



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

LABORATORNÍ PŘÍPRAVEK PRO MĚŘENÍ SLUCHÁTEK

LABORATORY DEVICE FOR MEASURING HEADPHONES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Kamil Holub

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.

BRNO 2022

Bakalářská práce

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

Student: Ing. Kamil Holub

ID: 170882

Ročník: 3

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Laboratorní přípravek pro měření sluchátek

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte konstrukci simulátorů ucha pro měření vlastností sluchátek různých typů a související mezinárodní normy. Navrhněte a zkonstruujte, například pomocí 3D tiskárny, jednoduché simulátory uzavřeného ucha pro měření náušních a vsuvných sluchátek podle doporučení IEC 60318, které budou využívat 1/2" nebo 1/4" měřicí kondenzátorový mikrofón. Na těchto simulátorech následně proveďte měření modulových kmitočtových charakteristik a vstupní impedance vybraných sluchátek a porovnejte je s měřením na profesionálních simulátorech uzavřeného ucha a na simulátoru hlavy a torza pro telekomunikace. Navrhněte laboratorní úlohu zabývající se měřením parametrů sluchátek na těchto simulátorech a vytvořte k ní návod.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] IEC 60318-1:2009. Electroacoustics - Simulators of human head and ear - Part 1: Ear simulator for the measurement of supra-aural and circumaural earphones. 2.0. International Electrotechnical Commission, 2009.
- [2] IEC 60318-4:2010. Electroacoustics - Simulators of human head and ear - Part 4: Occluded-ear simulator for the measurement of earphones coupled to the ear by means of ear inserts. International Electrotechnical Commission, 2010.

Termín zadání: 7.2.2022

Termín odevzdání: 31.5.2022

Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.

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

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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

Bakalářská práce se zabývá návrhem a konstrukcí přípravku pro měření charakteristik sluchátek. Úvodem práce jsou popsány typy sluchátek, jejich rozdělení z hlediska konstrukce a jejich typické charakteristiky. Dále jsou uvedeny přípravky pro měření sluchátek popsané normami ČSN EN 60318 a jejich rozdělení z hlediska konstrukce a využití. V navazující části je navržen vlastní přípravek, který byl následně zhotoven za pomoci 3D tisku. V rámci práce je na tomto přípravku provedeno měření modulových kmitočtových charakteristik a vstupních impedancí různých sluchátek a ty jsou následně porovnány s měřením na profesionálních měřicích přípravcích. Závěrem práce je navržen laboratorní úlohy, která zahrnuje měření sluchátek pomocí tohoto přípravku.

Klíčová slova

Sluchátka, umělé ucho, akustický vazební člen, kmitočtová charakteristika, impedance.

Abstract

This bachelor's thesis deals with the design and assembly of headphones test fixture. The introduction describes the types of headphones, their classification in terms of design and their typical specifications followed by a description of instruments for measuring headphones, defined by standards ČSN EN 60318 and their classification in terms of design and use. The following part is devoted to a design of a test fixture, which is subsequently put together using 3D printing. As part of the thesis, the measurement of frequency response and input impedances of various headphones is performed on the fixture. These are then compared with measurements on professional measuring devices. In the last part is described a laboratory task, which includes the measurement of headphones using this test fixture.

Keywords

Headphones, artificial ear, acoustic coupler, frequency response, impedance.

Bibliografická citace

HOLUB, Kamil. *Laboratorní přípravek pro měření sluchátek* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-29]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/141299>.

Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta: *Kamil Holub*

VUT ID studenta: *170882*

Typ práce: *Bakalářská práce*

Akademický rok: *2021/22*

Téma závěrečné práce: *Laboratorní přípravek pro měření sluchátek*

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

V Brně dne: 27. května 2022

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	7
SEZNAM TABULEK	8
ÚVOD	9
1. SLUCHÁTKA	10
1.1 PARAMETRY SLUCHÁTEK	11
2. SIMULÁTORY UCHA PRO MĚŘENÍ VLASTNOSTÍ SLUCHÁTEK	14
2.1 SIMULÁTOR PRO MĚŘENÍ NÁUŠNÍCH SLUCHÁTEK S UZAVŘENÝM OBJEMEM	14
2.2 SIMULÁTOR PRO MĚŘENÍ SLUCHÁTEK SPOJENÝCH S UCHEM POMOCÍ UŠNÍCH VLOŽEK	18
2.3 SIMULÁTOR ROZŠÍŘENÝ O VÁLCOVOU DUTINU SIMULUJÍCÍ VNĚJŠÍ UCHO	21
2.4 AKUSTICKÉ VAZEBNÍ ČLENY	23
2.4.1 <i>Akustický vazební člen pro kalibraci náušních sluchátek používaných v audiometrii</i>	23
2.4.2 <i>Akustický vazební člen pro měření sluchadel a sluchátek vkládaných do ucha pomocí ušních vložek</i>	24
3. LABORATORNÍ PŘÍPRAVEK.....	26
3.1 NÁVRH MODELU SIMULÁTORU PRO MĚŘENÍ NÁUŠNÍCH SLUCHÁTEK	26
3.2 NÁVRH MODELU SIMULÁTORU PRO MĚŘENÍ VSUVNÝCH SLUCHÁTEK	30
3.3 TISK A ZHODNOCENÍ MODELU SIMULÁTORU	32
3.4 MĚŘENÍ VLASTNOSTÍ SLUCHÁTEK NA PŘÍPRAVKU	35
3.4.1 <i>Modulová kmitočtová charakteristika</i>	35
3.4.2 <i>Vstupní impedance</i>	39
3.5 LABORATORNÍ ÚLOHA.....	40
4. ZÁVĚR.....	41
LITERATURA	42
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	44
SEZNAM PŘÍLOH	45

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Rozdělení sluchátek dle usazení [1].....	10
1.2	Otevřená a uzavřená sluchátka [3].....	11
2.1	Simulátor ucha: Typ 1 [7].....	14
2.2	Akustický vazební člen: Typ 1 [8].....	15
2.3	Schematický řez simulátoru v konfiguraci pro náušní sluchátka [5].....	15
2.4	Analogický elektrický obvod: Typ 1 [5].....	17
2.5	Simulátor ucha s adaptérem pro sluchátka s uzavřeným objemem [9].....	17
2.6	Simulátor ucha: Typ 2 [10].....	18
2.7	Akustický vazební člen: Typ 2 [6].....	19
2.8	Adaptéry simulátoru ušního nástavce [11].....	20
2.9	Zjednodušený simulátor vnějšího ucha [12].....	21
2.10	Simulátor boltce [13].....	22
2.11	Simulátor boltce (zjednodušený) [14].....	22
2.12	Rozměry akustického vazebního členu [15].....	23
2.13	Připojení sluchátka vkládaného do ucha k akustické spojce [16].....	24
2.14	Připojení vloženého sluchátka k akustické spojce [16].....	25
2.15	Připojení závěsného sluchadla k akustické spojce [16].....	25
3.1	Model akustického vazebního členu pro náušní sluchátka (1:1).....	26
3.2	Akustický zkušební přípravek [17].....	27
3.3	Model akustického zkušebního přípravku.....	27
3.4	Tělo zkušebního přípravku (1:2).....	28
3.5	Víko zkušebního přípravku (1:1).....	28
3.6	Stojánek zkušebního přípravku (1:2).....	28
3.7	Závitová tyč zkušebního přípravku (1:2).....	29
3.8	Opora hlavového mostu zkušebního přípravku (1:2).....	29
3.9	Matice pro závitovou tyč zkušebního přípravku (1:1).....	29
3.10	Adaptér pro měření circum-aurálních sluchátek (1:2).....	30
3.11	Přípravek s adaptéry pro měření circum-aurálních sluchátek.....	30
3.12	Model akustického vazebního členu pro vložená sluchátka (1:1).....	31
3.13	Model akustického vazebního členu pro měření vsuvných sluchátek.....	31
3.14	3D FDM tiskárna.....	32
3.15	Měřicí přípravek s umístěným mikrofonem.....	32
3.16	Měřicí přípravek pro měření náušních sluchátek.....	33
3.17	Měřicí přípravek pro měření sluchátek s uzavřeným objemem.....	33
3.18	Měřicí přípravek pro měření vsuvných sluchátek.....	34
3.19	Simulátor ucha (vlevo) [8] a HATS (vpravo) [13].....	35
3.20	Pracoviště pro měření kmit. char. na vlastním přípravku.....	36
3.21	Pracoviště pro měření kmit. char. na HATS.....	36
3.22	Pracoviště pro měření kmit. char. na simulátoru umělého ucha.....	36
3.23	Pracoviště pro měření kmit. char. na vlastním přípravku s APx515.....	37
3.24	Pracoviště pro měření kmit. char. na HATS s APx515.....	37
3.25	Naměřené kmitočtové charakteristiky sluchátek.....	38
3.26	Modulová impedanční charakteristika sluchátek.....	39

SEZNAM TABULEK

2.1	Specifikace hladiny přenosové impedance [5].	16
2.2	Specifikace hladiny přenosové akustické impedance [6].	20
3.1	Náklady na tisk modelu simulátoru ucha.....	34

ÚVOD

Spolu s reproduktory jsou sluchátka nedílnou součástí audio řetězce, kde slouží k převodu zvukového signálu na mechanické vlnění. Na rozdíl od reproduktorů, které musí generovat signál s dostatečnou amplitudou, aby byl zvuk slyšitelný z dálky, sluchátka generují zvukové vlnění pouze několik milimetrů od ušních bubínek.

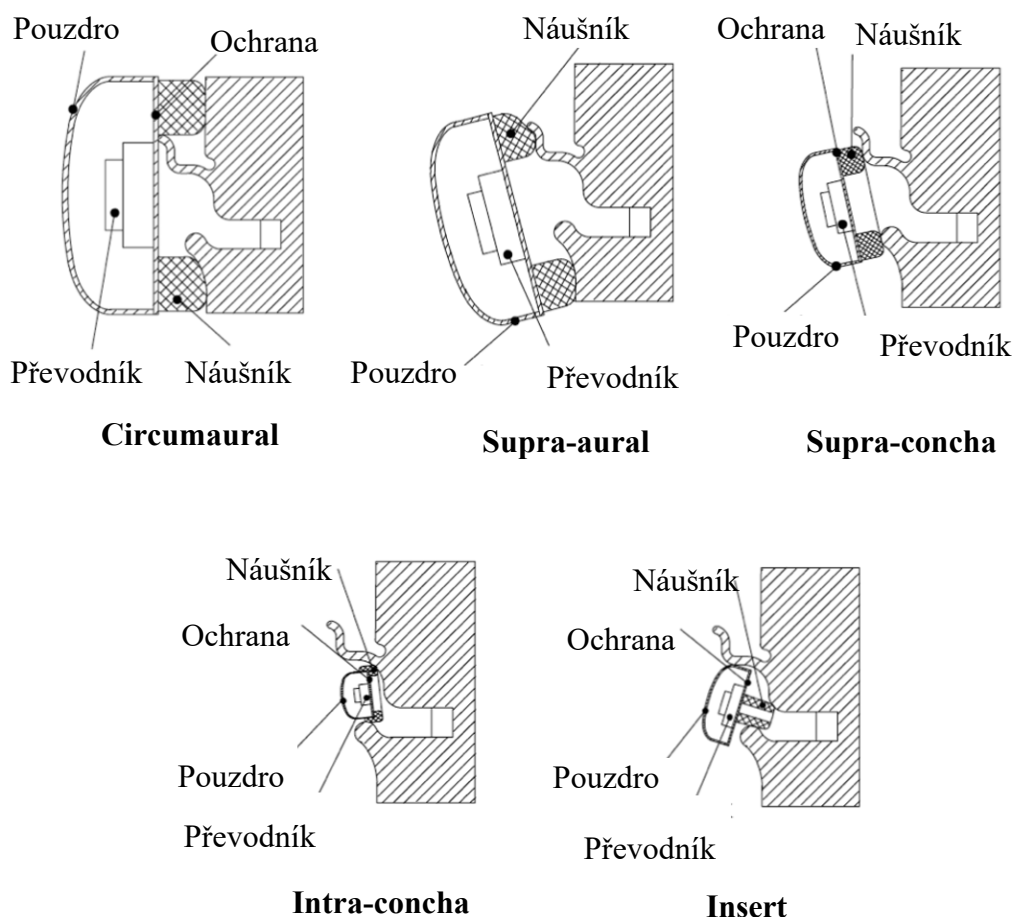
Při měření parametrů sluchátek je nezbytné vytvoření podmínek, které simulují jejich usazení na lidském sluchovém aparátu v závislosti na druhu konstrukce. Klíčovým prvkem je objem, který vzniká v dutině zvukovodu či ve vnějším uchu mezi ušním bubínkem a sluchátkem po jeho nasazení. Do tohoto objemu sluchátko vyzařuje, což zásadně ovlivní jeho parametry naměřené měřicím mikrofonom, který zastupuje ušní bubínek.

V následující kapitole jsou popsány typy sluchátek z hlediska jejich konstrukce a charakteristické parametry sluchátek, které se dají změřit a které by měly být uvedeny výrobcem. Navazuje část popisující jednotlivé typy měřicích zařízení z hlediska jejich konstrukce a využití. V praktické části je popsán návrh a realizace laboratorního přípravku pro měření vlastností náušních a vložných sluchátek a zároveň je provedena kalkulace spotřeby materiálu a celkových výrobních nákladů. Dále navazuje zkušební měření vybraných sluchátek na sestrojeném přípravku a porovnání s profesionálními měřicími přípravky. Zhotovený přípravek je navržen pro použití s moderním mikrofonom s fantomovým napájením a XLR konektorem připojitelným k libovolnému analyzátoru nebo zvukoměru moderní konstrukce. Jeho účelem je nahradit profesionální simulátor ucha využívající starý typ mikrofону, který lze připojit pouze k analogovému zvukoměru. Závěrem práce je navrženo zadání laboratorní úlohy, která se zabývá problematikou a principy měření různých typů sluchátek a zahrnuje měření na navrženém přípravku.

