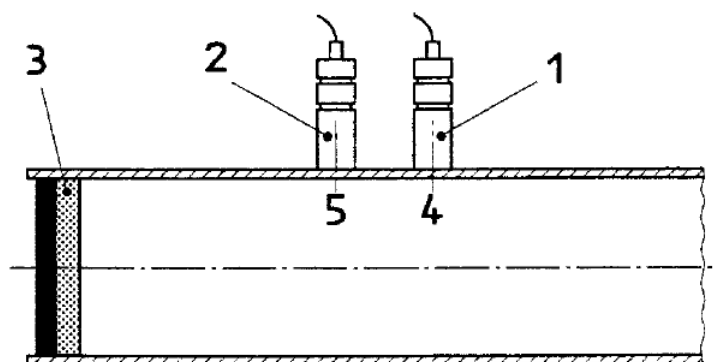
Poté dojde k vzájemnému prohození mikrofonů, proběhne další měření v prohozené konfiguraci II a z těchto signálů se opět vypočte přenosová funkce mikrofonů v prohozeném rozložení H_{12}^{II} . Měření v konfiguraci II je znázorněno na obrázku 1.6.

Přenosové funkce musí být v obou případech vypočteny stejným způsobem. Postup výpočtu přenosové funkce je uveden v kapitole .

Při vzájemné záměně mikrofonů je potřeba zajistit, aby mikrofon A v konfiguraci II (prohozené rozložení mikrofonů) zaujímal stejné místo jako mikrofon B v konfiguraci I (normální rozložení mikrofonů) a obráceně.

Po změření signálu a výpočtu přenosových funkcí se výsledná přenosová funkce vypočítá pomocí následující rovnice:

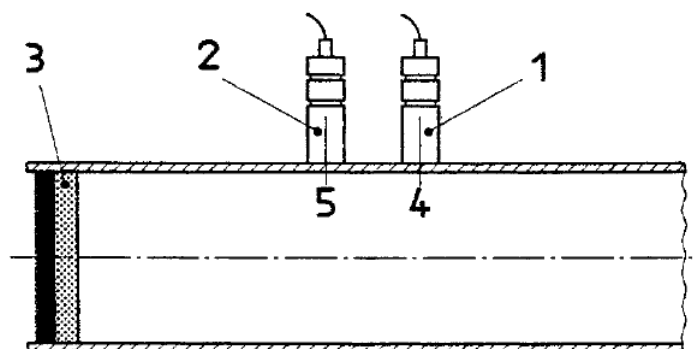
$$H_{12} = (H_{12}^I \cdot H_{12}^{II})^{\frac{1}{2}} \quad (1.20)$$



Vysvětlení

- | | |
|--------------|-------------------|
| 1 Mikrofon A | 3 Zkušební vzorek |
| 2 Mikrofon B | 4 Místo 1 |
| | 5 Místo 2 |

Obr. 1.5: Schematický diagram dvou-mikrofonového měření - normálního rozložení mikrofonů (konfigurace I) [8]



Vysvětlení

- | | |
|--------------|-------------------|
| 1 Mikrofon B | 3 Zkušební vzorek |
| 2 Mikrofon A | 4 Místo 1 |
| | 5 Místo 2 |

Obr. 1.6: Schematický diagram dvou-mikrofonového měření - normálního rozložení mikrofonů (konfigurace II)[8]

1.5.2 Výpočet přenosové funkce

Komplexní akustickou přenosovou funkci mezi mikrofony lze určit třemi následujícími způsoby:

$$H_{12} = \frac{S_{12}}{S_{11}} = \frac{p_2 \cdot p_1^*}{p_1 \cdot p_1^*} = |H_{12}| \cdot e^{j\Phi} = H_r + jH_i, \quad (1.21)$$

$$H_{12} = \frac{S_{22}}{S_{21}} = |H_{12}| \cdot e^{j\Phi} = H_r + jH_i, \quad (1.22)$$

$$H_{12} = \left[\frac{S_{12}}{S_{11}} \cdot \frac{S_{22}}{S_{21}} \right]^{\frac{1}{2}} = |H_{12}| \cdot e^{j\Phi} = H_r + jH_i, \quad (1.23)$$

kde H_{12} je komplexní přenosová funkce, H_r je reálná část přenosové funkce, H_i je imaginární část přenosové funkce, S_{12} a S_{21} reprezentuje vzájemné spektrum mezi naměřenými signály, S_{11} a S_{22} reprezentuje autospektrum naměřeného signálu, p_1 a p_2 je Fourierova transformace příslušného časového průběhu akustického tlaku, p_1^* komplexně sdružená hodnota p_1 a Φ [rad] je fáze přenosové funkce.

Rovnice 1.21 se použije v případě, kdy není šum na vstupu ani na výstupu. Rovnice 1.22 se doporučuje použít v případě, kdy na vstupu existuje šum. Rovnice 1.23 se doporučuje použít v případě, kdy šum existuje na vstupu i na výstupu.

1.5.3 Výpočet činitele odrazu

Pomocí následující rovnice lze vypočítat činitel odrazu při kolmém dopadu:

$$\beta = \left(\frac{H_{12} - H_I}{H_R - H_{12}} \right) \cdot e^{j2k_0 \cdot x_1} = |\beta| \cdot e^{j\Phi_r} = \beta_r + j\beta_i, \quad (1.24)$$

kde β_r je reálná složka činitele odrazu, β_i je imaginární složka činitele odrazu, x_1 je vzdálenost mezi vzdálenějším místem mikrofону a vzorkem umístěným v trubici, Φ_r je fázový úhel činitele odrazu, H_I je přenosová funkce pro samostatnou dopadající vlnu, H_R je přenosová funkce pro samostatnou odrážející se vlnu a k_0 je komplexní vlnové číslo.

Komplexní vlnové číslo je definováno následujícím vztahem:

$$k_0 = k'_0 - jk''_0, \quad (1.25)$$

kde k'_0 je reálná složka vlnového čísla a k''_0 je komplexní složka vlnového čísla, která reprezentuje činitele zeslabení a má jednotku neper na metr.

Reálná složka komplexního vlnového čísla je definována následujícím vztahem:

$$k'_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}, \quad (1.26)$$

kde λ_0 [m] je vlnová délka, která je definována jako:

$$\lambda_0 = \frac{c_0}{f}, \quad (1.27)$$

kde f [Hz] je kmitočet a c_0 [m/s] je rychlost zvuku při specifické teplotě okolí, která se vypočítá jako:

$$c_0 = 343,2 \cdot \sqrt{\frac{T_K}{293}}, \quad (1.28)$$

kde T_K [K] je teplota okolí.

Imaginární složka komplexního vlnového čísla k_0'' je určena dle vztahu:

$$k_0'' = 1,94 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{\sqrt{f}}{c_0 \cdot d}, \quad (1.29)$$

kde c_0 [m/s] je rychlost zvuku za specifikované teploty, f [Hz] je kmitočet a d [m] je průměr trubice.

Přenosové funkce pro samostatnou dopadající a odrážející se vlnu H_I a H_R jsou definovány následujícími vztahy:

$$H_I = e^{-jk_0 \cdot s}, \quad (1.30)$$

$$H_R = e^{jk_0 \cdot s}, \quad (1.31)$$

kde s [m] reprezentuje vzdálenost mezi místy umístění mikrofonů.

Činitel odrazu se po dosazení za H_I a H_R vypočítá podle následujícího vztahu:

$$\beta = \left(\frac{H_{12} - e^{-jk_0 \cdot s}}{e^{jk_0 \cdot s} - H_{12}} \right) \cdot e^{j2k_0 \cdot x_1} = |\beta| \cdot e^{j\Phi_r}. \quad (1.32)$$

1.5.4 Výpočet činitele zvukové pohltivosti

Činitel zvukové pohltivosti α je stanoven vztahem:

$$\alpha = 1 - |\beta|^2, \quad (1.33)$$

kde β reprezentuje činitele odrazivosti.

1.5.5 Výpočet normované akustické impedance

Normovanou akustickou impedanci Z lze vypočítat dle následujícího vztahu:

$$\frac{Z}{\rho \cdot c_0} = \frac{R}{\rho \cdot c_0} + j \frac{X}{\rho \cdot c_0} = \frac{1 + \beta}{1 - \beta}, \quad (1.34)$$

kde c_0 [m/s] je rychlost zvuku, R je reálná složka normované akustické impedance, X je imaginární složka akustické impedance a ρ je hustota vzduchu, která se na základě teploty a atmosferického tlaku okolí vypočítá pomocí následujícího vztahu:

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{p_a \cdot T_0}{p_0 \cdot T}, \quad (1.35)$$

za předpokladu: $\rho_0 = 1,186 \text{ kg/m}^3$, $p_0 = 101,325 \text{ kPa}$, $T_0 = 293 \text{ K}$. T_K [K] je teplota okolí a p_a [kPa] je atmosferický tlak okolí.

1.5.6 Výpočet normované akustické admitance

Normovaná akustická admitance G se vypočítá jako převrácená hodnota normované akustické impedance Z :

$$G \cdot \rho \cdot c_0 = g \cdot \rho \cdot c_0 - jb \cdot \rho \cdot c_0 = \frac{\rho \cdot c_0}{Z}, \quad (1.36)$$

kde g je reálná složka normované akustické admitance a b je imaginární složka normované akustické admitance.

2 Měření pomocí softwaru PULSE LabShop

Dle zadání této práce bylo provedeno měření pomocí impedanční trubice 4206 s využitím hardwarových a softwarových nástrojů společnosti Brüel & Kjær. V této kapitole budou blíže specifikováno použité vybavení a dílčí kroky měření.

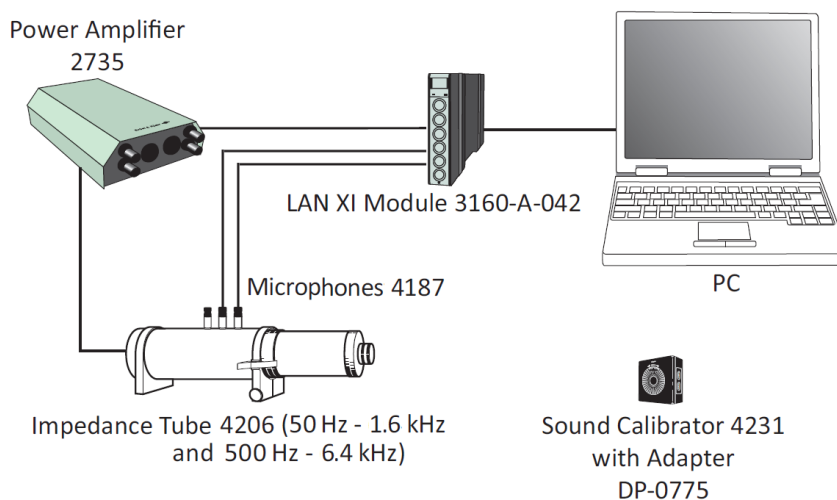
Na základě konzultace s vedoucím práce bylo rozhodnuto, že měřená data budou hodnocena na základě dvou parametrů a to činitele pohltivosti materiálu a činitele odrazivosti materiálu. Tyto měření a výpočty budou v kapitole 4 porovnávána s vlastní realizací měření a výpočtů.

Měření budou provedena s velkou i malou trubicí na vybraných vzorcích uvedených v kapitole 2.1.6.

Program PULSE LabShop používá k výpočtu činitele pohltivosti materiálu metodu přenosové funkce, která je popsána v kapitole 1.4.

2.1 Hardwarové a softwarové nástroje

Na obrázku 2.1 je uvedeno schéma použitých zařízení, která budou níže stručně popsána.



Obr. 2.1: Schematický diagram použitých zařízení při měření [6]

2.1.1 PC s potřebným softwarem

Pro uskutečnění měření byl využito softwarových prostředků společnosti Brüel & Kjær, konkrétně se jednalo o systém PULSE LabShop. V tomto prostředí byl po-

užit program zhotovený rovněž touto společností. Program je uzpůsoben k měření jednotlivých parametrů materiálu (pro potřeby diplomové práce zvolené parametry: činitel pohltivosti α a činitel odrazivosti β materiálu).

Tento program, společně s ostatními programy zabývajícími se měřením akustických veličin, spadá do balíčku typu 7758. Postup měření s využitím systému PULSE LabShop bude popsán v kapitole 2.2 [6].

2.1.2 Systém sběru dat LAN XI Module 3160-A-04/2

LAN XI Module 3160-A-042 je multifunkční data acquisition modul (DAQ), který je vhodný pro práci v akustice či vibrodiagnostice. Modul je vybaven čtyřmi vstupními a dvěma výstupními kanály. Toto zařízení bylo využito pro sběr dat z mikrofónů a generování signálu pro reproduktor umístěný v impedanční trubici. Podrobné informace o tomto zařízení jsou uvedeny v manuálu zařízení [9]. Zařízení lze vidět na obrázku 2.2.



Obr. 2.2: Multifunkční DAQ modul LAN XI Module 3160-A-04/2

2.1.3 Zesilovač B&K typ 2735

Pro zesílení signálu generovaného v DAQ byl použit 35W zesilovač od společnosti Brüel & Kjær. Zesílený signál byl poté veden do reproduktoru impedanční trubice.

Podrobné informace o tomto zařízení jsou uvedeny v manuálu [10]. Zařízení lze vidět na obrázku 2.3



Obr. 2.3: Zesilovač B&K typ 2735 [10]

2.1.4 Mikrofony B&K typu 4187

Pro měření akustického tlaku uvnitř impedanční trubice byl využit mikrofon typu 4187. Tento specifický typ mikrofonu je speciálně vyráběn pro využití měření signálů uvnitř impedanční trubice. Mikrofon je používán společně se signálovým předzesilovačem 2670. Podrobné informace lze nalézt v katalogu [11].

2.1.5 Mikrofonový kalibrátor typu 4231

Pro kalibraci mikrofónů byl využit mikrofonový kalibrátor typu 4231. Kalibrátor generuje signál o frekvenci 1 kHz a amplitudě 94 dB nebo 114 dB. Bližší informace lze dohledat v katalogu [12]. Kalibrátor je zobrazen na obrázku 2.4.



Obr. 2.4: Mikrofonový kalibrátor typu 4231 [12]

2.1.6 Vzorky materiálu použité pro měření

Měření činitele pohltivosti bylo prováděno na referenčním vzorku dodaném výrobcem impedanční trubice, který má přesně definovanou charakteristiku činitele pohltivosti. Tyto vzorky jsou vyrobeny ze stejného materiálu a jsou přizpůsobeny pro měření velkou i malou trubicí. Referenční vzorek určený pro měření pomocí velké trubice je na levé straně obrázku 2.5 a vzorek určený pro měření pomocí malé trubice na straně pravé.



Obr. 2.5: Referenční vzorky určené pro měření pomocí velké a malé trubice

Pro měření pomocí velké trubice byl rovněž použit vzorek stropního panelu od společnosti Knauf (dále označován jako černý vzorek). Tento vzorek je na obrázku 2.6



Obr. 2.6: Černý vzorek určen pro měření pomocí velké trubice

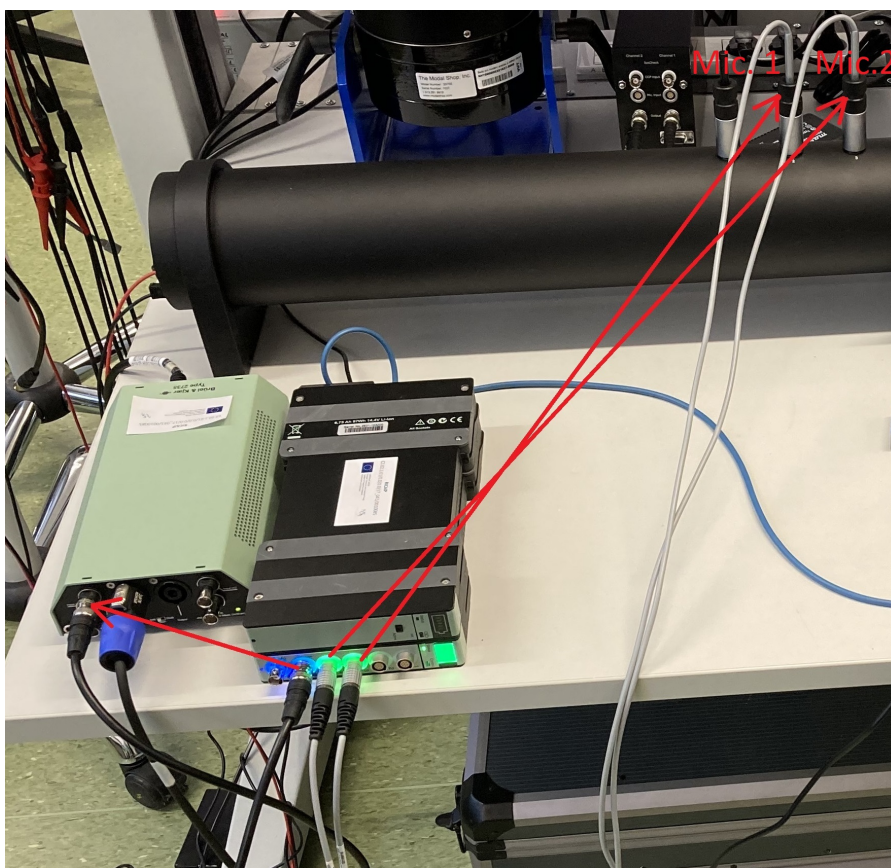
2.2 Průběh měření pomocí softwaru PULSE LabShop

V této kapitole bude blíže popsán postup měření softwarem PULSE LabShop s využitím konfigurace nástrojů popsaných v předešlých kapitolách. Níže popsané ukázkové měření bylo provedeno s využitím velké impedanční trubice.

Stejný postup byl aplikován i v případě použití malé trubice v kombinaci s referenčním vzorkem a velké trubice s černým vzorkem, došlo k pouze k upravě nastavených parametrů měření. Data naměřená pomocí programu PULSE LabShop budou zobrazena a porovnána v kapitole 4. Při měření se postupovalo dle následujících kroků:

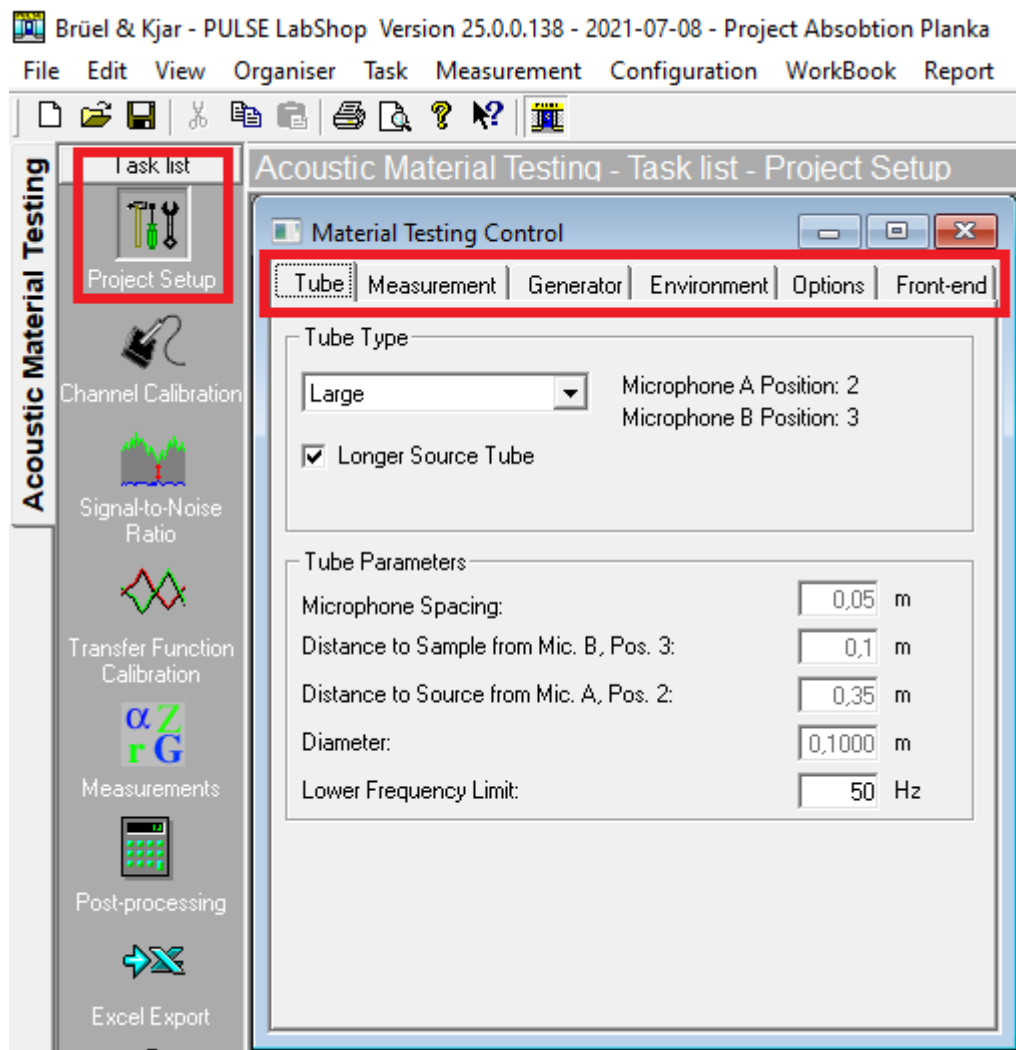
1. Zapojení zařízení - na obrázku 2.7 je šipkami znázorněno zapojení mikrofónů na kanály DAQ a propojení DAQ se zesilovačem. Mikrofon 1 byl připojen na třetí vstupní kanál DAQ a mikrofon 2 byl připojen na čtvrtý vstupní kanál DAQ. Zesilovač byl připojen na první výstupní kanál DAQ. DAQ byl s počítačem spojen s využitím LAN.

