



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

MĚŘENÍ MODULÁRNÍ HLUBOKOTÓNOVÉ JEDNOTKY V BLÍZKÉM POLI

NEAR-FIELD MEASUREMENT OF A MODULAR SUBWOOFER UNIT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Samuel Borodáč

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Miroslav Balík, Ph.D.

BRNO 2022

Bakalářská práce

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

Student: Samuel Borodáč

ID: 213662

Ročník: 3

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Měření modulární hlubokotónové jednotky v blízkém poli

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Nastudujte různé typy ozvučnic pro hlubokotónové jednotky, vliv typu ozvučnice na kmitočtovou charakteristiku hlubokotónové jednotky a jednotlivé způsoby měření kmitočtové charakteristiky hlubokotónových jednotek v jejich užitečném kmitočtovém rozsahu. Seznamte se s modulárním systémem hlubokotónové jednotky, který umožňuje modulárně změnit konstrukci hlubokotónové jednotky od otevřené ozvučnice až po ozvučnici typu pásmová propust. Provedte sadu měření této modulární hlubokotónové jednotky, zaměřte se na metody realizovatelné v bezodrazové komoře, porovnejte dosažené výsledky měření a vyberte vhodnou metodu měření. Pro vybraný typ měření připravte podrobný postup měření pro analyzátor APx nebo Pulse LabShop. Výstupem práce bude laboratorní úloha pro měření hlubokotónových jednotek.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] D. Keele, "Low Frequency Measurement of Loudspeakers by the Near-Field Sound Pressure Sampling Technique," presented at the 45th Convention of the Audio Eng. Soc., May 1973, Preprint 909.

[2] M. Malon, et al., "Comparison of Four Subwoofer Measurement Techniques," J. of Audio Eng. Soc., Volume 55, Issue 12, pp. 1077-1091, December 2007.

Termín zadání: 7.2.2022

Termín odevzdání: 31.5.2022

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

Obsahom práce je opis problematiky vplyvu typu ozvučnice a jednotlivých spôsobov meraní modulárnej hlbokotónovej jednotky na modulovú frekvenčnú charakteristiku pri nízkych frekvenciách. Práca popisuje konfiguráciu meraní a postup v analyzačnom programe APx500, ako aj export a vyhodnotenie nameraných hodnôt. V práci sú ďalej zahrnuté výsledky meraní a pozorovanie javov ovplyvňujúcich meranie modulovej frekvenčnej charakteristiky reproduktora v blízkom poli, ako aj docielenie celkovej výslednej frekvenčnej charakteristiky reproduktora.

Kľúčové slová

reproduktor, reproduktorová sústava, basreflexový nátrubok, ozvučnica, bezodrazová komora, blízke pole, modulová frekvenčná charakteristika, fázová frekvenčná charakteristika, analyzačný program APx500

Abstract

The bachelor thesis describes influence of the type of loudspeaker baffle and methods of measuring the subwoofer unit on the frequency response at low frequencies. The work describes the configuration of measurements and the procedure in the analysis software APx500, as well as the export and evaluation of measured values. Moreover, the thesis also includes the results of measurements, its brief analysis and observation of phenomena affecting the measurement of the modular frequency response of the loudspeaker unit in the near field, as well as achieving the overall resulting frequency response of the loudspeaker unit.

Keywords

loudspeaker, loudspeaker baffle, bassreflex port, anechoic chamber, near field, modular frequency response, phase frequency response, APx500 analysis software

Bibliografická citácia

BORODÁČ, Samuel. *Měření modulární hlubokotónové jednotky v blízkém poli* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-29]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/141295>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Miroslav Balík.

Prehlásenie autora o pôvodnosti diela

Prehlasujem, že svoju záverečnú prácu som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho záverečnej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej záverečnej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto záverečnej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovení § 11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Zb., vrátane možných trestnoprávnych dôsledkov vyplývajúcich z ustanovení časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka č. 40/2009 Zb.

V Brne dňa: 31.5.2022

podpis autora

PodĎakovanie

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce Ing. Miroslavovi Balíkovi, Ph.D. za účinnú metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovaní mojej bakalárskej práce.

V Brne dňa: 31.5.2022

podpis autora

Obsah

ZOZNAM OBRÁZKOV	9
ÚVOD	10
1. OZVUČNICA REPRODUKTORA.....	11
1.1 OZVUČNICA UZAVRETÁ.....	11
1.2 OZVUČNICA TYPU BASREFLEX.....	12
1.3 OZVUČNICA TYPU PÁSMOVÝ PRIEPUST.....	13
1.3.1 Pásmový priepust 4. rádu.....	13
1.3.2 Pásmový priepust 6. rádu – paralelná konfigurácia.....	15
1.3.3 Pásmový priepust 6. rádu - sériová konfigurácia.....	16
2. METÓDY MERANIA FREKVENČNEJ CHARAKTERISTIKY REPRODUKTORA.....	17
2.1 MERANIE V BEZODRAZOVEJ KOMORE.....	17
2.1.1 Vlastnosti bezodrazovej komory.....	17
2.1.2 Vplyv komory na merania frekvenčnej charakteristiky reproduktora.....	17
2.2 MERANIE VO VOĽNOM POLI.....	18
2.2.1 Kvázi-voľné pole.....	18
2.2.2 Teoretické výsledky merania vo voľnom poli.....	18
2.3 MERANIE V REFERENČNEJ KOMORE.....	18
2.3.1 Referenčná komora.....	18
2.3.2 Princíp merania v referenčnej komore.....	19
2.4 MERANIE S VYUŽITÍM ODRAZOVEJ PLOCHY.....	19
2.4.1 Princíp metódy s využitím odrazovej plochy.....	19
2.4.2 Opis priestoru.....	20
2.4.3 Poloha zdroja a mikrofónu.....	20
2.5 MERANIE S POUŽITÍM ČASOVÉHO OKNA.....	21
2.5.1 Základný princíp časového okna.....	21
2.5.2 Poloha mikrofónu a reproduktora.....	21
2.5.3 Výpočet dĺžky časového okna.....	21
2.6 MERANIE V BLÍZKOM POLI.....	22
2.6.1 Definícia blízkeho poľa.....	22
2.6.2 Spojenie meraní v blízkom a vzdialenom poli.....	24
2.6.3 Metódy skladania frekvenčných charakteristík viacerých zdrojov akustického vlnenia.....	26
2.6.4 Využitie blízkeho poľa pri meraní nízkych frekvencií.....	28
3. PRÍSTROJE A ANALYZAČNÝ PROGRAM	29
3.1 ZARIADENIE POUŽITÉ PRI MERANÍ.....	29
3.1.1 Analyzátor APx525.....	29
3.1.2 Prevodník APx1701.....	29
3.1.3 Mikrofónový zosilňovač Nexus 2690-A.....	29
3.1.4 Mikrofónový predzosilňovač Brüel & Kjær type 2669-L.....	30
3.1.5 Mikrofónová kapsula Brüel & Kjær type 4189.....	30
3.2 ANALYZAČNÝ PROGRAM APx500.....	30
3.2.1 Princíp analyzačného programu APx500.....	30
3.2.2 Frequency Response.....	30
3.2.3 Acoustic Response.....	31
3.3 POPIS MODULOV A KONFIGURÁCIÍ MODULÁRNEJ JEDNOTKY OM4.....	31
4. TESTOVACIE MERANIA MODULÁRNEJ JEDNOTKY A Z TOHO VYPLÝVAJÚCE BUDÚCE POSTUPY MERANÍ	33
4.1 MERANIE UZAVRETEJ KONFIGURÁCIE MODULÁRNEJ JEDNOTKY.....	33
4.1.1 Vyhodnotenie výsledkov meraní v blízkom poli.....	34
4.1.2 Porovnanie meraní v blízkom a vzdialenom poli uzavretej ozvučnice.....	34
4.2 MERANIE BASREFLEXOVEJ KONFIGURÁCIE MODULÁRNEJ JEDNOTKY.....	36

4.2.1	<i>Meranie reproduktora a basreflexového nátrubku</i>	36
4.2.2	<i>Meranie komplexných frekvenčných charakteristík basreflexovej ozvučnice v blízkom poli 37</i>	
4.2.3	<i>Komplexný súčet priebehov reproduktora a basreflexového nátrubku</i>	38
5.	MERANIE MODULÁRNEJ HLBOKOTÓNOVEJ JEDNOTKY OM4	40
5.1	JAVY OVPLYVNÚJÚCE MERANIE FREKVENČNÝCH CHARAKTERISTÍK HLBOKOTÓNOVEJ JEDNOTKY 40	
5.1.1	<i>Vplyv hodnoty budiaceho príkonu na modulovú frekvenčnú charakteristiku OM4</i>	40
5.1.2	<i>Vplyv tlmenia vnútri ozvučnice na modulovú frekvenčnú charakteristiku OM4</i>	42
5.1.3	<i>Porovnanie meraní v blízkom a vzdialenom poli</i>	45
5.1.4	<i>Súčet komplexných frekvenčných charakteristík reproduktora a nátrubku.....</i>	48
5.2	POROVNANIE JEDNOTLIVÝCH KONFIGURÁCIÍ MODULÁRNEJ HLBOKOTÓNOVEJ JEDNOTKY OM4 V BLÍZKOM POLI.....	50
5.2.1	<i>Vplyv zmeny objemu a zapojenia reproduktorov v uzavretej ozvučnici</i>	50
5.2.2	<i>Porovnanie meraných frekvenčných charakteristík basreflexovej ozvučnice s jednoduchým a izobarickým zapojením reproduktorov</i>	51
5.2.3	<i>Porovnanie modulových frekvenčných charakteristík ozvučnice typu pásmový priepust 6. rádu s jednoduchým a izobarickým zapojením reproduktorov.....</i>	53
6.	TVORBA LABORATÓRNEJ ÚLOHY	54
6.1	POŽIADAVKY LABORATÓRNEJ ÚLOHY	54
6.2	SPÍSANIE TEXTU LABORATÓRNEJ ÚLOHY A VYTVORENIE VÝSTUPNÉHO PROTOKOLU	54
7.	ZÁVER.....	55
	LITERATURA.....	57
	ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK	59
	ZOZNAM PRÍLOH.....	61

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 1.1 Uzavretá ozvučnica.....	11
Obr. 1.2 Basreflexová ozvučnica	12
Obr. 1.3 Ozvučnica typu pásmový priepust 4. rádu	14
Obr. 1.4 Ozvučnica typu pásmový priepust 6. rádu - paralelná konfigurácia	15
Obr. 1.5 Ozvučnica typu pásmový priepust 6. rádu - sériová konfigurácia	16
Obr. 2.1 Poloha mikrofónu a reproduktora pri meraní s využitím odrazovej plochy.....	19
Obr. 2.2 Poloha mikrofónu pri meraní reproduktora a basreflexového nátrubku v blízkom poli	23
Obr. 4.1 Modulová frekvenčná charakteristika reproduktora v uzavretej ozvučnici meraná v blízkom poli reproduktorovej sústavy	34
Obr. 4.2 Modulová frekvenčná charakteristika reproduktora v uzavretej ozvučnici v blízkom a vzdialenom poli.....	35
Obr. 4.3 Modulová frekvenčná charakteristika reproduktora v basreflexovej ozvučnici meraná v 8 mm a 20 cm.....	36
Obr. 4.4 Modulová frekvenčná charakteristika nátrubku basreflexovej ozvučnice v rôznych polohách mikrofónu	37
Obr. 4.5 Modulová frekvenčná charakteristika reproduktora a basreflexového nátrubku v blízkom poli ..	38
Obr. 4.6 Fázová frekvenčná charakteristika reproduktora a basreflexového nátrubku v blízkom poli	38
Obr. 4.7 Celková frekvenčná charakteristika basreflexovej ozvučnice v blízkom poli	39
Obr. 5.1 Vplyv nastavenia budiaceho príkonu na mod. frek. char. C3 v blízkom poli	41
Obr. 5.2 Vplyv nastavenia budiaceho príkonu na mod. frek. char. C8 v blízkom poli	41
Obr. 5.3 Vplyv použitia tlmiaceho materiálu vnútri konfigurácie C3 v blízkom poli	43
Obr. 5.4 Vplyv použitia tlmenia vnútri zadnej komory konfigurácie C8 v blízkom poli	44
Obr. 5.5 Vplyv použitia tlmenia vnútri prednej komory konfigurácie C8 v blízkom poli	44
Obr. 5.6 Vplyv použitia tlmenia vnútri oboch komôr konfigurácie C8 v blízkom poli	45
Obr. 5.7 Porovnanie modulej frekvenčnej charakteristiky konfigurácie C3 meranej v blízkom poli a vo vzdialenosti 25 cm.....	46
Obr. 5.8 Porovnanie modulej frekvenčnej charakteristiky konfigurácie C8 meranej v blízkom poli a vo vzdialenosti 25 cm.....	47
Obr. 5.9 Porovnanie celkového priebehu konfigurácie C5 a reálneho akustického merania v geometrickom strede ozvučnice vo vzdialenosti 25 cm po korekcii baffle step.....	48
Obr. 5.10 Porovnanie celkového priebehu konfigurácie C6 a reálneho akustického merania v geometrickom strede ozvučnice vo vzdialenosti 25 cm po korekcii baffle step.....	49
Obr. 5.11 Porovnanie meraní konfigurácií uzavretej ozvučnice v blízkom poli	50
Obr. 5.12 Porovnanie meraní reproduktora v konfigurácii C5 a C6 basreflexovej ozvučnice v blízkom poli	51
Obr. 5.13 Porovnanie meraní nátrubku v konfigurácii C5 a C6 basreflexovej ozvučnice v blízkom poli ..	52
Obr. 5.14 Porovnanie komplexného súčtu priebehov konfigurácií C5 a C6 basreflexovej ozvučnice v geometrickom strede vo vzdialenosti 25 cm	52
Obr. 5.15 Porovnanie modulových frekvenčných charakteristík konfigurácií ozvučnice typu pásmový priepust 6. rádu v blízkom poli.....	53

ÚVOD

Meranie frekvenčných charakteristík reproduktora osadeného v reálnej ozvučnici je značne komplikované vzhľadom ku konkrétnemu typu zvolenej ozvučnice, ako aj požiadavkami a obmedzeniami konkrétnej zvolenej metódy merania. Typ a jednotlivé parametre ozvučnice majú za následok zmenu v meraných frekvenčných charakteristikách reproduktora vzhľadom na konštrukčné riešenie ozvučnice a použitý typ reproduktora.

V rámci zvolenej metódy merania frekvenčných charakteristík reproduktora v ozvučnici sú výsledky ovplyvnené základnými predpokladmi zvolenej metódy a použitého zdroja akustického vlnenia. V prípade hlbokotónových jednotiek je voľba správnej metódy daná hlavne efektívnym frekvenčným rozsahom zdroja a teda samotným frekvenčným rozsahom merania. Pre zisk korektného vyobrazenia frekvenčných charakteristík hlbokotónových jednotiek využívajúcich viac primárnych zdrojov akustického vlnenia, napríklad reproduktor a basreflexový nátrubok, je potrebné vykonanie spojenia týchto priebehov, výsledkom je potom celková frekvenčná charakteristika reprosústavy ako celku.

V rámci uzavretých komôr ozvučníc je pozorovaný vznik parazitných javov vnútri ozvučnice, ktoré vplývajú na merané frekvenčné charakteristiky reproduktora/nátrubku. Tie sú podmienené vlastnosťami komôr ozvučníc, ako sú jej fyzické rozmery a zvolený materiál konštrukcie ozvučnice. Cieľom meraní je pozorovanie vplyvu rôznej hodnoty budiaceho príkonu reproduktora v ozvučnici a použitia tlmenia vnútri ozvučnice na výsledné frekvenčné charakteristiky reprosústavy.

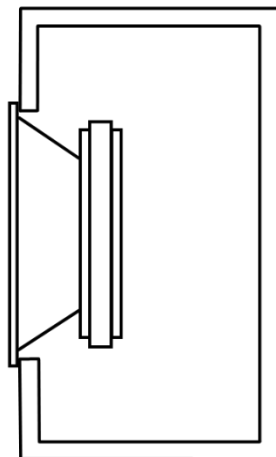
Konštrukčné riešenie modulárnej hlbokotónovej jednotky, používanej v tejto práci, umožňuje variabilné zmeny parametrov či typov ozvučníc s použitím reproduktora Monacor SPH-210 v jednoduchom a izobarickom zapojení. Cieľom práce je pozorovanie príspevkov jednotlivých konfigurácií ozvučnice hlbokotónovej jednotky na reprodukovanie akustický signál primárnych zdrojov, vplyv zvolenej metódy na meranie daných konfigurácií a následná problematika vyobrazenia celkovej frekvenčnej charakteristiky reprosústavy ako celku.

1. OZVUČNICA REPRODUKTORA

Typ ozvučnice má zásadný vplyv na reprodukované frekvenčné spektrum reproduktorovej sústavy. Základnou úlohou je zamedzenie tzv. akustického skratu, kedy reproduktorom vyžiarená akustická vlna zo zadnej polroviny reproduktora o istej frekvencii, najmä v nízkofrekvenčnom pásme, sa v mieste poslucháča fázovo odčíta od priamo vyžiarenej akustickej vlny a vlnenie sa vzájomne vyruší. Priamo vyžarujúci reproduktor umiestnený v ozvučnici nadobudne charakteristický pokles citlivosti na nízkych frekvenciách o 6 dB, čo je spôsobené difrakciami zvukového vlnenia od ozvučnice samotnej [1].

1.1 Ozvučnica uzavretá

Uzavretá ozvučnica predstavuje dokonale utesnenú skriňu istého objemu, v ktorej sa akustické vlnenie vychádzajúce zo zadnej polroviny reproduktora mení na tepelnú energiu, čo má za následok zníženie účinnosti reproduktora [1].



Obr. 1.1 Uzavretá ozvučnica

Vzduchový priestor v uzavretej ozvučnici vplýva na pohyb membrány, čím sa zvýši rezonančná frekvencia reproduktorovej sústavy f_c . Pre f_c platí

$$f_c = \sqrt{\frac{V_{as}}{V_b} + 1} * f_r \quad (1.1)$$

kde V_{as} je ekvivalentný objem reproduktora, V_b je objem ozvučnice a f_r je rezonančná frekvencia reproduktora. Z rovnice je možné vidieť, že s klesajúcim objemom ozvučnice narastá rezonančná frekvencia sústavy.

Uzavretá ozvučnica má podobný vplyv aj na celkový činiteľ akosti obvodu reproduktora Q_{ts} , ktorý narastá s klesajúcim objemom ozvučnice. Vzťah popisuje rovnica

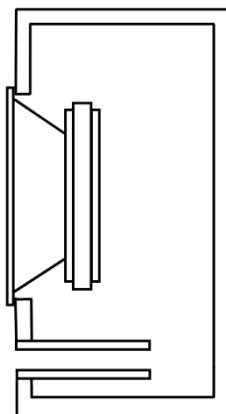
$$\frac{Q_c}{Q_{ts}} = \sqrt{\frac{V_{as}}{V_b} + 1} \quad (1.2)$$

kde Q_c je celkový činiteľ akosti reproduktora po umiestnení v ozvučnici. Z tohoto vzťahu vyplýva, že ozvučnica má za následok nárast amplitúdy signálu v okolí dolnej medznej frekvencie reproduktorovej sústavy. Impedančná charakteristika naberá na strmosti v okolí rezonančnej frekvencie vplyvom zmenených faktorov. Zakomponovaním reproduktora do ozvučnice uzavretej má za následok aj zmenšenie maximálnej výchylky reproduktora vplyvom zmeny impedancie na určitej frekvencii, vďaka čomu možno reproduktor v danom pásme viac mechanicky namáhať.

Charakteristická citlivosť reproduktora je zväčša udávaná pre reproduktor umiestnený v nekonečnej rovinnej doske, teda je docielené oddelenie prednej a zadnej vyžiarenej akustickej vlny reproduktorom. Ozvučnica polpriestor nevytvára a teda sa akustické vlnenie šíri do celého priestoru v okolí ozvučnice. Pre uzavretú ozvučnicu je teoretická dolná strmosť zmeny frekvenčnej charakteristiky reproduktorovej sústavy 12 dB/oktávu. Z tohoto priebehu môžeme uvažovať uzavretú ozvučnicu ako filter typu horný priepust 2. rádu [1].

1.2 Ozvučnica typu basreflex

Ak na niektorú zo stien uzavretej ozvučnice bude nainštalovaný basreflexový nátrubok, poprípade jednoduchý otvor kruhového alebo obdĺžnikového tvaru, ozvučnica sa nazýva basreflexová, v angličtine tiež vented či ported (viď. Obr. 1.2).



Obr. 1.2 Basreflexová ozvučnica

Kmitajúci vzduch v nátrubku sa fázovo otočí voči vlne vyžiarenej zadnou polrovinou reproduktora takmer o 180°, čím vyžiarená akustická vlna smerujúca z nátrubku je vo fázy s vlnou vyžiarenou reproduktorom a podporuje ju. Akustická energia vyžiarená z nátrubku potom spôsobí, že výchylka membrány reproduktora je menšia, čo znižuje nelineárne skreslenie reproduktora [1].

Vhodnosť vybraného reproduktora pre basreflexovú konfiguráciu ozvučnice popisuje činiteľ EBP (z ang. Efficiency Bandwidth Product), pre ktorý platí [1]

$$EBP = \frac{f_r}{Q_{es}} \quad (1.3)$$

kde f_r je rezonančná frekvencia a Q_{es} je elektrický činiteľ akosti reproduktora. Jedná sa o čisto informatívnu hodnotu. Ak pre túto teoretickú hodnotu platí, že je menšia než 50, daný reproduktor sa nehodí do použitia v basreflexovej ozvučnici, v opačnom prípade je reproduktor vhodný pre použitie v tejto konfigurácii.

Rezonančná frekvencia basreflexovej ozvučnice f_b , pre ktorú platí $f_b < f_c$, je daná vzťahom [1]

$$f_b = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{V_b(l_p + 0,96\sqrt{S})}} \quad (1.4)$$

kde c_0 je rýchlosť zvuku, S je prierez a l_p je dĺžka nátrubku a V_b je objem ozvučnice. Konštanta 0,96 sa používa v prípade, že dĺžka nátrubku je značne väčšia než jeho prierez, v opačnom prípade sa používa hodnota konštanty 0,91.

Z rovnice (1.4) je známe, že so znižujúcim sa prierezom a zvyšujúcou sa dĺžkou nátrubku sa rezonančná frekvencia f_b posúva do nižších frekvencií. Nastavením rezonančných frekvencií ozvučnice a nátrubku na rovnakú hodnotu docielime zjednotenie fázy kmitov membrány reproduktora a vzduchu v nátrubku na danej frekvencii, čo tlmí pohyb membrány, teda zvukové vlnenie v tejto frekvencii pomyselne vychádza iba z nátrubku.

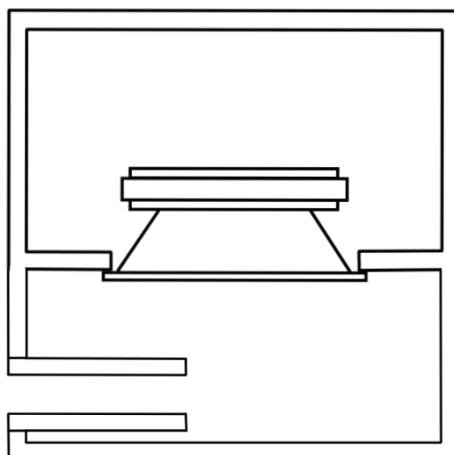
Frekvenčná charakteristika reproduktora umiestneného v basreflexovej ozvučnici nadobudne charakteristický pokles citlivosti na nízkych frekvenciách, dolná strmosť frekvenčnej charakteristiky reproduktorovej sústavy nadobúda hodnoty 24 dB/oktávu, basreflexová ozvučnica sa teda správa ako filter typu horný priepust 4. rádu. Nad rezonančnou frekvenciou ozvučnice výchylka membrány reproduktora klesá rýchlejšie. To znamená nižšie skreslenie výsledného vyžiareného akustického vlnenia. Naopak pod rezonančnou frekvenciou má výchylka membrány veľký nárast, čo predstavuje väčšie skreslenie a mechanické nebezpečenstvo pre reproduktor [1].

1.3 Ozvučnica typu pásmový priepust

Ozvučnicu typu pásmový priepust, v angličtine označovanú ako bandpass, tvorí viackomorové usporiadanie reproduktorovej sústavy. Reproduktor je umiestnený na priečku medzi komorami, teda nevyžaruje priamo, dochádza k filtrácii zvukového signálu filtrom typu pásmový priepust. Výchylka membrány pod rezonančnou frekvenciou sa nezväčšuje, horná a dolná strmosť frekvenčnej charakteristiky je daná parametrami ozvučnice. Konštrukciou komôr a basreflexových nátrubkov je možné docieľiť filtre rôznych rádov, najpoužívanejšie sú ozvučnice typu pásmový priepust 4. a 6. rádu [1].

1.3.1 Pásmový priepust 4. rádu

Ozvučnica zložená z dvoch komôr, kedy reproduktor vyžaruje do prednej komory opatrenej basreflexovým nátrubkom sa označuje ako ozvučnica typu pásmový priepust 4. rádu.



Obr. 1.3 Ozvučnica typu pásmový priepust 4. rádu

Výber správneho reproduktora je v závislosti na rovnici (1.3) podobný, ako v prípade basreflexovej ozvučnice. Ak je hodnota EBP vyššia než 50, reproduktor je vhodný pre použitie v tejto ozvučnici.

Predná komora opatrená basreflexovým nátrubkom funguje ako akustický dolnopriepustný filter, teda vyššie frekvencie sú filtrované v závislosti na objeme komory. Zadná uzavretá komora udáva chovanie priebehu na spodnom okraji frekvenčnej charakteristiky, v praxi obvykle ide o podobný pokles priebehu ako pri prednej komore [1].

Pre objem prednej (z ang. front) vyžarovacej komory platí vzťah [2]

$$V_p = (2s * Q_{ts})^2 * V_{as} \quad (1.5)$$

kde s je konštanta zvlňenia priepustu a Q_{ts} je celkový činiteľ akosti reproduktora. Konštanta s sa určuje na základe parametrov reproduktora použitého v tejto ozvučnici. $s = 0,7$ má za následok, že zvlňenie priepustného pásma bude minimálne a výsledná frekvenčná charakteristika bude užšia. Na druhú stranu, pri hodnote konštanty $s = 0,5$ bude zvlňenie priepustného pásma približne $\pm 1,25$ dB no frekvenčná charakteristika priepustného pásma bude širšia.

Pre zadnú (z ang. rear) komoru platí vzťah [2]

$$V_z = \frac{V_{as}}{\left(\frac{Q_{bp}}{Q_{ts}}\right)^2 - 1} \quad (1.6)$$

kde Q_{bp} je činiteľ akosti uzavretej zadnej komory.

Rezonančná frekvencia prednej komory f_{bp} sa dá dopočítať podľa vzťahu [2]

$$f_{bp} = Q_{bp} * \frac{f_r}{Q_{ts}} \quad (1.7)$$

Polomer nátrubku prednej komory sa z pravidla volí čo najväčší, čo má priamo úmerný vplyv na jeho dĺžku. Pre dĺžku nátrubku v centimetroch teda platí [2]

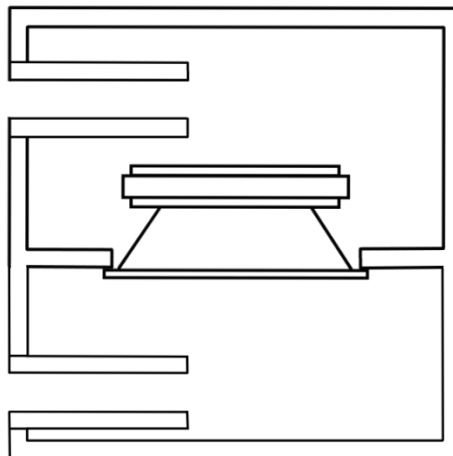
$$l_p = \frac{94250 * r_p^2}{f_{bp}^2 * V_f} - (1,595 * r_p), \quad [\text{cm}] \quad (1.8)$$

kde r_p predstavuje polomer nátrubku v centimetroch.

Za zmienku stojí, že pri väčšom celkovom činiteli akosti reproduktora Q_{ts} sa zväčšuje zvlnenie charakteristiky priepustného pásma, ako je vidieť z rovnice (1.5). Zároveň, čím je celkový objem ozvučnice V_b menší, tým sa charakteristika priepustného pásma posúva do vyšších frekvencií. Pri zväčšovaní objemu zadnej komory dochádza ku rozšíreniu, zmenšeniu citlivosti a zväčšeniu zvlnenia frekvenčnej charakteristiky priepustného pásma [1].

1.3.2 Pásmový priepust 6. rádu – paralelná konfigurácia

Ozvučnica typu pásmový priepust 6. rádu sa od 4. rádu líši zakomponovaním druhého basreflexového nátrubku do zadnej komory ozvučnice. Na Obr. 1.4 je znázornená paralelná konfigurácia basreflexových nátrubkov, kde obe z komôr majú vlastný basreflexový nátrubok.



Obr. 1.4 Ozvučnica typu pásmový priepust 6. rádu - paralelná konfigurácia

Ladiaca frekvencia konkrétneho basreflexového nátrubku sa volí vzhľadom na požadovanú rezonančnú frekvenciu konkrétnej komory, respektíve vzhľadom na tú časť frekvenčného spektra, kde správanie priebehu frekvenčnej charakteristiky udáva daná komora.

Pre výpočet dĺžky nátrubku platí vzťah [4]

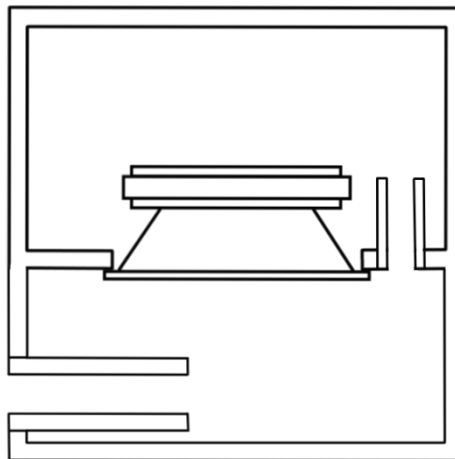
$$l_p = \frac{2,35625 * 10^4 * r_p^2 * N_p}{V_b f_b^2} - k_k r_p, \quad [\text{cm}] \quad (1.9)$$

kde N_p je počet použitých nátrubkov, r_p je polomer nátrubku a k_k predstavuje konštantu konečného korekčného faktora. Tá sa určuje pre daný nátrubok zvlášť vzhľadom ku jeho parametrom. Obvykle sa určí 0,34-násobkom druhej odmocniny plochy nátrubku [5].

Predná komora zastáva úlohu akustického dolnopriepustného filtra, podobne ako je popísané v podkapitole 1.3.1. Pri správnom ladení nátrubku zadnej komory je následne docielený nárast dolnej strmosti priepustného pásma na teoretické hodnoty 24 dB/oktávu [1].

1.3.3 Pásmový priepust 6. rádu - sériová konfigurácia

Pri tomto variante ozvučnice typu pásmový priepust 6. rádu vedie basreflexový nátrubok zo zadnej komory ozvučnice do prednej komory ako znázorňuje Obr. 1.5.



Obr. 1.5 Ozvučnica typu pásmový priepust 6. rádu - sériová konfigurácia

V ozvučnici nastáva lepšia akustická filtrácia vlnenia než u paralelnej konfigurácie, keďže výstupné akustické vlnenie prednej komory je podrobené akustickej filtrácii oboch sekcií. Oproti paralelnej konfigurácii je výpočet dĺžky basreflexového nátrubku značne zložitejší. Keďže vonkajší nátrubok vyžaruje vlny prednej aj zadnej komory, musí mať väčšie rozmery než vnútorný nátrubok. Zároveň ladenie nátrubkov je komplikované, vzhľadom ku faktu, že ladením jednej komory ovplyvňujeme ladenie druhej a naopak. Výhodu tejto konfigurácie predstavuje možnosť zmeny miery zvlnenia priepustného pásma pri docielení nízkych hodnôt medznej frekvencie sústavy aj pri menšom objeme ozvučnice [3].

2. METÓDY MERANIA FREKVENČNEJ CHARAKTERISTIKY REPRODUKTORA

Meranie korektného priebehu frekvenčnej charakteristiky môže byť značne komplikované, najmä teda pri nízkych frekvenciách, kedy vlnová dĺžka akustického signálu je väčšia v porovnaní s rozmerom miestnosti použitej pre meranie. V miestnosti sa vytvárajú módy o istých frekvenciách, ktoré spolu s odrazmi od stien miestnosti, najčastejšie podlahy alebo stropu, silne ovplyvňujú signál v mieste polohy mikrofónu a teda aj výslednú frekvenčnú charakteristiku reproduktorovej sústavy. Najčastejšie používané metódy merania frekvenčnej charakteristiky reprosústavy budú bližšie opísané v nasledujúcich podkapitolách.

2.1 Meranie v bezodrazovej komore

Jedným z najčastejšie používaných spôsobov merania frekvenčnej charakteristiky reprosústavy je meranie vykonané v bezodrazovej komore (v ang. anechoic chamber). V dnešnej dobe sa jedná o najjednoduchší spôsob docielenia korektného priebehu frekvenčnej charakteristiky reprosústavy, meranej v simulovanom voľnom poli, ktorý je ohraničený dolnou medznou frekvenciou miestnosti. Na druhú stranu je konštrukcia kvalitnej bezodrazovej komory značne komplikovaná a finančne náročná.

2.1.1 Vlastnosti bezodrazovej komory

Hlavným účelom konštrukcie bezodrazovej komory je minimalizácia odrazených vln v miestnosti a rušivých elementov prostredia, jej výsledkom je simulácia tzv. voľného poľa. Pre bezodrazovú komoru je nutné postaviť dostatočne veľkú miestnosť s vysoko pohltivým materiálom umiestneným ideálne na všetkých plochách miestnosti [6]. Pre najmenší rozmer miestnosti platí vzťah [7]

$$h = 1,5\lambda \quad (2.1)$$

kde λ je vlnová dĺžka akustickej vlny. Ak z definície rýchlosti zvuku c_0 dosadíme do rovnice (2.1) vlnovú dĺžku, dostaneme vzťah pre najmenší rozmer miestnosti

$$h = \frac{1,5c_0}{f} \quad (2.2)$$

Z tejto rovnice je možné vidieť, že pri frekvencii 20 Hz by miestnosť musela mať najmenší rozmer takmer 26 metrov, čo v praxi je veľmi ťažké doceliť. Predpokladaný objem reproduktorovej sústavy by mal tvoriť približne 1% objemu vzduchu v komore [7].

2.1.2 Vplyv komory na merania frekvenčnej charakteristiky reproduktora

Základným charakteristickým parametrom bezodrazovej komory je z ang. tzv. *cutoff frequency*. Nad touto dolnou medznou frekvenciou sú odrazy akustického vlnenia v miestnosti utlmené na určitú hladinu, ktorá už iba minimálne ovplyvňuje frekvenčnú charakteristiku meraného zariadenia. Pri meraní nízkych frekvencií, ktoré sa pohybujú v okolí alebo pod dolnou medznou frekvenciou bezodrazovej komory, je potrebná

kalibrácia meracej sústavy referenčným zdrojom akustického vlnenia. Tento referenčný zdroj by mal približne rozmerovo súhlasiť s meraným zariadením. Podobne by sa nepriaznivému vplyvu miestnosti prejavenej vo frekvenčnej charakteristike dalo predísť správnym umiestnením reprosústavy v miestnosti a porovnaním rôznych výsledkov spoločne súvisiacich meraní [6].

2.2 Meranie vo voľnom poli

Voľné pole je teoreticky ideálne prostredie pre meranie frekvenčnej charakteristiky reproduktora. Jedná sa o priestor, v ktorom nevznikajú sekundárne vlnenia odrazením primárnych vln od prekážok. Nadobudnutie takéhoto voľného poľa je náročné aj v exteriéri vzhľadom na okolité nepredvídateľné rušivé elementy prostredia. V praxi sa preto častejšie používa pojem „kvázi-voľné pole“ (z ang. „pseudo free field“).

2.2.1 Kvázi-voľné pole

Docielenie kvázi-voľného poľa je možné v rozmerovo obrovských halách či hangároch, no možné riešenie je aj v kludnom exteriéri za vyvážených podmienok počasia. Reprodukcia je umiestnená na dostatočne vyvýšené miesto, aby bolo docielené minimalizovanie vln odrazených, ktoré interferujú s priamo vyžiarenými vlnami z reproduktora. Najbližšia odrazová plocha by teda mala byť podlaha či zem pod reproduktorom. Tieto podmienky potom vytvárajú takmer bezodrazový charakter.

Ďalšou možnosťou je postavenie reproduktora na rovnú zem, aby membrána vyžarovala vo vertikálnej rovine. Takouto konfiguráciou je docielená eliminácia vln odrazených od zeme, keďže reproduktor vyžaruje do polpriestoru [6].

2.2.2 Teoretické výsledky merania vo voľnom poli

Pri zavesení reproduktora na konštrukciu je merací mikrofón umiestnený priamo na vyžarovaciu os reproduktorovej sústavy vo vzdialenosti 1 m, ktorá sa v praxi bežne považuje za meranie vo voľnom poli. Priebeh frekvenčných charakteristík merania v 1 metri, vykazuje istú nepravidelnosť spôsobenú odrazmi akustických vln od prekážok v prostredí, ako sú steny budov, zem či konštrukcia použitá pre zavesenie reproduktora [6].

Rozdielom pri konfigurácii s reproduktorom na zemi je, že priebeh frekvenčnej charakteristiky zaznamená signifikantný nárast úrovne hlasitosti o približne 6 dB, čo súhlasí s charakteristikou vyžarovania do polpriestoru.

Vplyv odrazov na meranú frekvenčnú charakteristiku sa dá takmer eliminovať za použitia časového okna, popísaného v časti 2.5, ktoré meranú charakteristiku „odosobní“ od odrazených vln, no spôsobilo by to skreslenie frekvenčnej charakteristiky pri nízkych frekvenciách, čo v texte neskôr opisuje rovnica (2.5) [6].

2.3 Meranie v referenčnej komore

2.3.1 Referenčná komora

Jedná sa o komoru malých nesúmerných rozmerov, rádovo v metroch štvorcových. Komora vykazuje v okolí meraného reproduktora takmer priestorovo rovnomerný akustický tlak. Reálny tlak v komore vykazuje odchýlky, ktoré sa dajú minimalizovať priemerovaním frekvenčných charakteristík nameraných v rôznych rohoch miestnosti.

Meraním v referenčnej komore však nezískame smerovosť zdroja zvukového vlnenia, zložky smerovosti sa dokonca spriemerujú [6].

2.3.2 Princíp merania v referenčnej komore

Reproduktorová sústava je umiestnená približne do stredu referenčnej komory a je budená sínusovým signálom. Reálny akustický tlak v miestnosti vykazuje isté odchýlky, ktoré sú spriemerovaním frekvenčných charakteristík nameraných v rôznych rohoch miestnosti minimalizované. Následnou kompenzáciou filtrom vypočítaným z charakteristík referenčného zdroja akustického vlnenia meraného v komore a zároveň vo voľnom poli dostaneme výslednú simuláciu podmienok voľného poľa.