1. SLUCHÁTKA

Tento text čerpá výhradně ze zdrojů [1] a [2]. Z hlediska konstrukce se dají sluchátka rozdělit podle dvou kritérií – podle způsobu jejich usazení na/v lidském uchu (obr. 1.1) a podle provedení mušlí (obr. 1.2). Podle způsobu usazení na/v lidském uchu se sluchátka dále dělí na pět základních skupin:

- **Sluchátka s uzavřeným objemem (Circum-aural)** – vyznačují se dutinou náušníku s dostatečným objemem na to, aby překryly část hlavy včetně ucha. Jejich kontakt s hlavou je normálně udržován pomocí molitanových polštářků. Circum-aurální sluchátka se mohou dotýkat ušních boltců, ale neměly by je výrazně stlačovat.
- **Náušní sluchátka (Supra-aural)** – sluchátka přikládáné vnějšek vnějšího ucha a opřené o ušní boltce s vnějším průměrem náušníku minimálně 45 mm.
- **Sluchátka vkládané za záhyb boltce (Supra-concha)** – sluchátka přikládáné na okraj vnějšího zvukovodu s vnějším průměrem mezi hodnotami 25 až 45 mm.
- **Sluchátka vkládané do dutiny boltce (Intra-concha)** – sluchátka, která se vkládají do ústí zvukovodu s akustickým výstupem u vstupu zvukovodu.
- **Vsuvné sluchátka (Insert)** – sluchátka přímo spojená s tvarovaným nástavcem vkládaným částečně nebo zcela do vnějšího zvukovodu.



Obr. 1.1 Rozdělení sluchátek dle usazení [1].

Podle provedení mušlí je možné sluchátka dělit na:

- Otevřená (Open-back earphone) - sluchátko s otevřenou zadní stranou náušníku. Vyzařuje významné akustické záření ze zadní strany měniče do vnějšího prostředí a zároveň propouští více okolních zvuků. Díky tomu je zvuk přirozenější a více podobný zvuku reproduktoru.
- Uzavřená (Closed-back earphone) - sluchátko s uzavřenou zadní stranou náušníku. Blokuje část okolního hluku a zároveň nepropouští zvuk ven. Díky izolaci náušníku uzavřená sluchátka obvykle dokážou produkovat silnější nízké frekvence, které ale nemusí znít přirozeně kvůli rezonanci utěsněné zadní komory.
- Polootevřená sluchátka (Semi-open earphone) - lze považovat za kompromis mezi sluchátky otevřenými a uzavřenými. Výrobci takto označují otevřená sluchátka, která mají z vnější strany náušníku méně otvorů než u plně otevřených.



Obr. 1.2 Otevřená a uzavřená sluchátka [3].

1.1 Parametry sluchátek

Tento text čerpá výhradně ze zdrojů [1] a [2]. Normou ČSN EN 60268-7 ed. 2 jsou definovány vlastnosti sluchátek, které by měly být zahrnuty do specifikace výrobcem a odpovídající metody jejich měření. Tyto charakteristiky jsou popsány v následujících odstavcích.

Jmenovitá impedance – je udávána výrobcem tak, že nejnižší hodnota modulu impedance v rozsahu kmitočtů, ve kterých sluchátko pracuje, neklesne pod 80 % této hodnoty. Pokud je impedance na jakékoli frekvenci mezi 0 Hz a 20 kHz menší než tato hodnota, mělo by to být uvedeno ve specifikacích.

Impedanční/frekvenční charakteristika – popis modulu impedance jako funkce frekvence. Ve standardních podmínkách pro měření je do sluchátka přiveden definovaný sinusový signál o proměnlivé frekvenci s konstantní dostatečně nízkou amplitudou, aby bylo zajištěno že sluchátka pracují v lineární oblasti. Modul impedance by měl být měřen v pásmu od 20 Hz do 20 kHz. Výsledky jsou prezentovány pomocí grafu v závislosti na frekvenci.

Vstupní napětí – maximální efektivní hodnotu napětí simulovaného programu (pásmově omezený růžový šum s definovaným poměrem maximální a efektivní hodnoty, normalizován v IEC 60268-1) připojeného na sluchátko přes definovanou vnitřní impedanci zdroje.

Dlouhodobé maximální napětí – maximální napětí signálu simulovaného programu připojeného přes definovanou vnitřní impedanci zdroje, které jsou sluchátka schopna reprodukovat bez trvalého poškození s tím, že signál je aplikován v 10 opakováních po dobu 60 sekund s pauzou 120 sekund.

Maximální trvalé napětí – maximální napětí signálu simulovaného programu připojeného přes definovanou vnitřní impedanci zdroje, které jsou sluchátka schopna dlouhodobě reprodukovat bez trvalého poškození s tím, že signál je aplikován po dobu 100 hodin.

Charakteristické napětí – napětí harmonického signálu s kmitočtem 500 Hz, které při připojení na sluchátko přes definovanou vnitřní impedanci zdroje vyvolá v akustickém vazebním členu nebo simulátoru ucha hladinu akustického tlaku 94 dB(SPL).

Charakteristické napětí simulovaného programu – napětí signálu simulovaného programu, které při připojení na sluchátko přes definovanou vnitřní impedanci zdroje vyvolá v akustickém vazebním členu nebo simulátoru ucha hladinu akustického tlaku 94 dB_{SPL}.

Charakteristické napětí simulovaného programu upravené váhovým filtrem typu A a kompenzací odezvy volného pole – napětí signálu simulovaného programu, které při připojení na sluchátko přes definovanou vnitřní impedanci zdroje vyvolá v akustickém vazebním členu nebo simulátoru ucha hladinu akustického tlaku 94 dB(SPL) upravenou váhovým filtrem typu A a kompenzací odezvy volného pole.

Ochranná zařízení – ochranné napětí, při které při připojení přes definovanou vnitřní impedanci zdroje zařízení zajišťuje, aby nedošlo k poškození sluchátek a zabraňuje vystavení uživatele nadměrnému akustickému tlaku.

Výkon – u sluchátek, ve kterých je signál ze zdroje přiváděn přímo do sluchátek, existuje charakteristika vyjádřená výkonem odpovídající každé z charakteristik uvedených u napětí (jmenovitý příkon, dlouhodobý maximální výkon, charakteristický výkon, charakteristický výkon simulovaného programu, ...)

Maximální hladina akustického tlaku – hladina akustického tlaku vytvořená sluchátkem v akustickém vazebním členu nebo simulátoru ucha při buzení harmonickým signálem se vstupním napětím a kmitočtem 500 Hz.

Pracovní hladina akustického tlaku – hladina akustického tlaku vytvořená sluchátkem v akustickém vazebním členu nebo simulátoru ucha při buzení harmonickým signálem s kmitočtem 500 Hz a příkonem 1 mW.

Pracovní hladina akustického tlaku simulovaného programu – hladina akustického tlaku v akustickém vazebním členu nebo simulátoru ucha vytvořená signálem simulovaného programu s příkonem 1 mW.

Pracovní hladina akustického tlaku simulovaného programu upravená váhovým filtrem typu A a kompenzací odezvy volného pole – hladina akustického tlaku v akustickém vazebním členu nebo simulátoru ucha vytvořená signálem simulovaného programu s příkonem 1 mW upravená váhovým filtrem typu A a kompenzací odezvy volného pole.

Kmitočtová odezva – je vyhodnocena alespoň jedním z následujících kritérií:

- Akustický vazební člen nebo simulátor ucha – kolísání hladiny akustického tlaku v akustickém vazebním členu nebo simulátoru ucha jako funkce kmitočtu, když je na sluchátka přiváděno harmonické napětí proměnné frekvence za standardních podmínek měření.
- Frekvenční odezva srovnání ve volném poli – podíl akustického tlaku bezreferenčního zvukového pole a napětí přiváděného do sluchátek, které je nutné k vytvoření zvuku subjektivně stejné hlasitosti jako volné zvukové pole. Normálně se vyjadřuje v decibelech vztažených k hodnotě při standardní referenční frekvenci.

- Frekvenční odezva srovnání v difúzním poli – podíl akustického tlaku referenčního difúzního zvukového pole a napětí přiváděného do sluchátek, které je nutné k vytvoření zvuku subjektivně stejné hlasitosti jako difúzní zvukové pole. Normálně se vyjadřuje v decibelech vztažených k hodnotě při standardní referenční frekvenci.

Kmitočtový rozsah – rozsah kmitočtů, které mají sluchátka reprodukovat. Výrobce uvádí kritéria, na kterých je založen výběr mezních frekvencí.

Nelineární zkreslení – mezi nelineární zkreslení se řadí:

- Harmonické zkreslení – harmonické zkreslení n -tého řádu je poměr výstupního akustického tlaku při n -násobku vstupní frekvence k celkovému akustickému tlaku, se jmenovitým vstupním napětím aplikovaným v sérii se jmenovitou impedancí zdroje.
- Celkové harmonické zkreslení (THD) - poměr součtu výstupních akustických tlaků při násobcích vstupní frekvence k celkovému akustickému tlaku, se jmenovitým vstupním napětím aplikovaným v sérii se jmenovitou impedancí zdroje.
- Modulační zkreslení – intermodulační zkreslení druhého a třetího řádu, když se signál skládá ze dvou sinusových signálů, 70 Hz a 600 Hz, s amplitudovým poměrem 4:1 a má špičkové napětí rovné jmenovitému vstupnímu napětí.
- Rozdílovými kmitočty – diferenční frekvenční zkreslení druhého a třetího řádu, kdy vstupní signály jsou dva harmonické signály, frekvenčně oddělené 80 Hz, z nichž každý poskytuje polovinu jmenovitého vstupního napětí.

Jmenovité klimatické podmínky – rozsah teplot, vlhkosti a atmosférického tlaku.

Vnější elektrické a/nebo magnetické pole – rozlišuje se:

- Maximální přímé a střídavé složky elektrického a/nebo magnetického pole generovaného v určené poloze v prostoru vzhledem ke sluchátkům, když jsou sluchátka napájena jmenovitým napětím při standardní referenční frekvenci v sérii se jmenovitou impedancí zdroje.
- Maximální střídavá složka elektrického a/nebo magnetického pole generovaného jakýmkoli pomocným zařízením, které tvoří součást systému sluchátek, v určené poloze v prostoru vzhledem k zařízení za stanovených podmínek napájení a napětí a frekvence signálu.

Nežádoucí vyzářování zvuku – závislost hladiny akustického tlaku na kmitočtu v ose sluchátka ve vzdálenosti 0,1 m za sluchátkem při buzení definovaným vstupním napětím. Tato charakteristika je vyjádřena jako graf akustického tlaku v závislosti na frekvenci s logaritmickou stupnicí.

Potlačení zvuku – závislost potlačení vnějšího zvukového pole sluchátkem na kmitočtu vyjádřená v decibelech.

Přeslechy – závislost hladiny akustického tlaku na kmitočtu ve sluchátku při buzení druhého sluchátka definovaným vstupním napětím. Tato charakteristika je normálně vyjádřena jako graf rozdílu hladin akustického tlaku v decibelech v závislosti na frekvenci s logaritmickou stupnicí.

Aplikační síla – upínací síla vyvíjená sluchátky na testovacím přípravku simulujícím lidskou hlavu.

Fyzikální vlastnosti, kabely a konektory – hlavní rozměry, hmotnost sluchátek a všech pomocných zařízení, délka a typ kabelu, typy použitých konektorů.

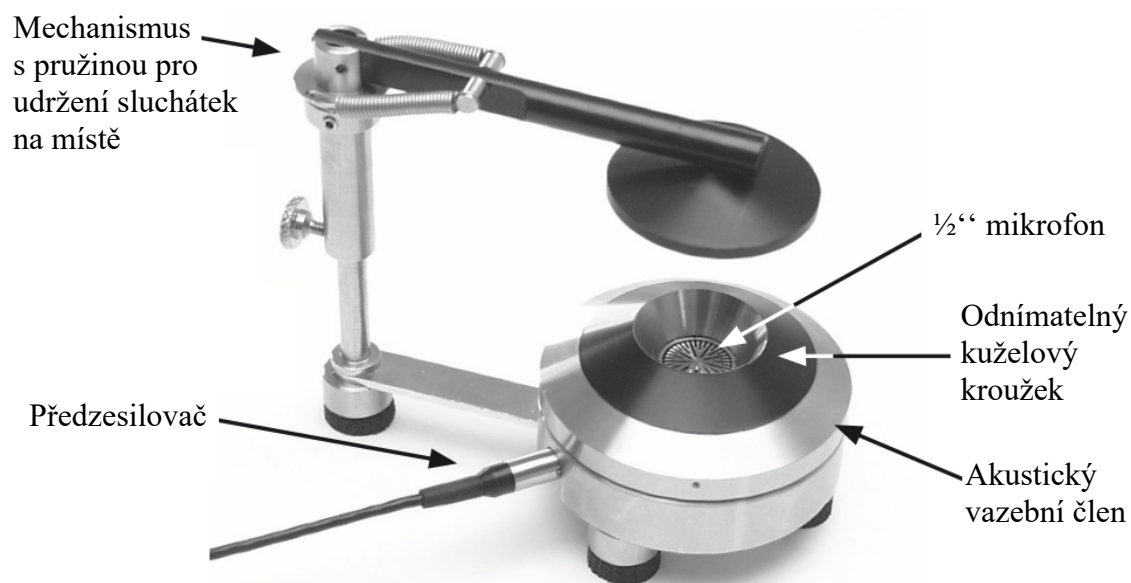
2. SIMULÁTORY UCHA PRO MĚŘENÍ VLASTNOSTÍ SLUCHÁTEK

Simulátor ucha je měřicí zařízení, které slouží pro testování a objektivní hodnocení akustického výstupu zdrojů zvuku, kdy se akustický tlak měří kalibrovaným mikrofonom připojeným ke zdroji, tak aby celková akustická impedance zařízení aproximovala v daném místě a v daném kmitočtovém pásmu akustickou impedanci průměrného lidského ucha. Existují v mnoha formách, podle charakteru měření a pro různé typy převodníků. Podle typu konstrukce a využití lze rozdělit simulátory ucha na tři základní skupiny [4]:

- Typ 1: Simulátor ucha pro měření náušních sluchátek a sluchátek s uzavřeným objemem.
- Typ 2: Simulátor uzavřeného ucha pro měření sluchátek spojených s uchem pomocí ušních vložek.
- Typ 3: Simulátor uzavřeného ucha rozšířený o válcovou dutinu simulující vnější ucho.

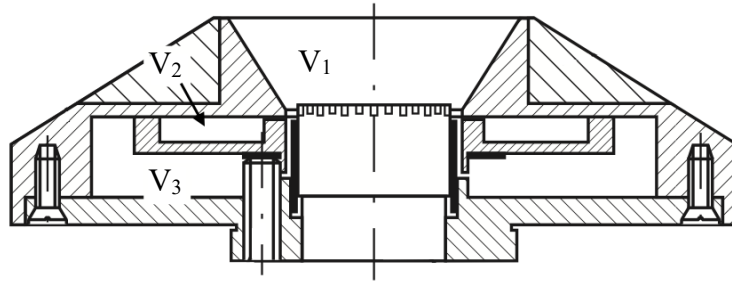
2.1 Simulátor pro měření náušních sluchátek s uzavřeným objemem

Následující text čerpá z literatury [4] a [5]. Tento typ simulátoru je popsán normou ČSN EN 60318-1 ed. 2. Slouží k měření náušních sluchátek a sluchátek s uzavřeným objemem přikládaných k uchu bez akustického svodu v kmitočtovém rozsahu od 20 Hz do 10 kHz. Příklad simulátoru včetně popisu jednotlivých částí lze vidět na obrázku 2.1.