Při měření s malou trubicí byly mikrofony instalovány na příslušná místa malé trubice a otvory velké trubice byly uzavřeny tzv. falešnými mikrofony.



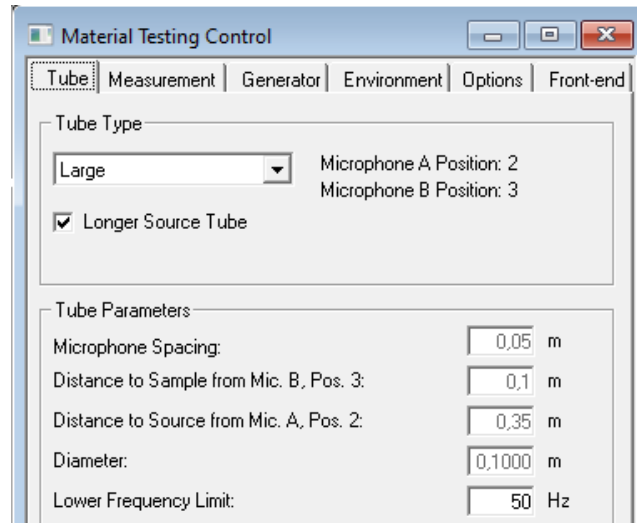
Obr. 2.7: Ukázka zapojení kanálů DAQ pro velkou trubicí

2. Spuštění programu - v adresáři systému PULSE byla následovaná tato souborová cesta: PULSE/Applications/Acoustic Material Testing in Tube/AMT Normal Incidence Absorption.
3. Nastavení parametrů měření - v levé části okna lze vidět panel **Task list**, kde lze listovat mezi jednotlivými záložkami fází měření. Volbou tlačítka *Projekt Setup* je uživateli umožněno nastavení parametrů měření (obrázek 2.8).



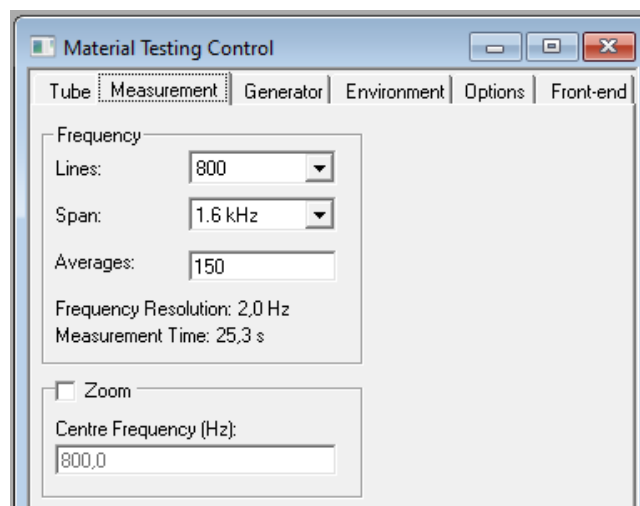
Obr. 2.8: PULSE Software - Měření absorpčního koeficientu krok 3

4. Nastavení v záložce *Tube* - tato záložka umožňuje volbu typu trubice. Pro účely ukázkového měření s velkou trubicí byl zvolen *Tube Type-Large* (pro měření s malou trubicí - *Tube Type-Small*). V okně jsou rovněž uvedeny parametry trubice, které jsou nastaveny automaticky dle zvoleného typu trubice (obrázek 2.9).



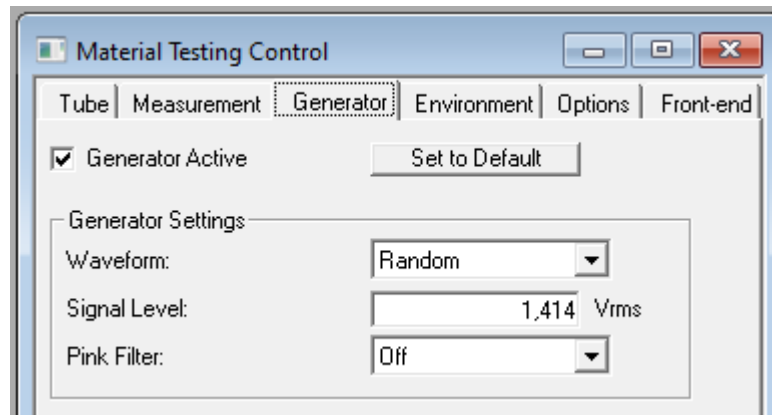
Obr. 2.9: PULSE Software - Měření absorpčního koeficientu krok 4

5. Nastavení v záložce *Measurement* - tato záložka nabízí nastavení parametru rozlišitelnosti *Lines*, frekvenčního rozsahu *Span* a průměrování *Averages* (obrázek 2.10).



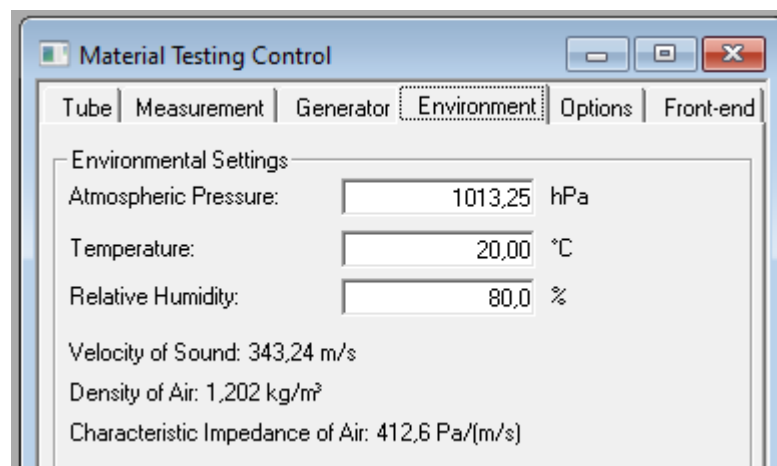
Obr. 2.10: PULSE Software - Měření absorpčního koeficientu krok 5

6. Nastavení v záložce *Generator* - tato záložka umožňuje volbu druhu generovaného signálu, amplitudy signálu a použitého filtru (obrázek 2.11).



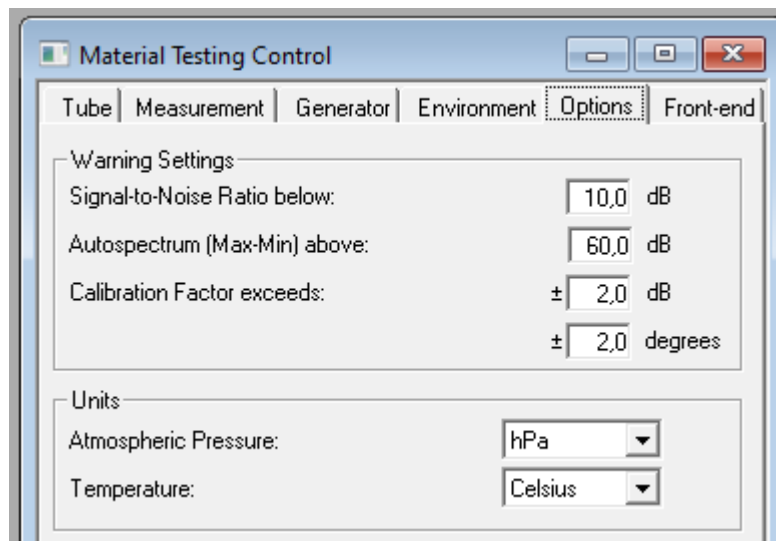
Obr. 2.11: PULSE Software - Měření absorpčního koeficientu krok 6

7. Nastavení v záložce *Environment* - této záložce je možnost upřesnění parametrů prostředí a to atmosferický tlaku, teploty a vlhkosti (obrázek 2.12).



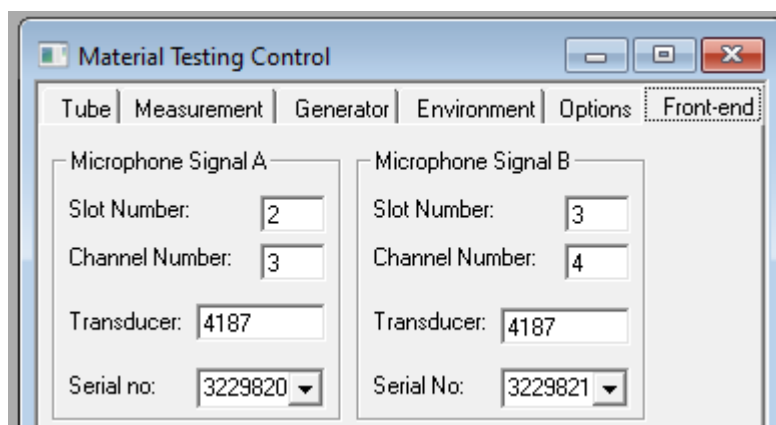
Obr. 2.12: PULSE Software - Měření absorpčního koeficientu krok 7

- Nastavení v záložce *Options* - tato záložka umožňuje nastavení varovných limitů a volbu jednotky atmosferického tlaku a teploty (obrázek 2.13).



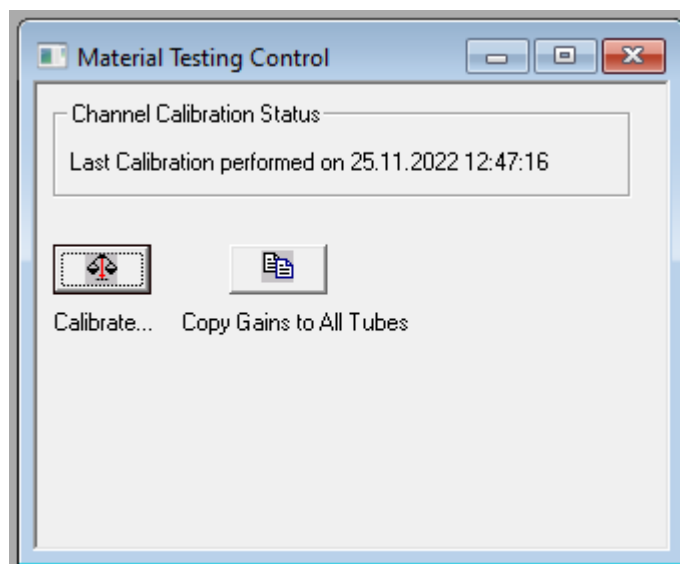
Obr. 2.13: PULSE Software - Měření absorpčního koeficientu krok 8

- Nastavení v záložce *Front-end* - v této záložce byly zvoleny použité mikrofony, jejich výrobní čísla, umístění a číslo kanálu, ke kterému byly připojeny (obrázek 2.14).



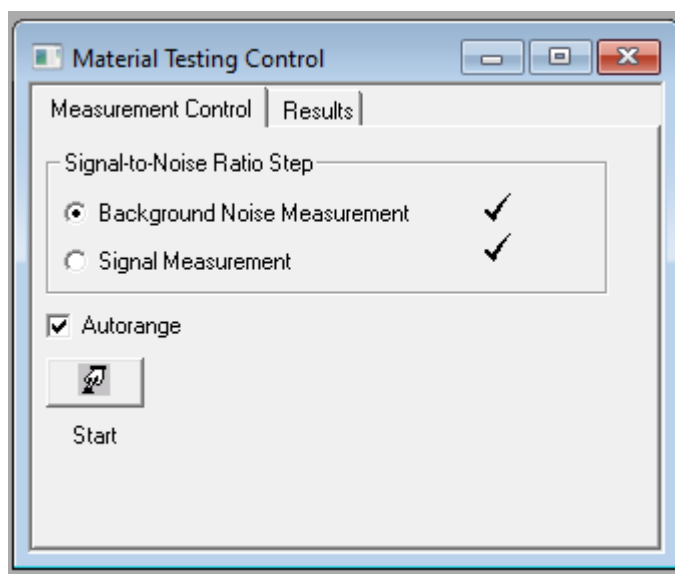
Obr. 2.14: PULSE Software - Měření absorpčního koeficientu krok 9

- Kalibrace mikrofونů - v bočním panelu *Task list* byla zvolena záložka *Channel Calibration* a následně ikona *Calibrate*, která umožňuje (po zvolení příslušného kalibračního zařízení) zkalibrování použitých mikrofونů (obrázek 2.15).



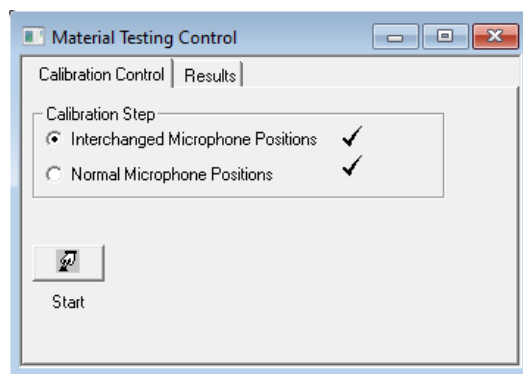
Obr. 2.15: PULSE Software - Měření absorpčního koeficientu krok 10

11. Měření poměru signálu a hluku - v panelu **Task list** byla zvolena záložka *Signal-to-Noise Ratio*. Po zakliknutí příslušných výběrových tlačítek proběhla dvě měření, měření okolního hluku a měření signálu (obrázek 2.16).



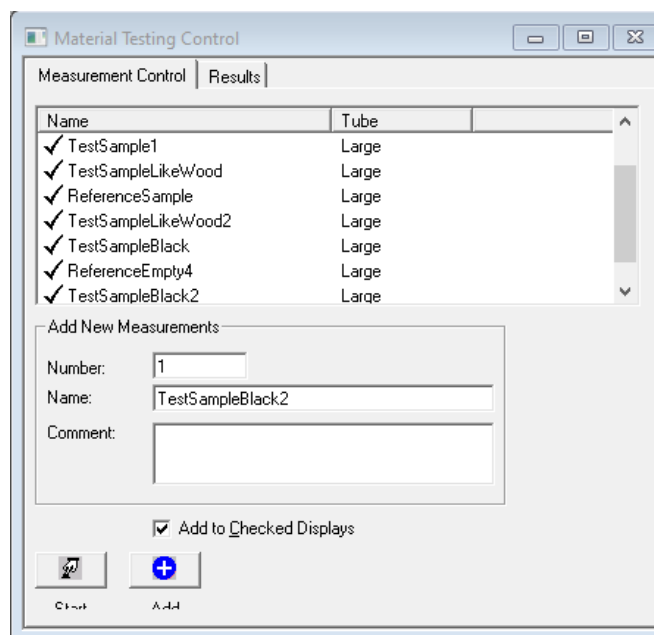
Obr. 2.16: PULSE Software - Měření absorpčního koeficientu krok 11

12. Kalibrace přenosové funkce - v panelu **Task list** byla zvolena záložka *Transfer Function Calibration*. Pro výpočet přenosové funkce bylo potřeba provést dvě měření: s normální pozicí mikrofonů a s prohozenými mikrofony (obrázek 2.17).



Obr. 2.17: PULSE Software - Měření absorpčního koeficientu krok 12

13. Měření - v panelu **Task list** byla zvolena záložka *Measurement*. V tomto kroku proběhla jednotlivá měření odlišená volbou názvu. Veškerá naměřená data byla v této záložce k nahlédnutí (obrázek 2.18).



Obr. 2.18: PULSE Software - Měření absorpčního koeficientu krok 13

14. Export dat - v posledním kroku byla data exportována do tabulek MS Excell a to po zvolení záložky *Excel Export* v panelu **Task list**.

3 Návrh a realizace měřicího systému

V této kapitole budou popsány požadavky na měřicí systém, který bude v rámci této práce vytvořen. Rovněž zde budou zmíněna zařízení a software použitý ke zhotovení měření a popis vytvořeného měřicího systému.

V rámci praktické části diplomové práce budou také provedena měření prostřednictvím navrženého a zrealizovaného měřicího systému, na vzorcích popsanych v kapitole 2.1.6, za účelem ověření jeho funkčnosti. Naměřená a vypočtená data budou následně porovnána a zhodnocena s výstupy ostatních metod měření a výpočtů zhodnocena v kapitole 4.

3.1 Požadavky na měřicí systém

Po konzultaci s vedoucím práce bylo rozhodnuto, že stěžejními parametry na základě, kterých budou výstupy měření hodnoceny jsou: činitel pohltivosti materiálu α a činitel odrazivosti materiálu β . Navržený otevřený měřicí systém bude mít za úkol měřit parametr činitele pohltivosti s využitím jak velké impedanční trubice, tak malé impedanční trubice B&K 4206, z čehož vyplývá, že frekvenční rozsah měření bude 50 Hz až 6,4 kHz. Systém bude splňovat následující body:

- Možnost nastavení parametrů trubice a parametrů okolního prostředí,
- Měření potřebných dat,
- Výpočet činitele zvukové odrazivosti a činitele zvukové pohltivosti,
- Zobrazování grafu činitele zvukové odrazivosti a činitele zvukové pohltivosti,
- Ukládání naměřených dat do tabulek pro použití v programu Excel.

3.2 Software

Pro zhotovení programu sloužícího k měření a výpočtům byl použit program LabVIEW od společnosti National Instruments (NI). Naměřená data byla rovněž zpracována pro porovnání pomocí programu Matlab. Program Matlab byl použit jako další prostředek pro porovnání naměřených a vypočtených dat.

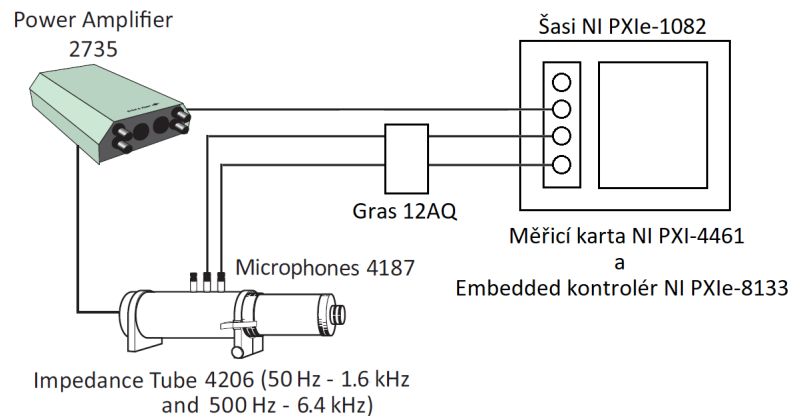
3.3 Použitá zařízení

K měření byly využity následující zařízení:

- Impedanční trubice B&K 4206 (popsáno v kapitole 1.2),
- Zesilovač B&K typu 2735 (popsáno v kapitole 2.1.3),
- Mikrofony B&K typu 4187 (popsáno v kapitole 2.1.4),

- Vzorky materiálu (popsáno v kapitole 2.1.6),
- Univerzální napájecí modul GRAS 12AQ,
- Šasi NI PXIe-1082,
- Embedded kontrolér NI PXIe-8133,
- Měřicí karta NI PXI-4461.

