

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



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

STANDARDNÍ OZVUČNICE – LABORATORNÍ PŘÍPRAVEK

STANDARD BAFFLE - LABORATORY DEVICE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Hodinka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Miroslav Balík, Ph.D.

BRNO 2021

Bakalářská práce

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

Student: Tomáš Hodinka

ID: 211586

Ročník: 3

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Standardní ozvučnice - laboratorní přípravek

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Nastudujte příslušnou normu, která popisuje tzv. standardní ozvučnici a jednotlivá měření, která se s jejím využitím provádějí. Připravte výchozí konstrukční podklady, které jasně a přehledně definují rozměry a další konstrukční požadavky, které jsou v normě uvedeny. Následně zpracujte výrobní podklady pro ozvučnici, která bude splňovat požadavky na standardní ozvučnici, bude zároveň modulární, samonosná, přenosná a rozložitelná. Ozvučnice bude využívat moduly vkládané ozvučnice, která umožní snadnou záměnu měřeného reproduktoru za jiný typ s jiným průměrem či zástavbou. Ozvučnice musí být konstruována tak, že na ní nebudou žádné překážky, které by způsobovaly parazitní odrazy zvukových vln. Na závěr provedete sadu srovnávacích měření impedančních a kmitočtových charakteristik reproduktorů s využitím standardní ozvučnice.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] ČSN EN 60268-5: Elektroakustická zařízení – Část 5: Reprodukory. Česká

technická norma, Český normalizační institut, únor 2004.

[2] COLLOMS, M., DARLINGTON, P. High Performance Loudspeakers. John Wiley & Sons, 2005. ISBN 978--470094-30-3.

Termín zadání: 1.2.2021

Termín odevzdání: 4.8.2021

Vedoucí práce: Ing. Miroslav Balík, 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

Cílem této práce byl návrh a konstrukce normovaného laboratorního přípravku pro přesné měření reproduktorů, standardní ozvučnice – přepážky. Standardní ozvučnice je obdélníková deska, do které je umístěn reproduktor (mimo střed) a měření se provádí v bezdozvukové místnosti (mrtvé komoře). Hlavním účelem standardní ozvučnice – přepážky je možnost měření reproduktorů bez tlakového vlivu uzavřené ozvučnice a bez akustického zkratu.

Standardní ozvučnice je navržena tak, aby byla samonosná, přenositelná, skladná, modulární a aby s její pomocí bylo možné měřit až dvanáctipalcový reproduktor. Navrhovaná standardní ozvučnice je rozebíratelná na 3 části: podstavec, přepážku a vsadky. Podstavec ozvučnice je velká těžká deska s perem na horní ploše pro nasunutí přepážky. Přepážka je vyrobena ze čtyř vrstev různých překližek, které tvoří kompromis v poměru pevnosti a lehkosti. Vsadky jsou navrženy tak, aby výměna a manipulace s reproduktory byla během měření co nerychlejší a nejjednodušší. Během měření reproduktory zůstávají ve svých vsadkách, které je možno namontovat a vymontovat ze standardní ozvučnice bez použití ručního nářadí.

Testovací měření ukázaly, že standardní ozvučnice není vhodná pro referenční měření. Rezonance přepážky, odrazy zvukových vln od podstavy, refrakce od vnějších hran a potenciálně jiné vlastnosti zkreslují výsledky měření. Tato zkreslení jsou však značně konzistentní i mezi různými reproduktory, to by mohlo znamenat, že by se mohla odstranit například pomocí speciálního software.

Klíčová slova

Standardní ozvučnice, ozvučnice, akustický zkrat, reproduktor, bezdozvuková místnost (mrtvá komora), impedance, růžový šum

Abstract

The purpose of this project is the design and the construction of a laboratory preparation for loudspeaker measurements, a standard baffle. Standard baffle is a rectangular panel with a loudspeaker placed eccentrically. Measurements with this baffle are then done in an anechoic chamber. The main purpose of a standard baffle is the ability to measure loudspeakers without the effect, that is caused by the pressure properties of a closed baffle and without an acoustic short circuit.

The standard baffle is designed, so that it is self-supporting, transferable by 2 people, easy to be stored, modular and able to support loudspeakers that are up to 12 inches in diameter. The designed baffle is detachable into 3 parts. The base, the panel, and the inserts. The base is a big, heavy board with a key on the upper side. This key fits into a key groove in the panel and that allows the two parts to assemble. The plane is made of four layers of different types of plywood. That allows the design to make a compromise between the toughness and weight. The inserts are designed, so that the replacement and manipulation of loudspeakers during measurement are as past and as simple as possible. During measurement the loudspeakers are mounted in their respective inserts, which can be mounted and dismounted from the standard baffle without any tools.

The test measurements demonstrated that the standard baffle is unsuitable for reference measurements. Resonance of the plane, reflections from the base, refractions from the outer edges of the baffle and potentially different causes unduly distort the results of measurements. These distortions are displayed with a considerable consistency even between different loudspeakers. This indicates that these distortions could be filtered out by, for example, using a specialized software.

Keywords

Standard baffle, baffle, acoustic short circuit, loudspeaker, anechoic chamber, impedance, pink noise

Bibliografická citace

HODINKA, Tomáš. *Standardní ozvučnice - laboratorní přípravek*. Brno, 2021, 53 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací.

Vedoucí práce: Ing. Miroslav Balík, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	Tomáš Hodinka
VUT ID studenta:	211586
Typ práce:	Bakalářská práce
Akademický rok:	2020/2021
Téma závěrečné práce:	Standardní ozvučnice – laboratorní přípravek

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Standardní ozvučnice – laboratorní přípravek“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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: 4.srpna 2021

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu práce Ing. Miroslavovi Balíkovi, Ph.D. za rady, odborné vedení, poskytnuté zázemí na fakultě a trpělivost. Velké poděkování také patří mým přátelům a rodině, za nepřetržitou podporu.

V Brně dne: 4.srpna 2021

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	9
SEZNAM TABULEK.....	10
1. ÚVOD.....	11
2. VLASTNOSTI ELEKTROAKUSTICKÉHO MĚNIČE – REPRODUKTOR.....	12
2.1 PRINCIP FUNKCE REPRODUKTORU	12
2.1.1 <i>Problematika fungování reproduktoru.....</i>	12
2.1.2 <i>Funkce reproduktoru a jeho nedokonalosti</i>	13
2.1.3 <i>Stručný přehled typů elektrodynamických reproduktorů</i>	13
2.2 AKUSTICKÝ ZKRAT – FUNKCE RŮZNÝCH OZVUČNIC.....	14
2.2.1 <i>Reproduktor bez ozvučnice</i>	14
2.2.2 <i>Rovinná deska</i>	14
2.2.3 <i>Otevřená ozvučnice.....</i>	15
2.2.4 <i>Uzavřená ozvučnice</i>	15
2.2.5 <i>Basreflexová ozvučnice.....</i>	15
3. POSTUPY MĚŘENÍ CHARAKTERISTIK REPRODUKTORŮ VE STANDARDNÍ OZVUČNICI.....	16
3.1 DŮLEŽITÉ CHARAKTERISTIKY MĚŘENÉ POMOCÍ STANDARDNÍ OZVUČNICE A VYPOČÍTANÉ A ODVOZENÉ PARAMETRY.....	16
3.1.1 <i>Modulová kmitočtová charakteristika reproduktoru.....</i>	16
3.1.2 <i>Kmitočtová závislost impedance reproduktoru</i>	16
3.1.3 <i>Jmenovitá impedance reproduktoru.....</i>	16
3.1.4 <i>Rezonanční kmitočet</i>	16
3.1.5 <i>Q_{es} – Elektrický činitel jakosti</i>	17
3.1.6 <i>Q_{ms} – Mechanický činitel jakosti.....</i>	17
3.1.7 <i>Celkový faktor Q_{ts}.....</i>	17
3.1.8 <i>Zatížitelnost reproduktorů.....</i>	18
3.1.9 <i>Ekvivalentní objem (V_{as})</i>	18
3.2 MĚŘÍCÍ SIGNÁLY	18
3.2.1 <i>Harmonický signál</i>	18
3.2.2 <i>Širokopásmový signál</i>	18
3.2.3 <i>Úzkopásmový signál.....</i>	19
3.2.4 <i>Impulzní signál.....</i>	19
4. TYPY OZVUČNIC POUŽÍVANÝCH PRO AKUSTICKÁ MĚŘENÍ.....	20
4.1 STANDARDNÍ OZVUČNICE – PŘEPÁŽKA.....	20
4.2 STANDARD OZVUČNICE – SKŘÍŇ.....	21
4.2.1 <i>Skříň typu A.....</i>	21
4.2.2 <i>Skříň typu B.....</i>	21
5. AKUSTICKÁ MATERIÁLOVÁ STUDIE	23
5.1 RYCHLOST ZVUKU V IDEÁLNÍM PLYNU.....	23
5.2 ŠÍŘENÍ ZVUKU V RŮZNÝCH MATERIÁLECH	23
5.3 PŘEDPOKLÁDANÉ ŠÍŘENÍ ZVUKU VE STANDARDNÍ OZVUČNICI	23

6. POŽADAVKY NA VLASTNOSTI STANDARDNÍ OZVUČNICE	24
6.1 MOŽNOST RYCHLÉ VÝMĚNY REPRODUKTORU VE FORMĚ OZVUČNICOVÉ VSADKY.....	24
6.1.1 <i>Těsnění vsadky</i>	25
6.1.2 <i>Provedení šroubení u vsadky</i>	25
6.2 POŽADAVKY NA PŘENOSNOST OZVUČNICE	26
6.2.1 <i>Oddělitelnost podstavce</i>	26
6.2.2 <i>Hmotnost standardní ozvučnice</i>	27
6.3 PODPOROVANÉ REPRODUKTORY	27
7. PROVEDENÁ MĚŘENÍ	29
7.1 MĚŘENÍ MODULOVÉ KMITOČTOVÉ CHARAKTERISTIKY REPRODUKTORU ZA RŮZNÝCH PODMÍNEK	29
7.2 SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ MODULOVÉ KMITOČTOVÉ CHARAKTERISTIKY MĚŘENÝCH NA STANDARDNÍ OZVUČNICI UMÍSTĚNOU V MRTVÉ KOMOŘE A LABORATOŘI	29
7.3 SROVNÁNÍ REPRODUKTORŮ SPH-170 A SPH210 NA STANDARDNÍ OZVUČNICI BEZ PODSTAVY ...	29
7.4 MĚŘENÍ MODULOVÉ KMITOČTOVÉ CHARAKTERISTIKY V BLÍZKÉM POLI (NEAR-FIELD)	30
7.5 MĚŘENÍ KMITOČTOVÉ ZÁVISLOSTI IMPEDANCE.....	30
8. POTŘEBNÉ INFORMACE PRO MĚŘENÍ	31
8.1 POPIS METOD MĚŘENÍ.....	31
8.1.1 <i>Dodatečné tlumení</i>	31
8.1.2 <i>Měření bez podstavce</i>	31
8.1.3 <i>Měření v laboratoři</i>	31
8.1.4 <i>Tlumení rezonancí</i>	31
8.2 ZPŮSOBY MĚŘENÍ.....	32
8.2.1 <i>Měření modulové kmitočtové charakteristiky reproduktoru ve vzdálenosti 1 metr</i>	32
8.2.2 <i>Měření modulové kmitočtové charakteristiky v blízkém poli</i>	32
8.2.3 <i>Měření kmitočtové závislosti impedance reproduktoru</i>	33
8.3 KATALOGOVÉ PARAMETRY MĚŘENÝCH REPRODUKTORŮ	33
9. VÝSLEDKY MĚŘENÍ	34
9.1 MĚŘENÍ MODULOVÝCH KMITOČTOVÝCH CHARAKTERISTIK REPRODUKTORŮ VE VZDÁLENOSTI 1M 34	
9.1.1 <i>Modulová kmitočtová charakteristika reproduktoru za různých podmínek způsobené postavou</i>	34
9.1.2 <i>Porovnání modulové kmitočtové charakteristiky reproduktoru v mrtvé komoře za pomoci programu APX a v laboratoři za pomoci programu NTi</i>	36
9.1.3 <i>Porovnání modulové kmitočtové charakteristiky obou reproduktorů v mrtvé komoře na standardní ozvučnici bez podstavce</i>	37
9.2 MĚŘENÍ MODULOVÉ KMITOČTOVÉ CHARAKTERISTIKY REPRODUKTORU V BLÍZKÉM POLI	38
9.3 MĚŘENÍ KMITOČTOVÉ ZÁVISLOSTI IMPEDANCE REPRODUKTORŮ	39
10. ZÁVĚR.....	41
LITERATURA.....	42
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	43
SEZNAM PŘÍLOH.....	44

SEZNAM OBRÁZKŮ

2-1	Funkční popis částí reproduktoru [6]	12
2-2	Schématické znázornění akustického zkratu [7]	14
3-1	Příklad modulové kmitočtové charakteristiky a kmitočtové závislosti impedance hlubokotónového reproduktoru. [10]	17
4-1	Rozměry standardní ozvučnice – přepážky	20
4-2	Normované provedení upevnění reproduktoru.....	20
4-3	Rozměry standardní ozvučnice – Skříň typu A	21
4-4	Rozměry standardní ozvučnice – Skříň typu B	22
6-1	Řez vsadkou	24
6-2	Rozložený pohled na upevnění vsadky	25
6-3	Pohled v řezu na upevnění vsadky - Příloha A -	26
6-4	Rozložený pohled spoje standardní ozvučnice a podstavce	27
6-5	Detailní pohled na vrstvení vsadky	28
8-1	Fotka laboratoře, ve které byla standardní ozvučnice měřena.....	31
8-2	Pohled na místo, kde byly rezonance tlumeny	32
8-3	Umístění mikrofону pro měření v blízkém poli	32
8-4	Schéma zapojení reproduktoru pro měření kmitočtové závislosti impedance [12]	33
9-1	Grafické znázornění modulové kmitočtové charakteristiky reproduktoru Monacor SPH-170 a vlivu postavy	34
9-2	Grafické znázornění modulové kmitočtové charakteristiky reproduktoru Monacor SPH-210 a vlivu postavy	35
9-3	Grafické znázornění modulové kmitočtové charakteristiky reproduktoru Monacor SPH-170 a vlivu místnosti	36
9-4	Grafické znázornění modulové kmitočtové charakteristiky reproduktoru Monacor SPH-210 a vlivu místnosti	36
9-5	Grafické znázornění modulové kmitočtové charakteristiky reproduktoru Monacor SPH-170 a SPH-210 bez postavy.....	37
9-6	Grafické znázornění modulové kmitočtové charakteristiky reproduktoru Monacor SPH-170 v blízkém poli.....	38
9-7	Grafické znázornění modulové kmitočtové charakteristiky reproduktoru Monacor SPH-210 v blízkém poli.....	38
9-8	Grafické znázornění kmitočtové závislosti impedance reproduktoru Monacor SPH-170.....	39
9-9	Grafické znázornění kmitočtové závislosti impedance reproduktoru Monacor SPH-210.....	40

SEZNAM TABULEK

5.1	Rychlost zvuku v různých materiálech.....	23
9.1	Rychlost zvuku v různých materiálech.....	33

1. ÚVOD

Dle normy IEC 60268-5 se pro přesné měření reproduktorů používá speciální přípravek zvaný standardní ozvučnice. V případě této práce byla z normově uvedených tří možností (typ A, typ B a přepážka) zkonstruována standardní ozvučnice – přepážka. Tato ozvučnice nemá žádný uzavřený prostor na eliminaci akustického zkratu. Místo toho se snaží přiblížit nekonečné ozvučnici. Jedná se o desku s přesnými rozměry, které jsou považovány za dostatečné, aby nedocházelo k akustickému zkratu.

