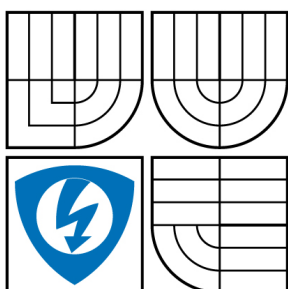


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

## REPRODUKTOROVÁ SKŘÍŇ PRO LABORATORNÍ MĚŘENÍ IMPEDANCE REPRODUKTORU

LOUDSPEAKER BOX FOR LABORATORY MEASUREMENTS OF LOUDSPEAKER IMPEDANCE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

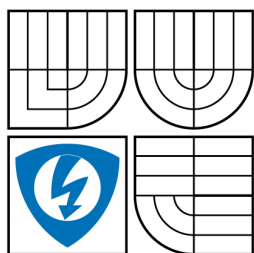
TOMÁŠ NEVOLE

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ SCHIMMEL, Ph.D.

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
**Teleinformatika**

**Student:** Tomáš Nevole

**ID:** 97916

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2008/2009

## NÁZEV TÉMATU:

**Reproduktorová skříň pro laboratorní měření impedance reproduktoru**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte otevřenou a uzavřenou reproduktorovou skříň a skříň typu bassreflex stejného objemu a konstrukčních vlastností osazené stejným širokopásmovým reproduktorem. Provedte rozbor, zda z hlediska tuhosti a těsnosti reproduktorové skříňe lze realizovat jedinou modulární skříň nebo je nutné realizovat tři samostatné skříňe. Tuto skříň či skříňe zkonstruujte a provedte měření impedanční charakteristiky zvoleného reproduktoru v bezobrazové komoře a ve všech třech variantách reproduktorové skříňe. Výsledky porovnejte mezi sebou i s výsledky simulací z návrhového programu.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [ 1 ] BENSON, K., B. Audio Engineering Handbook. McGraw-Hill, 1988. 1040 p. ISBN 0-07-004777-4
- [ 2 ] SÝKORA, B. "Stavíme reproduktorové soustavy", 1. - 48. díl. A Radio 10/97 - 9/2001.
- [ 3 ] TOMAN, K. Reprodukory a reprosoustavy, 1 díl. 2003.

**Termín zadání:** 9.2.2009

**Termín odevzdání:** 2.6.2009

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

**prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.**

*Předseda oborové rady*

## 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 § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

# ANOTACE

V této práci je řešena problematika návrhu a konstrukce univerzální modulární reproduktorové skříně- ozvučnice, která by měla sloužit pro laboratorní měření impedance širokopásmového elektromagnetického reproduktoru. Toto měření má prokázat, jak se mění elektrické parametry reproduktoru vlivem změny vlastností akustického prostředí, do něž vyzařuje. V první části je nejprve vysvětlena potřebná teorie ke zvládnutí problému, jako způsob šíření zvukového vlnění látkovým prostředím, vlastnosti a druhy reproduktorů a jejich parametry. Zvláštní pozornost je věnována popisu konstrukce a vlastností elektromagnetického reproduktoru, který byl posléze použit. Dále jsou uvedeny potřebné vztahy pro algebraický návrh ozvučnice, jednotlivé typy ozvučnic (otevřená, uzavřená, bassreflexová) a jejich vlastnosti. V práci je také řešena otázka, zda je možné docílit potřebné těsnosti systému, pakliže bude ozvučnice modulární a nebude-li žádoucí vyrobit spíše 2 až 3 různé ozvučnice. Při návrhu jsou centrem zájmu impedanční charakteristiky, ale práce se zabývá rovněž amplitudovými kmitočtovými charakteristikami. Bohužel hodografy impedance simulační programy neumožnily vygenerovat. Po algebraických výpočtech následují výsledky simulací ozvučnic v programech Unibox 408 a WinISD 0.6 a jejich porovnání s výsledky algebraických výpočtů. V poslední části je již popsána samotná konstrukce a výsledky měření, kterých bylo dosaženo v bezodrazové komoře laboratoře elektroakustiky. Měření modulové impedanční charakteristiky bylo provedeno na volném reproduktoru a všech ozvučnicích, měření amplitudové kmitočtové charakteristiky bylo provedeno pouze na ozvučnicích. Hodografy impedance byly také změřeny. Tyto výsledky jsou porovnány s výpočty a simulacemi a vzniklé nepřesnosti jsou na závěr zdůvodněny. Součástí vyhodnocení je rovněž porovnání charakteristik udaných výrobcem a údajů naměřených v laboratoři.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Impedance reproduktoru, impedanční charakteristika, otevřená, uzavřená, bassreflex, ozvučnice, reproduktorová skříň

# **ABSTRACT**

In this thesis there are solved problems of design and construction of a universal modular loudspeaker box, which should serve for laboratory measurements of broadband electro-magnetic loudspeaker's impedance. These measurements should demonstrate how the electric parameters are changed by changing the acoustic impedance of surrounding into which the speaker transmits. In the first part there is explained necessary theory for solving the task, such as way of sound's transmission in the environment, variable sorts of speakers and their characteristics. A special focus is given to description of the electro-magnetic speaker's parameters and construction that was used for the loudspeaker box. Then there are introduced needed mathematical formulas for algebraic design of the loudspeaker box, various types of the loudspeaker boxes (open, closed, vented) and their parameters. In this thesis there is also solved the problem with leaks and settled the matter, if it is better to build one modular box or 2 or 3 separate boxes. Most important characteristics are the impedance characteristics for this thesis but the SPL characteristics are also included. Unfortunately the simulating programs couldn't generate the hodographs of impedance. After the algebraic calculations, in the thesis there are presented outputs from simulation programs Unibox 408 and WinISD 0.6. The outputs also are compared with the algebraic calculations. In the last part of the thesis there is already described the own construction of the loudspeaker box and presented results from the box's measuring in the anechoic chamber (in the laboratory of electro-acoustic). The measuring of the modular impedance characteristic was realized on the single speaker and all the boxes. The measuring of the SPL (sound pressure level) characteristic was realized on the boxes only. All these results are compared with the calculations and simulations and the inaccuracies are substantiated in the end. The comparing of the manufacturer's characteristics with the measured characteristics is also included.

# **KEYWORDS**

Loudspeaker impedance, speaker, impedance response, open, closed, bassreflex, loudspeaker box,

NEVOLE, T. *Reproduktorová skříň pro laboratorní měření impedance reproduktoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 73 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Reproduktorová skříň pro laboratorní měření impedance reproduktoru“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne .....

.....

podpis autora

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Schimmlovi, Ph.D. za poskytnutí metodické pomoci a směřodatných připomínek při realizaci méj bakalářské práce.

V Brně dne .....

.....

podpis autora

# OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	9
SEZNAM TABULEK.....	10
ÚVOD.....	11
1 REPRODUKTOR.....	13
1.1 Šíření zvuku a požadavky na reproduktor.....	13
1.2 Typy reproduktorů a praktické provedení.....	13
1.2.1 Rozdělení podle kmitočtového pásma.....	14
1.2.2 Rozdělení podle principu funkce a praktického provedení.....	14
1.3 Charakteristiky a parametry reproduktorů.....	18
2 OZVUČNICE.....	27
2.1 Jednoduchá ozvučnice (rovinná deska).....	27
2.2 Otevřená ozvučnice.....	27
2.3 Uzavřená ozvučnice.....	28
2.3.1 Obecná charakteristika.....	28
2.3.2 Postup návrhu.....	30
2.4 Bassreflexová ozvučnice.....	32
2.4.1 Obecná charakteristika.....	32
2.4.2 Postupy návrhu.....	34
3 NÁVRH OZVUČNICE.....	37
3.1 Volba koncepce skříně.....	37
3.1.1 Tři samostatné ozvučnice (otevřená, uzavřená a bassreflexová).....	37
3.1.2 Dvě ozvučnice (bassreflexová kompaktní , 2. modulární).....	38
3.1.3 Jediná modulární ozvučnice s dvěma odnímatelnými zády.....	38
3.2 Volba reproduktoru.....	38
3.3 Návrhy ozvučnic pomocí algebraických výpočtů.....	39
3.3.1 Otevřená ozvučnice.....	39
3.3.2 Uzavřená ozvučnice.....	40
3.3.3 Ozvučnice typu bassreflex.....	41
3.4 Simulace navržených ozvučnic.....	43
3.4.1 Uzavřená ozvučnice.....	44
3.4.2 Ozvučnice typu bassreflex.....	46
4 REALIZACE A ZMĚŘENÍ NAVRŽENÉ OZVUČNICE.....	51
4.1 Volný reproduktor.....	51
4.2 Ozvučnice.....	52
5 ZÁVĚR.....	58
POUŽITÉ ZDROJE.....	60
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ.....	61
SEZNAM PŘÍLOH.....	62



# SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1** Otevřená a uzavřená ozvučnice
- Obr. 2** Ozvučnice typu rovinná deska
- Obr. 3** Otevřená ozvučnice
- Obr. 1.1** Konstrukce elektromagnetického reproduktoru (klasická koncepce)
- Obr. 1.2** Reentrální reproduktor ART-050-10
- Obr. 1.3** Širokopásmový reproduktor ARO 568K
- Obr. 1.4** Amplitudová kmitočtová charakteristika reproduktoru
- Obr. 1.5** Příklad směrové charakteristiky reproduktoru
- Obr. 1.6** Impedanční charakteristika elektromagnetického reproduktoru
- Obr. 1.7** Náhradní schéma reproduktoru s gyrátorem
- Obr. 1.8** Náhradní schéma reproduktoru převedené na elektrickou stranu
- Obr. 1.9** Náhradní schéma reproduktoru se sloučenými prvky, převedené na elektrickou stranu
- Obr. 2.1** Náhradní schéma uzavřené ozvučnice převedené na elektrickou stranu
- Obr. 2.2** Amplitudově- kmitočtová charakteristika uzavřené ozvučnice
- Obr. 2.3** Náhradní schéma ozvučnice typu bassreflex převedené na elektrickou stranu
- Obr. 2.4** Impedanční charakteristika bassreflexové ozvučnice s reproduktorem Dynaudio 30W-100 (z databáze volně šiřitelného programu Unibox 408)
- Obr. 3.1** Křivka SPL navržené otevřené ozvučnice
- Obr. 3.2** Driver editor programu WinISD
- Obr. 3.3** Kmitočtová amplitudová charakteristika ozvučnice typu bassreflex, odsimulovaná v Uniboxu, výchozí hodnota  $f_b$
- Obr. 3.4** Impedanční charakteristika ozvučnice typu bassreflex, odsimulovaná v Uniboxu, výchozí hodnota  $f_b$
- Obr. 3.5** Amplitudová kmitočtová charakteristika ozvučnice typu bassreflex, odsimulovaná v Uniboxu, výchozí hodnota  $l=8,39$  cm
- Obr. 3.6** Modulová impedanční charakteristika ozvučnice typu bassreflex, odsimulovaná v Uniboxu, výchozí hodnota  $l=8,39$  cm
- Obr. 4.1** Modulová impedanční charakteristika volného reproduktoru ARZ 6608
- Obr. 4.2** Hodograf impedance volného reproduktoru ARZ 6608
- Obr. 4.3** Naměřené modulové impedanční charakteristiky
- Obr. 4.4** Mod. kmitočtová charakteristika otevřené, uzavřené a bassreflexové ozvučnice
- Obr. 4.5** Hodograf impedance uzavřené a otevřené ozvučnice
- Obr. 4.6** Hodograf impedance ozvučnice typu bassreflex

## SEZNAM TABULEK

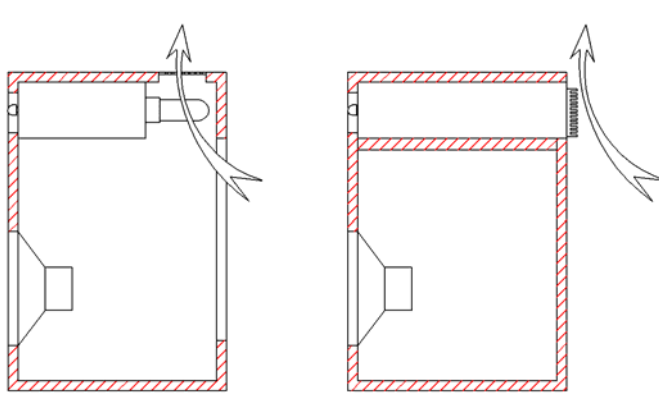
- Tab. 2.1** Orientační hodnoty pro volbu průměru nátrubku
- Tab. 3.1** Srovnání katalogových údajů reproduktoru s dopočítanými údaji z WinISD
- Tab. 3.2** Srovnání vypočtených a odsimulovaných parametrů uzavřené ozvučnice
- Tab. 3.3** Srovnání vypočtených a odsimulovaných parametrů ozvučnice typu bassreflex
- Tab. 3.4** Nastavení parametrů Uniboxu při simulaci ozvučnice typu bassreflex (výchozí hodnota  $f_b$ )
- Tab. 4.1** Srovnání hodnot naměřených, vypočtených a odsimulovaných pro bassreflexovou ozvučnici
- Tab. 4.2** Srovnání hodnot naměřených, vypočtených a odsimulovaných pro uzavřenou ozvučnici

# ÚVOD

Ozvučnice slouží k potlačení akustického zkratu, který by nastal při provozu reproduktoru bez ní. Akustickým zkratem se rozumí jev, při kterém se navzájem vyruší účinek přední a zadní vlny reproduktoru. *To nastává především u nízkých kmitočtů, kdy rozměry membrány jsou podstatně menší než vlnová délka vyzářených signálů* [1]. Bude-li reproduktor namontován do ozvučnice, částečně se oddělí jeho přední a zadní vlna. Poklesne také akustická impedance prostředí, do něž vyzářuje. Tento pokles způsobuje také pokles elektrické impedance reproduktoru a posun rezonančního kmitočtu reproduktoru směrem nahoru.

Toto jsou základní typy ozvučnic: otevřená, uzavřená, bassreflexová a jednoduchá (rovinná deska).

Ozvučnice otevřená je dnes spíše méně častým řešením např. pro elektronková komba, kde je cirkulace vzduchu nezbytná z důvodu chlazení zesilovače. V minulosti byla hojně využívána kromě kytarových komb také v rozhlasových přijímačích i televizorech, až do doby masového nástupu polovodičů. Ty přinesly vzhledem ke svým rozměrům a menšímu zbytkovému teplu možnost „vystrčit“ tepelně namáhané součásti s chladičem vně komba a to mohlo být uzavřeno (viz obr. 1)

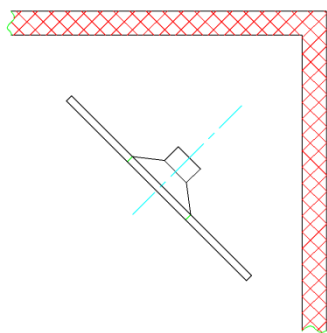


Obr. 1: Otevřená a uzavřená ozvučnice

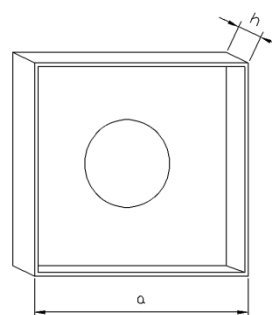
V dnešní době je možno se setkat nejčastěji s ozvučnicí uzavřenou (sealed) a bassreflexovou (ported, vented). To platí jak pro profesionální zařízení, tak pro spotřební elektroniku. Uzavřená a bassreflexová ozvučnice přináší četné výhody, co se týče efektivního využití výkonového potenciálu reproduktoru (bassreflexová dokonce částečně využívá zadní vlnu). Především lépe eliminují vliv akustického

zkratu. Proto se jedná o nejoblíbenější koncepci. Co se týče rovinné desky, dnes je možné se s ní setkat pouze při plošném ozvučování (např. v hypermarketech). Dříve bylo také možno se s ní setkat coby s ozvučnicí místního drátového rozhlasu ve školách či veřejných budovách, viz lit. [2]

Předmětem zájmu této práce je vliv změny impedance akustického prostředí na elektrickou impedanci měniče a to v ozvučnici otevřené, uzavřené a bassreflexové. Pro měření těchto změn by měla být navržena a odsimulována reproduktorová skříň buďto modulární (rozebíratelná), či více skříní kompaktních. Ozvučnice má být osazena širokopásmovým reproduktorem. Jeho výběr, stejně jako volba řešení konstrukce reproduktorové skříně bude probrána dále.



Obr. 2: Ozvučnice typu rovinná deska.



Obr. 3: Otevřená ozvučnice.

V první kapitole je nejprve vysvětlena potřebná teorie ke zvládnutí úkolu, jako způsob šíření zvukového vlnění látkovým prostředím, vlastnosti a druhy reproduktorů a jejich parametry. Zvláštní pozornost je věnována popisu elektromagnetického reproduktoru, který byl posléze použit. Ve druhé kapitole jsou uvedeny potřebné vztahy pro algebraický návrh ozvučnice, jednotlivé typy ozvučnic (otevřená, uzavřená, bassreflexová) a jejich vlastnosti. Ve třetí části je řešena otázka, zda je možné docílit potřebné těsnosti systému, pakliže bude ozvučnice modulární a nebude-li žádoucí vyrobit spíše 2 až 3 různé ozvučnice. Dále jsou popsány metody návrhu. Při návrhu jsou centrem zájmu impedanční charakteristiky, ale práce se zabývá rovněž amplitudovými kmitočtovými charakteristikami.

# 1 REPRODUKTOR

## 1.1 Šíření zvuku a požadavky na reproduktor

K vysvětlování principu činnosti jednotlivých typů ozvučnic lze přistoupit teprve tehdy, je-li dobře známá funkce toho hlavního: elektroakustického měniče, čili reproduktoru. Úkolem reproduktoru je přeměnit elektrický signál na zvukovou vlnu, tuto vlnu rozšířit pomocí média (vzduch) do svého okolí. Zvuk je střídavé zředování a zhušťování molekul vzduchu (změny atmosférického tlaku) v blízkosti zdroje zvuku [2]. Zdroj zvuku je tuhé těleso, které vykonává kmitavý pohyb (membrána). Toto zhušťování/ zředování se v látkovém prostředí šíří do svého okolí v podobě zvukového vlnění. V případě bodového zdroje zvuku se vlnění šíří po kulové vlnoploše, směrová charakteristika má tedy tvar kružnice. Hladina akustického tlaku klesá s rostoucí vzdáleností od zdroje zvuku a to o 6 dB s každým zdvojnásobením vzdálenosti od zdroje [2]. Požadavky na reproduktor jsou deklarovány vlastnostmi sluchového ústrojí člověka: přibližný rozsah kmitočtů vnímaných lidským uchem je cca od 20 Hz do 20kHz (u každého jedince mírně odlišné) [2]. Požadovaná změna tlaku se pohybuje v řádu desetin až jednotek Pa. Podrobný popis činnosti lidského sluchu je mimo rámec této práce a nebude do ní tedy zahrnut.

## 1.2 Typy reproduktorů a praktické provedení

Než budou popsány jednotlivé typy reproduktorů, mělo by být přesněji určeno, jakému ideálu by se reproduktor měl přiblížit. Tedy ideální reproduktor by měl splňovat tyto podmínky: *Vyrovnanou charakteristiku hladiny akustického tlaku v dB, směrovou charakteristiku izotropního (bodového) zářiče, tedy kruhovou, nesměrnost, konstantní-frekvenčně nezávislou impedanci, nulové nelineární zkreslení, libovolnou výchylku membrány a maximální účinnost a citlivost* [2]. Je zřejmé, že v praxi toto nelze uskutečnit. ale mělo by být snahou se k tomuto ideálu přiblížit.

Skutečné reproduktory lze dělit podle dvou základních kritérií: Podle přenášeného kmitočtového pásma a podle principu funkce a praktického provedení.

### **1.2.1 Rozdělení podle kmitočtového pásma**

Reproduktory se dělí na basové (cca od 20 do 4000 Hz), středobasové (cca od 50 do 8000Hz), středové (cca od 500 do 8000 Hz), výškové (cca od 5 kHz do 20 kHz) a širokopásmové (cca od 50 Hz do 20 kHz). Širokopásmové lze dále rozdělit na podskupiny jednoduché (klasická koncepce s difuzorem, vysvětleno dále) a koaxiální. Stále se lze ještě setkat se širokopásmovými reproduktory tzv. klasické koncepce bez dalších úprav, ty jsou však stěží použitelné pro uspokojivý přednes vzhledem ke své směrovosti. Koaxiální reproduktor je souosá sestava dvou kmitacích systémů na jedné konstrukci. Aby bylo docíleno co nejvyrovnanější kmitočtové amplitudové charakteristiky, jsou reproduktory kombinovány do dvou, tří či vícepásmových sestav. Příslušné pásmo se pro každý reproduktor pak vymezuje pomocí filtrů se strmostí 6, 12 a někdy i 18 dB/ okt, tyto filtry se nazývají výhybky [2].

### **1.2.2 Rozdělení podle principu funkce a praktického provedení**

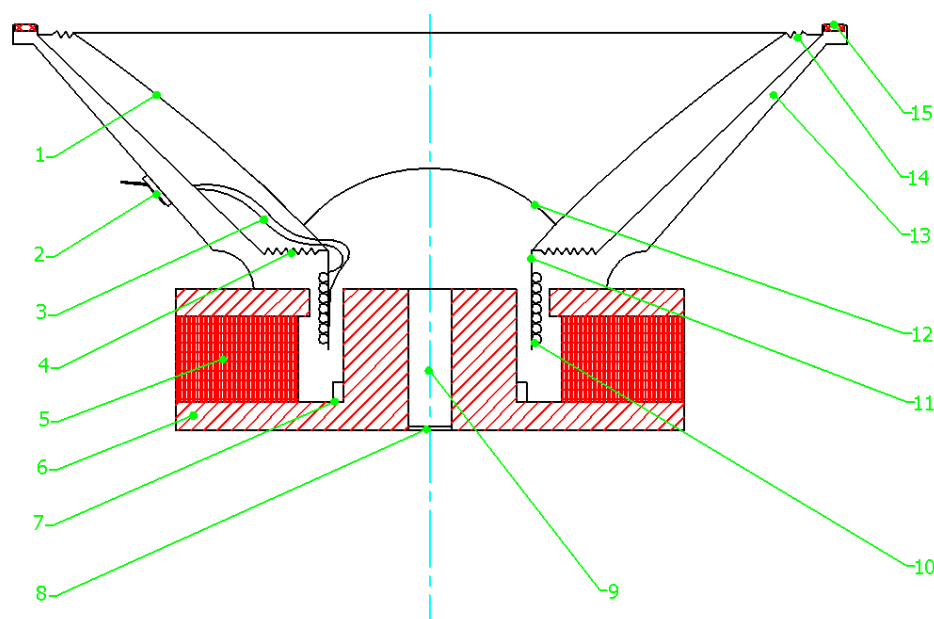
Podle požadovaného kmitočtového rozsahu reproduktoru byly vyvinuty různé technologie výroby. Mezi nejstarší a nejrozšířenější patří přímo vyzářující elektromagnetický reproduktor s kónickou membránou. Jelikož bude pro splnění požadavků zadání tento typ pravděpodobně nejvhodnější, bude mu věnována zvláštní pozornost. (Širokopásmové reproduktory jsou zpravidla výhradně tohoto typu)

#### **Elektromagnetický reproduktor s kónickou membránou**

Konstrukci tohoto měniče lze vidět na Obr. 1.1. Skládá se z těchto částí:

1. Kónická (kuželová) membrána
2. Kontakty pro připojení vedení (terminál)
3. Speciální ohebné vodiče propojující kmitací cívku s pevnými kontakty
4. Středící membrána (dolní závěs)
5. Magnet
6. Pólové nástavce
7. Zkratovací prstenec
8. Ochranná mřížka otvoru pólového nástavce (jenom pro některé typy)
9. Otvor v pólovém nástavci (pro lepší chlazení)

10. Kmitací cívka
11. Kostříčka kmitací cívky
12. Vrchlík (prachovka)
13. Koš
14. Horní závěs
15. Těsnění



Obr. 1.1: Konstrukce elektromagnetického reproduktoru (klasická koncepce).