Na obrázku 3.1 můžeme vidět konfiguraci zapojení zařízení.



Obr. 3.1: Schematický diagram zapojení vlastní realizace měření [6]

Zařízení, která nebyla v předešlých částech práce popsána, budou blíže specifikována v následujících podkapitolách.

3.3.1 Univerzální napájecí modul GRAS 12AQ

Obecně se tento napájecí modul používá k dvoukanálovému přesnému měření. V tomto projektu byl použit z důvodu potřeby polarizace mikrofonů. Toto zařízení rovněž umožňuje zesílení signálu z mikrofonů. Signál z napájecího modulu byl dále zpracováván pomocí měřicí karty NI PXI-4461. Detailní informace o tomto zařízení jsou uvedeny v manuálu [13]. Zařízení je ukázáno na obrázku 3.2.

3.3.2 Šasi NI PXIe-1082

Šasi NI PXIe-1082 slouží jako prostředek, do kterého jsou instalovány karty potřebné k měření a výpočtům. Konkrétně se jedná o měřicí kartu NI PXI-4461 a Controller NI PXIe-8133. Tento model je celkově vybaven osmi místy pro vložení modulů, z toho jedno je dedikováno k vložení embedded kontroléru. Bližší specifikace tohoto zařízení je uvedena v manuálu [15]. Zařízení lze vidět na obrázku 3.3.



Obr. 3.2: Univerzální napájecí modul GRAS 12AQ [13]



Obr. 3.3: Šasi NI PXIe-1082 [14]

3.3.3 Embedded kontrolér NI PXIe-8133

Jak již bylo zmíněno, toto zařízení bylo nainstalováno uvnitř šasi NI PXIe-1082. Sloužilo k provádění výpočtů z naměřených dat. V kontroléru byl nainstalován operační systém společně s vývojovým prostředím LabVIEW, ve kterém byl vytvořen program dle požadavků zadání diplomové práce. Zařízení je zobrazeno na obrázku 3.4.

3.3.4 Měřicí karta NI PXI-4461

Měřicí karta disponuje dvěma vstupními a dvěma výstupními kanály. Pomocí obou vstupních kanálů byla měřena data z mikrofonů. Na jednom z výstupních kanálů byl generován signál určený k buzení reproduktoru v impedanční trubici. Měřicí karta NI PXI-4461 byla rovněž nainstalována uvnitř šasi NI PXIe-1082. Bližší informace o tomto zařízení jsou uvedeny v manuálu [18]. Zařízení lze vidět na obrázku 3.5.



Obr. 3.4: Embedded kontrolér NI PXIe-8133 [16]



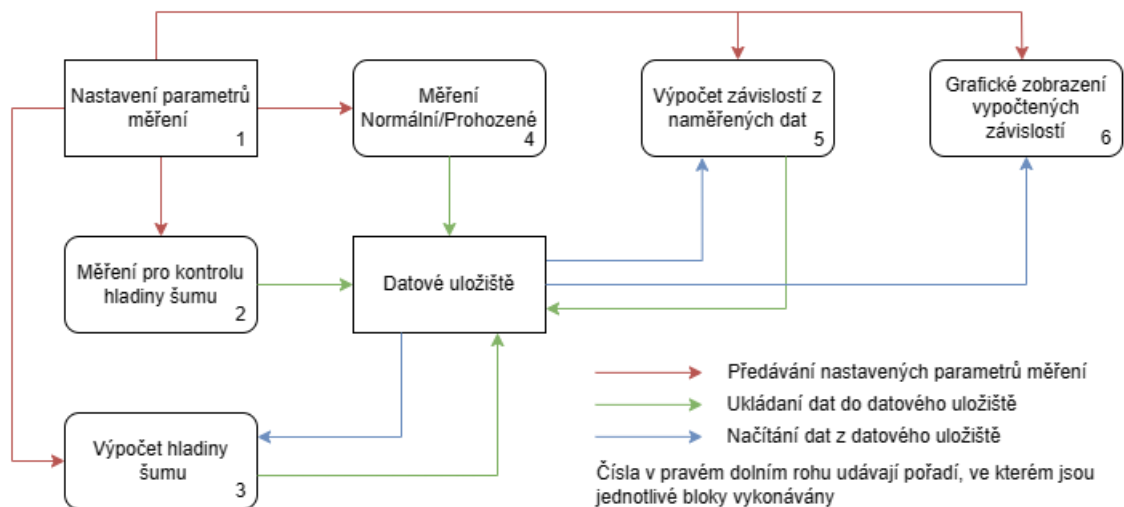
Obr. 3.5: Měřicí karta NI PXI-4461 [17]

3.4 Realizace vlastního měřicího systému

Ve vývojovém prostředí LabVIEW byl vytvořen program, který realizoval úkony potřebné ke splnění požadavků na měřicí systém uvedených v kapitole 3.1. Celý proces sloužící k měření a výpočtům specifikovaných parametrů lze shrnout následujícím výčtem navazujících funkcí:

1. Nastavení parametrů měření,
2. Provedení měření pro kontrolu hladiny šumu,
3. Výpočet hladiny šumu,
4. Realizace měření pro výpočty frekvenčních závislostí,
5. Výpočet závislostí z naměřených dat,
6. Grafické zobrazení vypočtených závislostí.

Zmíněné realizované funkce popisuje diagram toku dat uvedený na obrázku 3.6, kde lze vidět návaznosti jednotlivých funkcí.



Obr. 3.6: Diagram toku dat programu realizovaného ve vývojovém prostředí Labview

Jednotlivé funkce tohoto programu budou podrobně popsány v následujících podkapitolách. Vzhled prostředí programu bude představen v kapitole 3.5.

3.4.1 Nastavení parametrů měření

V tomto kroku bylo vytvořeno uživatelské rozhraní pro zadávání parametrů. V následujících bodech budou tyto parametry popsány:

- **Teplota okolí t [°C]** - tento parametr přímo ovlivňuje výpočet rychlosti zvuku (vzorec 1.28) a hustoty vzduchu (vzorec 1.35) a nepřímo ovlivňuje i navazující výpočty související se stanovením činitelů zvuku (vzorec 1.33 a 1.32), normované akustické impedance (vzorec 1.34) a normované akustické admittance (vzorec 1.36),
- **Atmosferický tlak okolí p_a [kPa]** - tento parametr přímo ovlivňuje výpočet hustoty vzduchu. Parametr hustoty vzduchu je dále využíván pro výpočet normované akustické impedance a admittance,
- **Vzdálenost vzdálenějšího mikrofonu od vzorku x_1 [m]** - tento parametr přímo ovlivňuje výpočet činitele zvukové odrazivosti,
- **Vzdálenost mezi mikrofony s [m]** - tento parametr rovněž ovlivňuje výpočet činitele zvukové odrazivosti,
- **Typ použité trubice** - ovlivňuje nastavení frekvence generovaného signálu a vzorkovací frekvence při měření signálu (blíže popsáno v kapitole 3.4.4). Tento parametr má rovněž vliv na název ukládaných dat, kdy se na základě

zvoleného typu trubice použije přípona *SMALL* pro malou trubici a přípona *LARGE* pro trubici velkou. Na základě tohoto parametru je potřeba měnit také parametry $x1$ a s , vzhledem k tomu, že se tyto parametry pro různé rozměry trubice liší,

- **Amplituda generovaného signálu** - tento parametr je potřeba zvýšit v případě překročení maximální hladiny šumu (vysvětleno v kapitole 3.4.2),
- **Název souborů** - veškerá uložená data související s měřením se budou ukládat s předponou zadaného názvu souborů, doplněného o popis a typ trubice (např. TEST_ALPHA_LARGE.xls).

Na základě zadávaných parametrů jsou prováděna měření a výpočty. Tyto parametry přímo ovlivňují měření a dosažené výsledky výpočtů.

3.4.2 Měření pro kontrolu hladiny šumu

Za účelem eliminace nepřesností způsobené šumem v trubici, musí být implementována funkce, která zajišťuje měření hladiny šumu. Norma ČSN ISO 10534-2 [8] specifikuje volbu amplitudy signálu, která musí být volena tak, aby nejméně o 10 dB převyšovala hluk pozadí (šumu) na všech měřených kmitočtech v místech mikrofonů.

Na základě tohoto poznatku byla vytvořena funkce, která naměří časové průběhy hladiny akustického tlaku v místech umístění mikrofonu. Celkem jsou provedena dvě měření. První měření je zhotoveno bez jakéhokoli buzení reproduktoru umístěného v impedanční trubici, pouze pro zaznamenání šumu. Druhé měření je provedeno s buzením reproduktoru. Tyto časové průběhy jsou v aplikaci následně zobrazeny a uloženy. Data jsou dále zpracována funkcí sloužící pro výpočet hladiny šumu (funkce je popsána v kapitole 3.4.3). Způsob měření, druh buzeného signálu, frekvence buzeného signálu, vzorkovací frekvence při měření a nástroje v prostředí LabVIEW použité pro měření těchto průběhů, budou blíže specifikováno v kapitole 3.4.4.

3.4.3 Výpočet hladiny šumu

Pro kontrolu hladiny šumu nejprve byla uložená data načtena. Poté byla z načtených dat signálu naměřených bez buzení reproduktoru a signálu při buzeném reproduktoru vypočteny amplitudy (v decibelech) pomocí Fourierovy transformace. Z těchto amplitud byla dále vypočtena absolutní vzdálenost pro všechny měřené frekvence. Jestliže tato výsledná hodnota (absolutní vzdálenosti) klesla pod hodnotu 10 dB na kmitočtech měřeného rozsahu, bylo nastaveno zobrazení dialogového okna, které o tomto problému uživatele informovalo. Amplitudy absolutních vzdáleností byly

zobrazeny v grafu a hodnoty byly uloženy. Výpočet hladiny šumu proběhl z dat naměřených pomocí obou mikrofonů. Pro účely výpočtu byl využit LabVIEW toolkit *MathScript*.

3.4.4 Měření pro výpočty frekvenčních závislostí

Pro výpočet přenosové funkce, a s tím spojené navazující výpočty veličin charakterizující akustické vlastnosti materiálu, je potřeba provést měření s normálním rozložením mikrofonů a prohozeným rozložením mikrofonů (popsáno v kapitole 1.5.1). Pro realizaci měření signálu z mikrofonů připojené na analogové vstupy měřicí karty NI PXI-4461 byl v programu LabVIEW použit blok *DAQ Assistant*, který po nastavení parametrů měření a mikrofonů přímo udává hodnotu hladiny akustického tlaku, se kterou se dále pracuje při navazujících výpočtech. Tento blok rovněž umožňuje kalibraci mikrofonů. [19]

Pro generování signálu na analogový výstup měřicí karty byl rovněž použit blok *DAQ Assistant*. Jako budící signál byl zvolen bílý šum, který byl generován pomocí bloku *Uniform White Noise Waveform VI*. Vzorkovací frekvence signálu bílého šumu byla volena tak, aby zaručeně pokryla frekvenční rozsah použité trubice (popsáno v kapitole 1.4.1). Pro velkou trubici byl signál vzorkován kmitočtem 8 kHz a pro malou trubici 25 kHz. [19]

Buzený signál bílého šumu generovaného reproduktorem byl poté měřen a vzorkován tak, aby byl dodržen vzorkovací teorém a nedocházelo k aliasing efektu. Pro velkou trubici byl signál z mikrofonu vzorkován frekvencí 16 kHz a pro malou trubici byl signál vzorkován frekvencí 50 kHz. [20]

Při jednom měření byly naměřeny celkem čtyři časové průběhy trvající 10 vteřin. Dva při normálním rozložení mikrofonů a dva při prohozeném rozložení mikrofonů obou měřených kanálů. Tyto data byla následně graficky zobrazena a uložena. S výstupy tohoto kroku bylo dále pracováno při výpočtu frekvenčních závislostí.

3.4.5 Výpočet frekvenčních závislostí z naměřených dat

Naměřené časové průběhy byly nejprve načteny, poté byly tyto data zpracovávána pomocí funkce *MathScript*.

Výpočty přenosových funkcí H_{12}^I a H_{12}^{II} (popsány v kapitole 1.5.1) byly realizovány podle vzorce 1.21. K tomuto účelu bylo využito funkce *tf_estimate* toolkitu *MathScript* [21]. Hodnota délky Fourierovy transformace byla v této funkci zvolena jako hodnota příslušné vzorkovací frekvence, což odpovídá rozlišení frekvenčních závislostí 1 Hz.

Dále se postupovalo podle výpočtů popsanych v kapitole 1.5. Výstupem byly následující frekvenční závislosti:

- Přenosová funkce H_{12} ,
- Činitel odrazivosti β ,
- Činitel pohltivosti α ,
- Normálová akustická impedance Z ,
- Normálová akustická admitance G .

Veškerá vypočtená data byla v této části uložena. Tato data jsou zpracována v dalším kroku, kterým je zobrazení vypočtených závislostí.

3.4.6 Zobrazení vypočtených závislostí

V tomto kroku byla vypočtená data nejprve načtena. Poté bylo provedeno jejich přizpůsobení pro zobrazení do XY grafu. Data byla zobrazena v grafech.

3.5 Návod k použití programu

V této kapitole bude představen návod k použití navrženého a realizovaného měřicího systému. Návod bude strukturován do jednotlivých kroků potřebných k realizaci měření.

Tento měřicí systém byl specificky vytvořen pro využití prostředků a nástrojů představených v kapitole 3.2 a 3.3.

3.5.1 Předběžná měření

Před zahájením měření je nejprve potřeba stanovit teplotu okolí a atmosferický tlak. Tyto parametry se poté promítají do výpočtů parametrů charakterizující akustické vlastnosti měřeného vzorku.

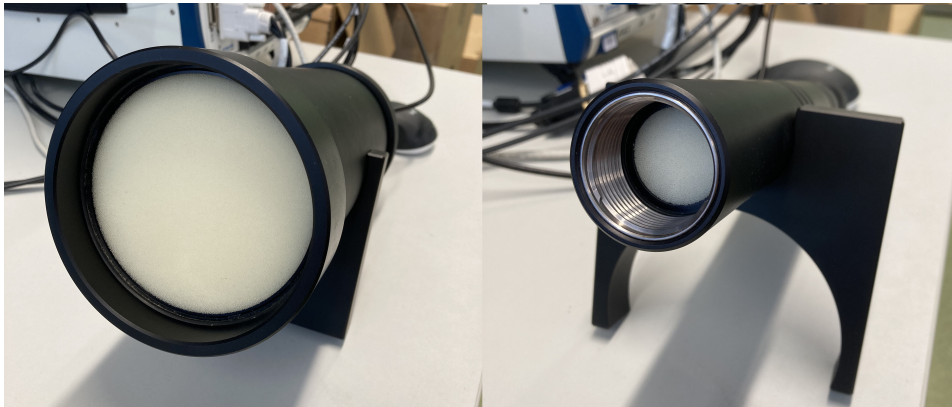
3.5.2 Volba trubice použité pro měření

Frekvenční rozsah malé trubice odpovídá hodnotám 860 Hz - 6860 Hz. Malá trubice má pouze dva sloty pro umístění mikrofونů, tudíž je frekvenční rozsah neměnný. Velká trubice však disponuje třemi sloty pro umístění mikrofونů. Na základě volby použitých slotů (umístění mikrofонů) se mění také frekvenční rozsah (popsáno v kapitole 1.4.1). Obecně lze říci, že velká trubice dokáže měřit v rozsahu od 180 Hz do 1900 Hz.

3.5.3 Instalace vzorku do trubice

Před samotným měřením je dále zapotřebí umístit zkušební vzorek do držáku na vzorek v trubici (trubice s pístem). Vzorek materiálů musí být v trubici umístěn

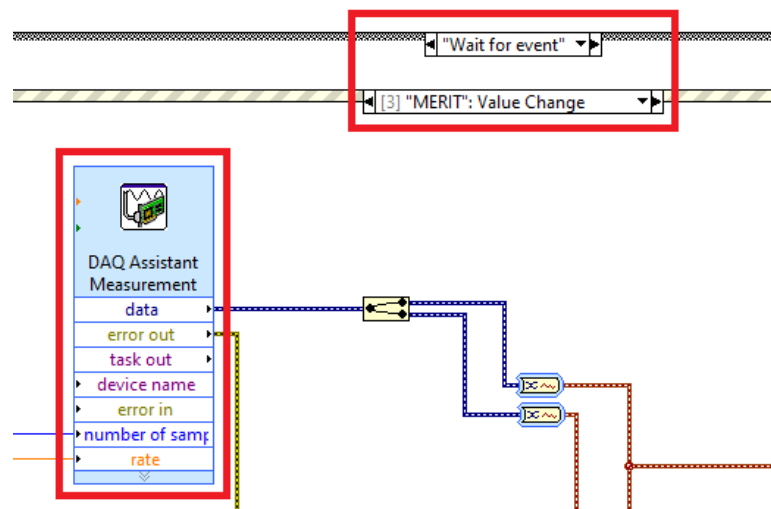
v souladu s normou ČSN ISO 10534-2 [8]. Během všech měření musí být instalovaný vzorek umístěn ve stejné poloze na stejném místě. Na obrázku 3.7 lze vidět správně umístěné vzorky uvnitř impedanční trubice.



Obr. 3.7: Vzorek umístěný uvnitř velké a malé impedanční trubice

3.5.4 Kalibrace mikrofónů

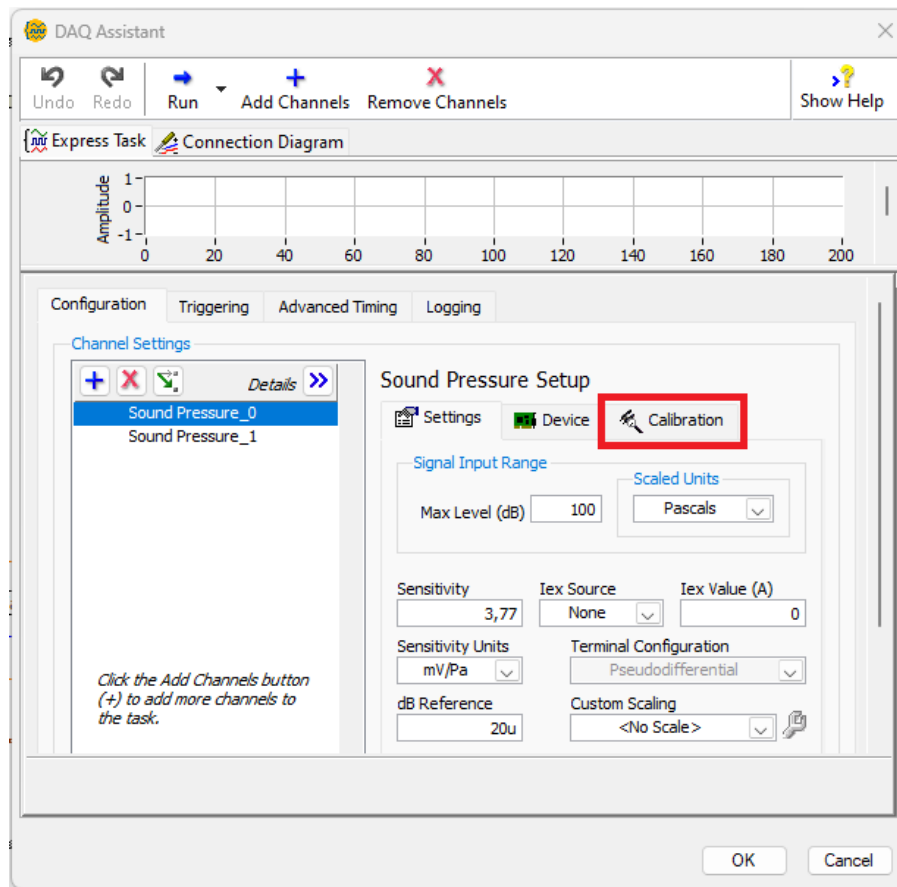
Za účelem eliminace nepřesností měření je před samotným měřením potřeba zkalibrovat použité mikrofony. Toto je umožněno v bloku *DAQ Assistant Measurement*, sloužící pro měření signálů z mikrofónů. DAQ Assistant lze vidět na obrázku 3.8.