Práce obsahuje návrh a konstrukci prototypu standardní ozvučnice – přepážky společně s výrobní dokumentací, dle které je možno tuto ozvučnici znovu zkonstruovat. Tato ozvučnice splňuje všechny požadavky ze zadání včetně normovaných parametrů. Konstrukce je navržena pro reproduktory o velikosti až do dvanácti palců. Obsluha standardní ozvučnice bude jednoduchá a přístupná po krátké instruktáži. Vše je navrženo tak, aby nebylo nutné používat speciální ruční nářadí.

Po zkonstruování byla se standardní ozvučnicí provedena série měření. Tato měření by měla pomoci naznačit, zda je zkonstruovaná standardní ozvučnice vhodná pro referenční měření, jak je uváděno v normách. Pokud ne, měla by pomoci identifikovat, jak tyto chyby vznikají a co jejich příčinou.

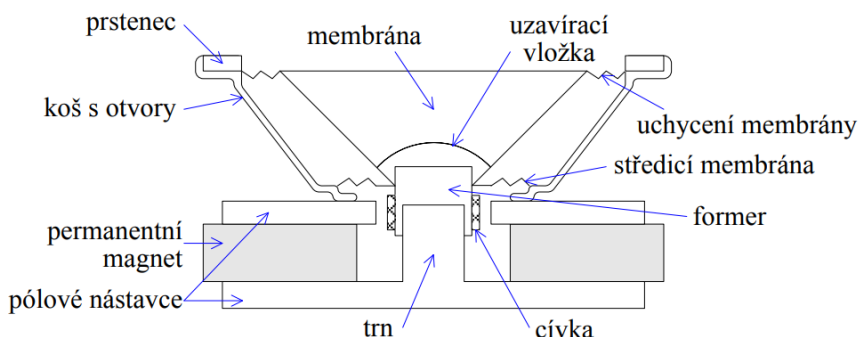
2. VLASTNOSTI ELEKTROAKUSTICKÉHO MĚNIČE – REPRODUKTOR

2.1 Princip funkce reproduktoru

Reproduktor je obecně elektroakustický měnič, vysílač, který mění elektrický signál na mechanický pohyb. Z hlediska principu jsou v současné době na trhu naprosto dominantní elektrodynamické měniče. Vyrábí se také měniče piezoelektrické, kapacitní a elektrostatické, ale ty buď přednáší zvuk nepřesně, nebo jsou extrémně nákladné, komplikované a nespolehlivé. Důležité je, že pro elektrodynamický měnič je i nejlépe přizpůsobená konstrukce nízkofrekvenčních zesilovačů. [1]

2.1.1 Problematika fungování reproduktoru

Elektrodynamický reproduktor je elektro-akustický systém, který funguje podobně jako lineární elektrický motor. Pohyblivou částí je cívka, která je zasunuta do magnetického obvodu. Magnetický obvod je vytvářen permanentním magnetem. Kostra cívky může být z různých materiálů, dříve to býval tvrdý papír, nyní tvrdý plast (kapton), kompozit se skelným vláknem (fibreglass), nebo hliník někdy i měď. Kostra cívky (někdy také kmitačka) je spojena s membránou. Tento celek nazýváme kmitací systém, a ten je umístěn pomocí pružných závěsů v pevném koši z hliníku, oceli nebo plastu.



Obrázek 2-1 Funkční popis částí reproduktoru [6][7]

Do cívky reproduktoru se přivádí střídavý proud z nízkofrekvenčního zesilovače. Zesilovač načítá zvukové frekvence ze zdrojového zařízení, které zesílí na požadovanou úroveň a tento signál, po přivedení na cívku reproduktoru, vyvolává kmity reproduktorové membrány, které jsou podobné kmitům, které byly zaznamenány ve zdrojové nahrávce. Podobnost je v tomto případě důležité slovo, protože reproduktor je přes snahu o neustálé zdokonalování, stále považován za nejslabší článek akustického řetězce. Přesné měření vlastností reproduktorů nám ukáže, že pojem „věrný zvuk“, který je považován za nejdůležitější kritérium z hlediska uživatelů, je jen iluze a že kterýkoliv reproduktor má k dokonalosti a věrnosti hodně daleko. [1]

2.1.2 Funkce reproduktoru a jeho nedokonalosti

Membrána reproduktoru se pohybuje v jedné ose s cívkou. Pro převedení jedné periody funkce sinus vyslané ze zesilovače, musí membrána udělat poměrně velkou rychlostí pohyb od jedné úvratě k druhé. Mechanicky je zřejmé, že zde působí setrvačné síly a membránu není možné zastavit úplně přesně. Vždy dochází k překmitům. Dále se projeví indukčnost cívky, kde v závislosti na frekvenci dochází k fázovým posunům až o 180° (rezonanční kmitočet). Na výsledný zvuk mají také vliv mechanické vlastnosti membrány, jako tvar, hmotnost, pružnost, tlumivé schopnosti závěsů a jejich efektivnost. Magnetické pole magnetického obvodu, ve kterém se pohybuje cívka, má maximální intenzitu uprostřed obvodu, ke stranám klesá. Podobně je to i s cívkou, která se v magnetickém obvodu pohybuje. To znamená, že v kritické části pohybu kmitacího systému, v úvratích, je magnetická síla nejslabší. [1]

Popisem těchto vlastností reproduktorů se zabývají Thiel-Small parametry. Viz 3.1

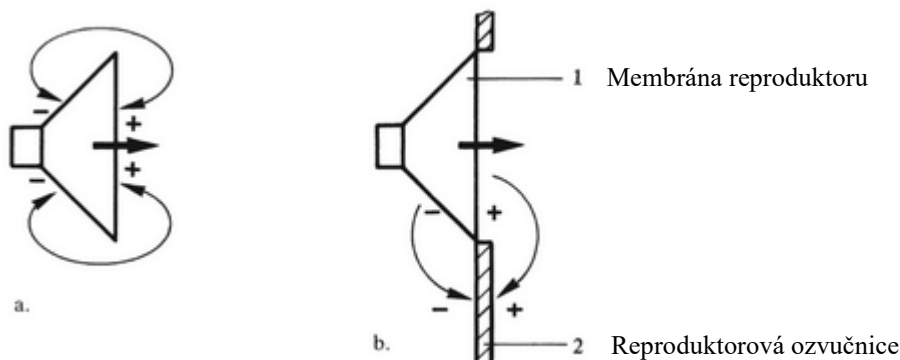
2.1.3 Stručný přehled typů elektrodynamických reproduktorů

Na reproduktory jsou kladeny různé požadavky a dle konstrukce je možné je rozdělit do těchto kategorií: vysokotónové, středotónové, hlubokotónové a subbasové. Zde jsou hlavní rozdíly ve frekvenční charakteristice, dle toho, kde je těžiště přenosu požadovaných frekvencí. Konstrukcí od ostatních reproduktorů se mohou výrazně lišit vysokotónové reproduktory označované jako kalotové, některé mají jenom uzavírací vložku vyrobenou z plastu nebo kovu, nebo jenom krycí (a tlumicí) plátěnou uzavírací vložku, a vysoké frekvence vyzařuje jenom návin cívky na kostře. Další rozlišení je možné na přímovyzářující a nepřímovyzářující, kde nepřímovyzářující mají různé rohy, band-pass filtry, zvukovody a nástavce. Pro domácí audio aparatury se nyní používají výhradně přímovyzářující. Nepřímovyzářující reproduktory mají své místo v profesionální technice, kde je často důležitější účinnost reproduktorů než kvalita přednesu. Za důležité se považuje i jejich směřování v prostoru a konečný zvuk se nastavuje pomocí zvukové techniky jako ekvalizéry, expandéry, kompresory atp. [1]

2.2 Akustický zkrat – funkce různých ozvučnic

2.2.1 Reproduktor bez ozvučnice

Při konstrukci standardní ozvučnice bylo nutné brát zřetel na případný akustický zkrat. Když do volně položeného reproduktoru přivedeme signál ze zesilovače, tak i člověk s nevytvořeným sluchem rozpozná, že zvuk je nedokonalý a neúplný. Největší ochuzení je znát především na nízkých kmitočtech. Tomuto jevu se říká akustický zkrat. Tento jev je způsoben tím, že akustické vlny, které jsou vysílány z přední i zadní plochy membrány reproduktoru se navzájem odečítají. Vlny vysílané zadní plochou membrány mají opačnou fázi než vlny vysílané přední plochou membrány. Tím dochází k odečítání. Tento jev se převážně týká kmitočtů s větší vlnovou délkou, než je průměr reproduktoru. Akustický zkrat je hlavním důvodem, proč se pro kvalitní poslech a kvalitní měření používají ozvučnice. [1]



Obrázek 2-2 Schématické znázornění akustického zkratu [7]

2.2.2 Rovinná deska

Pro přesné měření vlastností reproduktorů je technicky nedůslednější rovinná deska, také nazývaná jako nekonečná ozvučnice, tedy ozvučnice, která neovlivňuje měřitelné parametry reproduktoru. Tato ozvučnice však není v realitě proveditelná. Realizace ozvučnice blízké nekonečné bývá obvykle provedena tak, že mrtvá komora je rozdělena na dvě části a v této přepážce (která je rovněž zatlumena) je umístěn reproduktor. Objem prostoru před i za reproduktorem je takový, že pohyb membrány měřitelně neovlivňuje. Běžně se také měření provádí ve velké ozvučnici o objemu několika kubických metrů a měřicí mikrofón je uvnitř ozvučnice. Tato ozvučnice je rovněž umístěna v mrtvé komoře. [1]

2.2.3 Otevřená ozvučnice

Otevřená ozvučnice se dříve používala v PA (public address systém) patrně z úsporných důvodů. Nyní se s ní již nesetkáváme ani v hypermarketech. Umísťovala se obvykle do horního rohu místnosti a stěny mohly zvuk zesilovat jako horna. Toto umístění způsobovalo silné zkreslení, ale tyto reproduktory se nepoužívaly k věrnému poslechu, ale ponejvíce k přenosu mluveného slova a k tomu tento způsob přednesu vyhovoval. Mluvené slovo bylo srozumitelné. Tímto umístěním se obvykle řešil malý výkon reproduktoru.

V dnešní době jsou využívány prakticky exkluzivně u kytarových komb, kde akustický zkrat pro jejich využití nevádí. Elektrické kytary hrají převážně na vyšších kmitočtech, než kde se u ozvučnic objevuje akustický zkrat. [1]

2.2.4 Uzavřená ozvučnice

Vzhledem k tomu, že otevřené a nekonečné ozvučnice jsou pro poslech obtížně proveditelné řešení, byla jako jedno z možných řešení zkonstruována uzavřená ozvučnice. Tato ozvučnice se snaží akustické vlny vysílané zadní plochou membrány reproduktoru kompletně eliminovat a konvertovat na teplo v uzavřeném prostoru.

Pro tento efekt musí být ozvučnice co nejvíce tlakově utěsněná. To však znamená, že omezený objem ozvučnice bude tlakově omezovat reproduktor jako vzduchová pružina. Tato pružina také zvyšuje rezonanční kmitočet reproduktoru a zásadně ovlivňuje jeho chování. Nejvýrazněji je reproduktor ovlivněn na nízkých kmitočtech.

Pro úspěšnou eliminaci vln vysílaných zadní plochou membrány je potřeba zatlumit vnitřní plochy ozvučnice, aby se minimalizovaly odrazy zvukových vln. Ve velké ozvučnici je možné instalovat strukturované tlumení, které bude efektivně absorbovat většinu zvukových vln, které vyzařuje zadní část membrány. [1]

2.2.5 Basreflexová ozvučnice

Basreflexová ozvučnice vypadá jako běžná uzavřená ozvučnice, ale je v ní otvor obvykle opatřený nátrubkem, nebo je integrovaný do konstrukce ozvučnice. Rezananční kmitočet basreflexu závisí na délce a průřezu otvoru. Se vzrůstající délkou a klesajícím průřezem rezonanční kmitočet basreflexu klesá. Naladění basreflexu je možné jen na jeden kmitočet a jeho harmonické kmitočty jsou oslabené, jde o Helmholtzův rezonátor. [1]

Helmholtzův rezonátor nad svým rezonančním kmitočtem natáčí fázi vzduchu kmitajícího v nátrubku oproti zadní straně membrány reproduktoru o 180°. Na tomto kmitočtu je zvuk vysílaný rezonátorem ve fázi s přední plochou membrány reproduktoru.