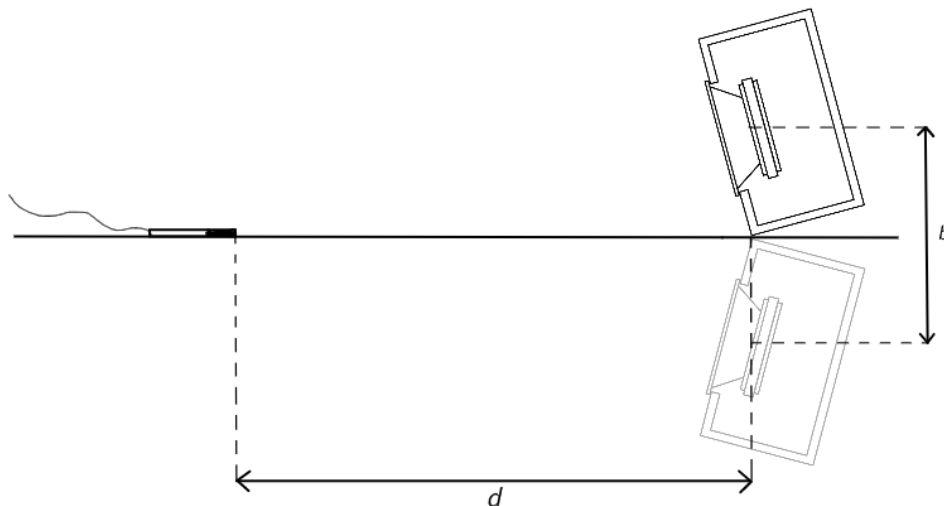
Metóda poskytuje celkom spoľahlivý odhad frekvenčnej charakteristiky reproduktora vo voľnom poli. K tomu je potrebné disponovať údajmi o referenčnom zdroji. Veľkosť miestnosti má vplyv na hornú medznú frekvenciu miestnosti. Pre širší frekvenčný rozsah je potrebná komora o veľmi malých rozmeroch.

Veľmi malá miestnosť činí pre reproduktor vysokú akustickú záťaž, čím nastáva skreslenie odhadu frekvenčnej charakteristiky reproduktora. Na druhú stranu táto metóda poskytuje spoľahlivé výsledky pri nízkych frekvenciách (pod 100 Hz) a to v relatívne krátkom čase [6].

2.4 Meranie s využitím odrazovej plochy

Pri meraní frekvenčných charakteristík reproduktorovej sústavy je pri väčšine metód cieľom minimalizovať, ideálne eliminovať, sekundárne akustické vlnenie odrazené od prekážok v priestore. Pri použití metódy s odrazovou plochou je využívaný práve odraz zvukových vln od vysoko odrazovej hladkej plochy pre získanie celkovej frekvenčnej charakteristiky reproduktora v simulovanom voľnom poli.

2.4.1 Princíp metódy s využitím odrazovej plochy



Obr. 2.1 Poloha mikrofónu a reproduktora pri meraní s využitím odrazovej plochy

Reproduktorová sústava je umiestnená na hladkú, vysoko odrazovú plochu a merací mikrofón je umiestnený zároveň s odrazovou plochou. Takto je docielené vytvorenie imaginárneho zrkadlového obrazu reproduktorovej sústavy, obraz sústavy sa nachádza akoby pod zemou hneď vedľa reálneho zdroja zvukového signálu, ako je vyobrazené v Obr. 2.1. Takúto konfiguráciu možno považovať ako pár identických reprosústav vyžarujúcich do voľného poľa vo fázy a zhodne v hlasitosti [8].

Pri nízkych frekvenciách je vzdialenosť medzi stredmi reproduktorov b veľmi malá v porovnaní s vlnovou dĺžkou akustického signálu. To má za následok, že zdroje zvukového vlnenia (reálny aj imaginárny zrkadlový) v podstate splývajú. Akustický tlak vo vzdialenosti d je potom dvojnásobný ako pre jediný zdroj vyžarujúci samostatne [8].

2.4.2 Opis priestoru

Základným podstatným elementom metódy je disponovanie veľkou, hladkou a vysoko odrazovou plochou. V praxi sa často používa napríklad asfaltová alebo betónová plocha (parkovisko, strecha...) dostatočne vzdialená od objektov, ktoré predstavujú pre reproduktorom vyžiarené akustické vlnenie dodatočné odrazové plochy. Meraná frekvenčná charakteristika reproduktora vykazuje lineárnu závislosť voči parametrom povrchu, teda čím hladší je povrch, tým presnejšie merania môžu byť vykonané.

Pre zaistenie podmienok voľného poľa je nutné, aby prekážky v okolí boli vzdialené minimálne 5-násobne v pomere ku meranej vzdialenosti. Tento predpoklad zaisťuje, že odrazené zvukové vlny budú zaznamenané s poklesom hlasitosti približne o 20 dB, čo činí menej ako 1 dB pre celkový vyžiarený akustický tlak. Zároveň sa týmto spôsobom zaisťujú konštantná vyžarovacia impedancia reproduktora v tomto prostredí.

Atmosférické podmienky zohrávajú podobne dôležitú rolu pri použití tejto metódy, keďže v praxi je táto technika prevažne vykonávaná v exteriéri. Prúdenie vzduchu v okolí meracieho mikrofónu vytvára parazitné signály o nízkych frekvenciách, tie sa dajú značne potlačiť použitím tzv. windscreenu na mikrofóne. Teplota a vlhkosť vzduchu môžu spôsobiť vychýlenie zvukových vln pri povrchu odrazovej plochy, čo ovplyvní priebeh frekvenčnej charakteristiky najmä v okolí a nad 5 kHz. Polohovanie zdroja zvuku pod väčším uhlom vzhľadom ku mikrofónu a povrchu odrazovej plochy môže tieto nežiadúce vplyvy redukovať [8].

2.4.3 Poloha zdroja a mikrofónu

Merací mikrofón je umiestnený zároveň s odrazovou plochou vo vzdialenosti charakteristickej pre voľné pole. Vzdialenosť mikrofónu by mala byť väčšia než trojnásobok maximálneho rozmeru zdroja zvukového signálu. Použitý mikrofón musí byť tlakového typu so všesmerovou charakteristikou.

Reproduktorová sústava je polohovaná pod takým uhlom, že vyžarovacia os reproduktora je smerovaná priamo na merací mikrofón. Relatívna vzdialenosť mikrofónu a reproduktora a umiestnenie mikrofónu zároveň s odrazovou plochou sú jedinými podstatnými faktormi pri polohovaní, keďže jedine poloha mikrofónu limituje presnosť merania vyšších frekvencií tejto metódy. Vzdialenosť reproduktora a jeho obrazu v tomto prípade nehrá rolu [8].

2.5 Meranie s použitím časového okna

Za použitia tejto metódy sa akustické merania vyžadujúce bezodrazovú komoru môžu vykonávať v prostredí s bežnou odrazivosťou zvukových vlnení. Metóda sa zameriava najmä na meranie frekvenčných a smerových charakteristík reproduktorovej sústavy, no možné využitie metódy je napríklad aj pri meraní skreslenia signálu, prvotných odrazov v miestnosti alebo impulznej odozvy systému. Najčastejšie sa potom táto metóda kombinuje s inými metódami bežne používanými pre meranie frekvenčnej charakteristiky reproduktorovej sústavy, ktorá disponuje hlbokotónovým reproduktorom.

2.5.1 Základný princíp časového okna

Základným problémom pri meraní reproduktorovej sústavy v bežnej miestnosti je, že sekundárne zvukové vlny odrazené od stien miestnosti silne interferujú s akustickým vlnením v mieste meracieho mikrofónu, ktorým sa snažíme zachytiť primárne vlny vyžiarené zo zdroja akustického vlnenia. Zvyčajne prvotné odrazy v miestnosti prichádzajú od podlahy, respektíve od stropu miestnosti. Cieľom použitia časového okna je zistenie prvotných odrazov v miestnosti na základe meraní bez použitia tohto okna a následne správnym nastavením časového okna tieto odrazy odčítať, aby sa nepremietli do výslednej frekvenčnej charakteristiky reproduktorovej sústavy.

2.5.2 Poloha mikrofónu a reproduktora

Reproduktor by mal byť umiestnený pozdĺž osi dlhšej steny miestnosti a uprostred všetkých stien, podlahy a stropu. Vzďialenosť meracieho mikrofónu od reproduktora by mala zodpovedať meraniu vo voľnom poli, čo v praxi znamená vzďialenosť aspoň jednej vlnovej dĺžky zvukového signálu pri najnižšej reprodukovanej frekvencii. Optimálna vzďialenosť reproduktora a mikrofónu je [9]

$$d = 0,58h \quad (2.3)$$

kde h predstavuje najmenší rozmer miestnosti. Tento vzťah platí v prípade, že dĺžka osi miestnosti, pozdĺž ktorej je umiestnený merací mikrofón, je aspoň o 15 % väčšia, než najmenší rozmer miestnosti h .

2.5.3 Výpočet dĺžky časového okna

Pre určenie dĺžky časového okna je podstatný fakt, s akým oneskorením dorazí prvá odrazená akustická vlna do miesta, kde je umiestnený merací mikrofón. Pre dĺžku časového okna platí vzťah [9]

$$t_{\max} = \frac{d_o - d}{c_0} \quad (2.4)$$

kde d_o predstavuje celkovú vzďialenosť urazenú odrazenou vlnou, d je vzďialenosť mikrofónu od reproduktora, ktorá je rovná vzďialenosti urazenej primárnou vlnou a c_0 je rýchlosť zvuku. Ekvivalentná dolná minimálna frekvencia, ktorú je možné za použitia tohto časového okna efektívne merať, sa vyjadří vzťahom [9]

$$f_{\min} = \frac{1}{t_{\max}} = \frac{c_0}{d_0 - d} \quad (2.5)$$

Časové okno je možné aplikovať na vopred zmeranú impulznú odozvu reproduktorovej sústavy. Podľa výsledkov impulznej odozvy, prípadne aj frekvenčných charakteristík, sa určí vhodný typ časového okna, ktorým sa následne impulzná odozva upraví. Výsledkom je frekvenčná charakteristika reproduktorovej sústavy odpovedajúca dolnej minimálnej frekvencii časového okna f_{\min} . Pre určenie korektného priebehu frekvenčnej charakteristiky reproduktorovej sústavy sa najčastejšie metóda dopĺňa o meranie v blízkom poli, o ktorom je pojednávané v nasledujúcej sekcii.

2.6 Meranie v blízkom poli

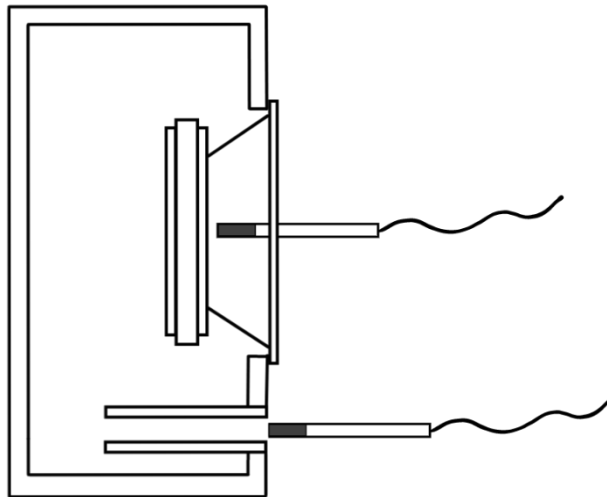
Pre získanie korektného priebehu frekvenčnej charakteristiky reproduktorovej sústavy pri nízkych frekvenciách sa používa meranie v blízkom poli reproduktora/nátrubku. Metóda využívajúca blízke pole je absolútne nenáročná na priestor, keďže meracia vzdialenosť je značne menšia, než najmenší rozmer reproduktora či ozvučnice. Značnou výhodou merania v blízkom poli je dostatočný odstup užitočného signálu od šumu (tzv. SNR) a eliminácia sekundárnych akustických vln odrazených od stien miestnosti.

2.6.1 Definícia blízkeho poľa

Aby sa predišlo chybám merania, merací mikrofón by mal byť umiestnený čo najbližšie ku membráne meraného reproduktora, prípadne zároveň s otvorom basreflexového nátrubku, vid'. Obr. 2.2. Výsledkom merania sú chyby s relatívnou odchýlkou merania približne 1 dB. Meraním v blízkom poli môžeme doceliť frekvenčnú charakteristiku pre celkové reprodukované spektrum zdroja akustického vlnenia. Avšak hodnoty budú validné iba do určitej hornej maximálnej frekvencie f_{\max} . Tá je závislá na vlnovej dĺžke odvodenej od efektívneho priemeru membrány meraného reproduktora d_e , pre ktorý platí vzťah

$$d_e = 2 \sqrt{\frac{S_d}{\pi}} \quad (2.6)$$

kde S_d predstavuje efektívnu vyžarovaciu plochu membrány reproduktora. Tento parameter je vždy udávaný výrobcom reproduktora ako súčasťou jeho základných T/S parametrov.



Obr. 2.2 Poloha mikrofónu pri meraní reproduktora a basreflexového nátrubku v blízkom poli

Pre reproduktor umiestnený v nekonečnej ozvučnici sa f_{\max} dá vyjadriť vzťahom [7]

$$kr_r = 1 \quad (2.7)$$

kde k predstavuje vlnové číslo ($= 2\pi/\lambda$) a r_r predstavuje polomer reproduktora. Dosadením definície rýchlosti zvuku c_0 do rovnice (2.7) dostaneme vzťah [7]

$$f_{\max} = \frac{c_0}{2\pi r_r} \quad (2.8)$$

Jedná sa však o idealizovaný teoretický predpoklad, keďže priamo vyžarujúci reproduktor je prakticky nutné používať v reálnej ozvučnici. V prípade reproduktora osadeného v reálnej ozvučnici je parameter f_{\max} závislý na vlnovej dĺžke odvodenej od najmenšieho rozmeru ozvučnice d_{\min} , v ktorej je reproduktor osadený a meraný. Hodnota f_{\max} podľa tohoto vzťahu je naozaj maximálna, v praxi je vhodné túto hodnotu voliť menšiu

$$f_{\max} = \frac{c_0}{\pi d_{\min}} = \frac{109,5}{d_{\min}} \quad (2.9)$$

Maximálna vzdialenosť meracieho mikrofónu od membrány reproduktora osadenom v reálnej ozvučnici pri meraní v blízkom poli je potom daná vzťahom

$$d_{\max} = 0,055d_{\min} \quad (2.10)$$

Táto hodnota je opäť maximálna, v praxi je vhodné túto hodnotu voliť menšiu. Pri blízkom postavení mikrofónu ku reproduktoru je potrebné počítať s maximálnou výchylkou membrány reproduktora, aby nedošlo ku chybám meraní spôsobeným dotykom membrány meraného reproduktora a meracieho mikrofónu. Zároveň je predpokladom, že konštrukcia ozvučnice bude dostatočne pevná, aby nedošlo ku

skresleniu výsledkov meraní pôsobením rezonancie častí reprosústavy či chybnou konštrukciou samotnej ozvučnice.

2.6.2 Spojenie meraní v blízkom a vzdialenom poli

Keďže merania vykonané v blízkom poli sú korektné do hornej maximálnej frekvencie f_{\max} , pre zisk celkovej frekvenčnej charakteristiky reproduktorovej sústavy je nutné merania spojiť s priebehom frekvenčnej charakteristiky sústavy meranej vo vzdialenom poli. Bežne sa používa vzdialenosť meracej sústavy od reproduktorovej sústavy 1 meter.

Z dôvodu bezprostrednej blízkosti meracieho mikrofónu ku membráne reproduktora/nátrubku, pri meraní v blízkom poli, je nameraná úroveň hlasitosti značne vyššia, ako pri ekvivalentnom meraní vo vzdialenom poli. Je preto nutné meranie v blízkom poli reproduktora/nátrubku normalizovať na úroveň merania vo vzdialenom poli.

Za predpokladu, že meranie idealizovaného tuhého kruhového piestového rezonátoru je vykonávané vo vzdialenosti d , ktorá je mnohonásobne väčšia než je efektívny priemer membrány reproduktora d_e ($d \gg d_e$), je akustický tlak vlnenia odpovedajúcemu meraniu vo vzdialenom poli definovaný [19]

$$p_{VP} = \frac{\rho_0 c_0 k U_0}{\pi d} \quad (2.11)$$

kde ρ_0 predstavuje hustotu vzduchu, c_0 je rýchlosť šírenia zvuku vo vzduchu, U_0 je výstupná objemová rýchlosť zdroja akustického vlnenia a k (pre ktoré platí $kd_e/2 < 1$) predstavuje vlnové číslo. Pre akustický tlak v blízkom poli za predpokladu merania do hornej maximálnej frekvencie f_{\max} platí vzťah [19]

$$p_{BP} = \frac{2\rho_0 c_0 k U_0}{\pi d_e} \quad (2.12)$$

Pre zistenie normalizačného pomeru meraní v blízkom a vzdialenom poli je nutné vyrátať pomer nameraných akustických tlakov

$$r_n = \frac{p_{BP}}{p_{VP}} = \frac{2d}{d_e} \quad (2.13)$$

Tento pomer však odpovedá iba vyžarovaniu do polpriestoru pred membránou. V prípade vyžarovania reproduktora do celého priestoru bude tento pomer dvojnásobný, vzťah (2.13) sa dá následne vyjadriť ako rozdiel pre merania hladín akustického tlaku v blízkom a vzdialenom poli

$$R_n = L_{BP} - L_{VP} = 20 \log \frac{4d}{d_e}, \quad [\text{dB}_{\text{SPL}}] \quad (2.14)$$

kde L_{BP} predstavuje hladinu akustického tlaku meraní v blízkom poli a L_{VP} hladinu akustického tlaku meraní vo vzdialenom poli.

Pri používaní normalizačného rozdielu je nutné brať do úvahy to, že prepočet neuvažuje javy spojené s odrazmi sekundárnych akustických vlnení od stien miestnosti

a ozvučnice reprosústavy a ani pokles citlivosti na nízkych frekvenciách o 6 dB (baffle step), ktoré ovplyvňujú spojenie priebehov meraných v blízkom a vzdialenom poli na hornej maximálnej frekvencii f_{\max} .

Jav spojený s poklesom citlivosti na nízkych frekvenciách meraní vo vzdialenom poli reprosústavy je možné eliminovať aplikovaním pasívneho high shelving filtru (v skratke HSF) na meranú modulovú frekvenčnú charakteristiku vo vzdialenom poli. Prenosové pásmo filtru nadobúda maxima útlmu -6 dB. Pre definíciu prechodového pásma filtru sa používa frekvencia inflexie, ktorá je rovná polovici prenosu filtru a určuje sa vzhľadom na nameraný rozdiel 3 dB vo frekvenčných charakteristikách reprosústavy v blízkom a vzdialenom poli. Pasívny HSF je realizovaný ako paralelný obvod R_s a $L_{s\text{HSF}}$, obdobný low shelving filter (v skratke LSH) je realizovaný ako paralelný obvod R_s a $C_{s\text{LSF}}$. Pre správny návrh filtru je nutná špecifikácia parametru reálnej impedancie reproduktora R_z , ktorá odpovedá menovitej impedancii reproduktora Z_j a odpor R_s je pripojovaný k záťaži R_z sériovo. Hodnoty jednotlivých prvkov obvodov sú potom definované

$$R_s = R_z \frac{1 - a_f}{a_f}, \quad (2.15)$$

$$L_{s\text{HSF}} = \frac{R_s}{2\pi f_i} \sqrt{\frac{R_z}{R_s + R_z}}, \quad C_{s\text{LSF}} = \frac{1}{2\pi f_i R_s} \sqrt{\frac{R_s + R_z}{R_z}}$$

kde a_f predstavuje hodnotu nastaviteľného prenosu filtru a f_i je frekvencia inflexie.

Pre vyobrazenie celkovej frekvenčnej charakteristiky reprosústavy je nutné priebehy merané v blízkom a vzdialenom poli plynule prepojiť. Uvažujúc, že hodnoty merania v blízkom poli boli normalizované do vzdialeného poľa podľa vzťahu (2.14), je možné pozorovať oblasť, v ktorej sa priebehy prekrývajú, prípadne sú vizuálne podobné v priebehu. V tejto oblasti je vybraná konkrétna prechodová frekvencia f_s , pre ktorú platí $f_s \leq f_{\max}$. Následne je definovaná oblasť prelínania priebehov (z ang. crossover) pomocou minima a maxima crossover oblasti $f_{s\min}$ a $f_{s\max}$. Tieto medzné frekvencie oblasti prelínania priebehov je ideálne voliť v rozsahu približne jednej oktávy nad a pod prechodovou frekvenciou f_s a vzhľadom ku počtu bodov meraní, aby prechod medzi priebehmi bol dostatočne plynulý. Na frekvenciách pod $f_{s\min}$ je následne vyobrazená charakteristika meraná v blízkom poli, naopak na frekvenciách nad $f_{s\max}$ je vyobrazená charakteristika meraná vo vzdialenom poli. V rámci oblasti prelínania sú potom charakteristiky merané v blízkom a vzdialenom poli pomerené vzhľadom ku počtu bodov merania v tejto oblasti a vzájomne sčítané. Týmto spôsobom sa priebehy už viac neprelínajú v celom frekvenčnom spektre, jedine v rozmedzí prechodovej frekvencie f_s . Spojením priebehov je docielená celková modulová frekvenčná charakteristika reproduktorovej sústavy v rámci počuteľného frekvenčného pásma bez vplyvu skreslenia na nízkych frekvenciách merania vo vzdialenom poli, ktoré je spôsobené nedostatočnou pohltivosťou týchto frekvencií v uzavretej miestnosti a tým spôsobeným stojatým vlnením interferujúcim s meranou frekvenčnou charakteristikou vo vzdialenom poli reprosústavy.

2.6.3 Metódy skladania frekvenčných charakteristík viacerých zdrojov akustického vlnenia

Z obrázku Obr. 2.2 je možné vidieť, že ak konkrétna ozvučnica obsahuje viac než jeden primárny zdroj akustického vlnenia, napr. reproduktor a basreflexový nátrubok, je nutné vykonať práve toľko samostatných meraní frekvenčných charakteristík v blízkom poli, koľkými primárnymi zdrojmi akustického vlnenia ozvučnica disponuje. Metóda merania v blízkom poli teda neposkytuje možnosť merania viacerých zdrojov akustického vlnenia s jedinou výslednou frekvenčnou charakteristikou popisujúcou reprosústavu ako celok.

Výslednú frekvenčnú charakteristiku reprosústavy ako celku je možné docieľiť metódou jednoduchého sčítania modulových frekvenčných charakteristík meraných v blízkom poli bez uvažovania fáze akustického signálu vyžiareného primárnym zdrojom. Avšak týmto spôsobom je docieľený výsledok s relatívnou chybou, ktorej akceptovateľná veľkosť je práve v takom frekvenčnom rozsahu, kde vlnové dĺžky akustických signálov sú výrazne väčšie, než vzdialenosť primárnych zdrojov akustického vlnenia. Výsledkom je zložená frekvenčná charakteristika v geometrickom strede medzi primárnymi zdrojmi akustického vlnenia. Pri skladaní priebehov na nízkych frekvenciách je spomínaná chyba akceptovateľná a z hľadiska menšej náročnosti je táto metóda v praxi bežne používaná.

Pre určenie presnej výslednej frekvenčnej charakteristiky reprosústavy ako celku je nutné brať ohľad na fázový posun v akustických signáloch primárnych zdrojov akustického vlnenia. Základom tejto metódy je špecifikácia konkrétneho bodu v priestore, v ktorom by sa merací mikrofón mal nachádzať. Jedná sa teda o simulované meranie frekvenčnej charakteristiky reprosústavy ako celku v konkrétnom bode priestoru, uvažujúce ideálne podmienky merania vo voľnom poli bez vzniku sekundárnych odrazov od objektov a ozvučnice samotnej. Metóda rovnako eliminuje jav tzv. baffle step, kedy je citlivosť reproduktora umiestneného v ozvučnici na nízkych frekvenciách znížená o 6 dB. Pre presnosť tejto metódy je nutné meranie komplexných frekvenčných charakteristík primárnych zdrojov akustického vlnenia reprosústavy v blízkom poli a následne vykonanie komplexného súčtu jednotlivých meraní bez zanedbania úbytku hladiny akustického tlaku pri šírení priestorom a fázových posunov sčítavaných charakteristík.

V prípade basreflexovej ozvučnice je v praxi bežné, že rozmery nátrubku sú značne menšie v porovnaní s rozmermi reproduktora samotného. Pred sčítaním priebehov modulových frekvenčných charakteristík reproduktora a nátrubku je nutné ich hodnoty kompenzovať [7].

Prvotne je potrebné zistiť efektívnu plochu nátrubku a membrány reproduktora. Efektívna plocha membrány reproduktora S_d by mala byť vždy uvedená výrobcom a to ako súčasťou T/S parametrov reproduktora.

Efektívna plocha basreflexového nátrubku je daná vzťahom [10]

$$S_p = \pi r_p^2 \quad (2.16)$$

kde r_p predstavuje vnútorný polomer basreflexového nátrubku.

Keďže v praxi je väčšinou basreflexový nátrubok menších rozmerov než reproduktor samotný, je nutné preto priebeh modulovej frekvenčnej charakteristiky nátrubku kompenzovať vzhľadom ku tomuto pomeru rozmerov. Výsledná frekvenčná charakteristika reproduktorovej sústavy meraná v blízkom poli je daná súčtom komplexných frekvenčných charakteristík podľa vzťahu [7]

$$\mathbf{H}_{\text{NF}}(f) = \mathbf{H}_d(f) + \sqrt{\frac{S_p}{S_d}} * \mathbf{H}_p(f) \quad (2.17)$$

kde $\mathbf{H}_d(f)$ je komplexná frekvenčná charakteristika reproduktora meraná v blízkom poli a $\mathbf{H}_p(f)$ je komplexná frekvenčná charakteristika nátrubku meraná v blízkom poli. Výsledkom je celková frekvenčná charakteristika reproduktorovej sústavy ako celku v geometrickom strede medzi primárnymi zdrojmi akustického vlnenia.

Pred vykonaním samotného súčtu komplexných frekvenčných charakteristík reproduktora a nátrubku v konkrétnom bode priestoru, no meraných v blízkom poli, je nutná postupná normalizácia priebehov meraných modulových a fázových frekvenčných charakteristík reproduktora a nátrubku. Modulové frekvenčné charakteristiky sú normalizované do konkrétneho bodu vzhľadom na vzdialenosť simulovaného meracieho mikrofónu pomocou vzťahu (2.14).

V prípade basreflexového nátrubku je nutné aplikovať vyššie spomínanú kompenzáciu vzhľadom ku rozmerom primárnych zdrojov akustického vlnenia v ozvučnici. Tá je daná pomerom efektívnej vyžarovacej plochy nátrubku a reproduktora pod odmocninou.

Výsledný normalizovaný priebeh modulovej frekvenčnej charakteristiky je prevedený z hladiny akustického tlaku [dBSPL] na základnú jednotku akustického tlaku [Pa], ktoré sú používané pri prevode signálov do komplexného tvaru, pomocou vzťahu [17]

$$p = p_0 * 10^{\frac{L_p}{20}} \quad (2.18)$$

kde p_0 predstavuje vzťažnú hodnotu pre 0 dB, ktorá odpovedá prahu počutia v okolí 1 kHz ($= 2 * 10^{-5}$ Pa) a L_p predstavuje odvodenú hladinu akustického tlaku.

Priebeh meraných fázových frekvenčných charakteristík je normalizovaný do konkrétneho bodu v priestore na základe oneskorenia akustického signálu v mieste simulovaného merania. To je dané pomerom vzdialenosti urazenej primárnou vlnou zo zdroja akustického vlnenia do bodu simulovaného merania d a rýchlosťou šírenia zvuku vo vzduchu c_0 . Na základe tohoto oneskorenia je vyrátaná normalizačná hodnota fáze v stupňoch pomocou vzťahu [20]

$$\Delta\phi = \frac{\Delta t * 360^\circ * f}{1000} \quad (2.19)$$

kde Δt predstavuje samotné oneskorenie signálu v konkrétnom bode v milisekundách. Z rovnice je jasne viditeľné, že fázový rozdiel je priamo úmerný frekvencii signálu. S narastajúcou frekvenciou bude rozdiel vo fázových priebehoch narastať.

Modul a fáza meraných primárnych zdrojov akustického vlnenia sú vyjadrené v polárnom komplexnom tvare. Prevodom z polárneho tvaru do karteziánskeho súradnicového systému je možné doceliť vektorový súčet normalizovaných priebehov reproduktora a nátrubku podľa vzťahu pre súčet koherentných vlnení [17]

$$p_c = \sqrt{p_r^2 + p_p^2 + 2p_r p_p \cos(\varphi_r - \varphi_p)} \quad (2.20)$$

pre p_c predstavujúcu amplitúdu výsledného akustického tlaku, p_r je meraná amplitúda reproduktora, p_p je meraná amplitúda nátrubku, φ_r predstavuje meranú fázu reproduktora a φ_p predstavuje meranú fázu nátrubku.

Následne je vykonaný spätný prevod do polárneho komplexného tvaru a určený modul a fáza výslednej frekvenčnej charakteristiky reprosústavy ako celku v konkrétnom bode priestoru.

2.6.4 Využitie blízkeho poľa pri meraní nízkych frekvencií

Pri nízkych frekvenciách sa reproduktor správa ako tuhý piestový rezonátor a jeho frekvenčná charakteristika v blízkom poli je preto priamo úmerná frekvenčnej charakteristike vo vzdialenom poli a je nezávislá na odrazoch a šumu prostredia. Preto je možné s touto charakteristikou pracovať a normalizovať ju do vzdialeného poľa bez spomínaných vplyvov spôsobujúcich skreslenie charakteristiky, ak je dodržaný postup skladania komplexných frekvenčných charakteristík primárnych zdrojov reprosústavy. Vplyv javov, ovplyvňujúcich meranie frekvenčných charakteristík vo vzdialenom poli, je možné docieľiť normalizáciou priebehov modulových a fázových charakteristík, meraných v blízkom poli, pomocou vyššie spomínaných princípov.

Pre akustické vlnenie nad hornou maximálnou frekvenciou f_{\max} sa reproduktor už nespráva ako tuhý piest a zároveň nastávajú difrakcie od stien ozvučnice samotnej. Z tohto hľadiska sa meranie v blízkom poli volí do frekvencie menšej, než je hodnota f_{\max} . Následne pre určenie celkového priebehu frekvenčnej charakteristiky hlbokotónovej reproduktorovej sústavy je potrebné vykonať merania v blízkom poli primárnych zdrojov akustického vlnenia reprosústavy kalibrovaným meracím mikrofónom a následne vykonať spojenie priebehov komplexných frekvenčných charakteristík normalizovaných do konkrétneho bodu v priestore.

Pre porovnanie výsledkov meraní v blízkom poli s meraním vo vzdialenom poli je nutné aplikovať kompenzáciu javu baffle step na meranie vo vzdialenom poli pre odstránenie poklesu citlivosti nameraných priebehov na nízkych frekvenciách, spôsobených osadením reproduktora do reálnej ozvučnice.

3. PRÍSTROJE A ANALYZAČNÝ PROGRAM

Táto kapitola pojednáva o základnej charakteristike a parametroch prístrojov, ktoré boli následne použité pri vykonaných testovacích meraniach modulárnej jednotky. Ďalej sú opísané možnosti meraní v analyzačnom programe APx500, spôsob analýzy výsledkov nameraných hodnôt a následné možnosti výstupu z programu. Zároveň je poskytnutý vecný opis modulárnej hlbokotónovej jednotky OM4, ktorou meraním sa práca zaoberá. Tieto základné opísané poznatky budú následne v práci využité pri meraniach a vyhodnotení výsledkov meraní modulárnej hlbokotónovej jednotky v blízkom poli.

3.1 Zariadenie použité pri meraní

3.1.1 Analyzátor APx525

Analyzátor v spojení s programom APx500 umožňuje celkom rýchly a jednoduchý spôsob vykonávania testovaní a meraní signálov rôzneho charakteru. Tento analyzátor disponuje dvoma kanálmi analógových vstupov a výstupov, vstupom a výstupom špecifického digitálneho rozhrania a ďalšími možnosťami rozhraní analógových i digitálnych. Poskytuje možnosť zisku vysokého počtu bodov spektra tzv. Rýchlej Fourierovej Transformácie (z ang. „FFT“) a poskytuje veľmi nízke systémové skreslenie signálu. Podrobný opis kľúčových parametrov je uvedený v dokumente [11].

Pre účely testovacích meraní bol použitý nesymetrický analógový vstup a výstup a USB rozhranie pre prepojenie analyzátoru s počítačom a následne analyzačným programom APx500.

3.1.2 Prevodník APx1701

Tento prevodník je počítačom a analyzačným programom APx500 riadené testovacie príslušenstvo pre prehľad správania elektroakustických zariadení. Poskytuje vyrovnané zosilnenie signálu, veľmi nízke hodnoty celkového harmonického skreslenia signálu a nízku odchýlku meraní frekvenčnej charakteristiky. Pár nesymetrických vstupov disponuje kompatibilitou s tzv. TEDS (z ang. „Transducer Electronic Data Sheet“), ktoré slúžia pre kalibráciu známych zariadení. Bližšia špecifikácia kľúčových parametrov sa nachádza v dokumente [12].

Pre vykonané testovacie merania bol využívaný výstup zosilňovača pre napájanie modulárnej jednotky, nesymetrický vstup zosilňovača a USB rozhranie pre prepojenie prevodníka s počítačom a teda aj analyzačným programom APx500.

3.1.3 Mikrofónový zosilňovač Nexus 2690-A

Zosilňovač poskytuje široké spektrum využitia pre rôzne typy mikrofónov. Disponuje celkovo dvoma vstupnými a rovnako dvoma výstupnými kanálmi s možnosťou použitia rôznych nastavení filtrov pre špecifické účely. Signál je v zosilňovači udržiavaný analógovo, čím je docielený optimálny odstup signálu od šumu a nízke skreslenie signálu. Zariadenie je kompatibilné s TEDS prevodníka. Vďaka sériovému ovládaciemu rozhraniu je možné zosilňovač ovládať pomocou počítača a kontrolovať tým jeho nastavenia. Takýmto spôsobom je možné prepojiť viacero zosilňovačov s jediným PC. Podrobný opis prístroja a jeho parametrov je dostupný v dokumente [13].

Pri vykonaných testovacích meraniach bol využité jeden kanál vstupu zosilňovača pre pripojenie mikrofónu a jeden kanál výstupu zosilňovača pre analyzátor APx525.

3.1.4 Mikrofónový predzosilňovač Brüel & Kjær type 2669-L

Tento typ mikrofónového predzosilňovača disponuje vysokou impedanciou na vstupe, čím nespôsobuje pre merací mikrofón praktickú záťaž. Predzosilňovač poskytuje široký dynamický rozsah na základe vysokého výstupného napätia a nízkej hladiny vlastného šumu. Vďaka implementovanému špeciálnemu systému kalibrácie je možná rýchla kalibrácia predzosilňovača s mikrofónom. Podrobný opis predzosilňovača je dostupný z [14].

3.1.5 Mikrofónová kapsula Brüel & Kjær type 4189

Mikrofón je prispôbený pre vysoko presné merania vo voľnom poli disponujúci vysokou citlivosťou v širokom frekvenčnom rozsahu. Podobne ako predzosilňovač má mikrofón nízku hladinu vlastného šumu a vysokú stabilitu. Je určený predovšetkým pre meranie vo voľnom poli alebo v bezodrazovej komore. Mikrofón má v konfigurácii s používaným mikrofónovým predzosilňovačom dostupné TEDS informácie. Kľúčové parametre a bližší rozbor mikrofónu je dostupný z [15].

3.2 Analyzačný program APx500

Analyzačným programom APx500 je možné vykonávať konfiguráciu meraní, samotné merania rôznych typov, automatizáciu meraní a následné vyhodnotenie nameraných hodnôt. Použitím prístrojov a analyzačného programu rady APx je zaistené analógové a digitálne rozhranie a systémové taktovanie.

3.2.1 Princíp analyzačného programu APx500

Projekt v analyzačnom programe predstavuje súbor konfigurácií a informácií pre konkrétne používané merania, disponuje súbormi s nameranými priebehmi, dátami a grafmi.

Program poskytuje dva základné režimy, v ktorých môže byť operované. Sekvenčný režim (z ang. „Sequence Mode“) disponuje množstvom predkonfigurovaných meraní, ktoré sa dajú ľubovoľne priradiť do automatickej sekvencie meraní, z ktorej je následne vytvorená správa obsahujúca konkrétne vykonané merania, ich konfiguráciu, výsledky a priebehy. Väčšina týchto meraní zvukového signálu je výsledkom spracovania meraných hodnôt vo frekvenčnej oblasti.

Druhým režimom je tzv. „Bench Mode“, ktorý je zo značnej časti dopredu nekonfigurovaný. Merania zvukového signálu v tomto režime sú predovšetkým výsledkom algoritmov v časovej oblasti. To znamená, že výpočty sa vykonávajú na okamžitých zvukových vzorkách meraných v reálnom čase [16].

Pre vykonané testovacie merania frekvenčnej charakteristiky bol použitý Sekvenčný režim analyzačného programu. Ten poskytuje dve základné možnosti získania frekvenčnej charakteristiky meraného zariadenia opísané nižšie.

3.2.2 Frequency Response

Táto metóda zistenia frekvenčnej charakteristiky meraného reproduktora využíva kontinuálny, logaritmicky ladený stimulačný sínusový signál. Signál sa pohybuje v rozsahu frekvencií zadaných v poli „Start Frequency“ a „Stop Frequency“ a na úrovni nastavenej v poli „Level“.

Pre ustálenie reproduktora pred nástupom definovaného budiaceho sínusového signálu sa používa hodnota „Pre-Sweep“, nastavenie hodnoty je možné v rozmedzí

maximálne 1 sekundy pred nástupom budiaceho signálu. Nastavením väčšej hodnoty má za následok lepšiu stabilizáciu reproduktora no predlžuje čas merania.

Do poľa „Sweep“ je zadávaná požadovaná dĺžka budiaceho signálu, ktorý začne prúdiť do reproduktora o frekvenciách pod definovanou počiatočnou frekvenciou. Signál je frekvenčne ladený smerom nahor, pričom počiatočnú frekvenciu dosiahne na konci trvania doby „Pre-Sweep“. Nastavením dlhšieho trvania budiaceho signálu má za následok presnejšie meranie a lepší odstup signálu od šumu, doba merania sa ekvivalentne predlži.

Výstupný akustický signál z meraného reproduktora je zachytený meracím mikrofónom a privedený do analyzátoru, kde je podrobený matematickej dekonvolúcii. Výsledné hodnoty sú vypočítané prevodom zvukových vzoriek do frekvenčnej oblasti pomocou FFT, kde je pomocou zvyškového súčtu štvorcov (z ang. „RSS - residual sum of squares“) docielená výsledná frekvenčná charakteristika reproduktorovej sústavy.