Tento náčrtek vychází z lit. [2]. Pro co nejlepší činnost tohoto reproduktoru je zapotřebí, aby membrána měla co největší tuhost, avšak co nejmenší hmotnost. Vysoká tuhost je žádoucí pro potlačení vlastních kmitů membrány, jež jsou způsobeny její pravidelnou deformací [2]. Tradičním materiálem pro výrobu membrány je papír. Aby bylo dosaženo kýžené tuhosti, vyrábí se membrána mnohdy i mírně prohnutá, právě jako na Obr. 1.1. Dále se membrána impregnuje např. polyuretanovým lakem a jinými speciálními nátěry. Na její povrch se někdy také nanáší vrstvička kovu, např. hliníku, který lze pro další zvýšení tuhosti membrány opatřit keramickým povlakem. V extrémních případech se používá i titan, který je sice velmi vhodný, ale zato extrémně drahý. Vůbec nejpevnější membrány jsou vyráběny z uhlíkových vláken [2].

Změny atmosférického tlaku jsou způsobovány pístovým pohybem této membrány. Ten je vyvoláván střídavým proudem připojeným na kmitací cívku, která

je umístěna v magnetickém poli pólových nástavců permanentního magnetu. Vzhledem k tomu, že se vychází z Faradayova zákona, je žádoucí, aby mezera, v níž se kmitací cívka pohybuje, byla co nejmenší (dosahuje se tak co nejvyšší intenzity magnetického pole a tak i co nejvyšší síly působící na kmitací cívku). Závěsy membrány by měly být maximálně poddajné. Můžou být vyrobeny ze zvlněného papíru, u hlubokotónových reproduktorů též z měkčené pryže nebo polyuretanu. Závěsy určují max. výchylku membrány a také zajišťují, aby se pohybovala v ose (kmitací cívka se nesmí během pohybu dotýkat pólového nástavce). Co se týče koše, nejčastěji se lze setkat s výliskem z ocelového plechu. U některých reproduktorů se lze dokonce setkat s koši litými, v poslední době také s plastovými [2].

Elektromagnetický systém se využívá jak pro reproduktory basové a středové, tak pro výškové či širokopásmové. Jaké kmitočty bude reproduktor s to přenášet je omezeno průměrem membrány a její maximální efektivní výchylkou. Tuto souvislost objasňuje vztah [1]:

$$P = k \cdot S^2 \cdot y^2 \cdot f^4, \quad (1.1)$$

Kde  $P$  je akustický výkon měniče,  $k$ - konstanta reprezentující vlastnosti prostředí,  $S$  je plocha membrány,  $y$  je maximální efektivní výchylka a konečně  $f$ - kmitočet. Pokud bude tedy např. nutno, aby měnič dodávající akustický výkon  $P$  přenesl bez poklesu tohoto  $P$  i kmitočty nižší, třeba  $f/2$ , musí se buďto zvýšit výchylka jeho membrány 2 krát anebo plocha membrány 4 krát (popř. kombinace obou). V praxi to znamená asi tolik, že hlubokotónové reproduktory jsou velké a jejich závěsy velmi vytížené. Obecně platí, že lepší volbou je reproduktor s většími rozměry, než menší reproduktor s většími výchylkami. To je proto, že mechanicky namáhané části, tedy závěsy a přívody, jsou nejčastějším zdrojem poruch basových reproduktorů [2]. Větší výchylka také znamená vyšší pravděpodobnost nelinearity systému z důvodu tendence kmitací cívky krátkodobě „opustit“ štěrbinu mezi pólovými nástavci. Na Obr. 1.3 je pro přiblížení širokopásmový elektromagnetický reproduktor ARO 568K opatřený difuzorem, fotografie z katalogového listu v [5]. Význam difuzoru bude podrobněji popsán v kapitole 1.3, která se zabývá charakteristikami reproduktorů.





Obr. 1.2: Reentrální reproduktor  
ART-050-10



Obr. 1.3: Širokopásmový reproduktor  
ARO 568K

### Elektromagnetické měniče s jinými membránami

Toto jsou rovněž velmi rozšířené typy měničů. Mohou to být buď přímo vyzařující, nebo tlakové systémy. Přímo vyzařujícím je např. systém s kalotou, což je kulový vrchlík z textilie plnící funkci membrány [2]. Kalotové reproduktory jsou zpravidla pouze vysokotónové, vhodné pro Hi-fi aplikace. Pro profesionální sestavy jsou vhodnější tlakové elektromagnetické reproduktory, kde je na membránu navázán tuhý zvukovod. Samotnému měniči se v tomto případě říká driver. Systém využívá principu impedančního transformátoru a vyrábí se nejčastěji jako středotónový či vysokotónový. Dolní mezní kmitočet zde závisí na délce zvukovodu: čím nižší kmitočet má systém reprodukovat, tím delší zvukovod to vyžaduje. Proto se také příliš nepoužívá tlakového systému pro hlubokotónové reproduktory. Speciálním případem je reentrální reproduktor- klasický tlampač. Zde se dostatečná délka získá několikerým zahnutím zvukovodu, díky čemuž se fyzicky celý reproduktor zkrátí [2]. Tyto reproduktory mívají vysokou citlivost, avšak na vysokých kmitočtech mají nedostatečnou účinnost. Jako širokopásmové se nevyrábí (princiálně to nelze vzhledem ke ztrátám vysokých kmitočtů ve zvukovodu velkých rozměrů) [2].

### Elektrostatický reproduktor

Vyznačuje se nízkým zkreslením a přímou kmitočtovou amplitudovou charakteristikou. Kromě budícího napětí potřebuje také stejnosměrné polarizační napětí. Jeho impedance má kapacitní charakter, principiálně se totiž jedná o kondenzátor.

Vyrábí se pouze jako výškové reproduktory, pro tuto práci tedy nemají význam, více v lit. [2].

### Piezelektrický reproduktor

Podobný princip jako u piezokeramického rezonátoru (krystalu). *Vzhledem k tuhosti a omezenému provedení piezokeramických částí se tyto používají pouze u výškových reproduktorů a v oblasti středních kmitočtů* [2]. Proto ani o tomto systému nelze uvažovat pro využití jako širokopásmového reproduktoru.

## 1.3 Charakteristiky a parametry reproduktorů

Každý seriózní výrobce u svých reproduktorů uvádí jejich základní charakteristiky. *Modulová kmitočtová charakteristika* udává závislost akustického tlaku (*SPL*) v dB na kmitočtu při konstantním napětí na reproduktoru. Hodnota *SPL* se vztahuje k referenční hodnotě. Tou je práh slyšení  $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$ , což odpovídá akustickému výkonu  $P_0 = 1 \text{ pW}$ , viz lit.[2]

$$SPL = L_p = 20 \log \frac{P}{P_0} \text{ (dB)} \quad (1.2)$$

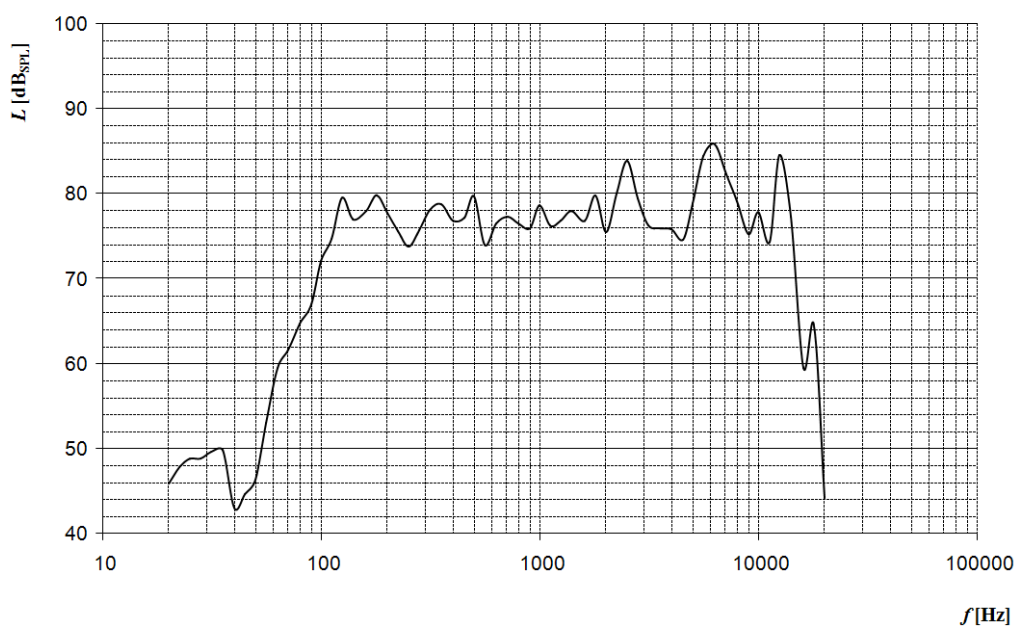
$$SPL = L_p = 10 \log \frac{P_{AK}}{P_0} \text{ (dB)} \quad (1.3)$$

Měří se měřícím mikrofonem v ose reproduktoru a v bezodrazové komoře, aby nedocházelo ke zkreslení naměřených údajů odraženými vlnami. S tímto jevem souvisí pojem střední doba dozvuku, „*což je doba trvání signálu po vypnutí zdroje signálu, samozřejmě již v ustáleném stavu, kdy se prostor dostatečně ustálí na směsici odražených a zvukových vln*“ [2]. Za konec trvání ozvěny se považuje pokles úrovně dozvuku o 60 dB, více v lit. [2].

Příklad kmitočtově amplitudové charakteristiky je na Obr. 1.4. Od ní se pro věrnou reprodukci v praxi požaduje, aby byla pokud možno přímá v co nejširším pásmu, bez zvlnění. Z této charakteristiky se obvykle určuje *kmitočtový rozsah reproduktoru*. Reproduktor považujeme za schopný přenášet ty kmitočty, při kterých akustický tlak nepoklesne pod 3dB ve srovnání s tlakem při referenčním kmitočtu, u hlubokotónových reproduktorů často např. 1 kHz, viz [5]. V případě, že bude charakteristika měřena mimo osu, naměřené údaje se budou dosti lišit. I kdyby se jeho

přední a zadní vlna dokonale oddělila, nešířila by se zvuková vlna ve vzniklém poloprostoru po půlkulové vlnoploše, ale přibyly by další postraní laloky: je tedy žádoucí udávat u měniče také *směrovou charakteristiku*.

Je to diagram s polárními souřadnicemi udávající závislost charakteristické citlivosti na úhlu otočení reproduktoru. V případě přímo vyzařujícího elektromagnetického měniče postačí jeden rovinný průmět, jelikož elektromagnetický reproduktor s kónickou membránou nebo kalotou je středově souměrný a tedy charakteristika je stejná jak v horizontálním tak ve vertikálním směru.



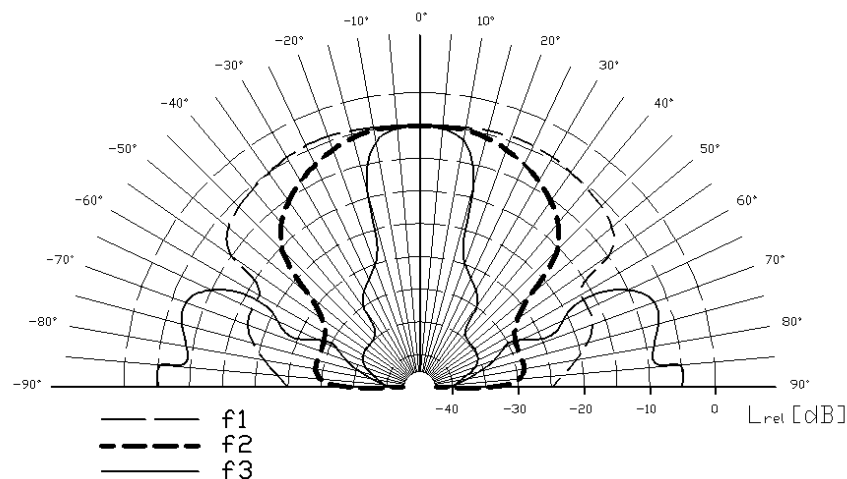
Obr. 1.4: Amplitudová kmitočtová charakteristika reproduktoru

Směrový účinek reproduktoru popisuje *činitel směrovosti*  $\sigma$  který se spočítá podle vztahu z lit. [4]

$$\sigma = \frac{I_0}{I_k} = \left( \frac{p_0}{p_k} \right)^2 \quad (-) \quad , \quad (1.4)$$

kde  $I_0$  je intenzita zvukové energie v ose reproduktoru a  $I_k$  intenzita, která by byla v témže místě, kdyby zdroj vyzařoval kulovou vlnu (tedy bez směrového účinku) [4]. Pak  $p_0$  a  $p_k$  jsou odpovídající akustické tlaky.

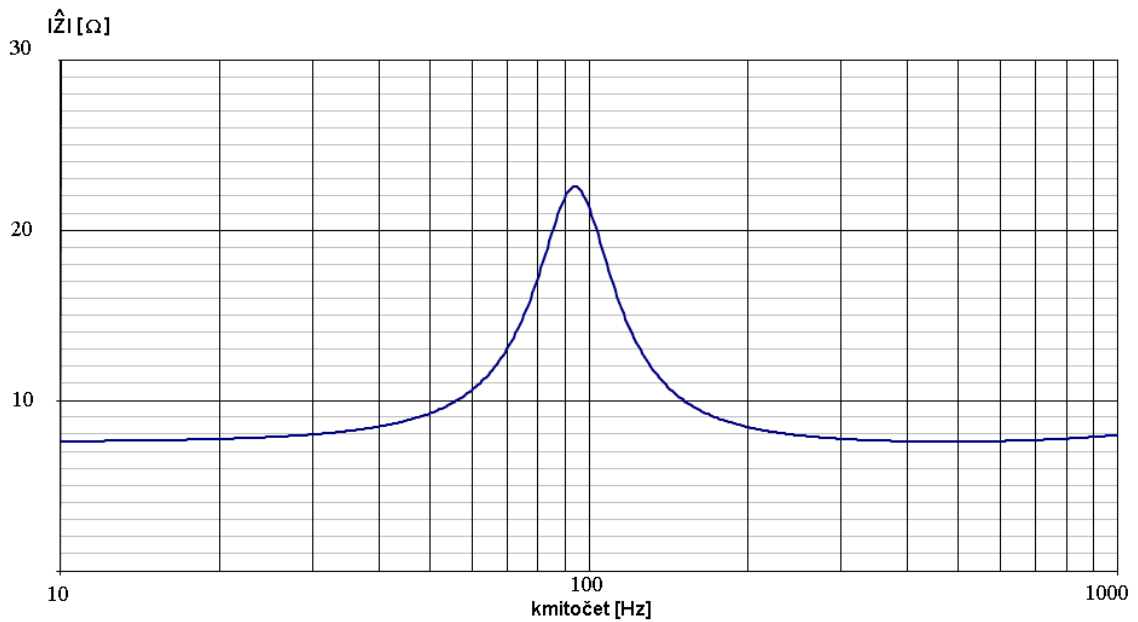
Na Obr. 1.5 je příklad směrové charakteristiky elektromagnetického reproduktoru, kde  $f_1 < f_2 < f_3$ . Je zde zřetelné, jak reproduktor na vyšších kmitočtech začíná směřovat.



Obr. 1.5: Příklad směrové charakteristiky reproduktoru.

Směrová charakteristika se měří vždy pro 2 až 3 kmitočty. Obecně platí, že čím vyšší kmitočet má zkušební signál, tím užší je hlavní lalok a zvětšuje se počet laloků postraních. Čím větší průměr membrány reproduktor má, tím dříve začíná směřovat. U širokopásmového reproduktoru, kde je třeba dostatečně velká membrána kvůli nízkým kmitočetům tento jev odstraňuje již zmiňovaný difuzor, který funguje jako další reproduktor- výškový, ovšem pracuje se stejným kmitacím systémem, viz [2].

Další významnou charakteristikou reproduktoru je *modulová impedanční charakteristika*. Je to graf závislosti modulu impedance reproduktoru na kmitočtu. Výrobce sice udává u každého reproduktoru jmenovitou impedanci, to však nelze považovat za fixní číslo. Tento údaj platí pro nejnižší možnou impedanci, jakou reproduktor může dosáhnout ve svém rozsahu. Na Obr. 1.6 je tato závislost zobrazena, je zde vidět významný nárůst impedance v oblasti rezonančního kmitočtu reproduktoru. To je kmitočet, kdy kmitací systém dosahuje nejnižší výchylky a největší účinnosti.



Obr. 1.6: Impedanční charakteristika elektromagnetického reproduktoru

Dalším důležitým parametrem je *jmenovitý příkon*. *Jmenovitý příkon* je to, co soustava vydrží po dobu alespoň sto hodin, aniž by se její vlastnosti změnily [1]. Je to zdánlivý příkon, platí tedy obecný vztah:

$$P = \frac{U^2}{Z} \text{ (VA)}, \quad (1.5)$$

kde  $U$  je efektivní napětí připojené na reproduktor a  $Z$  je jmenovitá impedance soustavy. Přestože jednotkou je 1 VA, je zvykem udávat tuto hodnotu ve W. Často výrobci za účelem většího výdělku udávají výkon v jiných pofiderních hodnotách, jako např. 50W rms nebo p.m.p.o., či hud, více v [2].

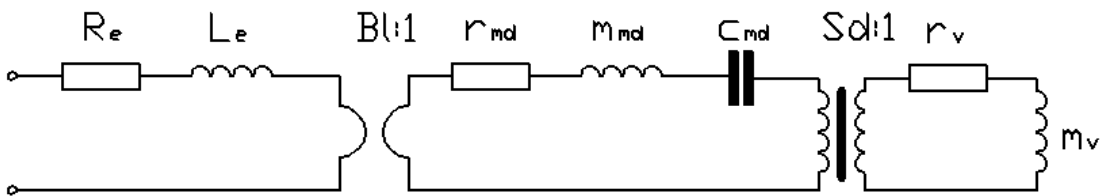
S příkonem souvisí *účinnost*. Aby bylo možno určit skutečný akustický výkon, je třeba ji znát. V jiných oblastech se běžně udává účinnost v %, u reproduktorů je ale zvykem udávat tzv. *charakteristickou citlivost* v dB. Ta vyjadřuje, jaký akustický tlak reproduktor vyvine ve vzdálenosti 1m při příkonu 1 VA při vyzářování do poloprostoru (tj. ideální oddělení přední a zadní vlny). Nejnížší citlivost mají basové hi-fi reproduktory, okolo 80 dB a nejvyšší výškové reproduktory (přes 100dB). Lze říci, že 92dB citlivost odpovídá účinnosti cca 1%, viz [2].

Důležitým parametrem reproduktoru je rovněž *zkreslení*. Nejvýznamnější je zkreslení harmonické, tedy nelineární. Udává se činitelem zkreslení THD v %. Vlivem omezených možností závěsů od určitého výkonu začne reproduktor „ořezávat“ signál,

čímž do něj přináší množství harmonických kmitočtů. Jinou příčinou zavedení zkreslení může být situace, kdy cívka krátkodobě opustí magnetické pole pólových nástavců, viz [2]. Také modulace magnetického pole zavádí zkreslení- střídavé mag. pole cívky se slučuje s polem permanentního magnetu a tak vzniká množství sudých harmonických. K odstranění slouží zkratovací prstenec, viz kap. 2.

*Maximální lineární výchylkou* reproduktoru se tedy rozumí taková výchylka, do které ještě výrobce garantuje udaný činitel zkreslení THD. Z hlediska účinnosti je ideální co nejmenší výchylka, značný pohyb kmitačky totiž vede k pravděpodobnějšímu opuštění magnetického pole štěrbinu pólových nástavců. To způsobuje již zmíněné nelineární zkreslení (lze si to představit jako postupné ořezávání sinusovky, se kterým přibývají harmonické).

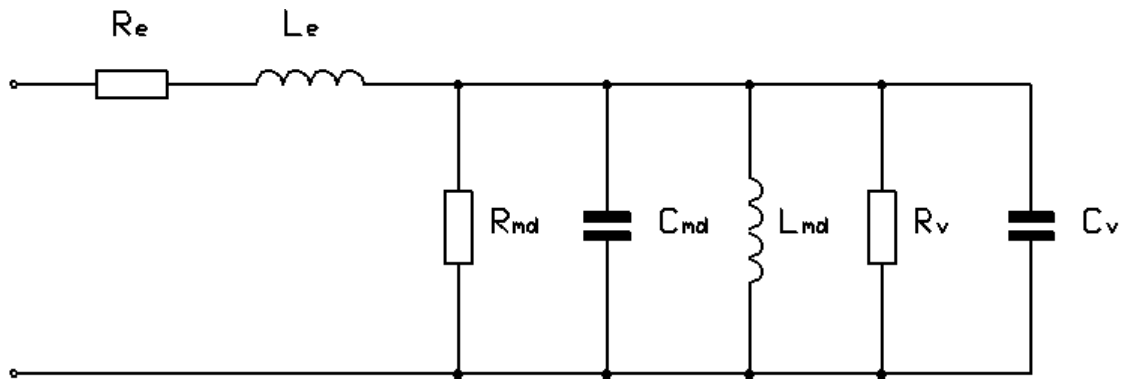
Na Obr. 1.7 je *náhradní schéma reproduktoru*, viz lit. [2] V elektromechanické analogii poddajnost představuje kapacitu  $C$ . Je to převrácená hodnota tuhosti pružiny. Hmotnost kmitacího systému a sloupce vzduchu, jenž je tlačěn membránou, zastupuje indukčnost  $L$ . Mechanický odpor kmitacího systému a sloupce vzduchu odpovídá el. odporu  $R$ . Dále je známo, že mechanická síla  $F$  odpovídá el. napětí  $U$ , a rychlost  $v$  zase el. proudu  $I$ .