Vhodnost reproduktoru pro umístění do basreflexové ozvučnice se určuje podle činitele EBP (Efficiency Bandwidth Product), který je závislý na rezonančním kmitočtu a elektrickém činiteli jakosti. [6]

3. POSTUPY MĚŘENÍ CHARAKTERISTIK REPRODUKTORŮ VE STANDARDNÍ OZVUČNICI

3.1 Důležité charakteristiky měřené pomocí standardní ozvučnice a vypočítané a odvozené parametry

T-S parametry je možné odvodit a vypočítat z výsledků měření pomocí standardní ozvučnice. [5]

3.1.1 Modulová kmitočtová charakteristika reproduktoru

Kmitočtová charakteristika reproduktoru vyjadřuje závislost hladiny akustického tlaku v určitém bodě před reproduktorem při konstantním napětí. [5]

3.1.2 Kmitočtová závislost impedance reproduktoru

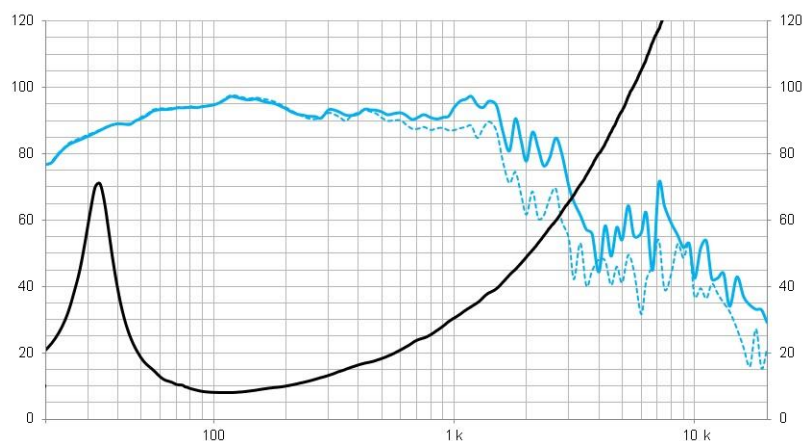
Kmitočtová závislost impedance musí být popsána jako závislost impedance na kmitočtu. Reprodukter by měl být připojen na konstantní napětí, nebo proud. Hodnota tohoto napětí, nebo proudu by měla být vybrána dostatečně nízká, aby bylo zajištěno, že reproduktor pracuje v lineárním výkonovém rozsahu. Impedance by měla být měřena v kmitočtovém rozsahu 20 až 20 000 Hz. Výsledky, dle [5] musí být zaznamenány graficky jako funkce frekvence. V dnešní době se však pro vykreslení také často používá hodograf.

3.1.3 Jmenovitá impedance reproduktoru

Jmenovitou impedanci reproduktoru formuluje výrobce. Představuje hodnotu čistého odporu, který nahrazuje reproduktor, když potřebujeme definovat množství elektrické energie, která přichází do reproduktoru. Nejnižší hodnota impedance v hodnoceném rozsahu kmitočtů nesmí být méně než 80% jmenovité impedance. [5]

3.1.4 Rezonanční kmitočet

Rezonanční frekvence je nejnižší frekvence, při níž vykazuje impedance reproduktoru maximální hodnotu. Udává se jen u přímo vyzařujících reproduktorů a pomocí ní je dána dolní mezní frekvence reproduktoru. Rezonanční frekvence může být posunuta k jiným hodnotám akustickou zátěží (např. umístěním reproduktoru v ozvučnici). Rezonanční kmitočet by měl být měřen ve volném poli, nebo poloprostoru. V dokumentaci by mělo být specifikováno, kde byl reproduktor měřen s detailními vlastnostmi prostoru. [5]



Obrázek 3-1 Příklad modulové kmitočtové charakteristiky a kmitočtové závislosti impedance hlubokotónového reproduktoru. [10]

3.1.5 Q_{es} – Elektrický činitel jakosti

Bezrozměrná veličina, která v sobě zahrnuje vliv elektrických ztrát v kmitací cívce reproduktoru. Vysoké Q_{es} znamená lepší kontrolu zesilovače nad pohybem membrány, nízké horší. Pohybuje se v hodnotách 0,08 až 0,6. [6]

Ztráty při reprodukci vznikají také tím, že cívka vydává teplo. V kovovém nosiči vinutí mohou vznikat vířivé proudy, které vyvolávají další teplo. Někdy se používá zkratovací kroužek na nosiči cívky, který tyto proudy vyruší.

3.1.6 Q_{ms} – Mechanický činitel jakosti

Bezrozměrná veličina, která v sobě zahrnuje vlivy mechanických ztrát pohyblivých částí reproduktoru. Pohybuje se v hodnotách 0,4 až 25. [6]

Jedná se o mechanické ztráty způsobené pohybem a elasticitou membrány. Membrána se při reprodukci ohýbá a vlní (dle použitého materiálu). Uzavírací vložka reproduktoru pumpuje vzduch na cívku, tím zlepšuje odvod tepla z cívky a zlepšuje zatížitelnost reproduktoru. Oboje jsou ztráty energie. Aby nedocházelo ke kompresi vzduchu pod uzavírací vložkou, bývá vložka odvětraná buď otvorem v magnetickém obvodu nebo otvory v nosiči cívky. [8]

3.1.7 Celkový faktor Q_{ts}

Parametr Q_{ts} zohledňuje oba předchozí parametry. Můžeme ho vypočítat pomocí rovnice:

$$Q_{ts} = \frac{Q_{ms} * Q_{es}}{Q_{ms} + Q_{es}}. \quad (3.1)$$

Q_{ts} tedy vyjadřuje, jak silný pohon reproduktor má v poměru k hmotě, se kterou pohybuje. Mění se s velice nízkou hodnotou Q_{ts} , např. 0,2, bude mít velmi zatlumený kmitací systém a nepovažuje se za vhodný pro užití v bassreflexové ozvučnici. Vhodnými

ozvučnicemi mohou být horna a různé druhy transmission-line (ozvučnice se zvukovodem). Zvyšující se hodnotou Q_{ts} tlumení pohybu membrány klesá. Pro bassreflexovou ozvučnici se doporučuje Q_{ts} v rozmezí 0,3 až 0,4. U uzavřené ozvučnice je vhodné Q_{ts} od 0,4 až do 0,7. Vyšší Q_{ts} vykazují obvykle profesionální reproduktory, ale jak již bylo uvedeno, zde jsou důležité především výkony. [5][8]

3.1.8 Zatížitelnost reproduktorů

Zatížitelnost reproduktorů je potřeba rozlišit na trvalou a špičkovou. Trvalá je závislá na schopnosti reproduktoru rozptýlit vzniklé teplo, protože 90 - 99 % dodaného výkonu se přemění na tepelnou energii. Maximální špičkový výkon je omezen pevností kmitacího systému a jeho maximální možnou výchylkou [8]. Některé definice uvádí zatížitelnost jako maximální dlouhodobý příkon reproduktoru, kdy je zvuk v přípustných tolerancích a reproduktor se nepoškodí.

Příkon reproduktorů udávaný výrobcem má velmi často reklamní charakter a spíše se blíží maximálnímu špičkovému výkonu.

3.1.9 Ekvivalentní objem (V_{as})

Ekvivalentní objem je informativní hodnota, která porovnává objem vzduchu v uzavřené ozvučnici a tuhost mechanického závěsu. Tedy, jaký objem vzduchu v uzavřené ozvučnici by vyvolal stejnou tuhost závěsů, kdyby se reálná tuhost závěsů u reproduktoru blížila nule. [8]

3.2 Měřicí signály

Akustické měření by mělo být provedeno za pomoci jednoho z níže uvedených signálů

3.2.1 Harmonický signál

Sinusový testovací signál nesmí přesáhnout výrobcem udanou voltáž pro sinusové signály na žádné frekvenci. Voltáž by měla být udržována konstantní na všech frekvencích, pokud není zadáno jinak [5]. Vzhledem k rozvoji výpočetní techniky, kterou se zpracovávají naměřené výsledky, se sinusový signál k běžnému měření reproduktorů již prakticky nepoužívá. Standardem se v podstatě stal růžový šum.

3.2.2 Širokopásmový signál

V elektronice můžeme najít popis různých širokopásmových šumů: bílý, růžový, modrý, černý, hnědý, šedý, fialový, oranžový, zelený. V audiotechnice se používá převážně růžový šum, což vyplývá z jeho vlastností.

Růžový šum si je s bílým hodně podobný. Představuje přechod mezi bílým a červeným šumem. V mnoha především zahraničních zdrojích je označován také jako "1/f" šum či kmitající šum. Znamená to, že spektrum signálu je úměrné převrácené hodnotě frekvence ($1/f$). Růžový šum, stejně jako bílý, obsahuje všechny pro lidské ucho

slyšitelné frekvence, tedy od 20 do 20 000 Hz. Signál tím pádem považujeme za širokopásmový.

Zásadní rozdíl však přichází ve spektrální výkonové hustotě jednotlivých šumů. Výkon růžového šumu klesá o 3 dB na oktávu. Znamená to, že růžový šum je na nižších frekvencích hlasitější než na frekvencích vyšších. Nicméně většina lidí tyto rozdíly v růžovém šumu nedokáže vnímat. Je to způsobeno tím, že energie šumu je stejná v pásmech, která jsou stejně široká v logaritmickém měřítku. Jinými slovy i přesto, že výkon šumu s rostoucí frekvencí klesá, růžový šum dosahuje stejného výkonu na jednu oktávu díky tomu, že šířka po sobě jdoucích oktáv se zvyšuje.[10]

3.2.3 Úzkopásmový signál

Pro měření musí být použity konstantní relativní pásmové filtry s generátorem růžového šumu. Šířka pásma filtrů by měla být 1/3 oktávy [5].

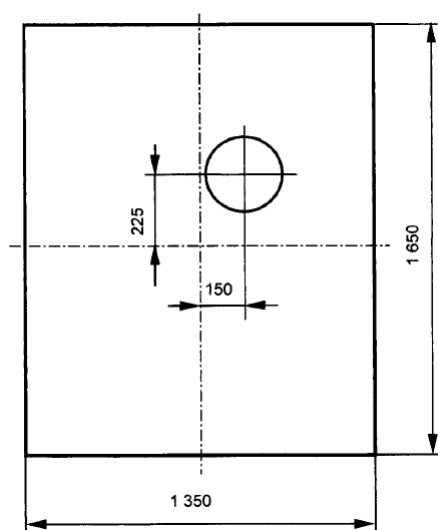
3.2.4 Impulzní signál

Krátkodobý puls s konstantní spektrální energií na jednotku pásma přes alespoň pásmovou šířku, která nás zajímá během měření. Takový signál má nízkou energii ve srovnání s jeho špičkovou amplitudou [5].

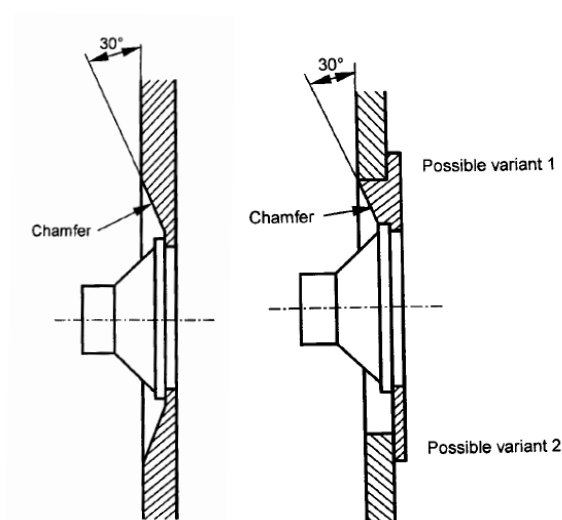
4. TYPY OZVUČNIC POUŽÍVANÝCH PRO AKUSTICKÁ MĚŘENÍ

4.1 Standardní ozvučnice – přepážka

Standardní ozvučnice – přepážka musí být vyrobena z rovné desky, která je akusticky odrazivá a má rozměry dané obrázkem 4-1. Přepážka by měla být vyrobena z materiálu přiměřené tloušťky, aby vibrace byly prakticky nezaznamenané. Hrana reproduktoru by měla vyčnívat nad povrchem desky. Toho může být dosaženo zkosením, nebo sub-ozvučnicí ukázanou na obrázku 4-2. [5]



Obrázek 4-1 Rozměry standardní ozvučnice – přepážky



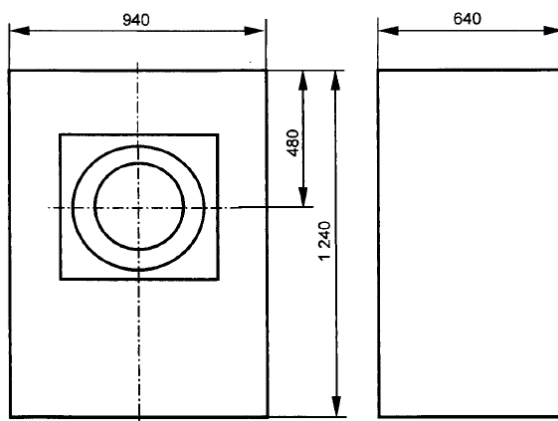
Obrázek 4-2 Normované provedení upevnění reproduktoru

4.2 Standard ozvučnice – skříň

Ozvučnice musí mít rovné, nebo zakřivené povrchy, které mají akusticky odrazivé charakteristiky. Materiál musí být adekvátně tlustý, aby vliv vibrací byl zanedbatelný. Pokud je to nutné, mohou být použity výztuhy mezi protějšími stěnami umístěné do středů stěn, aby se zamezilo jejich vibracím. Ozvučnice by měla být dostatečně těsná. Hrany reproduktoru by neměly vyčnívat z povrchu přední stěny. Aby se zabránilo stojatému vlnění uvnitř skříně, musí být použit adekvátní zvuk-pohlcující materiál na vnitřních stěnách ozvučnice [5].

4.2.1 Skříň typu A

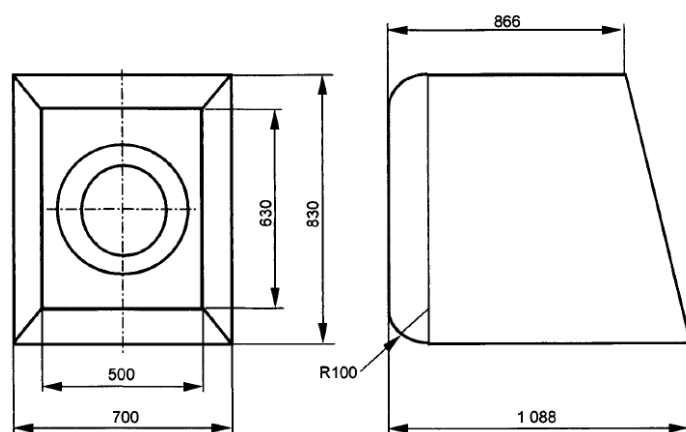
Všechny stěny tohoto typu skříně jsou rovné a spoje těchto stěn musí mít pravé úhly. Normované rozměry musí být dodrženy, aby byly charakteristiky difrakcí opakovatelné. Proto je typ A ideální pro analyzování a detailní porovnávání všech charakteristik reproduktorů [5].



Obrázek 4-3 Rozměry standardní ozvučnice – Skříň typu A

4.2.2 Skříň typu B

Změna rozměrů je dovolena, je doporučeno použít rozměry, které jsou zobrazeny na obrázku 4-4. Pokud je požadována větší, nebo menší skříň typu B, měla by splňovat požadavek proporcionální změny rozměrů dle tabulky v normě. Skříň s přesně upravenými rozměry je určená pro subjektivní testování [5].