Obr. 3.8: Záložka nastavení parametrů měření vlastní realizace měřicího systému

Na obrázku je zvýrazněno umístění bloku ve vytvořeném *Blokovém diagramu* v programu Labview. Po dvojným kliknutí na ikonu *DAQ Asistant Measurement* se

otevře okno, kde je možno upravit parametry měření a mikrofonů (např. citlivost mikrofonu, maximální hladina akustického tlaku apod.) na příslušných kanálech. Toto okno je uvedeno na obrázku 3.9.

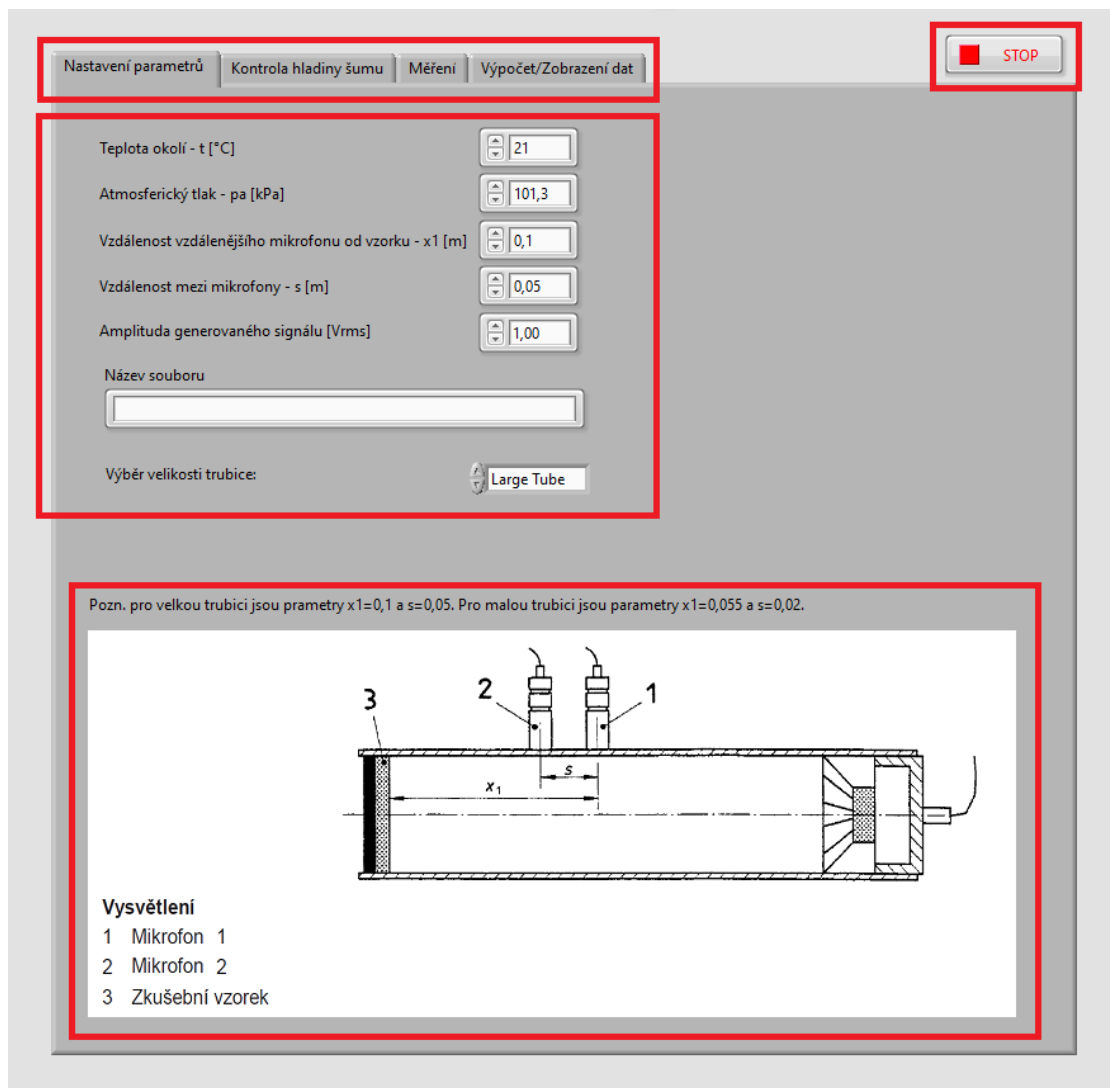


Obr. 3.9: Záložka nastavení parametrů měření vlastní realizace měřicího systému

Na obrázku 3.9 je zvýrazněna záložka umožňující kalibraci mikrofonů na zvolených kanálech.

3.5.5 Nastavení parametrů měření

Na obrázku 3.10 lze vidět okno sloužící pro nastavení parametrů měření.



Obr. 3.10: Záložka nastavení parametrů měření vlastní realizace měřicího systémů

Na obrázku 3.10 jsou zvýrazněny čtyři hlavní oblasti tohoto okna, které budou v následujícím textu popsány.

Záložky kroků měření slouží k posouvání mezi jednotlivými fázemi měření, kterými jsou:

- Nastavení parametrů,
- Kontrola hladiny šumu,
- Měření,

- Výpočet/Zobrazení.

Pomocí **STOP tlačítka** je možné v každé fázi měření vypnout spuštěný program.

Nastavení parametru měření je situováno pod záložkami kroků měření. Nastavit lze následující parametry:

- Teplota okolí t [°C],
- Atmosferický tlak okolí pa [kPa],
- Vzdálenost vzdálenějšího mikrofonu od vzorku $x1$ [m],
- Vzdálenost mezi mikrofony s [m] ,
- Amplituda generovaného signálu [Vrms],
- Název souborů - data, které budou během měření naměřena či vypočtena budou ukládána s předponou zadanou uživatelem,
- Typ použité trubice - na výběr je ze dvou možností *Large Tube* a *Small Tube*.

Tyto parametry ovlivňují průběh měření a výpočty frekvenční závislosti. Podle typu trubice použité k měření je potřeba změnit také parametry $x1$ a s . Pro malou trubici jsou tyto parametry neměnné ($x1=0,055$ m a $s=0,02$ m), v případě použití velké trubice jsou k dispozici tři sloty pro umístění mikrofonů. Na základě použitých slotů se mění také tyto parametry.

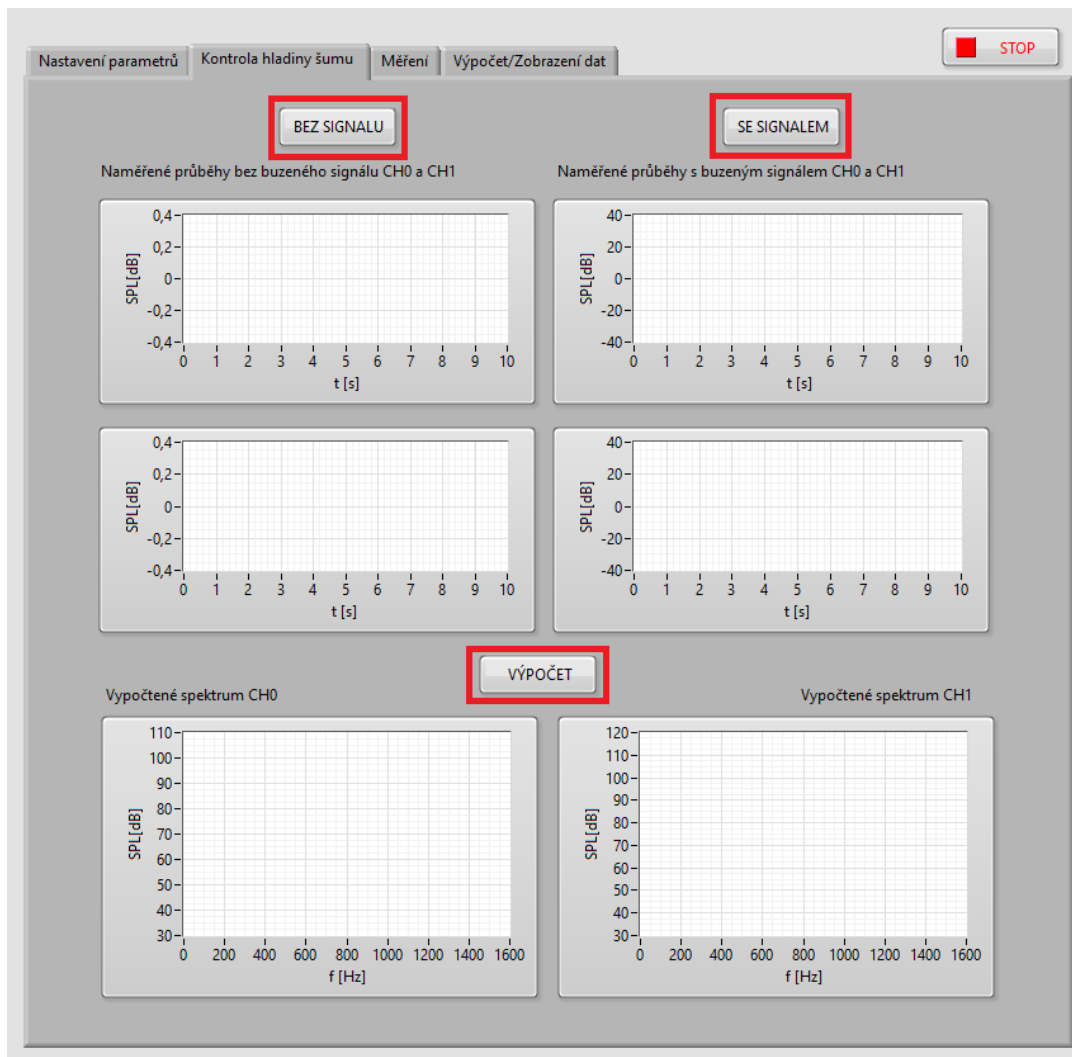
V dolní části obrázku je uvedeno **schéma popisující parametry $x1$ a s** .

3.5.6 Kontrola hladiny šumu

Tato záložka slouží ke kontrole hladiny šumu z okolí. Šum z okolí musí být na všech měřených frekvencích ve spektru o 10 dB nižší než měřený signál. Okno kontroly hladiny šumu je zobrazeno na obrázku 3.11.

Po kliknutí na tlačítko **BEZ SIGNALU** dojde k zahájení měření šumu z okolí v trubici. Během tohoto měření není buzen reproduktor v trubici. Po naměření těchto průběhů jsou data uložena do složky, ve které je umístěn spuštěný program. Průběhy z jednotlivých měřených kanálů jsou rovněž zobrazeny v grafech pod tlačítkem.

Po kliknutí na tlačítko **SE SIGNALEM** dojde k zahájení měření akustického tlaku v trubici s reproduktorem buzeným signálem bílého šumu. Po naměření těchto průběhů jsou data rovněž uložena do složky, ve které je umístěn spuštěný program. Průběhy z jednotlivých měřených kanálů jsou rovněž zobrazeny v grafech pod tlačítkem.



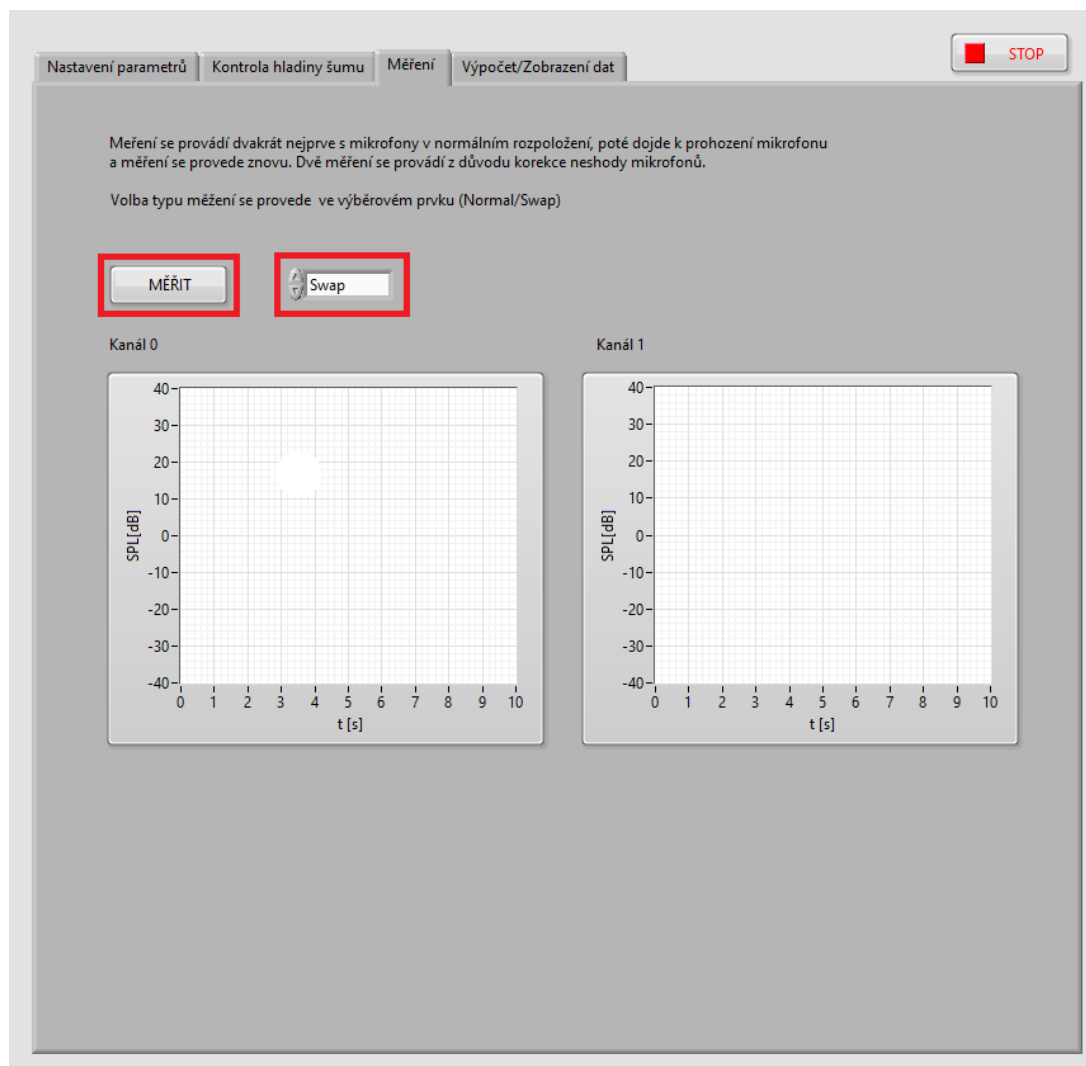
Obr. 3.11: Záložka kontrola hladiny šumu vlastní realizace měřicího systému

Po kliknutí na tlačítko **VÝPOČET** dojde k výpočtu spekter jednotlivých signálů. Mezi příslušnými hodnotami kmitočtů se poté vypočte absolutní vzdálenost. Hodnoty absolutní vzdálenosti jsou pro příslušné kanály zobrazeny v grafech pod tlačítkem. Vypočtené hodnoty jsou uloženy do složky, ve které je umístěn spuštěný program.

V případě, že dojde k překročení hladiny šumu, je vypsána chybová hláška. Dojde-li k překročení hladiny šumu, je potřeba zvýšit amplitudu buzeního signálu, což je možné provést v záložce *Nastavení parametru*.

3.5.7 Měření

V tomto kroku probíhá měření časových průběhů hladiny akustického tlaku, které se následně použijí pro výpočet požadovaných parametrů charakterizující vlastnosti testovaného vzorku. Na obrázku 3.12 jsou zvýrazněny klíčové ovládací prvky pro tento krok.



Obr. 3.12: Záložka měření vlastní realizace měřicího systémů

Jedním ze zvýrazněných ovládacích prvků je **prvek výběru** způsobu měření. Na výběr je ze dvou možností *Normal* a *Swap*.

Pro správnou realizaci výpočtů je potřeba provést dvě měření první s normálním rozložením mikrofونů a druhé s prohozeným rozložením mikrofونů.

Měření je zahájeno tlačítkem **MĚŘIT**. Celkem jsou naměřeny čtyři průběhy dva pro každý způsob měření z odpovídajících kanálů.

Aktuální naměřené průběhy jsou zobrazeny v grafech pod řídicími prvky. Naměřená data jsou ukládána do složky, ve které je umístěn spuštěný program.

3.5.8 Výpočet a zobrazení dat

V tomto kroku probíhá výpočet a grafické zobrazení frekvenčních závislostí. Na obrázku 3.13 jsou zvýrazněny ovládací prvky tohoto kroku.



Obr. 3.13: Záložka výpočtu a zobrazení vlastní realizace měřicího systému

Po kliknutí na tlačítko **VÝPOČET** se zahájí výpočet frekvenčních závislostí. Dokončení kalkulace signalizuje probliknutí **zeleného indikátoru** vedle tlačítka **VÝPOČET**. Tento krok rovněž zajišťuje uložení vypočtených dat do tabulek v Excelu.

Pro zobrazení dat je potřeba kliknout na tlačítko **ZOBRAZENÍ**. Vypočtené průběhy se poté vykresleny v příslušných grafech.

Pro lepší orientaci mezi jednotlivými vykreslenými grafy jsou určeny záložky, které jsou zvýrazněny na obrázku 3.13. Jsou zde záložky pro přepínání mezi typy trubice a záložky pro přepínání mezi jednotlivými grafy použité trubice.

Tlačítka **VÝPOČET** a **ZOBRAZIT** umožňují kalkulaci a vykreslení dat naměřených či vypočtených v předešlých měřeních. Pro zobrazení dat naměřených v předchozích měřeních je nejprve potřeba se přesvědčit, že vypočtená data jsou umístěna ve stejné složce jako spuštěný program, a že v záložce nastavení parametrů je uveden stejný název souborů jako název dat, které je třeba zobrazit. Rovněž je v nastavení parametrů potřeba zvolit správný typ trubice, pro které byly výpočty provedeny.

Obdobně lze postupovat také při výpočtech z již existujících měření. Je však třeba ověřit, že veškeré nastavené parametry v programu jsou shodné s parametry, při kterých byla data naměřena.

3.6 Realizace v prostředí MATLAB

Prostředí Matlab bylo použito k ověření výpočtu a zobrazení frekvenčních závislostí z dat naměřených pomocí vlastní realizace měřící procedury ve vývojovém prostředí LabVIEW. Jedná se pouze o další způsob výpočtu pro porovnání výsledků měření dosažených v této práci.

Během výpočtů bylo postupováno obdobně jako při realizaci v LabVIEW (popisáno v kapitole 1.5). Pro realizaci výpočtu přenosové funkce v prostředí Matlab byla využita funkce *tfestimate*. Dále bylo postupováno dle vzorců uvedených v již zmíněné kapitole. [22]

Data vypočtená pomocí programu Matlab a PULSE LabShop budou společně s vlastní realizací měření a výpočtů v prostředí LabVIEW porovnána a vyhodnocena v kapitole 4.

4 Zhodnocení výsledků měření

V této kapitole budou nejprve uvedeny výsledky měření s využitím vlastní realizace měřicího systému. Následně budou tyto výstupy měření porovnány s měřením pomocí programu PULSE LabShop a výstupy dosaženými pomocí programu MATLAB.

4.1 Výsledky vlastního měření

Měření pomocí vlastní realizace měřicího systému probíhalo s využitím malé trubice i velké trubice. Při měření s využitím velké trubice byly použity sloty pro umístění mikrofonů, které od sebe byly vzdáleny 0,05 m, od čehož se odvíjel měřený rozsah frekvencí: 350 Hz - 1980 Hz. V případě malé trubice je pouze jedna možnost umístění mikrofonů a to ve vzdálenosti 0,02 m od sebe. To odpovídá frekvenčnímu rozsahu: 860 Hz - 6860 Hz pro malou trubici. Data zpracována v grafech v této kapitole jsou zobrazována v rozsazích od 50 Hz do 1600 Hz pro velkou trubici a od 500 Hz do 6860 Hz pro trubici malou. Tento rozsah překrývá celé pásmo měřitelných frekvencí. Jako počáteční hodnota grafu byla zvolena frekvence 50 Hz (nikoli 350 Hz) za účelem poukázání na nepřesnost dat v rozsahu 50 Hz až 350 Hz. Výrobce definuje dolní kmitočtovou hranici na 50 Hz.