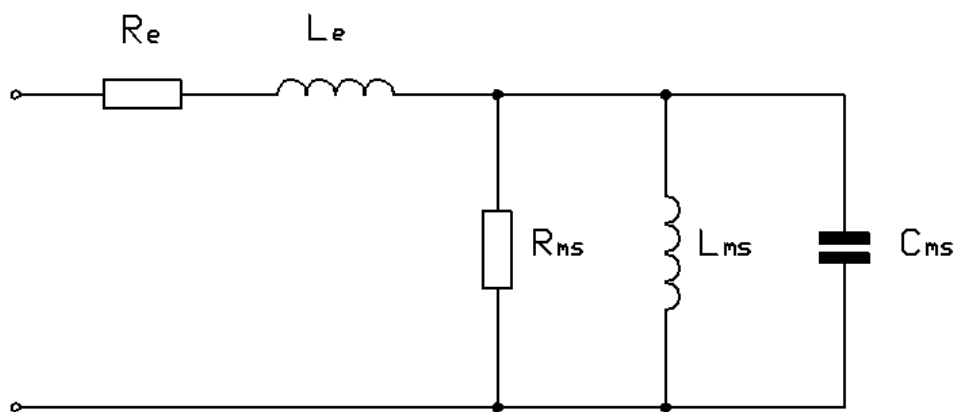
Obr. 1.7: Náhradní schéma reproduktoru s gyrátorem

Jedná se o nejčastější schéma s gyrátorem. To je neexistující součást, která však vystihuje způsob, jakým cívka transformuje proud na mechanické napětí. Jeho vlastnosti popisuje gyrační konstanta, u reproduktorů se udává jako  $Bl$  faktor [2]. Ten určuje, jak velká bude síla  $F$  při určitém proudu  $I$ . Ve schématu odděluje původně elektrickou část od převedené mechanické. Dvojice  $Re$  a  $Le$  na elektrické straně představují kmitací cívku, na mechanické straně odpor  $r_{md}$  zastupuje mechanický odpor obou závěsů, indukčnost  $m_{md}$  hmotnost membrány. Kapacita  $C_{md}$  reprezentuje poddajnost obou závěsů (horní+ střední).  $Sd$  je impedanční transformátor, jehož funkci

plní membrána svým kuželovitým tvarem, více v lit. [2]. Na druhé straně transformátoru je jak jinak než mechanický odpor a hmotnost vzduchového sloupce převedené na své elektrické ekvivalenty. Po umístění reproduktoru do ozvučnice ve schématu samozřejmě přibudou další prvky.



Obr. 1.8: Náhradní schéma reproduktoru převedené na elektrickou stranu.



Obr. 1.9: Náhradní schéma reproduktoru se sloučenými prvky, převedené na elektrickou stranu

Schéma s gyrátorem sice jednoznačně vymezuje elektrickou a akustickou část, ale není vhodné pro výpočty. Pro zjednodušení se tedy převádí prvky z akustické strany na stranu elektrickou, viz Obr. 1.8. Poddajnost však po převedení na stranu elektrickou již nemá charakter kapacitní, nýbrž induktivní a místo sériového zařazení přechází v paralelní. Značí se tedy nově jako indukčnost. Hmotnost svým převedením zase pozbývá charakteru induktivního a nabývá kapacitní charakter a rovněž se převádí ze sériového zapojení na paralelní. Na elektrické straně se tedy kreslí jako kapacita.

Odpor zůstává odporem, pouze opět změni způsob zapojení ze sériového na paralelní. Matematicky k převedení dochází s pomocí gyrační konstanty tímto způsobem:

$$R_{\text{md}} = \frac{(Bl)^2}{r_{\text{md}}} [\Omega] \quad (1.6)$$

$$C_{\text{md}} = \frac{m_{\text{md}}}{(Bl)^2} [\text{F}] \quad (1.7)$$

$$L_{\text{md}} = c_{\text{md}} \cdot (Bl)^2 [\text{H}] \quad (1.8)$$

$$R_{\text{v}} = \frac{(Bl)^2}{S_{\text{d}}^2 r_{\text{v}}} [\Omega] \quad (1.9)$$

$$C_{\text{v}} = \frac{S_{\text{d}}^2 m_{\text{v}}}{(Bl)^2} [\text{F}] \quad (1.10)$$

$R_{\text{md}}$  je tedy odpor jenž vznikl z mechanického odporu závěsů membrány,  $C_{\text{md}}$  představuje hmotnost membrány a závěsů a  $L_{\text{md}}$  její poddajnost. Odpor  $R_{\text{v}}$  je převedený odpor sloupce vzduchu, který reproduktor před sebou tlačí, a kapacita  $C_{\text{v}}$  reprezentuje zase hmotnost tohoto sloupce.  $S_{\text{d}}$  je efektivní plocha membrány. Na Obr. 1.9 je již zcela zjednodušené náhradní schéma reproduktoru se sloučenými prvky, převedené na elektrickou stranu, viz lit. [2].

Pro návrh ozvučnice je třeba znát ještě činitele jakosti, čili, kvality, což jsou  $Q_{\text{ms}}$ ,  $Q_{\text{es}}$ ,  $Q_{\text{ts}}$ , popř. ještě odpory  $r_{\text{ms}}$ ,  $r_{\text{md}}$ . V teorii elektronických obvodů platí obecný vzoreček:

$$Q = f_s / B [-] \quad (1.11)$$

Kde  $Q$  je činitel jakosti,  $f_s$  rezonanční kmitočet a  $B$  šířka pásma (pro pokles signálu nad a pod rezonancí o 3dB). Totéž analogicky platí i pro reproduktory. Úzká a vysoká rezonanční špička tedy značí velkou jakost, zatímco nízká a široká malou.

**Činitele jakosti jsou následující:**

- $Q_{\text{ms}}$  je mechanický činitel jakosti a zahrnuje v sobě vliv ztrát pohyblivých částí reproduktoru.
- $Q_{\text{es}}$  je elektrický činitel jakosti a zahrnuje vliv elektrických ztrát v kmitací cívice.
- $Q_{\text{ts}}$  je tzv. celkový činitel jakosti, viz. lit. [2]



Vliv činitele jakosti je znatelný na dolním okraji kmitočtové charakteristiky v podobě překmitu. Výška tohoto hrbu odpovídá celkové jakosti reproduktoru. Pokud jsou známy odpory  $r_{ms}$ - mech. odpor kmitacího systému a kmitajícího sloupce vzduchu,  $r_{md}$ - odpor kmitacího systému a hmotnost sloupce vzduchu  $m_{ms}$ , lze mechanickou jakost vypočítat dle vztahu z lit. [2]:

$$Q_{ms} = 2\pi f_s \frac{m_{ms}}{r_{ms}} [-] \quad (1.12)$$

Ten dle elektro- mechanické analogie odpovídá vztahu pro činitel jakosti obvodu RLC, viz výše. Stejně tak lze přepsat obdobný vztah, tentokrát pro elektrickou jakost, viz. lit. [2, str.50]:

$$Q_{es} = 2\pi f_s \frac{m_{ms} R_e}{Bl^2} [-] \quad (1.13)$$

Zde  $R_e$  je odpor kmitací cívky a  $Bl$  je již zmiňovaný silový faktor, čili gyrační konstanta. Pro výpočet lze použít vztah opět z lit. [2]:

$$Q_{ts} = \frac{Q_{ms} Q_{es}}{Q_{ms} + Q_{es}} [-] \quad (1.14)$$

Je třeba ještě zmínit skutečnost, že  $Q_{ts}$  parametry, jak jsou souhrnně jakosti reproduktoru nazývány, se změní připojením na zesilovač, jelikož ten do náhradního obvodu reproduktoru vnáší svůj vnitřní odpor. Jakost rep  $Q_{ts}$  oduktoru se tím tedy zvýší a to tím více, čím nižší bude vnitřní odpor zesilovače.

V praxi jsou reproduktory s nižším  $Q_{ts}$  vhodné pro malé skříně, jelikož mají dobré tlumení (podobné zatlumení obvodu RLC odporem). Vysoká hodnota  $Q_{ts}$  zase vyžaduje větší objem ozvučnice, ale jejich dolní mezní kmitočet bývá nižší.  $Q_{ts}$  se v praxi pohybuje v intervalu cca od 0,3 do 0,9, viz [5].

Zbývá dodat Ekvivalentní objem  $V_{as}$ . Tato hodnota přibližně určuje optimální objem ozvučnice, do které má být reproduktor uzavřen. Je definován jako takový objem vzduchu (ve skříně), který by vykazoval tutéž poddajnost, jako kmitací systém použitého reproduktoru. Reprodukty s nižším  $V_{as}$  vykazují větší tuhost systému (zatlumení odporem kmitacího systému) a tedy nižší výchylku, viz [2].

Poslední hodnotou, která bude zapotřebí pro návrh ozvučnic v této práci, je koeficient  $EBP$ . Ten slouží k orientačnímu určení vhodnosti reproduktoru pro basreflexovou ozvučnici. Výpočet dle lit. [2] je jednoduchý:

$$EBP = \frac{f_s}{Q_{ES}} [\text{Hz}] \quad (1.15)$$

Pokud je  $EBP < 50$  Hz, je reproduktor vhodný pro uzavřenou skříň, pokud je větší než 50Hz, bude se hodit pro basreflexovou.

## 2 OZVUČNICE

### 2.1 Jednoduchá ozvučnice (rovinná deska)

Jak již bylo řečeno v úvodu, jedná se o nejjednodušší a také o nejméně efektivní ozvučnici. Zejména v oblasti pod 100 Hz dochází ke značným ztrátám. Takováto ozvučnice byla zpravidla umisťována do rohu místnosti (viz obr. 2), aby poskytla alespoň uspokojivý přednes v podmínkách plošného ozvučování. Jednalo se většinou o čtvercovou desku vyrobenou z překližky. Nutno dodat, že přesnou impedanci takovéto ozvučnice nelze stanovit na jeden pevný údaj, velmi totiž záleží na jejím umístění. Obecně lze říci, že její impedance bude tím nižší, čím blíže ke zdi bude ozvučnice přiblížena. Výhodou je lacinější konstrukce a *nepřítomnost rezonancí vlivem stojatých vln* [2]. Rovinná deska se jako tzv. standardní ozvučnice též používá pro měřicí účely. Tato podkapitola je pouze informativní, projekt se ozvučnicí typu „rovinná deska“ nebude nadále zabývat.

### 2.2 Otevřená ozvučnice

Na rozdíl od rovinné desky je tato varianta stále živá. Tvarově odpovídá zpravidla kvádru, jemuž chybí zadní stěna. Akustický zkrat je zde lépe eliminován, než v předchozím případě. O dolním mezním kmitočtu ozvučnice rozhoduje její hloubka  $h$  (viz obr. 3). *Za dobrý kompromis se považuje, když  $a = 2$  až  $4h$ . Zvětšováním hloubky  $h$  posunujeme dolní mezní kmitočet dolů a současně na charakteristice vytváříme hrb, tomu odpovídá zvětšování činitele jakosti* [3]. Mezní kmitočet takové skříně lze spočítat ze vztahu z [3]:

$$f_m = \frac{55}{h \sqrt{1 + 0,48 \frac{a}{h}}} [\text{Hz}]. \quad (2.1)$$

Uvedený vztah platí pouze pro malé skříně. Výhodou otevřené ozvučnice je lepší chlazení reproduktoru než u ozvučnice uzavřené (viz další kapitola). Pro aplikace Hi-fi tato varianta nenachází uplatnění, jediná oblast využití je již zmiňovaná nástrojová, resp. kytarová aparatura (pakliže je řeč o elektrické a elektroakustické kytáře). Také

impedance reproduktoru v otevřené ozvučnici je do značné míry závislá na umístění boxu, resp. vzdálenosti jeho zadní části od stěny. Závislost již není tak markantní, jako v předchozím případě.

Materiály pro výrobu těchto ozvučnic jsou různé. V minulosti to byla především překližka s povrchovou úpravou dýha+ šelak. Často byly skříně řemeslně precizně zpracovány. I za cenu vyšších výrobních nákladů byly překližkové desky složitě ohýbány a polepovány dýhou. U kytarových komb bylo a stále je možno se setkat s čalouněním koženkou, či textilií. Protože zadní vlna reproduktoru není eliminována zadní stěnou, nemá ani smysl vnitřek takovéto ozvučnice tlumit. Naopak se u těchto soustav počítalo se skříní jako s rezonátorem. To bylo do značné míry dáno mimo jiné malou účinností zesilovačů. Byla snaha jejich výkon tedy využít co nejvíce. Do kytarových komb ani nebylo žádoucí montovat velmi výkonné zesilovače vzhledem k jejich hmotnosti. Ani dnes se téměř nelze setkat s elektronickým kombem výkonnějším než 50W.

V současnosti se tyto skříně vyrábí kromě překližky též z dřevotřísky a M.D.F. Jen zřídka lze narazit v kusové výrobě na masivní dřevěné skříně či laťovku. Ve spotřební elektronice jsou běžné i plastické hmoty jako např. polystyren (nepěnový).

## **2.3 Uzavřená ozvučnice**

### **2.3.1 Obecná charakteristika**

V tomto případě je akustický zkrat ještě lépe potlačen. Je třeba však zdůraznit, že reproduktor ani v tomto případě nevyzařuje do poloprostoru a je tedy jeho citlivost stále ještě nižší, než charakteristická citlivost udaná výrobcem (ta platí právě pro poloprostor). Tato hodnota se pohybuje okolo 6 dB (viz lit. [2] ) pro nejhorší případ, tj. umístění ozvučnice do pleněru. Reproduktorová skříň je tvořena uzavřeným kvádrem. Aby byla zadní vlna co nejlépe potlačena, je třeba, aby skříň byla dobře vytlumena a hermeticky uzavřena s ohledem na použitý výkon (není žádoucí např. těsnit skříň na 1 bar, pokud má reproduktor jmenovitý příkon 5W). Tlumení má dále za úkol eliminovat vlastní rezonanci skříně a nežádoucí odrazy zvukové vlny od stěn skříně. Ideální ozvučnice by pak vyzařovala se směrovou charakteristikou tvaru půlkružnice. Vestavěním reproduktoru do uzavřené ozvučnice nastávají tyto jevy: Poddajnost kmitacího systému a vzduchu uvnitř skříně se dle elektromechanické analogie

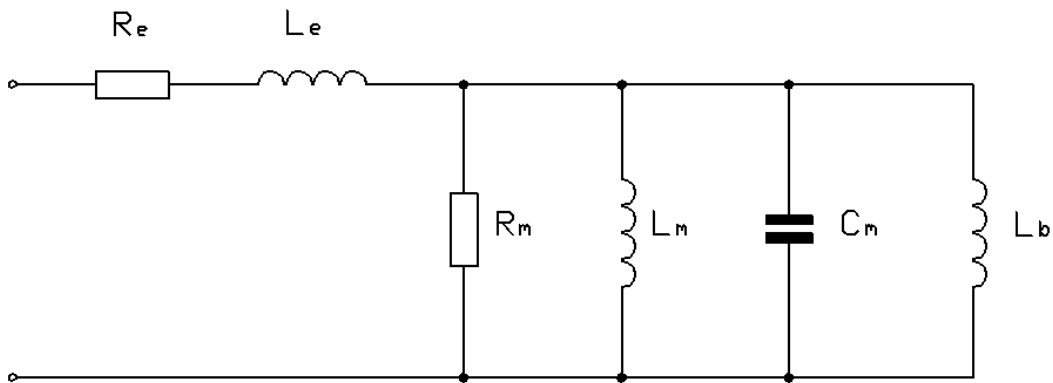
pochopitelně sečte tak, jako se sečtou 2 sériově zapojené kapacity v elektrickém obvodu, tedy:

$$\frac{1}{c_v} = \frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} \Rightarrow c_v = \frac{c_1 \cdot c_2}{c_1 + c_2} [\text{m/N}]. \quad (2.2)$$

Pro přibližnou rezonanci ozvučnice platí opět z principu elektromechanické analogie Thompsonův vztah (neuvažuje se zde hmotnost vzduchového sloupce ani vzduchu ve skříni, pouze kmitacího systému)

$$f_s = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{m_{\text{md}} c_{\text{md}}}} [\text{Hz}] \quad (2.3)$$

Zde již je zřetelný důsledek zmiňovaného vestavění reproduktoru do ozvučnice: výsledná poddajnost je číslo nižší,



Obr. 2.1: Náhradní schéma uzavřené ozvučnice převedené na elektrickou stranu

než poddajnosti 1 a 2, toto číslo se v Thompsonově vztahu nachází ve jmenovateli, to tedy znamená *posun rezonančního kmitočtu nahoru*.

Zjednodušené náhradní schéma uzavřené ozvučnice převedené na elektrickou stranu je na Obr. 2.1. Nová poddajnost je zde tvořena paralelní indukčností  $L_b$ .

Celková jakost rovněž vzroste společně s rezonančním kmitočtem. Nově vzniklá jakost  $Q_{tc}$  úzce souvisí s ekvivalentním objemem reproduktoru a zvoleným objemem ozvučnice, což vystihuje vzoreček z lit. [2]:

$$\frac{Q_{tc}}{Q_{ts}} = \sqrt{\frac{V_{as}}{V_b} + 1} [-] \quad (2.4)$$

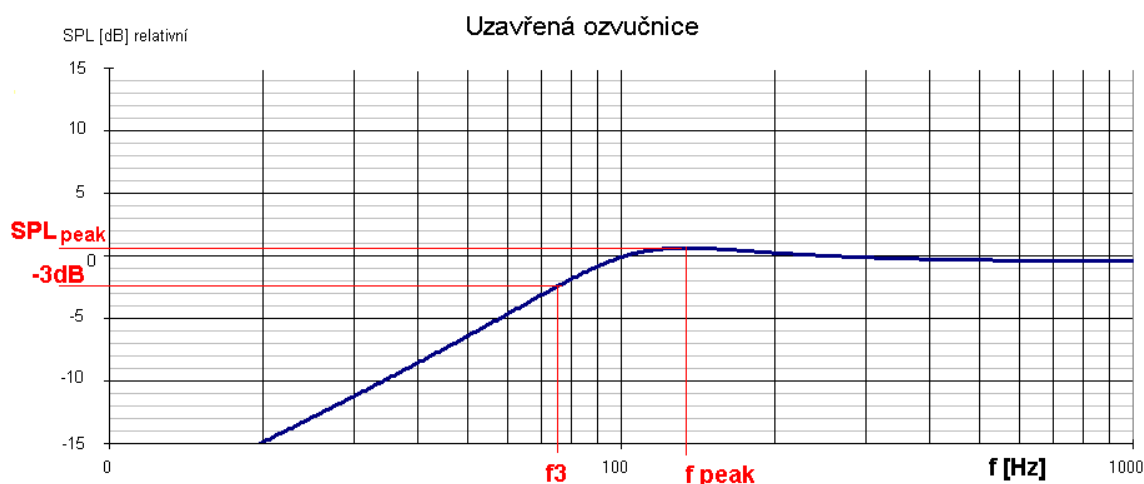
Z tohoto vztahu lze jednoduchou úpravou vyjádřit, kterak souvisí s objemem ozvučnice rezonanční kmitočtet:

$$\frac{Q_{tc}}{Q_{ts}} = \frac{f_c}{f_s} = \sqrt{\frac{V_{as}}{V_b} + 1} = \frac{f_c}{f_s} [-] \quad (2.5)$$

B je zde šířka pásma a  $V_b$  je zvolený objem. Z toho plyne, že čím menší bude objem skříně, tím markantnější bude nárůst rezonančního kmitočtu.

### 2.3.2 Postup návrhu

Při návrhu ozvučnice je cílem přibližně dosáhnout určitého tvaru modulové kmitočtové charakteristiky (SPL). Její tvar lze zachytit pomocí těchto základních údajů: dolní mezní kmitočet  $f_3$ , rezonanční kmitočet  $f_c$ , kmitočet maxima- výšky „hrbu“  $f_{peak}$  a výška hrbu v dB. Příklad takové charakteristiky je na Obr. 2.2. Resonanční kmitočet bude ležet někde mezi dolním mezním kmitočtem a kmitočtem maxima, viz [2].



Obr. 2.2: Amplitudová kmitočtová charakteristika uzavřené ozvučnice

Aby bylo možno tohoto cíle dosáhnout, je třeba znát parametry reproduktoru, na němž bude záviset výsledný objem ozvučnice  $V_b$  a její jakost  $Q_{tc}$ . Jak bylo vysvětleno, čím nižší objem ozvučnice bude zvolen, tím větší bude její jakost a tím vyšší a užší je právě onen zmiňovaný „hrb“. Ne náhodou se amplitudová charakteristika ozvučnice podobá přenosové funkci horní propusti 2. řádu, ozvučnice se jako filtr totiž chová. Dolní strmost je tedy 12dB/oct. Pro výpočty se bude pak využívat aproximací typu Čebyšev, Linkwitz- Riley, Bessel a Butterworth, podle požadované jakosti  $Q_{tc}$ , resp. zvlnění  $SPL_{peak}$ , viz [2]. Nejčastěji se však bude pravděpodobně požadovat

co nejpřímější charakteristika, tedy  $SPL_{\text{peak}}$  okolo 0dB a tomu dle [2] odpovídá aproximace typu Butterworth s  $Q_{tc}=0,707$ . S tímto údajem bude nadále počítáno i v této práci. V případě příliš vysokého objemu lze použít další možnosti dle tab. v [2], tj. např.  $SPL_{\text{peak}}=0,21$  dB odpovídá  $Q_{tc}=0,8$  a  $SPL_{\text{peak}}=0,69$  dB odpovídá  $Q_{tc}=0,9$ . Eventuelně lze použít vzoreček 25. Volbou  $Q_{tc}$  započíná návrh ozvučnice. Dále se vypočítá požadovaný objem skříně podle vztahu z lit. [2]:

$$V_b = \frac{V_{as}}{\left(\frac{Q_{tc}}{Q_{ts}}\right)^2 - 1} [\text{m}^3] . \quad (2.6)$$

Nyní se určí rezonanční kmitočet reproduktorové skříně, viz [2]:

$$f_c = f_s \sqrt{\frac{V_{as}}{V_b} + 1} [\text{Hz}]. \quad (2.7)$$

Následuje výpočet dolního mezního kmitočtu  $f_3$ , a kmitočtu maxima „hrbu“  $f_{\text{peak}}$ , viz [2]:

$$f_3 = f_c \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{Q_{tc}^2} - 2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{Q_{tc}^2} - 2\right)^2 + 4}}{2}} [\text{Hz}], \quad (2.8)$$

$$f_{\text{peak}} = f_c \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{2Q_{tc}^2}}} [\text{Hz}]. \quad (2.9)$$

Velikost zvlnění se určí podle následujícího vztahu z [2]:

$$SPL_{\text{peak}} = 20 \log \sqrt{\frac{Q_{tc}^4}{Q_{tc}^2 - 0,25}} [\text{dB}]. \quad (2.10)$$

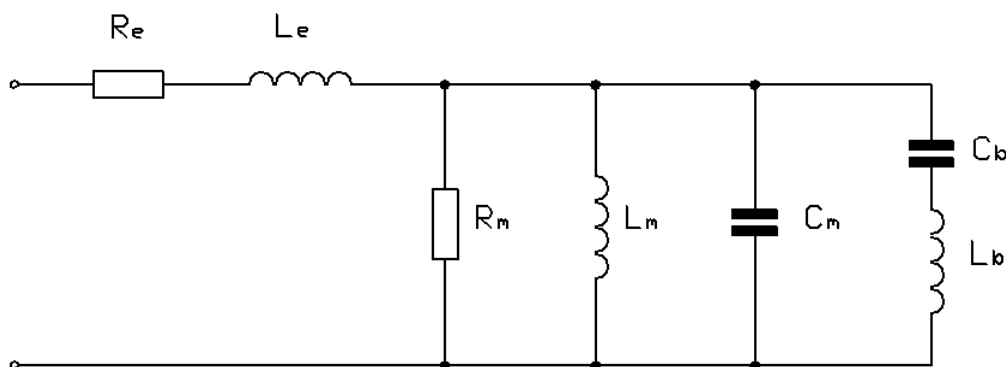
Po získání klíčových hodnot už je možno načrtnout SPL křivku a rozhodnout se, zda je vyhovující. Pokud ne (navrhující osoba vybrala nevhodný měnič), výpočet se opakuje s jiným reproduktorem, popř. s pozměněným  $Q_{tc}$ .