Obrázek 4-4 Rozměry standardní ozvučnice – Skříň typu B

5. AKUSTICKÁ MATERIÁLOVÁ STUDIE

Protože neexistuje dokonale tuhý materiál, který by nebylo možné rozkmitat, je nutné respektovat to, že zvukové vlny se budou v použitých zařízeních při měření nějak šířit. Zvukové vlny vždy budou hmotou odráženy a pohlcovány, budou se ve hmotě šířit a pozměněné se budou opět vyzařovat do prostoru. [3]

5.1 Rychlost zvuku v ideálním plynu

Stanovit rychlost zvuku za běžných podmínek je komplikovaný úkol, protože jeho šíření ovlivňuje teplota a vlhkost.

Při teplotě 20 °C je rychlost zvuku v suchém vzduchu 343 m/s, tj. 1235 km/h.

5.2 Šíření zvuku v různých materiálech

Z tabelovaných údajů je patrné, že zvuk se šíří rychleji v materiálech s vyšší hustotou a tvrdostí.

Tabulka 5.1 Rychlost zvuku v různých materiálech

Prostředí	Rychlost zvuku (m/s)	Teplota (°C)
Vzduch	331,8	0
Voda	1500	25
Ocel	5000	20
Led	3250	-4
Sklo	5200	20

5.3 Předpokládané šíření zvuku ve standardní ozvučnici

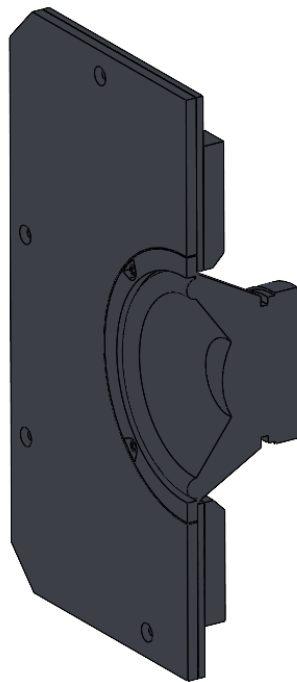
Deska standardní ozvučnice bude vlivem měřicích signálů kmitat v ose reproduktoru a od reproduktoru se budou šířit podélná a příčná vlnění. Přední část desky bude vyvolávat interference a refrakce přednášeného měřicího signálu. Z akustického hlediska je možné považovat za výhodu, že navrhovaná standardní ozvučnice bude vyrobena jako sendvičová konstrukce z materiálů s různou hustotou. Vzhledem k různým hustotám materiálů se vlny uvnitř desky budou šířit různými rychlostmi, což podpoří jejich interference a zánik. Případné rezonance se v desce pravděpodobně vyruší, nebo budou pohlceny měkčím materiálem uvnitř desky. [3]

6. POŽADAVKY NA VLASTNOSTI STANDARDNÍ OZVUČNICE

6.1 Možnost rychlé výměny reproduktoru ve formě ozvučnicové vsadky

Je požadováno, aby ve standardní ozvučnici bylo možné měnit reproduktory dostatečně rychle a jednoduše. Je zapotřebí, aby studenti během jednoho laboratorního měření stihli bezpečně vystřídat a proměřit více reproduktorů.

Snadná výměna reproduktorů bude umožněna pomocí vsadek. Vsadka je vkládací deska, ve které jsou umístěny měřené reproduktory. Vsadka se jednoduchou montáží vloží do standardní ozvučnice. Tyto vsadky budou vyráběny pro konkrétní reproduktory a během (i po) měření tyto reproduktory budou umístěny trvale ve vsadkách. Tím se omezí počet volných dílů a sníží se možnost poškození reproduktoru, která by mohla nastat během výměny.



Obrázek 6-1 Řez vsadkou

6.1.1 Těsnění vsadky

Těsnění je provedeno tkaninou používanou na pokrytí ozvučnic. Toto těsnění pokrývá celou plochu spoje mezi vsadkou a přepážkou a je permanentně nalepeno na přepážku.

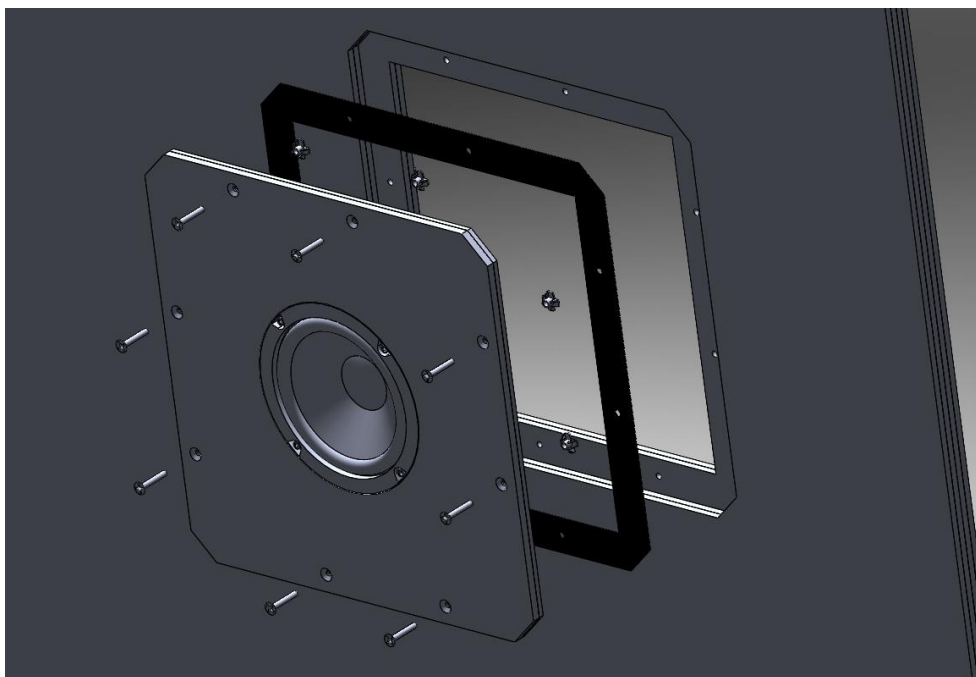
Těsnění vsadky slouží k tomu, aby se rezonance způsobené reproduktorem, nepřenášely do standardní ozvučnice a aby nedocházelo k trvalému poškození měkké topolové překližky. Těsnění se nachází ve spoji, viz obrázek 6-2 zvýrazněno černou barvou.

6.1.2 Provedení šroubení u vsadky

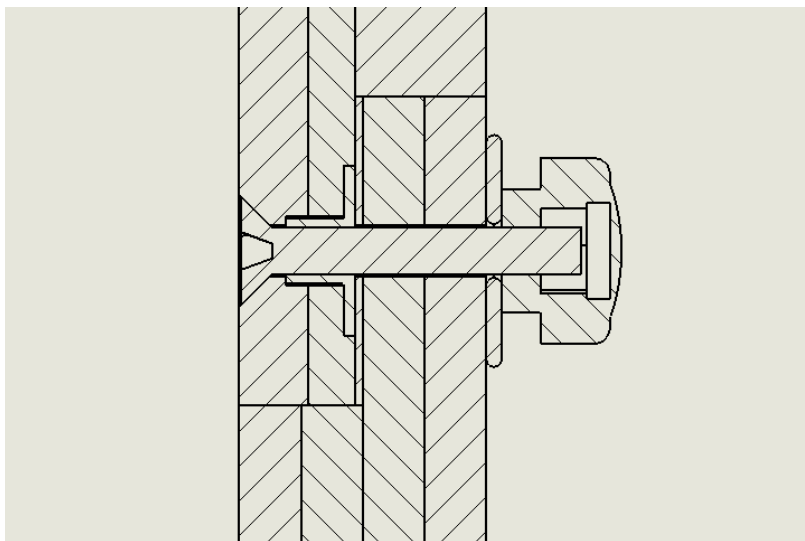
Během výroby standardní ozvučnice se ukázalo, že je nutné, aby zátěž při upínání vsadky byla rovnoměrně rozložena. Upínací šrouby nesmí narušovat rovinu přední strany standardní ozvučnice a musí být dostatečně pevné a v dostatečném množství.

Tento požadavek byl splněn použitím osmi zapuštěných šroubů, které jsou upevněny ve vsadce pomocí nárazecích matic. Šrouby byly dotaženy do nárazecích matic a v této pozici slepeny se vsadkou. Tím se zamezilo jakémukoliv dalšímu pohybu.

V dalším kroku byly ve standardní ozvučnici vyvrtány otvory odpovídající umístění šroubů ve vsadce. Šrouby ze vsadky se vsunou připravenými otvory ve standardní ozvučnici a ze zadní stěny se upevní a utáhnou maticemi zalisovanými do plastové korunky. Plastové matice byly vybrány tak, aby bylo možné utahování vsadek bez jakýchkoliv dalších pomocných nástrojů. Tyto matice jsou upevňovány na trvale umístěných podložkách, které rozkládají sílu při utahnutí a zamezují poškození povrchu standardní ozvučnice.



Obrázek 6-2 Rozložený pohled na upevnění vsadky



Obrázek 6-3 Pohled v řezu na upevnění vsadky - Příloha A -

6.2 Požadavky na přenosnost ozvučnice

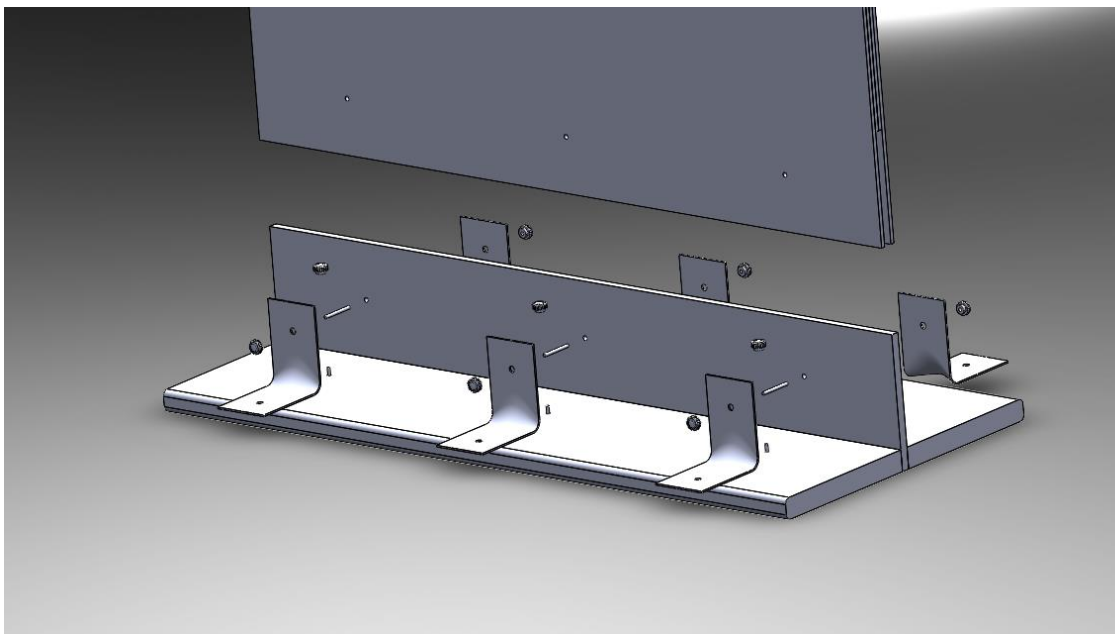
Standardní ozvučnice nebude mít trvalé umístění v mrtvé komoře. Proto bylo potřeba, udělat návrh tak, aby bylo možné standardní ozvučnici přenášet a sestavit pomocí dvou osob, a současně zajistit jednoduchou skladovatelnost.

Proto bylo navrženo, že standardní ozvučnice bude oddělitelná od podstavce, na kterém stojí. Standardní ozvučnice byla vyrobena jako sendvičová konstrukce, která je složena se ze čtyř vrstev, z toho vnitřní byly v dolní části zhotoveny kratší a tím se vytvořil prostor, pomocí kterého je možné ozvučnici usadit systémem pero-drážka do podstavce.

Dostatečná přenosnost přepážky byla zajištěna otvory, které jsou umístěny na zadní ploše standardní ozvučnice. Tyto otvory nebyly navrženy jako průchozí, ale jsou 24 mm hluboké (přes 3 desky-vrstvy), aby nedošlo k akustickému narušení předního povrchu.

6.2.1 Oddělitelnost podstavce

Oddělitelnost podstavce byla uskutečněna posazením drážky v přepážce na pero v podstavci. Protože tento spoj je pravděpodobně nejslabším místem konstrukce, byl posílen třemi páry úhelníků. Tyto páry byly propojeny závitovými tyčemi M6 x 60 a plastovými maticemi, které jsou použity u vsadky. V podstavci byly úhelníky upevněné za pomoci závitových skob. Tyto skoby jsou nehybné, fixované lepidlem, trvale umístěné. Úhelník je oddělitelný, ale díky většímu průměru otvoru v úhelníku je možnost ho posouvat, a tím se eliminuje potřeba úhelník sundávat během rozebírání ozvučnice.



Obrázek 6-4 Rozložený pohled spoje standardní ozvučnice a podstavce

6.2.2 Hmotnost standardní ozvučnice

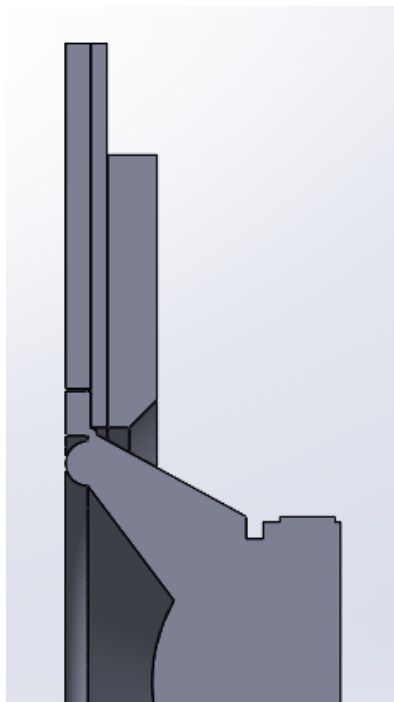
Hmotnost standardní ozvučnice byla navržena tak, že když se ozvučnice a podstava od sebe oddělí, obě části budou snadno přenositelné pomocí dvou osob a neměly by při manipulaci dělat potíže svými rozměry a hmotností. Pro manipulaci nebyly navrženy další úpravy, zejména s ohledem na to, že by případné držáky, nebo úchopy mohly způsobovat interference při měření reproduktorů. Při řešení standardní ozvučnice byl hlavní důraz kladen na to, aby si zachovala potřebné akustické vlastnosti, dostatečnou pevnost a rozumnou hmotnost při zachování plochy, která dosahuje $2,23 \text{ m}^2$.