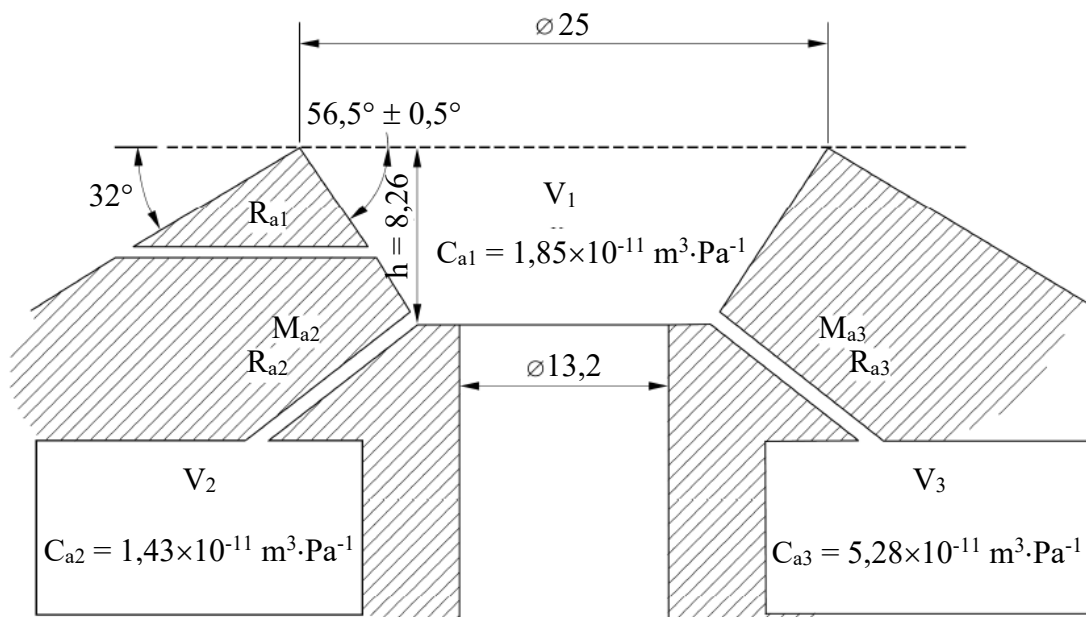
Obr. 2.1 Simulátor ucha: Typ 1 [7].

Charakteristickým prvkem simulátoru je jeho akustický vazební člen. Součástí tohoto simulátoru je akustický vazební člen, který obsahuje tři akusticky spojené dutiny V_1 , V_2 a V_3 , viz obr. 2.2.



Obr. 2.2 Akustický vazební člen: Typ 1 [8].

Primární dutina je kuželovitého tvaru a její dno tvoří mikrofon sloužící k měření. Objem dutiny zahrnuje celkový efektivní objem mikrofonní vložky, kdy se uvažuje také odpovídající korekce na přítomnost mikrofonní vložky. Sekundární dutiny jsou spojeny s primární dutinou prvky, které mají akustickou hmotnost M_a a odpor R_a . Tyto akustické hmotnosti a akustické odpory podléhají tolerancím dle normy ČSN EN 60318-1 ed. 2 a jejich hodnoty musí být $M_{a2} = 4,5 \times 10^4 \text{ Pa} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}^{-3}$, $M_{a3} = 1,06 \times 10^4 \text{ Pa} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}^{-3}$, $R_{a2} = 6,05 \times 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$ a $R_{a3} = 2 \times 10^7 \text{ Pa} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}^{-3}$. Schématický řez simulátorem se znázorněnými dutinami je uveden na obrázku 2.3.



Obr. 2.3 Schematický řez simulátoru v konfiguraci pro náušní sluchátka [5].

Vzdálenost h mezi rovinou vymezenou horním okrajem simulátoru ucha a membránou mikrofonu musí být $8,26 \text{ mm} \pm 0,30 \text{ mm}$. Další uvedené lineární rozměry musí mít toleranci $\pm 0,3 \text{ mm}$. Úhlové rozměry $56,5^\circ$ musí mít toleranci $\pm 0,5^\circ$ a úhel 32° toleranci $\pm 3^\circ$. Akustické poddajnosti, hmotnosti a odpory musí mít toleranci $\pm 10 \%$.

Na základnu dutiny V_1 se umísťuje kalibrovaný mikrofon se specifikovaným výrobcem a modelem. Akustická impedance membrány mikrofonu musí být dostatečně vysoká, aby byl ekvivalentní objem v daném rozsahu kmitočtů nižší než 20 mm^3 .

V kmitočtovém rozsahu od 20 Hz do 10 kHz musí být celková hladina akustické citlivosti mikrofonu a připojeného měřicího systému známa s nejistotou nepřekračující

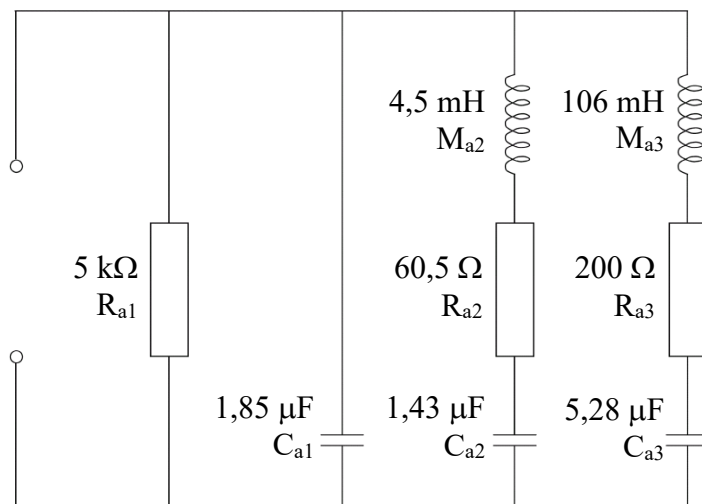
0,2 dB na konfidenční hladině 95 % (je-li provedeno 100 nezávislých měření, na nichž je odhadován neznámý parametr intervalem spolehlivosti, tak zhruba 95 intervalů bude hledaný parametr obsahovat a zhruba pět nikoli). Mikrofon musí být připojen s ochrannou mřížkou a bez svodu. Při měření nad 10 kHz s nejistotou nepřekračující 0,5 dB na konfidenční hladině 95 % a mezi mikrofonem a primární dutinou nesmí být ochranná mřížka nebo jiná překážka.

V kmitočtovém rozsahu pod 10 kHz je simulátor navržen tak, aby při dodržení utěsnění jeho přenosová akustická impedance odpovídala vstupní impedanci průměrného lidského ucha. Za referenčních podmínek prostředí se simulátor ucha musí připojit s použitým sluchátkem k mikrofonu s přenosovou akustickou impedancí uvedenou v tabulce 2.1.

Tab. 2.1 Specifikace hladiny přenosové impedance [5].

Kmitočet [Hz]	Hladina impedance [dB]	Kmitočet [Hz]	Hladina impedance [dB]
100	145,8	1500	131,4
126	144,4	1585	131,1
158	143,2	1995	131,5
200	143,0	2512	131,5
251	143,5	3000	130,8
316	144,1	3162	130,6
398	143,4	3982	128,5
501	141,4	5012	126,0
631	139,0	6000	124,0
750	137,2	6310	123,6
794	136,6	7943	121,1
1000	134,4	9000	119,9
1259	132,5	10000	118,5

Byl proveden určitý počet nezávislých určení akustické impedance průměrného lidského ucha za podmínek bez akustického svodu, který pokryl různé obrysy náušníků používaných u audiometrických sluchátek. V každém případě byl navržen analogický elektrický obvod simulátoru ucha tvořený prvky se soustředěnými parametry (obr. 2.4) tak, aby bylo dosaženo optimální shody s experimentálními daty impedance. Simulátory ucha byly následně navrženy a zkonstruovány v souladu s těmito optimalizovanými parametry. Podle analogického elektrického obvodu se předpokládá, že akustický tlak v primární dutině je prostorově homogenní. Z toho vyplývá, že přenosová akustická impedance mezi membránou mikrofonu a rovinou, kde působí zdroj zvuku, je v tomto modelu nutně stejná jako vstupní akustická impedance simulátoru ucha.



Obr. 2.4 Analogický elektrický obvod: Typ 1 [5].

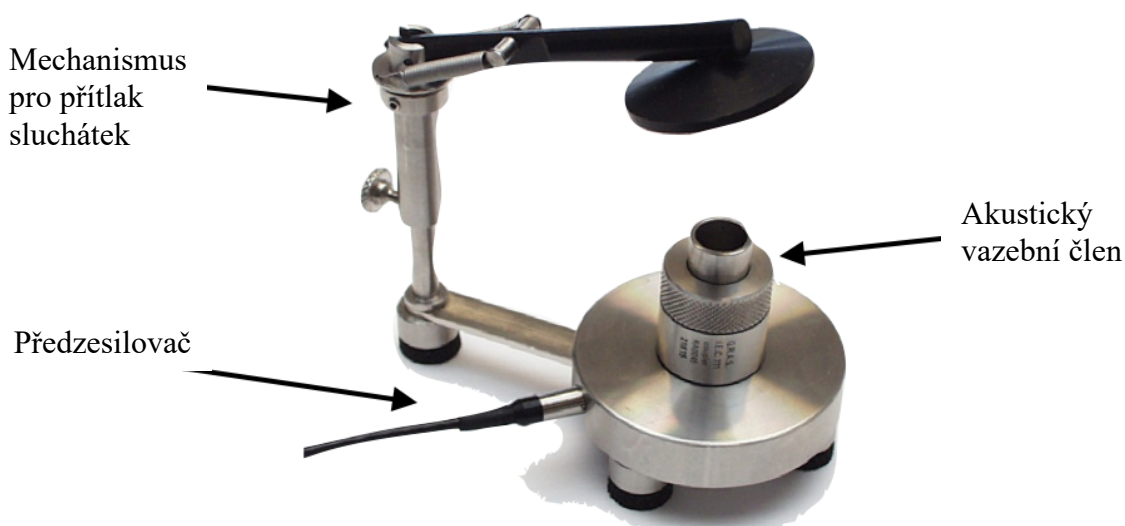
Při měření sluchátek sluchátek s uzavřeným objemem je potřeba do konstrukce zahrnout rovný styčný povrch, na který symetricky dosedá sluchátko. K tomuto účelu se využívá adaptér pro použití se sluchátky s uzavřeným objemem ve spojení s kuželovým kroužkem (obr. 2.5).



Obr. 2.5 Simulátor ucha s adaptérem pro sluchátka s uzavřeným objemem [9].

2.2 Simulátor pro měření sluchátek spojených s uchem pomocí ušních vložek

Následující text čerpá z literatury [4] a [6]. Tento typ simulátoru je popsán normou ČSN EN 60318-4. Slouží k měření vsuvných sluchátek v kmitočtovém rozsahu od 100 Hz do 10 kHz. Příklad simulátoru včetně popisu jednotlivých částí lze vidět na obrázku 2.6.

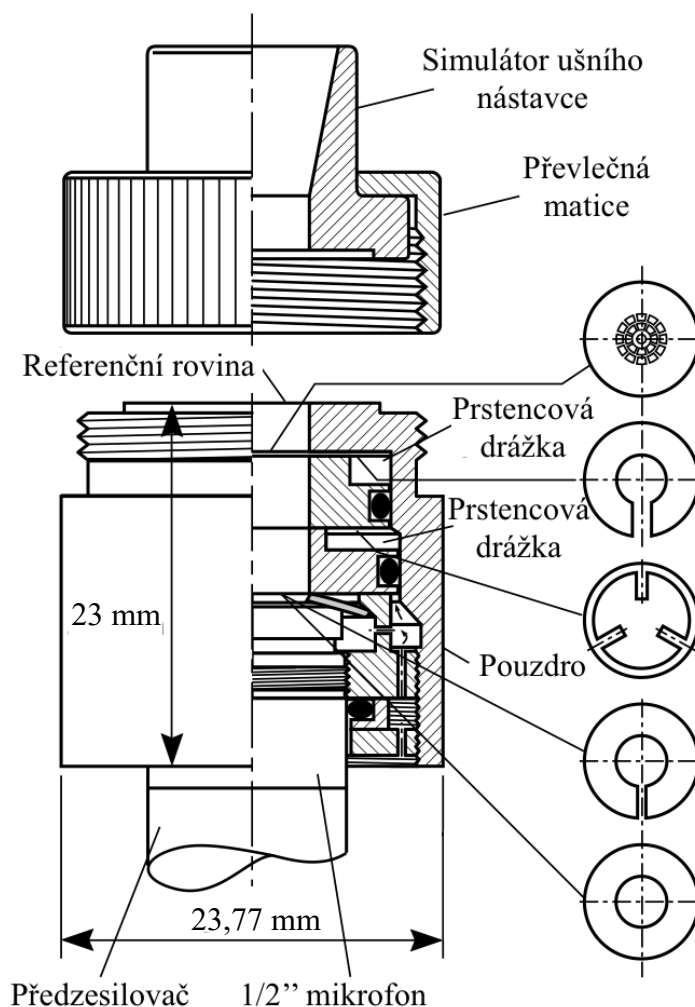


Obr. 2.6 Simulátor ucha: Typ 2 [10].

Je určen pro sluchadla s vedením zvuku vzduchem a sluchátka spojená s uchem pomocí ušních vložek. Simulátor uzavřeného ucha je také vhodný jako základ pro širší použití určené k simulování kompletního zvukovodu a zevního ucha. Simulátor uzavřeného ucha simuluje přenosovou akustickou impedanci uzavřeného ucha u běžného dospělého člověka. Nesimuluje však svod mezi ušním nástavcem a zvukovodem. Proto se výsledky získané pomocí simulátoru uzavřeného ucha mohou zejména na nízkých kmitočtech lišit od činnosti vsuvného sluchátka na reálném uchu. Při použití simulátoru ucha je třeba kromě toho vzít v úvahu velká provozní kolísání mezi jednotlivými ušima.

Simulátor ucha musí být konstruován z tvrdého, rozměrově stabilního, neporézního a nemagnetického materiálu. Cílem obecné konstrukce simulátoru uzavřeného ucha a připojení mikrofону musí být minimalizování odezvy mikrofónu na vibrace nebo rušivý zvuk vně dutiny.