Co se týče výběru reproduktoru, je třeba se dívat především na rezonanční kmitočet a  $V_{as}$ . Pravidlo je takové, že výsledná rezonance bude vždy vyšší než  $f_s$ . Pokud bude podmínkou docílit co nejnižšího rezonančního kmitočtu, je nutno počítat vždy s vyšším objemem, než je  $V_{as}$  [2].

## 2.4 Bassreflexová ozvučnice

### 2.4.1 Obecná charakteristika

Tento typ ozvučnice dosahuje díky částečnému využití zadní vlny reproduktoru vyšší účinnosti, než všechny předešlé případy. Využívá akustického rezonátoru, či Helmholtzova rezonátoru. Jako obchodní i laický název se dnes používá výraz „bassreflexový nátrubek“. Je to krátký kus trubky, obvykle z plastické hmoty, který je zabudován do stěny skříně tak, že vyčnívá dovnitř. Průřez bývá nejčastěji kruhový, ale i obdélníkový, či jiný. Přínos tohoto nátrubku spočívá v tom, že umožňuje dosáhnout daleko nižšího rezonančního kmitočtu než v případě ozvučnice uzavřené při zachování stejného objemu. Jinými slovy amplitudová charakteristika se protáhne směrem k nižším kmitočtům. Zavádí do systému novou poddajnost, která se přičte stejným způsobem jako ve vztahu 17 k celkové poddajnosti, výsledná jakost tedy opět vzroste. Náhradní schéma takto vzniklé ozvučnice převedené zcela na elektrickou stranu je na Obr. 2.3.

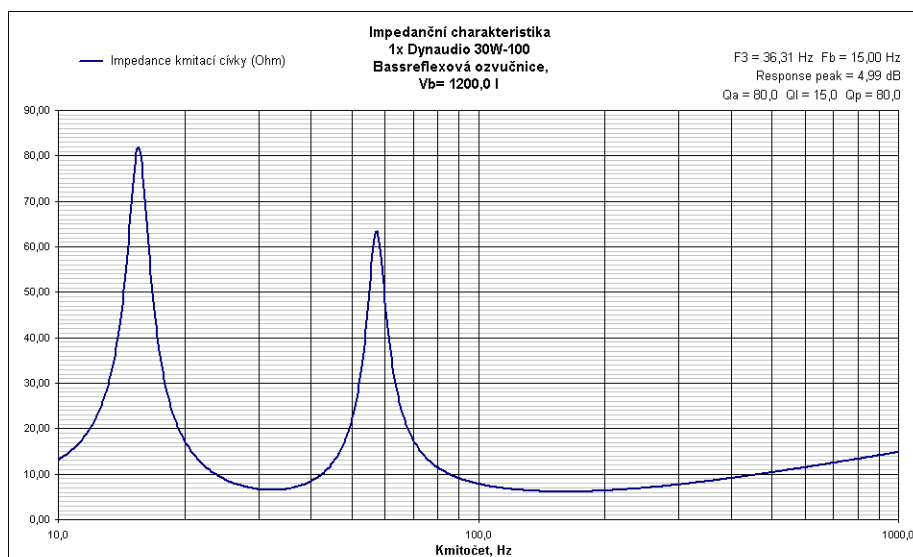


Obr. 2.3: Náhradní schéma ozvučnice typu bassreflex převedené na elektrickou stranu

$R_e$  a  $L_e$  tvoří impedanci reproduktoru, odpor  $R_m$  představuje souhrnný mechanický odpor kmitačky a kmitajícího sloupce vzduchu,  $C_m$  představuje hmotnost kmitacího systému a sloupce vzduchu a  $L_m$  celkovou poddajnost (zahrnuje tedy poddajnost kmitacího systému a vzduchu uvnitř bedny). Součástky  $C_b$  a  $L_b$  představují hmotnost sloupce vzduchu v nátrubku a poddajnost tohoto vzduchu. K natažení charakteristiky dojde tak, že se rezonanční kmitočet nátrubku zvolí hluboko pod rezonancí původní uzavřené ozvučnice. Čím hlouběji se nátrubek naladí, tím přímější charakteristika vznikne, ale o to menší zvýraznění nízkých kmitočtů toto ladění



přinese. Rezonanční kmitočet nátrubku určuje jeho průřez a délka: Se vzrůstající délkou a klesajícím průřezem rezonanční kmitočet klesá. Použitím nátrubku se do systému zavádí nový rezonanční kmitočet  $f_b$ , který bude pod mezním kmitočtem původní uzavřené ozvučnice (pokud se nátrubek správně naladí). Výhodou je menší výchylka nad rezonančním kmitočtem ozvučnice. V rezonanci je výchylka nejnižší, avšak pod ní prudce vzrůstá, což v praxi způsobuje neúnosné nelineární zkreslení a často i poškození závěsů reproduktoru. Pod rezonancí má kmitočtová amplitudová charakteristika dle [2] strmost 24dB/okt, je tedy zřejmé, že bassreflexová ozvučnice nesmí mít na vstup přivedeny signály nižší, než je  $f_b$ . Toho lze docílit buď dostatečně nízkou  $f_b$  nebo v horším případě předřazením horní propusti na vstup ozvučnice. Podle toho, jak velké zvýraznění v oblasti basů je požadováno a jaké zkreslení se bude u navrhované ozvučnici tolerovat, volí se pro návrh určitá aproximace ladění. Popř. lze využít normovaných charakteristik pro jednotlivé  $Q_{ts}$ , jsou-li k dispozici. Kromě složitějšího návrhu patří k úskalím této ozvučnice také větší citlivost na netěsnosti, vzhledem k její vysoké jakosti a nepřesnosti ve výpočtu. V praxi se proto vyrobená ozvučnice často ještě doladuje změnou délky nátrubku. Kromě posunu dolního mezního kmitočtu směrem dolů dochází též ke změně v impedanční charakteristice. Na ní se totiž objevuje nové impedanční maximum, čímž vzniká tzv. impedanční sedlo typické pro bassreflexovou ozvučnici, viz Obr. 2.4. Minimum tohoto sedla zhruba odpovídá poloze rezonančního kmitočtu ozvučnice, viz. [2].



Obr. 2.4: Impedanční charakteristika bassreflexové ozvučnice s reproduktorem Dynaudio 30W-100 (z databáze volně šiřitelného programu Unibox 408)

V následující kapitole budou probrány způsoby návrhu ozvučnice. Ty počítají s čistým objemem skříně, od něž je nutno v praxi je ještě odečíst objem nátrubku i samotného reproduktoru. V případě, že skříň obsahuje výhybku, nebo zapuštěná madla, i jejich objem se musí odečíst. Vzhledem k tomu, že se po návrhu ozvučnice odečítá od celkového objemu objem nátrubku, je třeba provést několik výpočtů k zpřesnění výsledku (nátrubek je naladěn na celk. objem před odečtením, tudíž se musí vždy o kousek doladit).

## 2.4.2 Postupy návrhu

Nejjednodušším návrhem bassreflexové ozvučnice je tzv. metoda jednoduchého ladění (simple tuning). Pro takový způsob návrhu je třeba najít na kmitočtové amplitudové charakteristice reproduktoru dolní minimum a právě na toto minimum ozvučnici naladit. Tímto se zužitkuje reproduktor na maximum, viz [2].

### Návrh metodou aproximace ladění

V literatuře jsou dále k dispozici různé aproximace podle požadavku na charakter zvlnění v dolní části křivky SPL. Např. pro co nejsilnější basy bez ohledu na zkreslení dobře vyhoví aproximace „SBB4/BB4“, tj. boom/ super boom box. Zde je zvlnění největší. Jelikož v této práci jde o ozvučnici pro účely měření, není třeba navrhovat takovéto výstřelky. Nyní bude tedy předveden postup návrhu aproximace „maximally flat“, tedy „nejvíce plochá“, což znamená, že výstupem této aproximace by měla být charakteristika se zvlněním okolo 0dB v oblasti nízkých kmitočtů, viz lit. [2].

Postup lze rozdělit do několika základních bodů, vzorce 26 až 35 jsou převzaty z [2]:

- Zjištění parametrů reproduktoru  $V_{as}$ ,  $Q_{ts}$  a  $f_s$
- Stanovení objemu ozvučnice pomocí vzorečku pro aproximaci maximally flat :

$$V_b = 15,33V_{as}Q_{ts}^{2,86} \text{ [l]}. \quad (2.11)$$

- Stanovení dolního mezního kmitočtu (vzoreček pouze pro max. flat):

$$f_3 = \frac{0,26 \cdot f_s}{Q_{ts}^{1,4}} \text{ [Hz]}. \quad (2.12)$$

- Stanovení rezonančního kmitočtu  $f_b$  (vzoreček pouze pro max. flat):

$$f_b = \frac{0,42 \cdot f_s}{Q_{ts}^{0,9}} \text{ [Hz]}. \quad (2.13)$$

- Volba průměru nátrubku: vzhledem k jednoduchosti montáže se nejčastěji používají nátrubky s kruhovým průřezem. Orientační hodnoty pro volbu průměru nátrubku jsou k dispozici v Tab. 2.1, jež je převzatá z lit. [2]:

Tab. 2.1: Orientační hodnoty pro volbu průměru nátrubku

Ø reproduktoru [mm]	Ø nátrubku [mm]
<100	30
130-165	50
165-200	75
200-250	100
250-305	130
305-380	160

Zvolený průměr souvisí s max. rychlostí proudění vzduchu v nátrubku. Za kritickou se pokládá hodnota 3 m/s. Při nedostatečném průměru nátrubku dochází k překročení této rychlosti a na okrajích dochází k turbulentnímu proudění vzduchu, jenž se projeví jako nepříjemný chruplavý pazvuk, popřípadě nahoukávání, viz [2]. Proti tomuto proudění se konce nátrubků zabrušují nebo se vyrábí nátrubky již se zaoblenými konci.

- Stanovení délky nátrubku:

$$l = \frac{2361 \cdot d^2}{f_b^2 \cdot V_b} - 0,732d \text{ [Hz]} \quad (2.14)$$

Praxe ukázala, že použitím takového zjednodušeného postupu lze dojít i k záporné, či nulové hodnotě  $l$ . V případě, že délka vyjde cca 0, bude na místě nátrubku pouhý otvor. V případě, že hodnota vyjde poněkud více záporná, je třeba zvolit nátrubek o menším průměru a zopakovat výpočet. V takovém případě je nutno ozvučnici odsimulovat na PC, aby byla ověřena přijatelná rychlost proudění vzduchu v nátrubku. Pokud hodnota překročí 3 m/s, je třeba objem  $V_b$  snížit na objem  $V_b'$  a pokračovat dále ve výpočtu.

- Výpočet dolního mezního kmitočtu  $f_3'$ :

$$f_3' = f_s \sqrt{\frac{V_{as}}{V_b'}} \text{ [Hz]}. \quad (2.15)$$

- Výpočet nového rezonančního kmitočtu:

$$f_b' = f_s \left( \frac{V_{as}}{V_b'} \right)^{0,32} \text{ [Hz]}. \quad (2.16)$$

- Výpočet nové délky nátrubku: viz vzorec 29.

- Je jasné, že po snížení objemu na  $V_b'$  již na charakteristice bude zřetelné zvlnění. To se vypočítá pomocí vztahu:

$$SPL_{peak} = 20 \log \left[ 2,6 Q_{ts} \left( \frac{V_{as}}{V_b'} \right)^{0,35} \right] \text{ [dB]} \quad (2.17)$$

### Postup návrhu dle normovaných charakteristik

Jedná se sice o nejjednodušší způsob algebraického výpočtu parametrů ozvučnice a nátrubku, avšak je zapotřebí mít k dispozici sadu normovaných charakteristik. Ty jsou k nalezení v lit. [5]. K výpočtu je nutno určit pomocné hodnoty  $f_{ob}$  a  $V_{of}$ :

$$f_{ob} = \frac{f_s}{Q_{ts}} \text{ [Hz]}, \quad (2.18)$$

$$V_{of} = V_{as} \cdot Q_{ts}^2 \text{ [l]}. \quad (2.19)$$

Poté se vybere charakteristika pro příslušné  $Q_{ts}$  a vyhledá se nejvhodnější křivka z nabízených průběhů. Je vhodné též přejechovat osu x na konkrétní kmitočty. U každé křivky je poznamenán požadovaný objem  $V_b$  a výsledný rezonanční kmitočet, viz [2]. Pro zjištění délky nátrubku již stačí dosadit do vzorce 2.14.

## 3 NÁVRH OZVUČNICE

Z důvodu prostorové úspory bude návrh proveden nikoli pro docílení určitého rezonančního, či mezního kmitočtu, nýbrž bude stanoven fixní čistý objem  $38,7 \text{ dm}^3$ . Pro tuto hodnotu proběhnou všechny návrhy a nakonec bude vyhodnoceno, jestli výsledné charakteristiky jsou uspokojivé. Toto číslo je zvoleno s ohledem na návrh pomocí normovaných charakteristik (viz dále).

Pro ozvučnici budou stanoveny tyto rozměry:

$$a = 0,3 \text{ m}$$

$$v = 0,43 \text{ m}$$

$$h = 0,3 \text{ m}$$

### 3.1 Volba koncepce skříně

#### **3.1.1 Tři samostatné ozvučnice (otevřená, uzavřená a bassreflexová)**

Tato koncepce umožňuje zaručit dostatečnou těsnost pro případ uzavřené a bassreflexové ozvučnice (u té je zvlášť důležitá pro přesné naladění). Vzhledem k tomu, že při měření nebude ozvučnice zatěžována vysokými tlaky (postačí provoz reproduktoru na příkon do 1 W), není třeba tuto výhodu považovat za podstatnou. Další výhodou je uspoření času při samotném měření, tj. nebylo by třeba složitě odnímat a zase připevňovat zadní stěnu. Přináší však nevýhodu rozměrovou: v podmínkách laboratoře, kde jsou značně omezené prostorové možnosti, by se úloha poněkud „roztahovala“. Dále by tato koncepce přinesla 3x vyšší pořizovací náklady a nepřesnost měření způsobenou použitím třech reproduktorů (kus od kusu se z výroby liší charakteristikami). Vzhledem k závažným nevýhodám (zejména cena) lze tuto koncepci předem zavrhnout

### **3.1.2 Dvě ozvučnice (bassreflexová kompaktní , 2. modulární)**

Tato koncepce je kompromisem mezi 1 a 3. Z teorie konstrukce reproduktorových boxů vyplývá, že nejcitlivější na netěsnosti je bassreflexová ozvučnice. Ta by byla tedy kompaktní, nerozebíratelná. Druhá ozvučnice by byla s odnímatelnými zády, byla by tedy použita k měření impedančních charakteristik otevřené a uzavřené ozvučnice. Výhodou této možnosti je částečná úspora místa, času při měření a zamezení problémům s netěsnostmi u bassreflexové ozvučnice. Stále však přetrvává nevýhoda přítomnosti dvou neidentických reproduktorů. Další nevýhoda je náročnější konstrukce otevřené/ uzavřené ozvučnice s ohledem na těsnost systému. Mezi zády a boxem by muselo být použito kvalitní pryžové těsnění a ozvučnice by musela být opatřena přídržným systémem např. s přítlačnou pružinou pro odnímatelná záda. Pokud se bude uvažovat výše zmíněný provozní výkon do 1W, nevýhodu horší těsnosti není třeba uvažovat, stejně jako výhodu perfektní těsnosti bassreflexové bedny (zdůvodnění viz. předchozí kapitulu). Dominuje zde tedy nevýhoda dvojnásobné pořizovací ceny oproti jednomu modulárnímu boxu.

### **3.1.3 Jediná modulární ozvučnice s dvěma odnímatelnými zády**

Modulární box je z uvažovaných variant ta nejlacinější a nejméně rozměrná. Nutno zdůraznit, že takovýto systém NELZE použít pro výkony vyšší než v řádu jednotek W, mají-li být nepřesnosti ladění vlivem netěsností únosné. Pro vyšší výkony totiž nelze počítat se 100% spolehlivostí těsnění, zohlední-li se též jeho omezená životnost. Má-li sloužit zařízení několik let, je třeba těsnění zbytečně nenamáhat a zajistit jeho údržbu v zájmu zpomalení degradace (např. pomocí silikonových konzervačních preparátů apod.). Pakliže popsané požadavky budou splněny (výkon okolo 1W, údržba), lze očekávat dostatečně dlouhou životnost zařízení. Tuto koncepci lze tedy využít pro potřeby měření vlivu změny akustické impedance prostředí na změnu elektrické impedance reproduktoru.

## **3.2 Volba reproduktoru**

Podle zadání má být vybrán širokopásmový reproduktor, který je zároveň vhodný pro montáž do bassreflexové ozvučnice. Požadavek na jmenovitý příkon není velký,

vzhledem k účelu této ozvučnice. Zároveň není třeba přihlížet na jakost reprodukce, primárně má tento výrobek sloužit k demonstraci změn impedančních charakteristik v závislosti na použité ozvučnici.

Tyto požadavky bude pravděpodobně splňovat reproduktor ARZ 6608 od firmy TVM Acoustics. Mohl by být použit popř. i ARZ 6604, ale v zájmu viditelnějších změn na impedanční charakteristice bude zvolena osmiohmová verze 6608. Jeho katalogové listy jsou v příloze 1 a 2.

Předně je třeba ověřit, zda se reproduktor hodí pro bassreflexovou ozvučnici. K tomu poslouží vztah (1.15):

$$EBP = \frac{f_s}{Q_{ES}} = \frac{75}{1,17} = 64,10 \text{ Hz} > 50 \text{ Hz} \Rightarrow \text{reproduktor je vhodný.}$$

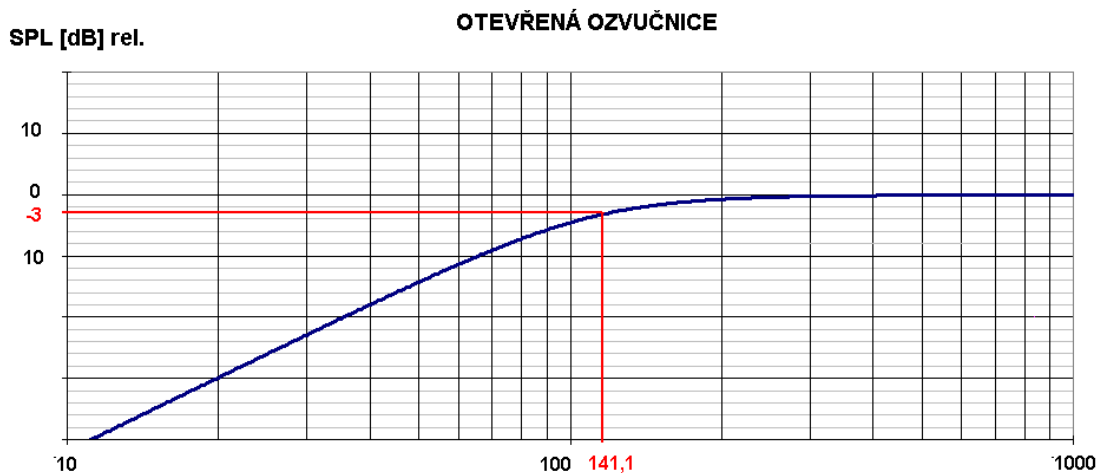
### 3.3 Návrhy ozvučnic pomocí algebraických výpočtů

#### 3.3.1 Otevřená ozvučnice

Dosazením do vztahu (2.1) se vypočítá dolní mezní kmitočet ozvučnice:

$$f_m = \frac{55}{h \sqrt{1 + 0,48 \frac{a}{h}}} = \frac{55}{0,3 \sqrt{1 + 0,48 \frac{0,43}{0,3}}} = 141,1 \text{ Hz}$$

Kmitočtová amplitudová charakteristika této ozvučnice bude podle lit. [2] pravděpodobně vypadat takto:



Obr. 3.1: Kmitočtová amplitudová charakteristika otevřené ozvučnice

Z toho vyplývá, že rezonance této skříně bude o dost vyšší, než rezonanční kmitočet reproduktoru (75Hz). Takto posunuté bude i impedanční maximum. Jak přesně bude vypadat impedanční charakteristika je třeba ověřit měřením, jelikož není k dispozici potřebný volně šířitelný program nebo matematický aparát.

### 3.3.2 Uzavřená ozvučnice

Pro ozvučnici byly zvoleny tyto rozměry:

$$a = 0,3 \text{ m}$$

$$v = 0,43 \text{ m}$$

$$h = 0,3 \text{ m}$$

Její objem tedy činí 38,7l. Po osazení úchytů, stojanové příruby, reproduktoru, terminálu a tlumícího materiálu Vicoustic Flexi panel A 75 byl objem ozvučnice odhadnut na pouhých 28 l. Přesný výpočet nelze uvést, protože u tlumícího materiálu není objem na  $\text{m}^2$  výrobcem uveden a také proto, že uspořádání součástí uvnitř ozvučnice zavádí dutiny o objemu, jenž nelze určit.