Výsledné hodnoty môžu byť vyjadrené v rôznych jednotkách, pre výsledky tejto práce bola zvolená jednotka efektívneho napätia V_{rms} . Výsledný graf predstavuje závislosť hodnôt úrovni signálu V_{rms} na frekvencii [16].

3.2.3 Acoustic Response

Podobne ako pri spôsobe merania frekvenčnej charakteristiky reproduktorovej sústavy pomocou Frequency Response, sa v tejto metóde využíva postupne logaritmicky ladený sínusový signál v rozsahu nastavených frekvencií. Základným elementom metódy je použitie časového okna pre minimalizáciu efektu odrazených akustických vln na výslednú frekvenčnú charakteristiku meraného zariadenia. Problematikou merania frekvenčnej charakteristiky reproduktorovej sústavy s použitím časového okna sa zaoberá podkapitola 2.5, princíp je nevyhnutné aplikovať pri použití Acoustic Response. Pre korektné výsledky frekvenčnej charakteristiky je doporučené vykonať kalibráciu meracieho mikrofónu.

Základný princíp merania Acoustic Response spočíva v zmeraní impulznej odozvy reproduktora. Výsledkom merania je grafické zobrazenie impulznej odozvy reproduktorovej sústavy a akustického priestoru a krivka poklesu energie zvukového vlnenia v miestnosti (z ang. „ETC – Energy Time Curve“). Na základe vyobrazených priebehov a teórie použitia časového okna je možné správne nastavenie a aplikovanie časového okna. Časové okno je do meraní pridané automaticky. Nastavenie parametrov časového okna je možné priamo v grafickom zobrazení impulznej odozvy, prípadne ETC. Výsledná impulzná odozva, ETC a z nich odvodené priebehy budú automaticky upravené [16].

Následne sú hodnoty impulznej odozvy spätne prepočítané algoritmom analyzačného programu a vykreslené do priebehov frekvenčnej, či fázovej charakteristiky reproduktorovej sústavy, ktoré sú potrebným zdrojom hodnôt pre komplexný súčet priebehov frekvenčných charakteristík reproduktorovej sústavy, ako popisuje podkapitola 2.6.2.

3.3 Popis modulov a konfigurácií modulárnej jednotky OM4

Konštrukčné riešenie modulárnej hlbokotónovej jednotky poskytuje variabilitu možností konfigurácie rôznych typov ozvučníc. Jednotlivé moduly OM4 boli pre prehľadnosť označené OM-4.1 až OM-4.8 na ich vnútorných stranách. Základným rozdelením modulov je delenie na tzv. moduly aktívne a pasívne. Aktívne moduly sú osadené

reproduktormi Monacor SPH-210 v jednoduchom a izobarickom zapojení, pasívne moduly reproduktorom nedisponujú. Z dôvodu použitia rôznej dĺžky basreflexového nátrubku pre potreby konkrétnych konfigurácií, je aktívny modul OM-4.2 dodatočne delený vzhľadom ku dĺžke použitého nátrubku v module. Aktívny modul s označením OM-4.21 obsahuje pôvodnú dĺžku nátrubku, označenie OM-4.22 vedie ku modulu s predĺženým nátrubkom. Pasívne moduly sú samostatné komory alebo zadné veká, pomocou ktorých je OM4 skladaná do konkrétnych typov ozvučníc. Každá konfigurácia je tvorená jedným aktívnym a jedným alebo dvoma pasívnymi modulmi. Pasívne moduly predstavujúce samostatnú prídavnú komoru ozvučnice sú dodatočne delené podľa umiestnenia na komory predné a zadné. Pasívne moduly s označením OM-4.7 a OM-4.8 predstavujú zadné veká konfigurácií a nepredstavujú dodatočný prídavný objem pre komory konfigurácií OM4. Fotografie modulov hlbokotónovej jednotky OM4 sú k nahliadnutiu v prílohe A.1.

Tabuľka popisujúca jednotlivé konfigurácie OM4, typ ozvučnice vytvorenej danou konfiguráciou a používané moduly v danej konfigurácii je k nahliadnutiu v prílohe B.1. V prílohách B.2 až B.9 sú vypísané základné parametre všetkých konfigurácií hlbokotónovej jednotky OM4. Prílohy obsahujú vnútorné rozmery komôr a z nich vychádzajúce základné vnútorné objemy komôr ozvučnice. Tie nepredstavujú celkový objem komôr, keďže niektoré moduly majú nainštalovaný reproduktor a/alebo basreflexový nátrubok, ktorých objemy je nutné brať do úvahy pri určovaní ich celkového vnútorného objemu. Je preto nutná špecifikácia vnútornej dĺžky a vnútorného priemeru, z ktorých vyplýva vnútorný prierez a vnútorný objem basreflexového nátrubku. Vzhľadom k hrúbke steny nátrubku, ktorá je zanedbateľná voči jeho rozmerom, je možné pri určovaní celkového objemu komory počítať s vnútorným objemom nátrubku. Ďalším základným parametrom je objem samotného reproduktora, ktorý je kompletne vložený do prednej dosky modulu. Ten je daný súčtom objemov priestoru pred membránou po úroveň horného lemu koša reproduktora a všetkých zadných konštrukčných častí reproduktora. Celkový objem komory v konkrétnej konfigurácii je potom daný jeho základným vnútorným objemom poníženým o objem reproduktora a/alebo otvoreného basreflexového nátrubku.

V prípade ozvučnice uzavretej je nutné od základného objemu modulu odčítať objem reproduktora, nátrubok je uzavretý a utesnený z prednej dosky modulu, preto jeho objem nie je nutné odčítať od základného objemu modulu. Ak sa jedná o ozvučnicu typu basreflex, je nutné od základného objemu modulu odčítať objem reproduktora a použitého basreflexového nátrubku v konkrétnej konfigurácii. Analogicky, ako pri basreflexovej ozvučnici, to platí pre ozvučnicu typu pásmový priepust 6. rádu. V prípade jednoduchého zapojenia reproduktorov sa od základného objemu prednej komory odčíta iba objem použitého nátrubku. Pre prípad izobarického zapojenia reproduktorov, kedy predný reproduktor zasahuje do prednej komory, je nutné od základného objemu prednej komory odčítať objem použitého nátrubku aj objem reproduktora.

Všetky prílohy popisujúce parametre konfigurácií uvažujú celkový voľný vnútorný objem komôr. Pre docielenie limitácie alebo dokonca eliminácie vznikajúceho stojatého vlnenia vnútri komôr, ktoré je spôsobené nedokonalou tuhosťou ozvučnice, je nutné použitie tlmiaceho materiálu vnútri komôr ozvučnice. Tlmiaci materiál je ideálne umiestnený po obvode všetkých vnútorných stien komôr, pričom je nutné dbať na mechanické usporiadanie komponentov v moduloch. Zároveň je dôležité brať ohľad na dostatočný voľný priestor za reproduktorom a nátrubkom, aby nedochádzalo k jeho nadmernému zatlmeniu a tým pádom ku výraznej zmene vlastností ozvučnice.

4. TESTOVACIE MERANIA MODULÁRNEJ JEDNOTKY A Z TOHO VYPLÝVAJÚCE BUDÚCE POSTUPY MERANÍ

Testovacie merania boli vykonávané v bezodrazovej komore za použitia uzavretej a basreflexovej konfigurácie ozvučnice modulárnej hlbokotónovej jednotky v blízkom poli reproduktora a basreflexového nátrubku, ako aj vo vzdialenosti 20 centimetrov. Pri meraniach boli použité vyššie spomínané prístroje a mikrofón. Na základe testovacích meraní a ich výsledkov bude konštatovaný budúci postup meraní a práce.

Prvotnými testovacími meraniami modulárnej jednotky bolo za účelom zistiť vhodnú polohu modulárnej jednotky v bezodrazovej komore, aby boli zaistené čo najideálnejšie podmienky meraní. Modulárna jednotka bola prvotne umiestnená na stojane v strede bezodrazovej komory, os vyžarovania reproduktorovej sústavy bola zhodná s dlhšou osou komory. Po zmeraní modulovej frekvenčnej charakteristiky reproduktorovej sústavy vo vzdialenosti 20 centimetrov bola modulárna jednotka umiestnená na zem komory do horizontálnej polohy, reproduktor teda vyžaroval smerom nahor. Zmeraním modulovej frekvenčnej charakteristiky a porovnaním priebehov charakteristík oboch postavení modulárnej jednotky bolo zhodnotené, že výhodnejšie postavenie modulárnej jednotky je na zemi v horizontálnej polohe, kedy je docielené vyžarovanie reproduktorovej sústavy do polpriestoru, teda odrazy od zeme komory sú teoreticky eliminované a majú minimálny vplyv na meranú modulovú frekvenčnú charakteristiku modulárnej jednotky.

4.1 Meranie uzavretej konfigurácie modulárnej jednotky

Ak je dodržaná podmienka vzdialenosti mikrofónu od reproduktora podľa vzťahu (2.10), sú merania a výsledná modulová frekvenčná charakteristika reproduktora v blízkom poli nezávislé na odrazoch akustického vlnenia v priestore. Validita meraní v blízkom poli je však obmedzená hornou maximálnou frekvenciou f_{\max} (2.9), pre ktorú po dosadení najmenšieho rozmeru prednej dosky ozvučnice modulárnej jednotky platí hodnota 405,5 Hz. Nasledujúci postup bol vykonaný pri všetkých testovacích meraniach modulárnej jednotky OM4.

Reproduktor bol umiestnený na pryžových podložkách na zemi s vyžarovacou osou reproduktora smerom do stropu miestnosti. Mikrofón bol umiestnený do vzdialenosti 8 milimetrov od protiprachového krytu reproduktora. Zároveň bola zaistená čo najväčšia možná vzdialenosť meracej sústavy od stien komory.

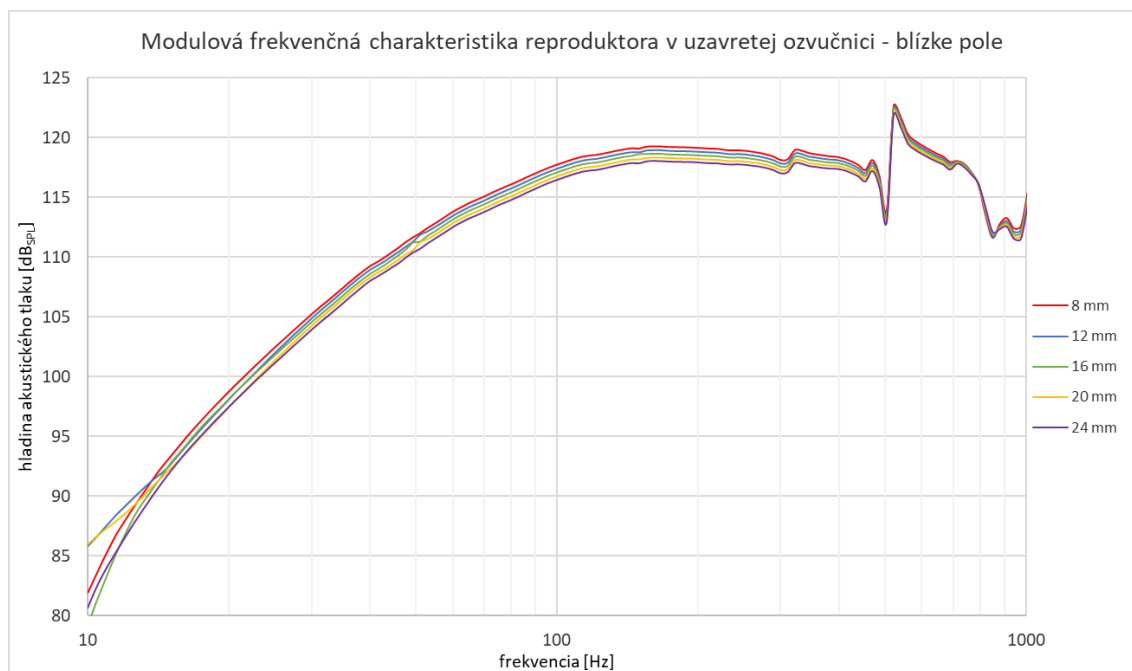
Do reproduktora modulárnej jednotky bol privedený budiaci signál s hodnotou napätia 2,68 V_{rms}. Táto hodnota sa vzťahuje ku menovitému príkonu 1 W a menovitej impedancii reproduktora, ktorá činí 7,2 Ω.

Použitá metóda merania v analyzačnom programe APx500 bola Frequency Response. Pozorovaním rôznych nastavení dĺžky Pre-Sweep a Sweep a ich vplyvu na výslednú modulovú frekvenčnú charakteristiku bolo zistené, že ideálne nastavenie týchto parametrov merania bolo s použitou hodnotou Pre-Sweep 0,5 s, pre dĺžku budiaceho signálu bola použitá hodnota Sweep 2 s. Rozsah meraných frekvencií bol nastavený vzhľadom ku meraniu v blízkom poli v rozmedzí od 10 do 1000 Hz.

4.1.1 Vyhodnotenie výsledkov meraní v blízkom poli

Po vykonaní akustického merania modulárnej jednotky bol v programe vykreslený priebeh modulovej frekvenčnej charakteristiky v jednotkách dB_{SPL} vo vzťahu ku frekvencii. Následne boli hodnoty meraného priebehu exportované do tabuľky v programe MS Excel. Nastavenie výstupu z analyzačného programu do Excelu bolo prevedené na 500 bodov v logaritmickej mierke, aby bolo zaistené dostatočné krokovanie medzi meranými frekvenciami a teda korektné vykreslenie priebehu modulovej frekvenčnej charakteristiky v grafe. Priebehy meraní modulovej frekvenčnej charakteristiky reproduktora v uzavretej ozvučnici v blízkom poli sú vyobrazené na Obr. 4.1.

Priebehy vyobrazujú priamo hodnoty namerané v daných vzdialenostiach, konkrétne 8, 12, 16, 20 a 24 milimetrov od protiprachového krytu reproduktora. Hodnoty neboli normalizované vzhľadom ku veľmi malým meraným vzdialenostiam, ktoré viedli ku veľkým chybám v kompenzácii. Z priebehov je viditeľný pokles nameraných hladín akustických tlakov v okolí 200 Hz o približne $0,3 \text{ dB}_{\text{SPL}}$ so vzdialenosťou zväčšujúcou sa po štyroch milimetroch. Priebehy nevykazujú značné skreslenie vplyvom odrazov v komore, pretože bola dodržaná podmienka vzdialenosti mikrofónu od reproduktora v blízkom poli podľa vzťahu (2.10).



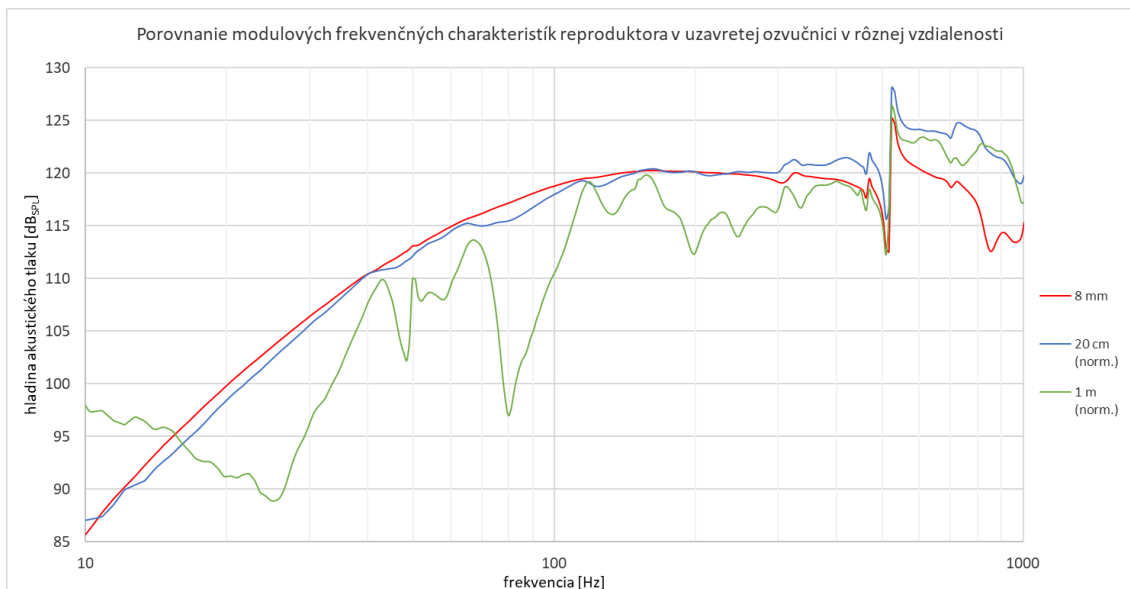
Obr. 4.1 Modulová frekvenčná charakteristika reproduktora v uzavretej ozvučnici meraná v blízkom poli reproduktorovej sústavy

4.1.2 Porovnanie meraní v blízkom a vzdialenom poli uzavretej ozvučnice

Pri meraniach vo vzdialenom poli bola zachovaná poloha modulárnej jednotky v komore, ako aj konfigurácia merania v analyzačnom programe APx500. Merací mikrofón bol umiestnený do vzdialenosti 20 cm a následne 1 m od protiprachového krytu reproduktora.

Meranie priebehu modulovej frekvenčnej charakteristiky reprosústavy v 20 centimetroch a v 1 metri vykazovalo rôzne odchýlky nameraných priebehov v danej vzdialenosti. Priebehy boli vyrátané z priemeru 8 po sebe vykonaných meraní v danej

vzdialenosti. V analyzačnom programe to umožňuje funkcia „Append Graph Data“, ktorá namerané priebehy zakreslí do jedného grafu a zároveň si uloží namerané hodnoty do pamäti. Následne exportovaním dát do MS Excel boli vytvorené samostatné listy s danými nameranými hodnotami týchto meraní. Spriemerovaním ôsmich meraní bol docielený priebeh modulovej frekvenčnej charakteristiky reprosústavy v danej vzdialenosti mikrofónu. Priebehy frekvenčných charakteristík reproduktora v uzavretej ozvučnici meraných v rôznych vzdialenostiach sú vyobrazené v Obr. 4.2.



Obr. 4.2 Modulová frekvenčná charakteristika reproduktora v uzavretej ozvučnici v blízkom a vzdialenom poli

Keďže namerané priebehy modulovej frekvenčnej charakteristiky reprosústavy v 20 centimetroch a v 1 metri vykazujú značne nižšiu úroveň merania hladiny akustického tlaku, je potrebné priebehy normalizovať do referenčnej hladiny nameranej v 8 milimetroch. Z nameraných hodnôt vo vzdialenosti meracieho mikrofónu umiestneného 8 milimetrov od protiprachového krytu reproduktora na frekvencii 200 Hz je vyrátaná vzdialenosť membrány od referenčného bodu reproduktora, ktorá predstavuje 31,32 milimetrov. Na základe tejto vzdialenosti je následne priebeh v 20 centimetroch a v 1 metri normalizovaný pomocou vzťahu pre úbytok hladiny akustického tlaku so vzdialenosťou do referenčnej roviny 8 milimetrov od protiprachového krytu reproduktora. Normalizácia týmto spôsobom vykazuje značné chyby a priebehy nie sú normalizované na korektnú úroveň. Zároveň priebehy merané vo vzdialenom poli neboli normalizované vzhľadom na pokles citlivosti reproduktora na nízkych frekvenciách o 6 dB, tzv. jav baffle step.

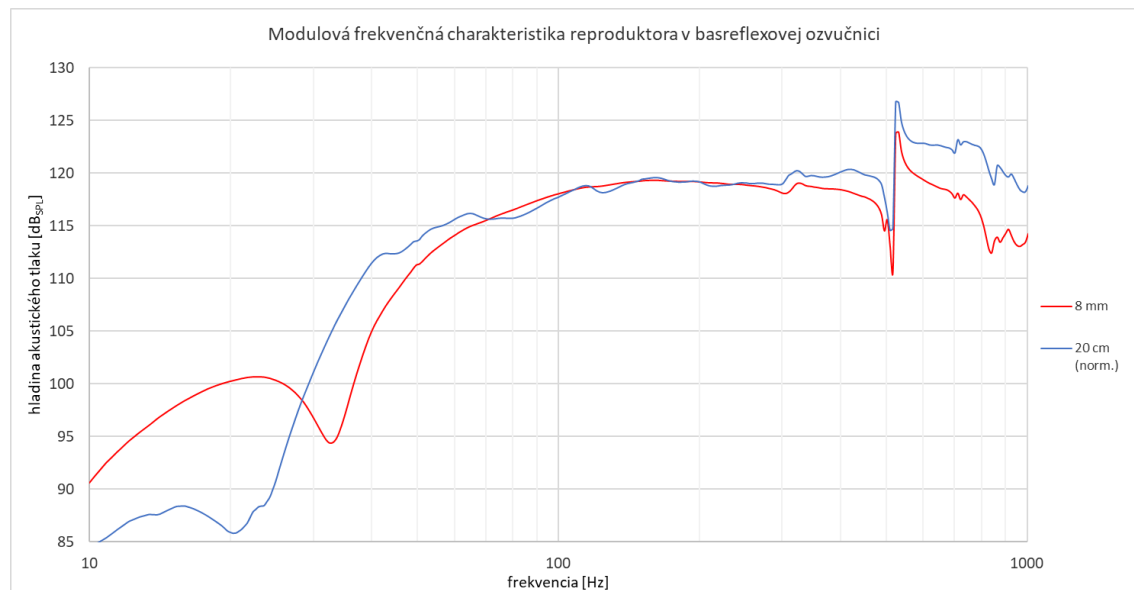
Z Obr. 4.2 je viditeľný vplyv vzdialenosti v bezodrazovej komore na meranú modulovú frekvenčnú charakteristiku reproduktora v uzavretej ozvučnici. Keďže samotná komora nie je ideálne skonštruovaná pre meranie nízkych frekvencií, tieto frekvencie sa v miestnosti odrážajú a tým interferujú s primárnou akustickou vlnou vyžiarenou reproduktorovou sústavou. To má za následok zvlnenie výslednej frekvenčnej charakteristiky reprosústavy pod medznou frekvenciou komory. Vplyv odrazov vo vzdialenosti 1 meter je tak značný, že daná vzdialenosť je pre meranie hlbokotónovej jednotky nevhodná a nebude volená v budúcom meraní.

4.2 Meranie basreflexovej konfigurácie modulárnej jednotky

Merania frekvenčných charakteristík reproduktora a basreflexového nátrubku v blízkom poli boli podrobené rovnakým postupom ako pri meraní uzavretej konfigurácie modulárnej jednotky, popísaným v 4.1. Rozdielom bolo otvorenie basreflexového nátrubku a teda aplikácia vplyvu tejto konfigurácie na výslednú frekvenčnú charakteristiku reproduktorovej sústavy. Cieľom meraní bolo vyobrazenie frekvenčných charakteristík basreflexovej konfigurácie modulárnej jednotky v blízkom poli, ako aj vplyv rôznej meracej vzdialenosti na frekvenčné charakteristiky reproduktora v basreflexovej ozvučnici a samotného basreflexového nátrubku ozvučnice.

4.2.1 Meranie reproduktora a basreflexového nátrubku

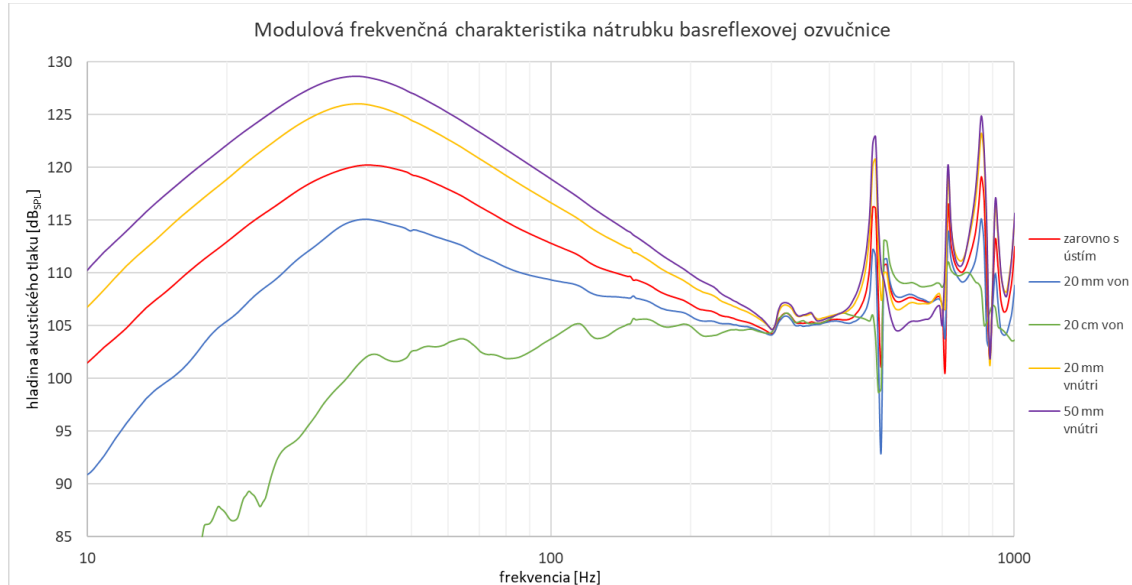
Obr. 4.3 vyobrazuje priebehy modulových frekvenčných charakteristík reproduktora v basreflexovej ozvučnici merané vo vzdialenosti 8 milimetrov a 20 centimetrov od protiprachového krytu reproduktora. Z priebehov je viditeľný vplyv vzdialenosti a teda aj vplyv odrazeného akustického vlnenia v miestnosti v mieste mikrofónu umiestnenom v 20 centimetroch. Priebeh nameraný v 20 centimetroch bol normalizovaný vzhľadom ku referenčnej rovine v 8 milimetroch, ako opisuje podkapitola 4.1.2. Pre meranie modulovej frekvenčnej charakteristiky bol použitý modul Frequency Response programu APx500.



Obr. 4.3 Modulová frekvenčná charakteristika reproduktora v basreflexovej ozvučnici meraná v 8 mm a 20 cm.

Zároveň je viditeľný charakteristický priebeh modulovej frekvenčnej charakteristiky reproduktora umiestneného v basreflexovej ozvučnici, ktorý na nízkych frekvenciách prechádza do priebehu nátrubku. Vo vzdialenosti 20 centimetrov od reproduktora je meracím mikrofónom čiastkovo zachytená aj frekvenčná charakteristika basreflexového nátrubku. To má za následok, že priebeh modulovej frekvenčnej charakteristiky reproduktora v 20 centimetroch prechádza do celkového priebehu modulovej frekvenčnej charakteristiky basreflexovej ozvučnice, vplyvom interferencie vyžiarovaných akustických signálov reproduktora a nátrubku.

Meranie modulovej frekvenčnej charakteristiky basreflexového nátrubku bolo vykonané v rôznych vzdialenostiach smerom dovnútra a smerom od ústia basreflexového nátrubku. Priebehy nameraných hodnôt frekvenčných charakteristík nátrubku sú vyobrazené v Obr. 4.4.



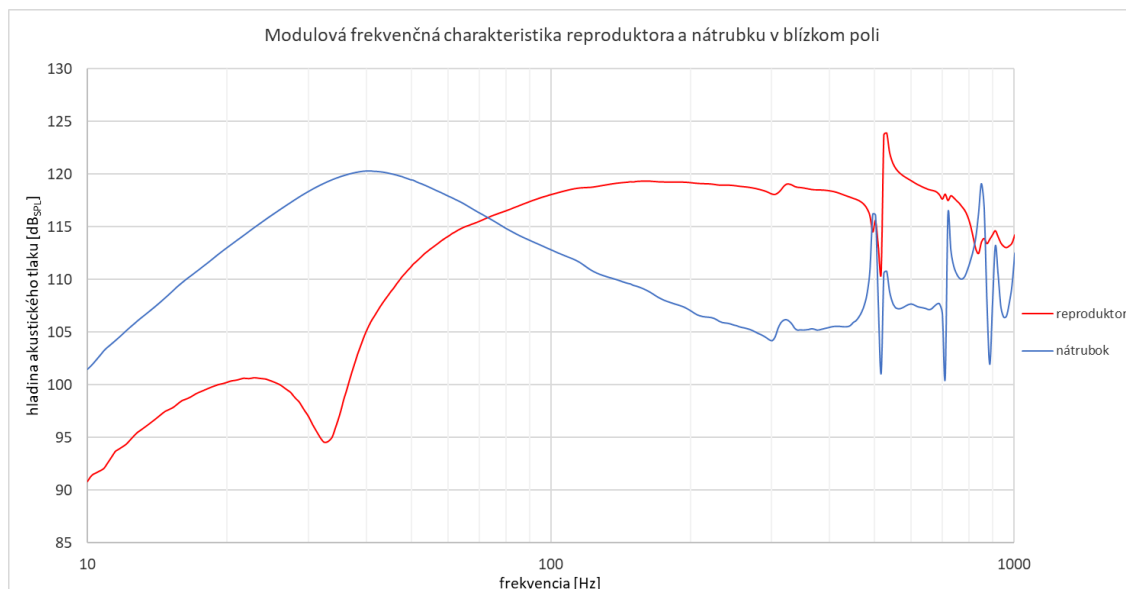
Obr. 4.4 Modulová frekvenčná charakteristika nátrubku basreflexovej ozvučnice v rôznych polohách mikrofónu

Z priebehov modulových frekvenčných charakteristík je viditeľné, že hladina akustického tlaku v okolí rezonančnej frekvencie nátrubku narastá pri meraní nátrubku smerom do vnútra, z čoho vyplýva, že referenčný bod basreflexového nátrubku sa nachádza vnútri samotného nátrubku. Namerané priebehy boli normalizované pomocou vzťahu pre úbytok hladiny akustického tlaku so vzdialenosťou do referenčnej roviny ústia nátrubku tak, ako to popisuje podkapitola 4.1.2, ktorá rovnako disponuje spomínanou chybovosťou. Vo vzdialenosti 20 centimetrov od ústia nátrubku smerom do miestnosti je viditeľný prechod modulovej frekvenčnej charakteristiky nátrubku do priebehu modulovej frekvenčnej charakteristiky basreflexovej ozvučnice vplyvom interferencie akustických signálov vyžiarených nátrubkom a reproduktorom.

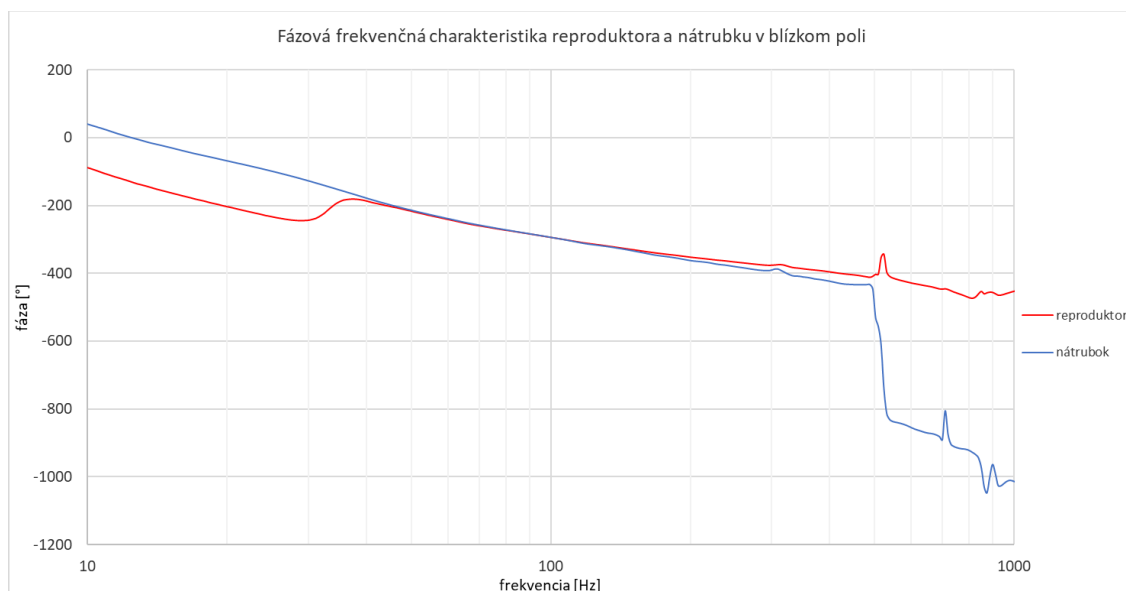
4.2.2 Meranie komplexných frekvenčných charakteristík basreflexovej ozvučnice v blízkom poli

Pre získanie celkového priebehu frekvenčnej charakteristiky basreflexovej konfigurácie modulárnej jednotky v blízkom poli bolo potrebné vykonať samostatné meranie reproduktora a nátrubku v blízkom poli. Priebehy komplexných frekvenčných charakteristík boli získané pomocou meraní Acoustic Response v analyzačnom programe APx500, jej princíp je opísaný v podkapitole 3.2.3. Merací mikrofón bol umiestnený 8 milimetrov od protiprachového uzáveru reproduktora, po vykonanom meraní Acoustic Response a exportovaní dát bol mikrofón umiestnený zarovno s ústím basreflexového nátrubku a meranie bolo opakované. Export bol nastavený na 1000 bodov v logaritmickej mierke pre výslednú modulovú a fázovú frekvenčnú charakteristiku, čím bol docieľený rovnaký rozostup nameraných hodnôt v rámci zvoleného frekvenčného rozsahu merania.

Modulová a fázová frekvenčná charakteristika reproduktora a basreflexového nátrubku je vyobrazená v Obr. 4.5 a Obr. 4.6. Priebehy sú priamo obrazom nameraných hodnôt bez normalizácie. Fázový skok o 360° v okolí 500 Hz je pravdepodobne spôsobený chybovosťou meracej metódy Acoustic Response programu APx500, na výsledný priebeh celkovej frekvenčnej charakteristiky basreflexovej ozvučnice ale nemá praktický vplyv, ako bude ukázané v nasledujúcej časti.



Obr. 4.5 Modulová frekvenčná charakteristika reproduktora a basreflexového nátrubku v blízkom poli



Obr. 4.6 Fázová frekvenčná charakteristika reproduktora a basreflexového nátrubku v blízkom poli

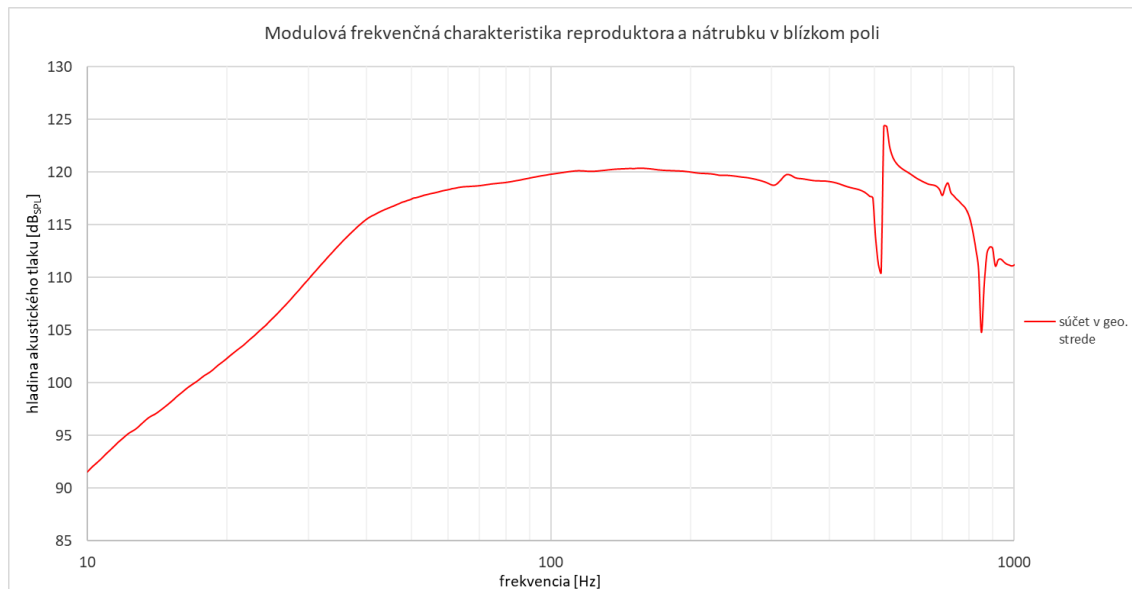
4.2.3 Komplexný súčet priebehov reproduktora a basreflexového nátrubku

Zvolenie metódy Acoustic Response bolo základom pri určení fáze reproduktora a nátrubku ozvučnice, keďže metóda Frequency Response neposkytuje možnosť merania

a vyhodnotenia údajov v časovej oblasti. Pre uskutočnenie samotného komplexného vektorového súčtu priebehov je nevyhnutná informácie o fáze akustického signálu vyžiareného reproduktorom a nátrubkom.

Pred samotným súčtom priebehov komplexných frekvenčných charakteristík je nutné previesť namerané hodnoty modulovej frekvenčnej charakteristiky reproduktora a nátrubku z hladiny akustického tlaku dB SPL na ekvivalentný akustický tlak v Pascaloch [Pa] za pomoci vzťahu (2.18). Zároveň je nutné kompenzovať namerané hodnoty modulovej frekvenčnej charakteristiky nátrubku druhou odmocninou podielu efektívnej vyžarovacej plochy nátrubku a reproduktora.

Následne sú hodnoty modulu a fázy vyjadrené v polárnom komplexnom tvare, prevedené do karteziánskej súradnicovej sústavy a sčítané pomocou komplexného vektorového súčtu koherentných vlnení (2.20). Z takto vyrátaného komplexného priebehu sú spätným prevodom do polárneho tvaru zistené hodnoty modulu [Pa] a fázy výsledného priebehu celkovej frekvenčnej charakteristiky basreflexovej ozvučnice. Prepočtom hodnôt modulu z Pa na dB_{SPL} je následne získaný priebeh modulovej frekvenčnej charakteristiky basreflexovej ozvučnice v blízkom poli. Tento priebeh je vyobrazený v Obr. 4.7.



Obr. 4.7 Celková frekvenčná charakteristika basreflexovej ozvučnice v blízkom poli

Základný problém činí poloha meracieho mikrofónu pri zdrojoch zvukového vlnenia. Zatiaľ čo bol merací mikrofón polohovaný zároveň s ústím basreflexového nátrubku, vzdialenosť mikrofónu od reproduktora bola 8 milimetrov. Vzhľadom ku faktu, že je samotný reproduktor umiestnený „hlbšie“ v ozvučnici, než ústie basreflexového nátrubku, je výsledok komplexného vektorového súčtu meraných priebehov pomyselné vnútri ozvučnice v geometrickom strede medzi reproduktorom a ústím nátrubku. Pre korektné vyjadrenie celkovej frekvenčnej charakteristiky ozvučnice pomocou simulovaného merania v konkrétnom bode priestoru bude nutné hodnoty modulovej a fázovej frekvenčnej charakteristiky jednotlivých zdrojov akustického vlnenia normalizovať tak, ako to popisuje kapitola 2.6. Tento postup bude vykonaný v rámci nasledujúceho postupu pozorovania javov ovplyvňujúcich meranie frekvenčných charakteristík hlbokotónovej jednotky a porovnania jednotlivých konfigurácií OM4.