Jako ideální materiál byla vybrána překližka, která má vhodnou hustotu a pevnost. Bylo nutné zvážit dvě protikladná řešení. Překližka z tvrdého dřeva je příliš těžká a pokud použijeme lehčí materiál, tak vznikne problém, že bude příliš měkký a montáž a manipulace by ho dříve, nebo později, nějak poškodila. Proto byla zvolena sendvičová konstrukce, která kombinuje oba materiály. Přední a zadní deska byly vyrobeny z tvrdší břízové překližky. Vnitřní struktura (která bude méně namáhaná) byla vyrobena ze značně lehčí topolové překližky. Tím se se návrh standardní ozvučnice dostal k relativně zvladatelné hmotnosti zhruba 40 kg.

6.3 Podporované reproduktory

Projekt standardní ozvučnice předpokládá, že bude podporováno 5 různých reproduktorů. Bude potřeba postupně vyrobit 5 vsadek. Vsadky jsou složeny z více vrstev a byly navrženy tak, aby jejich výroba byla co nejjednodušší.

Toho je dosaženo použitím 3 různých vrstev. Přední vrstva má stejnou tloušťku jako hloubka zapuštění vsunutého reproduktoru, prostřední je navržena tak, aby společně s přední měly tloušťku 15 mm (hloubka přední části otvoru pro vsadky s těsněním). Zadní vrstva má tloušťku zbývající hloubky otvoru (17 mm). Tímto rozložením můžeme jednotlivé vrstvy vsadky velice jednoduše vyrobit bez využití složitějších nástrojů, nebo metod. Jednotlivé vrstvy mohou být vyříznuty jako obdélníky, následně vykružovacím vrtákem vyříznuty otvory pro reproduktor a zkosení na zadní vrstvě zafrézováno.



Obrázek 6-5 Detailní pohled na vrstvení vsadky

Podporované reproduktory jsou Monacor SPH 170 a Monacor SPH 210. Pro budoucí reproduktory se předpokládá tloušťka přední vrstvy 5, 7, 10 mm.

7. PROVEDENÁ MĚŘENÍ

Během práce se standardní ozvučnicí byla provedena řada měření, během kterých se zjišťovaly vlastnosti standardní ozvučnice a hledala se její optimální vhodnost pro měření reproduktorů. V této kapitole bylo ze série navržených měření vybráno pět různých způsobů, kterými byla standardní ozvučnice testována.

7.1 Měření modulové kmitočtové charakteristiky reproduktoru za různých podmínek

Vzhledem k podmínkám, které jsou v mrtvé komoře, je potřebné, aby standardní ozvučnice byla samonosná, a proto k ní byla vyrobena podstava, která ji stabilně drží ve svislé poloze. Tato podstava vytváří akusticky odrazivou plochu, a proto může vytvářet interference a ovlivnit měření.

Z tohoto důvodu budou měření prováděna i bez podstavy, a pro porovnání bude jedno měření provedeno s dodatečným tlumením na podstavě. Srovnání těchto charakteristik nám pomůže posoudit možné interference způsobené standardní ozvučnicí a mrtvou komorou.

7.2 Srovnání výsledků měření modulové kmitočtové charakteristiky měřených na standardní ozvučnici umístěnou v mrtvé komoře a laboratoři

Předchozí měření byla navržena tak, aby se ukázalo, které části modulové kmitočtové charakteristiky jsou ovlivňovány podstavou. Není jasné, zda jsou ovlivňovány standardní ozvučnicí, nebo komorou, nebo jinými vlivy. V těchto grafických znázorněních jsou srovnávány kmitočtové charakteristiky standardní ozvučnice v mrtvé komoře, a v akusticky neupravované laboratoři. Bylo provedeno měření pro oba reproduktory. Toto srovnání by nám mělo naznačit, které části kmitočtové charakteristiky reproduktoru jsou ovlivňovány samotnou standardní ozvučnicí, a které místností.

7.3 Srovnání reproduktorů SPH-170 a SPH210 na standardní ozvučnici bez podstavy

V dalším grafickém znázornění srovnáme oba reproduktory ve standardní ozvučnici bez podstavy, což by měla být charakteristika s nejmenším množstvím interferencí. V tomto grafickém znázornění by mělo být možné porovnat modulové kmitočtové charakteristiky reproduktorů, a sledovat interference od přepážky a komory.

7.4 Měření modulové kmitočtové charakteristiky v blízkém poli (near-field)

Na grafických znázorněních z měření near-field je snaha zjistit, zda a jak je modulová kmitočtová charakteristika reproduktoru ovlivněna objemem ozvučnice, ve které je reproduktor měřen. Pro toto měření byly použity uzavřené ozvučnice, ve kterých byly upevněny reproduktory SPH-170 a SPH-210. Tyto ozvučnice byly k dispozici v laboratoři pro srovnání. Rozdíly by se měly projevit hlavně na nízkých kmitočtech.

Dále bude sledován vliv místnosti na měření near-field. Pro tento účel bylo měření near-field provedeno na standardní ozvučnici jak v mrtvé komoře, tak v laboratoři.

7.5 Měření kmitočtové závislosti impedance

Na grafických znázornění bude sledován vliv standardní ozvučnice na impedanční charakteristiku reproduktoru. Také je očekáváno, že se negativně projeví vlastní rezonance standardní ozvučnice, takže je provedeno i měření s utlumenými rezonancemi. Tímto také bude možno zjistit vlastní rezonanční kmitočty ozvučnice.

8. POTŘEBNÉ INFORMACE PRO MĚŘENÍ

8.1 Popis metod měření

8.1.1 Dodatečné tlumení

Dodatečné tlumení je řešeno přidáním lišty pod úhlem 45° pro zakrytí akusticky odrazivé plochy podstavy, která může tvořit interference během měření.

8.1.2 Měření bez podstavy

Odebrání standardní ozvučnice z podstavy a položení na mřížovou podlahu mrtvé komory a snížení měřicího mikrofону o výšku podstavy (38 mm) aby zůstal v ose. Jedna osoba drží ozvučnici kolmo vůči podlaze v mrtvé komoře, a druhá provádí měření.

8.1.3 Měření v laboratoři

Měření je prováděno v laboratorní místnosti, která vede k mrtvé komoře za pomoci programu NTi.



Obrázek 8-1 Fotka laboratoře, ve které byla standardní ozvučnice měřena

8.1.4 Tlumení rezonancí

Během měření kmitočtové závislosti impedance za pomoci funkce sine sweep se poslechově a hmatem vyhledá nejsilněji rezonující místo na standardní ozvučnici a aplikací síly potlačí.



Obrázek 8-2 Pohled na místo, kde byly rezonance tlumeny

8.2 Způsoby měření

8.2.1 Měření modulové kmitočtové charakteristiky reproduktoru ve vzdálenosti 1 metr

Měření probíhá za pomoci mikrofonu umístěného v akustické ose reproduktoru přesně 1 metr od středu uzavírací vložky reproduktoru. Měření je provedeno jak v mrtvé komoře, tak i v laboratoři.

8.2.2 Měření modulové kmitočtové charakteristiky v blízkém poli

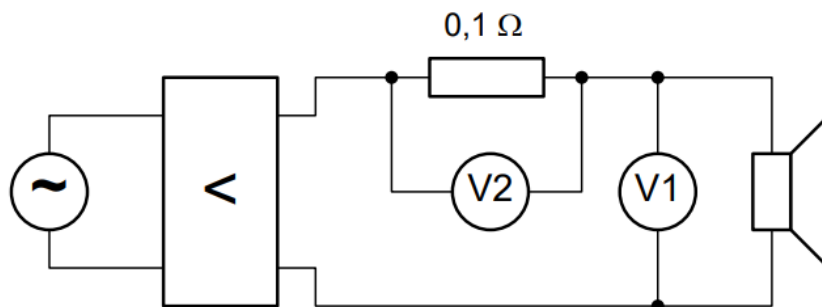
Měření je opět provedeno v akustické ose reproduktoru, ale tentokrát je mikrofon umístěn pár milimetrů od uzavírací vložky reproduktoru. Mikrofon musí být co nejbližší je možné, ale zároveň dostatečně daleko, aby se reproduktor nedotknul mikrofону během nejvyššího rozkmitu, ke kterému dochází během měření.



Obrázek 8-3 Umístění mikrofону pro měření v blízkém poli

8.2.3 Měření kmitočtové závislosti impedance reproduktoru

Měření kmitočtové závislosti impedance bylo prováděno v laboratoři a nevyžaduje mikrofon. Reproductor je zapojen jako zátěž sériově s normálovým odporem o známé rezistenci. Za pomoci dvou voltmetrů je měřeno protékající napětí a proud v závislosti na kmitočtu. Program NTi poté tyto hodnoty přepočítá na hodnoty impedance a fáze pro měřený reproduktor.



Obrázek 8-4 Schéma zapojení reproduktoru pro měření kmitočtové závislosti impedance [12]

8.3 Katalogové parametry měřených reproduktorů

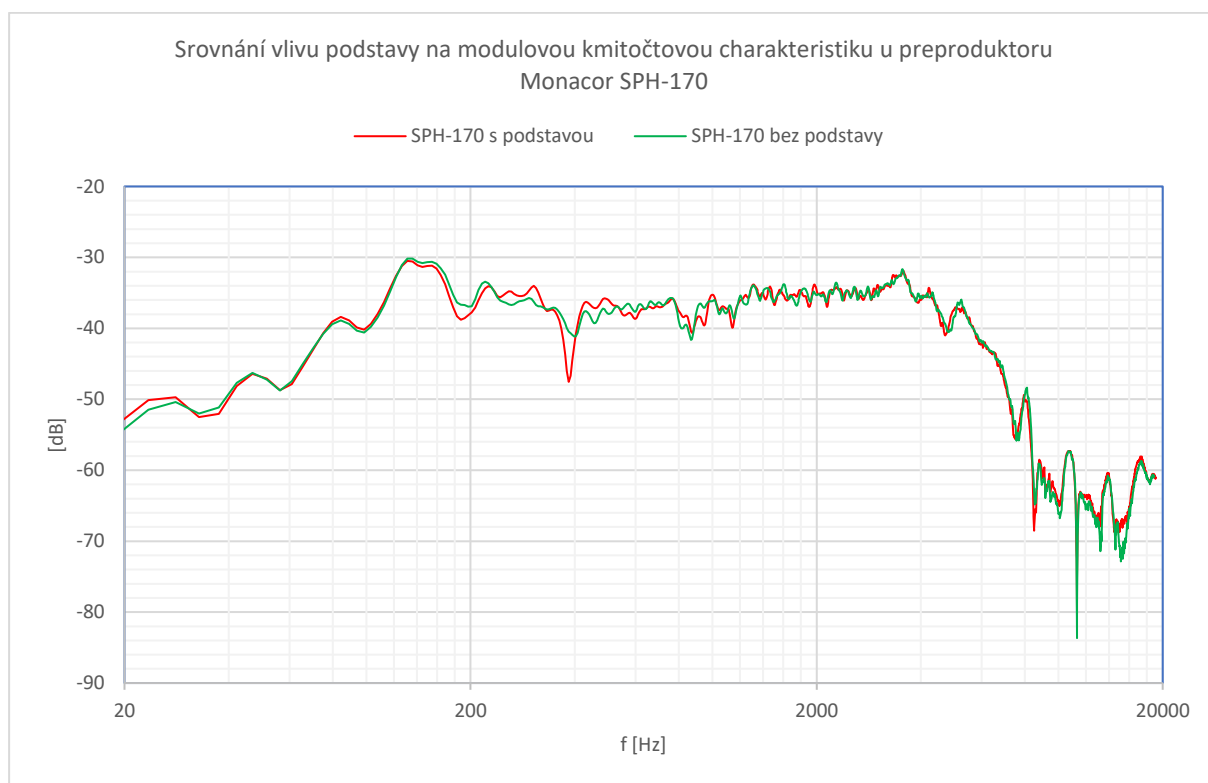
Tabulka 9.1 Katalogové parametry měřených reproduktorů

Reproduktor	SPH 170	SPH 210
Impedance; Z (Ω)	8	8
Rezonanční kmitočet; (Hz)	38	28
Kmitočtový rozsah; (Hz)	38 - 5000	28 - 4000
Mechanický činitel jakosti; Q_{ms}	2,38	2,14
Elektrický činitel jakosti; Q_{es}	0,55	0,27
Celkový činitel; Q_{ts}	0,44	0,24
Ekvivalentní objem; V_{as} (l)	37	81
Stejnoseměrný odpor; R_e (Ω)	6,2	6,5

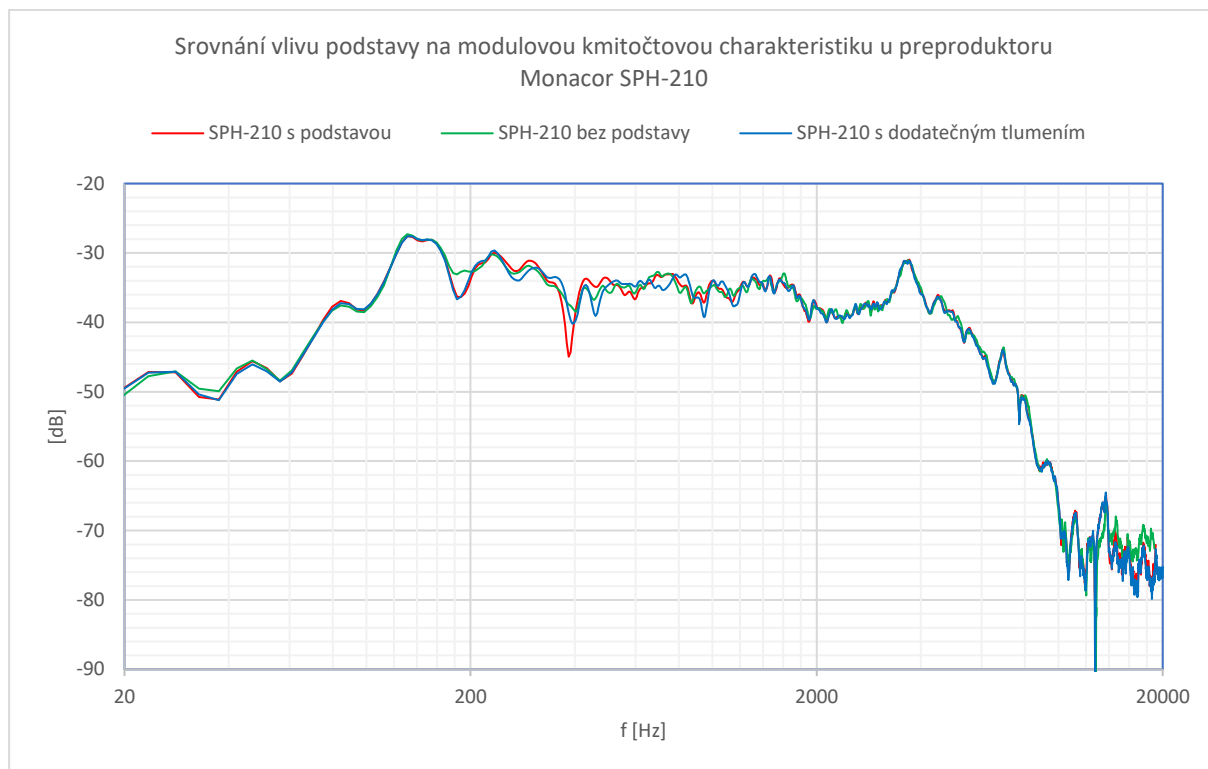
9. VÝSLEDKY MĚŘENÍ

9.1 Měření modulových kmitočtových charakteristik reproduktorů ve vzdálenosti 1 m

9.1.1 Modulová kmitočtová charakteristika reproduktoru za různých podmínek způsobené postavou



Obrázek 9-1 Grafické znázornění modulové kmitočtové charakteristiky reproduktoru Monacor SPH-170 a vlivu podstavy