Cílová jakost bude 0,707, avšak vzhledem k předem zvolenému objemu a vysoké jakosti reproduktoru bude třeba z tohoto požadavku pravděpodobně slevit a smířit se se zvlněním amplitudově kmitočtové charakteristiky. Nejprve se tedy dosadí do vztahu (2.6):

$$V_b = \frac{V_{as}}{\left(\frac{Q_{tc}}{Q_{ts}}\right)^2 - 1} = \frac{27}{\left(\frac{0,707}{0,85}\right)^2 - 1} = -87,611$$

Z výsledku je zřejmé (záporné číslo), že zvolené jakosti zkrátka není možno docílit vzhledem k vysoké jakosti reproduktoru anebo jinak řečeno, vzhledem k nízké zvolené jakosti ozvučnice. Zvlnění charakteristiky se tedy nelze vyhnout. Proto se nyní na místo výběru  $Q_{tc}$  vyjádří tato hodnota ze vztahu (2.6):

$$Q_{tc} = Q_{ts} \sqrt{\frac{V_{as}}{V_b} + 1} = 0,85 \cdot \sqrt{\frac{27}{28} + 1} = 1,191$$

Rezonanční kmitočet se vypočítá podle vztahu (2.7):



$$f_c = f_s \sqrt{\frac{V_{as}}{V_b} + 1} = 75 \cdot \sqrt{\frac{27}{28} + 1} = 105,1 \text{ Hz}$$

Při tomto kmitočtu lze očekávat maximum na impedanční charakteristice.

Kmitočet maxima „hrbu“ se vypočítá dle vztahu (2.9):

$$f_{\text{peak}} = f_c \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{2Q_{tc}^2}}} = 105,1 \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{2 \cdot 1,191^2}}} = 130,6 \text{ Hz}$$

Nyní výpočet dolního mezního kmitočtu ze vzorečku (2.8):

$$f_3 = f_c \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{Q_{tc}^2} - 2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{Q_{tc}^2} - 2\right)^2 + 4}}{2}} = 105,1 \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{1,191^2} - 2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{1,191^2} - 2\right)^2 + 4}}{2}} = 77,51 \text{ Hz}$$

A na závěr určení velikosti zvlnění podle vzorečku (2.10):

$$SPL_{\text{peak}} = 20 \log \sqrt{\frac{Q_{tc}^4}{Q_{tc}^2 - 0,25}} = 20 \log \sqrt{\frac{1,191^4}{1,191^2 - 0,25}} = 2,36 \text{ dB}$$

### 3.3.3 Ozvučnice typu bassreflex

Aproximace maximally flat

Dle katalogového listu z přílohy 1:  $V_{as} = 27 \text{ l}$ ,  $Q_{ts} = 0,85$ ,  $f_s = 75 \text{ Hz}$ .

Nyní bude proveden návrh dle postupu z podkapitoly 3.4.2 (vztahy 2.11 až 2.17), který se pokusí v první fázi zjistit, zda je vůbec možné přiblížit se přímé SPL charakteristice. V druhé fázi se návrh přepočítá pro stanovený objem.

$$V_b = 15,33 V_{as} Q_{ts}^{2,86} = 15,33 \cdot 27 \cdot 0,85^{2,86} = 260 \text{ l}$$

Nyní je jasné, že se zvoleným reproduktorem se při objemu 28 l nelze přiblížit kýžené přímé charakteristice. Pro zajímavost budou nyní dopočítány zbylé parametry, což ukáže, zda vůbec je proveditelné takovou charakteristiku získat s použitím ARZ6608.

$$f_3 = \frac{0,26 \cdot f_s}{Q_{ts}^{1,4}} = \frac{0,26 \cdot 75}{0,85^{1,4}} = 24,48 \text{ Hz}, \quad f_b = \frac{0,42 \cdot f_s}{Q_{ts}^{0,9}} = \frac{0,42 \cdot 75}{0,85^{0,9}} = 36,46 \text{ Hz}$$

Dle Tab. 2.1 je zvolen průměr nátrubku na 75mm:

$$l = \frac{2361 \cdot d^2}{f_b^2 \cdot V_b} - 0,732d = \frac{2361 \cdot 0,075^2}{36,46^2 \cdot 0,26} - 0,732 \cdot 0,075 = -0,0165 \text{ m}$$

Tedy s tímto průměrem nátrubku se výsledku nelze dobrat.

Druhý pokus- průměr 130mm:

$$l = \frac{2361 \cdot d^2}{f_b^2 \cdot V_b} - 0,732d = \frac{2361 \cdot 0,13^2}{36,46^2 \cdot 0,26} - 0,732 \cdot 0,13 = 0,02029 \text{ m} = 2,029 \text{ cm}$$

S gigantickou skříní a obrovským průměrem nátrubku by tedy bylo možno dosáhnout jakéhosi výsledku, ovšem realizace takové skříně by byla velmi neefektivní vzhledem k nízkému poměru výkon/ objem, potažmo výkon a kvalita/ cena.

Nyní tedy bude snížen objem na  $V_b' = 28 \text{ l}$  a postupováno dále dle [2]:

$$f_3' = f_s \sqrt{\frac{V_{as}}{V_b'}} = 75 \sqrt{\frac{27}{28}} = 73,65 \text{ Hz}, \quad f_b' = f_s \left( \frac{V_{as}}{V_b'} \right)^{0,32} = 75 \left( \frac{27}{28} \right)^{0,32} = 74,13 \text{ Hz}$$

Pro nátrubek bude opět zvolen nejprve průměr 75 mm:

$$l' = \frac{2361 \cdot d^2}{f_b'^2 \cdot V_b} - 0,732d = \frac{2361 \cdot 0,075^2}{74,13^2 \cdot 0,028} - 0,732 \cdot 0,075 = 0,03141 \text{ m} = 3,141 \text{ cm}$$

To je pro dodatečné doladování dost krátký kus, téměř by ani nebylo třeba nátrubku, stačil by pouhý otvor s ohledem na tloušťku stěny boxu. Proto bude vypočítáno několik dalších alternativ, podle nabízeného sortimentu:

Průměr 101 x 115, tl. Stěny 2mm, 55 Kč (nabízen na [7]):

$$l'' = \frac{2361 \cdot 0,101^2}{74,13^2 \cdot 0,028} - 0,732 \cdot 0,101 = 0,0826 = 8,26 \text{ cm}, \text{ cm nutno zkrátit}$$

Průměr 155x122 mm, 8,33Kč, tl. stěny 1,5 mm, zaoblený lem (nabízen na [8], doprodej):

$$l''' = \frac{2361 \cdot 0,155^2}{74,13^2 \cdot 0,028} - 0,732 \cdot 0,155 = 0,2482 \text{ m}, \text{ nelze použít (příliš krátký)}.$$

Průměr 100x250 mm, tl. stěny 1,5 mm, zaoblený lem, 99 Kč (Nabízen na [9])

$$l'''' = \frac{2361 \cdot 0,1^2}{74,13^2 \cdot 0,028} - 0,732 \cdot 0,1 = 0,08024 \text{ m} = 8,024 \text{ cm}, \text{ nutno zkrátit}$$

Vhodné bude tedy použít poslední z nabízených nátrubků a zkrátit jej (dražší verze byla vybrán proto, že ji lze zakoupit v kamenném obchodě- u DEXONU by byly příliš vysoké náklady na dopravu).

Nyní se odečte objem nátrubku od  $V_b'$  a zopakuje se výpočet ještě dvakrát:

$$V_b^{II} = V_b^I - \frac{\pi \cdot d^2 \cdot l^{III}}{4} = 0,028 - \frac{\pi \cdot 0,1^2 \cdot 0,08024}{4} = 27,371$$

$$l^V = \frac{2361 \cdot d^2}{f_b^{I/2} \cdot V_b^{II}} - 0,732d = \frac{2361 \cdot 0,1^2}{74,13^2 \cdot 0,02737} - 0,732 \cdot 0,1 = 8,378 \text{ cm}$$

$$V_b^{III} = V_b^I - \frac{\pi \cdot d^2 \cdot l^V}{4} = 0,028 - \frac{\pi \cdot 0,1^2 \cdot 0,08378}{4} = 27,341$$

$$l^{VI} = \frac{2361 \cdot d^2}{f_b^{I/2} \cdot V_b^{III}} - 0,732d = \frac{2361 \cdot 0,1^2}{74,13^2 \cdot 0,02734} - 0,732 \cdot 0,1 = 8,39 \text{ cm}$$

Pro vypočtení velikosti zvlnění se dosadí do vztahu 33:

$$SPL_{peak} = 20 \log \left[ 2,6 \cdot 0,85 \left( \frac{27}{27,34} \right)^{0,35} \right] = 6,85 \text{ dB}$$

Tento výpočet tedy koriguje délku nátrubku na 8,39 cm z původních 8,024 cm. Zde je vidět, jak malé nepřesnosti ve výpočtu nebo netěsnost skříně mohou být rozhodující.

### Normované charakteristiky

Podle vzorců (2.18) a (2.19) z kapitoly 2.4.2 se vypočtou pomocné hodnoty:

$$f_{ob} = \frac{f_s}{Q_{ts}} = \frac{75}{0,85} = 88,23 \text{ Hz}, \quad V_{of} = V_{as} \cdot Q_{ts}^2 = 27 \cdot 0,85^2 = 19,5 \text{ l}$$

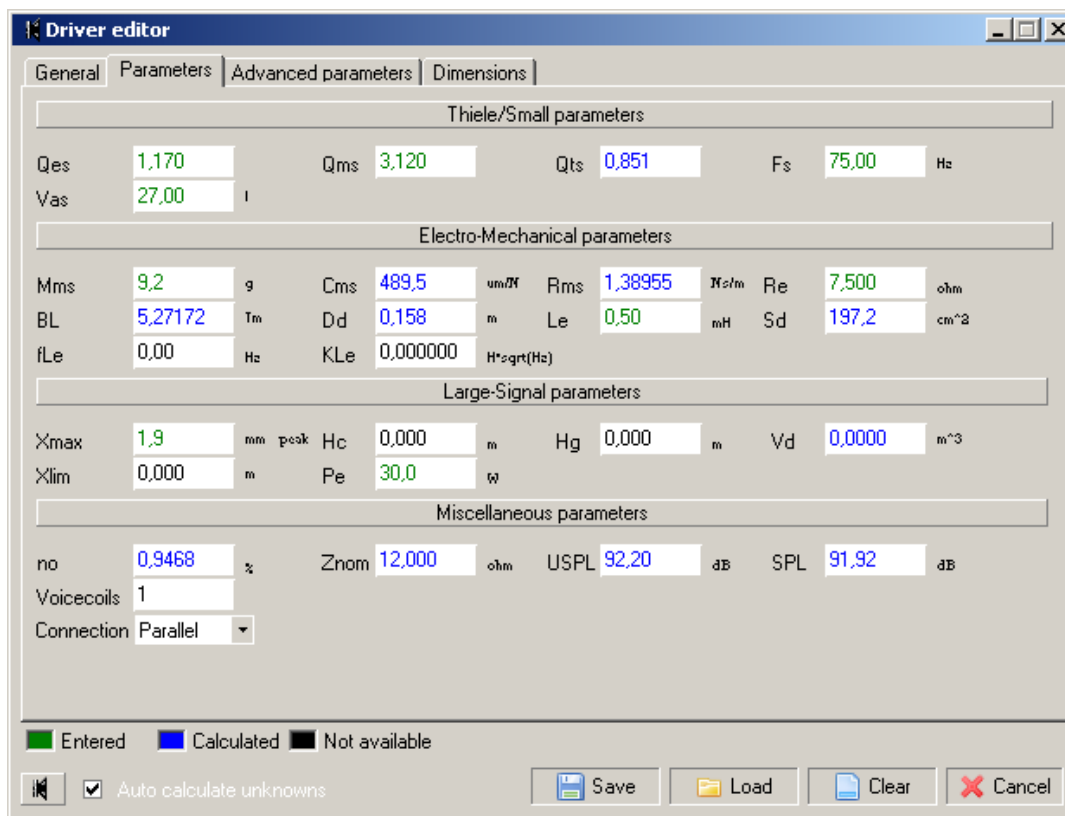
Požadovaná normovaná charakteristika nebyla k dispozici, tato práce se proto již touto metodou nebude nadále zabývat.

## 3.4 Simulace navržených ozvučnic

K simulaci navržených ozvučnic byl použit dle požadavků zadání volně šiřitelný program WinIsd 0.60a1, stažený z [6]. Bohužel tento program neumožňuje simulovat otevřenou ozvučnici. Pro ověření údajů poslouží v případě větších nesrovnalostí ještě program Unibox 408, rovněž stažený z [6].

### 3.4.1 Uzavřená ozvučnice

Ovládání programu je intuitivní. Nejprve byly do databáze uloženy parametry reproduktoru ARZ6608 pomocí driver editoru. Je zde barevně odlišeno, které údaje lze zadávat a které si program dopočítává:



Obr. 3.2: Driver editor programu WinISD

U dopočítaných údajů je vidět odlišnosti od katalogového listu výrobce, viz přílohu 1 a 2.

Pro srovnání viz tabulku 2:

Tab. 3.1: Srovnání katalogových údajů reproduktoru s dopočítanými údaji z WinISD

	výrobce	WinISD
Bl [Tm]	5,2	5,27
Q <sub>ts</sub> [-]	0,85	0,851
C <sub>ms</sub> [539μm/N]	539	489,5
M <sub>ms</sub> [g]	9,2	9,2
S <sub>d</sub> [cm <sup>2</sup> ]	189	197,2
Z <sub>n</sub> [Ω]	8	12
citlivost [dB]	91	91,92

Proto byla vypnuta fce. automatického dopočítávání a tyto údaje byly ručně zadány přesně podle katalogu.

Vygenerovaná kmitočtová amplitudová charakteristika je na obrázku v příloze 3. Výslednou Q<sub>tc</sub> program vypočítal na 1,143, což je co se velikosti zvlnění týče, příznivější, než hodnota získaná ručním výpočtem. Pomocí kurzorů se programu z charakteristiky dají odečíst i ostatní důležité hodnoty. V Tab. 3.2 lze srovnat takto odečtené hodnoty s vypočtenými:

Tab. 3.2: Srovnání vypočtených a odsimulovaných parametrů uzavřené ozvučnice

Vb=28 l	Vypočtené	Simulace WinISD	Jednotka
f <sub>c</sub>	105,1	105,46	Hz
Q <sub>tc</sub>	1,191	1,143	-
f <sub>peak</sub>	130,6	136,67	Hz
f <sub>3</sub>	77,51	80,15	Hz
SPL <sub>peak</sub>	2,36	2,06	dB

Z impedanční charakteristiky byla odečtena kromě rezonančního kmitočtu také maximální impedance na  $23,43 \Omega$ . Impedanční charakteristika vygenerovaná simulačním programem je v příloze 4.

### **3.4.2 Ozvučnice typu bassreflex**

V programu WinISD jsou k dispozici tyto aproximace: QB3-quasibutterworth, BB4/SBB4 (boom box/ super boom box), C4/SC4 (Chebyshev/ subchebyshev), EBS3 a EBS6 (extended bass shelf -3 a -6 dB). Z nich nejbližší aproximaci maximally flat je QB3 (viz lit. [2]). Je tedy třeba počítat, že údaje vygenerované programem se budou více lišit od vypočtených, než v případě uzavřené ozvučnice. Po vygenerování ozvučnice ještě muselo dojít k úpravě objemu na  $38,7 \text{ l}$  a ladění na  $74,13 \text{ Hz}$  (viz dále)

Tab. 3.3: Srovnání vypočtených a odsimulovaných parametrů ozvučnice typu bassreflex

Vb=28 l d=100mm	Vypočtené	Simulace WinISD	Simulace Unibox 408, výchozí hodnota l	Simulace Unibox 408, výchozí hodnota f <sub>b</sub>	Jednotka
f <sub>b</sub>	74,13	74,26	63,5	<b>74,13</b>	Hz
f <sub>peak</sub>	-	121,9	133,05	133,05	Hz
f <sub>3</sub>	73,65	65,74	69,18	69,18	Hz
l	8,39	8,00	<b>8,39</b>	4,21	cm
SPL <sub>peak</sub>	6,85	5,994	2,14	2,14	dB

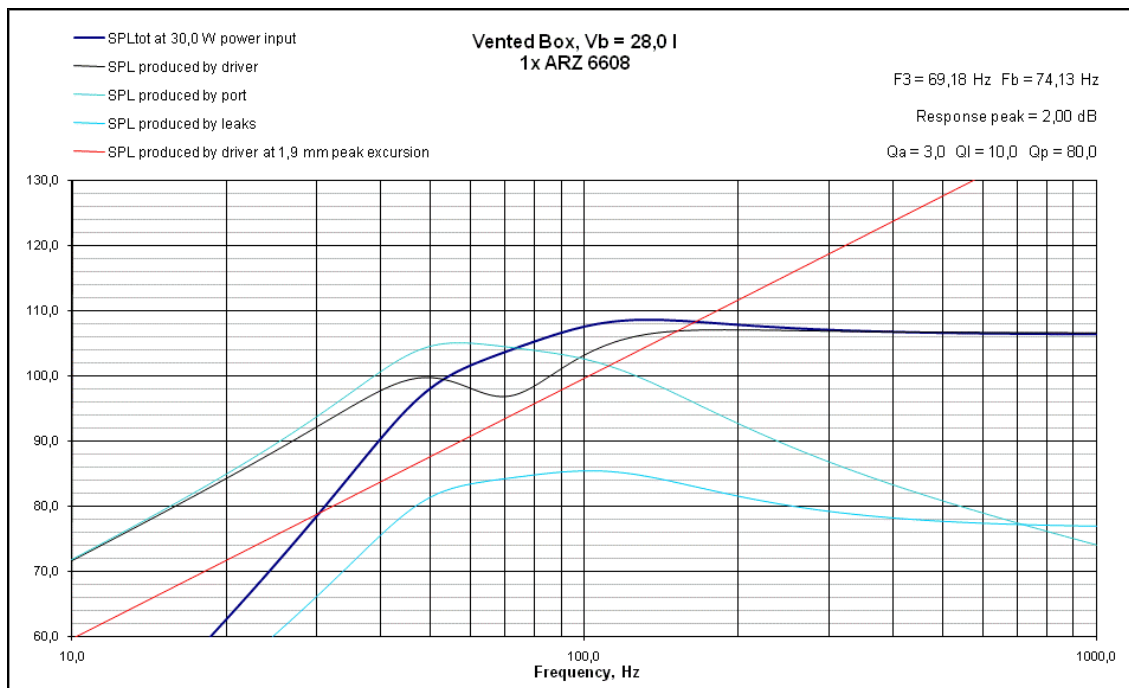
SPL charakteristika a impedanční charakteristika vygenerované programem WinISD jsou v příloze 5 a 6. Pomocí kurzorů byla odečtena impedance v rezonanci na 8,259 Ω, což odpovídá minimu impedančního sedla. Pro zajímavost byla ještě vyzkoušena simulace v programu Unibox 408 a výsledky jeho jsou značně odlišné od WinISD. Protože Unibox je více variabilní a umožňuje zadat i činitel tlumení, bylo možno nastavit výchozí údaje tak, že fyzický objem byl oněch odhadovaných 28 l, a objem V<sub>b</sub> 37,4 l (cca odpovídá 37,8 l, přesněji nelze nastavit). Jako výchozí údaj byl nejprve zadán rezonanční kmitočet získaný výpočtem a posléze délka nátrubku získaná výpočtem. Na výsledcích je zřejmé, že někde se stala chyba, rozptyl hodnot 4,21 až 8,39 cm pro délku nátrubku je nepřijatelný. Která z hodnot je blíže pravdě prokáže až měření. Nastavení parametrů v Uniboxu je v Tab. 3.4.

Tab. 3.4: Nastavení parametrů Uniboxu při simulaci ozvučnice typu bassreflex  
(výchozí hodnota  $f_b$ )

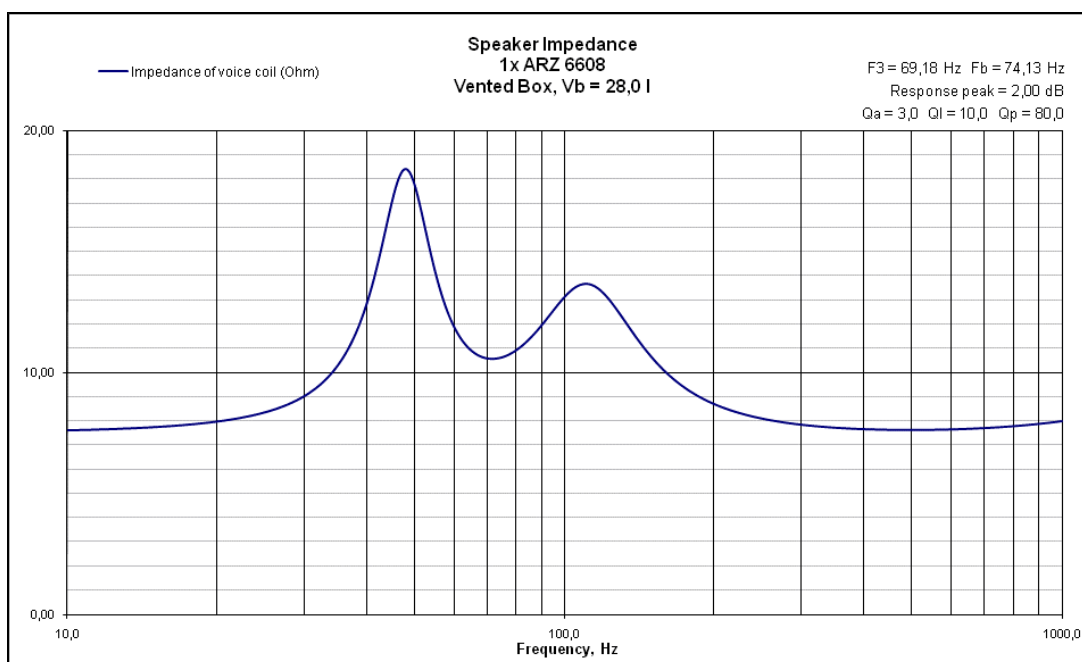
<b>Vented Box</b>	
<i>Port</i>	
No of ports	<b>1</b>
Inside port dia.	<b>10,00 cm</b>
Port area	<b>78,54 cm<sup>2</sup></b>
Port end correction	<b>0,732</b>
<i>Standard Design</i>	
Vb	<b>337,6 l</b>
Fb	<b>34,28 Hz</b>
F3	<b>24,68 Hz</b>
Port min dia.	<b>5,50 cm</b>
Port length	<b>-1,35 cm</b>
<i>Design by Vb, Fb and Q</i>	
Physical Vb	<b>28,0 l</b>
Absorption, Qa	<b>3</b>
Leakage, Ql	<b>10</b>
Port, Qp	<b>80</b>
Alpha, a	<b>0,722</b>
Vb	<b>37,4 l</b>
Fb	<b>74,13 Hz</b>
F3	<b>69,18 Hz</b>
Response peak	<b>2,00 dB</b>
Peak at	<b>133,05 Hz</b>
Port min dia.	<b>6,28 cm</b>
Port length	<b>4,21 cm</b>
Port 1. Resonance	<b>1508 Hz</b>

Na Obr. 3.3 až 22 jsou příslušné modulové kmitočtové a impedanční charakteristiky pro popsané konfigurace Uniboxu.