V následujících dvou kapitolách (pro velkou a malou trubici) budou graficky zobrazena naměřená data a ilustrační fotografie z průběhu měření. Rovněž zde bude popsán postup při výpočtu nejistoty měření typu A.

4.1.1 Měření pomocí velké impedanční trubice

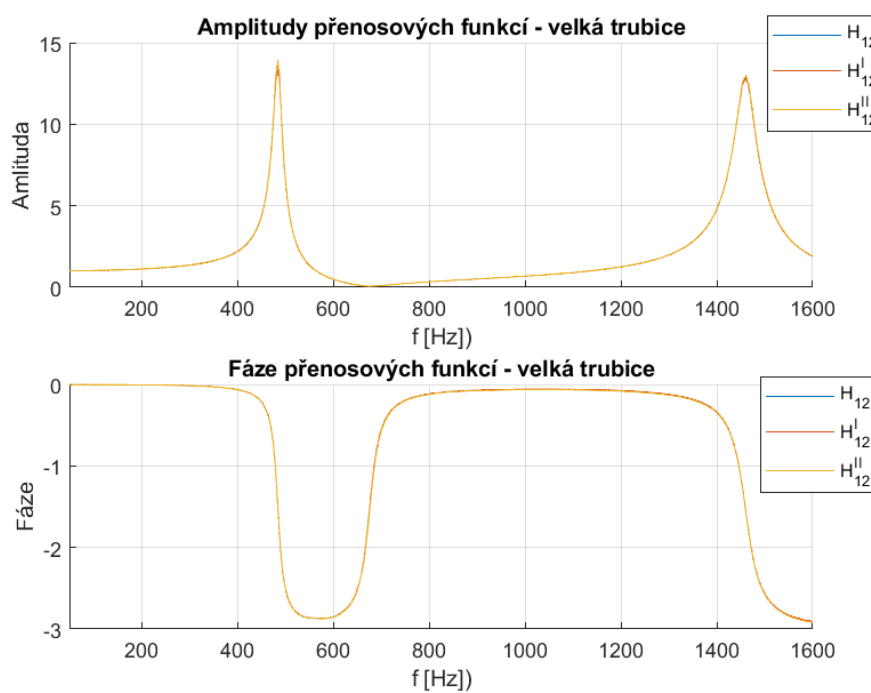
Na obrázku 4.1 lze vidět fotografii měřicího systému v průběhu měření s využitím velké impedanční trubice. Měření bylo prováděno na velkém referenčním vzorku popsaném v kapitole 2.1.6. Na obrázku lze vidět zmíněné rozmístění mikrofonů ($s=0,05$ m, levý slot zaslepen falešným mikrofonem).

V následujících grafických zpracováních jsou uvedeny frekvenční závislosti, které byly v tomto sestavení měřicího systému naměřeny a vypočteny. Lze vidět závislosti přenosových funkcí (obrázek 4.2), činitele odrazivosti (obrázek 4.3) a činitele pohltivosti (obrázek 4.4) materiálu.

Vypočtené závislosti zobrazené v grafech 4.2, 4.3, 4.4 reprezentují jedno měření a jsou v této podkapitole uvedeny jako příklad naměřených a vypočtených dat s využitím velké trubice.



Obr. 4.1: Fotografie pořízena při měření s využitím velké impedanční trubice

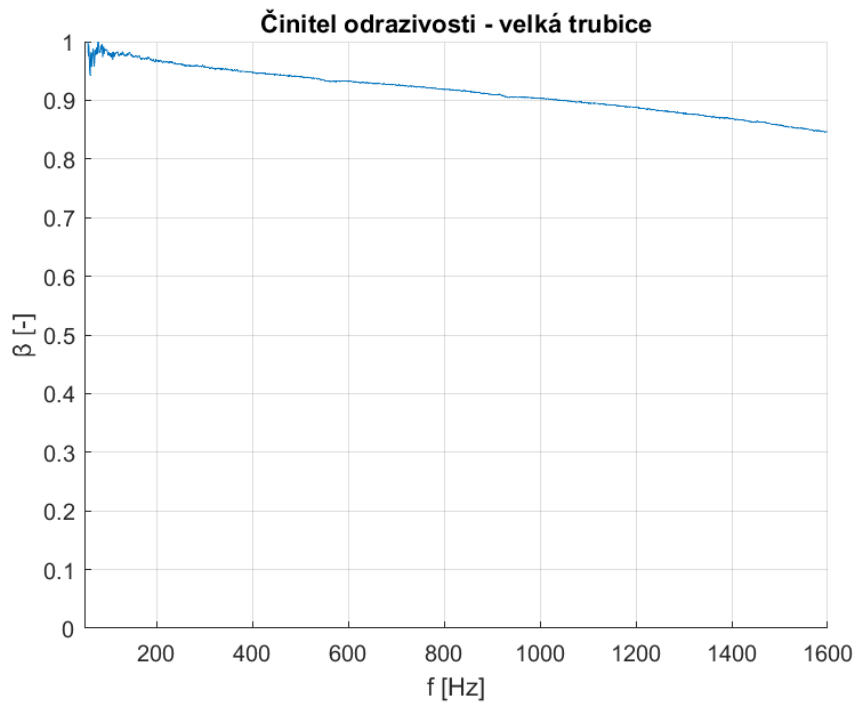


Obr. 4.2: Frekvenční závislost přenosových funkcí - velká trubice

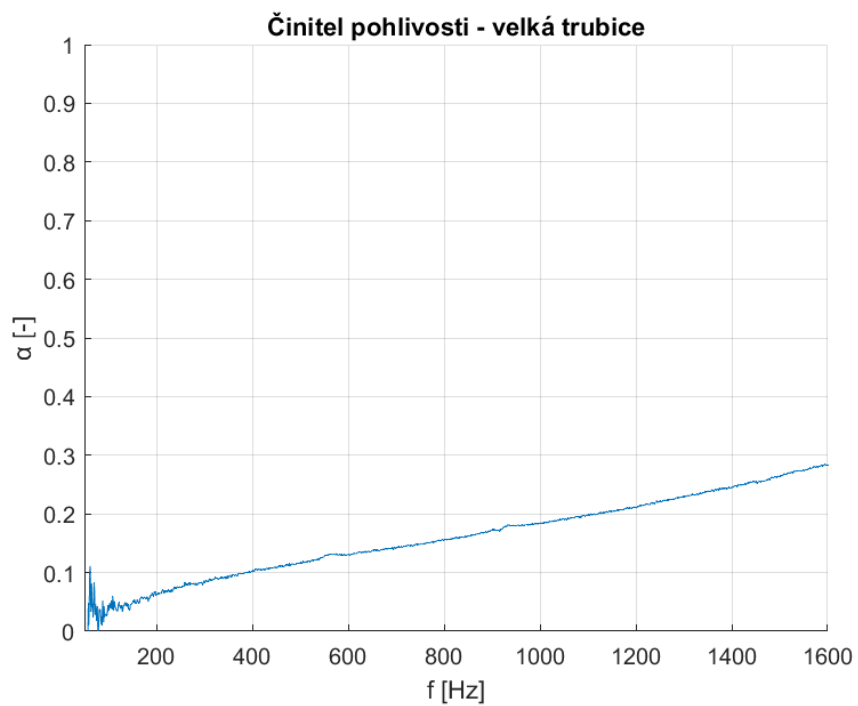
Pro potřebu výpočtu nejistoty typu A bylo provedeno deset měření v řadě za sebou se stejným nastavením parametrů měření, stejnou použitou trubicí a stejným měřeným vzorkem.

Pro stanovení nejistoty měření typu A byly použity následující vzorce:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \quad (4.1)$$



Obr. 4.3: Frekvenční závislost činitele odrazivosti - velká trubice



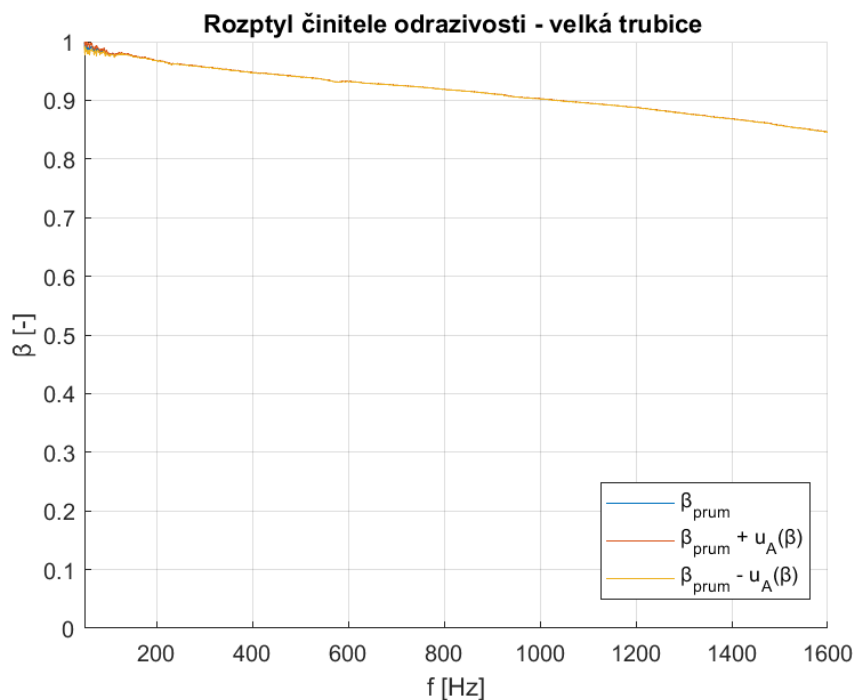
Obr. 4.4: Frekvenční závislost činitele pohltivosti - velká trubice

kde \bar{x} je aritmetický průměr proměnné x , N je počet provedených měření a x_i je vypočtená hodnota pro i -té měření.

$$u_A(x) = \sqrt{\frac{1}{N \cdot (N - 1)} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}, \quad (4.2)$$

Výpočet nejistoty byl proveden pro proměnnou činitele odrazivosti β na všech měřených frekvencích.

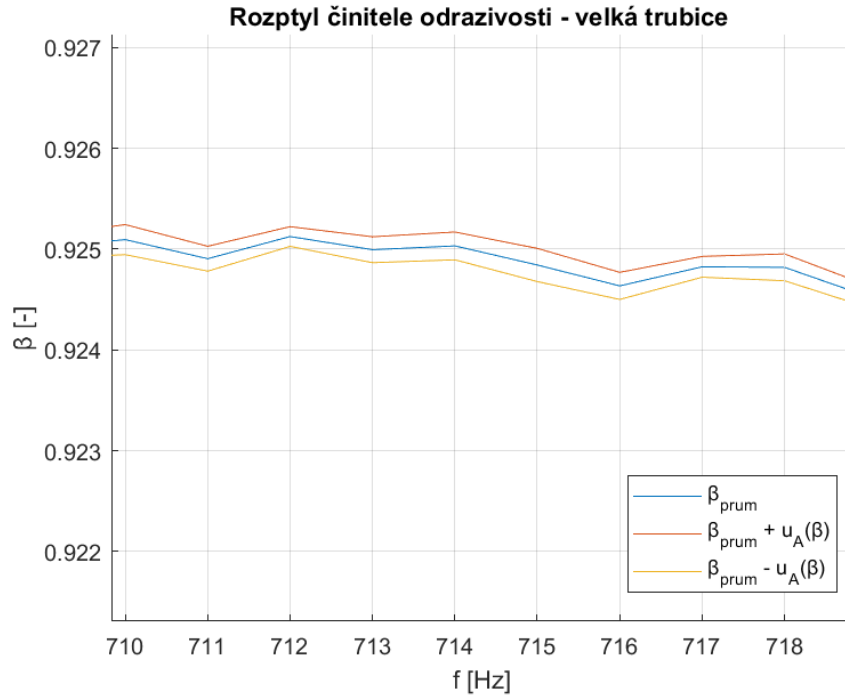
Pro přehlednost byla nejistota měření v grafu zobrazena jako pásmo, ve kterém se pro příslušné frekvence může hodnota činitele akustické odrazivosti pohybovat při opakovaném měření. Graf je uveden na obrázku 4.5.



Obr. 4.5: Nejistota typu A frekvenční závislosti činitele odrazivosti - velká trubice

Vzhledem k tomu, že se hodnoty nejistoty typu A činitele odrazivosti pohybují v řádu desetitisícin, není nejistota grafu 4.5 viditelná. Z tohoto důvodu je pro přehlednost a názornost na obrázku 4.6 uveden stejný graf přiblížený na část průběhu, kde lze vidět průměrnou hodnotu β společně s nejistotou typu A.

Pro názornost jsou v tabulce 4.1 uvedeny průměrné hodnoty a nejistoty typu A činitele odrazivosti pro vybrané hodnoty frekvencí.



Obr. 4.6: Nejistota typu A frekvenční závislosti činitele odrazivosti (přibližný) - velká trubice

f [Hz]	100	300	500	700	1000	1200	1400	1600
β_{prum} [-]	0,9803	0,9568	0,9401	0,9258	0,9025	0,8879	0,8682	0,8463
$u_A(\beta)$	0,0016	0,0003	0,0002	0,0001	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002

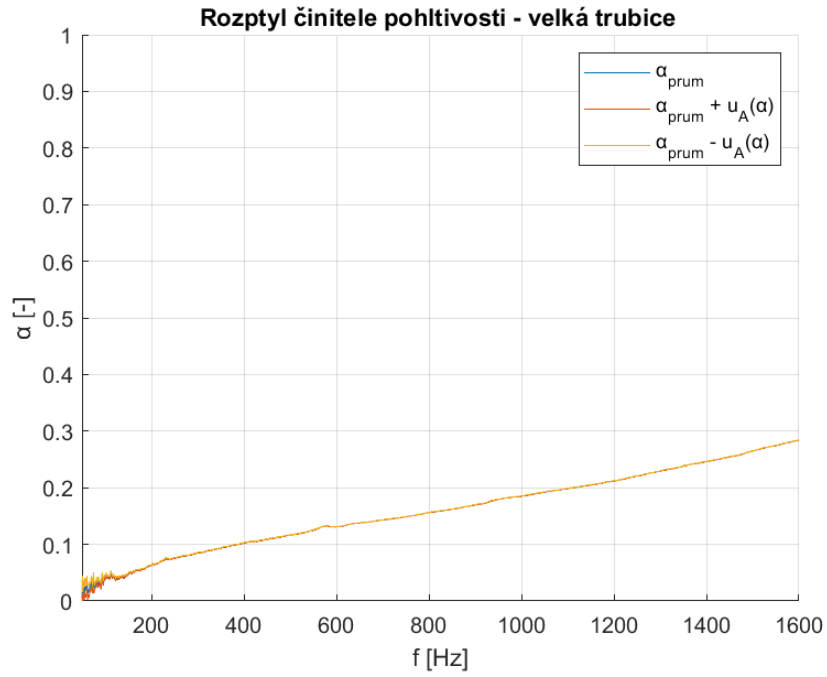
Tab. 4.1: Tabulka průměrných hodnot činitele odrazivosti a nejistoty měření typu A činitele odrazivosti pro vybrané hodnoty kmitočtu - velká trubice

Pro činitele pohltivosti byla hodnota nejistoty vypočtena z již existující nejistoty pro činitele odrazivosti. Průběhy činitele pohltivosti byly vypočteny podle vzorce frekvenční závislosti činitele pohltivosti 1.33:

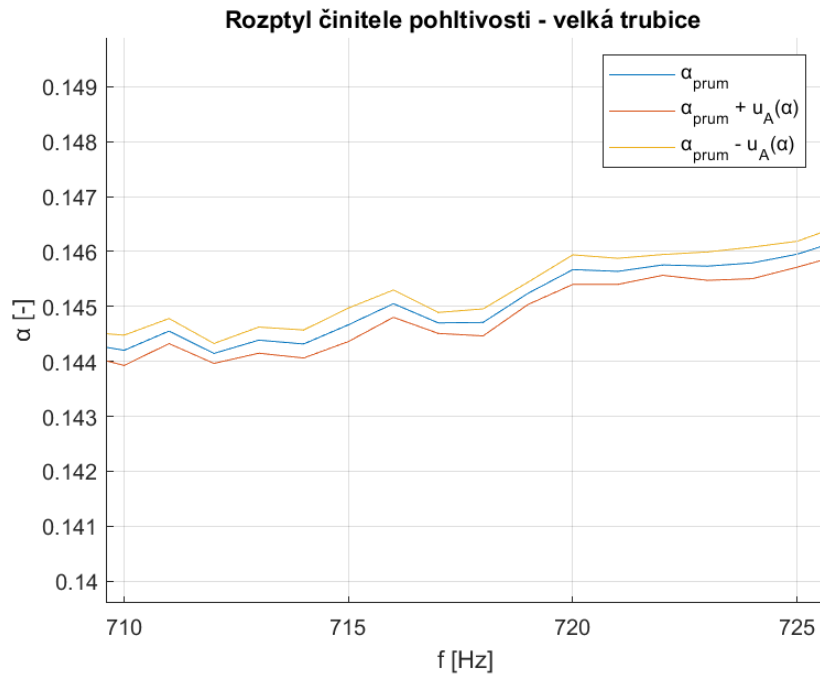
- z průměrné hodnoty činitele odrazivosti
- z průměrné hodnoty sečtené s nejistotou typu A
- z průměrné hodnoty, od které byla hodnota nejistoty odečtena

Výsledné hodnoty činitele pohltivosti s nejistotou jsou zaznamenány v grafu na obrázku 4.7.

V grafu 4.7 není vypočtená nejistota typu A činitele pohltivosti vzhledem k veličnosti rozlišitelná. Z tohoto důvodu bylo opět provedeno přiblížení průměrné hodnoty činitele pohltivosti společně s nejistotou typu A (obrázek 4.8).



Obr. 4.7: Rozptyl frekvenční závislost činitele pohltivosti - velká trubice



Obr. 4.8: Nejistota typu A frekvenční závislosti činitele pohltivosti (přibližný) - velká trubice

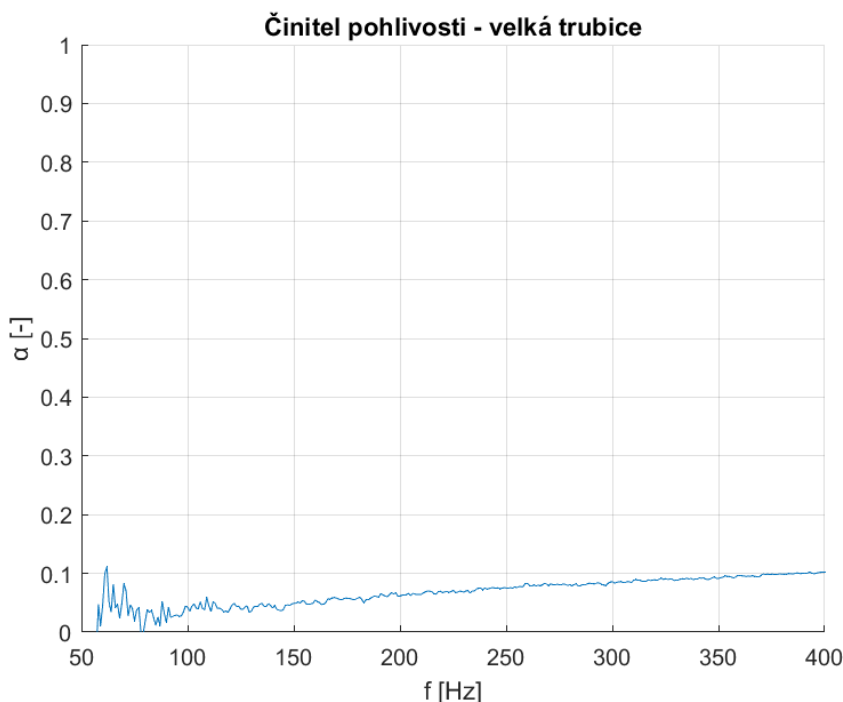
Pro vybrané hodnoty frekvencí byla rovněž vytvořena tabulka 4.2 průměrné vy-
počtené hodnoty a nejistoty měření typu A činitele pohltivosti.

f [Hz]	100	300	500	700	1000	1200	1400	1600
α [-]	0,0390	0,0844	0,1162	0,1430	0,1855	0,2117	0,2462	0,2837
$u_A(\alpha)$	0,0032	0,0005	0,0004	0,0002	0,0004	0,0003	0,0003	0,0002

Tab. 4.2: Tabulka průměrných hodnot činitele pohltivosti a nejistoty měření typu A
činitele pohltivosti pro vybrané hodnoty kmitočtu - velká trubice

V grafech uvedených výše může být pozorován rozkmit činitele pohltivosti a odra-
zivosti pro nízké frekvence v rozsahu od 50 Hz do 300 Hz, což je způsobeno zob-
razením dat mimo rozsah frekvencí měřitelných pomocí velké impedanční trubice
(popsáno v kapitole 1.4.1). Data v tomto rozsahu jsou v případě vlastní realizace
nevypovídající. Na obrázku 4.9 je pro názornost uvedena frekvenční závislost činitele
pohltivosti pro nízké frekvence (50 Hz - 400 Hz).