Charakteristickým prvkem simulátoru je jeho akustický vazební člen (obr. 2.7), který věrně reprodukuje akustické parametry lidského ucha a je schopen testované sluchátko měřit s impedancí, která se blíží impedanci skutečného lidského ucha. Skládá se z hlavního pouzdra, do kterého je namontováno množství kroužků, jejichž tvary tvoří prstencové vzduchové objemy spojené s hlavním objemem pouzdra vzduchovými průchody. Na horní straně pouzdra je pro zajištění reprodukovatelnosti měření definována referenční rovina měření, která je kolmá k ose zvukovodu. Další součástí akustického vazebního členu je převlečná matice, která slouží k ukotvení vnější sou-



Obr. 2.7 Akustický vazební člen: Typ 2 [6].

část reprezentuje měnitelné simulátory ušního nástavce pro různé typy sluchátek. Ty se tvarově odlišují dle potřeb měření. Pro měření sluchadel vkládaných do ucha zhotovených pro uživatele se využije pouze těsnění, které zajistí vzduchotěsné spojení mezi sluchadlem a simulátorem uzavřeného ucha. Pro měření sluchadel se vsuvným sluchátkem se kromě těsnění využije také simulátoru ušního nástavce, který se skládá z tuhé trubice předepsaných rozměrů, umístěné soustředně s dutinou. Pro měření závěsných sluchadel a brýlových sluchadel je kromě těsnění a simulátoru ušního nástavce potřeba připojit pružnou spojovací trubici definovaných rozměrů. Různé typy adaptérů simulátoru ušního nástavce jsou znázorněny na obrázku 2.8.



Obr. 2.8 Adaptéry simulátoru ušního nástavce [11].

Za referenčních podmínek prostředí se simulátor ucha musí připojit s použitým sluchátkem k mikrofону s přenosovou akustickou impedancí uvedenou v tabulce 2.2.

Tab. 2.2 Specifikace hladiny přenosové akustické impedance [6].

Kmitočet [Hz]	Hladina impedance [dB]	Kmitočet [Hz]	Hladina impedance [dB]
100	145,8	1250	131,4
125	144,4	1600	131,1
160	143,2	2000	131,5
200	143,0	2500	131,5
250	143,5	3150	130,8
315	144,1	4000	130,6
400	143,4	5000	128,5
500	141,4	6300	126,0
630	139,0	8000	124,0
800	137,2	10000	123,6
1000	136,6		

Akustická vstupní impedance ušních simulátorů ČSN EN 60318-4 se velmi podobá impedanci lidského ucha až do 10 kHz a ve výsledku zatěžuje zdroj zvuku velmi stejným způsobem. V ekvivalentním elektrickém obvodu by kondenzátory představovaly objem, indukčnosti akustickou hmotnost a odpor proudění vzduchu v odporových drážkách.

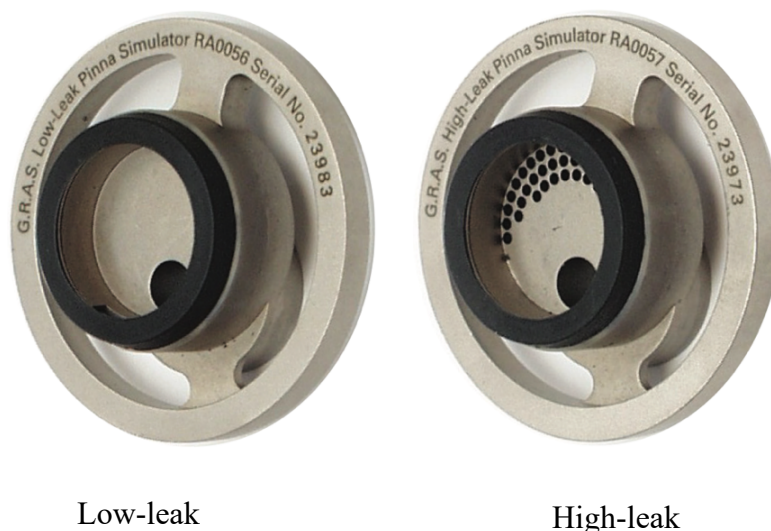
2.3 Simulátor rozšířený o válcovou dutinu simulující vnější ucho

Tento text čerpá zejména z literatury [4] a [12]. Umělé ucho typu 3 se skládá ze simulátoru uzavřeného ucha popsaného normou ČSN EN 60318-4 rozšířeného o válcovou dutinu simulující dutinu vnějšího ucha. Doporučují se tři simulátory dutiny vnějšího ucha, které poskytují vhodná uspořádání vazeb pro měření různých typů převodníků. Konfigurace umělého ucha typu 3 jsou klasifikovány takto:

- Typ 3.1: Simulátor spodní části vnějšího ucha.
- Typ 3.2: Zjednodušený simulátor vnějšího ucha.
- Typ 3.3: Simulátor boltce.
- Typ 3.4: Simulátor boltce (zjednodušený).

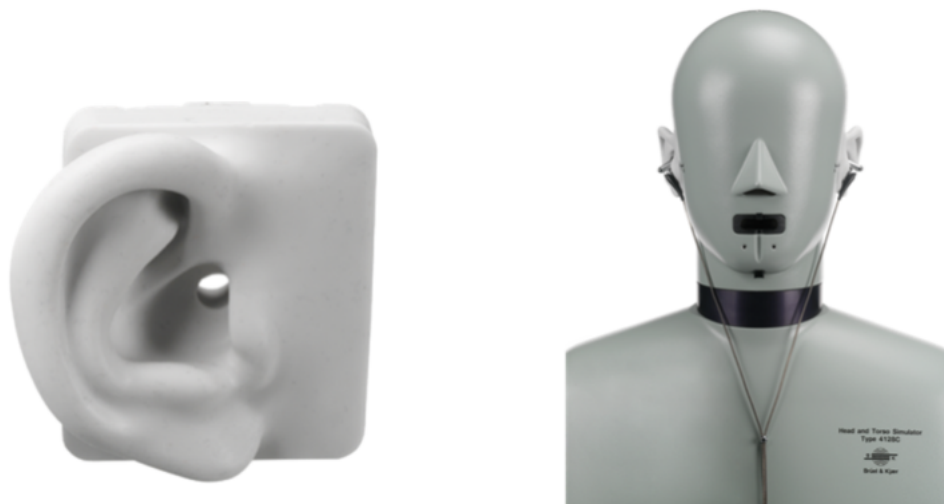
Simulátor spodní části vnějšího ucha je realizován simulátorem uzavřeného ucha typu 2 rozšířeným o ploché zakončení 10 mm nástavce zvukovodu. Je doporučen pro měření sluchátek vkládaných do dutiny boltce. Naměřený akustický tlak se vztahuje k referenčnímu bodu ušního bubínku (Ear-drum reference point - DRP). Korekční funkce umožňuje převod dat vzhledem k referenčnímu bodu ucha (Ear reference point – ERP).

Zjednodušený simulátor vnějšího ucha je realizován simulátorem typu 3.1 s definovaným pronikáním simulujícím reálné ztráty při netěsnosti v provedení „high-leak“ a „low-leak“. První varianta se využívá pro měření, které simulují telefonní sluchadlo nebo sluchátko držené pohodlně u ucha posluchače a druhá varianta pro sluchadlo či sluchátko držené v malé vzdálenosti od ucha posluchače. Liší se pouze množstvím simulovaného úniku, jinak jsou geometricky podobné. Doporučené jsou také pro náušní sluchátka a sluchátka vkládaná za záhyb boltce s tuhými náušníky pro telekomunikační aplikace. Simulují akustickou impedanci a přenos na ERP. Oba typy nástavců jsou uvedeny na obrázku 2.9.



Obr. 2.9 Zjednodušený simulátor vnějšího ucha [12].

Simulátor boltce je realizován ukončením reálným zvukovodem a ušním boltcem a lze využít pro měření jakéhokoliv typu sluchátek. Musí být vyroben z vysoce kvalitního elastomeru s definovanou tvrdostí. Akustický tlak měřený umělým uchem typu 3.3 se vztahuje k DRP. Pro převod dat do ERP se využívá korekční funkce. Simulátor ušního boltce a jeho umístění v simulátoru hlavy a torza je znázorněno na obrázku 2.10.



Obr. 2.10 Simulátor boltce [13].

Simulátor boltce (zjednodušený) je realizován rozšířením zvukovodu a zjednodušeným boltcem. Musí být vyroben z kvalitního elastomeru s definovanou tvrdostí. Lze využít jako alternativa k typu 3.3 pro měření na všech typech zařízení kromě náušních sluchátek a sluchátek vkládaných za záhyb boltce. Umělé ucho typu 3.4 má reprodukovat typické netěsnosti sluchátka, ke kterým dochází při reálném použití pro tlakové síly v rozsahu mezi 1 N a 13 N. Měření akustický tlak se vztahuje k DRP. Korekční funkce uvedená v Příloze 3 se využívá pro převod dat do ERP. Simulátor zjednodušeného ušního boltce umístěného na umělé hlavě je znázorněn na obrázku 2.11.



Obr. 2.11 Simulátor boltce (zjednodušený) [14].

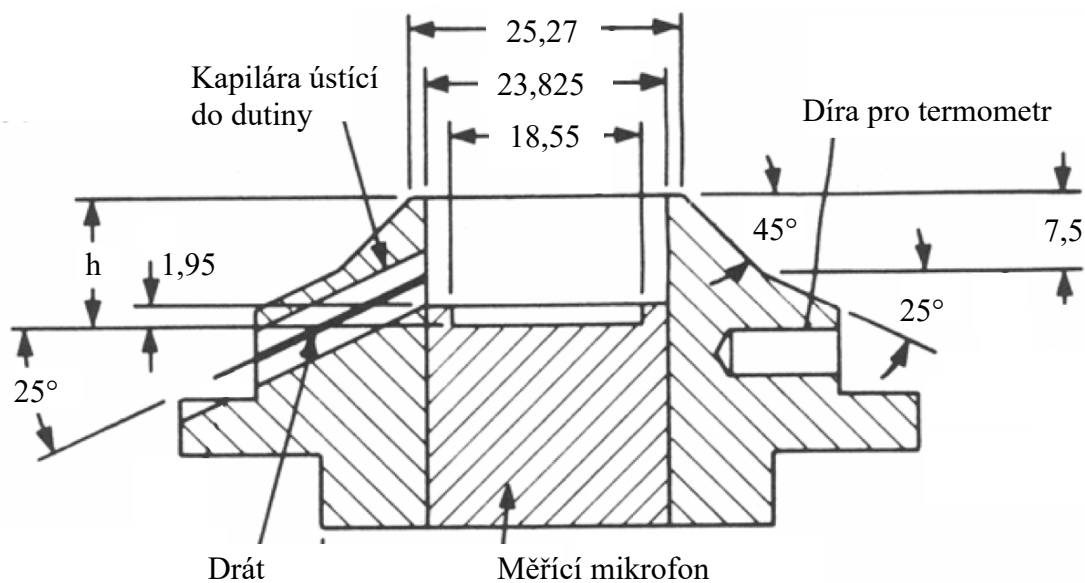
2.4 Akustické vazební členy

Kromě akustických vazebních členů, které jsou součástí simulátorů ucha typu 1 a 2, popsanými normami ČSN EN 60318-1 ed. 2 a ČSN EN 60318-4, rozlišujeme ještě akustické vazební členy, které jsou definovány normami ČSN EN 60318-3 ed. 2 a ČSN EN 60318-5.

2.4.1 Akustický vazební člen pro kalibraci náušních sluchátek používaných v audiometrii

Následující text čerpá zejména z literatury [15]. Tento vazební člen obsahuje jednu komoru daného tvaru, která spojuje měřené sluchátko a měřící mikrofon a simuluje pouze objem lidského ucha. Akustický tlak vytvářený ve spojce není obecně shodný s akustickým tlakem v lidském uchu. Vazební člen však může být použita jako objektivní a reprodukovatelný prostředek měření výstupu z náušních sluchátek v kmitočtovém rozsahu 125 Hz až 8 000 Hz a k určení referenčních ekvivalentních prahových hladin akustického tlaku pro kalibraci audiometrů.

Nejdůležitějším prvkem konstrukce je válcová dutina s efektivním objemem $5\,780\text{ mm}^3 \pm 130\text{ mm}^3$, jejíž akustická impedance je definovaná objemem vzduchu. Spodní strana dutiny je tvořena měřícím mikrofonem s vysokou akustickou impedancí. Vazební člen by měl být vyroben z tvrdého, rozměrově stabilního, neporézního a nemagnetického materiálu. Řez akustického vazebního členu je znázorněn na obrázku 2.12.



Obr. 2.12 Rozměry akustického vazebního členu [15].

Rozměr h by měl být definován vztahem [15]

$$h = \frac{V_1 - V_{eq} - V_2}{\frac{1}{4}\pi d_1^2}, \quad (2.1)$$

kde d_1 je průměr válcové dutiny vazebního členu, V_1 je akustický objem komory, V_{eq} je efektivní akustický objem měřícího mikrofonu a V_2 je objem čelní dutiny měřícího mikrofonu, který je dán vztahem

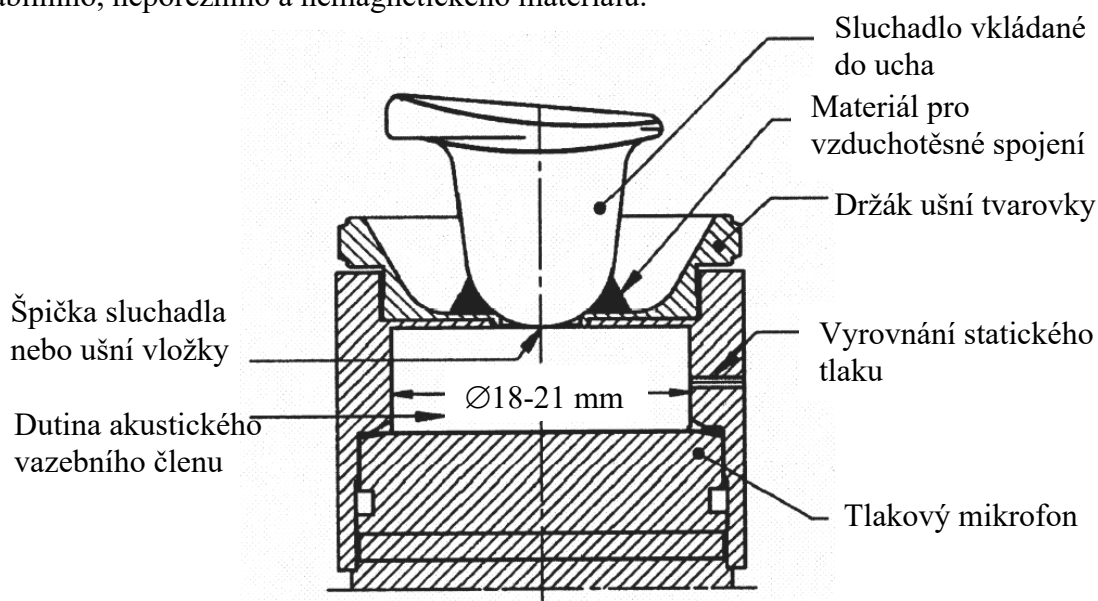
$$V_2 = \frac{1}{4} \pi d_2^2 l_2, \quad (2.2)$$

kde d_2 je rozměr čela mikrofonu bez ochranné mřížky a l_2 je výška kavity měřícího mikrofonu. Kapilára ústící do válcové dutiny slouží pro vyrovnání statického tlaku po připojení sluchátka na akustický vazební člen. Kalibrované sluchátko by mělo být přiloženo těsně a s přitlakem o síle $4,5 \text{ N} \pm 0,5 \text{ N}$.