5. MERANIE MODULÁRNEJ HLBOKOTÓNOVEJ JEDNOTKY OM4

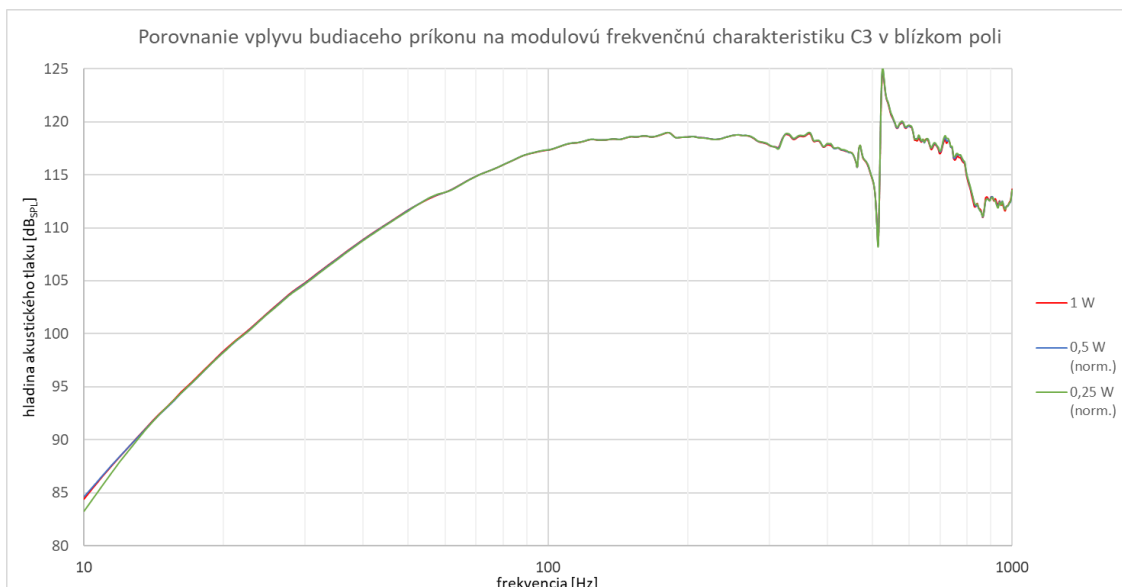
Vzhľadom na parametre konfigurácií hlbokotónovej jednotky OM4, vid'. Príloha B –, je možná špecifikácia jednotnej hornej maximálnej frekvencie, po ktorú sú merania frekvenčných charakteristík OM4 v blízkom poli validné. Maximálna horná frekvencia merania v blízkom poli hlbokotónovej jednotky OM4 predstavuje $f_{\max} = 405,5$ Hz vzhľadom na najmenší rozmer ozvučnice $d_{\min} = 27$ cm. Vzďialenosť mikrofónu od membrány reproduktora v blízkom poli činila 8 mm nad protiprachovým krytom membrány, prípadne zároveň s ústím basreflexového nátrubku. Pre merania vo vzdialenom poli bola volená jednotná vzdialenosť 25 cm, vzhľadom na pozorovaný vplyv miestnosti pri testovacích meraniach. Vyhodnotenia meraní v grafoch sú v rozsahu 10 - 1000 Hz pre pozorovanie javov spojených s meraním frekvenčných charakteristík hlbokotónovej jednotky.

5.1 Javy ovplyvňujúce meranie frekvenčných charakteristík hlbokotónovej jednotky

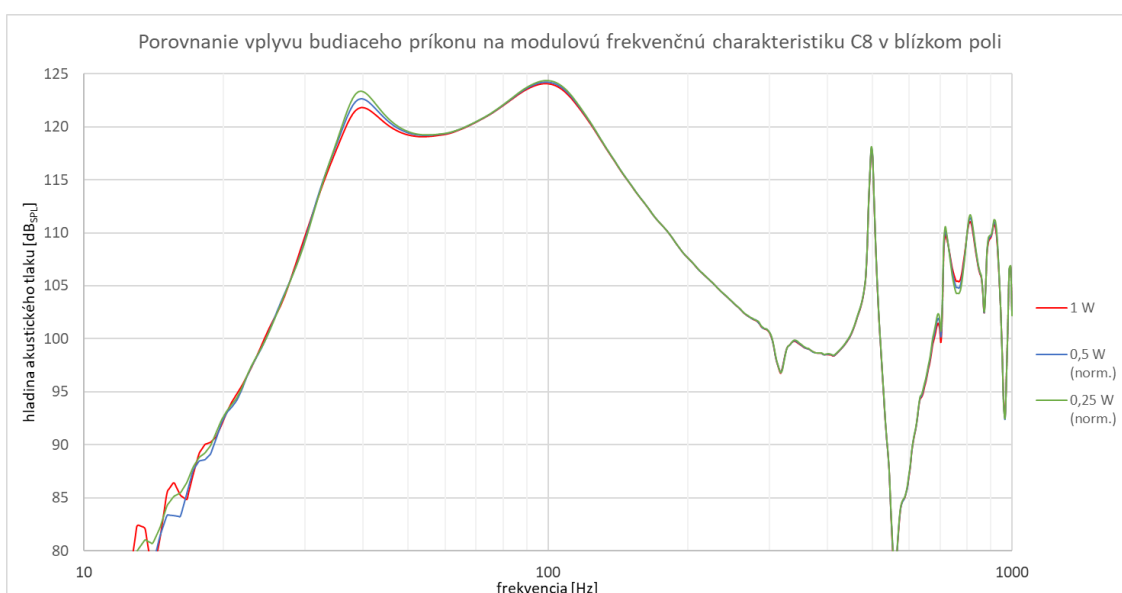
5.1.1 Vplyv hodnoty budiaceho príkonu na modulovú frekvenčnú charakteristiku OM4

Jedným zo základných faktorov, ktoré vplyvajú na meraní modulovú frekvenčnú charakteristiku reprosústavy, je samotné konštrukčné riešenie ozvučnice. Ideálne riešenie uvažuje dostatočne hrubý materiál, použitý na konštrukciu komôr, aby sa minimalizovali rezonancie samotných stien ozvučnice. V prípade stien väčších rozmerov je vhodné použitie prídavných výstuží medzi týmito stenami. Tie majú za účinok rozdelenie väčšieho panelu s určitou rezonančnou frekvenciou na panely menších rozmerov. Tieto panely majú síce vyššiu rezonančnú frekvenciu, avšak so značne menšou výchylkou zákmitu. Zároveň je predpokladom, že reproduktor je pevne osadený v jednej zo stien ozvučnice, vzhľadom na hlbokotónové reproduktory by táto stena mala byť hrubšia než zvyšné steny ozvučnice. Hrubší materiál má za výsledok útlm vibrácií koša reproduktora, čo má za následok aj menší prenos týchto vibrácií do samotnej konštrukcie ozvučnice. V prípade basreflexového nátrubku je rovnako dôležitý použitý materiál a jeho ukotvenie v ozvučnici.

Pri budení reproduktora rôznymi úrovňami budiaceho príkonu je možné pozorovať javy spojené so spomenutými faktormi na modulovú frekvenčnú charakteristiku meraného reproduktora/basreflexového nátrubku. Pri budení na vyššom príkone je meraná citlivosť reproduktora vyššia, zväčšuje sa maximálna výchylka a akustický tlak vyprodukovaný pohybom membrány a cievky reproduktora. To má vplyv na prúdenie vzduchu vnútri ozvučnice, prípadne vnútri basreflexového nátrubku a na celkovú rezonanciu stien ozvučnice. Vzhľadom na celkovú kvalitu ozvučnice je tento vplyv pozorovateľný na modulovej frekvenčnej charakteristike meraného zdroja v ozvučnici.



Obr. 5.1 Vplyv nastavenia budiaceho príkonu na mod. frek. char. C3 v blízkom poli



Obr. 5.2 Vplyv nastavenia budiaceho príkonu na mod. frek. char. C8 v blízkom poli

Grafy vyobrazujúce vplyv nastavenia budiaceho príkonu na modulovú frekvenčnú charakteristiku jednotlivých konfigurácií OM4 sú súčasťou príloh C.1 až C.8. Vzhľadom na celkovú kvalitu ozvučnice sú vyobrazené priebehy konfigurácie uzavretej ozvučnice s väčším objemom C3 a ozvučnice typu pásmový priepust 6. rádu s izobarickým zapojením reproduktorov C8. Znížením budiaceho príkonu na polovičnú hodnotu je výsledná modulová frekvenčná charakteristika meraná s poklesom úrovne o 3 dB_{SPL}. Výsledné charakteristiky sú pre čitateľnosť rozdielov v priebehoch normalizované vzhľadom ku nastaveniu budiaceho príkonu na úroveň 1 W, ktorá činí budenie reproduktora napätím 2,68 V_{rms} pri menovitej impedancii reproduktora 7,2 Ω. Pri voľbe hodnoty budiaceho signálu izobarickej konfigurácie reproduktorov je nutné počítať s polovičnou menovitou impedanciou reproduktora SPH-210, ktorá činí 3,6 Ω.

Pri znížení hodnoty budiaceho príkonu uzavretej ozvučnice C3 neboli pozorované znateľne výrazné rozdiely v priebehoch modulových frekvenčných charakteristík. Podobne sú tieto minimálne rozdiely viditeľné pri všetkých konfiguráciách uzavretej ozvučnice C1 až C4. Pri znižovaní budiaceho príkonu ozvučnice typu pásmový priepust 6. rádu C8 je viditeľný nárast dolnej rezonančnej frekvencie, ktorá priamo súvisí s parametrami zadnej komory ozvučnice. Obdobne je tento jav pozorovaný v konfigurácii C7.

Pri meraniach reproduktora v basreflexovej ozvučnici C5 a C6 je vplyv zmeny budiaceho príkonu na charakteristiku minimálny, avšak pri basreflexových nátrubkoch je viditeľný vplyv v okolí frekvencie ladenia nátrubku, kedy priebeh modulovej frekvenčnej charakteristiky nadobudne vyššej kvality, než priebeh meraný pri príkone 1 W.

Pokles priebehu so zvyšujúcou sa hodnotou budiaceho príkonu je spôsobený nedokonalosťou basreflexového nátrubku a vznikajúcim turbulentným prúdeniam vzduchu v nátrubku, ktoré ovplyvňujú modulovú frekvenčnú charakteristiku v okolí frekvencie ladenia basreflexového nátrubku konkrétnej komory.

5.1.2 Vplyv tlmenia vnútri ozvučnice na modulovú frekvenčnú charakteristiku OM4

V uzavretom priestore, do ktorého vyžaruje zdroj akustického vlnenia, dochádza ku odrazom primárnej vlny zo zdroja od stien priestoru a tým ku vzniku sekundárnych vln odrazených. V uzavretej komore ozvučnice reproduktorovej sústavy dochádza ku vzniku stojatého vlnenia vplyvom odrazov od stien komory, ktoré je definované parametrami danej komory ozvučnice. Vznikajúce stojaté vlnenie, označované ako módy priestoru, parazitne vplýva na meranú frekvenčnú charakteristiku reprosústavy v podobe rezonancií spôsobujúcich skreslenie modulovej frekvenčnej charakteristiky na frekvenciách odpovedajúcich módom daného uzavretého priestoru.

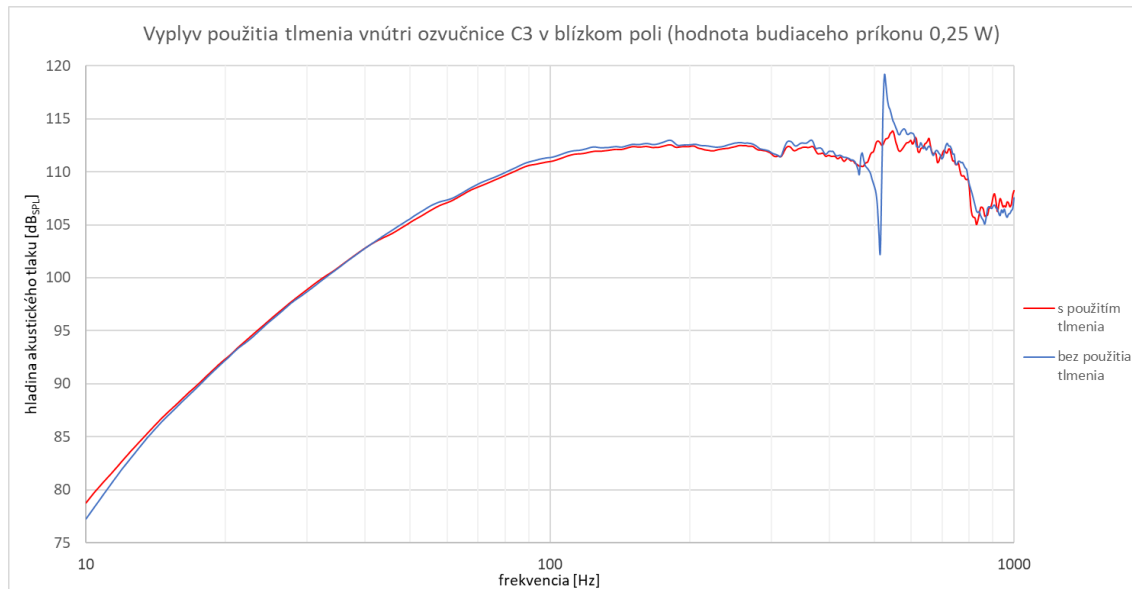
Limitácia, či prípadná eliminácia, vplyvu stojatého vlnenia vznikajúceho vnútri komory ozvučnice je možná použitím tlmiaceho materiálu vnútri komory. Tlmenie je vhodné uložiť pozdĺž všetkých stien komory rovnomerne. Je nutné brať ohľad na fakt, že vloženie tlmiaceho materiálu do vnútra uzavretej komory ozvučnice dochádza ku zmene celkového objemu komory a tým pádom ku zmene vlastností danej ozvučnice. Je vhodné voliť materiál s optimálnym činiteľom pohltivosti, ktorý by splňoval potrebu tlmenia módov v danej komore ozvučnice a zároveň by nespôsobil značný úbytok na celkovom objeme komory spôsobený nutnosťou použitia hrubšej vrstvy tlmiaceho materiálu.

Pri vkladaní tlmiaceho materiálu do vnútra ozvučnice je nutné brať ohľad na dostatočný voľný priestor za reproduktorom a basreflexovým nátrubkom. V prípade tlmenia prednej komory ozvučnice typu pásmový priepust 6. rádu je nutné brať do úvahy reproduktor a nátrubok, vyžarujúce do prednej komory, a je rovnako nutné doceliť dostatočný voľný priestor pred týmito zdrojmi akustického vlnenia.

Pri meraní vplyvu tlmenia vnútri ozvučnice hlbokotónovej jednotky OM4 bola použitá tlmiača vlna MDM-4 od firmy Monacor. Materiál je vyrobený zo 60% bavlny a 40% polyesterovými vláknami a jeho hrúbka činí 3,5 mm. Materiál bol uložený pozdĺž všetkých stien komory s ohľadom na dostatočný voľný priestor za reproduktorom/nátrubkom. Nastavenie úrovne budiaceho príkonu bolo na základe pozorovania jeho vplyvu v podkapitole 5.1.1 zvolené na hodnotu 0,25 W, čo činí budenie reproduktora o hodnote 1,34 V_{rms} pri menovitej impedancii reproduktora 7,2 Ω .

Grafy vyobrazujúce vplyv použitia tlmiaceho materiálu na modulové frekvenčné charakteristiky hlbokotónovej jednotky OM4 sú zahrnuté v prílohách D.1 až D.8.

V prípade konfigurácií uzavretej ozvučnice C1 – C4 je po aplikovaní tlmiaceho materiálu pozorovateľný jemný pokles nameranej úrovne hlasitosti, ktorý je spôsobený zmenou celkového objemu komôr ozvučníc. Značne viditeľnejší vplyv má tmenie na samotné skreslenie modulovej frekvenčnej charakteristiky spôsobené vznikajúcim stojatým vlnením vnútri ozvučnice, ktoré je ale limitované práve vďaka použitému tlmiacemu materiálu.



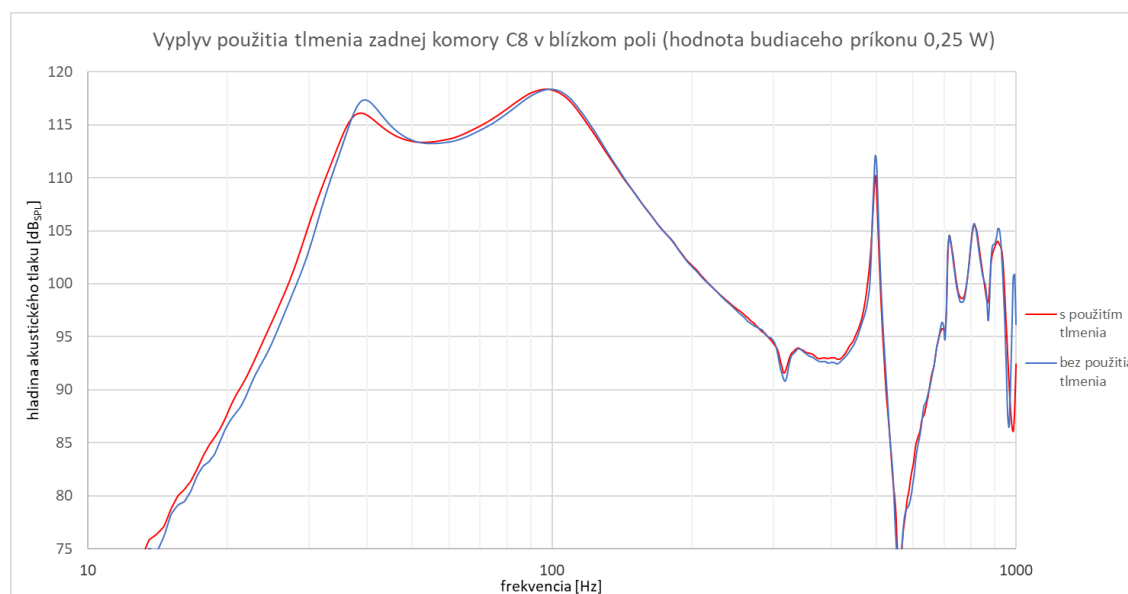
Obr. 5.3 Vplyv použitia tlmiaceho materiálu vnútri konfigurácie C3 v blízkom poli

Z grafu Obr. 5.3 je viditeľné menšie skreslenie priebehu charakteristiky a to najmä v rozsahu frekvencií nad 200 Hz. Použitím tlmenia bola značne oslabená rezonancia v priebehu v okolí 500 Hz, ktorá je priamo spojená s konštrukciou samotnej ozvučnice a jej parametrami. Zároveň zmenou objemu zadnej komory je pozorovaná jemná zmena poklesu modulu na nízkych frekvenciách.

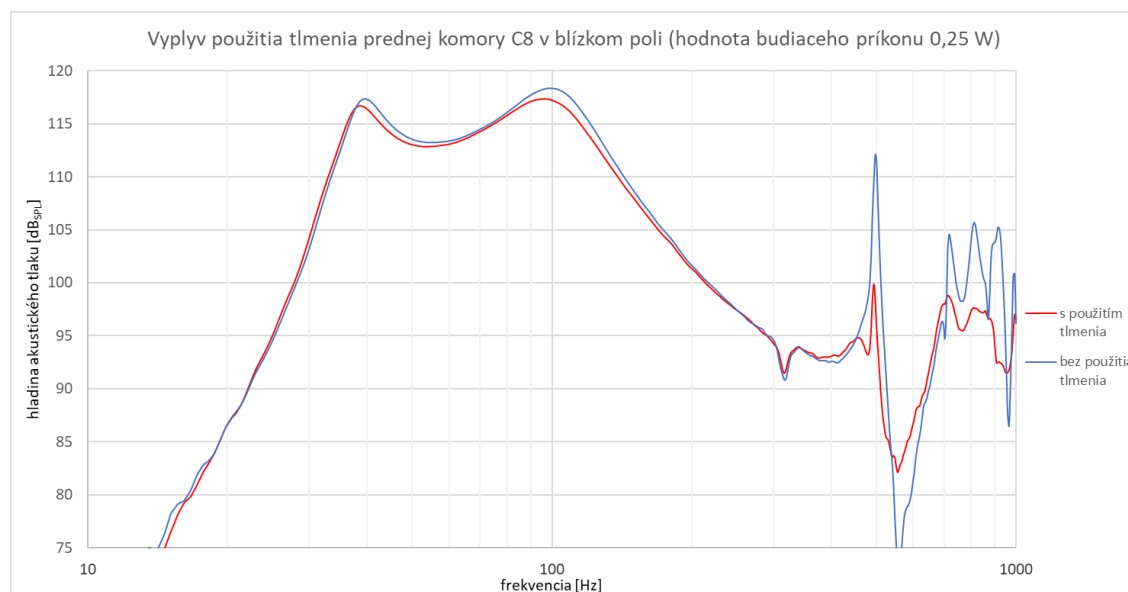
U konfigurácie typu basreflex a pásmový priepust 6. rádu dochádza rovnako ku zmene celkového vnútorného objemu komôr ozvučnice a tým pádom ku zmenám jej vlastností. Ak je materiál v ozvučnici uložený správne a nedochádza tak k nadmernému zatlmeniu reproduktorov či nátrubkov, je možné pozorovať zmeny v modulových frekvenčných charakteristikách v podobe menšieho skreslenia a zároveň posun rezonančných frekvencií do nižších hodnôt. V prílohách D.5 a D.6, ktoré vyobrazujú priebehy basreflexových konfigurácií, je vplyv značný najmä v pásme nízkych frekvencií. Priebeh nátrubku vykazuje pokles v kvalite nátrubku vzhľadom ku zmene objemu v ozvučnici. Rezonančná frekvencia nátrubku je vplyvom tlmenia posunutá do nižších frekvencií a nameraná hladina akustického tlaku v tejto frekvencii vykazuje pokles o 1,5 dB_{SPL}. Nad 200 Hz priebeh vykazuje značne menšie skreslenie spôsobené stojatým vlnením v ozvučnici. Tento vplyv nátrubku sa odzrkadľuje v meranej charakteristike reproduktora práve v okolí rezonančnej frekvencie nátrubku, kedy priebeh vykazuje zmenšenie poklesu modulu o 2 dB_{SPL} a podobne ako pri nátrubku sa tento pokles posunie do nižších frekvencií. Pri izobarickom zapojení reproduktorov

v konfigurácii C6 je pozorovaný podobný, hoci menší vplyv na charakteristiku reproduktora a nátrubku.

V prípade konfigurácií ozvučnice typu pásmový priepust 6. rádu bol tlmiaci materiál a jeho vplyv meraný pre tlmenie prednej a zadnej komory zvlášť, ako aj vplyv tlmenia oboch komôr súčasne. V prílohách označených D.7 a D.8 sú vyobrazené jednotlivé porovnania modulových frekvenčných charakteristík bez použitia tlmenia a postupne s použitím tlmenia prednej, zadnej a oboch komôr. Použitie tlmenia v konkrétnej komore ozvučnice ovplyvní parametre danej tlmej komory a vplyv sa odzrkadlí v pásme frekvencií, na ktorom je priebeh modulovej frekvenčnej charakteristiky definovaný parametrami danej komory.

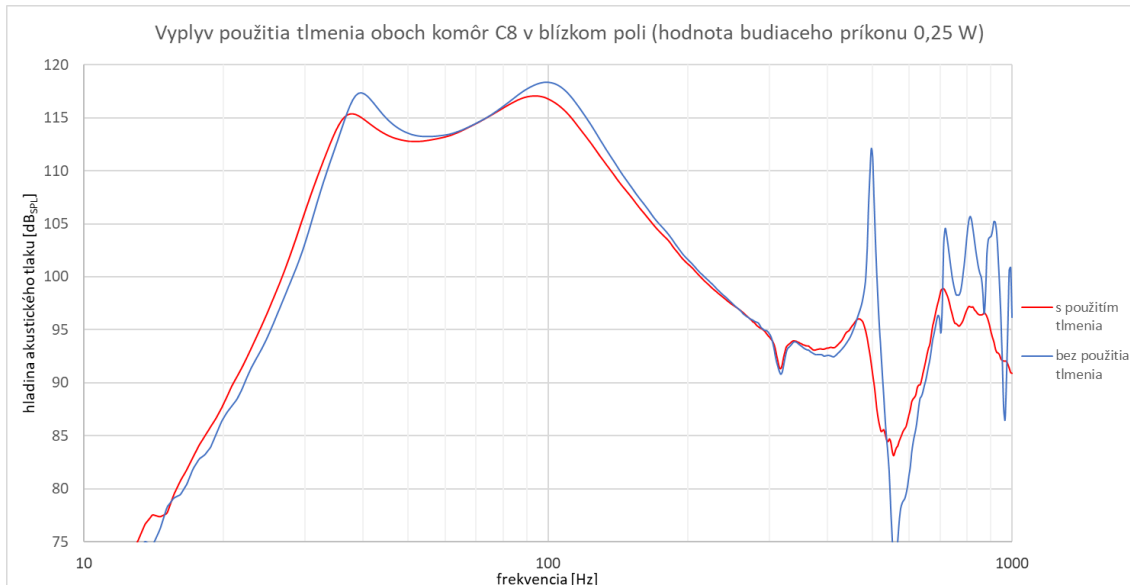


Obr. 5.4 Vplyv použitia tlmenia vnútri zadnej komory konfigurácie C8 v blízkom poli



Obr. 5.5 Vplyv použitia tlmenia vnútri prednej komory konfigurácie C8 v blízkom poli

Pri použití tlmenia vnútri zadnej komory ozvučnice, ktorá ovplyvňuje priebeh v dolnom pásme priepustu a dolnú rezonanciu v modulovej frekvenčnej charakteristike, je pozorovaný pokles modulu v okolí rezonancie o 1,5 dB_{SPL} a zároveň posun jeho maxima do nižšej frekvencie. Priebeh za pásom zvlnenia priepustu ostal bez relatívnej zmeny. Ak je použité tlmenie v prednej komore ozvučnice, ktorá funguje ako akustický dolnopriepustný filter, je pozorovaný podobný vplyv, avšak v okolí hornej rezonancie v charakteristike. Priebeh charakteristiky nadobudol nižšieho skreslenia nad hranicou 300 Hz, vplyv je pozorovateľný aj v okolí dolnej rezonancie, avšak vplyv je značne minimálny vzhľadom ku tlmeniu samotnej prednej komory.



Obr. 5.6 Vplyv použitia tlmenia vnútri oboch komôr konfigurácie C8 v blízkom poli

Ak sú obe komory ozvučnice pásmového priepustu 6. rádu tlmené súčasne, je vplyv tlmenia v samostatných komorách viditeľne väčší, no priebehom sa charakteristiky podobajú zatlmeniu jednotlivých komôr zvlášť. Dochádza k značnému zmenšeniu zvlnenia priepustného pásma, najmä u konfigurácie C7 s jednoduchým zapojením reproduktorov. Podobne aj celková úroveň nameraných priebehov je nižšia, než u merania bez použitia tlmiaceho materiálu a priebeh modulovej frekvenčnej charakteristiky nadobúda nižšie celkové skreslenie nad 300 Hz.

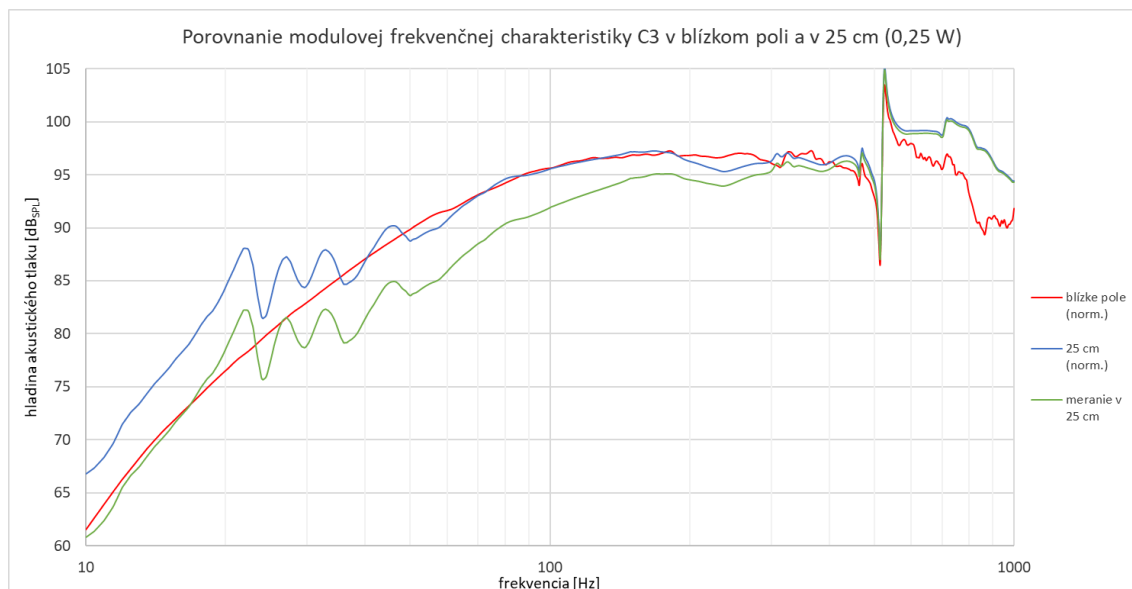
5.1.3 Porovnanie meraní v blízkom a vzdialenom poli

Pre porovnanie meraní modulárnej hlbokotónovej jednotky OM4 v blízkom a vzdialenom poli je nutná špecifikácia efektívneho priemeru membrány reproduktora bez závesu d_e podľa vzťahu (2.4), ktorá sa rovná hodnote 16,352 cm. Na základe tejto hodnoty a za predpokladu, že vzdialenosť meracieho mikrofónu vo vzdialenom poli od membrány reproduktora d je mnohonásobne väčšia než parameter d_e platí vzťah pre normalizačný rozdiel úrovni hladín akustického tlaku podľa vzorca (2.14). Ak vezmeme ohľad na efektívny frekvenčný rozsah reproduktora Monacor SPH-210 v ozvučnici, tvoriacich modulárnu hlbokotónovú jednotku OM4, sú výsledky merania frekvenčných charakteristík v blízkom poli nad úrovňou 405,5 Hz nehodnotné. Frekvenčný rozsah meraní hlbokotónovej jednotky OM4 bol preto volený do maximálnej frekvencie 1000 Hz, aby bolo možné detailnejšie pozorovať javy vplyvajúce na priebehy

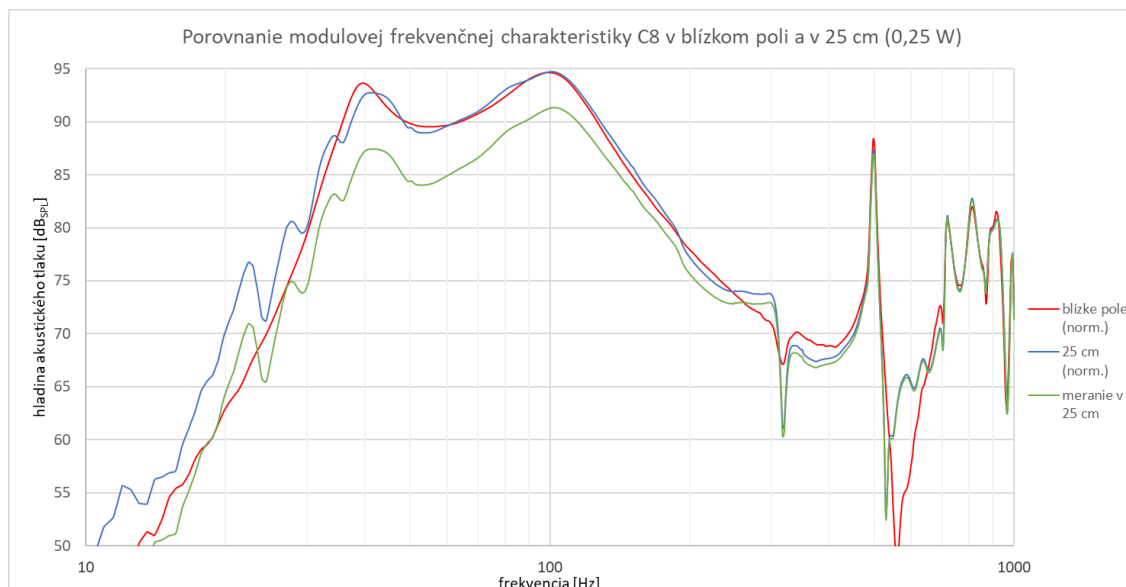
frekvenčných charakteristík v efektívnom rozsahu frekvencií hlbokotónovej jednotky OM4.

Vzhľadom na frekvenčný rozsah merania a parametre bezodrazovej komory, v ktorej boli merania vo vzdialenom poli vykonávané, bola následne určená maximálna vzdialenosť meracieho mikrofónu od reprosústavy 25 cm. V tejto vzdialenosti nedochádza k tak výrazným vplyvom odrazených akustických vln v mieste meracieho mikrofónu a to predovšetkým na nízkych frekvenciách, ktoré sú pod medznou frekvenciou bezodrazovej komory. Merací mikrofón vo vzdialenosti 1 meter, ktorá je bežne považovaná za vzdialené pole, by zaznamenal značné skreslenie modulovej frekvenčnej charakteristiky vplyvom módov bezodrazovej komory a priebeh na nízkych frekvenciách by stratil validný charakter, ako bolo poukázané pri testovacích meraniach.

Porovnanie priebehov modulových frekvenčných charakteristík meraných v blízkom poli po normalizácii vzťahom (2.14) do vzdialenosti 25 cm a priebehov priamo meraných vo vzdialenosti 25 cm je vyobrazené v grafoch, ktoré sú súčasťou príloh E.1 až E.6. Porovnanie má za účel pozorovanie funkčnosti normalizácie priebehov modulových frekvenčných charakteristík hlbokotónovej jednotky OM4 meraných v blízkom poli do určitej vzdialenosti pre následný korektný súčet komplexných frekvenčných charakteristík reproduktora a nátrubku a ich následné vyobrazenie v konkrétnom bode priestoru.



Obr. 5.7 Porovnanie modulovej frekvenčnej charakteristiky konfigurácie C3 meranej v blízkom poli a vo vzdialenosti 25 cm



Obr. 5.8 Porovnanie modulovej frekvenčnej charakteristiky konfigurácie C8 meranej v blízkom poli a vo vzdialenosti 25 cm

Normalizačný rozdiel úrovní hladín akustického tlaku (2.14) zanedbáva javy spojené s difrakciou a interferenciou sekundárnych akustických vlnení odrazených od samotnej steny ozvučnice a miestnosti a pokles citlivosti reproduktora v ozvučnici o 6 dB (tzv. baffle step). Pre korekciu priebehu vzhľadom na baffle step, bol navrhnutý pasívny high shelving filter s prenosovým pásmom 0 až -6 dB. Frekvencia inflexie bola určená zvlášť pre konkrétne konfigurácie, kedy priebeh nameraný vo vzdialenosti 25 cm vykazoval voči normalizovanému priebehu v blízkom poli pokles o 3 dB. Frekvencia inflexie konfigurácií využívajúcich jednoduchého zapojenia reproduktorov bola jednotne volená na frekvencii 125 Hz. V prípade použitia rovnakého filtra pre konfigurácie využívajúce izobarického zapojenia reproduktorov bola kompenzácia nedostatočná a teda frekvencia inflexie bola pre C2, C4 a C6 volená na 308 Hz. V prípade konfigurácií tvoriacich ozvučnicu typu pásmový priepust 6. rádu bola volená jednotná frekvencia inflexie 115 Hz. Následným pričítaním 6 dB ku priebehu kompenzovanej charakteristiky je docieľaná eliminácia javu baffle step pri meraní vo vzdialenom poli.

Po aplikovaní baffle step korekcie na priebeh modulovej frekvenčnej charakteristiky meraný vo vzdialenosti 25 cm je viditeľné, že priebeh odpovedá priebehu v blízkom poli po normalizácii do vzdialenosti 25 cm. Vplyv odrazených vln od stien bezodrazovej komory interferujúce s primárnym akustickým vlnením vyžiareným z reproduktora je jasne viditeľné v rozmedzí 10 – 90 Hz, rozsah odpovedá reálnym parametrom bezodrazovej komory.

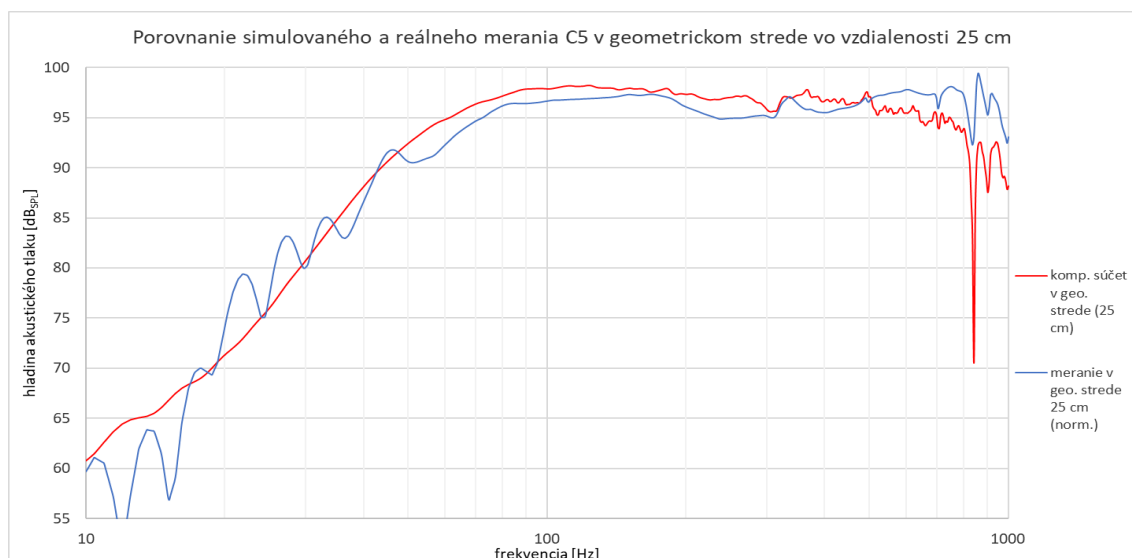
Normalizované priebehy v prípade konfigurácií uzavretej ozvučnice s jednoduchým zapojením reproduktorov po aplikácii normalizačného rozdielu odpovedajú priebehom nameraným v 25 cm po korekcii baffle step a je značne viditeľný vplyv miestnosti na modulové frekvenčné charakteristiky reproduktora v danej vzdialenosti. Pri konfiguráciách využívajúcich izobarické zapojenie reproduktorov je problematická aplikácia normalizačného rozdielu (2.14). Ten pracuje s predpokladom, že je meraný tuhý piestový rezonátor v osi vyžarovania, avšak pri meraní izobarickej kombinácie reproduktorov bol mikrofón umiestnený do vnútra koša vonkajšieho reproduktora, os meracej vložky mikrofónu smerovala do stredu kmitavej cievky reproduktora

a mikrofón bol umiestnený čo najbližšie k membráne tak, aby nedošlo ku ich kontaktu v priebehu budenia reproduktora. V tomto prípade normalizácia nabera na chybovosti pri prepočte. Priebehy je možné pozorovať v prílohe E.2 a E.4.