Obrázek 9-2 Grafické znázornění modulové kmitočtové charakteristiky reproduktoru Monacor SPH-210 a vlivu podstavy

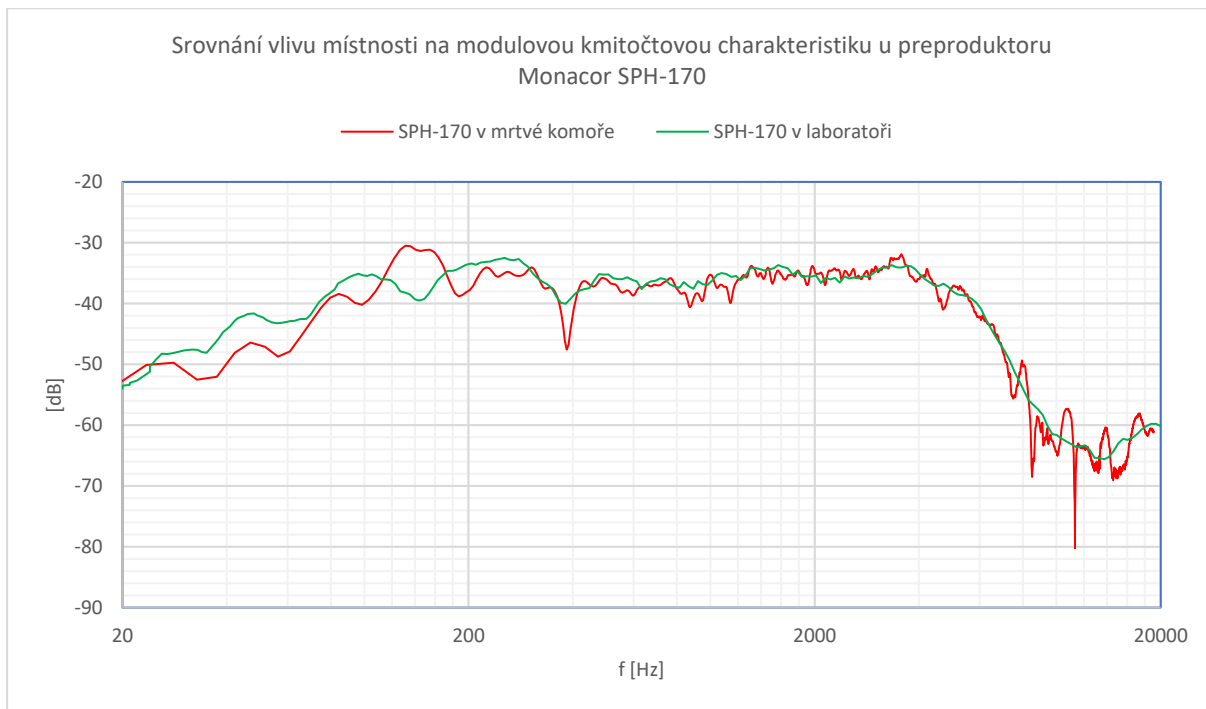
Z grafických znázornění je patrné, že podstava měřitelně ovlivňuje modulovou kmitočtovou charakteristiku mezi kmitočty 160 Hz a 600 Hz. Dále jsou rozdíly mezi kmitočty 20 až 40 Hz, které by mohly být přisouzeny změně polohy reproduktoru v mrtvé komoře o 38mm níže.

Na kmitočtu 387 Hz vidíme nejvýraznější rozdíl. Tento rozdíl je způsoben tím, že vzdálenost středu reproduktoru od podstavy je téměř přesně 1 m, stejně jako vzdálenost mikrofonu. To způsobí, že na tomto kmitočtu je zvuková vlna odražená od podstavy zpožděná o 2,5 periody a u mikrofonu se odečte.

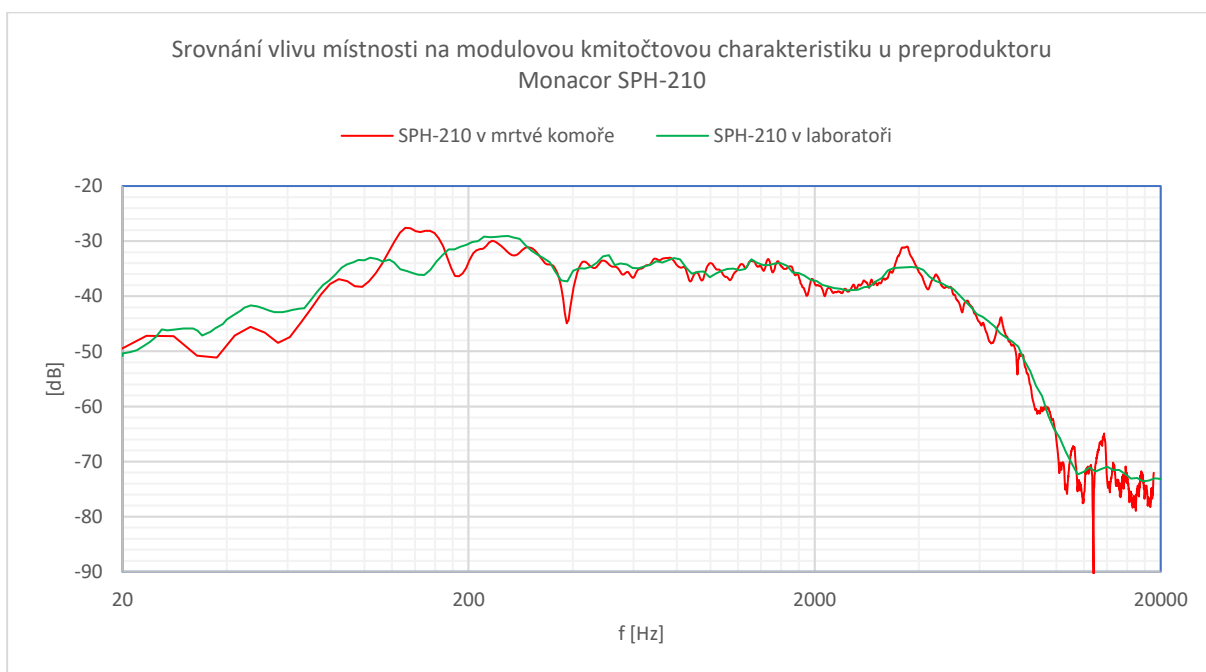
Přidání dodatečného tlumení za pomoci nakloněné lišty nám snížilo zvlnění na 387 Hz, ale zase navýšilo na jiných kmitočtech, jako například 450 Hz. Tato metoda však znehodnocuje měření z hlediska norem, protože omezuje normou dané rozměry standardní ozvučnice.

Přes to, že byla standardní ozvučnice umístěna bez podstavy, tak v grafických znázorněních lze vidět zvlnění pravděpodobně způsobené odrazy od akusticky propustné podlahy. Pro nejvěrnější měření by bylo potřebné zavěsit standardní ozvučnici na podvěsy, alespoň 20 cm nad podlahu mrtvé komory, což během této práce nebylo možné.

9.1.2 Porovnání modulové kmitočtové charakteristiky reproduktoru v mrtvé komoře za pomoci programu APX a v laboratoři za pomoci programu NTi



Obrázek 9-3 Grafické znázornění modulové kmitočtové charakteristiky reproduktoru Monacor SPH-170 a vlivu místnosti

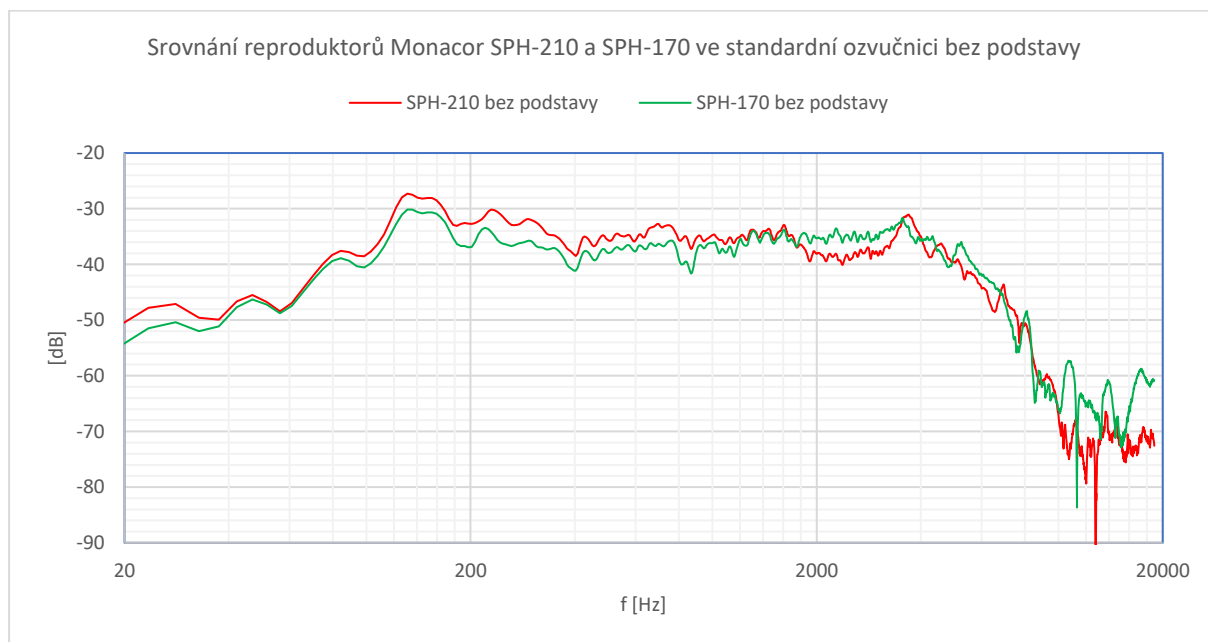


Obrázek 9-4 Grafické znázornění modulové kmitočtové charakteristiky reproduktoru Monacor SPH-210 a vlivu místnosti

Na těchto grafických znázorněních lze pozorovat, že kmitočtová charakteristika je do 200 Hz značně ovlivněna místností a můžeme vidět nejvýraznější rozdíl na kmitočtech 120 až 200 Hz. Propad na 387 Hz, který je velice výrazný v mrtvé komoře, je v laboratoři menší, ale stále konzistentní u obou reproduktorů.

Na vyšších kmitočtech je těžké tato měření porovnávat, protože v laboratoři programem NTi bylo měřeno s mnohem méně body, a s vyhlazováním. Program APX používaný u mrtvé komory vykresluje s 1500 body, a NTi s 220. I tak je zřetelné, že se charakteristiky se na kmitočtech od 400 Hz u obou reproduktorů přibližně shodují.

9.1.3 Porovnání modulové kmitočtové charakteristiky obou reproduktorů v mrtvé komoře na standardní ozvučnici bez podstavy

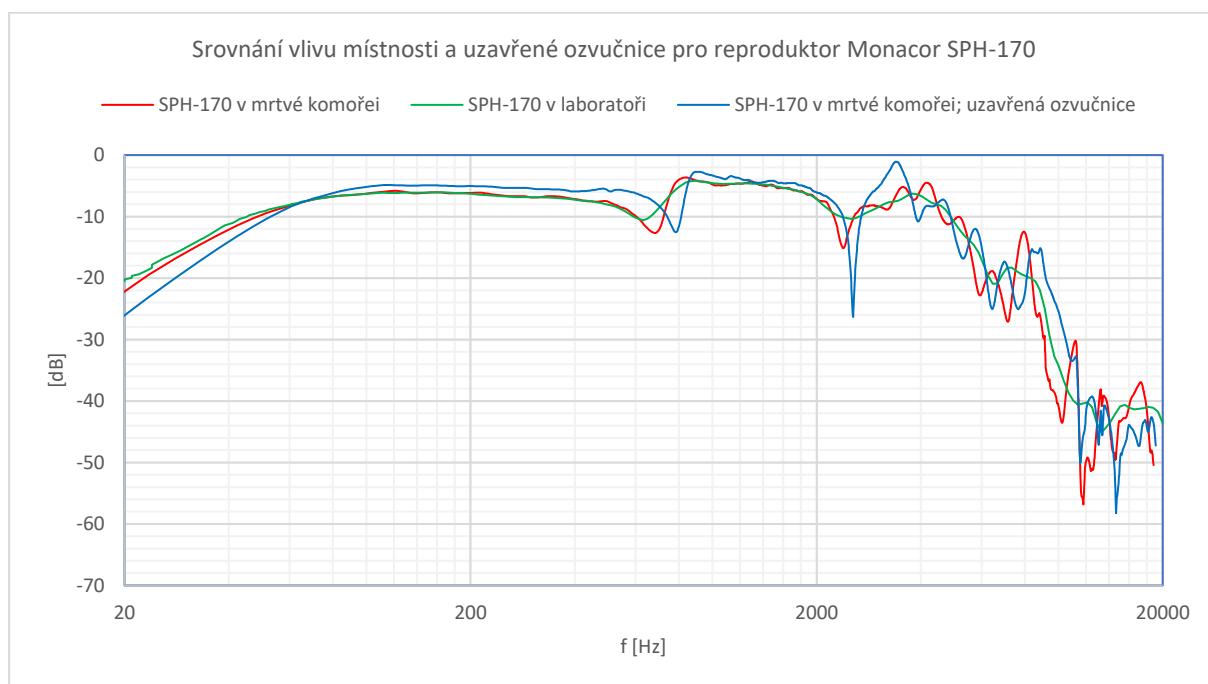


Obrázek 9-5 Grafické znázornění modulové kmitočtové charakteristiky reproduktoru Monacor SPH-170 a SPH-210 bez podstavy