2.4.2 Akustický vazební člen pro měření sluchadel a sluchátek vkládaných do ucha pomocí ušních vložek

Následující text čerpá zejména z literatury [16]. Tento vazební člen obsahuje jednu komoru definovaného tvaru, která spojuje měřící mikrofon a měřené sluchadlo nebo sluchátko s vedením zvuku vzduchem vkládané do ucha pomocí ušních vložek (obr. 2.13). Akustický tlak vytvářený ve spojce není obecně shodný s akustickým tlakem v lidském uchu. Vazební člen však může být použita jako objektivní a reprodukovatelný prostředek měření výstupu z náušních sluchátek v kmitočtovém rozsahu 125 Hz až 8 000 Hz a pro kalibraci specifikovaných vložných sluchátek používaných v audiometrii.

Základem akustického vazebního členu je válcová dutina s efektivním objemem $2\,000 \text{ mm}^3$. Podstavu dutiny tvoří membrána měřícího mikrofonu, který měří akustickou hladinu v akustické spojce. Vazební člen musí být vyrobena z tvrdého, rozměrově stabilního, neporézního a nemagnetického materiálu.



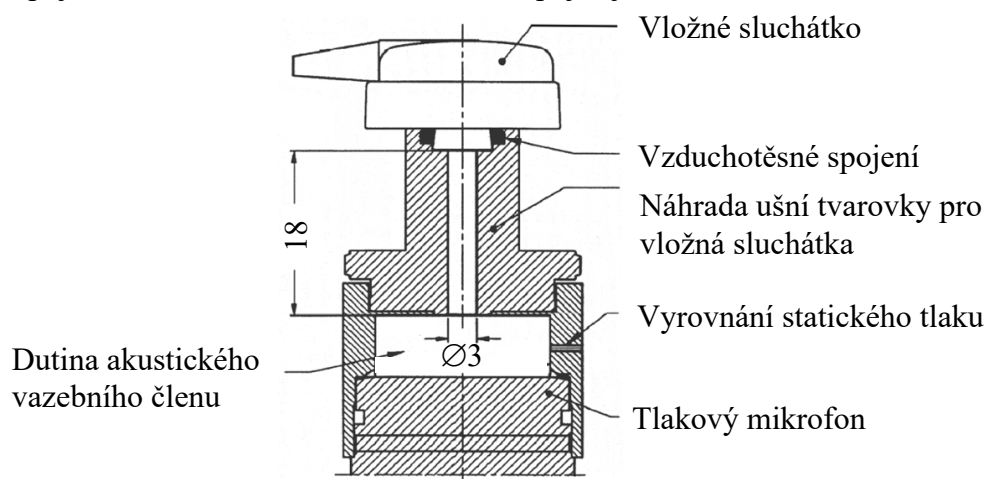
Obr. 2.13 Připojení sluchátka vkládaného do ucha k akustické spojce [16].

Stěžejní rozměry akustické dutiny jsou ty, které určují tvar a objem válcové dutiny a kapilárního svodu. Do efektivního objemu dutiny se počítá i objem čelní dutiny měřícího mikrofonu. Průměr válcové dutiny musí být v rozsahu 18 až 21 mm. Kapilární trubice ústící do válcové dutiny slouží pro vyrovnání statického tlaku po připojení sluchátka na akustický vazební člen.

Měřené sluchátko se musí připojit přímo k dutině akustického vazebního členu při zajištění vzduchotěsného spojení pomocí vhodného těsnícího prostředku bez vzniku přídavného objemu dutiny, který by mohl ovlivnit měřenou provozní funkci sluchadla.

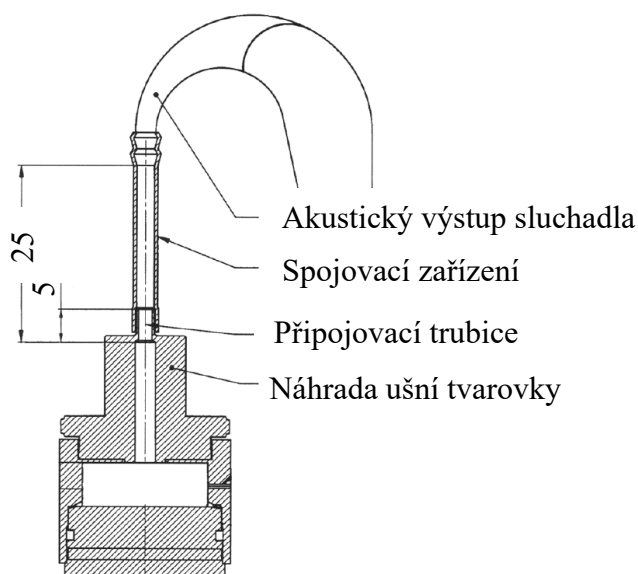
U sluchadla s vložným sluchátkem se musí ušní vložka vkládaná do lidského ucha nahradit ušní tvarovkou tvořenou tuhým materiálem o délce $18,0 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$ a vnitřním

průměru $3,00 \text{ mm} \pm 0,06 \text{ mm}$ připojenou souose s dutinou při dodržení vzduchotěsného spojení. Připojení vložného sluchátka k akustické spojce je znázorněno na obrázku 2.14.



Obr. 2.14 Připojení vložného sluchátka k akustické spojce [16].

Závěsná a brýlová sluchadla se musí připojit k akustické spojce pomocí náhrady ušní tvarovky rozšířené o připojovací trubici o délce $25 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ při zajištění vzduchotěsného spojení. Připojovací trubice se musí připojit k jádru brýlového sluchadla nebo k držáku závěsného sluchadla. Propojení trubice a náhradní ušní tvarovky zajišťuje malé spojovací zařízení z tuhého materiálu o délce $5,0 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$. Připojení závěsného sluchadla k akustické spojce je znázorněno na obrázku 2.15.



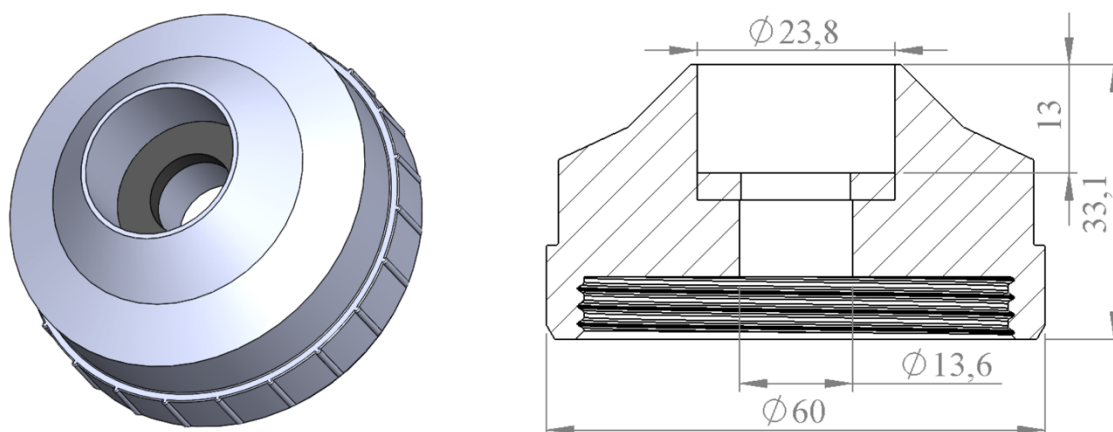
Obr. 2.15 Připojení závěsného sluchadla k akustické spojce [16].

3. LABORATORNÍ PŘÍPRAVEK

V následující části práce je popsán proces návrhu a realizace laboratorního přípravku pro měření náušních sluchátek. Cílem je zhotovit funkční simulátor uzavřeného ucha s jednoduchou konstrukcí za vynaložení minimálních výrobních nákladů. Z tohoto důvodu byl pro konstrukci modelu zvolen 3D tisk pomocí technologie FDM. Pro účely měření na laboratorním přípravku bude využíván ½“ mikrofón NTi Audio M2010. Jeho rozměry a technické parametry jsou součástí přílohy A. Problematikou měření parametrů náušních sluchátek se zabývá norma ČSN EN 60318-1 ed.2, viz kapitola 2.1.

3.1 Návrh modelu simulátoru pro měření náušních sluchátek

Konstrukce přípravku vyžaduje zahrnutí prvku, který simuluje akustickou impedanci ucha. K tomu byl pomocí 3D CAD softwaru SolidWorks navržen samostatný díl, který odpovídá parametrům akustického vazebního členu daným normou ČSN EN 60318-3 ed. 2, viz kapitola 2.4.1. Návrh modelu a charakteristické rozměry v řezu jsou znázorněny na obrázku 3.1.



Obr. 3.1 Model akustického vazebního členu pro náušní sluchátka (1:1)

Klíčovým parametrem tohoto dílu je objem válcové komory. Ten musí odpovídat hodnotě 5 780 mm³ při dodržení geometrie kužele pro zajištění dosedací plochy pro náušní sluchátka. Při dodržení průměru dutiny 23,8 mm vychází z rovnice pro výpočet objemu válce

$$V = \pi r^2 h, \quad (3.1)$$

že výška h dutiny odpovídá hodnotě 13 mm. Na dno válcové komory je ovšem potřeba umístit prvek, který zajistí těsné uložení čela měřicího mikrofónu do dutiny akustického vazebního členu. K tomuto účelu bylo zvoleno ploché gumové těsnění o rozměrech 24x13x3 mm, které je do modelu vlepeno pomocí vteřinového lepidla.

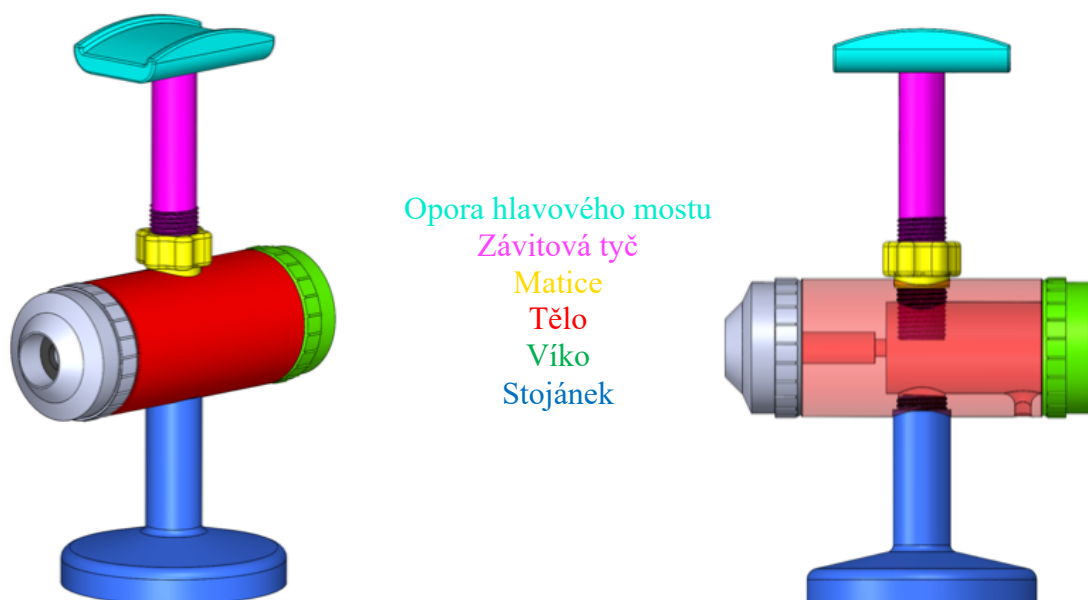
Pro zajištění potřebného přitlaku sluchátka a pro statické usazení mikrofónu do akustického vazebního členu je potřeba nosná konstrukce. Nabízí se typ konstrukce, kde se přitlak na sluchátko zajišťuje pomocí mechanismů s pružinkami, jak bylo znázorněno na obrázku 2.1. Zde je ovšem potřeba volit vhodný typ pružiny s odpovídající tuhostí a následně provést výpočet působících sil mechanismu na měřené sluchátko pro dodržení normou předepsaného přitlaku. Jednodušší a efektivnější variantou je využití tuhosti hlavového mostu sluchátek při jejich rozevření do průměrné šířky lidské hlavy. Tím je

zajištěn přítlak měřeného sluchátka, který odpovídá skutečnému přítlaku při nasazení sluchátek. Tato varianta se využívá při měření sluchátek na simulátorech torza a hlavy. Vycházet se dá z akustického zkušební přípravku, který je popsán normou ČSN EN ISO 4869-3. Stejný přípravek je znázorněn na obrázku 3.2.



Obr. 3.2 Akustický zkušební přípravek [17].

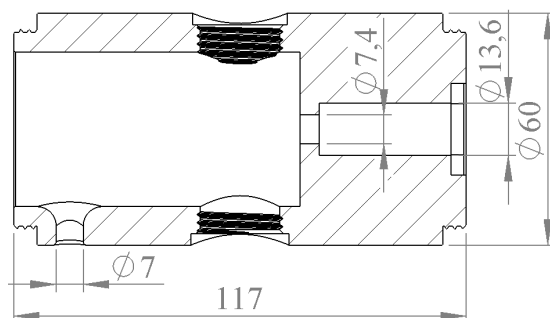
Pro připojení akustického vazebního členu ke zkušebnímu přípravku je potřeba pevné spojení. Na zkušebních modelech se osvědčilo využití závitu pro hrdla plastových lahví SP425, který slouží i k vytvoření spojů ostatních dílů konstrukce. Návrh modelu testovacího přípravku při kompletním složení všech dílů sestavy je zobrazen na obrázku 3.3.