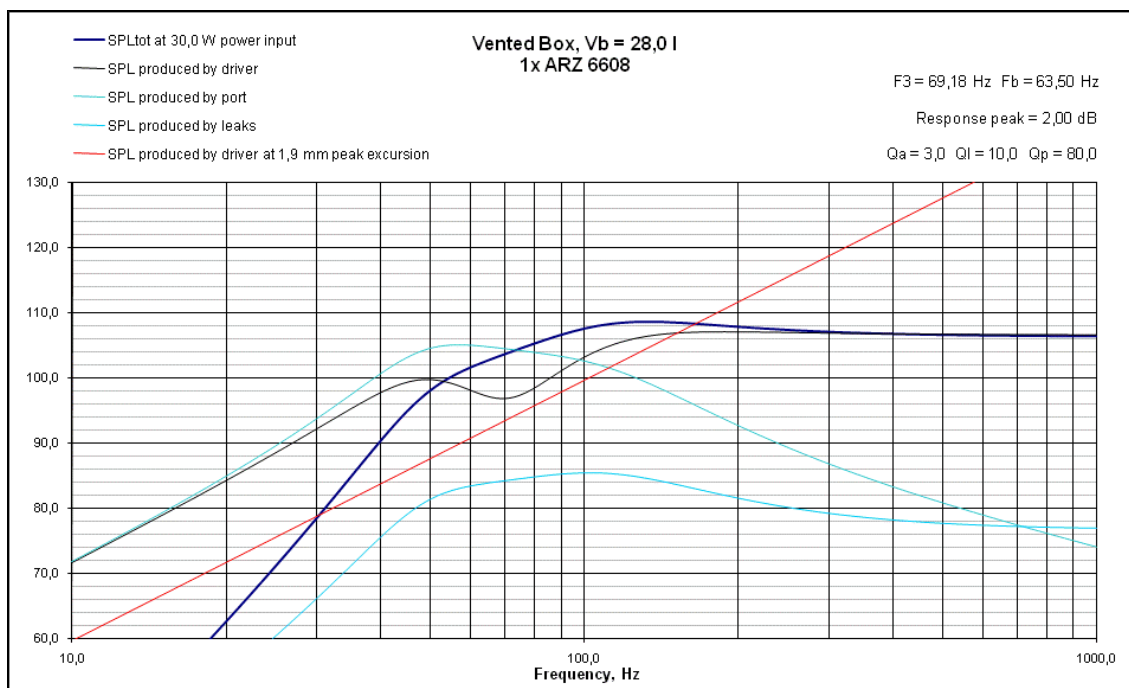




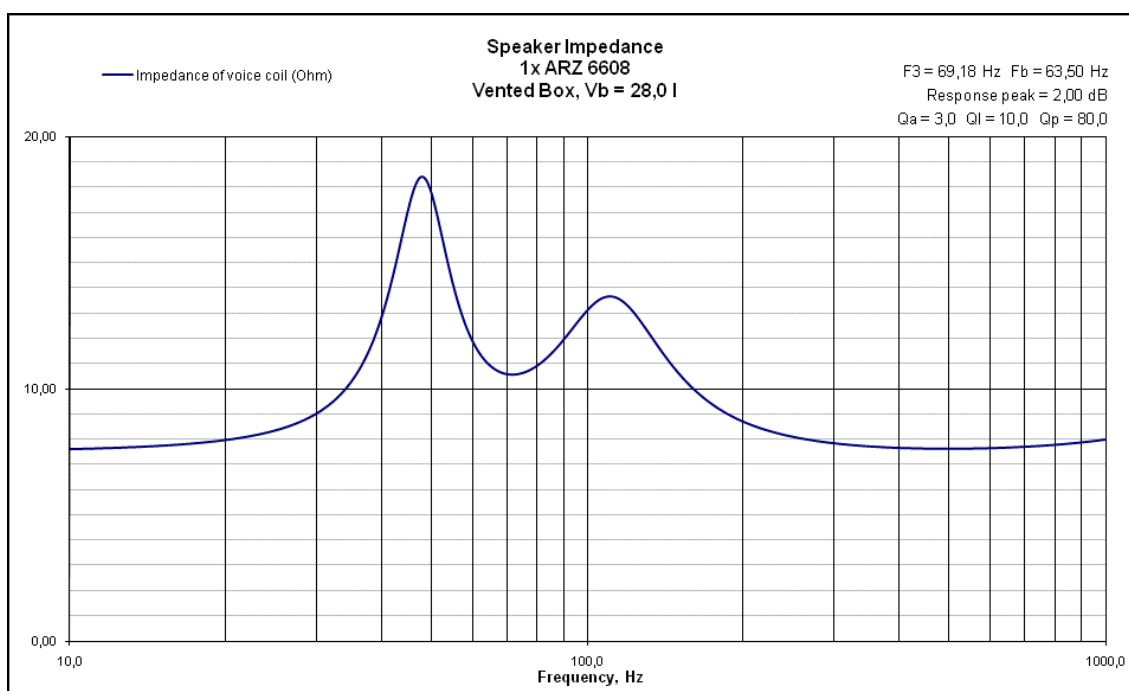
Obr. 3.3: Kmitočtová amplitudová charakteristika ozvučnice typu bassreflex, odsimulovaná v Uniboxu, výchozí hodnota  $f_b$



Obr. 3.4: Impedanční charakteristika ozvučnice typu bassreflex, odsimulovaná v Uniboxu, výchozí hodnota  $f_b$



Obr. 3.5: Amplitudová kmitočtová charakteristika ozvučnice typu bassreflex, odsimulovaná v Uniboxu, výchozí hodnota  $l=8,39$  cm



Obr. 3.6: Modulová impedanční charakteristika ozvučnice typu bassreflex, odsimulovaná v Uniboxu, výchozí hodnota  $l=8,39$  cm

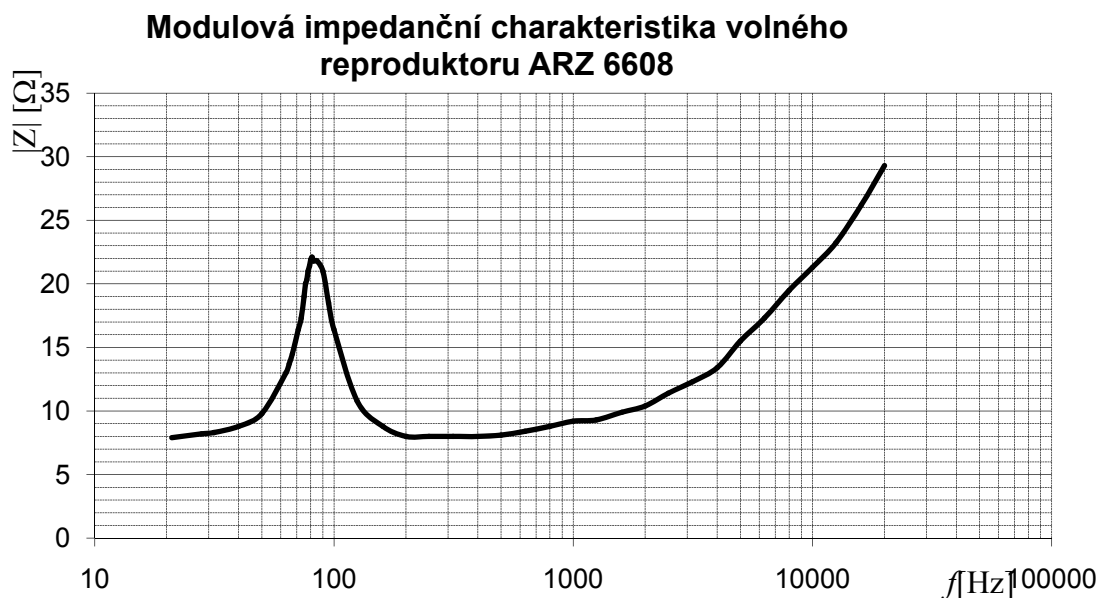
## 4 REALIZACE A ZMĚŘENÍ NAVRŽENÉ OZVUČNICE

Ozvučnice byla zkonstruována z 18mm silných dřevovláknitých desek (dřevotřískas, D.T.D.) s laminátovým povrchem, jelikož jde o středně těžký a spíše laciný materiál. Jednalo se o 3 ks desek 340x470 (čelní a 2x zadní) 2 ks 300x430 (boční) a 2ks 300x340 (vrchní a spodní). Pevnost tohoto materiálu je dostačující. Jako povrchová úprava bylo zvoleno prosté čalounění zátěžovým kobercem a to s ohledem na pohltivost povrchu (není žádoucí, aby samotná skříň šířila zvukovou vlnu, to by měření jenom více komplikovalo). Výkres skříňe je k dispozici v příloze 7.

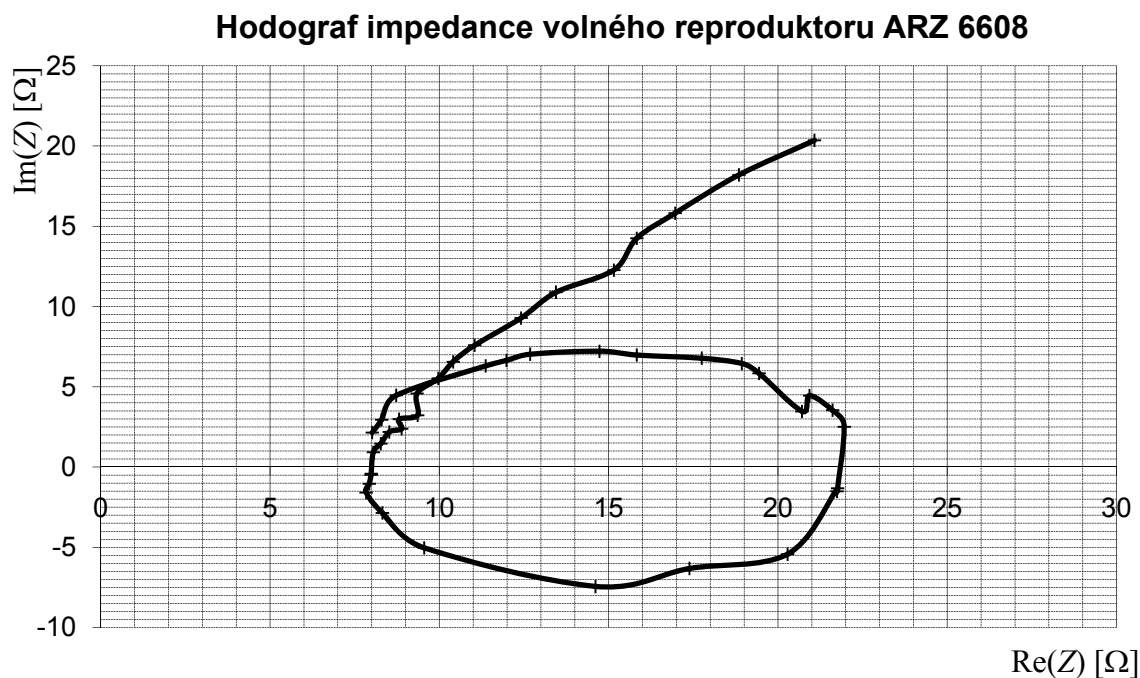
V následujících kapitolách je srovnání naměřených, vypočtených a odsimulovaných důležitých parametrů pro jednotlivé ozvučnice.

### 4.1 Volný reproduktor

Nominální impedance reproduktoru vyšla  $8 \Omega$ , což odpovídá katalogovému údaji citlivost 91 dB, což je také v pořádku, rezonanční kmitočet vyšel 77 Hz . Na Obr. 4.1 a 4.2 jsou modulová impedanční charakteristika a hodograf impedance volného reproduktoru. Porovnáním s katalogovým listem (příloha 1) lze zjistit, že údaje přibližně odpovídají.



Obr. 4.1: Modulová impedanční charakteristika volného reproduktoru ARZ 6608

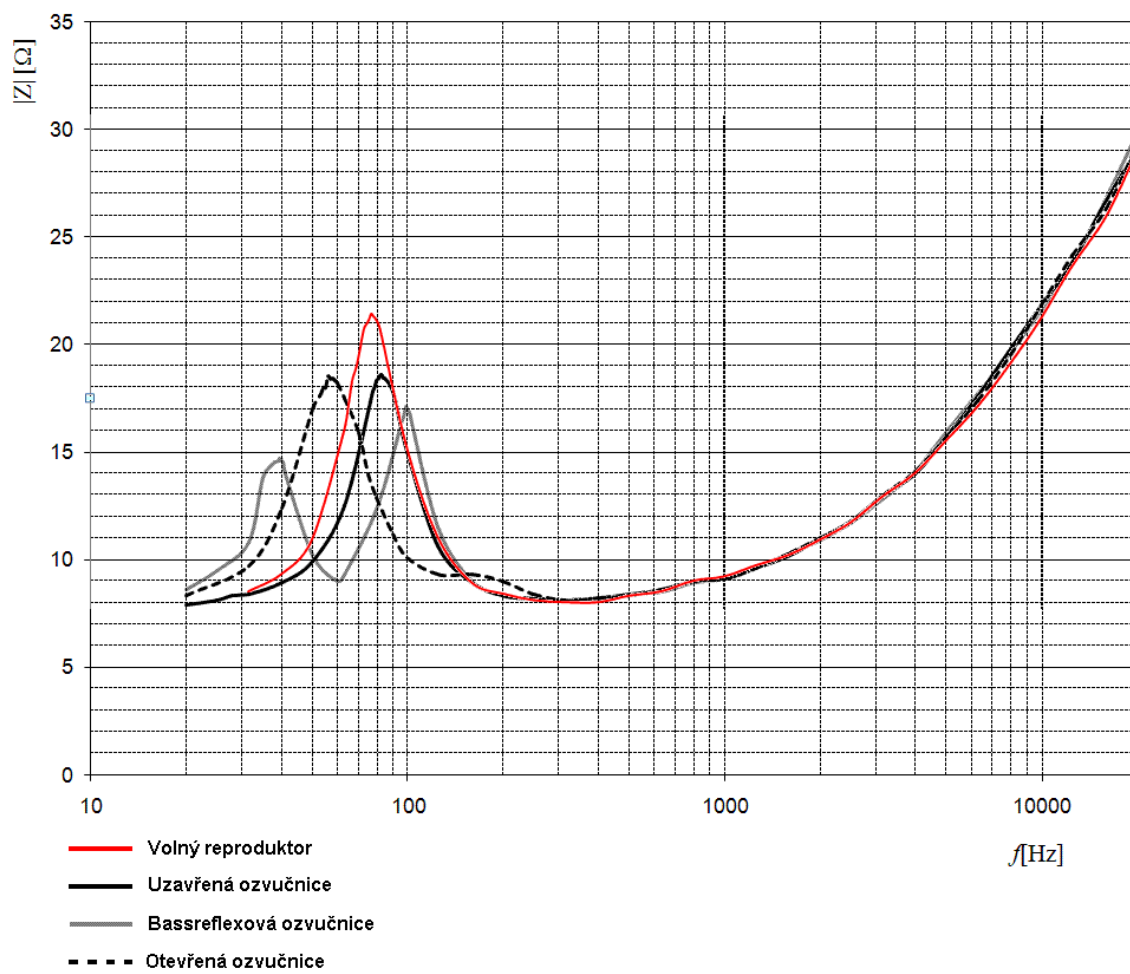


Obr. 4.2: Hodograf impedance volného reproduktoru ARZ 6608

## 4.2 Ozvučnice

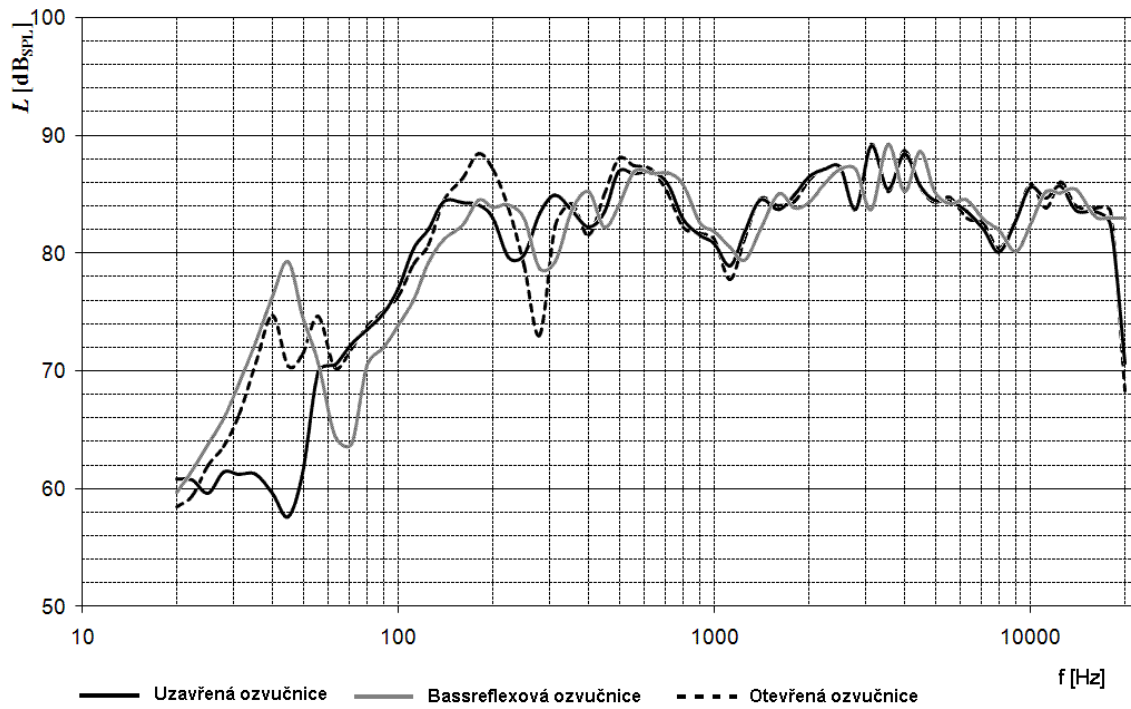
Na Obr. 4.3 je možno porovnat výsledné impedanční charakteristiky všech ozvučnic mezi sebou i se samotným reproduktorem. Tyto charakteristiky se jeví být v pořádku a v souladu s teorií, jenom posun rezonance po vestavění do ozvučnice není tak veliký, jak lze očekávat. To je možno připisovat zřejmě velkému činiteli tlumení tlumícího materiálu. O něco slabší je to u kmitočtových amplitudových charakteristik (Obr. 4.4), kde se kýžené „hrby“ poněkud ztrácejí v charakteristice značně zvláště po celé šířce pásma. Zjevně se zde velmi uplatňují vlastní kmity membrány. Hodografy impedance pro otevřenou a uzavřenou ozvučnici je možno opět porovnat (Obr. 4.5).

### Modulová impedanční charakteristika



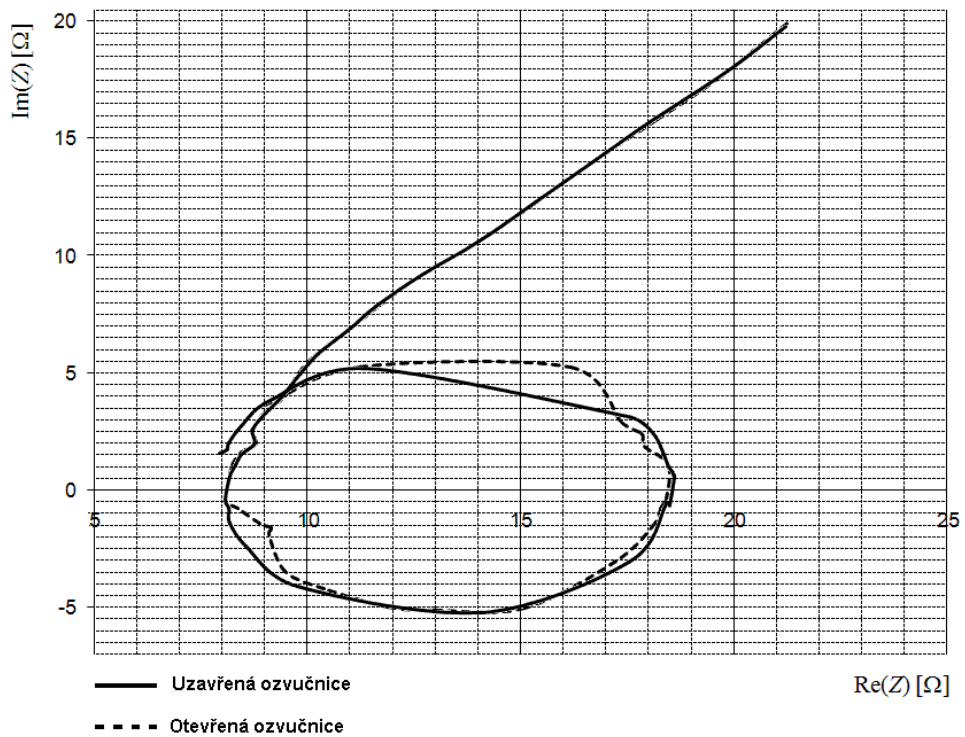
Obr. 4.3: Naměřené modulové impedanční charakteristiky

Modulová kmitočtová charakteristika otevřené, uzavřené a bassreflexové ozvučnice,  $V_b = 28 \text{ l}$



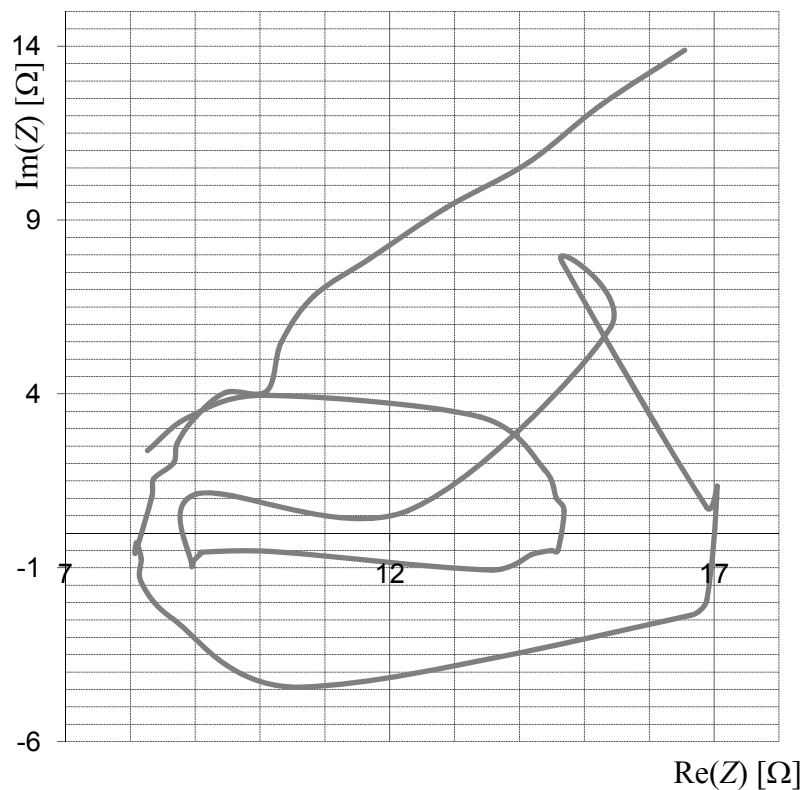
Obr. 4.4: Mod. kmitočtová charakteristika otevřené, uzavřené a bassreflexové ozvučnice

Hodograf impedance



Obr. 4.5: Hodograf impedance uzavřené a otevřené ozvučnice

### Hodograf impedance ozvučnice typu bassreflex



Obr. 4.6: Hodograf impedance ozvučnice typu bassreflex

Hodograf impedance volného reproduktoru je podobný otevřené ozvučnici. Zvláštním poznatkem je hodograf impedance ozvučnice typu bassreflex (Obr. 4.6), kde se fáze mění také v závislosti na nátrubku, který má vlastní rezonanci.