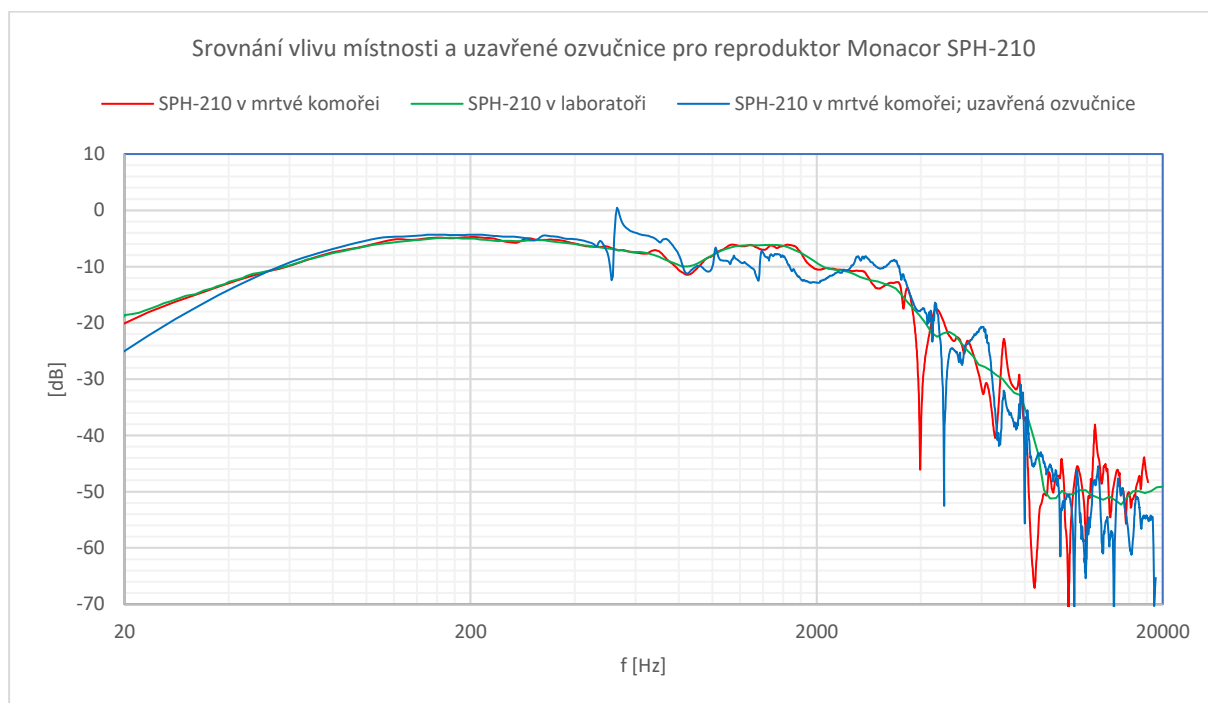
Na tomto grafickém znázornění bylo pozorováno, do jaké míry jsou charakteristiky ovlivňovány standardní ozvučnicí a případně mrtvou komorou. Z předchozích grafických znázornění může vyplynout, že do 200 Hz je kmitočtová charakteristika ovlivňována mrtvou komorou, nebo extrémní podobností modulových kmitočtových charakteristik obou měřených reproduktorů.

Tady však vidíme zvláštní, až příliš velkou podobnost mezi reproduktory až do kmitočtu 1600 Hz.

9.2 Měření modulové kmitočtové charakteristiky reproduktoru v blízkém poli



Obrázek 9-6 Grafické znázornění modulové kmitočtové charakteristiky reproduktoru Monacor SPH-170 v blízkém poli



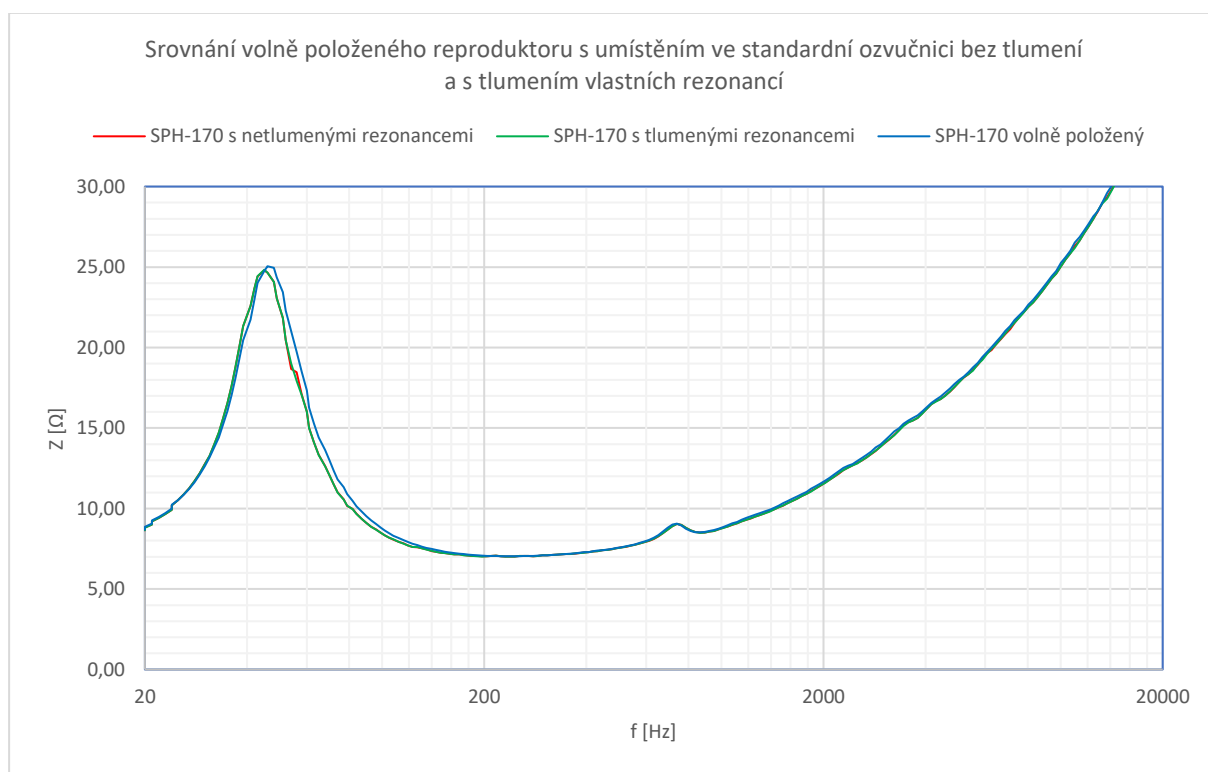
Obrázek 9-7 Grafické znázornění modulové kmitočtové charakteristiky reproduktoru Monacor SPH-210 v blízkém poli

Z grafického znázornění měření near-field je možno posoudit, že místnost má zanedbatelný vliv na modulovou kmitočtovou charakteristiku reproduktoru. Pozorované rozdíly je možné přičíst převážně odlišnostem programů, které byly použity.

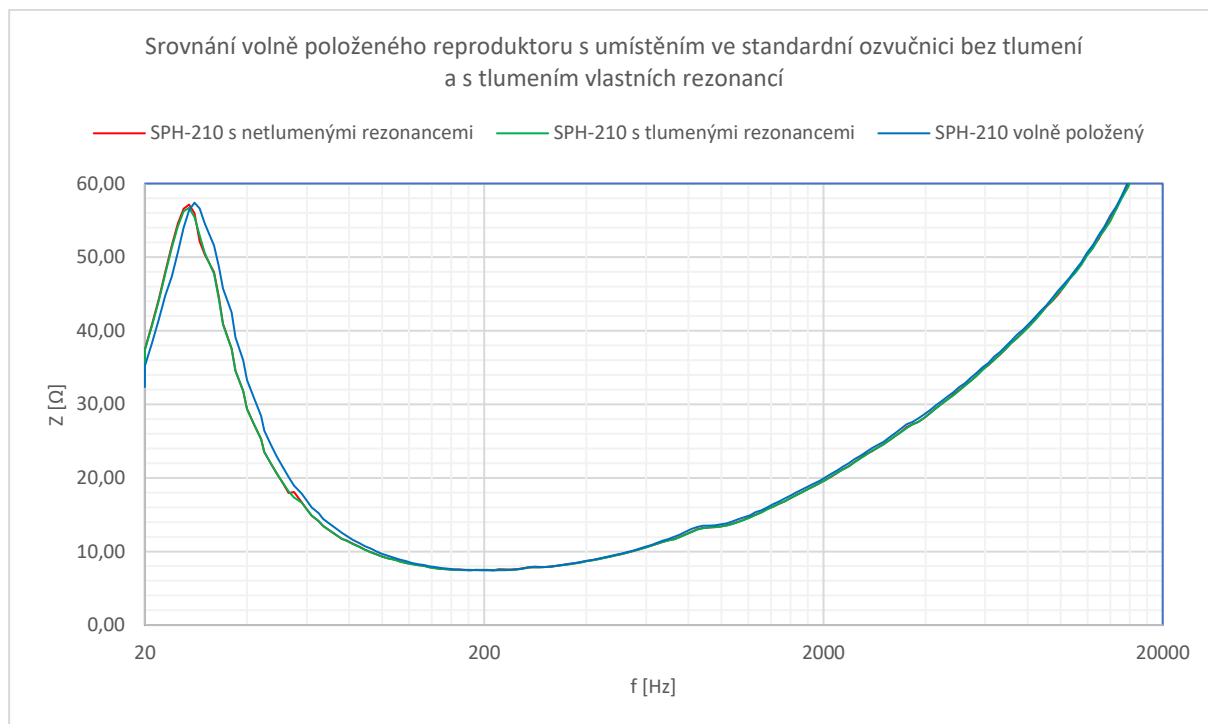
U uzavřené ozvučnice je viditelné, že reproduktor Monacor SPH-170 ztrácí citlivost dříve a nepatrně strměji než u standardní ozvučnice a pod 40 Hz má nižší citlivost než standardní ozvučnice. Mezi kmitočty 60 až 600 Hz má uzavřená ozvučnice o 2 dB vyšší citlivost než standardní ozvučnice.

Uzavřená ozvučnice s reproduktorem Monacor SPH-210 má malý objem a nemá vnitřní zatlumení, což omezuje reproduktor více, než u SPH-170. Proto vidíme výraznější pokles citlivosti pod 40 Hz, prakticky nulové zvýšení citlivosti do 400 Hz a přidává výrazné zvlnění na 500 Hz.

9.3 Měření kmitočtové závislosti impedance reproduktorů



Obrázek 9-8 Grafické znázornění kmitočtové závislosti impedance reproduktoru Monacor SPH-170



Obrázek 9-9 Grafické znázornění kmitočtové závislosti impedance reproduktoru Monacor SPH-210

Z grafických znázornění kmitočtové závislosti impedance reproduktorů můžeme pozorovat, že standardní ozvučnice o jednotky hertzů snižuje rezonanční kmitočet měřených reproduktorů. Důvod, proč má během tohoto měření reproduktor volně položený vyšší rezonanční kmitočet, je pravděpodobně jeho umístění. Byl položen na měkké podložce, na které se během měření přes sine sweep mohl nepatrně pohybovat v ose reproduktoru. Tento pohyb mohl způsobit chybu měření.

Nejvýraznější vlastní rezonance standardní ozvučnice se projevila na kmitočtu 38 Hz u obou reproduktorů. Jiné rezonanční kmitočty se na grafickém znázornění neprojevily.

Na grafickém znázornění se projevilo, že tyto nepatrné rezonance je možné potlačit fyzickým zatlačením (rukou) na rezonující místo, kde se zdály rezonance nejvýraznější.

10. ZÁVĚR

V rámci bakalářské práce byl zpracován doprovodný text a výkresová dokumentace pro stavbu standardní ozvučnice. Pomocí programu SolidWorks (strojírenský 3D CAD software) byla zpracována kompletní dokumentace pro výrobu standardní ozvučnice. V rámci konzultací s vedoucím této práce byly v dokumentaci propracovány všechny potřebné detaily, které zajišťují správné funkce této ozvučnice, včetně možnosti jednoduché manipulace.

Teoretická část práce připravila nástin funkčního a teoretického fungování reproduktorů a obvyklých možností, jak je měřit. Do těchto teoretických požadavků byly zpracovány základní požadavky normy IEC 60268-5[5]42. Dle teorií o funkcích reproduktorů se práce snaží reproduktor vnímat jako nedokonalé zařízení, které při dobré znalosti jeho funkcí dokáže vyvolat pocit dokonalého poslechu.

Na základě teoretických předpokladů a návrhu zpracovaném v programu SolidWorks byla zkonstruována standardní ozvučnice. Na této ozvučnici byla provedena měření, jejichž cílem bylo zjistit, pro jaká měření je standardní ozvučnice vhodná a zjistit případné chyby, které mohou při měření nastat.

V průběhu testovacích měření se zjistilo, že měření pomocí této ozvučnice poskytuje relevantní výsledky. Během měření se standardní ozvučnicí je nutné brát na zřetel, že se pravidelně projevují některé chyby způsobené odrazem akustických vln od podstavy, refrakcí od vnějších hran, případně podlahy mrtvé komory. V současném stavu nejsou výsledky měření plně relevantní, ale pokud by byl použit algoritmus, který by tyto pravidelně se opakující chyby eliminoval, vypovídací hodnota výsledků by byla výrazně lepší.

Experimentální měření, která byla provedena v této práci ukazují, že standardní ozvučnice je použitelná pro měření jak kmitočtové závislosti impedance, tak modulových kmitočtových charakteristik bez potřeby jakékoliv další manipulace s reproduktorem.