Pro zbylý zobrazený frekvenční rozsah (300 Hz - 1600 Hz) mají data téměř line-
ární průběh. V případě činitele odrazivosti má křivka klesající charakter. V případě
činitele pohltivosti dochází k nárůstu se zvyšující se frekvencí.



Obr. 4.9: Frekvenční závislost činitele pohltivosti pro nízké frekvence - velká trubice

4.1.2 Měření pomocí malé impedanční trubice

Frekvenční závislosti uvedeny v této kapitole byly naměřeny pomocí malé impedanční trubice s malým referenčním vzorkem (vzorek je popsán v kapitole 2.1.6). Na obrázku 4.10 lze vidět fotografii pořízenou v průběhu měření s využitím malé impedanční trubice.

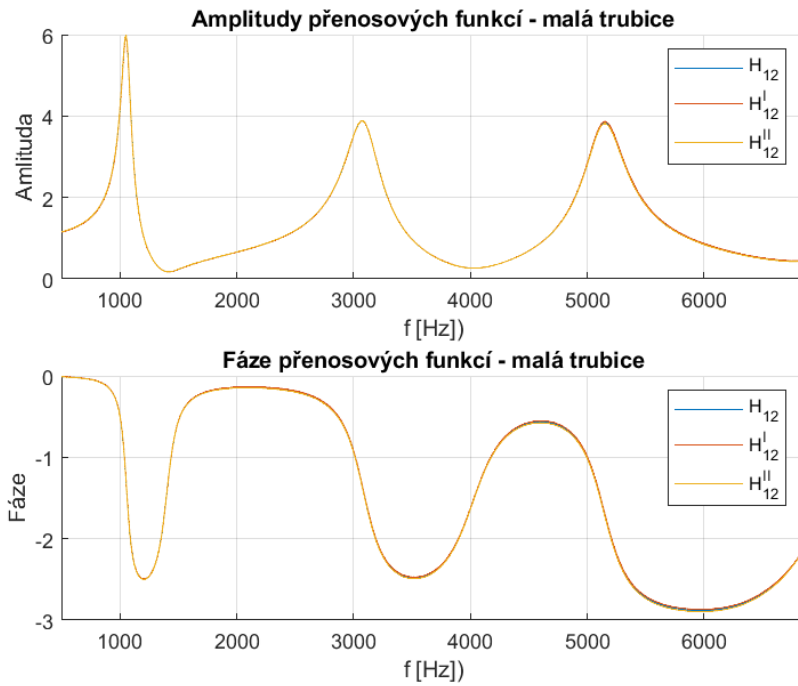


Obr. 4.10: Fotografie pořízena při měření s využitím malé impedanční trubice

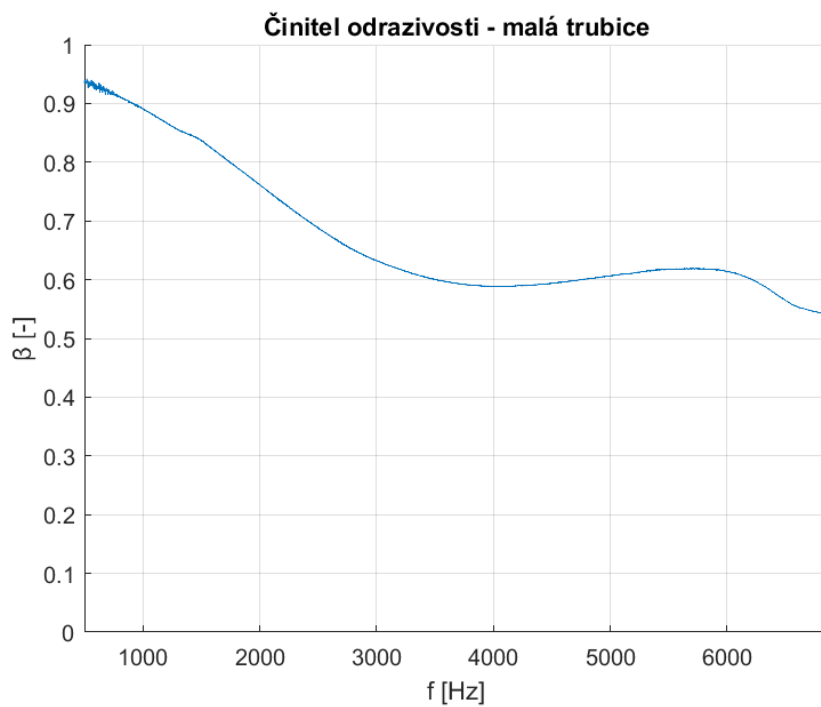
V následujících grafických zpracováních jsou uvedeny frekvenční závislosti, které byly v tomto sestavení měřicího systému naměřeny a vypočteny. Opět lze vidět závislosti přenosových funkcí (obrázek 4.11), činitele odrazivosti (obrázek 4.12) a činitele pohltivosti (obrázek 4.13) materiálu.

Vypočtené závislosti zobrazené v grafech 4.11, 4.12, 4.13 reprezentují jedno měření a jsou v této podkapitole uvedeny jako příklad naměřených a vypočtených dat s využitím malé trubice.

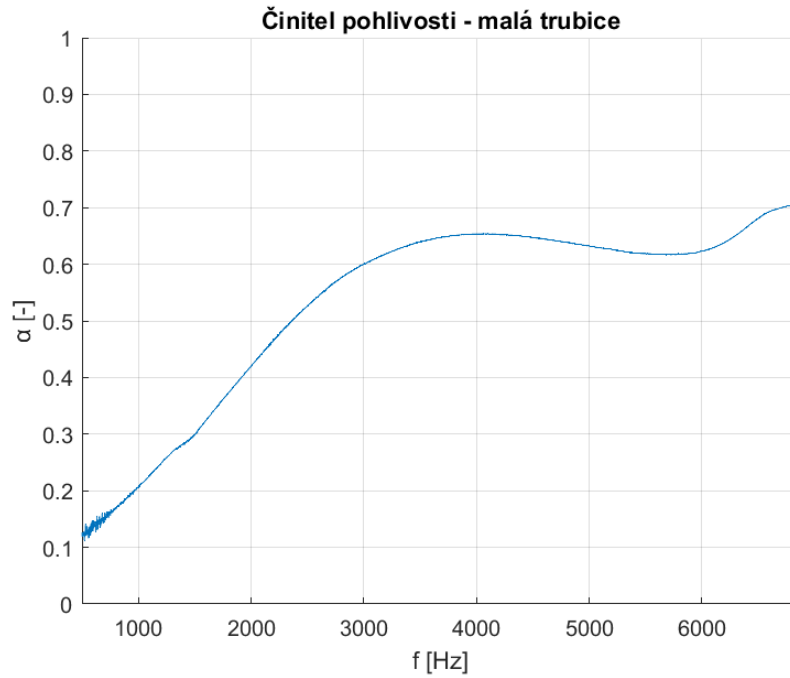
Pro potřebu výpočtu nejistoty typu A bylo postupováno stejně jako v případě velké trubice. Opět bylo provedeno deset měření v řadě za sebou se stejným nastavením parametrů měření, stejnou použitou trubicí a stejným měřeným vzorkem.



Obr. 4.11: Frekvenční závislost přenosových funkcí - malá trubice



Obr. 4.12: Frekvenční závislost činitele odrazivosti - malá trubice



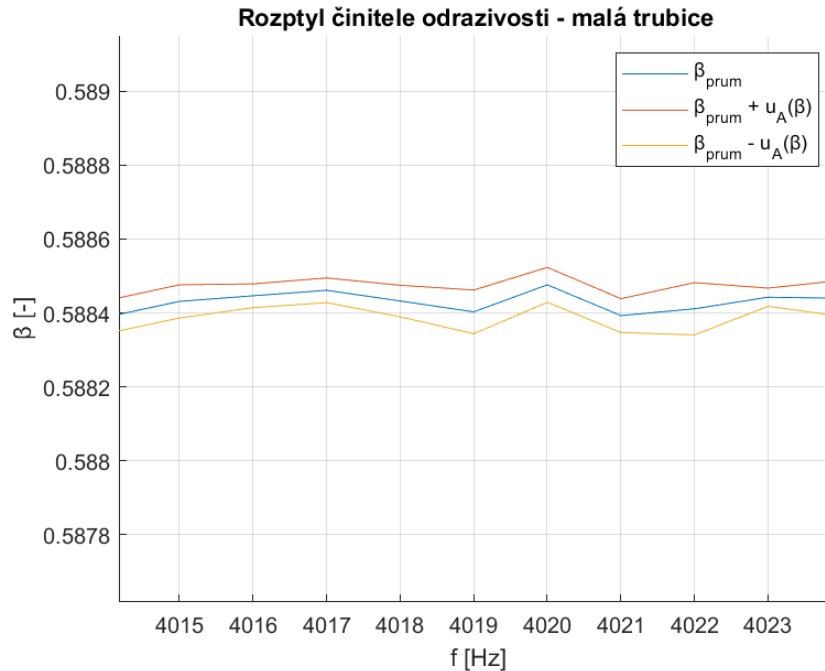
Obr. 4.13: Frekvenční závislost činitele pohltivosti - malá trubice

Nejistota typu A činitele odrazivosti je uveden v grafu 4.14.



Obr. 4.14: Nejistota typu A frekvenční závislosti činitele odrazivosti - malá trubice

Vypočtená nejistota typu A činitele odrazivosti není v grafu 4.14 vzhledem k její velikosti (řádově desetitisíciny) rozeznatelná. Z tohoto důvodu bylo opět provedeno přiblížení průměrné hodnoty činitele odrazivosti a nejistotou typu A (obrázek 4.15).



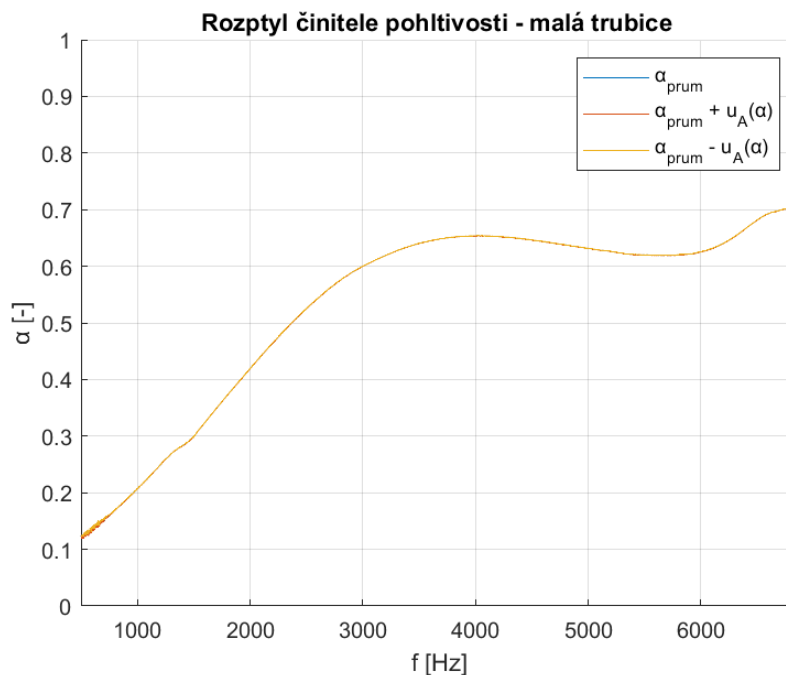
Obr. 4.15: Rozptyl frekvenční závislost činitele odrazivosti (přiblížený) - malá trubice

Pro vybrané hodnoty frekvencí byla vytvořena tabulka 4.3 průměrné vypočtené hodnoty a nejistoty typu A činitele odrazivosti.

f [Hz]	500	1000	2000	3000	4000	5000	6000
β [-]	0,93583	0,89065	0,76215	0,63262	0,58845	0,60703	0,61189
$u_A(\beta)$	0,00056	0,00008	0,00011	0,00012	0,00008	0,00015	0,00025

Tab. 4.3: Tabulka průměrných hodnot činitele odrazivosti a nejistoty měření typu A činitele odrazivosti pro vybrané hodnoty kmitočtu - malá trubice

Obdobně jako při použití velké trubice byla vypočtena také nejistota typu A pro činitele pohltivosti (popsáno v kapitole 4.5). Nejistota typu A činitele pohltivosti je uvedena v grafu 4.16.



Obr. 4.16: Rozptyl frekvenční závislost činitele pohltivosti - malá trubice

Graf 4.16 byl opět za účelem zobrazení nejistoty měření činitele pohltivosti přiblížen a zobrazen (obrázek 4.17).

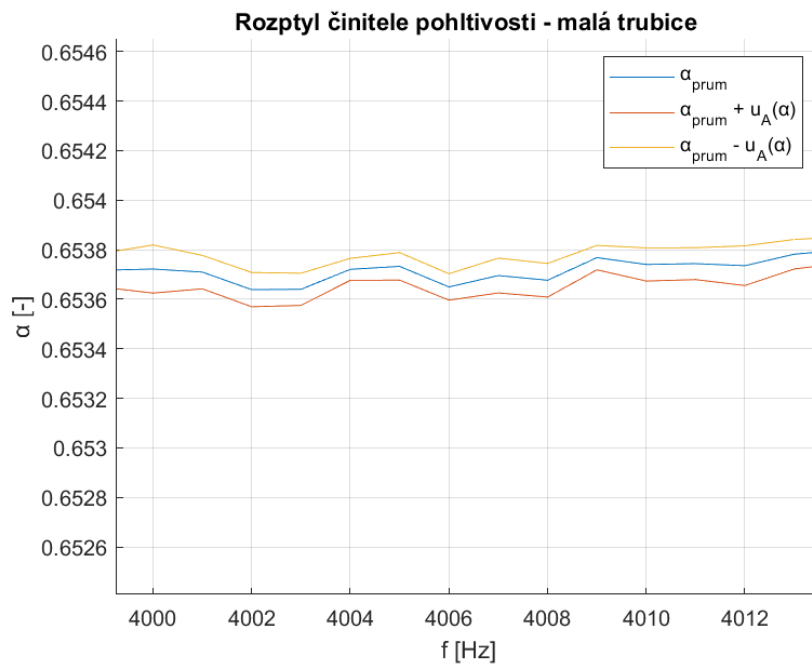
Pro vybrané hodnoty frekvencí byla rovněž vytvořena tabulka 4.4 průměrné vypočtené hodnoty a nejistoty typu A činitele pohltivosti.

f [Hz]	500	1000	2000	3000	4000	5000	6000
α [-]	0,12422	0,20675	0,41913	0,59980	0,65372	0,63151	0,62559
$u_A(\alpha)$	0,00105	0,00013	0,00017	0,00015	0,00010	0,00018	0,00031

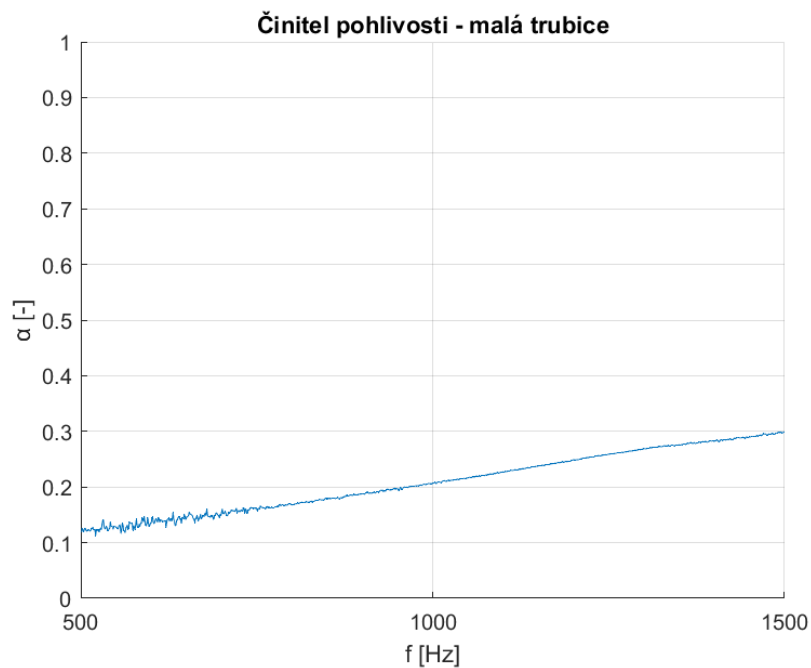
Tab. 4.4: Tabulka průměrných hodnot činitele pohltivosti a nejistoty měření typu A činitele pohltivosti pro vybrané hodnoty kmitočtu - malá trubice

V grafech uvedených výše může být pozorován rozkmit činitele pohltivosti a odrazivosti pro frekvence z rozsahu od 500 Hz do 850 Hz, což je způsobeno zobrazením dat mimo rozsah frekvencí měřitelných pomocí malé impedanční trubice (popsáno v kapitole 1.4.1). Na obrázku 4.18 je uvedena frekvenční závislost činitele pohltivosti pro frekvence 500 Hz - 1500 Hz.

Pro zbylý zobrazený frekvenční rozsah (850 Hz - 6860 Hz) mají data činitele odrazivosti klesající charakter.



Obr. 4.17: Rozptyl frekvenční závislost činitele pohltivosti (přibližný) - malá trubice



Obr. 4.18: Frekvenční závislost činitele pohltivosti - malá trubice

4.2 Porovnání naměřených dat

V této kapitole budou porovnány výstupy jednotlivých metod měření, konkrétně: vlastní realizace s využitím softwaru LabVIEW, měření využívající softwaru PULSE LabShop a realizace využívající softwaru Matlab k výpočtu frekvenčních závislostí. Výstupy měření pro oba rozměry trubice budou porovnávány na základě parametru činitele pohltivosti referenčních vzorků. Výsledky měření a výpočtů černého vzorku budou porovnávány na základě měření činitele pohltivosti pouze pomocí velké trubice.

Data naměřená pomocí velké trubice budou porovnávána v rozsahu frekvencí 50 Hz až 1600 Hz a data naměřená pomocí malé trubice na frekvenčním rozsahu 500 Hz až 6400 Hz. Tento rozsah je dán výrobcem trubice a probíhalo na něm měření pomocí programu PULSE.

Na závěr zde bude uvedeno celkové zhodnocení použitých metod měření a výpočtů v závislosti na dosažených výstupech a dostupnosti softwaru.

4.2.1 Měření referenčního vzorku

Jak již bylo zmíněno, měření na referenčním vzorku dvou velikostí probíhalo s využitím velké i malé trubice. Hodnoty činitele pohltivosti pro tento vzorek (materiál) jsou přímo specifikovány výrobcem, což bylo použito k orientačnímu porovnání dosažených výsledků.