Obr. 3.3 Model akustického zkušební přípravku.

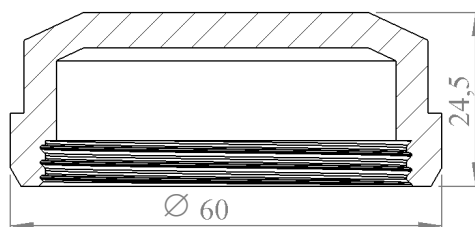
Sestava měřicího přípravku obsahuje (kromě akustického vazebního členu) celkem 6 dílů: tělo, víko, stojánek, závitovou tyč, matici a oporu hlavového mostu. Tělo (obr. 3.4) slouží ke stabilnímu uložení mikrofonu a výškou válce zajišťuje potřebný rozvor náušních sluchátek. Na čelní ploše na straně, kde se připojuje akustický vazební člen je

vymodelována drážka pro ploché gumové těsnění, které slouží ke statickému ukotvení měřícího mikrofonu na místě, aby nedocházelo k jeho vysouvání při manipulaci s akustickým vazebním členem. Ve spodní části se nachází díra o průměru 7 mm pro odvedení kabelu měřícího mikrofonu do zesilovače.



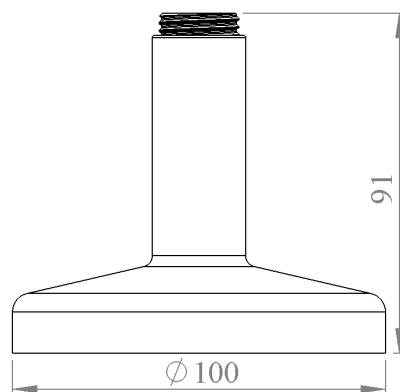
Obr. 3.4 Tělo zkušební přípravku (1:2)

Šroubovací víko (obr. 3.5) je dosedací plocha pro neměřené sluchátko a umožňuje přístup do dutiny těla, nezbytný k odvedení kabelu měřícího mikrofonu.



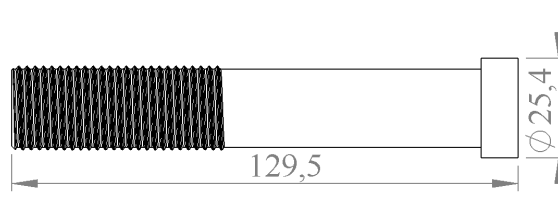
Obr. 3.5 Víko zkušební přípravku (1:1)

Celou sestava je posazena na stojánek (obr. 3.6), který musí mít dostatečnou výšku, kvůli pohodlnému odvedení kabelu měřených sluchátek od přípravku. Zároveň musí mít robustní základnu, aby byl přípravek při manipulaci se sluchátkem dostatečně stabilní.



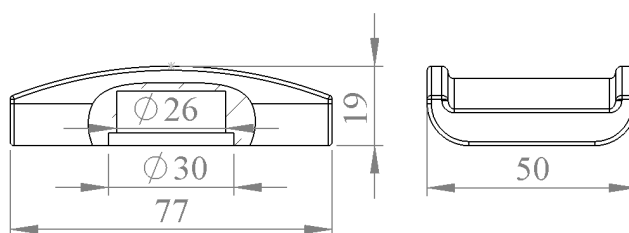
Obr. 3.6 Stojánek zkušební přípravku (1:2)

Závitová tyč (obr. 3.7) slouží k nastavení potřebné výšky opory hlavového mostu podle velikosti měřených sluchátek a zajišťují jejich stabilní polohu při měření.



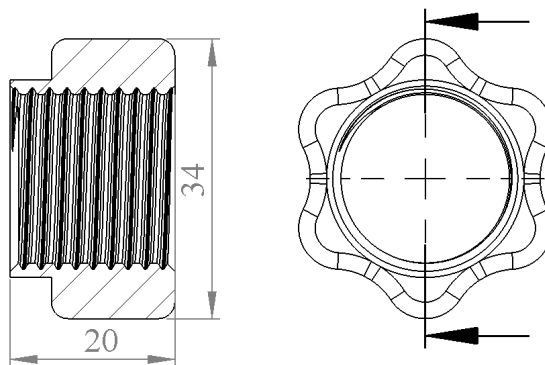
Obr. 3.7 Závitová tyč zkušebního přípravku (1:2)

Rozšířený konec tyče je volně uložen ve válcové dutině na spodní straně opory hlavového mostu (obr. 3.8). Spojení těchto dvou dílů je zajištěno plochým gumovým těsněním. Díky tomu lze po nasazení sluchátek na přípravek upravit výšku otáčením tyče, aniž by docházelo k otáčení opory hlavového mostu. Sluchátka tedy není nutné kvůli tomuto úkonu sundávat.



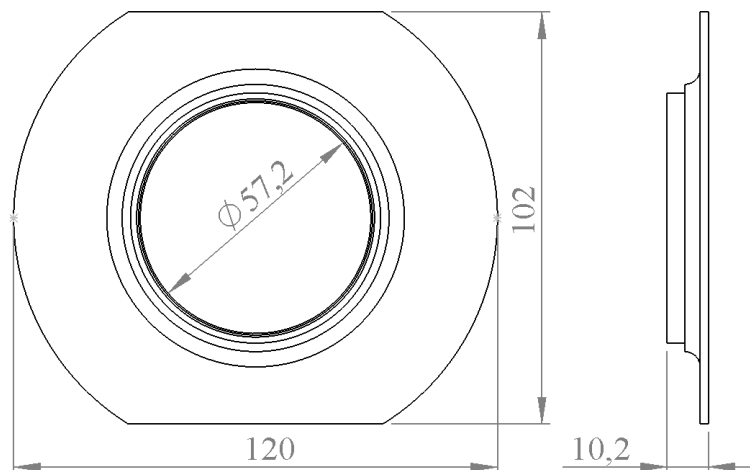
Obr. 3.8 Opora hlavového mostu zkušebního přípravku (1:2)

Aby nedocházelo k pohybu tyče v závitu, je na ní umístěna aretační matice, viz obr. 3.9. Tím je zajištěna stabilní výška opory hlavového mostu.



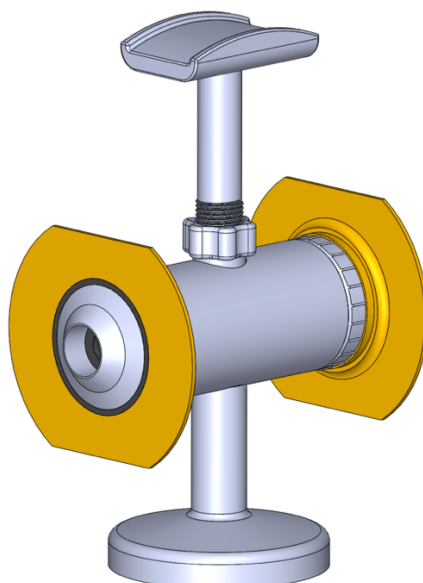
Obr. 3.9 Matice pro závitovou tyč zkušebního přípravku (1:1)

Při měření charakteristik circum-aurálních sluchátek není dosedací plocha pro mušle dostatečně široká a nedochází k utěsnění prostoru mezi sluchátkem a umělým uchem. Z toho důvodu byl dle normy ČSN EN 60318-1 ed. 2 navrhnut adaptér (obr. 3.10), který se nasazuje na umělé ucho a na víko.



Obr. 3.10 Adaptér pro měření circum-aurálních sluchátek (1:2).

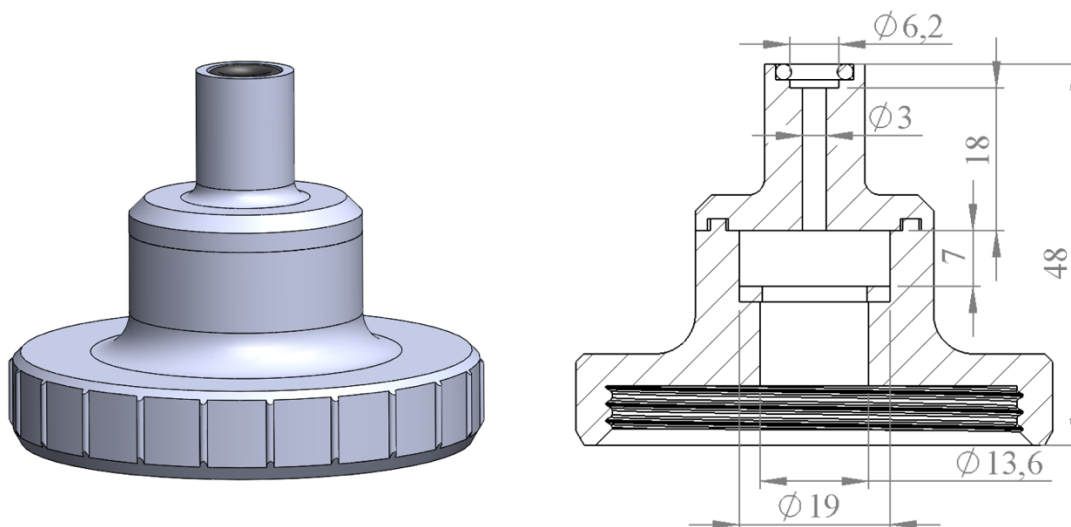
Sestava s adaptéry pro měření vlastností circum-aurálních sluchátek je znázorněna na obrázku 3.11. Adaptéry jsou označeny oranžovou barvou.



Obr. 3.11 Přípravek s adaptéry pro měření circum-aurálních sluchátek.

3.2 Návrh modelu simulátoru pro měření vsuvných sluchátek

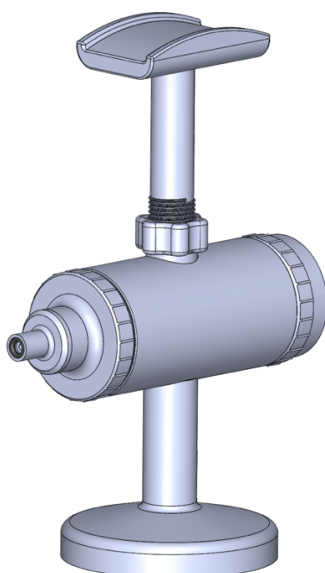
Konstrukce akustického vazebního členu pro měření vsuvných sluchátek musí obsahovat válcovou komoru, která ztvárňuje akustickou impedanci ucha. Pomocí 3D CAD softwaru SolidWorks byl navržen díl, který odpovídá parametrům akustického vazebního členu daným normou ČSN EN 60318-5, viz kapitola 2.4.2. Model je navržen ve variantě s adaptérem pro měření vsuvných sluchátek, který je součástí samotného akustického vazebního členu. Model včetně charakteristických rozměrů v řezu je znázorněn na obrázku 3.12.



Obr. 3.12 Model akustického vazebního členu pro vložná sluchátka (1:1).

Klíčovým parametrem dílu je objem válcové komory. Ten musí odpovídat hodnotě $2\,000\text{ mm}^3$. Při dodržení předepsaného průměru dutiny 19 mm vychází z rovnice (3.1), že výška h dutiny odpovídá hodnotě 7 mm .

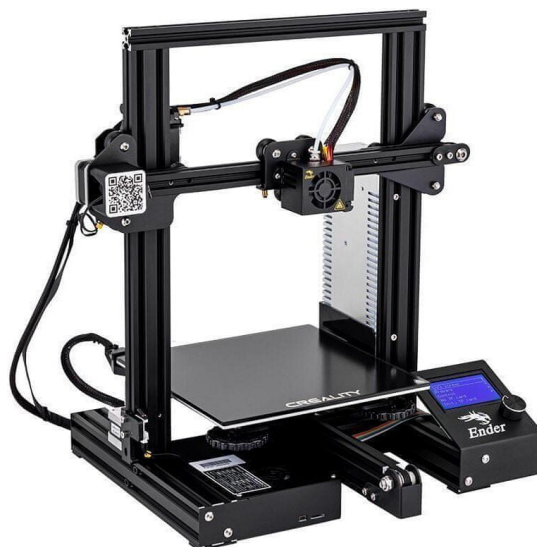
Je nezbytné zajistit těsné uložení čela měřícího mikrofonu do dutiny akustického vazebního členu. K tomuto účelu slouží ploché gumové těsnění o rozměrech $19 \times 12 \times 2\text{ mm}$. Kvůli přístupu do válcové dutiny pro uložení gumového těsnění a kvůli povaze konstrukce, která není vhodná pro 3D tisk jako samostatný díl, se akustický vazební člen skládá ze dvou dílů vytištěných samostatně. Tyto díly byly následovně slepeny vteřinovým lepidlem. Na horním konci tenké trubice je vlepen o-kroužek o rozměrech $6 \times 2\text{ mm}$ pro zajištění těsného spojení při vložení vsuvného sluchátka. Sestava s akustickým vazebním členem pro měření vlastností vsuvných sluchátek je znázorněna na obrázku 3.13.



Obr. 3.13 Model akustického vazebního členu pro měření vsuvných sluchátek.

3.3 Tisk a zhodnocení modelu simulátoru

Ke zhotovení vlastního přípravku byla využita 3D FDM tiskárna Creality Ender 3 (obr. 3.14). Jako materiál konstrukce jednotlivých dílů byl zvolen filament PLA, což je nejuniverzálnější materiál pro 3D tisk a je vhodný i pro tisknutí větších objektů.



Obr. 3.14 3D FDM tiskárna.

Nastavené parametry pro tisk všech součástí byly stejné, kromě hustoty výplně (podíl plastové výplně součásti oproti vzduchu v procentech). Pro součásti tělo, víko, matice, závitová tyč a opora bylo zvoleno 20 %, což je považováno za doporučené minimum. Pro oba akustické vazební členy byla nastavena hodnota 100 %, kvůli dodržení podmínky plnosti materiálu. U stojánku bylo nastaveno 100 % výplně pro základnu, kvůli zvýšení hmotnosti pro zajištění stability, a 20 % výplně pro zbytek dílu. Vytisknuté díly zkompletované do sestavy s umístěným měřicím mikrofonom jsou viditelné na obrázku 3.15.



Obr. 3.15 Měřicí přípravek s umístěným mikrofonom.

Sestava včetně akustického vazebního členu pro měření náušních sluchátek je vidět na obrázku 3.16.