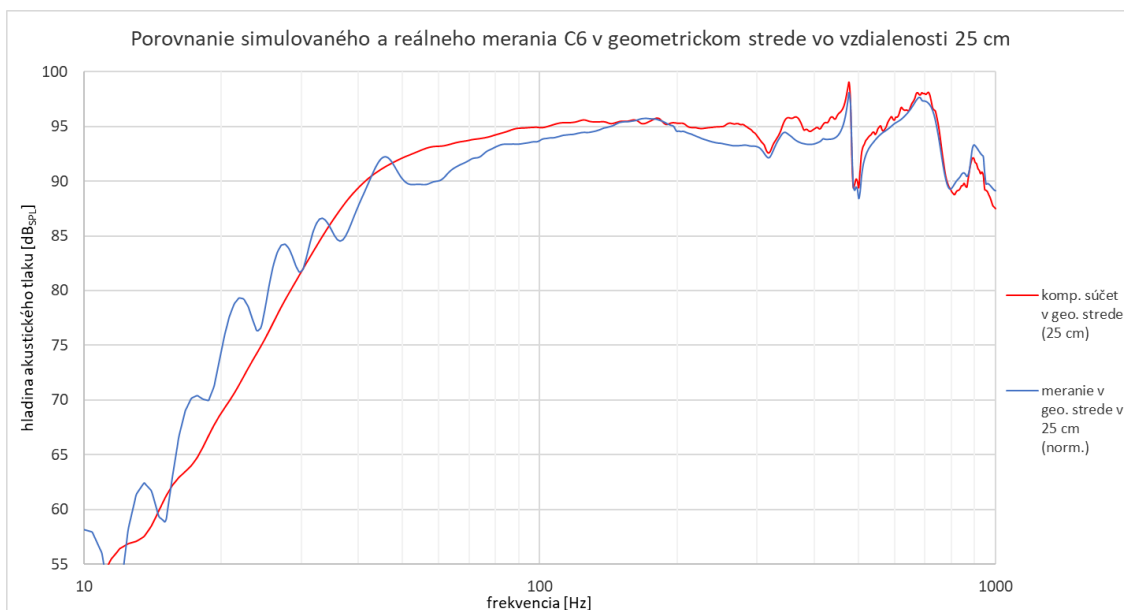
V prípade normalizácie modulových frekvenčných charakteristík konfigurácií ozvučnice typu pásmový priepust 6. rádu je parameter d_e určený vzhľadom ku nátrubkom predných komôr, pomocou ktorých tieto konfigurácie vyžarujú akustické vlnenie do priestoru uvažujúc efektívnu vyžarovaciu plochu basreflexového nátrubku. Horná maximálna frekvencia merania, pre ktorú sú výsledky merania v blízkom poli valídne, v tomto prípade korešponduje s hornou maximálnou frekvenciou meraní konfigurácií C1 až C6, keďže najmenší rozmer prednej dosky ozvučnice je rovnaký pre všetky konfigurácie OM4. Po aplikovaní normalizačného rozdielu boli docielené modulové frekvenčné charakteristiky odpovedajúce akustickému meraniu vo vzdialenosti 25 cm po korekcii baffle step a je pozorovaný vplyv miestnosti na meranie, ktorý svojou charakteristikou odpovedá meraniam uzavretej konfigurácie.

5.1.4 Súčet komplexných frekvenčných charakteristík reproduktora a nátrubku

Pre určenie korektnej celkovej frekvenčnej charakteristiky reprosústavy ako celku v konkrétnom bode priestoru boli využívané komplexné frekvenčné charakteristiky namerané v blízkom poli primárnych zdrojov akustického vlnenia. Pre získanie komplexných frekvenčných charakteristík v analyzačnom programe APx500 bolo nutné vykonanie meraní pomocou modulu Acoustic Response, ktoré poskytuje možnosť vyobrazenia priebehu modulovej aj fázovej frekvenčnej charakteristiky. Tie sú neodlúčiteľnými charakteristikami potrebnými pre korektný vektorový súčet koherentných vlnení. Merania prebehli na konfiguráciách basreflexovej ozvučnice C5 a C6 v blízkom poli reproduktorov a nátrubkov, hodnota budiaceho príkonu odpovedala hodnote 0,25 W. Namerané priebehy modulu a fáze boli postupne normalizované do konkrétneho bodu v priestore, ako to popisuje kapitola 2.6 a podobne, ako pri predchádzajúcich meraniach. Týmto bodom v priestore bol zvolený geometrický stred ozvučnice, ktorý sa nachádza uprostred priesečníka stredov reproduktora a nátrubku, vzdialenosť meracieho mikrofónu od geometrického stredu bola vzhľadom na predchádzajúce merania 25 cm.



Obr. 5.9 Porovnanie celkového priebehu konfigurácie C5 a reálneho akustického merania v geometrickom strede ozvučnice vo vzdialenosti 25 cm po korekcii baffle step



Obr. 5.10 Porovnanie celkového priebehu konfigurácie C6 a reálneho akustického merania v geometrickom strede ozvučnice vo vzdialenosti 25 cm po korekcii baffle step

Pre potreby baffle step korekcie priebehov meraných vo vzdialenosti 25 cm boli použité návrhy filtrov podľa zapojenia reproduktorov v moduloch OM4 rovnako, ako popisuje predchádzajúca podkapitola. Na priebeh modulovej frekvenčnej charakteristiky meranej vo vzdialenom poli bol aplikovaný pasívny high shelving filter s prenosom 0 až -6 dB s frekvenciou inflexie 125 Hz pre konfiguráciu C5 a 308 Hz pre izobarickú C6. Následným pričítaním 6 dB ku priebehu charakteristiky je docieľaná eliminácia javu baffle step pri meraní vo vzdialenom poli.

Pri aplikácii normalizácií bolo nutné určenie vzdialenosti simulovaného meracieho mikrofónu od jednotlivých bodov meraní v blízkom poli reproduktora a nátrubku. Na základe týchto vzdialeností bolo možné správne normalizovanie priebehov modulových a fázových frekvenčných charakteristík. Výsledné normalizované vzťahy boli sčítané komplexným vektorovým súčtom koherentných vlnení v karteziánskom súradnicovom systéme a po následnom prevode do polárneho tvaru boli vykreslené celkové modulové frekvenčné charakteristiky, vid'. Obr. 5.9 a Obr. 5.10.

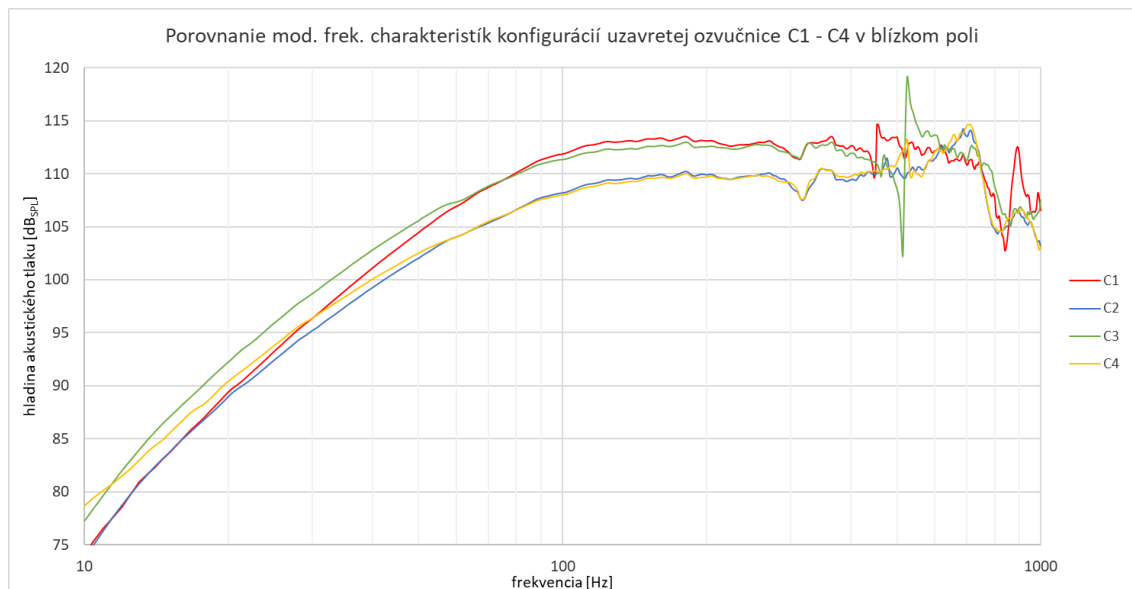
Celkový komplexný súčet po normalizácii priebehov meraných v blízkom poli nezanedbáva úbytok hladiny akustického tlaku pri šírení priestorom a fázové posuny signálov na základe zvoleného meracieho bodu v priestore. Jav poklesu citlivosti reproduktora osadeného v ozvučnici (baffle step) je do celkového priebehu možné aplikovať použitím pasívneho low shelving filtru na normalizovaný priebeh merania modulu reproduktora, v prípade nátrubku je použitý pasívny high shelving filter. Pre porovnanie meraní vo vzdialenom poli ku simulácii priebehu reprosústavy je aplikovaný filter na meranie vo vzdialenom poli pre odstránenie javu baffle step podobne, ako v 5.1.3. Z grafov je viditeľný vplyv miestnosti na celkové charakteristiky konfigurácií v rozsahu nízkych frekvencií podobne, ako pri porovnaní meraní v 5.1.3.

5.2 Porovnanie jednotlivých konfigurácií modulárnej hlbokotónovej jednotky OM4 v blízkom poli

Zložením konkrétnych modulov modulárnej hlbokotónovej jednotky OM4 je možné docieľenie 8 rôznych konfigurácií reproduktora Monacor SPH-210 v rôznych typoch ozvučníc. Umožňuje tým pozorovanie vplyvu daného typu ozvučnice a jej parametrov na výslednú frekvenčnú charakteristiku meraného reproduktora.

5.2.1 Vplyv zmeny objemu a zapojenia reproduktorov v uzavretej ozvučnici

Jednotlivé konfigurácie hlbokotónovej jednotky OM4 tvoriace typ uzavretej ozvučnice sa od seba odlišujú zapojením reproduktorov v ozvučnici a veľkosťou zadnej komory ozvučnice. V prípade jednoduchého zapojenia reproduktorov v ozvučnici, teda za použitia jediného reproduktora SPH-210 osadeného kompletne v prednej doske aktívneho modulu, je možné skombinovanie modulov do uzavretej ozvučnice s menším a väčším objemom. Rovnako tak pri izobarickej kombinácii reproduktorov v zapojení kužel na kužel (z ang. cone to cone) je možné docieľenie ozvučnice menšieho a väčšieho objemu. Pri tejto izobarickej kombinácii je na jeden z reproduktorov privedený signál v opačnej fáze, čím je docieľený pohyb oboch membrán reproduktorov v rovnakom smere a s rovnakou výchylkou.



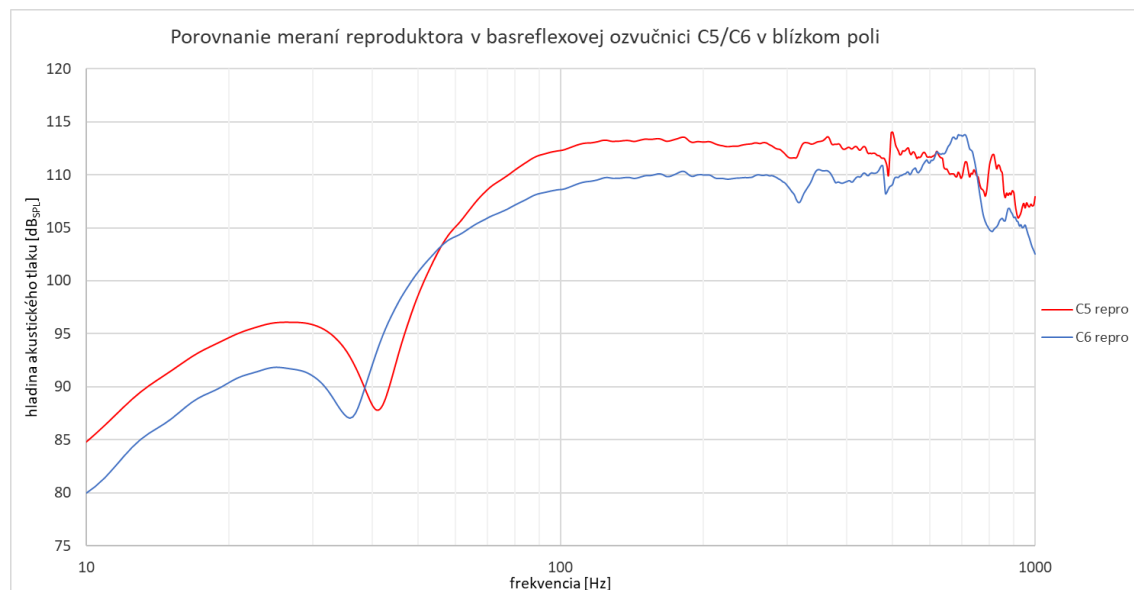
Obr. 5.11 Porovnanie meraní konfigurácií uzavretej ozvučnice v blízkom poli

Meranie modulových frekvenčných charakteristík jednotlivých konfigurácií uzavretej ozvučnice je vyobrazené na obrázku Obr. 5.11. Konfigurácie uzavretej ozvučnice s jednoduchým zapojením samotného reproduktora vykazujú vyššiu nameranú úroveň hladiny akustického tlaku. Z priebehu je možné vidieť, že pri zmenšení celkového objemu zadnej komory uzavretej ozvučnice dochádza ku prudšiemu poklesu modulovej frekvenčnej charakteristiky reproduktora na nízkych frekvenciách. V uzavretej ozvučnici väčšieho objemu je možné pozorovať vznik parazitnej rezonancie tesne nad 500 Hz, meranie v blízkom poli nad hornou maximálnou frekvenciou $f_{\max} = 405,5$ Hz však stráca validný charakter a preto výsledky nadobúdajú značného skreslenia.

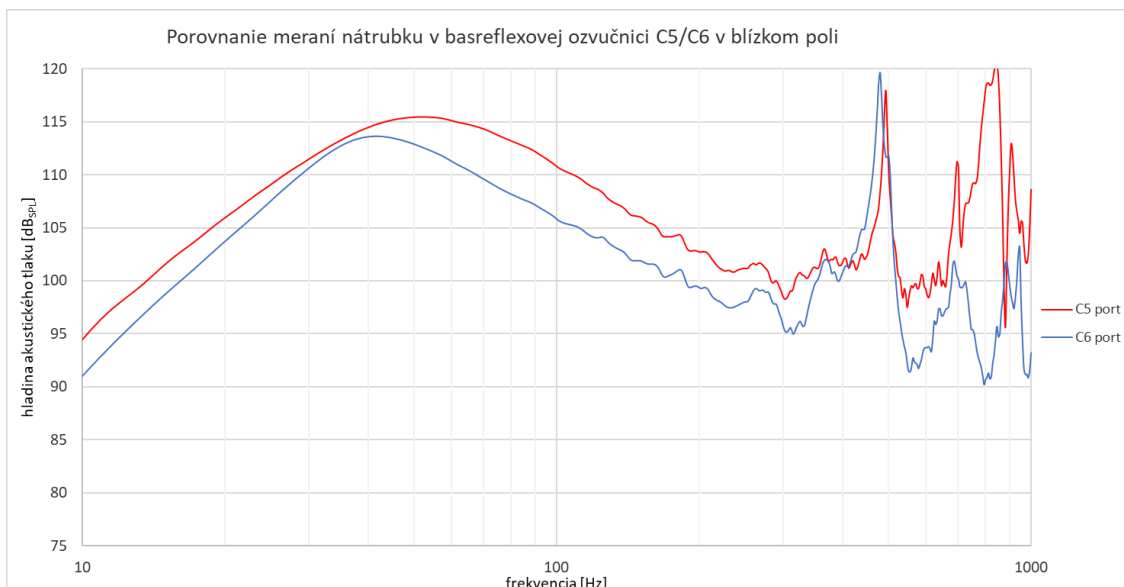
V prípade izobarického zapojenia reproduktorov v uzavretej ozvučnici je možné sledovať pokles celkovej nameranej úrovne oproti jednoduchému zapojeniu o 3 dB. Zmenou celkového objemu zadnej komory je znovu pozorovaná zmena poklesu modulovej frekvenčnej charakteristiky na nízkych frekvenciách. Obdobne ako pri konfiguráciách s jednoduchým zapojením reproduktorov sa so zmenšením vnútorného objemu ozvučnice znižuje pokles charakteristiky, avšak rozdiel v poklese je celkovo menší, ako pri jednoduchom zapojení reproduktorov. Reprodukory v izobarickej kombinácii v ozvučnici s menším objemom C2 nadobúdajú približne rovnakú rezonančnú frekvenciu, ako konfigurácia C3 s takmer dvojnásobným objemom a jednoduchým zapojením reproduktora.

5.2.2 Porovnanie meraných frekvenčných charakteristík basreflexovej ozvučnice s jednoduchým a izobarickým zapojením reproduktorov

Konštrukčné riešenie konfigurácií C5 a C6 basreflexovej ozvučnice sa celkovým objemom zadnej komory dramaticky nelíši. Rozdiel v konštrukcii je okrem zapojenia reproduktorov značný najmä v použítom basreflexovom nátrubku. Nátrubok v izobarickom aktívnom module bolo pre potreby návrhu modulárnej jednotky OM4 predĺžiť, zároveň bol použitý nátrubok s väčším vnútorným priemerom, ako pri aktívnom module s jedným reproduktorom. Vplyv zmeny objemu na modulové frekvenčné charakteristiky je preto minimálny.

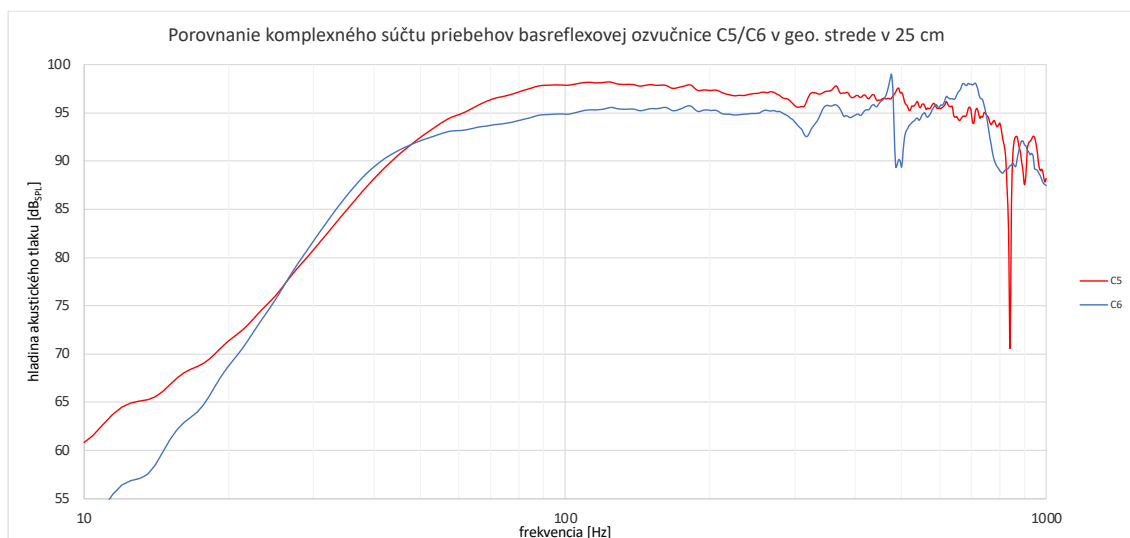


Obr. 5.12 Porovnanie meraní reproduktora v konfigurácii C5 a C6 basreflexovej ozvučnice v blízkom poli



Obr. 5.13 Porovnanie meraní nátrubku v konfigurácii C5 a C6 basreflexovej ozvučnice v blízkom poli

Pri porovnaní modulových frekvenčných charakteristík samotných reproduktorov a nátrubkov v basreflexovej ozvučnici boli použité merania v blízkom poli primárnych zdrojov. Izobarické zapojenie reproduktorov vykazuje pokles celkovej meranej citlivosti modulovej charakteristiky s poklesom 3 dB podobne, ako tomu bolo pri reproduktoroch v ozvučnici uzavretej. Na frekvencii ladenia basreflexového nátrubku dochádza ku zrovnaniu fáze kmitania vzduchu v nátrubku a samotnej membrány reproduktora a tým je tlmený jej pohyb. To má za následok viditeľný pokles modulu frekvenčnej charakteristiky v mieste maxima charakteristiky nátrubku.

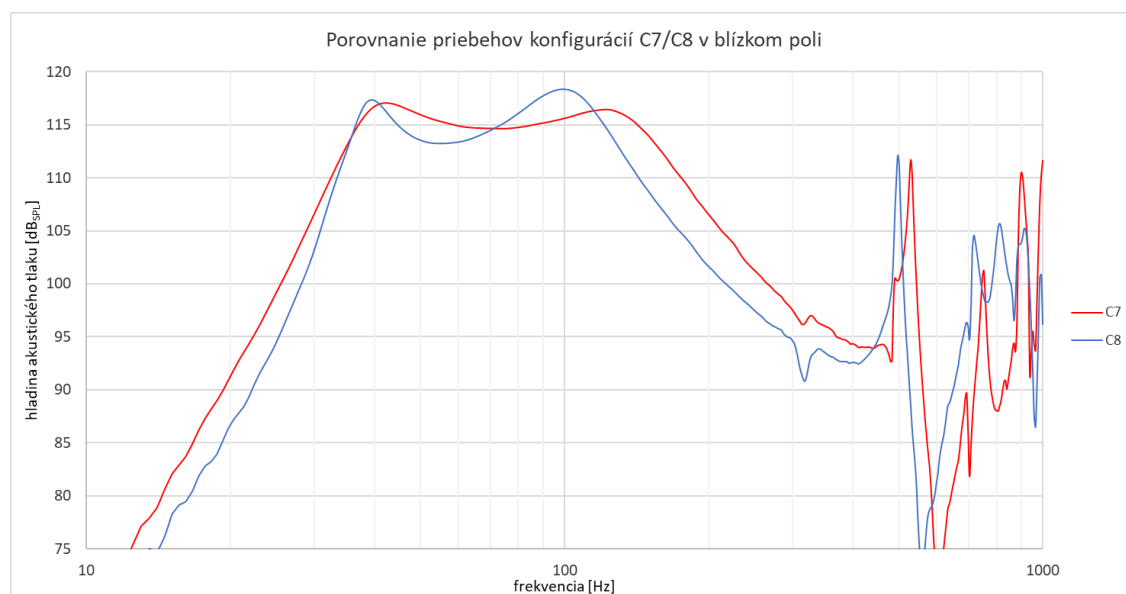


Obr. 5.14 Porovnanie komplexného súčtu priebehov konfigurácií C5 a C6 basreflexovej ozvučnice v geometrickom strede vo vzdialenosti 25 cm

Z priebehov samotných reproduktorov a nátrubkov, no obzvlášť z priebehov po komplexných súčtoch priebehov primárnych zdrojov, je viditeľné, že konfigurácia C6 s izobarickým zapojením reproduktorov vykazuje nižšiu celkovú citlivosť nameraného priebehu s rozdielom 3 dB, no zároveň vykazuje vyššiu celkovú kvalitu priebehu frekvenčnej charakteristiky na nízkych frekvenciách. Strmosť poklesu izobarickej konfigurácie je značne väčšia, avšak rezonančná frekvencia ozvučnice sa nachádza poznatelne nižšie.

5.2.3 Porovnanie modulových frekvenčných charakteristík ozvučnice typu pásmový priepust 6. rádu s jednoduchým a izobarickým zapojením reproduktorov

Výhodou konštrukcie modulov hlbokotónovej jednotky OM4 je použitie rovnakej zadnej komory ozvučnice typu pásmový priepust 6. rádu pri oboch typoch zapojenia reproduktorov v ozvučnici. Z toho vyplýva, že obe konfigurácie C7 a C8 majú rovnaké parametre zadnej komory a basreflexového nátrubku, ktorý je inštalovaný v tejto komore. Predný objem komory konfigurácie C8 avšak disponuje väčším objemom vzhľadom na izobarické zapojenie reproduktorov a teda na reproduktor zasahujúci do prednej komory, analogicky tomu je úmerne skrátený basreflexový nátrubok prednej komory, aby sa zachovalo ladenie tohto nátrubku a teda ozvučnica nestrácala na kvalite.



Obr. 5.15 Porovnanie modulových frekvenčných charakteristík konfigurácií ozvučnice typu pásmový priepust 6. rádu v blízkom poli

Z grafu je možné vidieť výsledné priebehy konfigurácií C7 a izobarickej C8. Priebeh s jednoduchým zapojením reproduktorov vykazuje značne nižšie zvlnenie priepustného pásma a jeho celkovo širší frekvenčný rozsah. Avšak priebeh izobarickej konfigurácie C8 má užšie prenosové pásmo so značným zvlnením aj napriek zachovaniu objemu zadnej komory, čo značí nedokonalosť návrhu samotnej konštrukcie izobarickej konfigurácie C8. Charakteristický pokles citlivosti izobarického zapojenia reproduktorov síce v tomto prípade nebol pozorovaný, avšak celková kvalita priepustného pásma sa značne znížila oproti jednoduchému zapojeniu reproduktora v konfigurácii C7.

6. TVORBA LABORATÓRNEJ ÚLOHY

Výstup práce predstavuje vytvorenie laboratórnej úlohy pre meranie frekvenčných charakteristík reprosústav v blízkom poli. Výsledná laboratórna úloha pozostáva zo samotného textu, ktorý predstavuje postup merania a spracovania výsledkov merania hlbokotónovej jednotky OM4, a výstupného protokolu vypracovanom v programe MS Excel. Text a výstupný protokol laboratórnej úlohy je priložený v elektronických prílohách.

6.1 Požiadavky laboratórnej úlohy

Pre potreby laboratórnej úlohy boli zvolené konkrétne konfigurácie modulárnej hlbokotónovej jednotky OM4. Vybraným konfiguráciám boli zmerané modulové frekvenčné charakteristiky v blízkom poli na meracej sústave APx. Následne boli konfigurácie zmerané na meracom systéme NTi Audio RT-2M s použitím programu RT-Eval. Z dôvodu kalibrácie mikrofónu bolo potrebné výsledky porovnať a nastaviť správnu citlivosť mikrofónu v programe RT-Eval. Ďalej boli vytvorené jednotlivé šablóny projektov v programe RT-Eval a zmerané modulové frekvenčné charakteristiky podľa zadania laboratórnej úlohy.

Pre potreby overenia nameraných výsledkov na NTi systéme a vytvorenia výstupného protokolu laboratórnej úlohy boli všetky konfigurácie nasimulované v simulačnom programe LspCad. Pre korektné spracovanie simulácií bolo nutné zmeranie reálnych T/S parametrov reproduktoru Monacor SPH-210.

6.2 Spísanie textu laboratórnej úlohy a vytvorenie výstupného protokolu

Podľa zadania laboratórnej úlohy boli spísané jednotlivé body laboratórnej úlohy. V nich bolo nutné oboznámenie s parametrami a problematikou skladania jednotlivých modulov modulárnej hlbokotónovej jednotky, vloženie tlmiaceho materiálu do vnútra ozvučnice a práca s meracím programom RT-Eval. Následne bol spísaný detailný postup merania a importovania nameraných súborov do výstupného protokolu.

Na základe postupu merania laboratórnej úlohy bol vytvorený výstupný protokol v programe MS Excel. Pre konkrétne typy dokumentov a ich formátovania boli vytvorené samostatné makrá v programovacom jazyku Visual Basic for Applications (VBA).

7. ZÁVER

Z použitých metód merania frekvenčných charakteristík modulárnej jednotky vyplýva, že pre meranie nízkych frekvencií reproduktorovej sústavy je vhodné použiť merania v blízkom poli reprosústavy. Pre zobrazenie korektnej frekvenčnej charakteristiky reprosústavy v celom jej frekvenčnom rozsahu je nutné uskutočniť merania jednotlivých primárnych zdrojov reprosústavy a po následnej normalizácii priebehov modulových a fázových charakteristík je vykonaný komplexný vektorový súčet priebehov. Týmto spôsobom je možné vykonanie simulovaného merania v akomkoľvek konkrétnom bode priestoru pred ozvučnicou bez zanedbania vplyvov na merané frekvenčné charakteristiky v konkrétnom bode. Simulované a reálne akustické meranie v geometrickom strede ozvučnice vo vzdialenosti 25 cm vykazujú správnosť postupu skladania charakteristík primárnych zdrojov do konkrétneho bodu. Pre správnosť metódy je nutné vykonanie ďalších simulovaných meraní v konkrétnych bodoch a ich porovnanie s reálnym akustickým meraním v konkrétnom bode, aby bola metóda popísaná v tejto práci overená dôslednejšie. V rámci bakalárskej práce nebol tento postup podrobený náležitému skúmaniu, prepočet do spomínaného geometrického stredu vo vzdialenosti 25 cm však súhlasí.

Pri budení reproduktora rôznou hodnotou budiaceho príkonu bolo pozorované parazitné skreslenie modulovej frekvenčnej charakteristiky v okolí frekvencie ladenia basreflexových nátrubkov vznikajúcim turbulentným prúdením vzduchu v nátrubkoch z dôvodu nedokonalosti konštrukcie nátrubkov. Z tohto hľadiska boli nasledujúce merania volené na budiacom príkone 0,25 W.

Pri použití tlmenia vnútri zadnej komory konfigurácií uzavretej ozvučnice bolo pozorované zníženie skreslenia modulovej frekvenčnej charakteristiky, ktoré je spôsobené vznikajúcim stojatým vlnením vnútri ozvučnice. V prípade konfigurácií používajúcich basreflexový nátrubok je pozorovaný vplyv zmeny celkového vnútorného objemu a tým ku zmene ladenia komory a nátrubku, vplyv sa prejavil posunutím rezonančnej frekvencie v priebehu na frekvenciách, kde je priebeh modulovej charakteristiky definovaný danou komorou. Dochádza k značnému zmenšeniu zvlnenia priepustného pásma, najmä u konfigurácie C7 s jednoduchým zapojením reproduktorov.

Z porovnaní normalizovaných charakteristík meraných v blízkom poli a vo vzdialenosti 25 cm sú viditeľné nedostatky reálnej bezodrazovej komory, najmä v pásme nízkych frekvencií. Pre porovnanie akustických meraní vo vzdialenom poli s normalizovanými priebehmi merania v blízkom poli je nutná kompenzácia javu baffle step, kedy je meraná citlivosť reproduktora na nízkych frekvenciách s poklesom 6 dB. Aplikovaním pasívneho high shelving filtru a následným kompenzovaním o 6 dB je docieľaná charakteristika zrovnateľná napríklad so simuláciou priebehu reprosústavy, či meraním v blízkom poli reprosústavy.

Konštrukčné riešenie modulárnej jednotky poskytuje možnosť osadenia reproduktora Monacor SPH-210 v rôznych typoch a objemoch ozvučníc, jednotlivé rozdiely v ozvučniciach boli pozorované vzhľadom na meranie v blízkom poli reprosústavy. Použitím menšieho objemu v uzavretej ozvučnici je docieľený prudší pokles modulovej charakteristiky. Použitím izobarického zapojenia je docieľaná nameraná úroveň modulu s rozdielom 3 dB. Použitím izobarickej kombinácie reproduktorov v ozvučnici s menším objemom je docieľaná veľmi podobná rezonančná frekvencia reproduktoru, ako pri použití jednoduchého zapojenia reproduktoru v uzavretej ozvučnici

dvojnásobného objemu. Použitím izobarickej kombinácie reproduktorov v basreflexovej ozvučnici zrovnateľného objemu bol pozorovaný charakteristický pokles modulu nameraného priebehu o 3 dB a zvýšenú kvalitu prenosu na nízkych frekvenciách. Došlo ku posunutiu rezonančnej frekvencie a tým aj k posunu poklesu modulovej frekvenčnej charakteristiky do nižších frekvencií. Avšak pri použití izobarického zapojenia reproduktorov v ozvučnici typu pásmový priepust 6. rádu bolo pozorované značné zvlnenie a zúženie priepustného pásma z dôvodu zmeny celkového objemu prednej komory ozvučnice. Charakteristický pokles nameranej úrovne o 3 dB pri použití izobarickej konfigurácie však nebol pozorovaný.

Na záver práce bola vypracovaná laboratórna úloha, ktorá sa zameriava na konkrétne konfigurácie modulárnej hlbokotónovej jednotky OM4 a ich meraní v blízkom poli. Laboratórna úloha je priamo previazaná na predchádzajúcu laboratórnu úlohu, ktorá pojednáva o návrhu samotných konfiguráciách hlbokotónovej jednotky OM4. V laboratórnej úlohe je cieľom pozorovanie rozdielov v simuláciách reálneho konštrukčného riešenia OM4 a reálnych akustických meraní daných konfigurácií v blízkom poli. Zároveň práca popisuje skladanie modulových frekvenčných charakteristík meraných v blízkom a vzdialenom poli (1 m) pre výslednú modulovú frekvenčnú charakteristiku reprosústavy ako celku v celom jej efektívnom frekvenčnom rozsahu bez skreslenia na nízkych frekvenciách. Samotný text laboratórnej úlohy, popisujúci postup merania a výstupný protokol sú k práci priložené v elektronickej podobe.