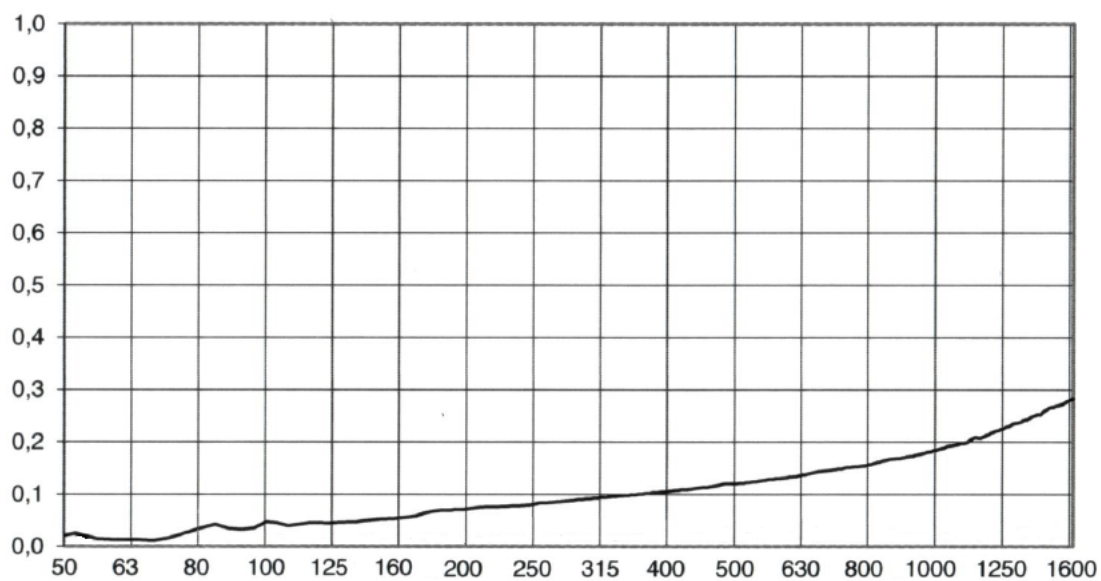
Velká impedanční trubice

V grafu na obrázku 4.19 je uvedena frekvenční závislost činitele pohltivosti udávána výrobcem trubice (respektive vzorku) při měření s využitím velké trubice.

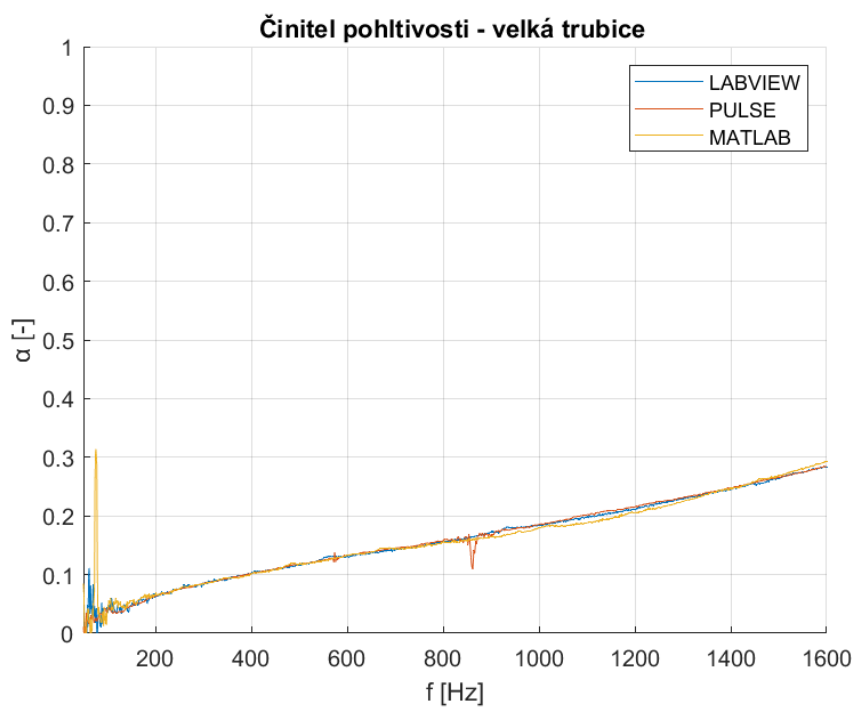
Graf uvedený na obrázku 4.19 byl poskytnut pouze v papírové formě bez bližší specifikace zobrazených hodnot, tudíž není možné tyto data přenést do grafu pro porovnání jednotlivých metod měření a výpočtů. Porovnání je možné provést pouze vizuálně.

Pro porovnání jednotlivých metod měření byl vytvořen graf uvedený na obrázku 4.20, kde jsou vyobrazeny frekvenční závislosti činitele pohltivosti dosažené měřením a výpočty pomocí zmíněných tří metod.

V grafu 4.20 je možné vidět propad činitele pohltivosti při frekvenci přibližně 850 Hz v případě měření pomocí programu PULSE. Tato chyba byla konzistentní, vyskytovala se při opakovaném měření. Vzhledem k tomu, že se tato chyba neprojevila při vlastní realizaci měření je pravděpodobné, že se jedná o chybu metody měření (měřicího softwaru).



Obr. 4.19: Frekvenční závislost činitele pohltivosti referenčního vzorku (pro frekvenci 50 Hz - 1600 Hz) - udáváno výrobcem



Obr. 4.20: Frekvenční závislost činitele pohltivosti referenčního vzorku pro různé metody měření (frekvence 50 Hz - 1600 Hz)

Metoda, která k výpočtu využívá softwaru Matlab je zde uvedena pouze jako další způsob zpracování naměřených dat k vizuálnímu porovnání v grafu. Lze vidět (graf 4.20) patrný rozdíl ve frekvenční závislosti v porovnání se zbylými dvěma metodami měření. Tato odchylka může být způsobena neúmyslným posunem vzorku v trubici mezi jednotlivými měřeními nebo vlastnostmi konkrétní metody výpočtu programem Matlab.

Při porovnání grafu činitele pohltivosti od výrobce (4.19) a naměřených průběhů činitele pohltivosti naměřenými danými metodami (4.20) je možné vidět podobnost v těchto grafech. Propad činitele pohltivosti zmíněný v odstavci výše se v tomto grafu nevyskytuje.

Pro zjištění chyby měření vlastní metody měření byla vytvořena tabulka 4.5 vybraných hodnot frekvence s příslušnými činiteli pohltivosti, pro které byla vypočtena relativní chyba δ [%] měření činitele pohltivosti referenčního vzorku. Hodnoty činitele pohltivosti příslušející jednotlivým frekvencím, které jsou uvedeným v grafu poskytnutém výrobcem, nejsou dostupná a musela by být pouze orientačně odhadnuta. Tento způsob stanovení by však byl nepřesný, tudíž za správné hodnoty činitele pohltivosti byly považovány hodnoty naměřené pomocí softwaru PULSE LabShop.

f [Hz]	100	200	300	500	700	1000	1300	1600
α_S [—]	0,0380	0,0633	0,0854	0,1173	0,1454	0,1852	0,2309	0,2843
α_M [—]	0,0426	0,0615	0,0863	0,1166	0,1424	0,1844	0,2293	0,2828
δ [%]	12,0090	-2,7744	1,0046	-0,6025	-2,0916	-0,4330	-0,6835	-0,5381

Tab. 4.5: Tabulka výpočtu relativní chyby měření činitele pohltivosti - velká trubice

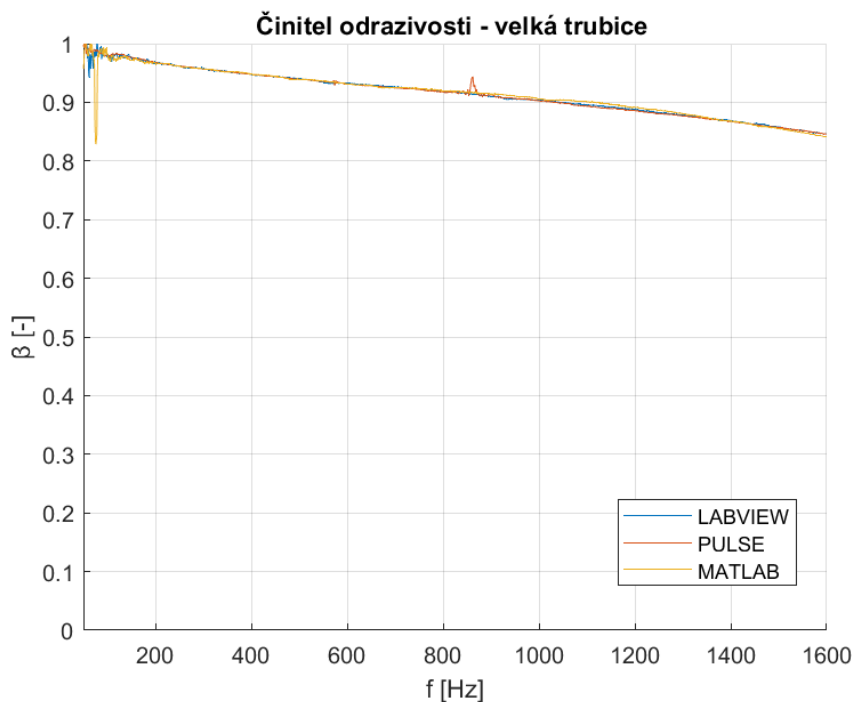
Hodnota relativní chyby δ byla stanovena podle následujícího vzorce:

$$\delta = \frac{\alpha_M - \alpha_S}{\alpha_S} \cdot 100, \quad (4.3)$$

kde α_M představuje hodnotu činitele pohltivosti určenou na základě vlastní metody měření a α_S reprezentuje hodnotu činitele pohltivosti stanovenou využitím programu PULSE LabShop.

Relativní chyba určená pro frekvenci 100 Hz je řádově vyšší z důvodu rozkmitu činitele pohltivosti pro nízké frekvence při vlastní realizaci. Rozkmit je způsoben tím, že jsou data mimo rozsah měřitelné frekvence stanovený dle normy, ze které se při vlastní realizaci měření vycházelo. Kromě již zmíněné hodnoty se relativní chyba pohybuje v řádu desetin až jednotek procenta, což lze brát jako chybu přijatelnou.

Obdobný graf porovnávající jednotlivé metody měření a výpočtů byl také vyhotoven pro činitele odrazivosti. Tento graf je uveden na obrázku 4.21. V grafu lze rovněž vidět inkonzistenci metody měření využívající software PULSE LabShop okolo frekvence 850 Hz.



Obr. 4.21: Frekvenční závislost činitele pohltivosti referenčního vzorku pro různé metody měření (frekvence 50 Hz - 1600 Hz)

Malá impedanční trubice

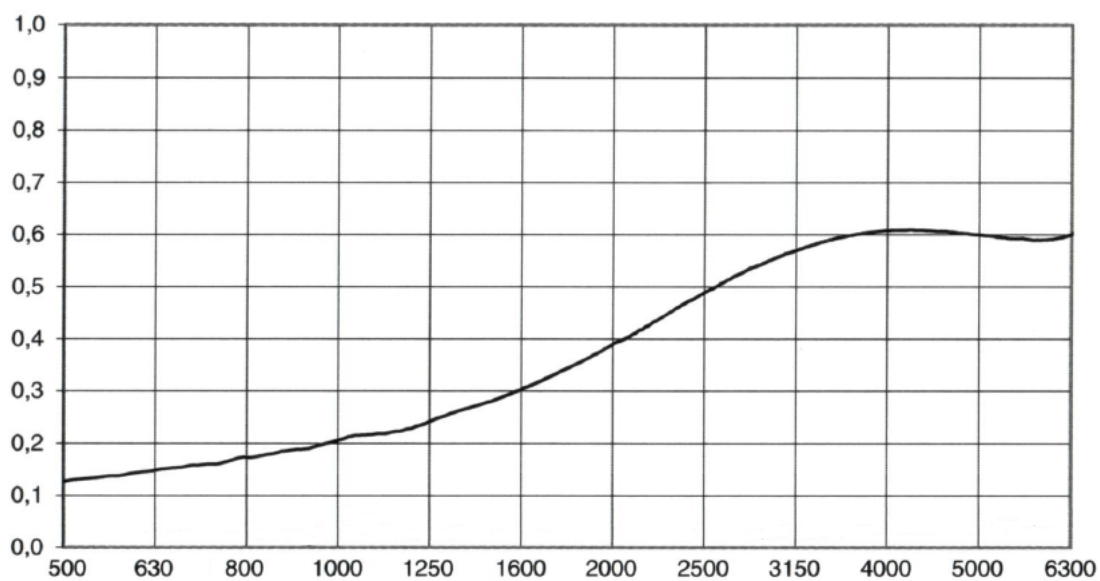
V grafu na obrázku 4.22 je uvedena frekvenční závislost činitele pohltivosti udávána výrobcem trubice (respektive vzorku) při měření za využití malé trubice.

Graf uvedený na obrázku 4.22 byl rovněž poskytnut pouze v papírové formě, tedy není možné tyto data přesně přenést do grafu pro porovnání daných metod měření a výpočtů.

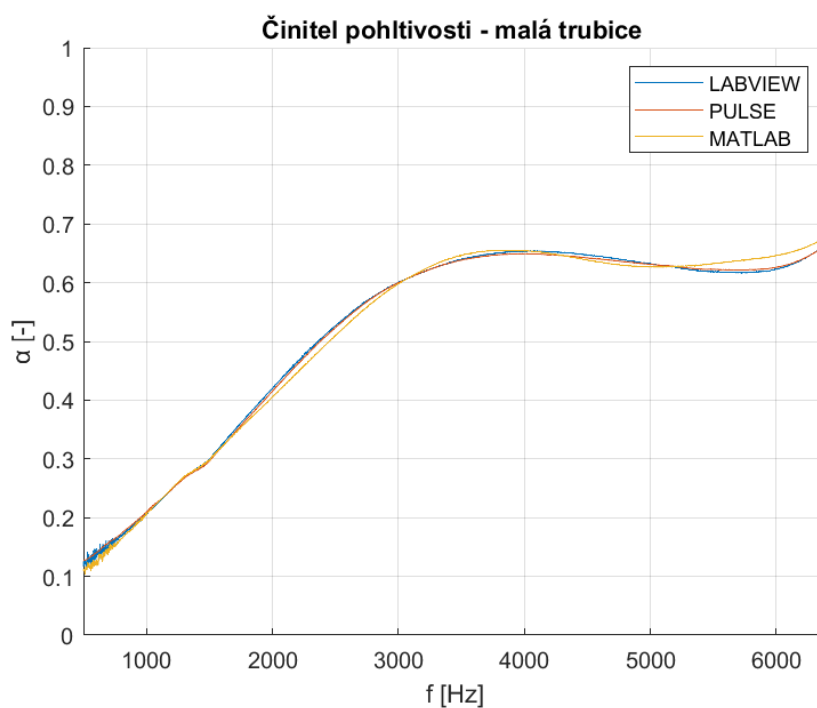
Za účelem porovnání jednotlivých metod měření byl vytvořen graf uvedený na obrázku 4.23, kde jsou vyobrazeny frekvenční závislosti činitele pohltivosti dosažené měřeními a výpočty zmiňovanými metodami.

Metoda, která pro výpočty využívá softwaru Matlab je zde uvedena pouze jako další způsob zpracování naměřených dat k vizuálnímu porovnání v grafu. Stejně jako v případě velké trubice lze vidět (v grafu 4.23) patrný rozdíl ve frekvenční závislosti v porovnání se zbylými dvěma metodami měření. Tato odchylka mohla být způsobena neúmyslným posunem vzorku v trubici mezi jednotlivými měřeními nebo vlastnostmi konkrétní metody výpočtu pomocí programu Matlab.

Při porovnání grafu činitele pohltivosti od výrobce (4.22) s průběhy činitele pohltivosti třech metod měření a výpočtů (4.23) je možné opět vidět podobnost charakteru průběhu křivek v těchto grafech. Rovněž je možné pozorovat, že namě-



Obr. 4.22: Frekvenční závislost činitele pohltivosti referenčního vzorku (frekvence 500 Hz - 6300 Hz) - udáváno výrobcem



Obr. 4.23: Frekvenční závislost činitele pohltivosti referenčního vzorku pro různé metody měření (frekvence 500 Hz - 6400 Hz) - velká trubice

řené a vypočtené hodnoty činitele pohltivosti číselně zcela nesouhlasí. To je způsobeno rozlišným umístěním měřeného vzorku v trubici. Tento nesoulad byl pozorován převážně při měření s využitím malé trubice, kdy i orientace homogenního vzorku umístěného v trubici měla zásadní význam na naměřené hodnoty činitele pohltivosti. Data naměřená vlastní metodou a metodou měření využívající software PULSE LabShop se však až na mírné odchylky shodují.

Pro zjištění chyby měření vlastní metody byla vytvořena tabulka 4.6 s vybranými hodnotami frekvence a příslušnými činiteli pohltivosti, pro které byla vypočtena relativní chyba δ [%] měření činitele pohltivosti referenčního vzorku. Jako správné hodnoty činitele pohltivosti byly považovány hodnoty naměřené pomocí softwaru PULSE LabShop. Relativní chyba byla vypočtena dle vzorce 4.3.

f [Hz]	600	1000	2000	3000	4000	5000	6000	6400
α_S [–]	0,1399	0,2093	0,4148	0,6001	0,6493	0,6313	0,6262	0,6643
α_M [–]	0,1349	0,2063	0,4194	0,6006	0,6532	0,6325	0,6232	0,6662
δ [%]	-3,5688	-1,4563	1,0951	0,0805	0,5984	0,1920	-0,4732	0,2990

Tab. 4.6: Tabulka výpočtu relativní chyby měření činitele pohltivosti - malá trubice

Relativní chyba určená pro frekvenci 600 Hz je vyšší a to z důvodu rozkmitu činitele pohltivosti pro frekvenční rozsah 500 Hz až 800 Hz v případě vlastní realizace. Rozkmit je způsoben tím, že jsou data mimo rozsah měřitelné frekvence stanoveny dle normy ČSN ISO 10534-2 [8].

Obdobný graf porovnávající jednotlivé metody měření byl také vyhotoven pro činitele odrazivosti. Tento graf je uveden na obrázku 4.24.

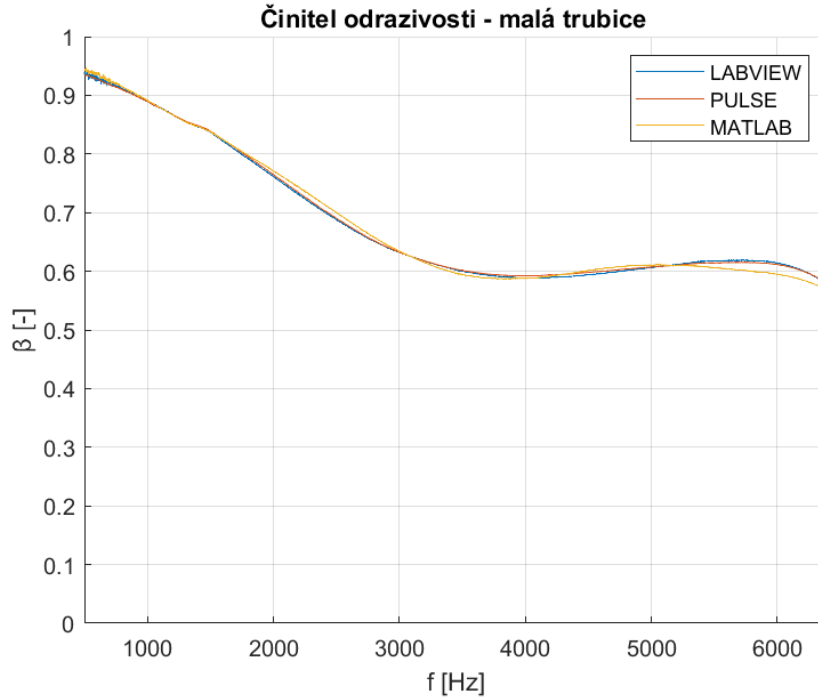
4.2.2 Měření vzorku firmy Knauf (černý vzorek)

Za účelem porovnání jednotlivých metod měření byl vytvořen graf uvedený na obrázku 4.25, kde jsou vyobrazeny frekvenční závislosti činitele pohltivosti dosažené měřením a výpočty třemi metodami.

V grafu 4.25 je rovněž možné vidět propad činitele pohltivosti při frekvenci přibližně 850 Hz v případě měření pomocí programu PULSE LabShop, stejně jako v případě měření s referenčním vzorkem a velkou trubicí.

Byla opět stanovena chyba měření δ [%] viz. tabulka 4.7. Jako správné hodnoty činitele pohltivosti byly považovány hodnoty naměřené pomocí softwaru PULSE LabShop. Relativní chyba byla vypočtena dle vzorce 4.3.