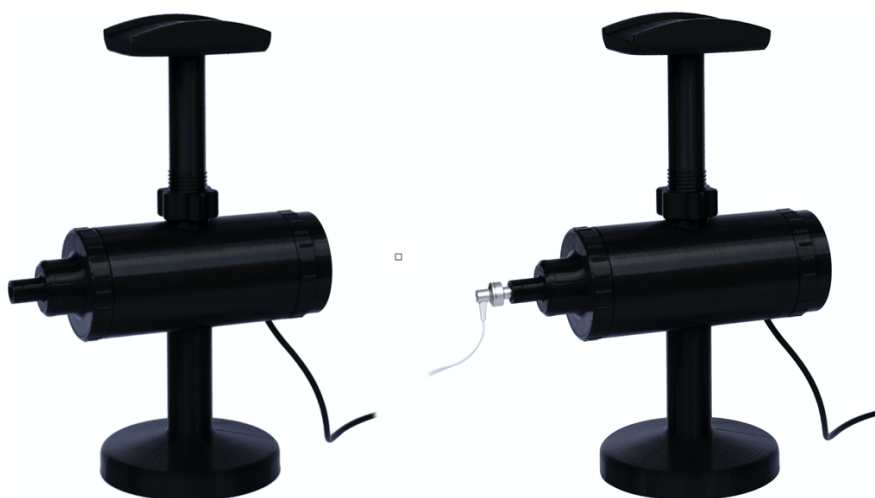
Obr. 3.16 Měřicí přípravek pro měření náušních sluchátek

Stejná sestava včetně umístěných adaptérů pro měření sluchátek s uzavřeným objemem je vidět na obrázku 3.17.



Obr. 3.17 Měřicí přípravek pro měření sluchátek s uzavřeným objemem.

Sestava včetně akustického vazebního členu pro měření vložných sluchátek je vidět na obrázku 3.18.



Obr. 3.18 Měřicí přípravek pro měření vsuvných sluchátek.

Pro zhodnocení vhodnosti využití technologie FDM 3D tisku je vedle kvality provedení konstrukce vhodné provést i odhad spotřeby materiálu a nákladů na tisk. Odhad je proveden při uvažování ceny filamentu PLA 400 Kč/kg a průměrné ceně elektřiny 5,81 Kč/kWh. Při tisku s tryskou zahřátou na 200 °C a s podložkou zahřátou na 60 °C příkon tiskárny odpovídá hodnotě 125 W. Vychází-li se ze vzorce

$$X = \frac{125}{1000} \cdot 5,81 \cdot t, \quad (3.2)$$

kde X je cena elektřiny za výtisk v Kč a t čas daného výtisku v hodinách, je dosaženo hodnot, které jsou pro přehlednost uvedeny v tabulce 3.1.

Tab. 3.1 Náklady na tisk modelu simulátoru ucha.

Díl	Hmotnost	Čas tisku	Cena za materiál dílu	Cena za tisk dílu	Celková cena dílu
AVČ - náušní sluchátka	65 g	10 h 20 min	25,84 Kč	7,50 Kč	33,34 Kč
AVČ - vložná sluchátka	41 g	6 h 47 min	16,16 Kč	4,93 Kč	21,09 Kč
Tělo	84 g	9 h 17 min	33,69 Kč	6,74 Kč	40,43 Kč
Víko	28 g	3 h 54 min	11,03 Kč	2,83 Kč	13,86 Kč
Stojánek	194 g	10 h 53 min	77,77 Kč	7,90 Kč	85,67 Kč
Opора	24 g	3 h 3 min	9,47 Kč	2,22 Kč	11,69 Kč
Závitová tyč	18 g	2 h 15 min	7,24 Kč	1,63 Kč	8,87 Kč
Matice	5 g	38 min	1,82 Kč	0,46 Kč	2,28 Kč
Adaptéry	50 g	7 h 8 min	20,38 Kč	5,18 Kč	25,56 Kč

Z tabulky vyplývá, že celkové náklady na tisk laboratorního přípravku činí 242,80 Kč.

3.4 Měření vlastností sluchátek na přípravku

Za účelem vyhodnocení, zda je zkonstruovaný přípravek vhodný k laboratornímu měření vlastností sluchátek, byla provedena dvě srovnávací měření. V prvním byly měřeny a srovnávány modulové kmitočtové charakteristiky sluchátek na vlastním zkonstruovaném přípravku, na profesionálním simulátoru uzavřeného ucha a na simulátoru hlavy a torza pro telekomunikace (dále HATS). Ve druhém měření byly srovnávány vstupní impedance sluchátek ve volném prostoru, na vlastním přípravku a na HATS. Na obrázku 3.19 je zobrazen použitý simulátor ucha B&K Type 4152 a HATS B&K Type 4128-C. Pro získání srovnávacích hodnot byly měřeny tři typy sluchátek:

- Audiometrická sluchátka Beyerdynamics DT 48 A.00
- Circum-aurální sluchátka AKG K-66
- Vložná sluchátka typu insert Sencor SEP 300

U každých sluchátek bylo provedeno měření modulové kmitočtové charakteristiky a u sluchátek circum-aurálních a vložných i měření vstupní impedance.



Obr. 3.19 Simulátor ucha (vlevo) [8] a HATS (vpravo) [13].

3.4.1 Modulová kmitočtová charakteristika

U sluchátek audiometrických a circum-aurálních byla provedena tři měření – na HATS, na simulátoru uzavřeného ucha a na vlastním přípravku. U vložných sluchátek byla provedena dvě měření – na HATS a na vlastním přípravku.

Kromě sluchátek a měřicího přípravku je nezbytné zařízení pro generování zvukového signálu, voltmetr pro měření výstupního napětí generátoru, zesilovač měřeného signálu a analyzátor pro měření výstupního napětí zesilovače. Pro účely tohoto měření byly použity:

- Generátor NTi Audio MR-PRO Minirator
- Multimetr Agilent 34410A
- Zesilovač B&K Nexus (pro měření na HATS)
- Analogový zesilovač B&K Type 2606 (pro měření na simulátoru uzavřeného ucha)
- Analyzátor NTi Audio XL2

Pracoviště pro měření kmitočtových charakteristik sluchátek na vlastním přípravku bylo zapojeno dle obrázku 3.20 s tím, že circum-aurální sluchátka vyžadovala přidání adaptérů (obr. 3.17) na měřicí přípravek a vložná sluchátka vyžadovala výměnu akustického vazebního členu, viz obr. 3.18.



Obr. 3.20 Pracoviště pro měření kmit. char. na vlastním přípravku.

Nejprve bylo stanoveno charakteristické napětí sluchátek. Hodnota tohoto napětí je potřeba kontrolovat pomocí multimetru a udržovat při přeladování kmitočtů po celý čas měření, případně upravit výstupní napětí generátoru. Měření kmitočtové charakteristiky se provádí pomocí harmonického signálu 1/12-oktávových intervalech. Pro účely srovnání jednotlivých simulátorů je však dostačující měření v 1/3-oktávových intervalech. Z displeje analyzátoru byly odečítány jednotlivé hodnoty odezvy sluchátek v dB(SPL). Naměřené hodnoty byly následně přepočítány pro získání relativní odezvy v dB vztažené k 1 kHz.

Druhé měření bylo provedeno na HATS. Pracoviště pro měření bylo zapojeno dle obrázku 3.21. U naměřených hodnot dB(SPL) audiometrických a circum-aurálních sluchátek na HATS je potřeba provést korekci na odezvu vzhledem k referenčnímu bodu ucha v difuzním poli (Ear reference point – ERP). U měření vložných sluchátek se korekce neprovádí, protože se odezva vnějšího ucha v tomto případě neuplatní. Následně byly hodnoty opět přepočítány pro získání relativní odezvy v dB vztažené k 1 kHz.



Obr. 3.21 Pracoviště pro měření kmit. char. na HATS.

Třetí měření bylo provedeno (vyjma sluchátek vložných) na simulátoru uzavřeného ucha. Pracoviště pro měření bylo zapojeno dle obrázku 3.22. Naměřené hodnoty odezvy sluchátek v dB(SPL) byly tentokrát odečítány z analogového měřicího zesilovače a poté byly přepočítány pro získání relativní odezvy v dB vztažené k 1 kHz.



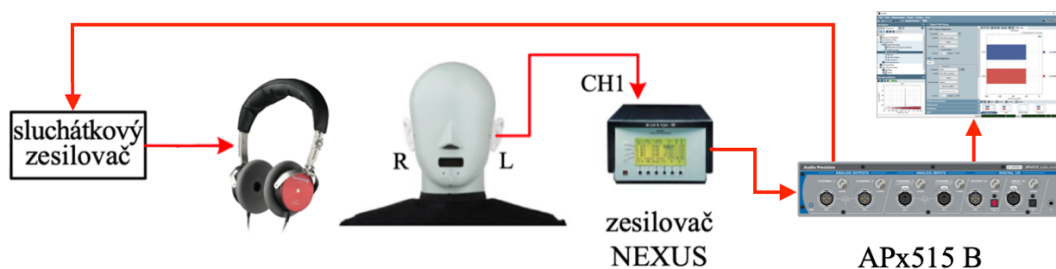
Obr. 3.22 Pracoviště pro měření kmit. char. na simulátoru umělého ucha.

Z výstupních hodnot byly sestrojeny křivky, které odpovídají modulovým kmitočtovým charakteristikám sluchátek na jednotlivých přípravcích. Některé naměřené hodnoty u circum-aurálních a vložných se značně odlišovaly od ostatních průběhů, což bylo způsobeno jednak chybami měření, ale především nevhodným nasazením sluchátek. Z toho důvodu bylo realizováno opakované měření některých sluchátek. Tentokrát bylo měření provedeno za pomoci analyzátoru APx515 ovládaného pomocí desktopové aplikace APx500, který byl schopen dodat více změřených vzorků v kratším čase. Analyzátor zároveň sloužil ke generování přeladovaného harmonického signálu v rozsahu 20 Hz až 20 kHz. Pracoviště pro měření sluchátek na vlastním přípravku bylo zapojeno podle obrázku 3.23.



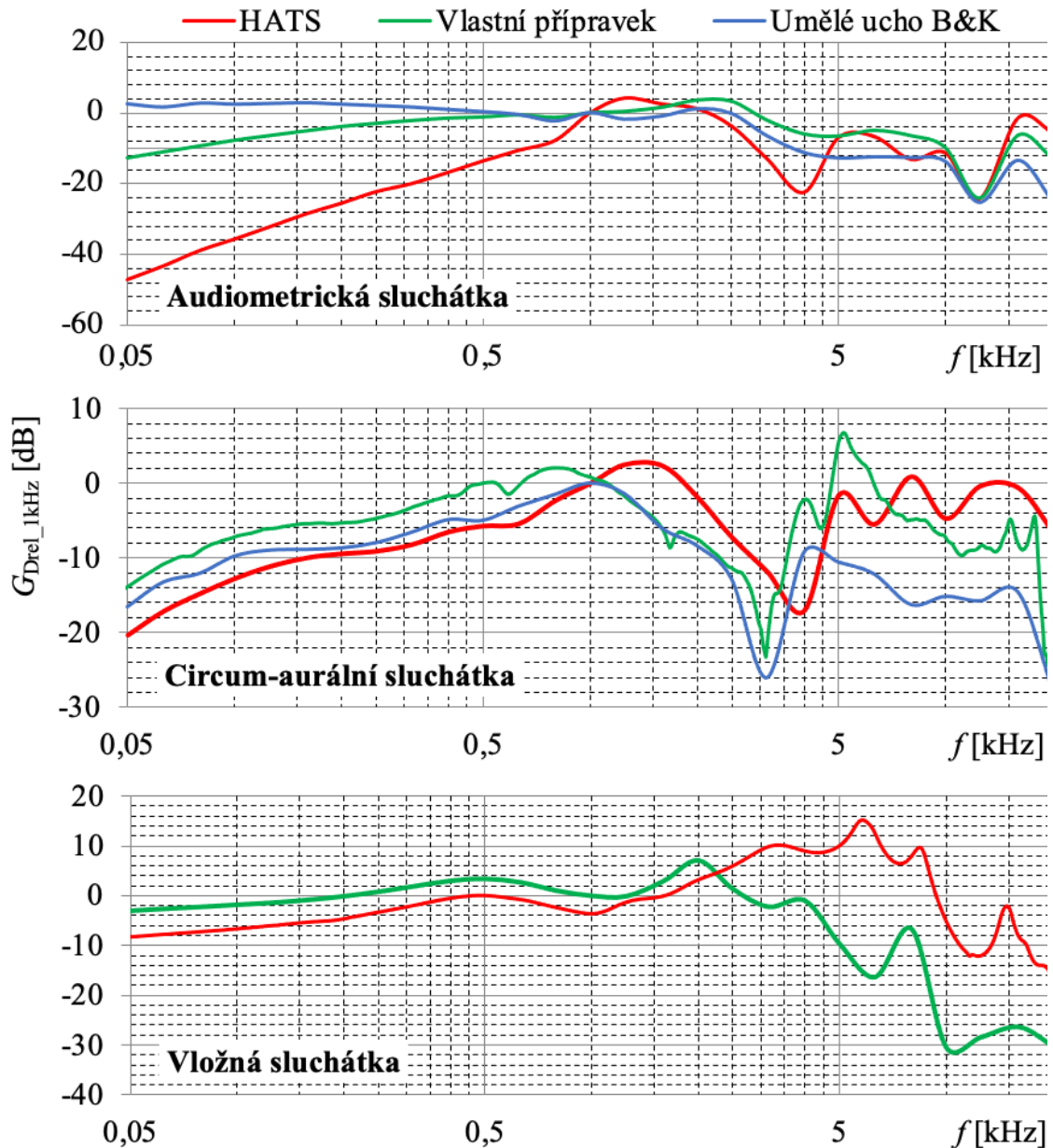
Obr. 3.23 Pracoviště pro měření kmit. char. na vlastním přípravku s APx515.

Pracoviště pro měření na HATS je znázorněno na obrázku 3.24.



Obr. 3.24 Pracoviště pro měření kmit. char. na HATS s APx515.

Získané hodnoty z obou měření byly vyneseny do grafů, které jsou znázorněny na obrázku 3.25.



Obr. 3.25 Naměřené kmitočtové charakteristiky sluchátek.