LITERATURA

- [1] TOMAN, Kamil. *Reproduktory a reprosoustavy: 1. díl*. Karviná: Dexon, 2001. ISBN 859-14-592-8080-5.
- [2] DICKASON, Vance. *The Loudspeaker Design Cookbook*. 7th Edition. Peterborough, New Hampshire: Audio Amateur Press, 2006. ISBN 1-882580-47-8.
- [3] The Subwoofer DIY Page Bandpass Systems. *The Subwoofer DIY Page* [online]. 26 October, 2018 [cit. 2021-11-27]. Dostupné z: <http://www.diysubwoofers.org/bnd/>
- [4] RAYMOND, Jimmy. 4th Order Bandpass Subwoofer Box Equations Formulas Design Calculator. *AJ Design Software* [online]. © 2002-2015 [cit. 2021-11-27]. Dostupné z: https://www.ajdesigner.com/phpsubwooferbandpass/port_length_equation.php
- [5] LILJENCRANTS, Johan. End Correction at a Flue Pipe Mouth. *Fonema* [online]. 2006-09-30 [cit. 2021-11-27]. Dostupné z: <http://www.fonema.se/mouthcorr/mouthcorr.htm>
- [6] M. Melon, C. Langrenne, D. Rousseau, and P. Herzog, "Comparison of Four Subwoofer Measurement Techniques," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 55, no. 12, pp. 1077-1091, (2007 December.). Permalink: <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=14183>
- [7] CH. J.. Struck, and ST. F.. Temme, "Simulated Free Field Measurements," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 42, no. 6, pp. 467-482, (1994 June.). Permalink: <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=6937>
- [8] MA. R.. Gander, "Ground Plane Acoustic Measurement of Loudspeaker Systems," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 30, no. 10, pp. 723-731, (1982 October.). Permalink: <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=3812>
- [9] MOLLER, Henning a Carsten THOMSEN. Electroacoustic free-field measurements in ordinary rooms — using gating techniques. *Briuel & Kjaer: B&K* [online]. , 1-13 [cit. 2021-11-30]. Dostupné z: <https://www.bksv.com/media/doc/17-196.pdf>
- [10] Near field speaker measurement using SoundEasy. *Audiojudgement* [online]. December 31, 2016 [cit. 2021-12-01]. Dostupné z: <https://audiojudgement.com/near-field-speaker-measurement-using-soundeasy/>
- [11] APx52x B Series | AUDIO ANALYZERS: Modular 2- and 4-channel performance audio analyzers. *Audio Precision* [online]. Beaverton (OR, USA): Audio Precision, c2020,2021 [cit. 2021-12-05]. Dostupné z: <https://www.ap.com/download/apx52x-series-datasheet-2/?wpdmdl=5754>
- [12] APx1701 TRANSDUCER TEST INTERFACE: Electro-Acoustic Test Accessory. *Audio Precision* [online]. Beaverton (OR, USA): Audio Precision, c2018 [cit. 2021-12-05]. Dostupné z: <https://www.ap.com/download/apx1701-datasheet/?wpdmdl=6105>

- [13] PRODUCT DATA: The NEXUS Range of Conditioning Amplifiers Types 2690, 2691, 2692 and 2693. *Brüel & Kjær Sound And Vibration Measurement* [online]. Virum (Denmark): Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement, 2015-02 [cit. 2021-12-05]. Dostupné z: <https://www.bksv.com/media/doc/bp1702.pdf>
- [14] ½-INCH MICROPHONE PREAMPLIFIER, TAPERED, INCL. CABLE, 7-PIN LEMO CONNECTOR: TYPE 2669-L. *Brüel & Kjær Sound And Vibration Measurement* [online]. Virum (Denmark): Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement [cit. 2021-12-05]. Dostupné z: <https://www.bksv.com/en/transducers/acoustic/microphones/preamplifiers/2669-1>
- [15] ½" PREPOLARIZED FREE-FIELD MICROPHONE: TYPE 4189. *Brüel & Kjær Sound And Vibration Measurement* [online]. Virum (Denmark): Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement [cit. 2021-12-05]. Dostupné z: <https://www.bksv.com/en/transducers/acoustic/microphones/microphone-cartridges/4189>
- [16] APx500 User Manual. *Audio Precision* [online]. Beaverton (OR, USA): Audio Precision, c2021, June 3, 2008 [cit. 2021-12-05]. Dostupné z: <https://www.ap.com/download/apx500-user-manual-2/>
- [17] SCHIMMEL, J. *Elektroakustika*. Elektroakustika. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2013. p. 1-167. ISBN: 978-80-214-4716- 5.
- [18] HOLÍNSKÝ, Jan. *Návrh a konstrukce hlubokotónové ozvučovací jednotky - subwooferu* [online]. Brno, 2018 [cit. 2021-12-07]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/82164>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Ing. Miroslav Balík, Ph.D..
- [19] KEELE, JR., D. B. (Don). *Low-Frequency Loudspeaker Assessment by Nearfield Sound-Pressure Measurement* [online]. JAES Volume 22 Issue 3 pp. 154-162; April 1974 [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=2774>
- [20] KRIEG SCHREIBER, Michael. Phase and Comb Filtering. *SoundGirls México* [online]. [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://soundgirls.org/phase-and-comb-filtering/>

ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

Skratky:

BP (NF)	blízke pole (z ang. near field)
EBP	Efficiency Bandwidth Product
ETC	Energy Time Curve
FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačných technológií
FFT	fast Fourier transform
HSF	high shelving filter
LSF	low shelving filter
MS	Microsoft
PC	personal computer
PP	pásmový priepust
RSS	residual sum of squares
SNR	signal-to-noise ratio
TEDS	Transducer Electronic Data Sheet
T/S	Thiele/Small (parametre reproduktora)
USB	Universal Serial Bus
VP (FF)	vzdialené pole (z ang. far field)
VUT	Vysoké učení technické

Symboly:

b	vzdialenosť stredov reproduktorov	[m]
c_0	rýchlosť zvuku	[m/s]
d	vzdialenosť mikrofónu	[m]
d_e	efektívny priemer membrány reproduktora	[m]
d_{\max}	maximálna vzdialenosť mikrofónu pre meranie v BP	[m]
d_{\min}	najmenší rozmer ozvučnice	[m]
d_0	vzdialenosť urazená odrazenou vlnou	[m]
f	frekvencia (kmitočet)	[Hz]
f_b	rezonančná frekvencia basreflexovej ozvučnice	[Hz]
f_{bp}	rezonančná frekvencia prednej komory (PP)	[Hz]
f_c	rezonančná frekvencia uzavretej ozvučnice	[Hz]
f_{\max}	horná medzná frekvencia	[Hz]
f_{\min}	dolná medzná frekvencia	[Hz]
f_r	rezonančná frekvencia reproduktora	[Hz]
f_s	prechodová frekvencia	[Hz]
$f_{s\max}$	horná medz. frek. prechodovej oblasti	[Hz]
$f_{s\min}$	dolná medz. frek. prechodovej oblasti	[Hz]
h	rozmer miestnosti	[m]
H_d	frekvenčná charakteristika reproduktora	[dB _{SPL}]
H_p	frekvenčná charakteristika nátrubku	[dB _{SPL}]
H_{FF}	ekvivalentná fr. char. sústavy vo vzdialenom poli	[dB _{SPL}]
H_{NF}	frekvenčná charakteristika sústavy v blízkom poli	[dB _{SPL}]
k	vlnové číslo ($=2\pi/\lambda$)	[m ⁻¹]
k_k	konečný korekčný faktor	[m]
L_p	hladina akustického tlaku	[dB _{SPL}]

L_{BP}	hladina akustického tlaku v blízkom poli	[dB _{SPL}]
L_{VP}	hladina akustického tlaku vo vzdialenom poli	[dB _{SPL}]
$l_p (l)$	dĺžka basreflexového nátrubku	[m]
N_p	počet použitých basreflexových nátrubkov	[-]
p	akustický tlak	[Pa]
p_0	vzťažná hodnota pre 0 dB v 1 kHz ($2 \cdot 10^{-5}$)	[Pa]
p_c	amplitúda výsledného tlaku	[Pa]
p_r	meraná amplitúda reproduktora	[Pa]
p_p	meraná amplitúda nátrubku	[Pa]
p_{BP}	akustický tlak vlnenia v blízkom poli	[Pa]
p_{VP}	akustický tlak vlnenia vo vzdialenom poli	[Pa]
Q_{bp}	činiteľ akosti uzavretej zadnej komory (PP)	[-]
Q_c	celkový činiteľ akosti reproduktora v ozvučnici	[-]
Q_s	celkový činiteľ akosti obvodu reproduktora	[-]
Q_{ts}	činiteľ akosti reproduktora	[-]
r_n	normalizačný podiel	[-]
r_p	polomer basreflexového nátrubku	[m]
r_r	polomer reproduktora	[m]
R	polomer	[m]
R_n	normalizačný rozdiel úrovni meraných v BP a VP	[dB _{SPL}]
s	konštanta zvlnenia pásmového priepustu	[-]
s_p	prierez basreflexového nátrubku	[m ²]
S_d	ekvivalentná plocha membrány reproduktora	[m ²]
S_p	ekvivalentná plocha basreflexového nátrubku	[m ²]
t_{max}	dĺžka časového okna	[s]
U_0	výstupná objemová rýchlosť zdroja ak. vlnenia	[m ³ /s]
V_{as}	ekvivalentný objem reproduktora	[l]
V_b	objem ozvučnice	[l]
V_n	objem nátrubku	[dm ³]
V_p	objem prednej komory ozvučnice (PP)	[l]
V_z	objem zadnej komory ozvučnice (PP)	[l]
λ	vlnová dĺžka	[m]
ρ_0	hustota vzduchu	[kg/m ³]
φ_r	meraná fáza reproduktora	[°]
φ_p	meraná fáza nátrubku	[°]

ZOZNAM PRÍLOH

PRÍLOHA A – FOTOGRAFIA MODULOV OM4.....	62
PRÍLOHA B – VÝPIS PARAMETROV KONFIGURÁCIÍ OM4.....	63
PRÍLOHA C – VPLYV NASTAVENIA BUDIACEHO PRÍKONU NA MOD. FREK. CHAR. OM4 V BLÍZKOM POLI	67
PRÍLOHA D – VPLYV POUŽITIA TLMIAČEHO MATERIÁLU VNÚTRI OZVUČNICE NA MOD. FREK. CHAR. OM4	77
PRÍLOHA E – POROVNANIE MOD. FREK. CHAR. OM4 MERANÝCH V BLÍZKOM A VZDIALENOM POLI.....	84
PRÍLOHA F – SIMULOVANÉ MERANIE BASREFLEXOVEJ OZVUČNICE C5/C6 VO VZDIALENOSTI 25 CM OD GEO. STREDU REPROSÚSTAVY	87
PRÍLOHA G – POROVNANIE KONFIGURÁCIÍ OM4 V BLÍZKOM POLI.....	88

Príloha A – Fotografia modulov OM4

A.1 Fotografie modulov hlbokotónovej jednotky OM-4.1 až OM-4.6



Príloha B – Výpis parametrov konfigurácií OM4

B.1 Zloženie jednotlivých konfigurácií OM4

konfigurácia OM4	typ ozvučnice	zapojenie reproduktorov	zloženie modulov prednej komory	zloženie modulov zadnej komory
C1	uzavretá menšia	jednoduché	-	OM-4.1 + OM-4.7
C2	uzavretá menšia	izobarické	-	OM-4.21 + OM-4.8
C3	uzavretá väčšia	jednoduché	-	OM-4.1 + OM-4.5
C4	uzavretá väčšia	izobarické	-	OM-4.21 + OM-4.5
C5	basreflexová	jednoduché	-	OM-4.1 + OM-4.6
C6	basreflexová	izobarické	-	OM-4.22 + OM-4.8
C7	PP 6. rádu	jednoduché	OM-4.4	OM-4.1 + OM-4.7
C8	PP 6. rádu	izobarické	OM-4.3	OM-4.21 + OM-4.8

B.2 Parametre konfigurácie C1

Zadná komora ozvučnice:

- a (vnútorná hĺbka komory) = 1,85 dm
- b (vnútorná šírka komory) = 2,28 dm
- c (vnútorná výška komory) = 3,3 dm
- hrúbka stien ozvučnice = 0,2 dm
- V_z (základný objem zadnej komory) = $a * b * c = 13,92 \text{ dm}^3$
- r_p (vnútorný polomer nátrubku) = 0,25 dm
- l_p (vnútorná dĺžka nátrubku) = 1,58 dm
- s_p (vnútorný prierez nátrubku) = $19,63 \text{ cm}^2$
- V_n (objem nátrubku) = $0,31 \text{ dm}^3$
- V_{as} (objem reproduktora) = $1,07 \text{ dm}^3$
- V_c (celkový objem zadnej komory) = $V_z - V_{as} = 12,85 \text{ dm}^3$

B.3 Parametre konfigurácie C2

Zadná komora ozvučnice:

- a (vnútorná hĺbka komory) = 1,85 dm
- b (vnútorná šírka komory) = 2,28 dm
- c (vnútorná výška komory) = 3,3 dm
- hrúbka stien ozvučnice = 0,2 dm
- V_z (základný objem zadnej komory) = $a * b * c = 13,92 \text{ dm}^3$
- r_p (vnútorný polomer nátrubku) = 0,25 dm
- l_p (vnútorná dĺžka nátrubku) = 1,23 dm
- s_p (vnútorný prierez nátrubku) = $19,63 \text{ cm}^2$
- V_n (objem nátrubku) = $0,24 \text{ dm}^3$
- V_{as} (objem reproduktora) = $1,07 \text{ dm}^3$
- V_c (celkový objem zadnej komory) = $V_z - V_{as} = 12,85 \text{ dm}^3$

B.4 Parametre konfigurácie C3

Zadná komora ozvučnice:

- a (vnútorná hĺbka komory) = 3,3 dm
- b (vnútorná šírka komory) = 2,28 dm
- c (vnútorná výška komory) = 3,3 dm
- hrúbka stien ozvučnice = 0,2 dm
- V_z (základný objem zadnej komory) = $a * b * c = 24,83 \text{ dm}^3$
- r_p (vnútorný polomer nátrubku) = 0,25 dm
- l_p (vnútorná dĺžka nátrubku) = 1,58 dm
- s_p (vnútorný prierez nátrubku) = $19,63 \text{ cm}^2$
- V_n (objem nátrubku) = $0,31 \text{ dm}^3$
- V_{as} (objem reproduktora) = $1,07 \text{ dm}^3$
- V_c (celkový objem zadnej komory) = $V_z - V_{as} = 23,76 \text{ dm}^3$

B.5 Parametre konfigurácie C4

Zadná komora ozvučnice:

- a (vnútorná hĺbka komory) = 3,3 dm
- b (vnútorná šírka komory) = 2,28 dm
- c (vnútorná výška komory) = 3,3 dm
- hrúbka stien ozvučnice = 0,2 dm
- V_z (základný objem zadnej komory) = $a * b * c = 24,83 \text{ dm}^3$
- r_p (vnútorný polomer nátrubku) = 0,25 dm
- l_p (vnútorná dĺžka nátrubku) = 1,23 dm
- s_p (vnútorný prierez nátrubku) = $19,63 \text{ cm}^2$
- V_n (objem nátrubku) = $0,24 \text{ dm}^3$
- V_{as} (objem reproduktora) = $1,07 \text{ dm}^3$
- V_c (celkový objem zadnej komory) = $V_z - V_{as} = 23,76 \text{ dm}^3$

B.6 Parametre konfigurácie C5

Zadná komora ozvučnice:

- a (vnútorná hĺbka komory) = 2,13 dm
- b (vnútorná šírka komory) = 2,28 dm
- c (vnútorná výška komory) = 3,3 dm
- hrúbka stien ozvučnice = 0,2 dm
- V_z (základný objem zadnej komory) = $a * b * c = 16,03 \text{ dm}^3$
- r_p (vnútorný polomer nátrubku) = 0,25 dm
- l_p (vnútorná dĺžka nátrubku) = 1,58 dm
- s_p (vnútorný prierez nátrubku) = $19,63 \text{ cm}^2$
- V_n (objem nátrubku) = $0,31 \text{ dm}^3$
- V_{as} (objem reproduktora) = $1,07 \text{ dm}^3$
- V_c (celkový objem zadnej komory) = $V_z - V_{as} - V_n = 14,65 \text{ dm}^3$

B.7 Parametre konfigurácie C6

Zadná komora ozvučnice:

- a (vnútorná hĺbka komory) = 1,85 dm
- b (vnútorná šírka komory) = 2,28 dm
- c (vnútorná výška komory) = 3,3 dm
- hrúbka stien ozvučnice = 0,2 dm
- V_z (základný objem zadnej komory) = $a * b * c = 13,92 \text{ dm}^3$
- r_p (vnútorný polomer nátrubku) = 0,265 dm
- l_p (vnútorná dĺžka nátrubku) = 3,03 dm
- s_p (vnútorný prierez nátrubku) = $22,06 \text{ cm}^2$
- V_n (objem nátrubku) = $0,67 \text{ dm}^3$
- V_{as} (objem reproduktora) = $1,07 \text{ dm}^3$
- V_c (celkový objem zadnej komory) = $V_z - V_{as} - V_n = 12,18 \text{ dm}^3$

B.8 Parametre konfigurácie C7

Zadná komora ozvučnice:

- a (vnútorná hĺbka komory) = 1,85 dm
- b (vnútorná šírka komory) = 2,28 dm
- c (vnútorná výška komory) = 3,3 dm
- hrúbka stien ozvučnice = 0,2 dm
- V_z (základný objem zadnej komory) = $a * b * c = 13,92 \text{ dm}^3$
- r_p (vnútorný polomer nátrubku) = 0,25 dm
- l_p (vnútorná dĺžka nátrubku) = 1,58 dm
- s_p (vnútorný prierez nátrubku) = $19,63 \text{ cm}^2$
- V_n (objem nátrubku) = $0,31 \text{ dm}^3$
- V_{as} (objem reproduktora) = $1,07 \text{ dm}^3$
- V_c (celkový objem zadnej komory) = $V_z - V_{as} - V_n = 12,54 \text{ dm}^3$

Predná komora ozvučnice:

- a (vnútorná hĺbka komory) = 1,45 dm
- b (vnútorná šírka komory) = 2,28 dm
- c (vnútorná výška komory) = 3,3 dm
- hrúbka stien ozvučnice = 0,2 dm
- V_p (základný objem prednej komory) = $a * b * c = 10,91 \text{ dm}^3$
- r_p (vnútorný polomer nátrubku) = 0,325 dm
- l_p (vnútorná dĺžka nátrubku) = 1,31 dm
- s_p (vnútorný prierez nátrubku) = $33,18 \text{ cm}^2$
- V_n (objem nátrubku) = $0,43 \text{ dm}^3$
- V_c (celkový objem prednej komory) = $V_p - V_n = 10,48 \text{ dm}^3$

B.9 Parametre konfigurácie C8

Zadná komora ozvučnice:

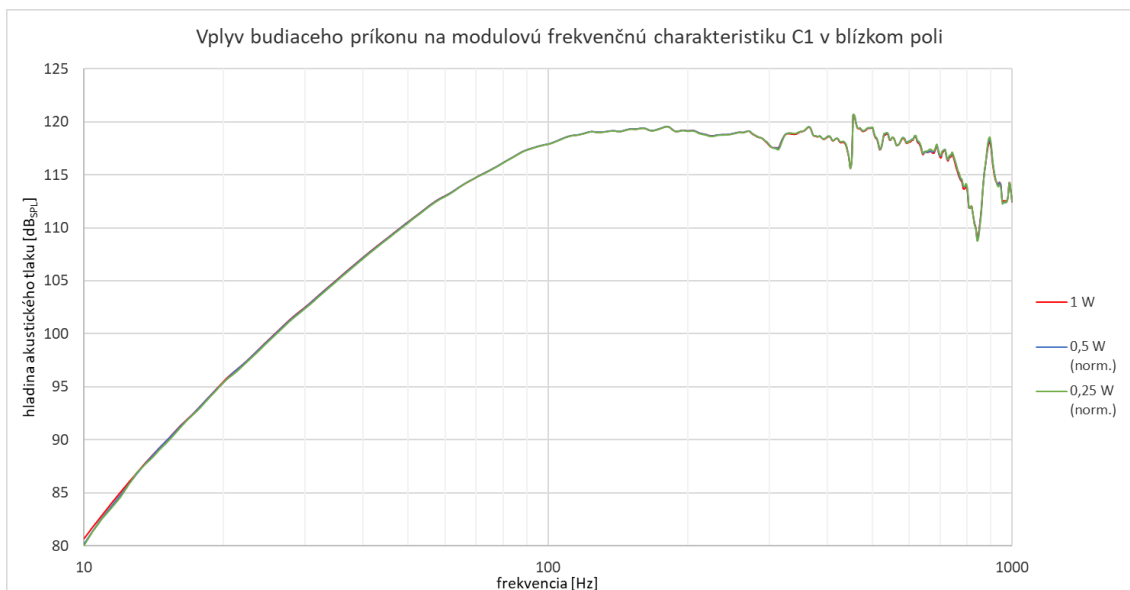
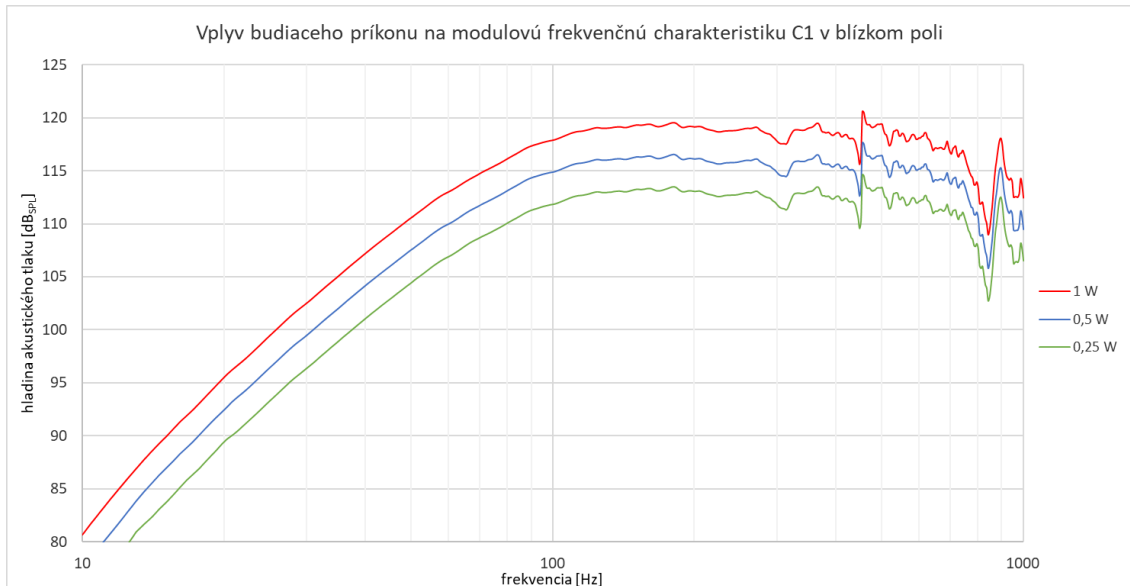
- a (vnútorná hĺbka komory) = 1,85 dm
- b (vnútorná šírka komory) = 2,28 dm
- c (vnútorná výška komory) = 3,3 dm
- hrúbka stien ozvučnice = 0,2 dm
- V_z (základný objem zadnej komory) = $a * b * c = 13,92 \text{ dm}^3$
- r_p (vnútorný polomer nátrubku) = 0,25 dm
- l_p (vnútorná dĺžka nátrubku) = 1,58 dm
- s_p (vnútorný prierez nátrubku) = $19,63 \text{ cm}^2$
- V_n (objem nátrubku) = $0,31 \text{ dm}^3$
- V_{as} (objem reproduktora) = $1,07 \text{ dm}^3$
- V_c (celkový objem zadnej komory) = $V_z - V_{as} - V_n = 12,54 \text{ dm}^3$

Predná komora ozvučnice:

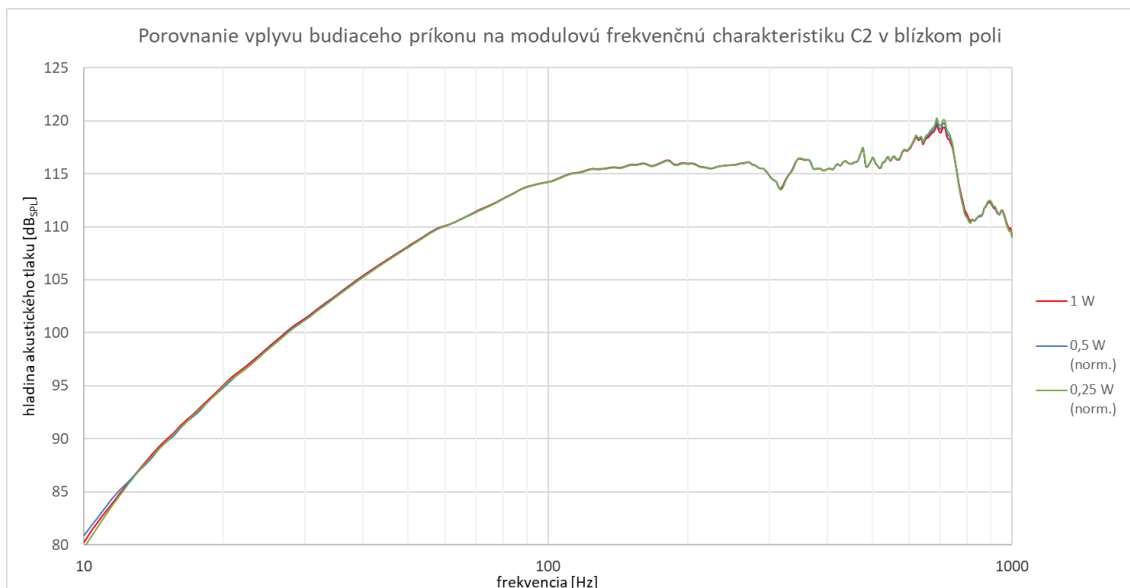
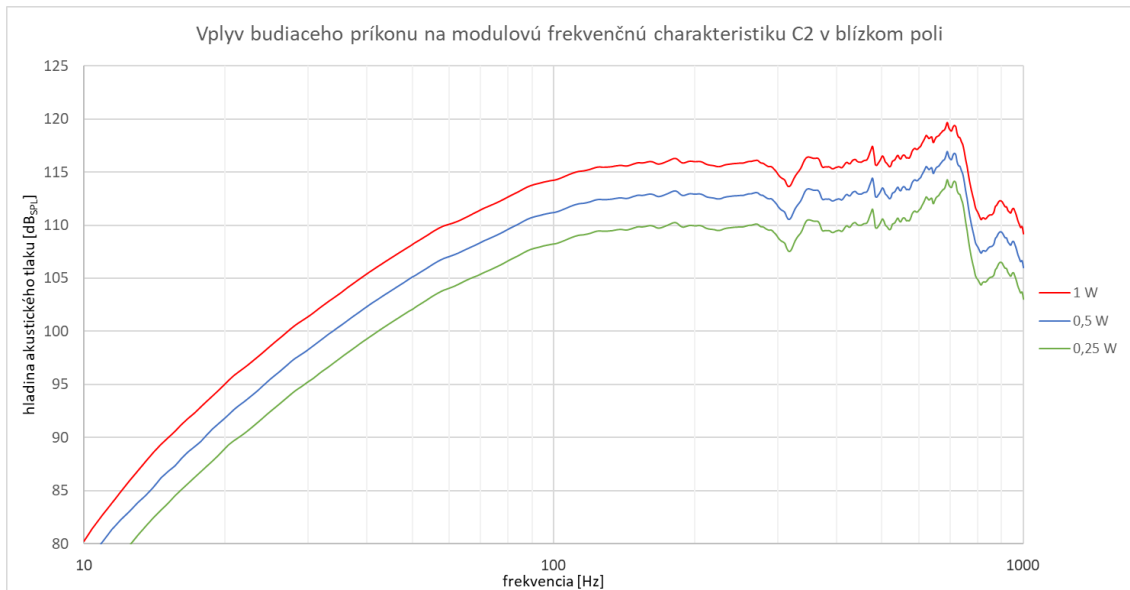
- a (vnútorná hĺbka komory) = 2,07 dm
- b (vnútorná šírka komory) = 2,28 dm
- c (vnútorná výška komory) = 3,3 dm
- hrúbka stien ozvučnice = 0,2 dm
- V_p (základný objem prednej komory) = $a * b * c = 15,57 \text{ dm}^3$
- r_p (vnútorný polomer nátrubku) = 0,325 dm
- l_p (vnútorná dĺžka nátrubku) = 1,06 dm
- s_p (vnútorný prierez nátrubku) = $33,18 \text{ cm}^2$
- V_n (objem nátrubku) = $0,35 \text{ dm}^3$
- V_{as} (objem reproduktora) = $1,07 \text{ dm}^3$
- V_c (celkový objem prednej komory) = $V_p - V_{as} - V_n = 14,15 \text{ dm}^3$

Príloha C – Vplyv nastavenia budiaceho príkonu na mod. frek. char. OM4 v blízkom poli

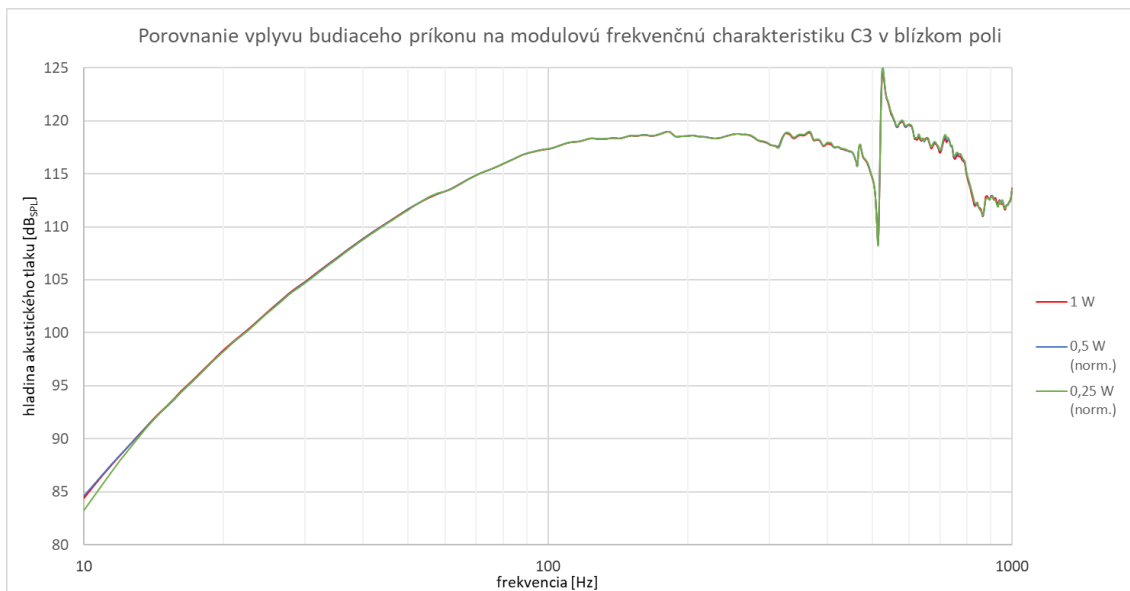
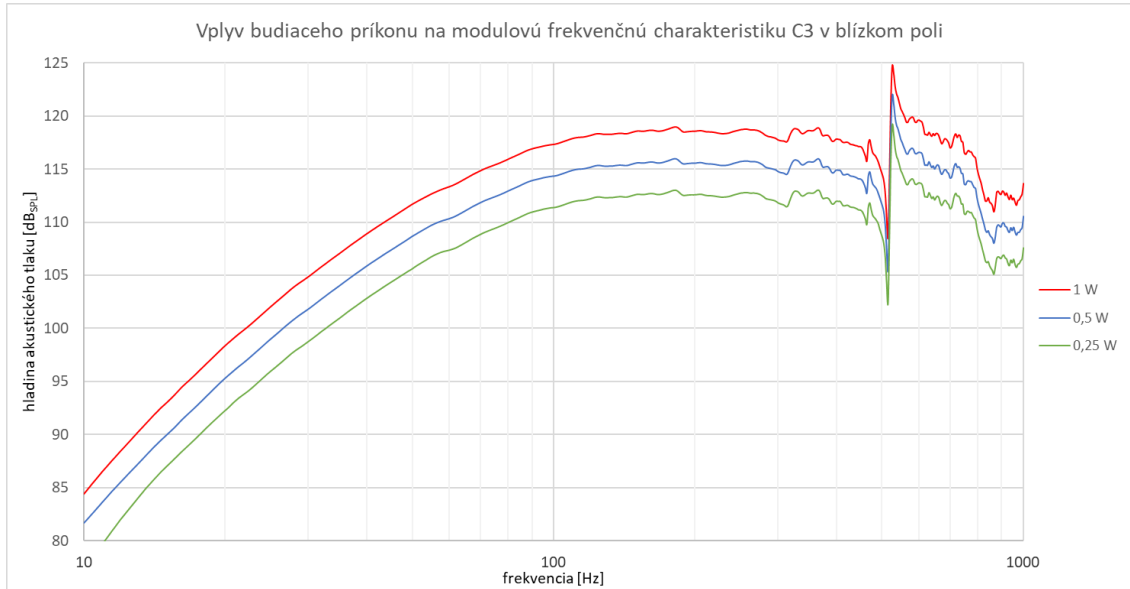
C.1 Vplyv budiaceho príkonu na mod. frek. char. C1 v BP



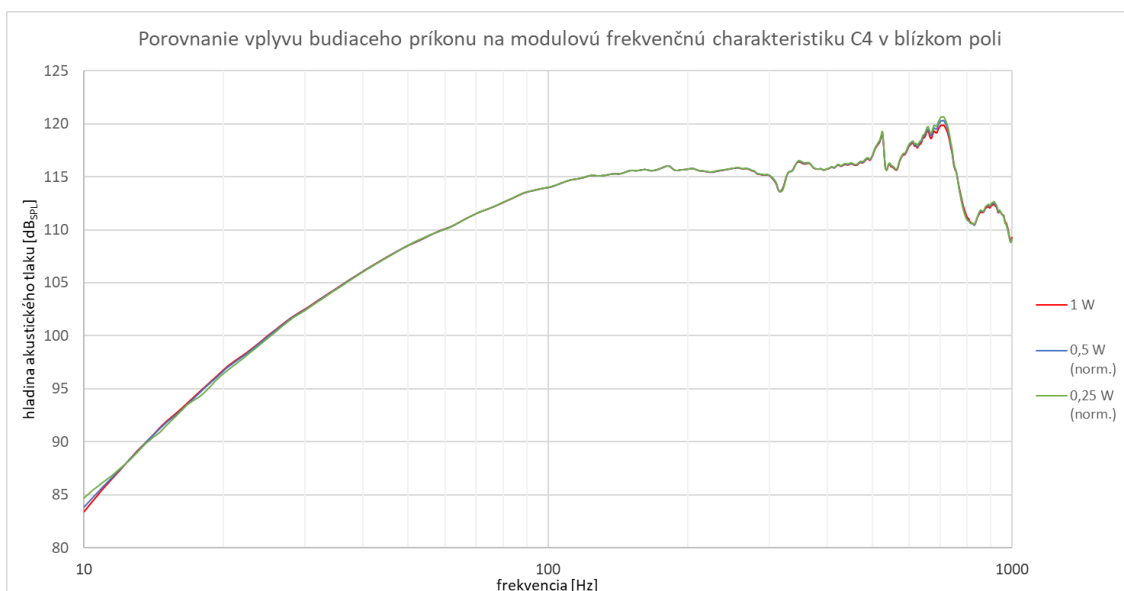
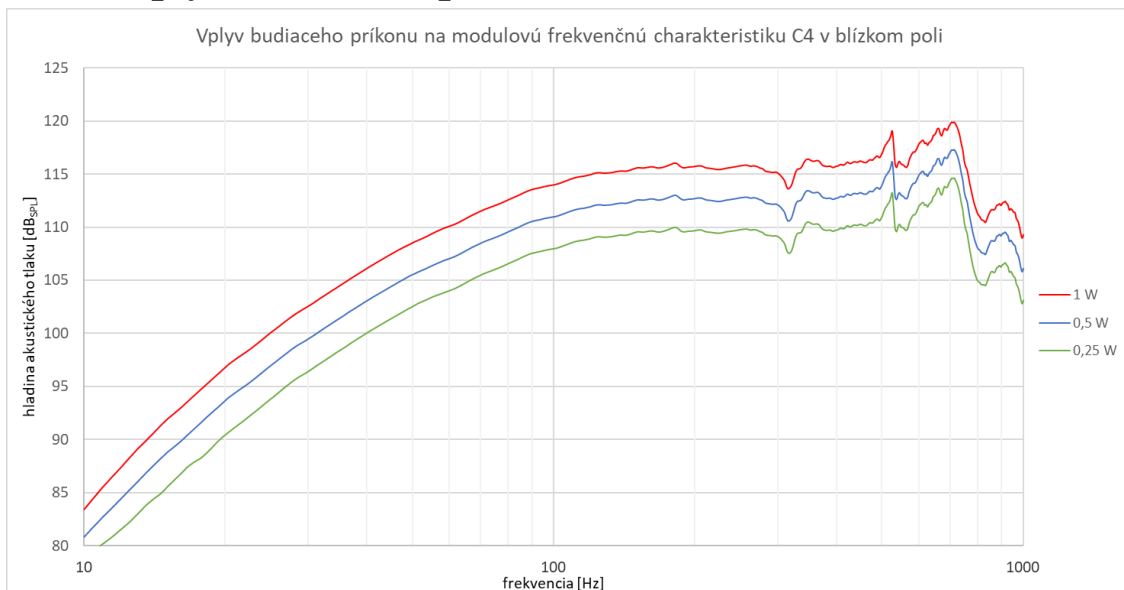
C.2 Vplyv budiaceho príkonu na mod. frek. char. C2 v BP



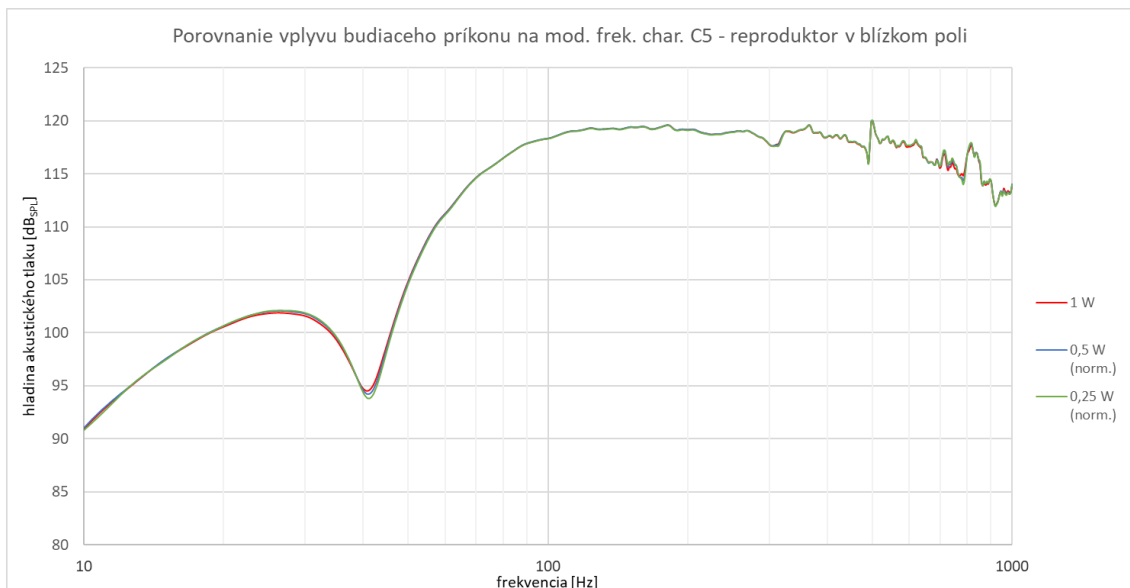
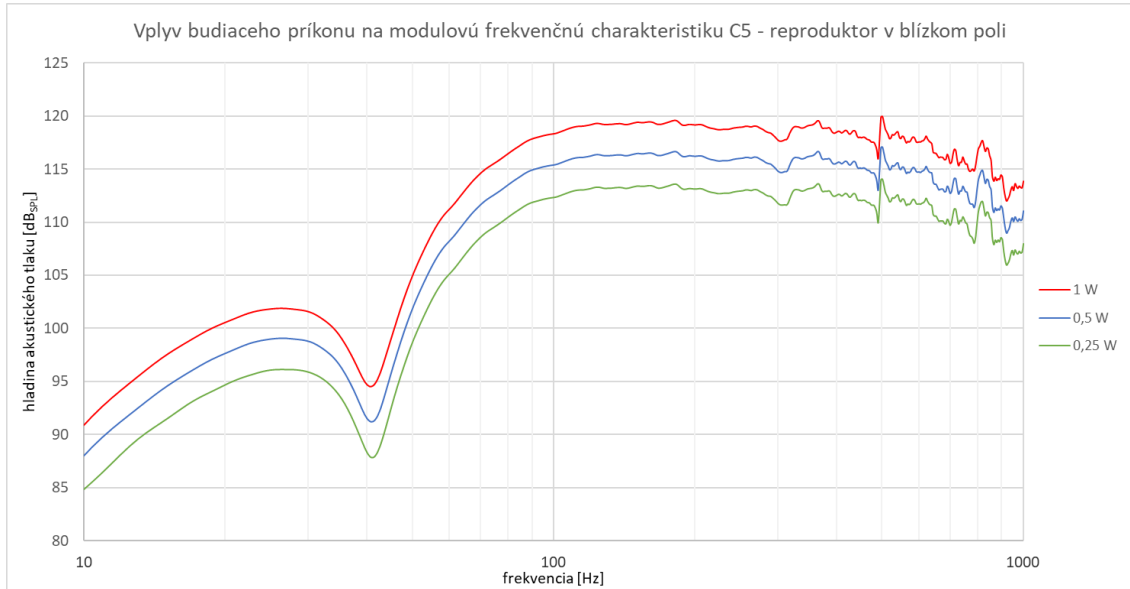
C.3 Vplyv budiaceho príkonu na mod. frek. char. C3 v BP

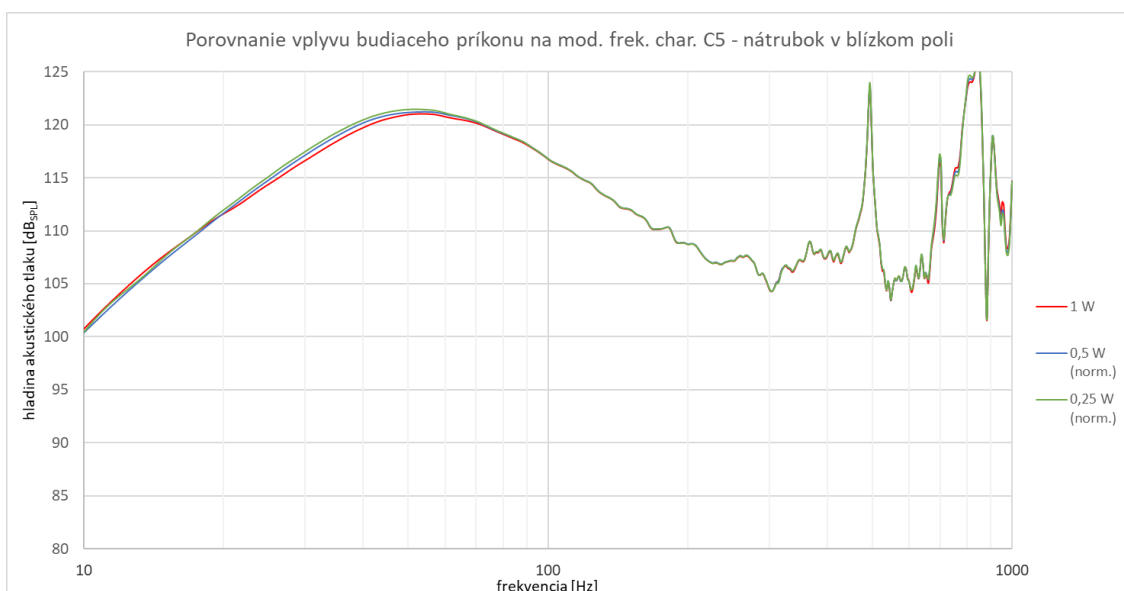
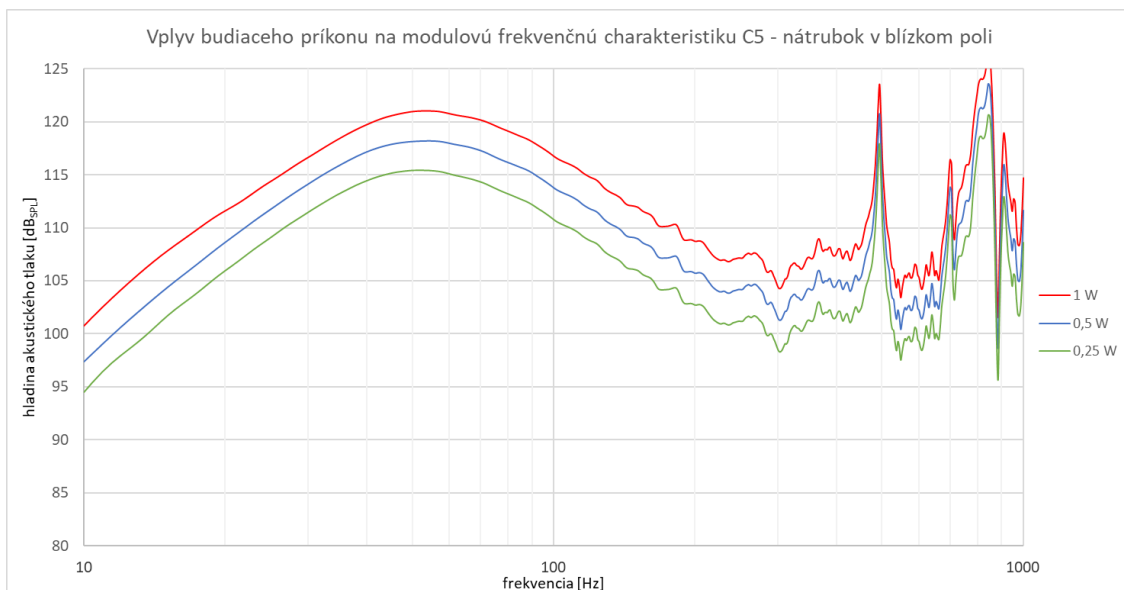