V následujících tabulkách jsou k dispozici srovnání vypočtených, odsimulovaných a změřených nejdůležitějších údajů.

Tab. 4.1: Srovnání hodnot naměřených, vypočtených a odsimulovaných pro bassreflexovou ozvučnici

Vb=28 l d=100mm	Vypočtené	Simulace WinISD	Simulace Unibox, výchozí hodnota l	Simulace Unibox, výchozí hodnota f <sub>b</sub>	Naměřeno v bezodrazové komoře	Jednotka
f <sub>b</sub>	74,13	74,26	63,5	<b>74,13</b>	60	Hz
f <sub>peak</sub>	-	121,9	133,05	133,05	180	Hz
f <sub>3</sub>	73,65	65,74	69,18	69,18	Nelze určit	Hz
l	8,39	8,00	<b>8,39</b>	4,21	8,39	cm
SPL <sub>peak</sub>	6,85	5,994	2,14	2,14	2,2	dB

Tab. 4.2: Srovnání hodnot naměřených, vypočtených a odsimulovaných pro uzavřenou ozvučnici

Vb=28 l	Vypočtené	Simulace WinISD	Naměřené hodnoty a dopočítané z naměřených	Jednotka
f <sub>c</sub>	105,1	105,46	82,5	Hz
Q <sub>tc</sub>	1,191	1,143	1,4934	-
f <sub>peak</sub>	130,6	136,67	140	Hz
f <sub>3</sub>	77,51	80,15	105	Hz
SPL <sub>peak</sub>	2,36	2,06	4	dB

Pro ověření viz přílohy 7 až 10, kde jsou uvedeny tabulky všech naměřených hodnot.

Hodnota Q<sub>tc</sub> v Tab. 4.2 byla vypočtena ze zjištěné velikosti zvlnění SPL<sub>peak</sub> v oblasti nízkých kmitočtů a to tak, že byla vyjádřena ze vzorečku 25 (jeden z kořenů kvadratické rovnice).



Zajímavých výsledků bylo dosaženo při měření otevřené ozvučnice. Rezonanční kmitočet reproduktoru se posunul až na 56 Hz, avšak dolní mezní kmitočet ozvučnice byl už na 112 Hz. To pouze v případě, že nebude vzat v potaz náhlý propad na 280 Hz. Vypočtený dolní mezní kmitočet bylo to jediné, s čím bylo možno srovnávat a činil 141,1 Hz. Příčina všech nepřesností výše bude diskutována v závěru.

## 5 ZÁVĚR

Byla navržena požadovaná ozvučnice pro účely laboratorního měření vlivu akustické impedance na impedanci reproduktoru. Byly odsimulovány uzavřená ozvučnice a ozvučnice typu bassreflex s objemem 28 (38,7) l. Otevřená ozvučnice nemohla být odsimulována, vzhledem k absenci této možnosti v použitých volně šiřitelných programech Unibox 408 a WinISD 0.6. Podařilo se pomocí programů vygenerovat modulové kmitočtové i impedanční charakteristiky. Díky zahrnutí maximální lineární výchylky do výpočtu programu Unibox bylo zjištěno, že bude žádoucí reproduktor zatěžovat do výše max. nízkých jednotek W, aby nedošlo k poškození při měření s bassreflexovou ozvučnicí (viz Obr. 3.3).

Pro koncepci skříně byla zvolena varianta jednoho modulárního boxu s výměnnými zadními stěnami, tzn jedna stěna jednoduchá a jedna opatřená bassreflexovým nátrubkem. Obě stěny jsou opatřeny pryžovým těsněním a přítlačným systémem (4 bodový).

Výsledky měření prokázaly obecná pravidla: montáží reproduktoru do ozvučnice se posouvá rezonance směrem nahoru a impedanční maxima u bassreflexové ozvučnice jsou 2. Výsledné rezonanční kmitočty ozvučnice uzavřené a bassreflexové a dolní mezní kmitočty otevřené ozvučnice vyšly nižší, než u výpočtů a simulací, což bylo zřejmě způsobeno špatným odhadem objemu tlumícího materiálu, přesněji řečeno jeho podceněním- jeho skutečný objem byl nižší než odhad. Totéž bylo příčinou rozptylu hodnot výsledné délky nátrubku pro bassreflexovou ozvučnici. U ní se navíc špatný odhad podepsal i na amplitudové kmitočtové charakteristice, ve které maximum v dolní oblasti SPL křivky nenavazuje plynule na zbytek charakteristiky, nýbrž tvoří ojedinělý útvar odtržený od celku (viz Obr. 4.4).

Značným problémem bylo nalezení hodnoty  $SPL_{peak}$  u všech měření a to z důvodu značného zvlnění charakteristiky v celé šíři pásma, které poněkud „přehlušilo“ důsledky navýšení celkové jakosti ozvučnice. Toto zvlnění bylo způsobeno jednak vlastními kmitami membrány a jednak stojatým vlněním uvnitř ozvučnice, jelikož její objem byl nevalný a tlumící materiál ne příliš vhodný.

Co se týče hodografů impedance: odpovídaly předpokladu, u bassreflexové ozvučnice se též projevila rezonance nátrubku a hodograf se poněkud „zkomplikoval“. Měření impedančních charakteristik bylo provedeno můstkovou srovnávací metodou

s pomocí můstku ORION KTS 3105 (DKP 1537), na který bylo připojeno zkušební napětí 5 V $\sim$ . Pro měření amplitudových kmitočtových charakteristik bylo využito automatizované měření laboratoře BELA.

## POUŽITÉ ZDROJE

- [1] SÝKORA, B. *Stavíme reproduktorové soustavy: 1.-48. díl*. A Radio 10/97 - 9/2001.
- [2] TOMAN, K. *Reproduktory a reprosoustavy : 1.díl, 1. vydání*. Orlová : DEXON, 2003. 212 s.
- [3] SVOBODA L., ŠTEFAN M.: *Reproduktory a reproduktorové soustavy*, SNTL, 1983
- [4] SCHIMMEL, J., KÁŇA, L. *Návody do laboratoří BELA: ELEKTROAKUSTIKA, Laboratorní úloha č. 8- měření kmitočtových a směrových charakteristik reproduktorů*
- [5] *TVM Acoustics Valašské Meziříčí*, [online] c2004. Dostupný z WWW: <[www.tvm-valmez.cz](http://www.tvm-valmez.cz)>.
- [6] *Audioweb*, [online] c2008. Dostupný z WWW: <[www.audioweb.cz](http://www.audioweb.cz)>
- [7] *DEXON*, [online] c2008. Dostupný z WWW: <[www.dexon.cz](http://www.dexon.cz)>
- [8] *TIPA.eu*, [online] c2008. Dostupný z WWW: <[www.tipa.eu](http://www.tipa.eu)>
- [9] *PRODANCE.cz*, [online] c2004. Dostupný z WWW: <[www.prodance.cz](http://www.prodance.cz)>

# SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

$Bl$ (Tm)	silový faktor reproduktoru
$C_{md}$ (F)	kapacita reprezentující poddajnost reproduktorových závěsů
$EBP$ (Hz)	činitel definující vhodnost aplikace reproduktoru (uzavřená/ bassreflexová ozvučnice)
$f_m$ (Hz)	mezní kmitočet otevřené ozvučnice
$f_b$ (Hz)	rezonanční kmitočet ozvučnice typu bassreflex
$f_s$ (Hz)	rezonanční kmitočet reproduktoru
$f_{ob}$ (Hz)	pomocná hodnota pro návrh s normovanými charakteristikami
$f_{peak}$ (Hz)	kmitočet v maximu SPL charakteristiky
$f_c$ (Hz)	rezonanční kmitočet uzavřené ozvučnice
$f_3$ (Hz)	dolní mezní kmitočet uzavřené/ bassreflexové ozvučnice
$I_0$ (W/m <sup>2</sup> )	intenzita zvukové energie v ose reproduktoru
$I_k$ (W/m <sup>2</sup> )	intenzita zvukové energie v ose reproduktoru pro případ ideální směrové charakteristiky reproduktoru
$m_{ms}$ (g)	hmotnost sloupce vzduchu
$P$ (W)	akustický výkon elektroakustického měniče
$P$ (VA)	jmenovitý příkon reproduktorové soustavy
$P_0$ (W)	referenční hodnota akustického výkonu 1 pW odpovídající prahu slyšení
$p_0$ (Pa)	práh slyšení, odpovídá úrovni 20 μPa
$Q_{ms}$ (-)	mechanický činitel jakosti reproduktoru
$Q_{es}$ (-)	elektrický činitel jakosti reproduktoru
$Q_{ts}$ (-)	celkový činitel jakosti reproduktoru
$Q_{tc}$ (-)	jakost ozvučnice
$r_{ms}$ (kg/s)	mechanický odpor kmitacího systému a kmitajícího sloupce vzduchu
$r_{md}$ (kg/s)	odpor kmitacího systému
$SPL$ (dB)	závislost akustického tlaku na kmitočtu při konstantním napětí na reproduktoru, vztažnou hodnotou je práh slyšení
$SPL_{peak}$ (dB)	akustický tlak v maximu amplitudově- kmitočtové charakteristiky ozvučnice
THD (%)	činitel zkreslení reproduktoru
$V_b$ (l)	objem ozvučnice
$V_{of}$ (l)	pomocná hodnota pro návrh s normovanými charakteristikami
$V_{as}$ (l)	ekvivalentní objem (optimální hodnota objemu ozvučnice)
$Z_n$ (Ω)	nominální impedance reproduktoru
$\sigma$ (-)	činitel směrovosti reproduktoru pro daný kmitočet

# SEZNAM PŘÍLOH

**Příloha 1:** Katalogový list reproduktoru TVM ARZ6608

**Příloha 2:** Katalogový list reproduktoru TVM ARZ6608

**Příloha 3:** Amplitudová kmitočtová charakteristika uzavřené ozvučnice odsimulovaná ve WinISD

**Příloha 4:** Impedanční charakteristika uzavřené ozvučnice odsimulovaná ve WinISD

**Příloha 5:** Amplitudová kmitočtová charakteristika ozvučnice typu bassreflex, odsimulovaná ve WinISD

**Příloha 6:** Impedanční charakteristika ozvučnice typu bassreflex, odsimulovaná ve WinISD

**Příloha 7:** Naměřené údaje pro volný reproduktor ARZ 6608

**Příloha 8:** Naměřené údaje pro otevřenou ozvučnici

**Příloha 9:** Naměřené údaje pro uzavřenou ozvučnici

**Příloha 10:** Naměřené údaje pro ozvučnici typu bassreflex

**Příloha 11:** Mechanická konstrukce ozvučnice

## Příloha 1: Katalogový list reproduktoru TVM ARZ6608



### Širokopásmový reproduktor

### ARZ 6608

Přímovyozařující elektrodynamický reproduktor s vysokotónovým kuželem pro aplikaci ve výrobcích spotřební elektroniky k přenosu celého pásma slyšitelných kmitočtů.

#### AKUSTICKÁ DATA

Jmenovitý šumový příkon <sup>1)</sup>	30 W
Krátkodobý maximální příkon <sup>2)</sup>	90 W
Jmenovitá impedance	8 Ohm
Rezonanční kmitočet $F_s$ <sup>4)</sup>	75.0 Hz
Jmenovitý kmitočtový rozsah	60 - 20000 Hz
Charakteristická citlivost <sup>3)</sup>	91 dB

#### TS PARAMETRY

Pořízeno MLSSA D-0-10	
Efektivní plocha membrány $S_d$	189 cm <sup>2</sup>
Stejnoseměrný odpor kmitací cívky $R_e$	7.5 Ohm
Mechanický činitel jakosti $Q_{ms}$	3.12
Elektrický činitel jakosti $Q_{es}$	1.17
Celkový činitel jakosti $Q_{ts}$	0.85
Indukčnost kmitací cívky $L_e$	0.5 mH
Ekvivalentní objem $V_{as}$	27.0 l
Celková kmitající hmotnost $M_{ms}$	9.2 g
Mechanická poddajnost závěsu $C_{ms}$	539 uM/Newton
Silový faktor $Bl$	5.2 Tm
Maximální lineární výchylka $X_{max}$ <sup>5)</sup>	1.9 mm

#### MECHANICKÁ DATA

Materiál kmitací cívky	hliník
Průměr kmitací cívky	25.4 mm
Výška vinutí kmitací cívky	5.9 mm
Průměr jádra	25 mm
Výška vzduchové mezery	4.5 mm
Vnější průměr magnetu	72 mm
Vnitřní průměr magnetu	32 mm
Výška magnetu	15 mm
Vnější průměr kompenzačního magnetu	- mm
Vnitřní průměr kompenzačního magnetu	- mm
Výška kompenzačního magnetu	- mm
Hmotnost	0.84 kg

#### ZKUŠEBNÍ PODMÍNKY

Zkušební napětí	4.5 V
Kmitočtový rozsah	60 - 20000 Hz

1) DIN IEC 268-5, uzavřená ozvučnice 15 dm<sup>3</sup>.

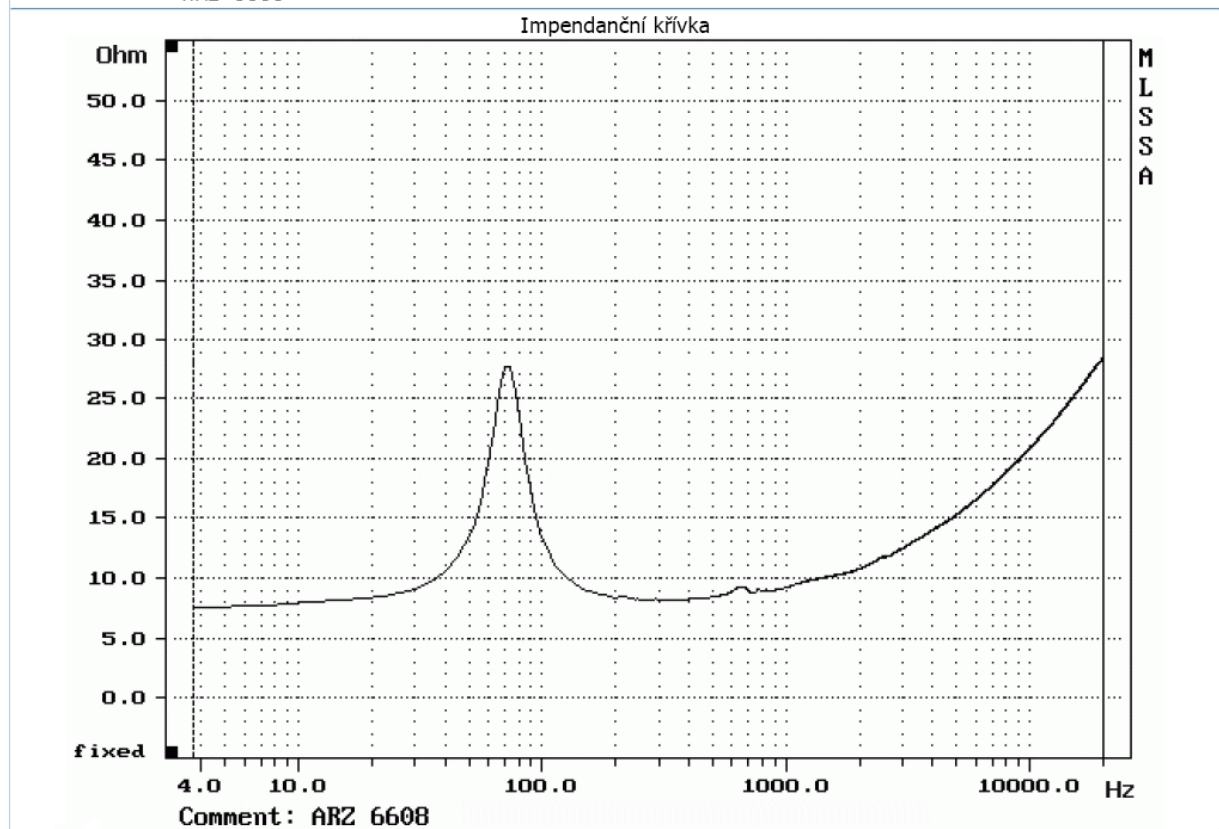
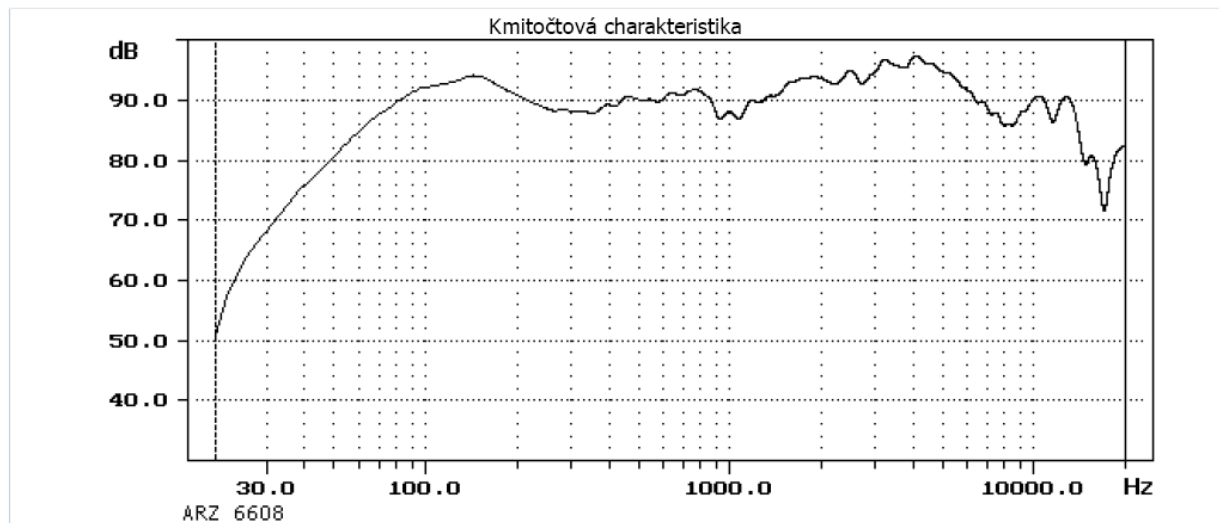
2) ČSN IEC 268-5, uzavřená ozvučnice 15 dm<sup>3</sup>.