U srovnávacího grafu audiometrických sluchátek jsou vidět rozdíly kmitočtového přenosu u všech přípravků. Při měření na HATS je pozorovatelný značný pokles na nižších kmitočtech (levá polovina grafu), což je způsobeno netěsnostmi při nasazení sluchátek na ušní boltce. Tento rozdíl v přenosu u HATS byl potvrzen větším počtem naměřených vzorků pomocí APx515, které vykazovaly obdobné průběhy. Rozdíly mezi umělým uchem a vlastním přípravkem již nejsou tak velké a jsou způsobeny drobnými netěsnostmi při nasazení sluchátka na akustický vazební člen. V druhé půlce grafu se křivky vlastního přípravku a umělého ucha odlišují od HATS, jelikož dle povahy konstrukce simulují pouze objem lidského ucha, kdežto HATS simuluje impedanci lidského ucha komplexněji. S tím však příslušné normy počítají, a proto se na simulátorech ucha měří pouze do kmitočtu 4 kHz.

U sluchátek circum-aurálních si na nižších kmitočtech jednotlivé průběhy odpovídají. Změna nastává okolo kmitočtu 1 kHz u rezonanční frekvence, kterou má každý

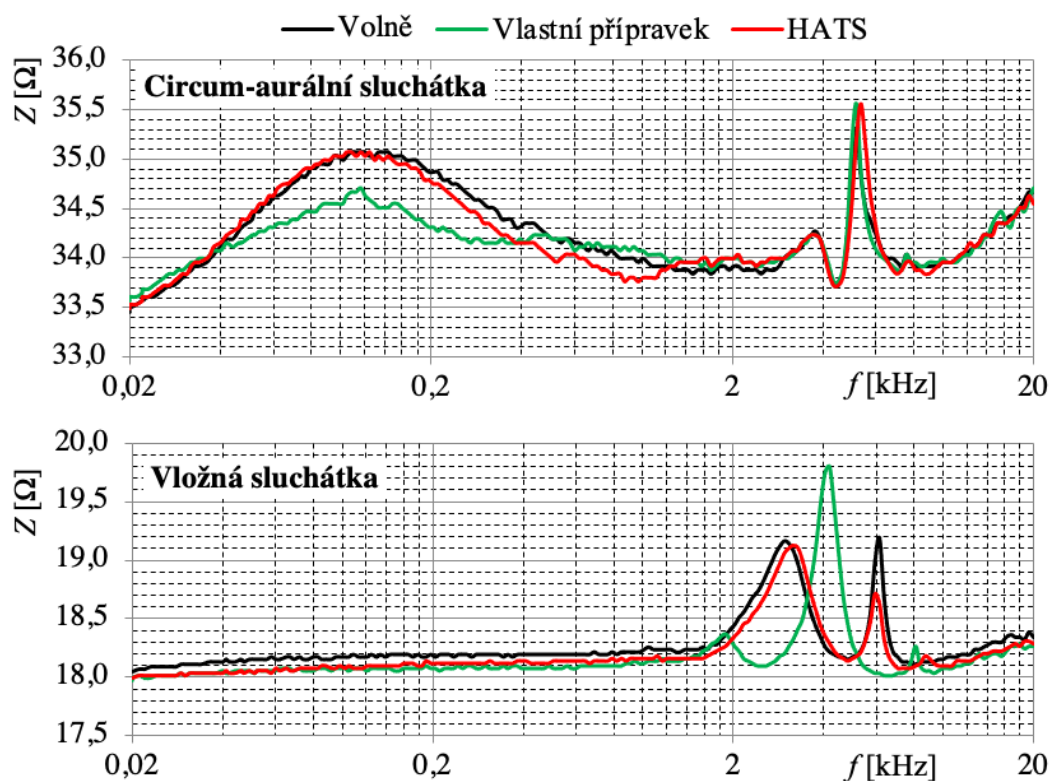
z přípravků jinde, díky odlišnému objemu prostoru, do kterého sluchátko vyzařuje. Na vyšších kmitočtech jsou rozdíly způsobeny opět tím, že HATS disponuje větší komplexností simulace impedance ucha. Umělé ucho zase postrádá adaptér pro měření circum-aurálních sluchátek. To u sluchátek způsobuje vyzařování do prostoru mimo umělé ucho, což ho činí pro měření daného typu sluchátek nepoužitelným.

U sluchátek vložitelných si na nižších kmitočtech jednotlivé průběhy odpovídají. Začínají se lišit od kmitočtu 2 kHz, což je opět dáno povahou konstrukce akustického vazebního členu vlastní přípravky, který simuluje pouze objem lidského ucha, kdežto HATS simuluje impedanci lidského ucha komplexněji.

3.4.2 Vstupní impedance

Při měření impedance sluchátek bylo postupováno tak, že bylo změřeno napětí na konektoru sluchátek a proud protékající sluchátko, kdy hodnota proudu je měřena jako napětí na známém normálovém odporu s nízkou hodnotou zapojeným do série s měřenými sluchátko.

K měření byl využit elektroakustický analyzátor s generátorem NTi Audio RT-2M, ovládaný pomocí desktopové aplikace RT-Eval. Na jeden jeho vstup je přivedeno napětí snímané na sluchátko a na druhý vstup napětí snímané na normálové impedanci 1 Ω . Analyzátor zároveň sloužil ke generování přeladovaného harmonického signálu v rozsahu 20 Hz až 20 kHz. Výstupem měření jsou modulové impedanční charakteristiky sluchátek ve volném prostoru, nebo nasazených na jednom z měřicích přípravků, viz obr. 3.26.



Obr. 3.26 Modulová impedanční charakteristika sluchátek.

V prvním grafu lze pozorovat, že přivedením střídavého proudu se impedance měniče od spodních kmitočtů mírně zvyšuje vlivem indukčnosti kmitací cívky. Při určité frekvenci se dostane na lokální maximum - tzv. rezonanční frekvence, na které sluchátko funguje energeticky nejúčinněji. Teprve nad touto frekvencí sluchátko hraje nejvíce

vyrovnaně až do cca 2 kHz. Jednotlivé charakteristiky circum-aurálních sluchátek se shodují až na oblast okolo rezonanční frekvence při vyzařování do vlastního přípravku. To je způsobeno tím, že na vlastním přípravku je díky talířovým adaptérům pro měření circum-aurálních sluchátek vytvořeno těsnější spojení než na ušních boltcích u HATS.

Ve druhém grafu jsou jednotlivé impedanční charakteristiky vložných sluchátek vyrovnané, až do cca 2 kHz, kde se objevují rezonanční frekvence, které jsou ale vůči sobě posunuté. To je způsobeno rozdílnou vzdáleností mezi měničem sluchátka a měřicím mikrofonem u jednotlivých přípravků.

3.5 Laboratorní úloha

Zkonstruovaný přípravek bude sloužit pro měření vlastností sluchátek v laboratoři elektroakustiky a studiové techniky VUT v Brně. Měření na přípravku bude probíhat v rámci laboratorního cvičení v předmětu Elektroakustika, kde je cílem seznámit se s problematikou a principy měření různých typů sluchátek podle příslušných norem pomocí více typů měřicích přípravků. Měření na zkonstruovaném přípravku je zakomponováno do již existujícího zadání, které obsahovalo úlohy pro měření na simulátoru hlavy a torza pro telekomunikace B&K Type 4128-C a na profesionálním simulátoru uzavřeného ucha B&K Type 4152. Dosud používaný simulátor uzavřeného ucha je však konstruován pro starší typ 1“ mikrofonu, který lze připojit pouze k analogovému zvukoměru. Nově zkonstruovaný přípravek využívá moderní 1/2“ mikrofon s fantomovým napájením a XLR konektorem a je tedy možné ho připojit k libovolnému analyzátoru nebo zvukoměru moderní konstrukce. Účelem je, aby zkonstruovaný přípravek nahradil původní simulátor uzavřeného ucha B&K pro potřeby laboratorního měření sluchátek. Původní zadání laboratorní úlohy je upraveno tak, aby byl využíván nový přípravek pro řešení následujících úkolů:

- Změřit modulovou kmitočtovou charakteristiku levého kanálu circum-aurálních sluchátek pomocí simulátoru uzavřeného ucha při buzení harmonickým signálem s charakteristickým napětím sluchátek a porovnat výsledný graf s charakteristikami při měření pomocí simulátoru hlavy a torza.
- Změřit modulovou kmitočtovou charakteristiku vložných sluchátek pomocí simulátoru uzavřeného ucha a výsledný graf porovnat s charakteristikou při měření pomocí simulátoru hlavy a torza.

Pracoviště pro laboratorní měření sluchátek bude zapojeno podle obrázku 3.14. Kompletní zadání laboratorního měření je součástí přílohy B.

4. ZÁVĚR

V teoretické části práce je proveden rozbor jednotlivých druhů sluchátek podle typu jejich konstrukce a také popsány jejich charakteristické parametry. Dále se práce zabývá popisem jednotlivých simulátorů ucha a akustických vazebních členů podle platných mezinárodních norem.

V navazující praktické části byl popsán návrh modelu laboratorního přípravku pro měření náušních, circum-aurálních a vložných sluchátek. Navržené díly byly zhotoveny pomocí 3D tisku technologií FDM. Pro celou sestavu byl proveden odhad spotřeby materiálu a celkových nákladů na výrobu, které jsou obecně nízké zejména díky ceně použitého materiálu a lehce dostupné technologii.

Na sestrojeném laboratorním přípravku bylo provedeno měření modulové kmitočtové charakteristiky a vstupní impedance náušních audiometrických a circum-aurálních sluchátek dle normy ČSN EN 60318-3 ed. 2. Stejná měření byla na přípravku provedena i za využití akustického vazebního členu pro vložná sluchátka dle normy ČSN EN 60318-5. Výsledky měření byly srovnatelné s hodnotami naměřenými na profesionálním simulátoru ucha a simulátoru hlavy a torza pro telekomunikace. Tato srovnávací měření potvrdila, že zkonstruovaný přípravek je využitelný pro účely laboratorního měření charakteristik více typů sluchátek. Závěrem bylo navrženo zadání laboratorní úlohy, ve kterém tento přípravek nahrazuje profesionální simulátor uzavřeného ucha B&K Type 4152 pro měření modulové kmitočtové charakteristiky circum-aurálních a vložných sluchátek.

LITERATURA

- [1] ČSN EN 60268-7 ED.2. *Elektroakustická zařízení – Část 7: Náhlavní sluchátka a sluchátka*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [2] SCHIMMEL, Jiří. *Sluchátka* [online prezentace]. 2011 [cit. 2011-12-05]. Dostupné z: https://moodle.vut.cz/pluginfile.php/144235/mod_resource/content/6/ELA_10_sluchatka.pdf
- [3] *Open-back vs. Closed-back Headphones: What's the Difference?* [online]. Fort Wayne: Thom Koester, 2020 [cit. 2021-12-05]. Dostupné z: <https://www.sweetwater.com/insync/open-back-vs-closed-back-headphones-whats-the-difference/>
- [4] ITU-T Recommendation P.57. *Series P: Telephone transmission quality, Objective measuring apparatus: Artificial ears*. Geneva: ITU-T, 2005.
- [5] ČSN EN 60318-1 ED. 2. *Elektroakustika – Modelová hlava a simulátor ucha - Část 1: Simulátor ucha pro měření náušních sluchátek a sluchátek s uzavřeným objemem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [6] ČSN EN 60318-4. *Elektroakustika – Modelová hlava a simulátor ucha - Část 4: Simulátor uzavřeného ucha pro měření sluchátek spojených s uchem pomocí ušních vložek*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [7] *Instruction Manual: 43AA Ear Simulator Kit According to IEC 60318-1 & -2* [online]. Holte: GRAS Sound & Vibration [cit. 2021-12-05]. Dostupné z: https://www.grasacoustics.com/files/m/a/man_43AA.pdf
- [8] *Product data: Artificial Ear Types 4152 and 4153* [online]. Virum: HOTTINGER BRÜEL & KJÆR, 2020 [cit. 2021-12-05]. Dostupné z: <https://www.bksv.com/-/media/literature/Product-Data/bp0265.ashx>
- [9] *AWA6160 Ear Simulator* [online]. Hangzhou: Hangzhou Aihua Instruments Co., 2020 [cit. 2021-12-05]. Dostupné z: https://www.hzaihua.com/products_cont.html?id=142&style_id=113
- [10] *Instruction Manual: GRAS 43AC Ear Simulator Kit* [online]. Holte: GRAS Sound & Vibration, 2020 [cit. 2021-12-05]. Dostupné z: https://www.grasacoustics.com/files/m/a/man_43AC.pdf
- [11] *Product Data: Ear Simulator — Type 4157* [online]. Virum: HOTTINGER BRÜEL & KJÆR [cit. 2021-12-05]. Dostupné z: <https://www.bksv.com/-/media/literature/Product-Data/bp0262.ashx>
- [12] *Instruction Manual: RA0056 Low-leak Pinna Simulator ITU-T Rec. P57 Type 3.2* [online]. Holte: GRAS Sound & Vibration, 2017 [cit. 2021-12-05]. Dostupné z: https://www.grasacoustics.com/files/m/a/man_RA0056_RA0057.pdf

- [13] *Symmetrical pinnae for head and torso simulator* [online]. Virum: HOTTINGER BRÜEL & KJÆR [cit. 2021-12-05]. Dostupné z: <https://www.bksv.com/en/transducers/simulators/head-and-torso/pinnae-dz9770>
- [14] *HSU – Artificial head series for binaural sound recordings* [online]. Herzogenrath: HEAD acoustics [cit. 2021-12-05]. Dostupné z: <https://www.head-acoustics.com/products/artificial-head-binaural-recording/hsu-iii>
- [15] ČSN EN 60318-3 ED. 2. *Elektroakustika - Modelová hlava a simulátor ucha - Část 3: Akustická spojka pro kalibraci náušních sluchátek používaných v audiometrii*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
- [16] ČSN EN 60318-5. *Elektroakustika - Modelová hlava a simulátor ucha - Část 5: Akustická spojka o objemu 2 cm³ pro měření sluchadel a sluchátek vkládaných do ucha pomocí ušních vložek*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2007.
- [17] *GRAS 45CA Headphone/Hearing-protector Test Fixture* [online]. Holte: GRAS Sound & Vibration [cit. 2021-12-05]. Dostupné z: <https://www.grasacoustics.com/products/test-fixtures/for-hearing-protector-test/product/734-45ca>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

THD	Total Harmonic Distortion
DRP	Ear-Drum Reference Point
ERP	Ear Reference Point
CAD	Computer Aided Design
FDM	Fused Deposition Modeling
PLA	Polylactic Acid

Symboly:

V	objem	(m ³)
M _a	akustická hmotnost	(Pa·s ² ·m ⁻³)
R _a	akustický odpor	(Pa·s·m ⁻³)
V _{eq}	efektivní akustický objem	(m ³)

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A - MIKROFON NTI AUDIO M2010	46
PŘÍLOHA B - ZADÁNÍ LABORATORNÍ PRÁCE.....	48