C.4 Vplyv budiaceho príkonu na mod. frek. char. C4 v BP

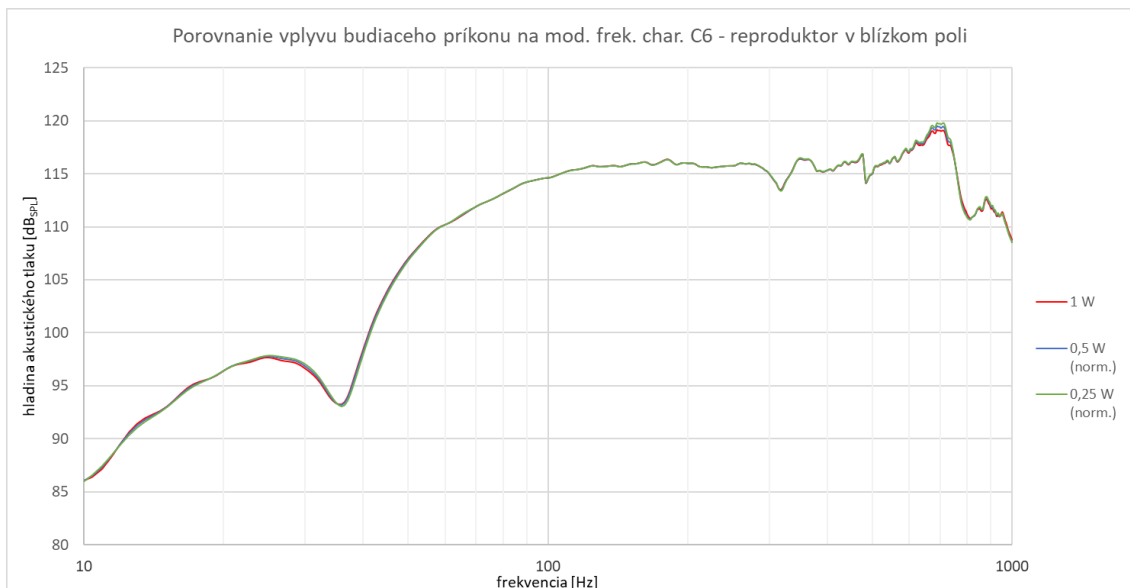
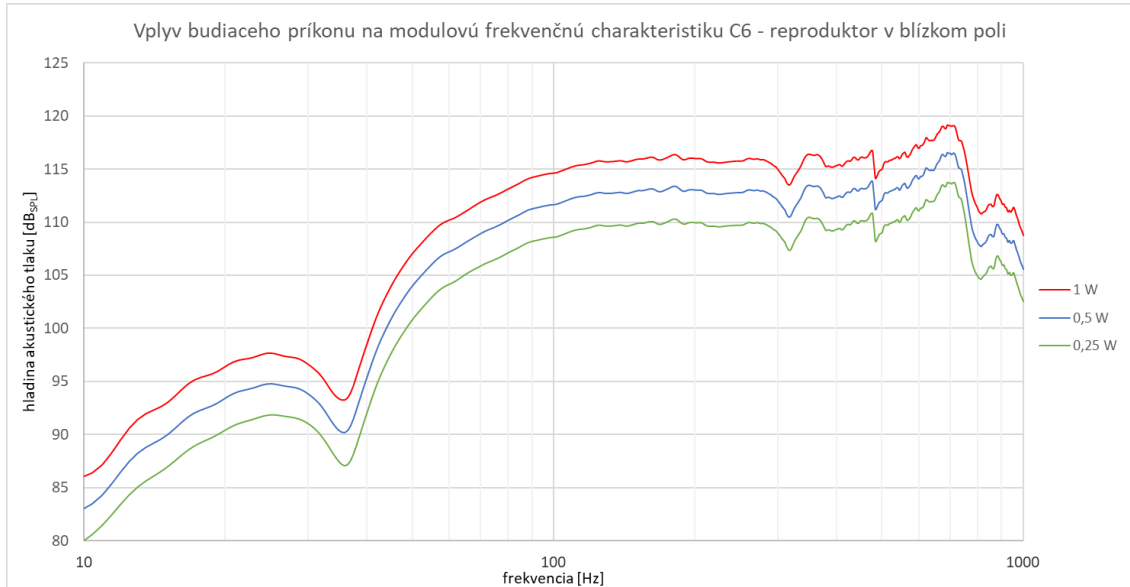


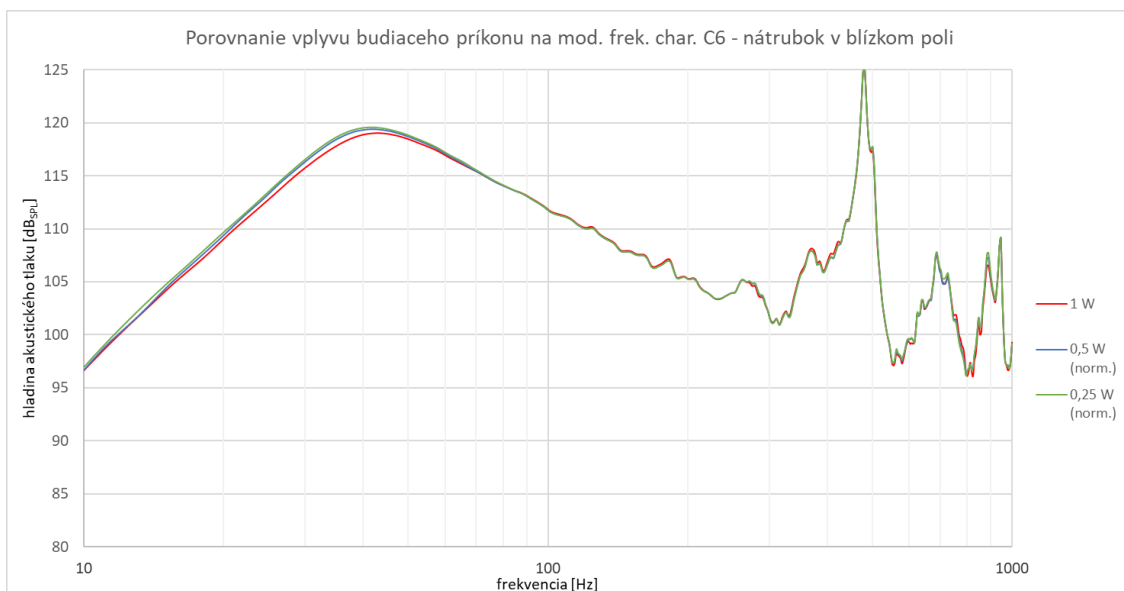
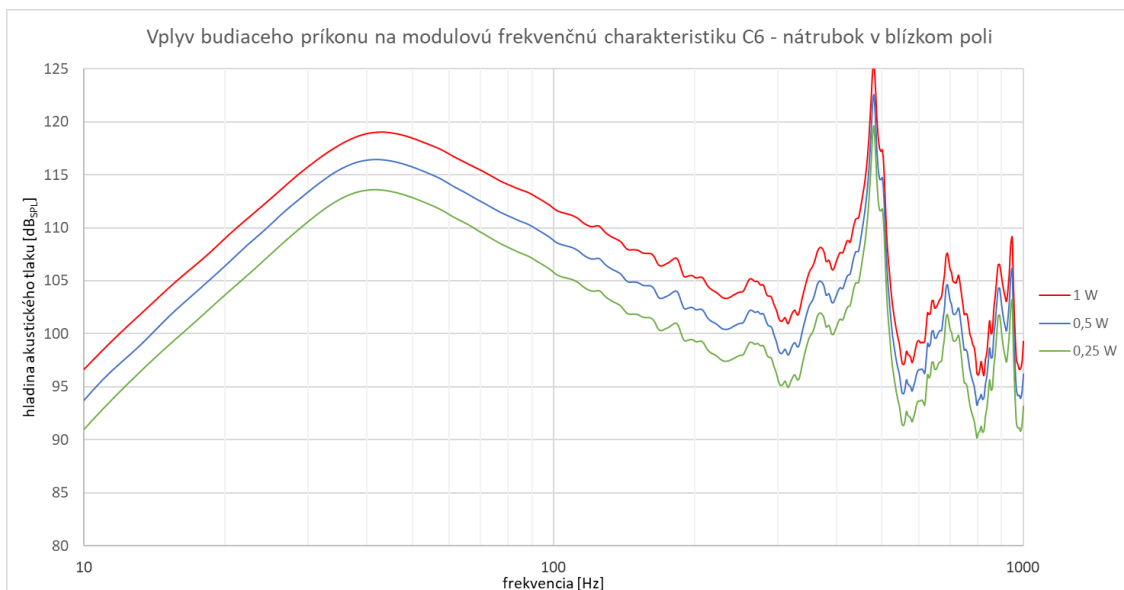
C.5 Vplyv budiaceho príkonu na mod. frek. char. C5 v BP



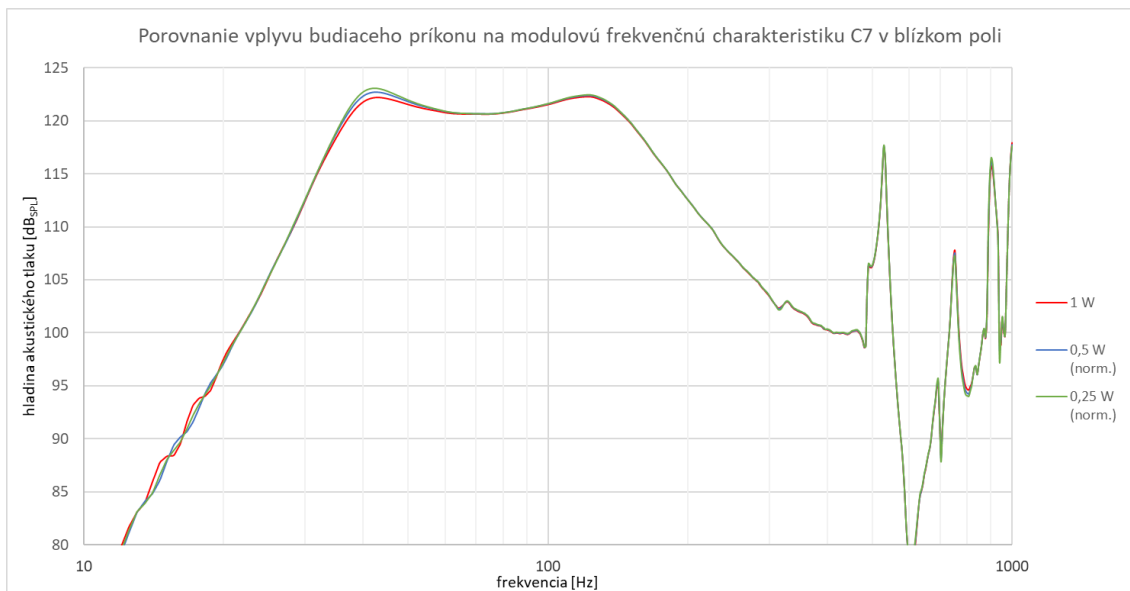
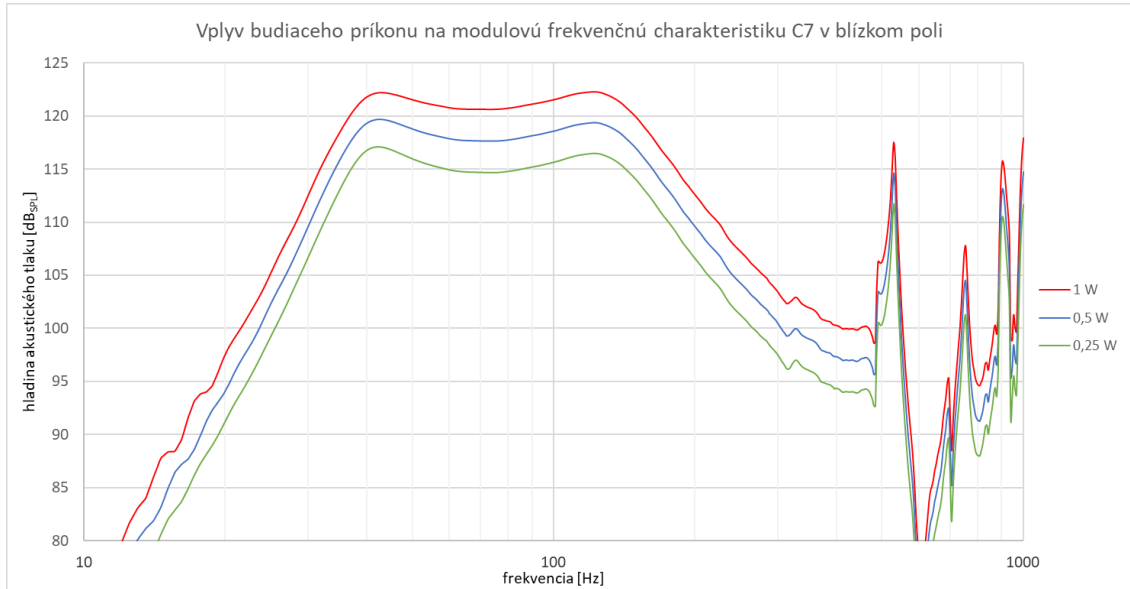


C.6 Vplyv budiaceho príkonu na mod. frek. char. C6 v BP

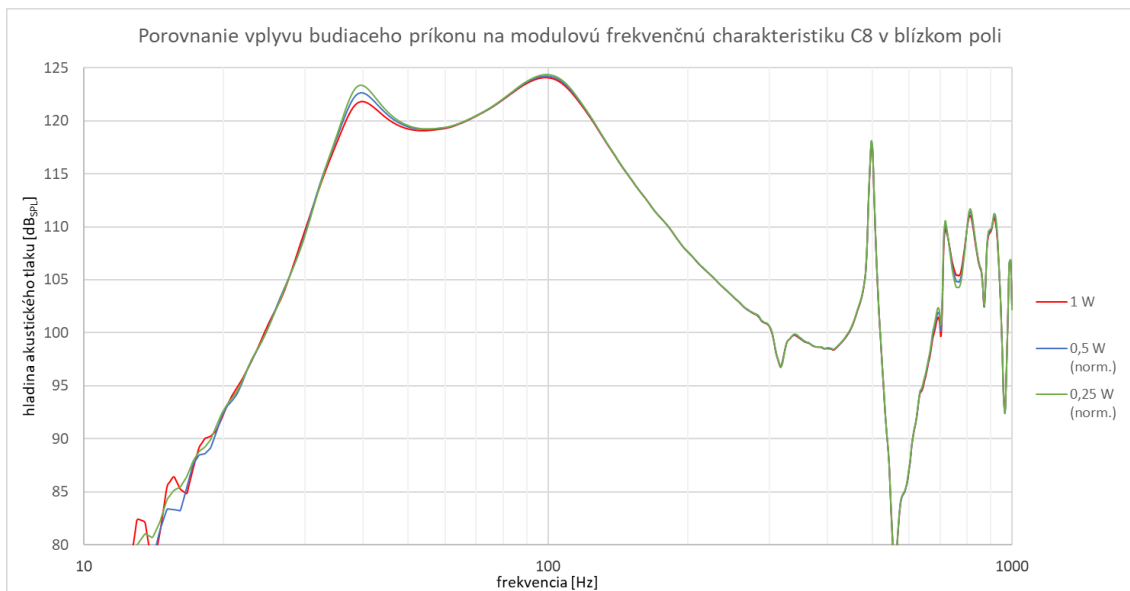
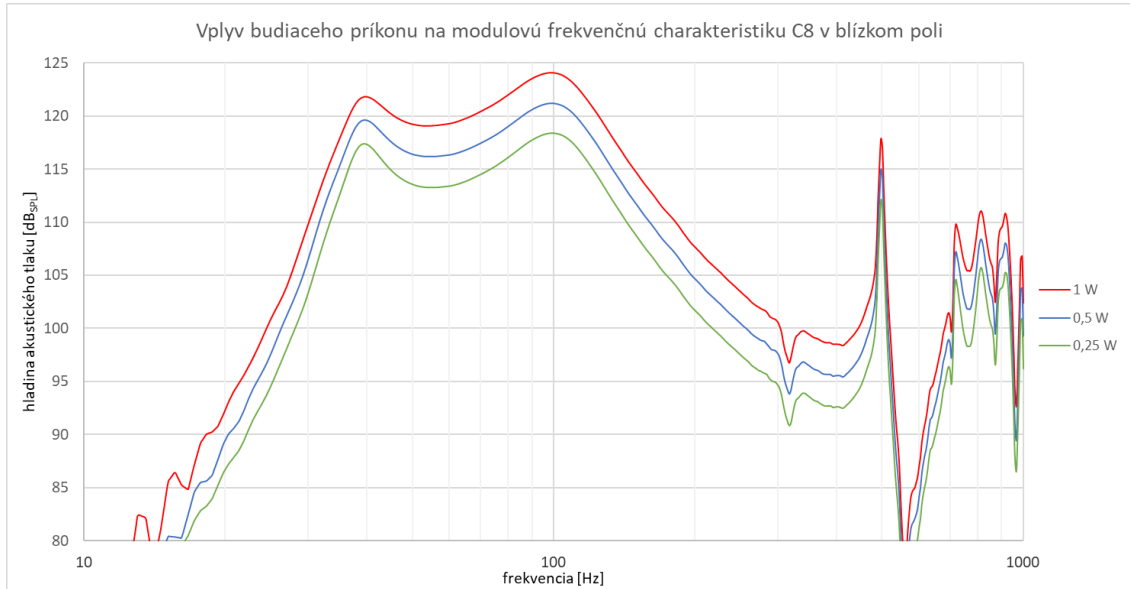




C.7 Vplyv budiaceho príkonu na mod. frek. char. C7 v BP

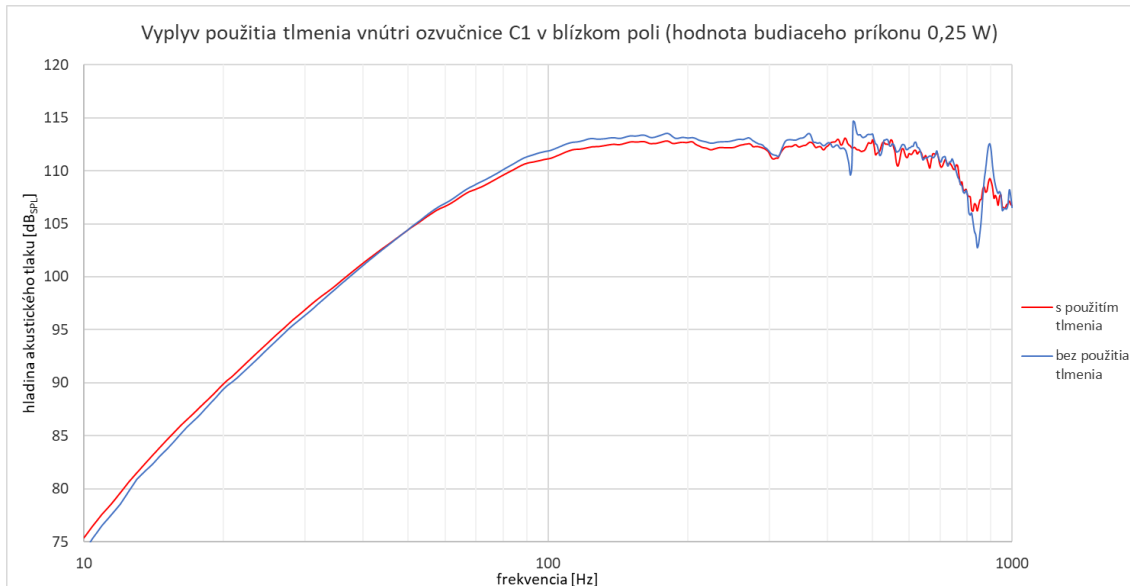


C.8 Vplyv budiaceho príkonu na mod. frek. char. C8 v BP

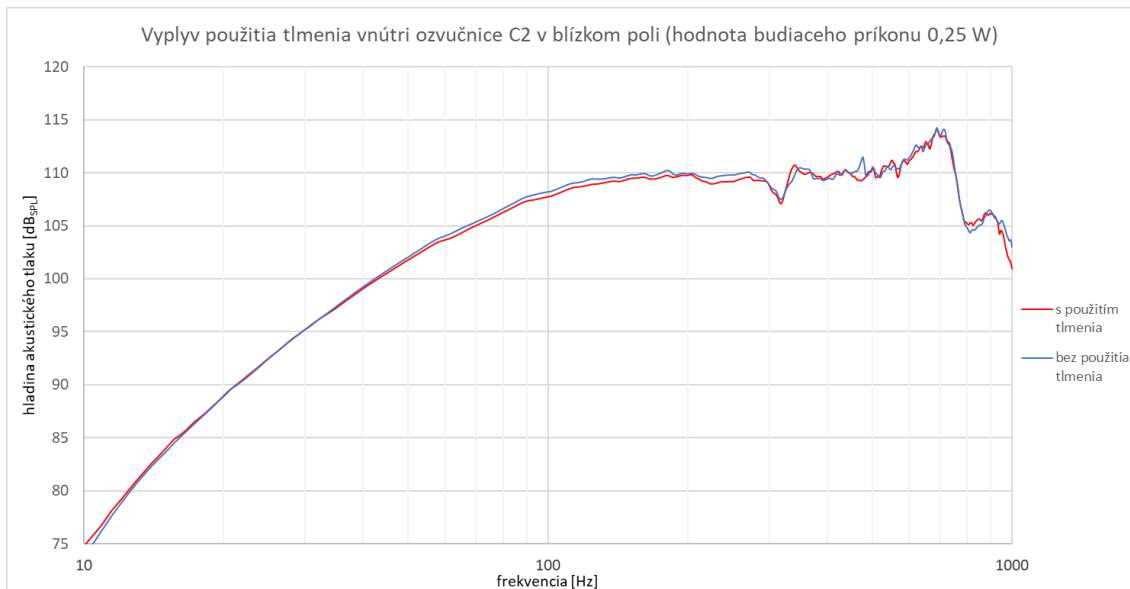


Príloha D – Vplyv použitia tlmiaceho materiálu vnútri ozvučnice na mod. frek. char. OM4

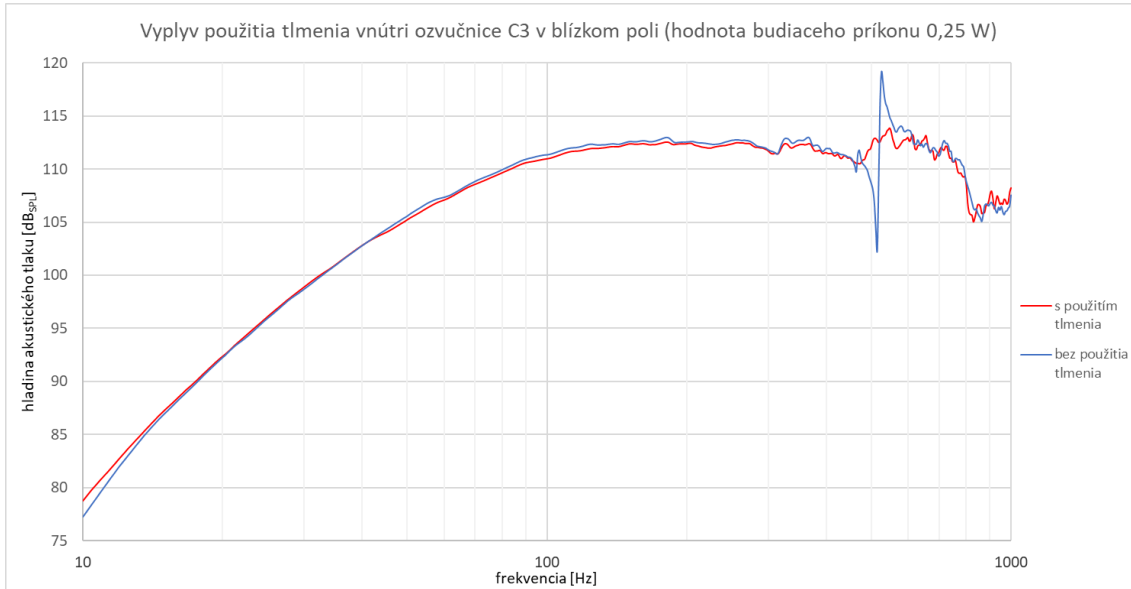
D.1 Vplyv tlmenia vnútri ozvučnice C1



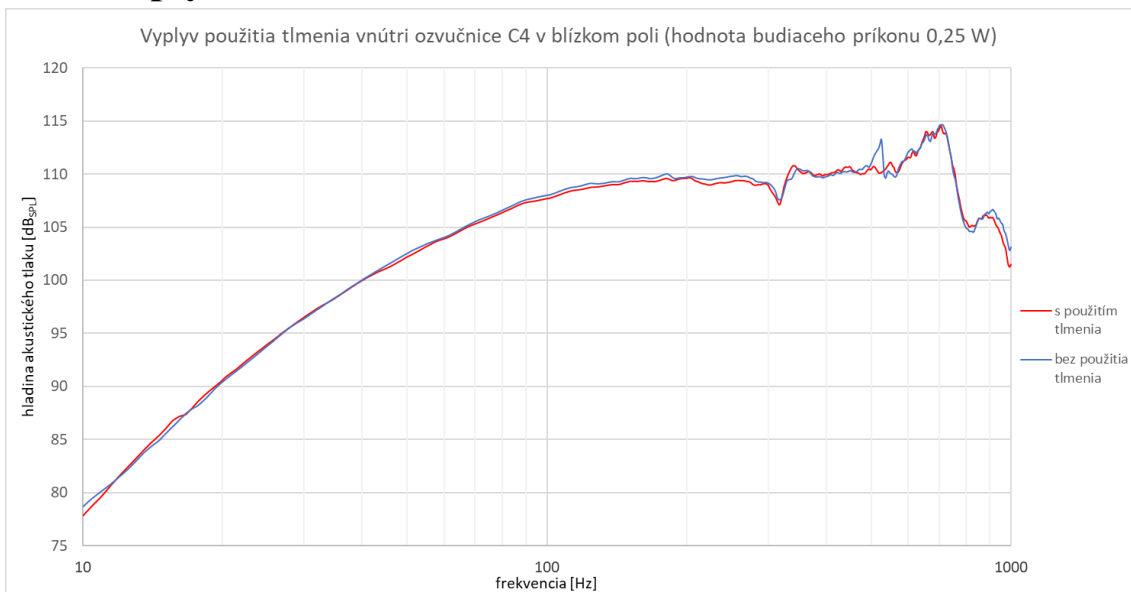
D.2 Vplyv tlmenia vnútri ozvučnice C2



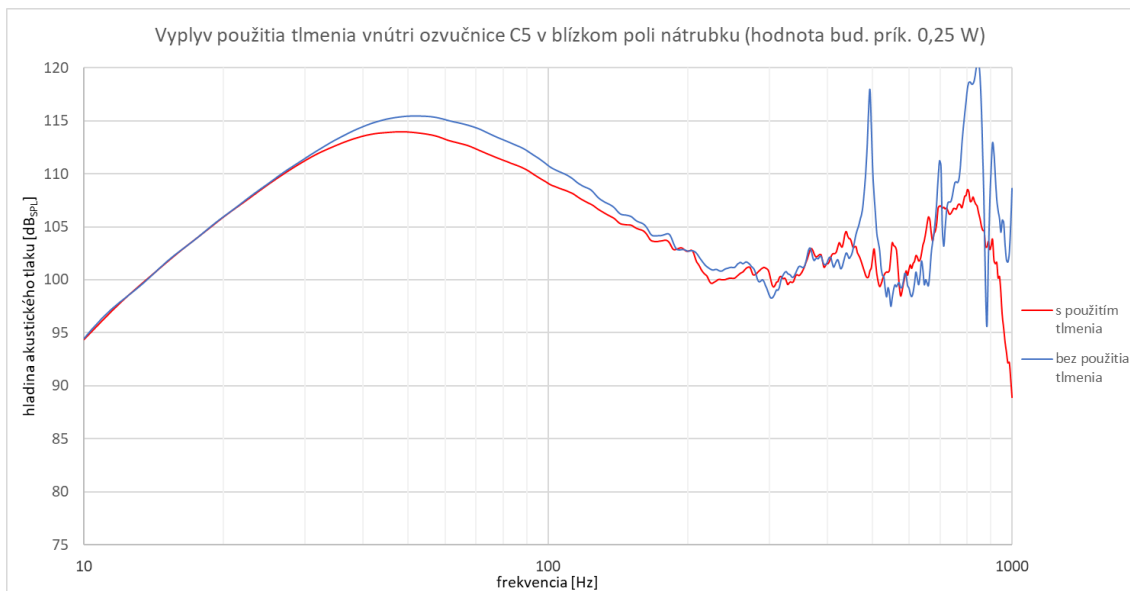
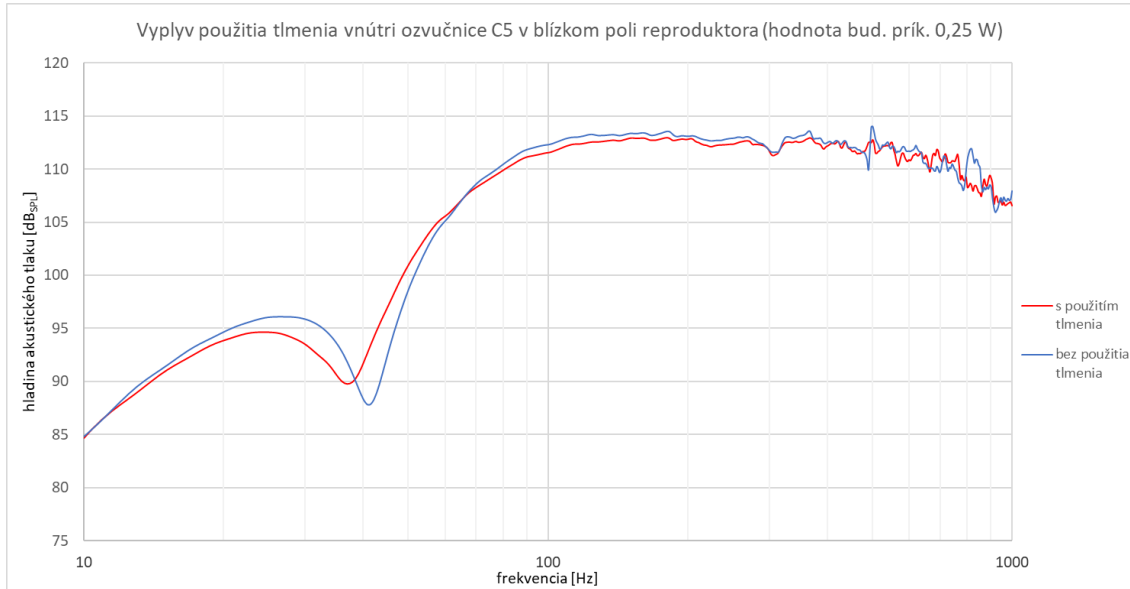
D.3 Vplyv tlmenia vnútri ozvučnice C3



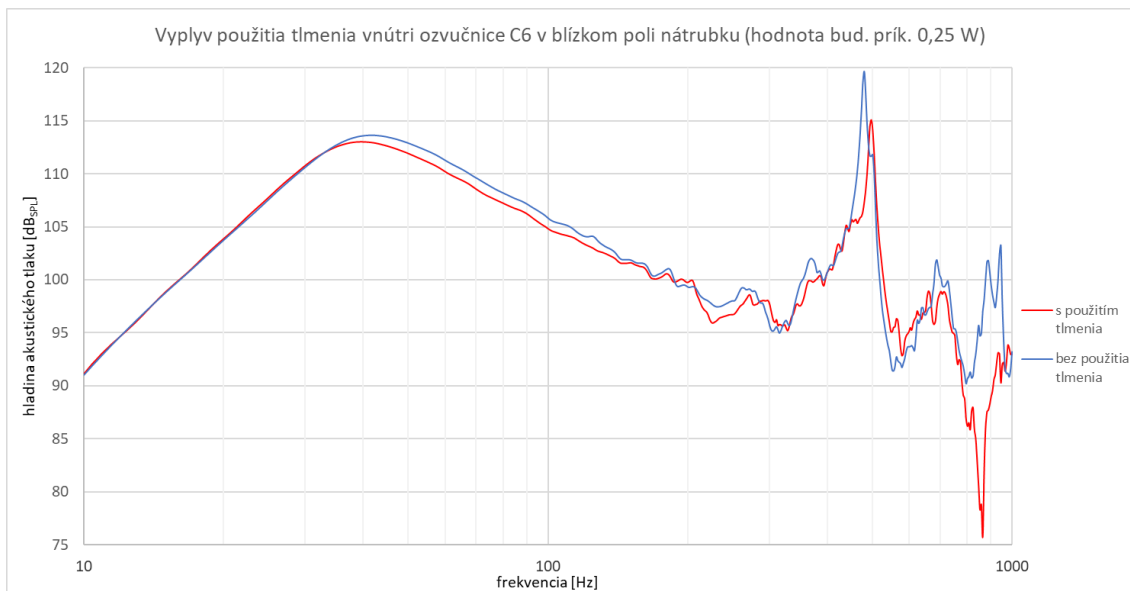
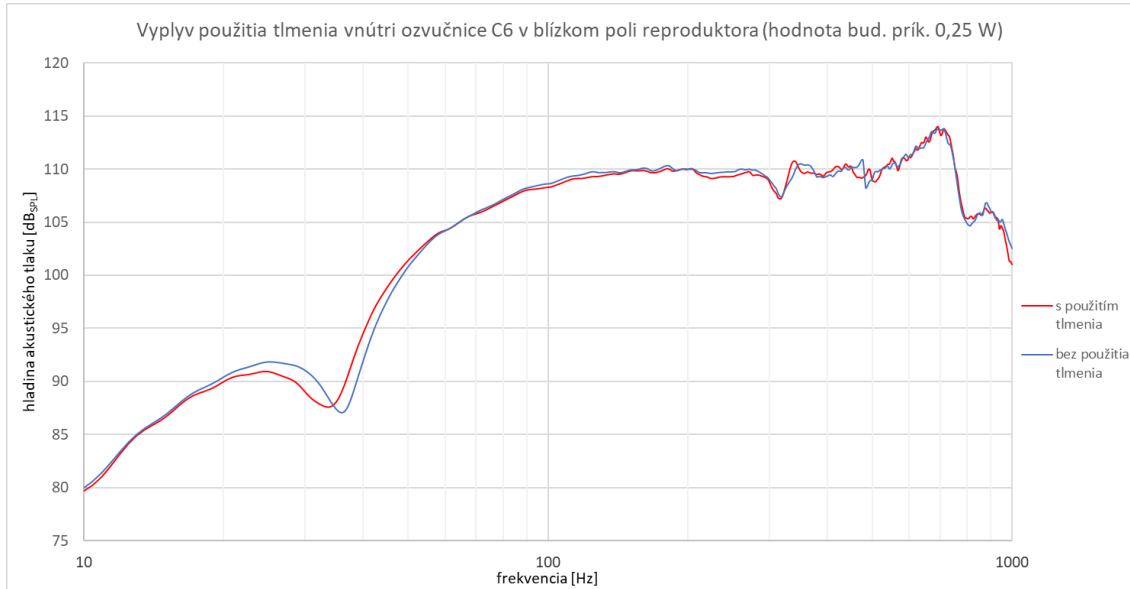
D.4 Vplyv tlmenia vnútri ozvučnice C4