Relativní chyba stanovena pro frekvenci 100 Hz a 200 Hz je řádově vyšší a to z důvodu, že jsou naměřená data pro tento frekvenční rozsah mimo rozsah měřitelné



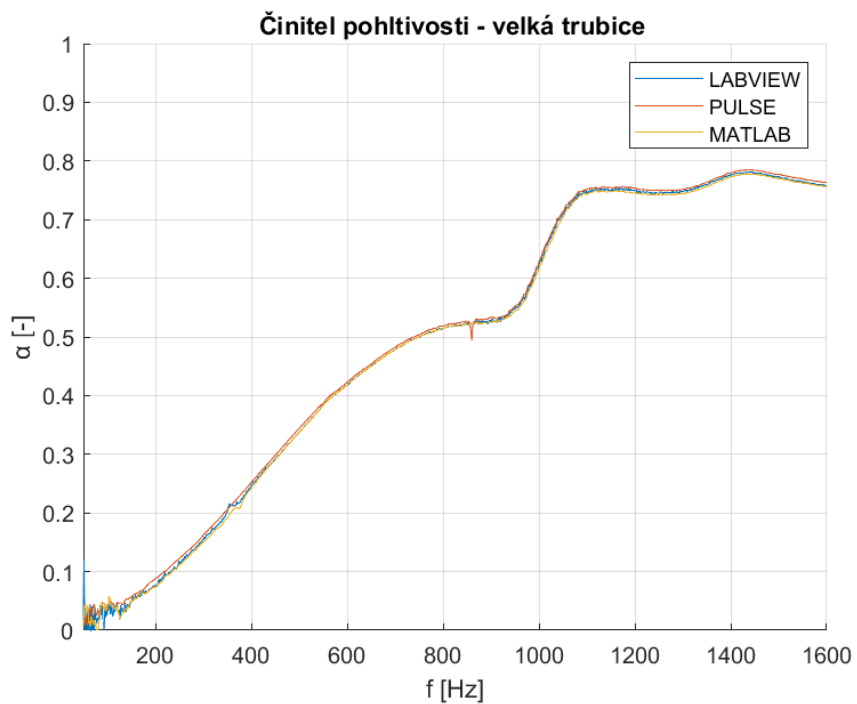
Obr. 4.24: Frekvenční závislost činitele odrazivosti referenčního vzorku pro různé metody měření (frekvence 500 Hz - 6400 Hz) - velká trubice

f [Hz]	100	200	300	500	700	1000	1300	1600
$\alpha_S [-]$	0,0435	0,0857	0,1604	0,3417	0,4803	0,6272	0,7497	0,7612
$\alpha_M [-]$	0,0309	0,0742	0,1543	0,3387	0,4783	0,6252	0,7484	0,7572
$\delta [\%]$	-28,919	-13,473	-3,788	-0,885	-0,417	-0,315	-0,180	-0,520

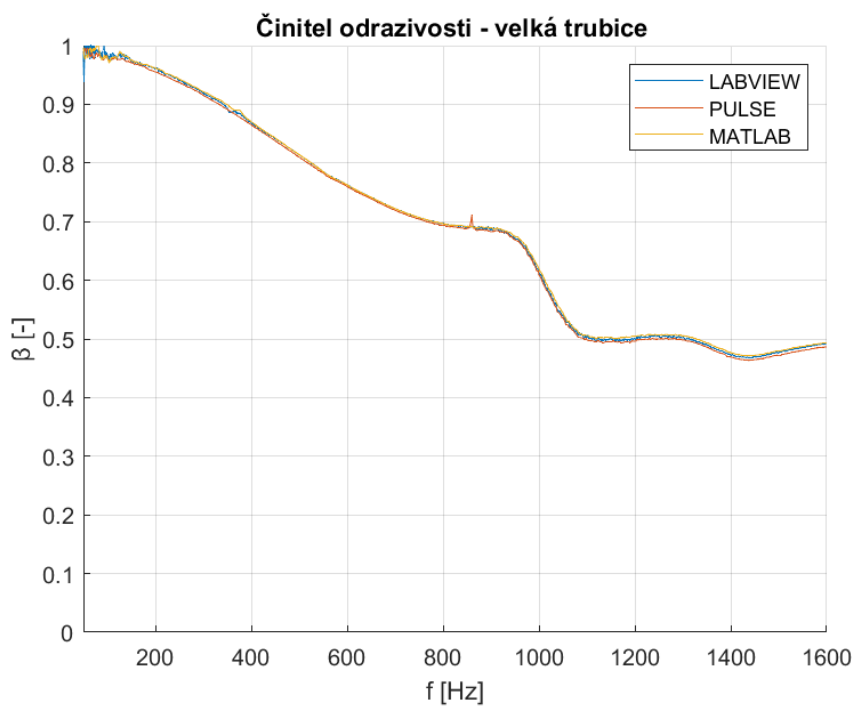
Tab. 4.7: Tabulka výpočtu relativní chyby měření činitele pohltivosti - černý vzorek

frekvence pomocí vlastní měřicí metody. Kromě již zmíněných hodnot se relativní chyba pohybuje v řádu desetin až jednotek procenta.

Obdobný graf porovnávající jednotlivé metody měření byl také vyhotoven pro činitele odrazivosti. Tento graf je uveden na obrázku 4.26.



Obr. 4.25: Frekvenční závislost činitele pohltivosti pro různé metody měření



Obr. 4.26: Frekvenční závislost činitele odrazivosti - černý vzorek

4.3 Celkové zhodnocení metod měření

Na základě prezentovaných výsledků metody měření využívající program PULSE LabShop a metody měření, při níž bylo pro stanovení akustických parametrů materiálů využito vlastní realizace v prostředí LabVIEW se dá usoudit, že tyto metody měření jsou srovnatelné, a to na frekvenčních rozsazích definovaných podle normy ČSN ISO 10534-2 [8], které jsou popsány v kapitole 1.4.1. Hodnoty relativní chyby činitele pohltivosti se ve vypočteném frekvenčním rozsahu pohybují v řádu desetin procenta až jednotek procenta. Mimo tyto rozsahy se hodnoty relativní chyby činitele pohltivosti pohybují v řádu desítek procent.

Na základě porovnání výstupů z obou metod lze říci, že bylo dosaženo hlavního cíle práce a to navržení a realizace funkčního měřicího systému pro akustickou charakterizaci materiálů pomocí impedanční trubice.

Výhodou vývojového prostředí LabVIEW použitého pro vlastní realizaci je softwarová dostupnost v porovnání s programem PULSE LabShop. Vlastní realizace programu pro měření akustických parametrů materiálů může být vhodnou alternativou k programu zhotoveného společností B&K (PULSE LabShop).

Realizace pomocí programu Matlab v této práci byla použita jako doplňkový způsob zpracování dat k grafickému porovnání výstupů získaných z vlastního měřicího systému. Po přidání možnosti měření do kódu programu Matlab by i tato metoda mohla být plnohodnotným řešením používaným ke stanovení akustických parametrů materiálu.

Závěr

Cílem této diplomové práce byl návrh a realizace otevřeného měřicího systému pro akustickou charakterizaci materiálů pomocí impedanční trubice B&K 4206. Tento měřicí systém byl navržen na platformě prostředků firmy National Instruments. Součástí výstupu práce bylo rovněž ověření funkčnosti navrženého a realizovaného měřicího systému na základě stanovení a vyhodnocení parametru činitele akustické pohltivosti a odrazivosti definovaných zkušebních vzorků a jejich srovnání s výstupy získanými využitím systému PULSE LabShop.

Tato diplomová práce byla strukturována do čtyř hlavních kapitol dle dílčích bodů zadání.

První kapitola byla věnována literární rešerši týkající se stanovení akustických parametrů materiálů. Nejprve byly popsány základní pojmy akustiky a nejdůležitější veličiny používané v akustice potřebné k pochopení problematiky práce. Dále byly představeny charakteristické veličiny - činitele zvuku, které byly v rámci této práce měřeny. V další části kapitoly byla popsána impedanční trubice B&K 4206, která tvořila stěžejní prvek měřicího systému. Závěr této kapitoly pojednává o metodě přenosové funkce, která byla později použita ke stanovení akustických parametrů materiálu s využitím impedanční trubice.

V druhé kapitole byl představen postup provedení měření parametrů materiálu pomocí impedanční trubice s využitím softwarových prostředků PULSE LabShop včetně použitých zařízení.

Třetí kapitola byla věnována návrhu a realizaci vlastního měřicího systému s využitím vývojového prostředí LabVIEW. Dále byly definovány požadavky na měřicí systém a byla popsána zařízení použita pro měření akustických parametrů materiálu této měřicí metody. Následně byly specifikovány jednotlivé funkce vlastního realizovaného měřicího softwaru. Kapitola rovněž zahrnuje přehledný návod s postupem pro ovládání navrženého programu.

Poslední čtvrtá kapitola byla věnována zhodnocení naměřených dat na základě parametru činitele pohltivosti a odrazivosti. V rámci této kapitoly byla data, naměřená pomocí jednotlivých metod, graficky zobrazena. Rovněž byl proveden výpočet nejistoty typu A z dat naměřených pomocí vlastní realizace. Jednotlivé metody měření byly na závěr porovnány na základě relativní chyby měření.

Na základě celkového zhodnocení lze říci, že vlastní realizace programu a měřicího systému můžeme považovat za možnou alternativu k metodě využívající softwaru PULSE LabShop. Vlastní realizací měřicího systému byl splněn cíl této práce, tedy vytvořit otevřený měřicí systém pro akustickou charakterizaci materiálů využívající prostředky platformy National Instruments.

Literatura

- [1] *Akustika, základní pojmy a veličiny v akustice. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Ústav fyziky a materiálového inženýrství.* [online]. [cit. 23. 12. 2022]. Dostupné z URL:
<https://ufmi.ft.utb.cz/texty/env_fyzika/EF_02.pdf>.
- [2] *HEJGRLÍKOVÁ, Zuzana. Stanovení rezonance nanovlákněné vrstvy v závislosti na jejích parametrech. Brno, 2019, 62 str. Diplomová práce. Technická univerzita v liberci, Fakulta textilní, Katedra netkaných textilií.*
- [3] *HAVRÁNEK, Zdeněk. Akustická měření. Presentace pro předmět MPC-MTD. Vysoké učení technické v BRNĚ.*
- [4] *HLAVATÝ, Radek. Měření ultrazvukových polí hladinových snímačů. Brno, 2019, 62 str. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.*
- [5] Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně: *Pohlcování zvuku, šíření hluku ve volném a uzavřeném prostoru. Ústav fyziky a materiálového inženýrství.* [online]. [cit. 23. 12. 2022]. Dostupné z URL:
<https://ufmi.ft.utb.cz/texty/env_fyzika/EF_04.pdf>.
- [6] *Brüel & Kjær. Impedance tube manual: Impedance Tube Kit (50 Hz – 6.4 kHz) Type 4206* [online]. [cit. 26. 12. 2022]. Dostupné z URL:
<<https://www.bksv.com/media/doc/bp1039.pdf>>.
- [7] *Brüel & Kjær. Impedance tube manual: Impedance/Transition Loss Measuring Tubes Type 4206, 4206-A, 4206-T.* Dostupné v budově Ceitec.
- [8] *ČSN ISO 10534-2. Akustika - Určování činitele zvukové pohltivosti a akustické impedance v impedančních trubicích - Část 2: Metoda přenosové funkce. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1998, 28 stran.*
- [9] *Brüel & Kjær. Manual: TYPE 3160 GENERATOR MODULE* [online]. [cit. 26. 12. 2022]. Dostupné z URL:
<<https://www.bksv.com/en/instruments/daq-data-acquisition/lan-xi-daq-system/daq-modules/type-3160>>.
- [10] *Brüel & Kjær. Manual: Type 2735 MEASUREMENT POWER AMPLIFIER* [online]. [cit. 26. 12. 2022]. Dostupné z URL:

- <<https://www.bksv.com/en/transducers/acoustic/sound-sources/measurement-power-amplifier-2735>>.
- [11] *Brüel & Kjær. Catalogue: Transducers and conditioning* [online]. [cit. 26. 12. 2022]. Dostupné z URL: <<https://www.trstudio.com/files/Bruel&kjaerCatalogue.pdf>>.
- [12] *Brüel & Kjær. Manual: TYPE 4231 SOUND CALIBRATOR* [online]. [cit. 26. 12. 2022]. Dostupné z URL: <<https://www.bksv.com/en/transducers/acoustic/calibrators/sound-calibrator-4231>>.
- [13] *GRAS. Introduction Manual: POWER MODULE 12AQ* [online]. [cit. 25. 4. 2023]. Dostupné z URL: <<https://www.manualslib.com/manual/1972295/G-R-A-S-12aq.html#manual>>.
- [14] *Artisan Technologi Group. NI National Instruments PXIe-1082 PXI Chassis* [online]. [cit. 26. 4. 2023]. Dostupné z URL: <<https://www.artisanng.com/TestMeasurement/93794-1/National-Instruments-PXIe-1082-PXI-Chassis>>.
- [15] *NATIONAL INSTRUMENTS. PXI Express - NI PXIe-1082 User Manual* [online]. [cit. 26. 4. 2023]. Dostupné z URL: <<https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/pxie-1082-seri/resource/372752c.pdf>>.
- [16] *Artisan Technologi Group. NI National Instruments PXIe-8133 1.73 GHz PXI Express Controller* [online]. [cit. 26. 4. 2023]. Dostupné z URL: <<https://www.artisanng.com/TestMeasurement/94214-1/National-Instruments-PXIe-8133-1-73-GHz-PXI-Express-Controller>>.
- [17] *Artisan Technologi Group. NI PXI-4461 2-Input / 2-Output Dynamic Signal Analyzer* [online]. [cit. 26. 4. 2023]. Dostupné z URL: <<https://www.artisanng.com/TestMeasurement/77906-2/National-Instruments-PXI-4461-2-Input-2-Output-Dynamic-Signal-Analyzer>>.
- [18] *NATIONAL INSTRUMENTS. User Manual - NI PXI-4461* [online]. [cit. 26. 4. 2023]. Dostupné z URL: <<https://studylib.net/doc/18694674/ni-pxi-4461-user-manual>>.

- [19] *MANISH RAJ, SHAHAB FATIMA. Development of an experimental set-up to measure sound absorption coefficients of porous materials. Industrial Tribology, Machine Dynamics and Maintenance Engineering Centre (ITMMEC), Indian Institute of Technology Delhi.* [online]. [cit. 30. 4. 2023]. Dostupné z URL: <https://www.researchgate.net/publication/341700109_Development_of_an_experimental_set-up_to_measure_sound_absorption_coefficients_of_porous_materials>.
- [20] *Ústav Přístrojové Techniky, Akademie věd České republiky. Prezentace - Vzorování* [online]. [cit. 30. 4. 2023]. Dostupné z URL: <http://www.isibrno.cz/~joe/elektronika/elektronika_10.pdf>.
- [21] *National Instruments. LabVIEW MathScript RT Module - tf_estimate function* [online]. [cit. 26. 4. 2023]. Dostupné z URL: <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/labview-mathscript-rt-module/page/lvtextmath/msfunc_tf_estimate.html>.
- [22] *YANJUN WANG. Acoustic manipulation of sound with soft materials-based actuators. New Brunswick, New Jersey* [online]. [cit. 2. 5. 2023]. Dostupné z URL: <<https://rucore.libraries.rutgers.edu/rutgers-lib/48712/PDF/1/play/>>.

Seznam symbolů a zkratek

DAQ	Data acquisition modul - systém sběru dat
NI	National Instruments
c	$[m.s^{-1}]$ - rychlost zvuku
p_a	[Pa] - akustický tlak
u	$[m.s^{-1}]$ - akustická rychlost
W	[W] - akustický výkon
S	$[m^2]$ - plocha
I	$[W.m^{-2}]$ - intenzita zvuku
L_{P_a}	[dB] - hladina akustického tlaku
p_0	[Pa] - práh akustického tlaku
L_I	[dB] - hladina akustické intenzity
I_0	$[W.m^{-2}]$ - práh akustické intenzity
L_u	[dB] - hladina akustické rychlosti
u_0	$[m.s^{-1}]$ - je práh akustické rychlosti
Z	$[Pa.s.m^{-1}]$ - akustická impedance
R	Reálná část akustické impedance
X	Akustická reaktance
λ	[m] - vlnová délka
f	[Hz] - kmitočet
T	[s] - perioda
I_0	$[W.m^{-2}]$ - celková intenzita zvukové vlny dopadající na překážku
I_1	$[W.m^{-2}]$ - intenzita odražené části zvukové vlny
I_2	$[W.m^{-2}]$ - intenzita pohlcené části zvukové vlny
I_3	$[W.m^{-2}]$ - celková intenzita části zvukové vlny vyzářené za překážku

I_4	$[W.m^{-2}]$ - intenzita zvukové vlny, která prošla skrze póry překážky
I_5	$[W.m^{-2}]$ - intenzita zvukové vlny vyzářené v důsledku ohybového kmitání překážky do druhého prostoru
I_6	$[W.m^{-2}]$ - intenzita zvukové vlny vedené do jiných částí konstrukcí překážky
I_7	$[W.m^{-2}]$ - intenzita přeměněné části zvukové vlny na teplo
α	$[-]$ - činitel zvukové pohltivosti
β	$[-]$ - činitel zvukové odrazivosti
τ	$[-]$ - činitel zvukové průzvučnosti
ϵ	$[-]$ - činitel tepelné přeměny
f_d	$[Hz]$ - dolní pracovní kmitočet trubice
f_h	$[Hz]$ - horní pracovní kmitočet trubice
d	$[m]$ - vnitřní průměr použité trubice
s	$[m]$ - je vzdálenost mezi mikrofony
H_{12}^I	Přenosová funkce pro konfiguraci I
H_{12}^{II}	Přenosová funkce pro konfiguraci II
H_{12}	Výsledná přenosová funkce
S_{12}	Vzájemné spektrum mezi naměřenými signály
S_{21}	Vzájemné spektrum mezi naměřenými signály
S_{11}	Autospektrum signálu
S_{22}	Autospektrum signálu
H_r	Reálná část přenosové funkce
H_i	Imaginární část přenosové funkce
p_1	Fourierova transformace příslušného časového průběhu akustického tlaku
p_2	Fourierova transformace příslušného časového průběhu akustického tlaku

Φ	[rad] - fáze přenosové funkce
β_r	Reálná složka činitele odrazu
β_i	Imaginární složka činitele odrazu
x_1	Vzdálenost mezi vzdálenějším místem mikrofonu a vzorkem umístěným v trubici
Φ_r	[rad] - je fázový úhel činitele odrazu
H_I	Přenosová funkce pro samostatnou dopadající vlnu
H_R	Přenosová funkce pro samostatnou odrážející se vlnu
k_0	Komplexní vlnové číslo
k'_0	Reálná složka vlnového čísla
k''_0	Komplexní složka vlnového čísla
c_0	[m/s] - rychlost zvuku při specifické teplotě okolí
λ_0	[m] - vlnová délka při specifické teplotě okolí
T_K	[K] - teplota v kelvinech
ρ	[kg/m ³] - hustota vzduchu
T_0	[K] - teplota okolí v kelvinech odpovídající hodnotě 293 K
ρ_0	[kg/m ³] - hustota vzduchu odpovídající hodnotě 1,186 kg/m ³
p_0	[kPa] - atmosferický tlak odpovídající hodnotě 101,325 kPa
p_a	[kPa] - atmosferický tlak okolí
G	Normovaná akustická admitance
g	Reálná složka normované akustické admitance
b	Imaginární složka normované akustické admitance
\bar{x}	Aritmetický průměr proměnné x
x_i	Vypočtená hodnota pro i-té měření
N	Počet provedených měření

$u_A(x)$	Nejistota typu A
α_M	[-] - činitele odrazivosti určený na základě vlastní metody měření
α_S	[-] - činitele pohltivosti stanovený využitím programu PULSE LabShop
δ	[%] - relativní chyba

Seznam příloh

Příloha A - Složka se souborem programu měřicího systému pro akustickou charakterizaci materiálů

Příloha B - Tabulky s naměřenými a vypočtenými hodnotami

Tyto přílohy jsou umístěny na přiloženém datovém médiu.