LITERATURA

- [1] TOMAN, Kamil. *Reproduktory a reprosoustavy II.* [Česko: s.n.], c2010. ISBN 978-80-254-9510-0.
- [2] LUKEŠ, Jaroslav. *Věrný zvuk: Určeno pro prac. v nízkofrekvenční elektrotechn. a radioamatéry.* Praha: SNTL, 1962. Řada elektrotechnické literatury.
- [3] BINKO, Jaroslav a Ivan KAŠPAR. *Fyzika stavebního inženýra: vysokoškolská učebnice pro stavební fakulty.* Praha: SNTL, 1983.
- [4] HORÁK, Zdeněk a František KRUPKA. *Fyzika: příručka pro vysoké školy technického směru. 2., přeprac. vyd.* Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1976. Řada teoretické literatury.
- [5] IEC 60268-5: Sound system equipment – part 5: Loudspeakers. INTERNATIONAL STANDARD, Third edition 2003-05
- [6] BALÍK, Miroslav. *Reproduktorové soustavy: Reprodukory.* Brno, 2020
- [7] Akustický zkrat https://www.researchgate.net/figure/a-Acoustical-short-circuit-and-b-its-prevention-using-a-baffle-translated_fig10_315775979
- [8] EMINENCE. *Understanding loudspeaker data.* Dostupné také z: <https://www.eminence.com/support/understanding-loudspeaker-data/>
- [9] ENCYKLOPEDIE FYZIKY. *Zatížitelnost reproduktoru.* Dostupné také z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/396-zatizitelnost-reproduktoru>
- [10] KŘIVÁNEK, Tomáš a Petr FRENŠTÁTSKÝ. *Generátor barevných šumů.* 2016.
- [11] Beyma – technický list: <https://www.beyma.com/en/products/c/low-mid-frequency/121QLEX16FE8/altavoz-21qllex1600fe-8-oh/>
- [12] BALÍK, Miroslav. *Měření impedančních charakteristik reproduktorů pro dvoupásmovou reproduktorovou soustavu.* Brno, 2020

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	Vysoké učení technické v Brně
T-S	Thiel-Small
CAD	Computer aided design (počítačem podporované projektování)
PA	public address systém (hromadné ozvučení např. obcí)

Symboly:

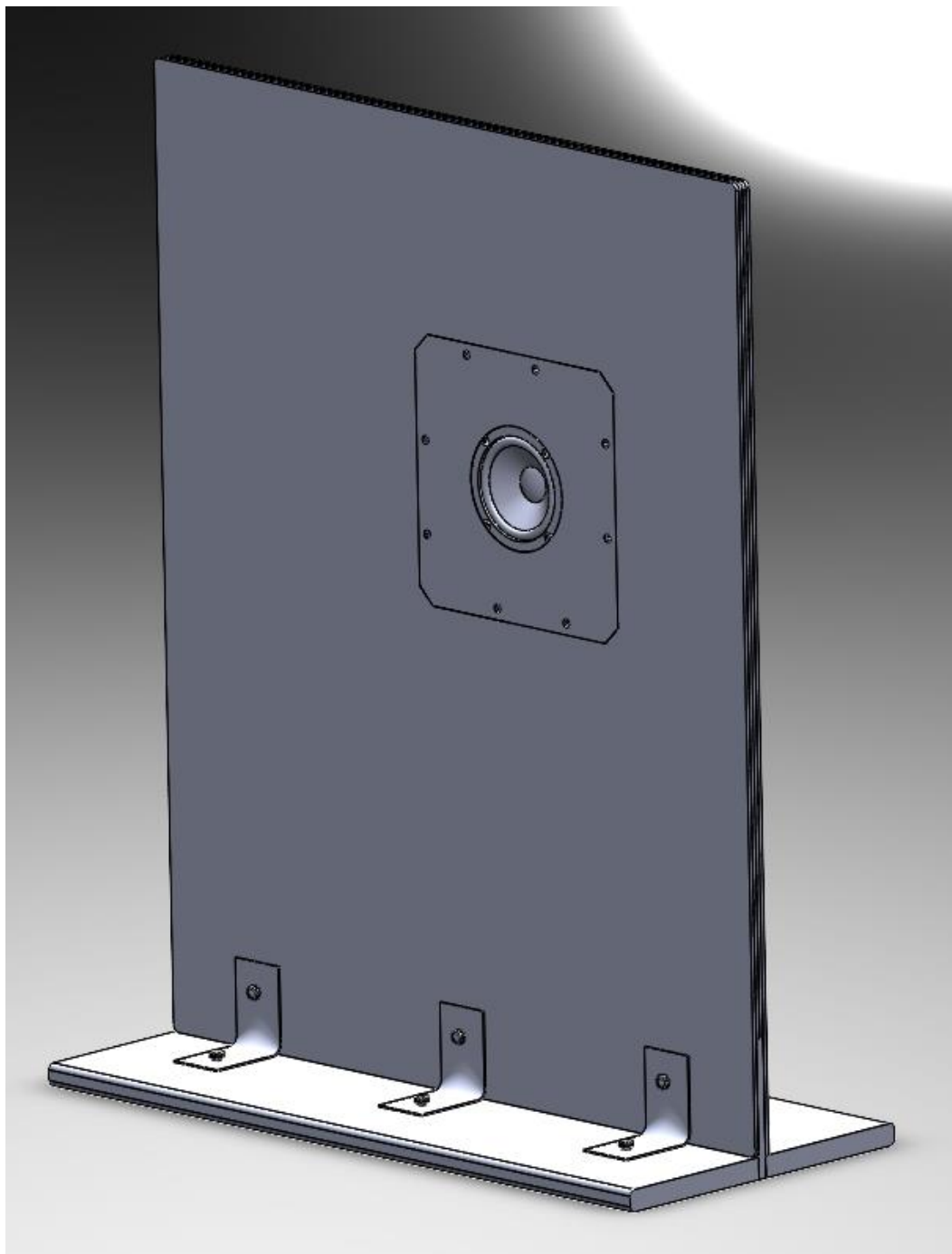
Q_{es}	elektrický činitel jakosti	(-)
Q_{ms}	mechanický činitel jakosti	(-)
Q_{ts}	celkový činitel jakosti	(-)
V_{as}	Ekvivalentní objem	(l)
f	frekvence	(Hz)
c	rychlost zvuku	(m/s)
t	teplota	(°C)

SEZNAM PŘÍLOH

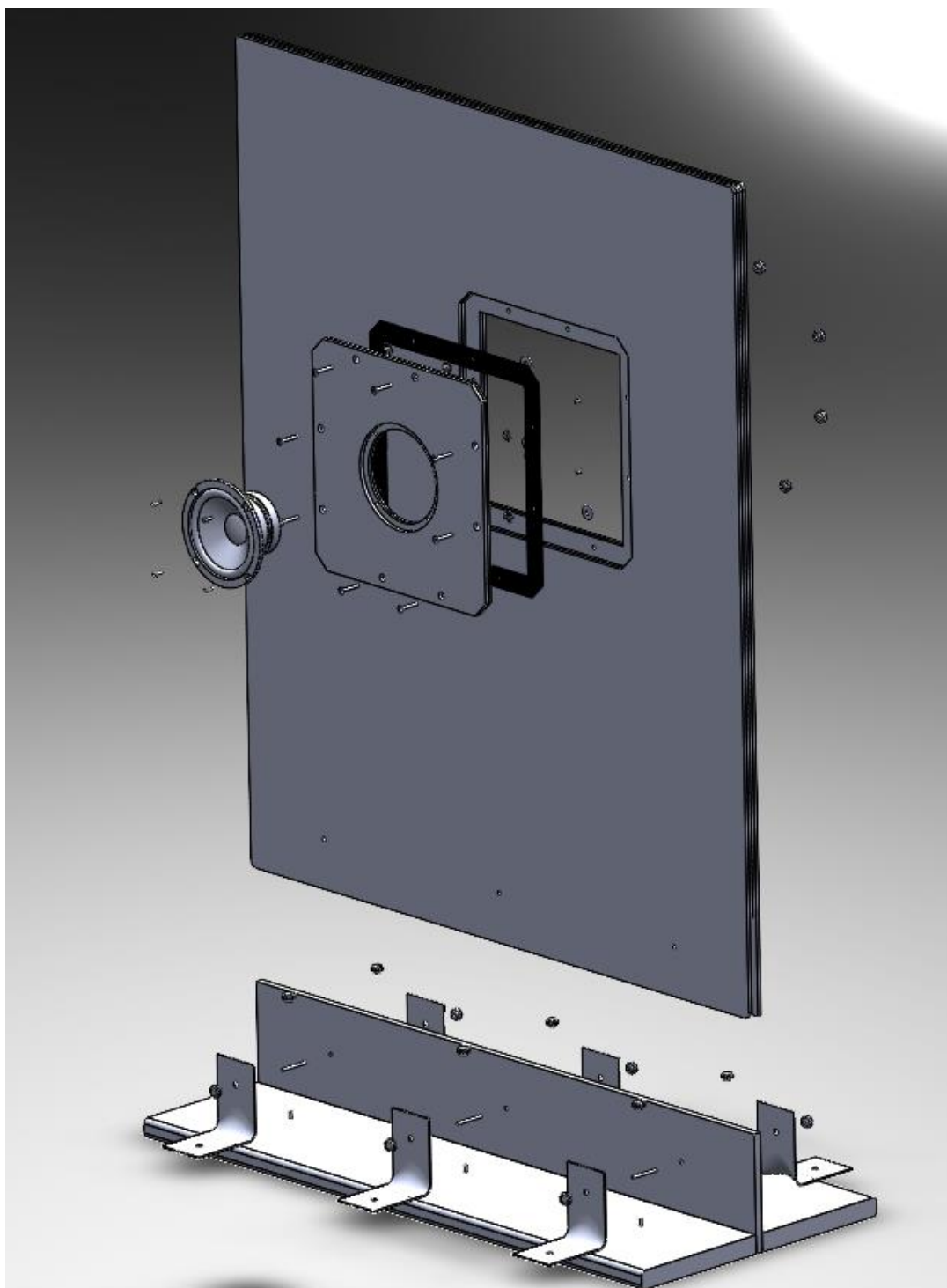
PŘÍLOHA A - POHLED NA 3D SESTAVU	45
PŘÍLOHA B - FOTOGRAFICKÁ DOKUMENTACE.....	47
PŘÍLOHA C - VÝKRESOVÁ DOKUMENTACE	51

Příloha A - Pohled na 3D sestavu

A.1 Sestava ve složeném stavu



A.2 Sestava v rozloženém stavu



Příloha B - Fotografická dokumentace

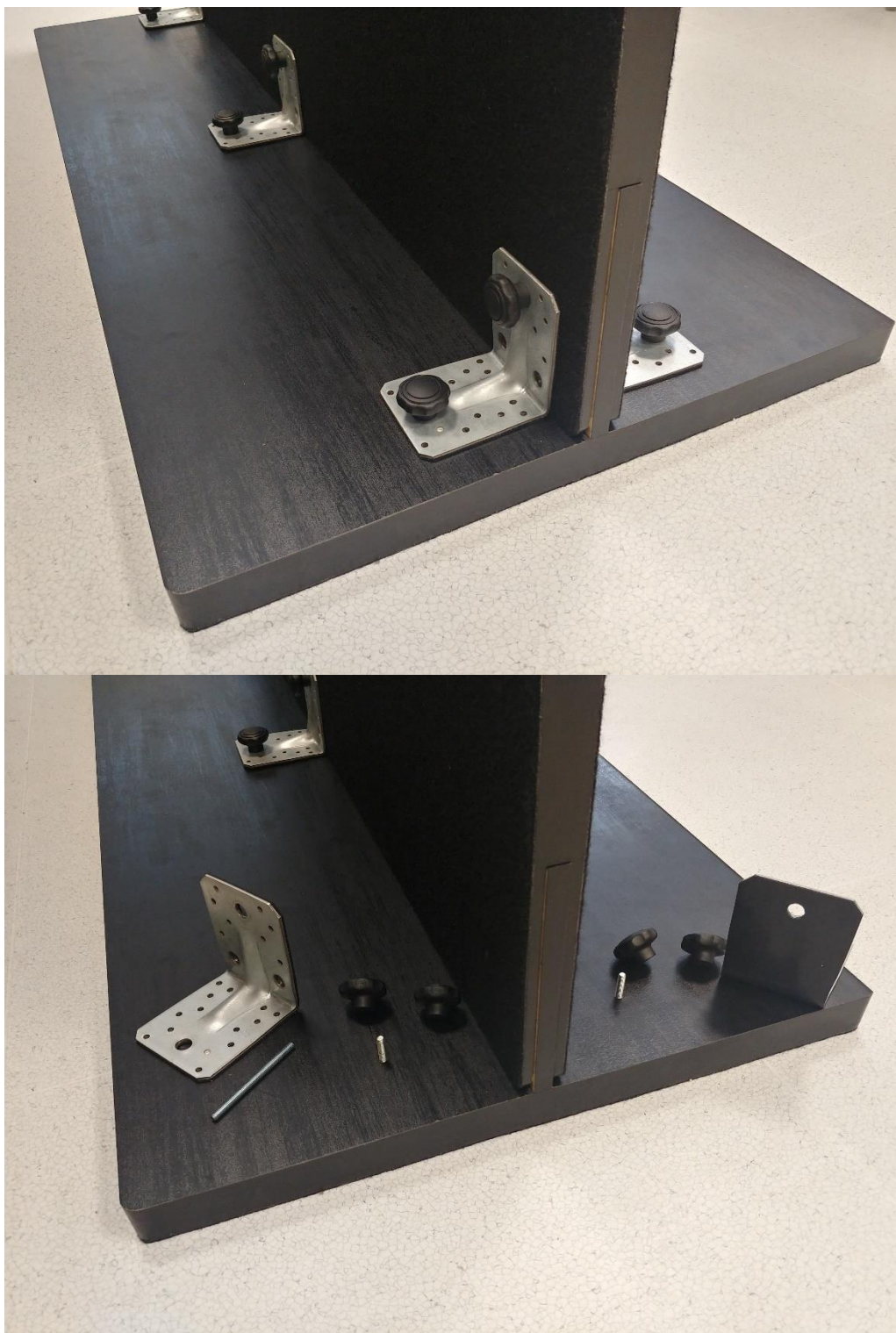
B.1 Standardní ozvučnice



B.2 Vsadka



B.3 Spoj mezi ozvučnicí a podstavou



B.4 Uzavřená ozvučnice pro reproduktor SPH-170



B.5 Uzavřená ozvučnice pro reproduktor SPH-210



Příloha C - Výkresová dokumentace

C.1 Výkres sestavy

C.2 Výkres přední desky

C.3 Výkres přední topolové desky

C.4 Výkres zadní topolové desky

C.5 Výkres zadní desky

C.6 Výkres podsestavy vsadky

C.7 Výkres podsestavy podstavy

Výkresy jsou přiloženy odděleně.