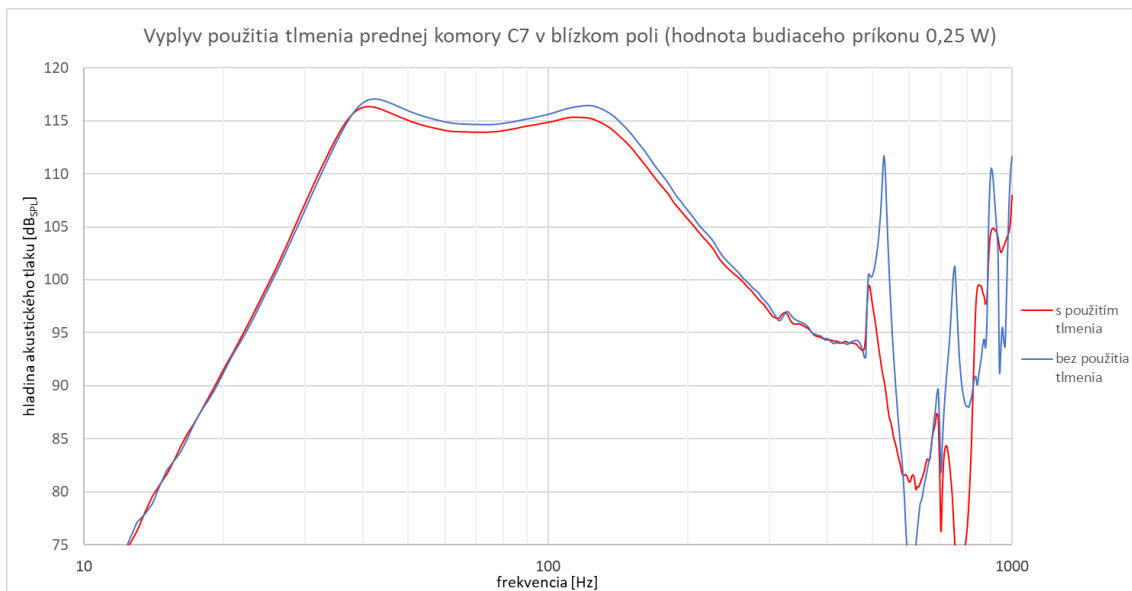
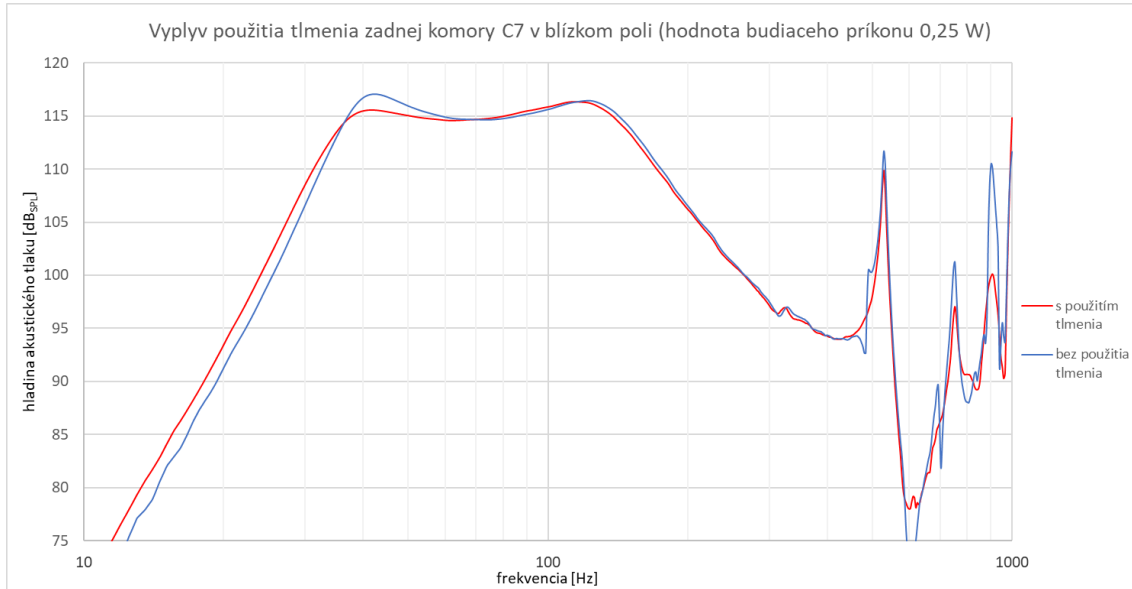
D.5 Vplyv tlmenia vnútri ozvučnice C5

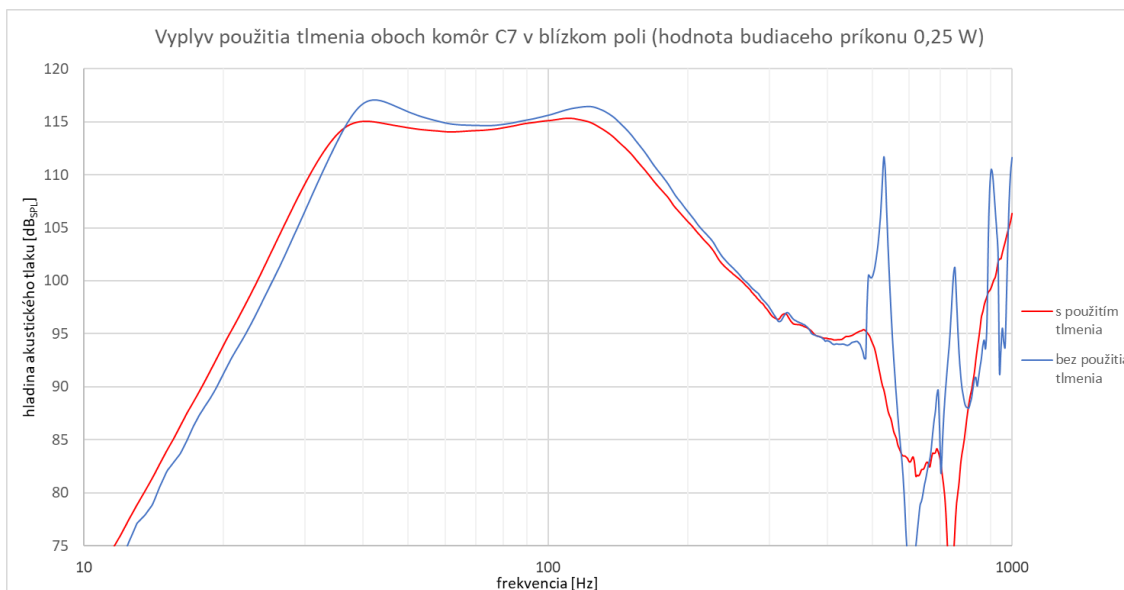


D.6 Vplyv tlmenia vnútri ozvučnice C6

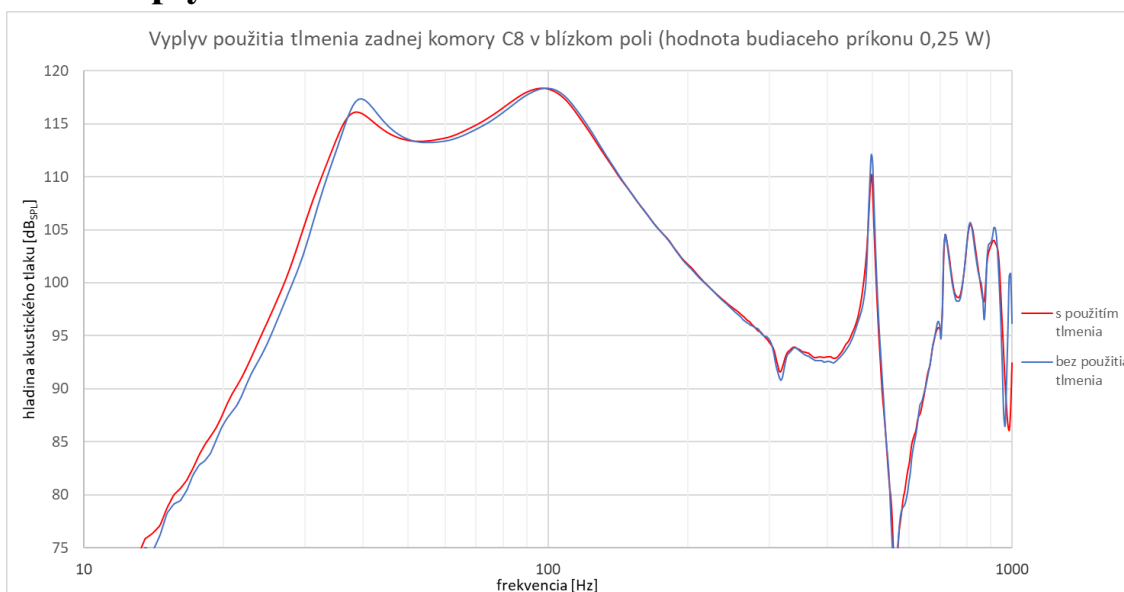


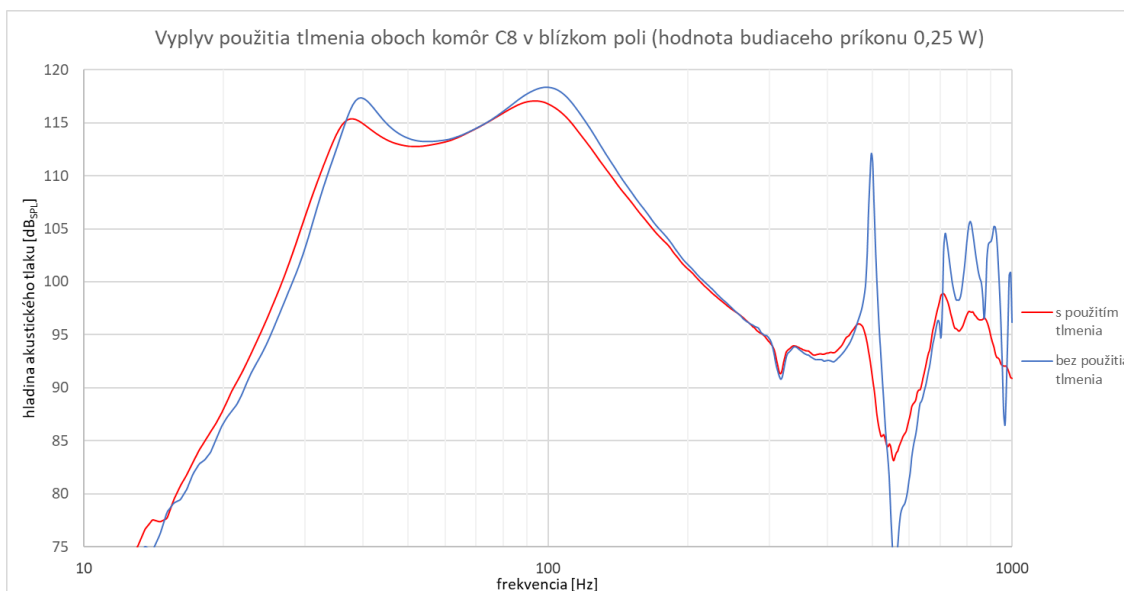
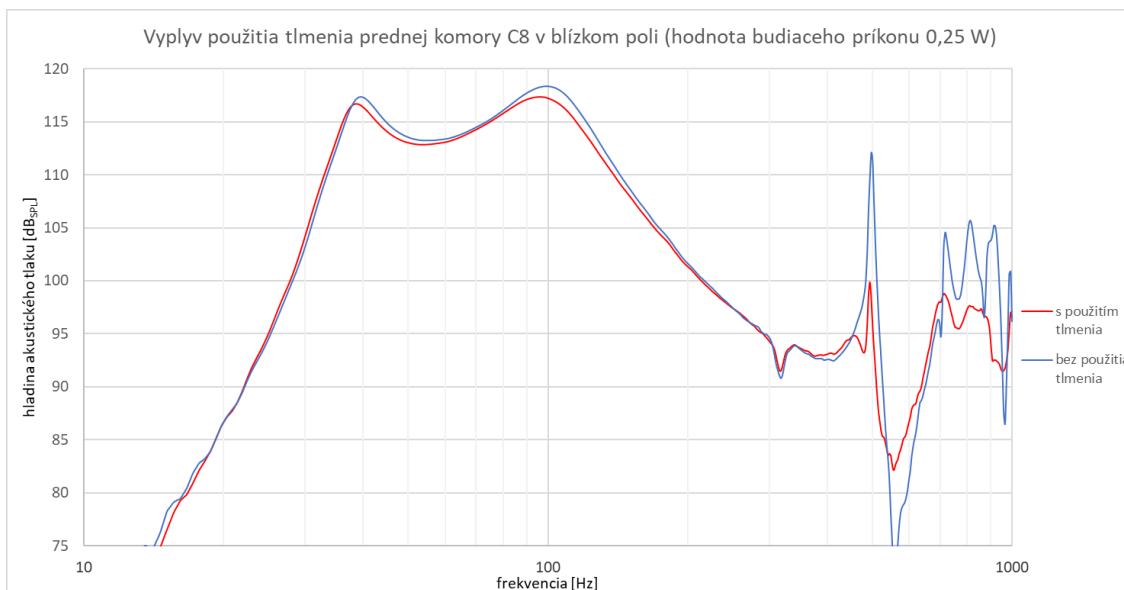
D.7 Vplyv tlmenia vnútri ozvučnice C7





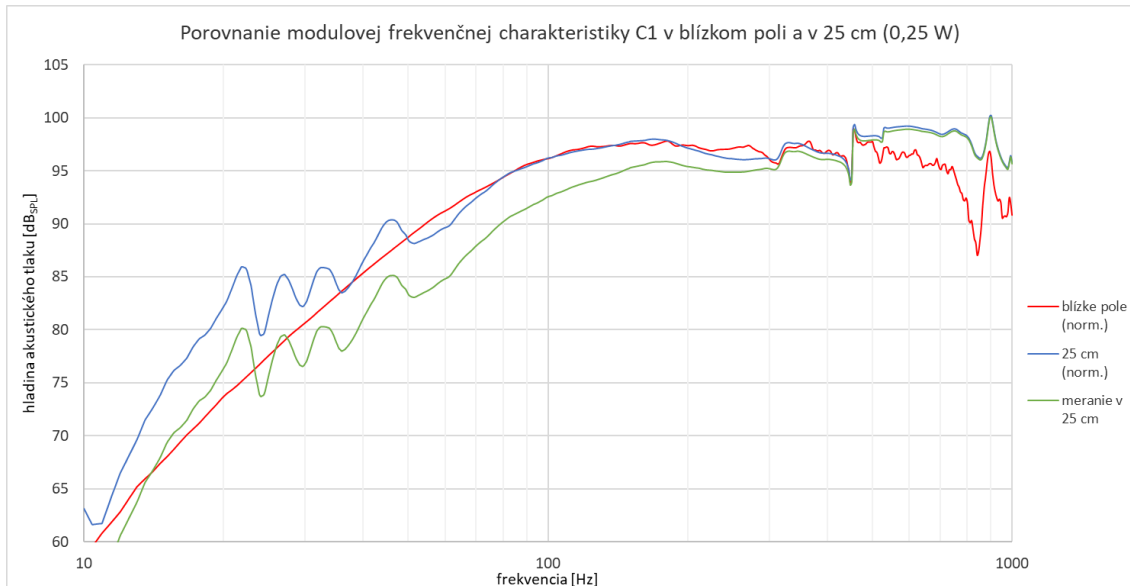
D.8 Vplyv tlmenia vnútri ozvučnice C8



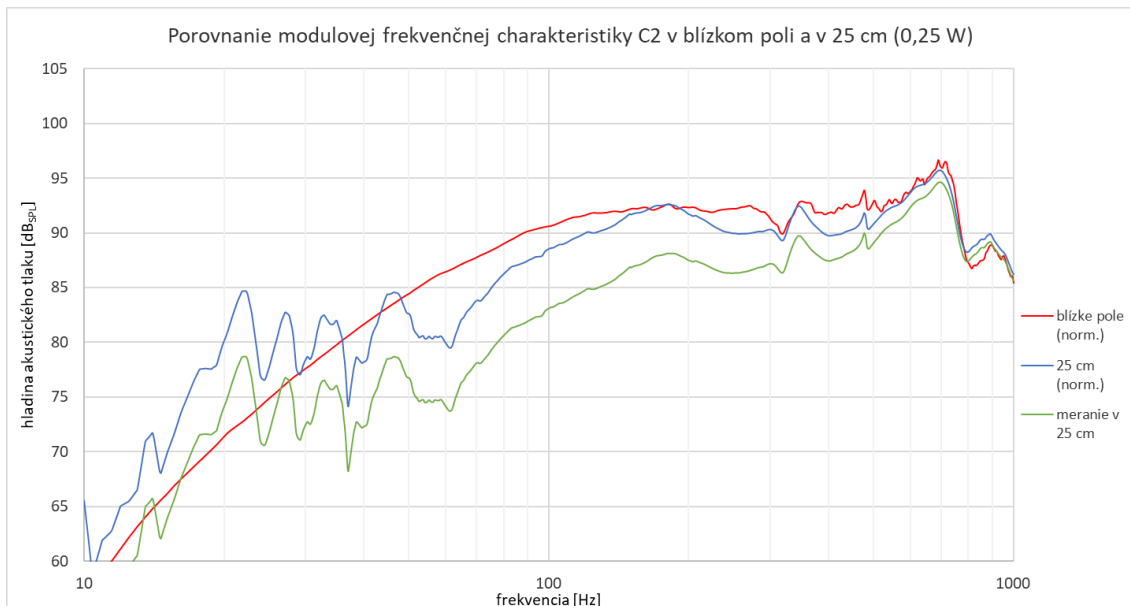


Príloha E – Porovnanie mod. frek. char. OM4 meraných v blízkom a vzdialenom poli

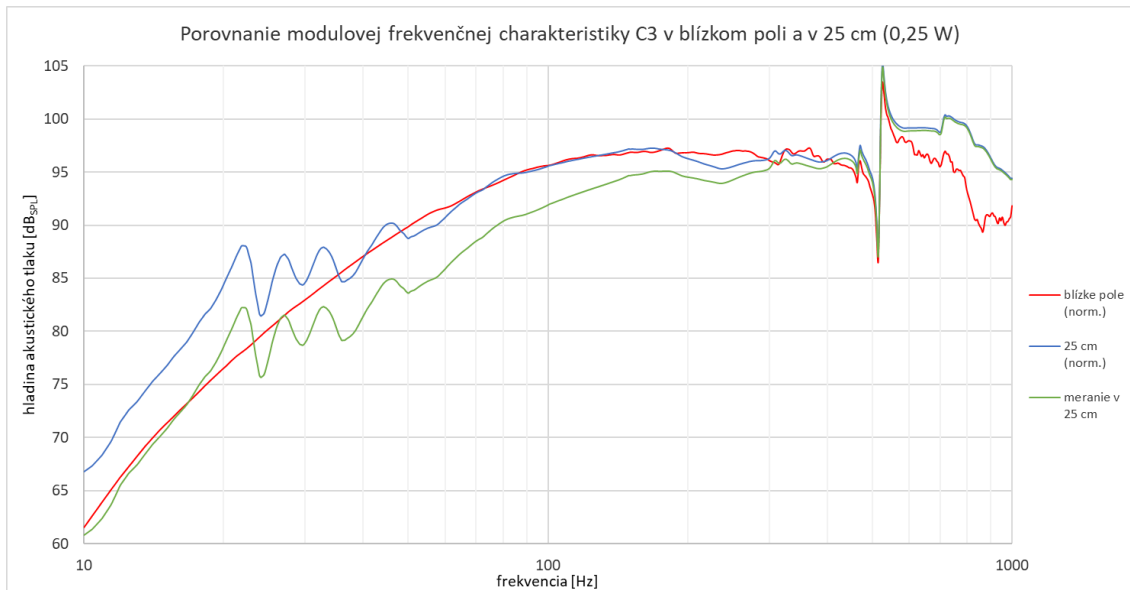
E.1 Porovnanie mod. frek. char. C1 v BP a v 25 cm



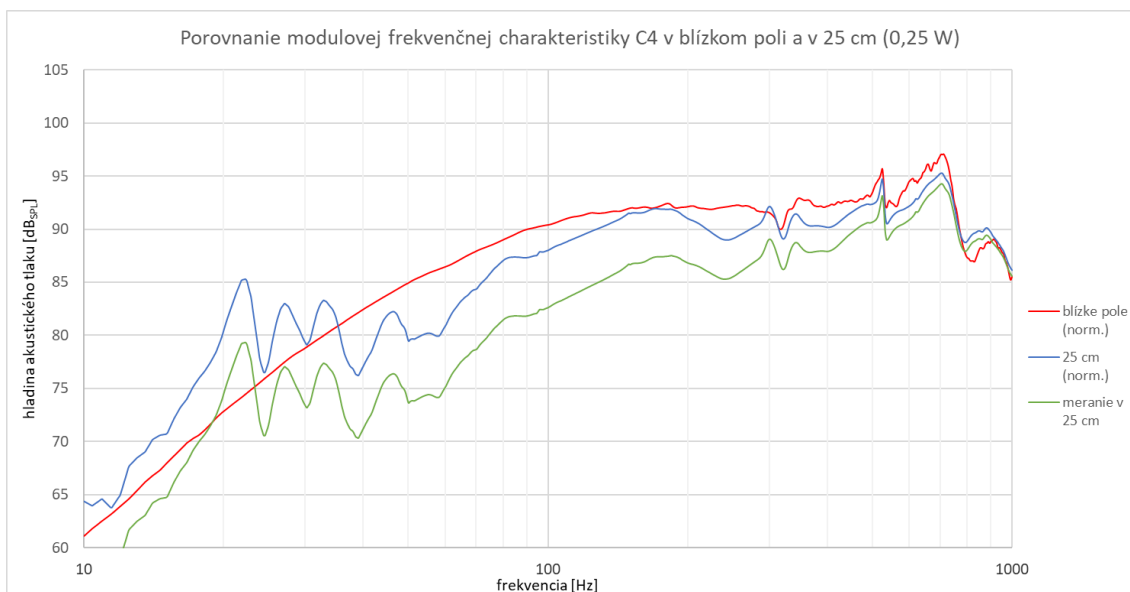
E.2 Porovnanie mod. frek. char. C2 v BP a v 25 cm



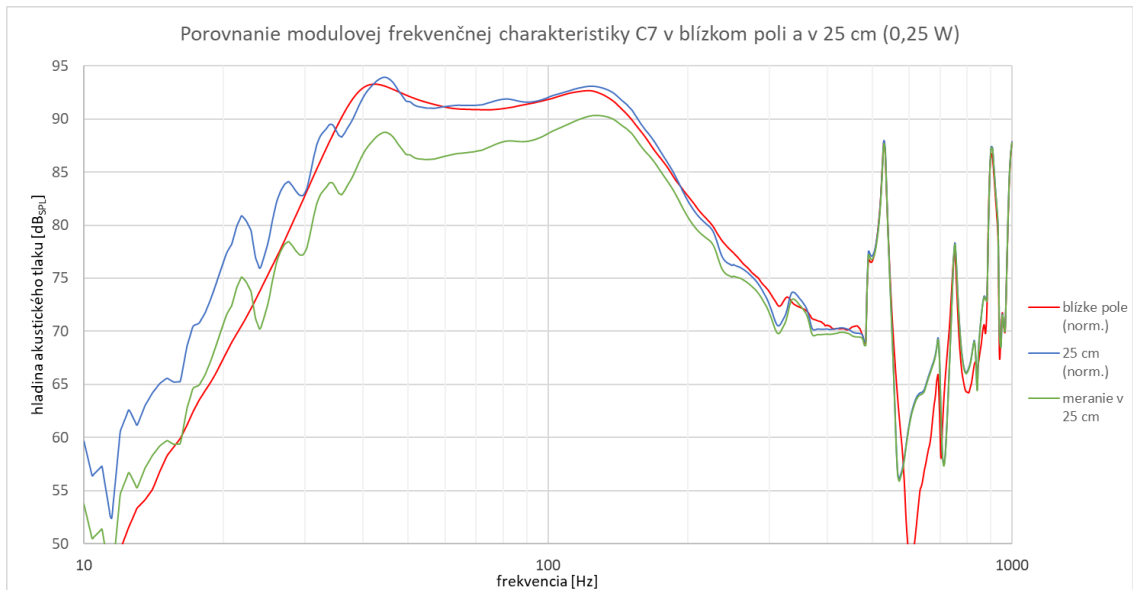
E.3 Porovnanie mod. frek. char. C3 v BP a v 25 cm



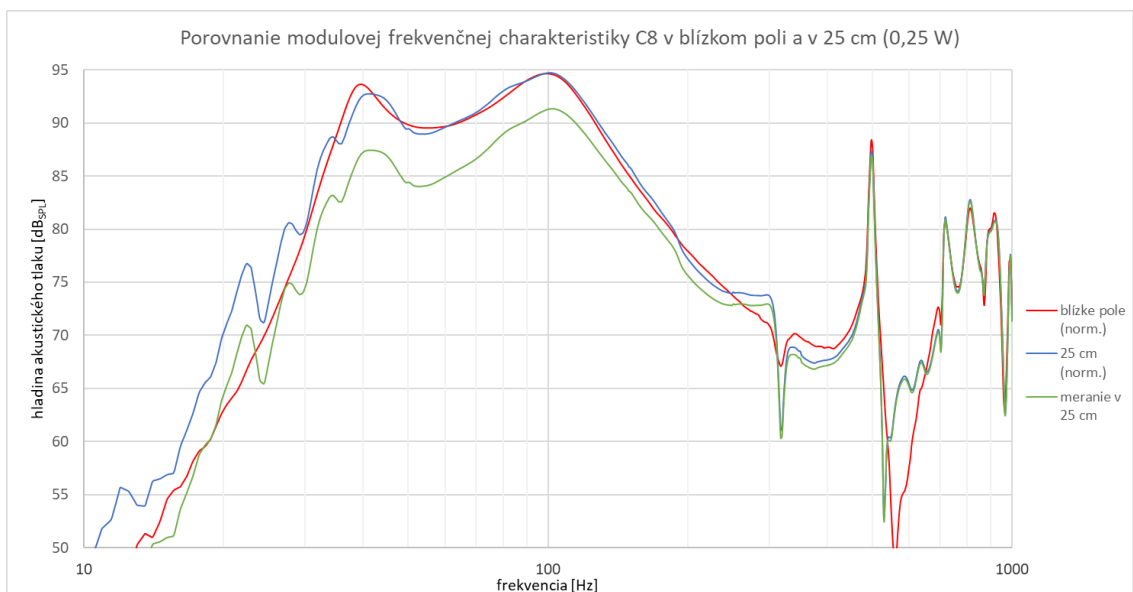
E.4 Porovnanie mod. frek. char. C4 v BP a v 25 cm



E.5 Porovnanie mod. frek. char. C7 v BP a v 25 cm

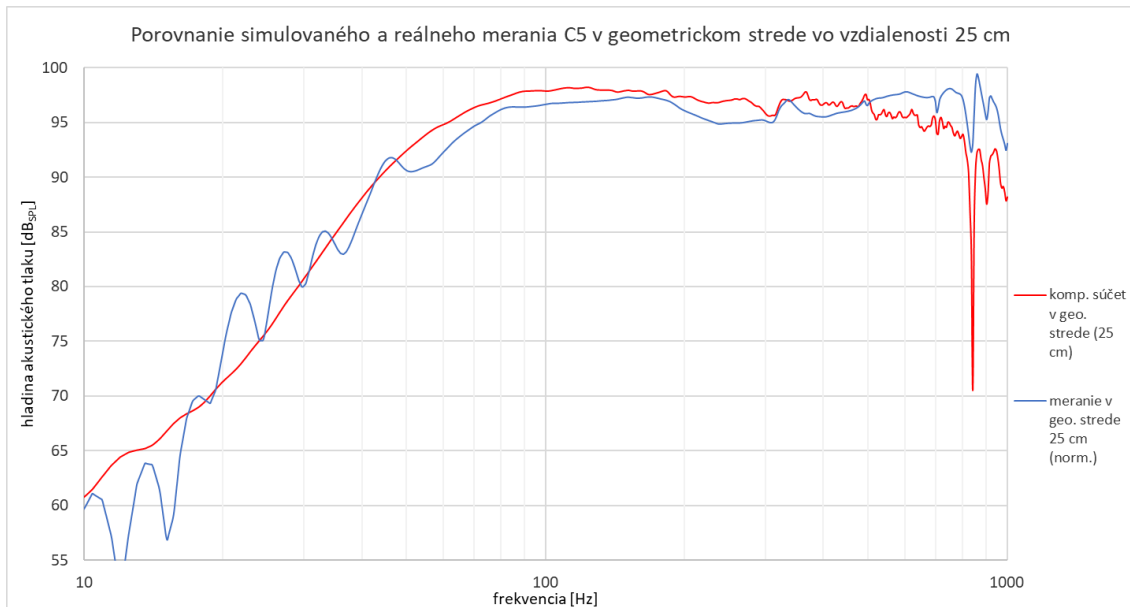


E.6 Porovnanie mod. frek. char. C8 v BP a v 25 cm

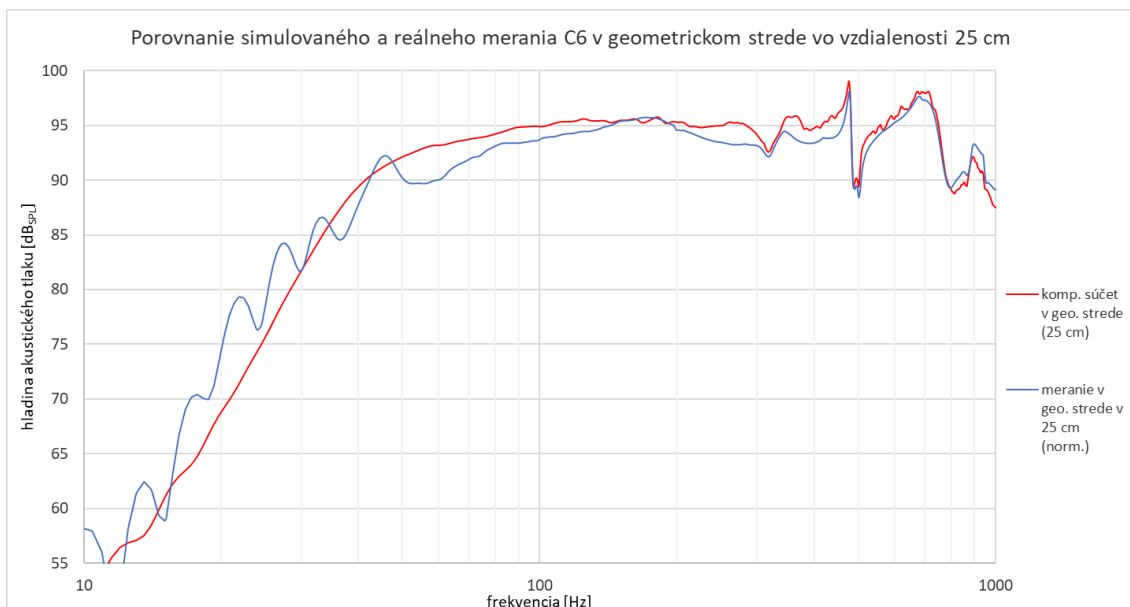


Príloha F – Simulované meranie basreflexovej ozvučnice C5/C6 vo vzdialenosti 25 cm od geo. stredu reprosústavy

F.1 Simulované meranie konfigurácie C5 v geometrickom strede vo vzdialenosti 25 cm

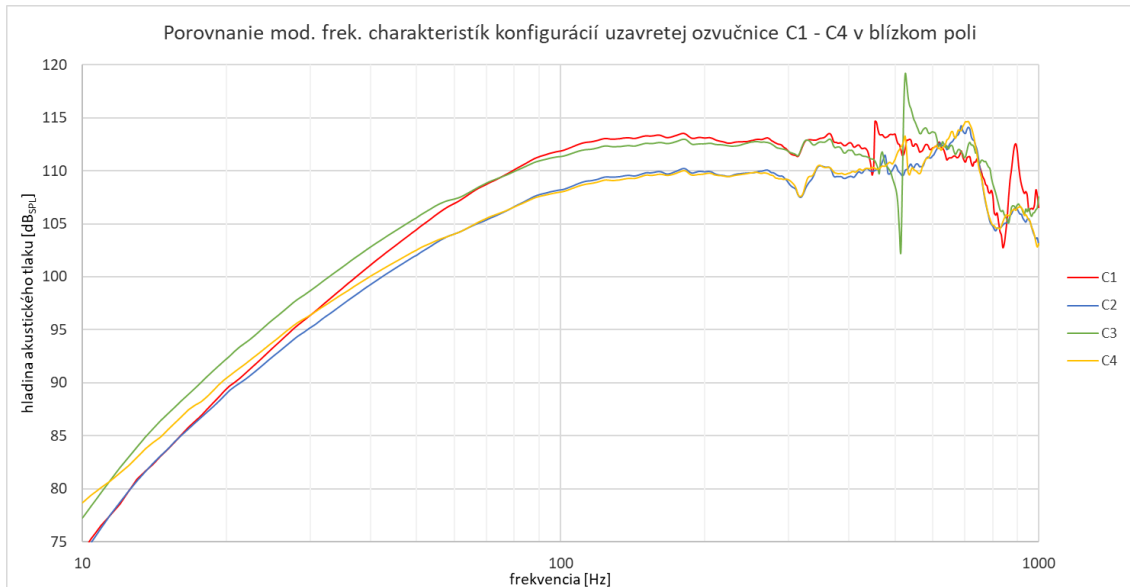


F.2 Simulované meranie konfigurácie C6 v geometrickom strede vo vzdialenosti 25 cm

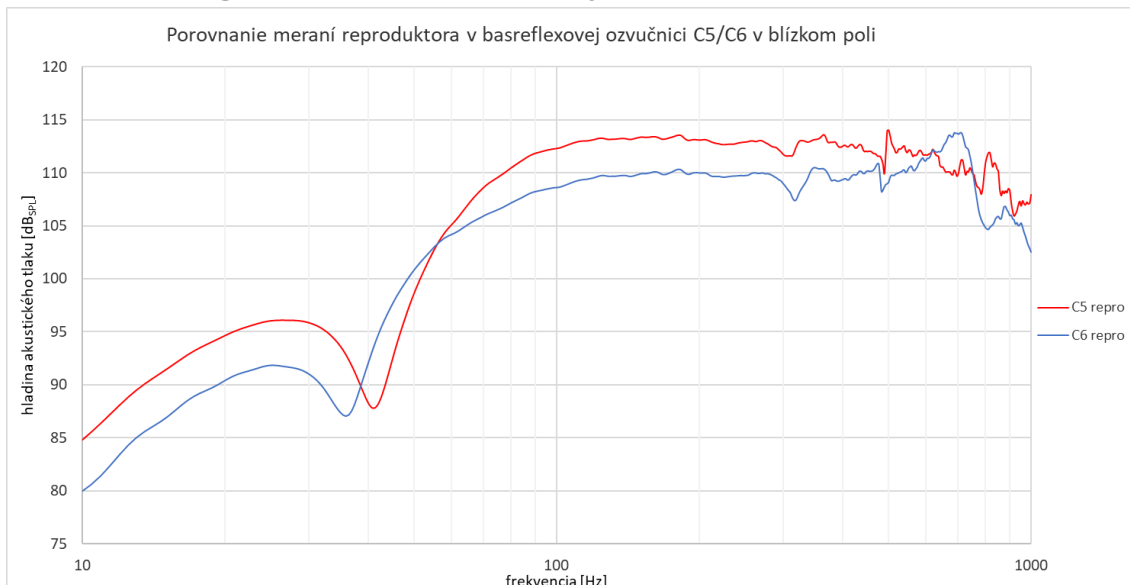


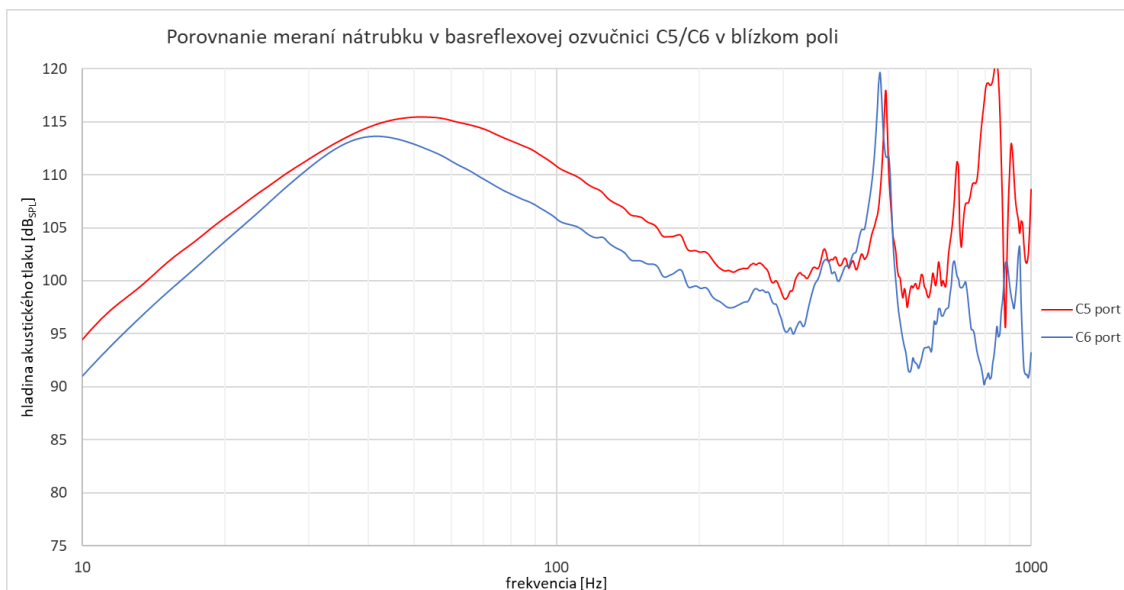
Príloha G – Porovnanie konfigurácií OM4 v blízkom poli

G.1 Porovnanie mod. frek. char. konfigurácií uzavretej ozvučnice v blízkom poli

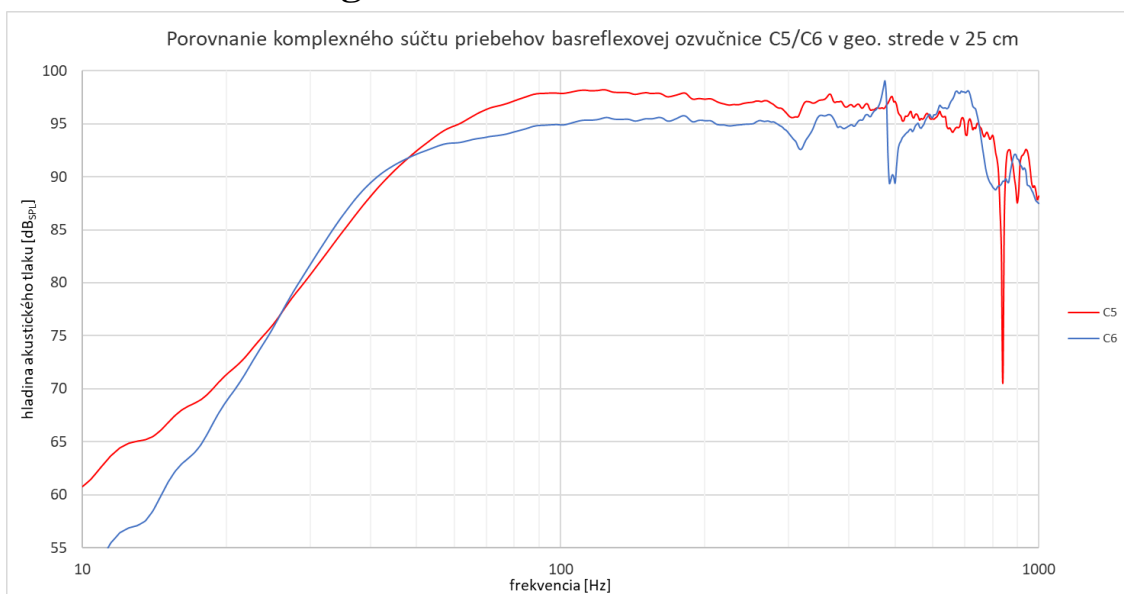


G.2 Porovnanie mod. frek. char. reproduktora a nátrubku konfigurácie basreflexovej ozvučnice v blízkom poli





G.3 Porovnanie komplexného súčtu priebehov basreflexovej ozvučnice v geometrickom strede vo vzdialenosti 25 cm



G.4 Porovnanie mod. frek. char. konfigurácií pásmového priepustu 6. rádu v blízkom poli