3) ČSN IEC 268-5, standardní ozvučnice. 1W, 1 m, 200 - 10000 Hz

4) -20 Hz +15 Hz

5) Špička - špička

## Příloha 2: Katalogový list reproduktoru TVM ARZ6608



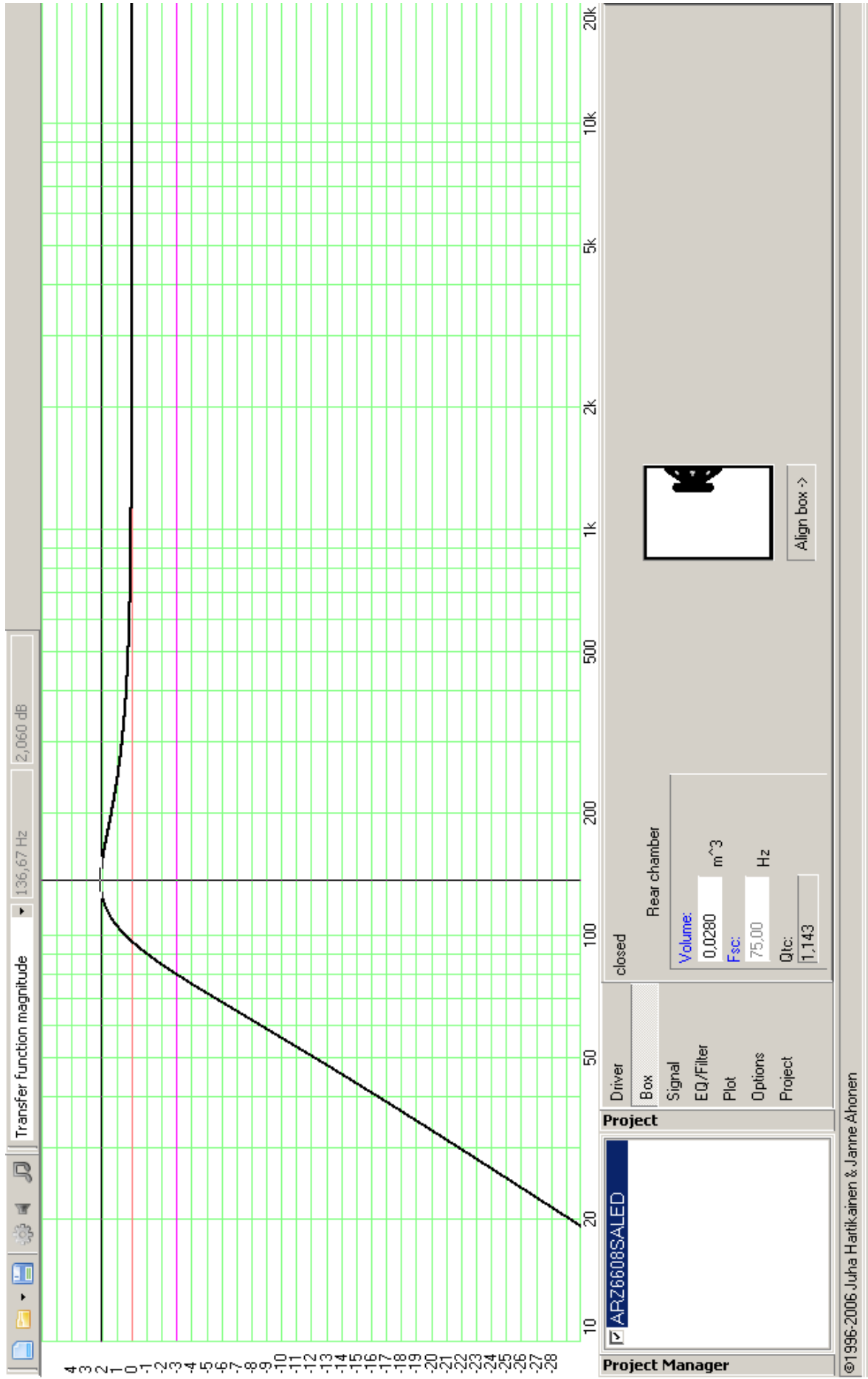
Výška vzduchové mezery	4.5 mm
Vnější průměr magnetu	72 mm
Vnitřní průměr magnetu	32 mm
Výška magnetu	15 mm
Vnější průměr kompenzačního magnetu	- mm
Vnitřní průměr kompenzačního magnetu	- mm
Výška kompenzačního magnetu	- mm
Hmotnost	0.84 kg

### ZKUŠEBNÍ PODMÍNKY

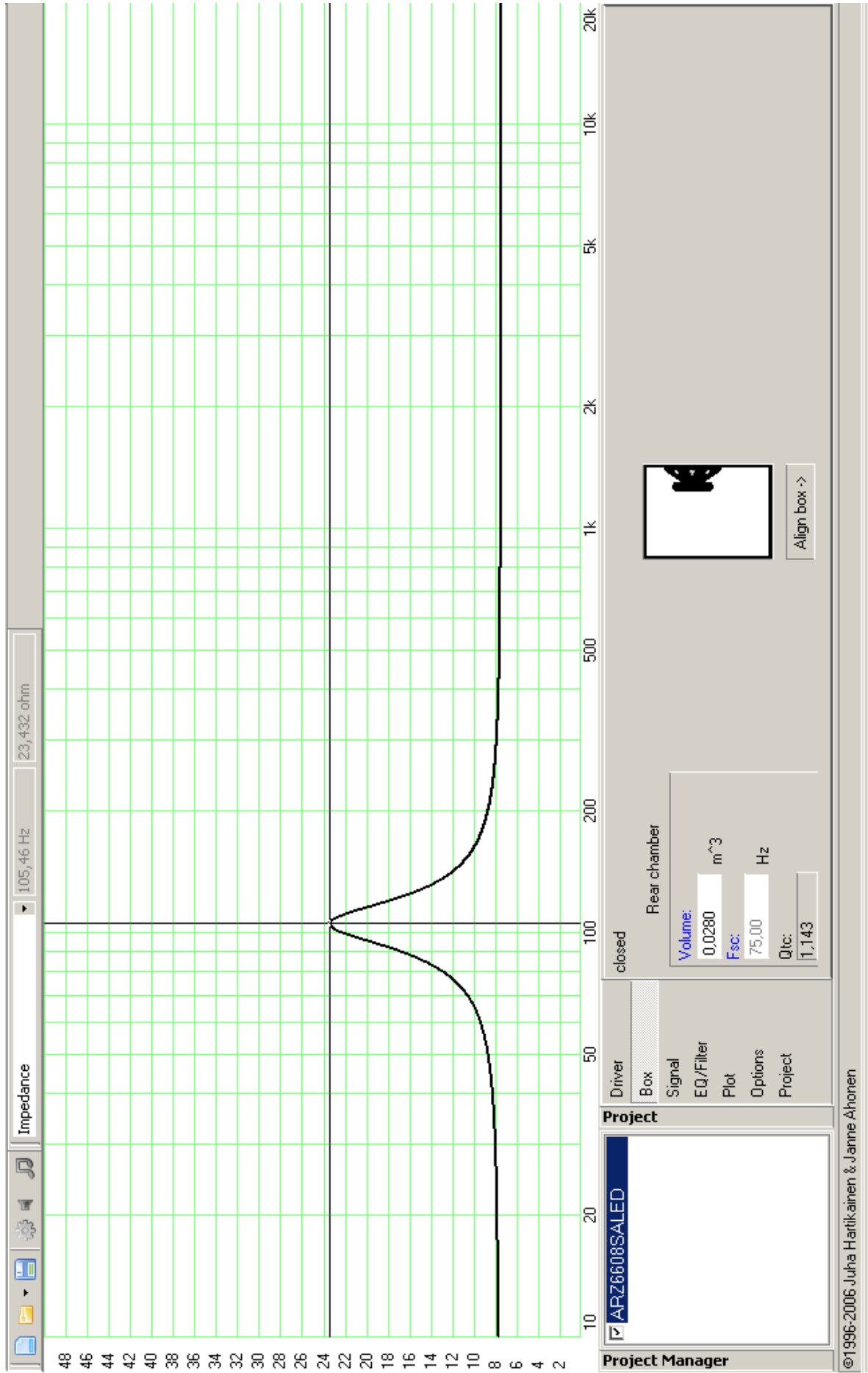
Zkušební napětí	4.5 V
Kmitočtový rozsah	60 - 20000 Hz

- 1) DIN IEC 268-5, uzavřená ozvučnice 15 dm<sup>3</sup>.
- 2) ČSN IEC 268-5, uzavřená ozvučnice 15 dm<sup>3</sup>.
- 3) ČSN IEC 268-5, standardní ozvučnice. 1W, 1 m, 200 - 10000 Hz
- 4) -20 Hz +15 Hz
- 5) Špička - špička

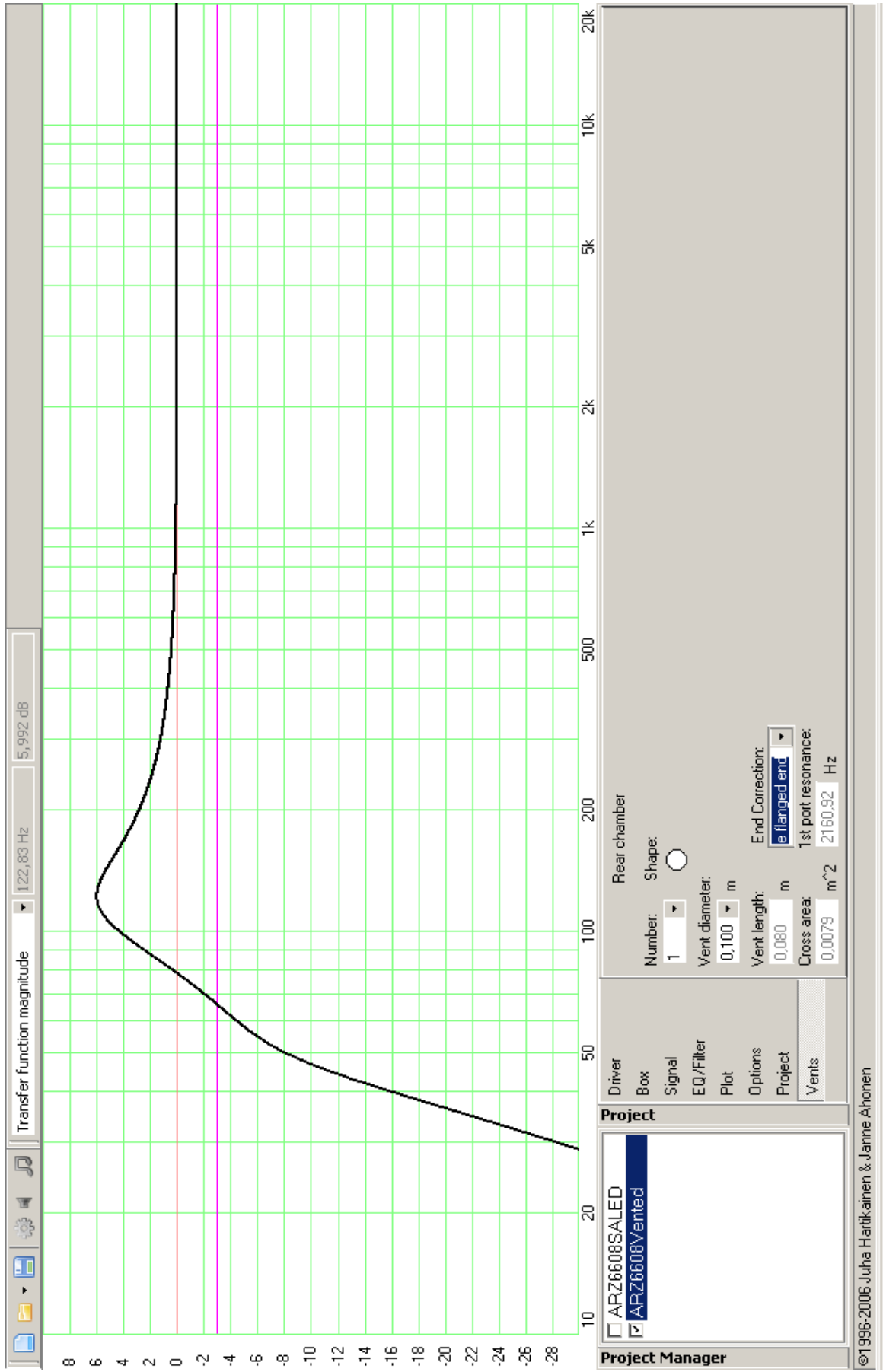




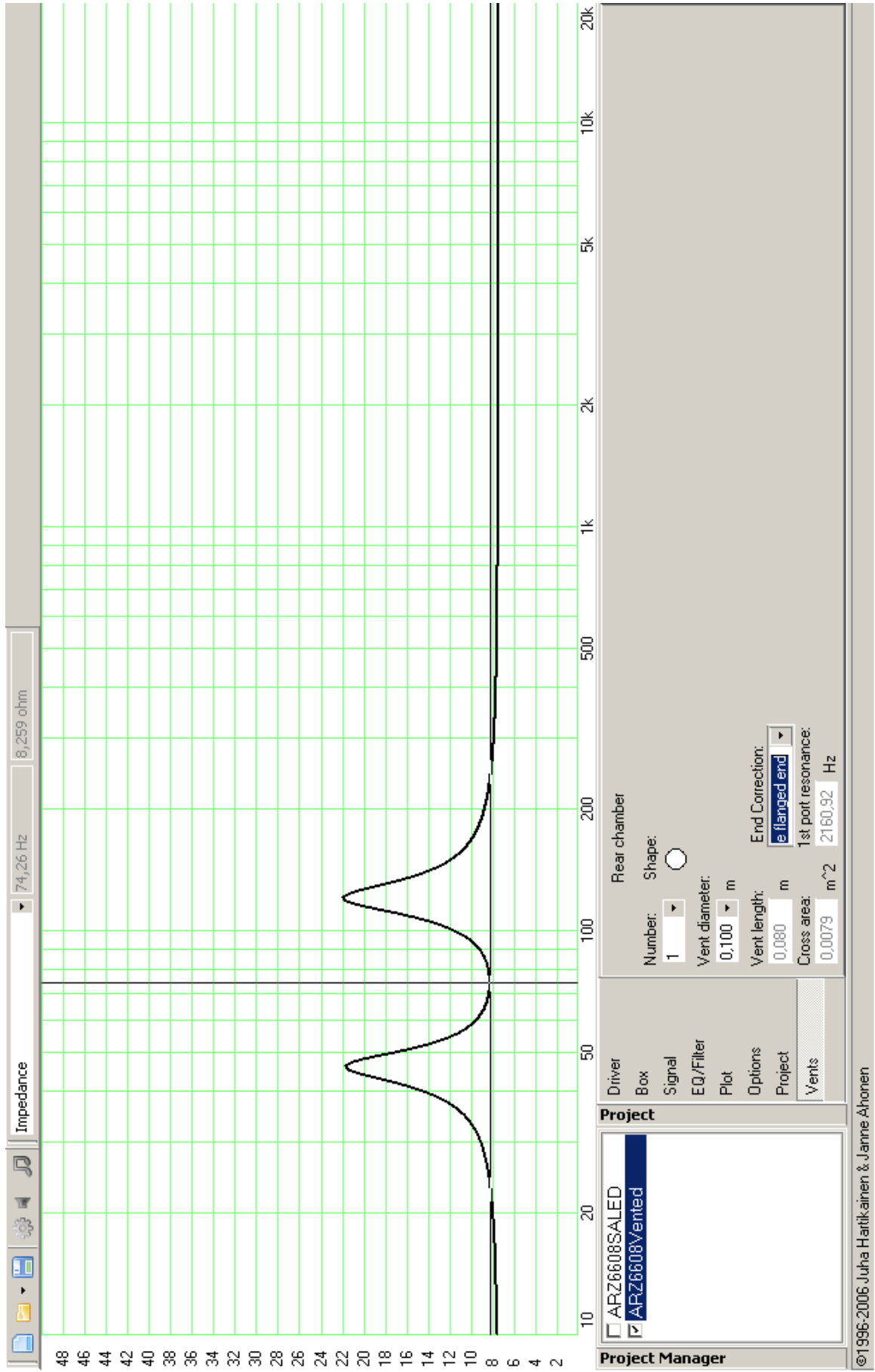
Příloha 3: Amplitudová knítočtová charakteristika uzavřené ozvučnice, simulace ve WinISD 0.6



Příloha 4: Modulová impedanční charakteristika uzavřené ozvučnice, simulace WinISD 0.6



Příloha 5: Kmitočtová amplitudová charakteristika bassreflexové ozvučnice, simulace WinISD



Příloha 6: Modulová impedanční charakteristika bassreflexové ozvučnice, simulace WinISD 0.6

Příloha 7: Naměřené údaje pro volný reproduktor ARZ 6608

$f$	$ Z $	$\arg(Z)$	$\operatorname{Re}(Z)$	$\operatorname{Im}(Z)$
[Hz]	[ $\Omega$ ]	[ $^\circ$ ]	[ $\Omega$ ]	[ $\Omega$ ]
31,5	8,5	19	8,036908	2,767329
40	9,3	22,5	8,59208	3,558956
50	10,9	30	9,439677	5,45
63	15,9	25	14,41029	6,71963
65	17	23,5	15,59002	6,778734
67	18,3	21	17,08452	6,558133
69	18,9	17,5	18,02525	5,68334
71	19,8	14	19,21186	4,790054
73	20,7	8	20,49855	2,880883
75	21	3	20,97122	1,099055
76	21,2	-5	21,11933	-1,8477
77	21,4	-6	21,28277	-2,23691
78	21,3	-8,5	21,06604	-3,14834
80	21,1	-12	20,63891	-4,38694
82	20,7	-14	20,08512	-5,00778
100	15,1	-26,5	13,51351	-6,73759
125	11	-26	9,886735	-4,82208
160	8,9	-20	8,363264	-3,04398
200	8,4	-15	8,113777	-2,17408
250	8,1	-9	8,000276	-1,26712
315	8	-6	7,956175	-0,83623
400	8	6	7,956175	0,836228
500	8,3	8	8,219225	1,155137
630	8,5	11	8,343831	1,621876
800	9	13	8,769331	2,024559
1000	9,2	15	8,886518	2,381135
1250	9,7	17,5	9,251054	2,916846
1600	10,2	21	9,52252	3,655353
2000	10,9	24,5	9,918578	4,520156
2500	11,7	26,5	10,47073	5,220514
3150	12,9	29	11,28259	6,254044
4000	14	31	12,00034	7,210533
5000	15,5	32,5	13,07257	8,328144
6300	17,1	33	14,34127	9,313327
8000	19,1	34	15,83462	10,68058
10000	21,2	34	17,5756	11,85489
12500	23,6	34	19,56529	13,19695
16000	25,9	33,5	21,59764	14,29517
20000	28,9	33,5	24,0993	15,95098

Příloha 8: Naměřené údaje pro otevřenou ozvučnici

$f$ [Hz]	Reproduktorová soustava		$f$ [Hz]	$ Z $ [ $\Omega$ ]	$\arg(Z)$ [ $^\circ$ ]	$\text{Re}(Z)$ [ $\Omega$ ]	$\text{Im}(Z)$ [ $\Omega$ ]
	IMPORT	$L$ [dB <sub>SPL</sub> ]					
20	58.5	58.5	20	8,3	15,5	7,998133	2,218079
22,4	59.4	59,4	31,5	9,7	22	8,993683	3,633684
25	62.0	62	40	12,4	25	11,23822	5,240466
28	63.6	63,6	50	17	17,9	16,1771	5,225063
31,5	66.3	66,3	53	17,6	9,5	17,35863	2,904838
35,5	70.7	70,7	54	18	7,6	17,84188	2,380615
40	74.7	74,7	55	18	5,9	17,90465	1,850266
45	70.4	70,4	56	18,5	3,2	18,47115	1,032698
50	71.4	71,4	57	18,4	-2	18,38879	-0,64215
56	74.6	74,6	58	18,4	-1,5	18,39369	-0,48166
63	70.3	70,3	59	18,3	-2,5	18,28258	-0,79823
71	71.9	71,9	60	18,2	-4,5	18,1439	-1,42796
80	73.8	73,8	63	17,5	-10	17,23414	-3,03884
90	75.1	75,1	70	15,9	-18,5	15,07835	-5,04514
100	76.3	76,3	75	14	-21,5	13,02585	-5,13102
112	79.1	79,1	80	12,9	-22,8	11,89203	-4,99895
125	80.7	80,7	90	11,2	-22	10,38446	-4,19559
140	84.5	84,5	100	10,1	-20	9,490895	-3,4544
160	86.4	86,4	125	9,3	-11,8	9,103467	-1,90181
180	88.4	88,4	160	9,3	-10	9,158712	-1,61493
200	87.1	87,1	200	9	-9,2	8,884226	-1,43893
224	83.8	83,8	250	8,4	-5,3	8,364087	-0,77591
250	79.0	79	315	8,1	-3	8,088899	-0,42392
280	73.0	73	400	8,2	4	8,180025	0,572003
315	82.3	82,3	500	8,3	7,5	8,228992	1,083367
355	84.2	84,2	630	8,6	10,8	8,44767	1,611479
400	81.5	81,5	800	9	12,5	8,786664	1,947957
450	84.9	84,9	1000	9,1	16,5	8,72526	2,58454
500	88.0	88	1250	9,6	20,2	9,009533	3,314863
560	87.4	87,4	1600	10,3	23	9,4812	4,024531
630	87.1	87,1	2000	11	27	9,801072	4,993895
710	85.1	85,1	2500	11,7	29,4	10,1932	5,743574
800	82.2	82,2	3150	13	32	11,02463	6,88895
900	81.7	81,7	4000	14,1	34	11,68943	7,88462
1000	81.2	81,2	5000	15,7	36	12,70157	9,228228
1120	77.8	77,8	6300	17,4	37	13,89626	10,47158
1250	81.2	81,2	8000	19,5	38,5	15,26086	12,13904
1400	84.6	84,6	10000	21,8	40	16,69977	14,01277
1600	84.0	84	12500	24,1	41	18,1885	15,81102
1800	84.4	84,4	16000	26,3	41,8	19,60602	17,5298
2000	86.2	86,2	20000	29,3	43,2	21,35878	20,05723
2240	87.1	87,1					
2500	87.2	87,2					
2800	83.7	83,7					
3150	89.2	89,2					
3550	85.2	85,2					
4000	88.7	88,7					
4500	85.6	85,6					
5000	84.3	84,3					
5600	84.7	84,7					
6300	83.0	83					
7100	82.5	82,5					
8000	80.4	80,4					
9000	82.9	82,9					
10000	85.8	85,8					
11200	83.8	83,8					
12500	86.0	86					
14000	84.0	84					
16000	83.8	83,8					
18000	83.5	83,5					
20000	68.3	68,3					

Příloha 9: Naměřené údaje pro uzavřenou ozvučnici

f [Hz]	Reproduktorová soustava	
	IMPORT	L [dB <sub>SPL</sub> ]
20	60.8	60,8
22,4	60.7	60,7
25	59.6	59,6
28	61.4	61,4
31,5	61.2	61,2
35,5	61.2	61,2
40	59.6	59,6
45	57.6	57,6
50	61.3	61,3
56	69.9	69,9
63	70.5	70,5
71	72.3	72,3
80	73.5	73,5
90	74.9	74,9
100	77.0	77
112	80.4	80,4
125	82.0	82
140	84.4	84,4
160	84.3	84,3
180	84.1	84,1
200	83.0	83
224	79.6	79,6
250	79.8	79,8
280	83.3	83,3
315	84.9	84,9
355	83.6	83,6
400	82.2	82,2
450	83.4	83,4
500	86.9	86,9
560	86.7	86,7
630	86.9	86,9
710	85.9	85,9
800	82.9	82,9
900	81.5	81,5
1000	80.8	80,8
1120	78.9	78,9
1250	81.7	81,7
1400	84.5	84,5
1600	83.7	83,7
1800	84.9	84,9
2000	86.5	86,5
2240	87.1	87,1
2500	87.3	87,3
2800	83.7	83,7
3150	89.1	89,1
3550	85.4	85,4
4000	88.4	88,4
4500	85.7	85,7
5000	84.5	84,5
5600	84.4	84,4
6300	83.5	83,5
7100	82.0	82
8000	80.1	80,1
9000	82.8	82,8
10000	85.6	85,6
11200	84.7	84,7
12500	85.7	85,7
14000	83.6	83,6
16000	83.5	83,5
18000	82.4	82,4
20000	70.7	70,7

f	Z	arg(Z)	Re(Z)	Im(Z)
[Hz]	[Ω]	[°]	[Ω]	[Ω]
20	7,9	9	7,802738	1,235832
25	8,1	11	7,95118	1,545553
28	8,3	12	8,118625	1,725667
31,5	8,4	14	8,150484	2,032144
40	8,9	18	8,464403	2,750251
50	9,9	22,8	9,126445	3,836404
63	12,5	24,5	11,37452	5,183666
78	17,8	10,2	17,51868	3,152108
79	18,1	9	17,87716	2,831464
80	18,3	7	18,16359	2,230209
81	18,4	5,1	18,32716	1,635655
82	18,5	3	18,47465	0,968215
82,5	18,6	2	18,58867	0,649131
83	18,5	-2	18,48873	-0,64564
83,5	18,5	-1,9	18,48983	-0,61337
84	18,4	-1,5	18,39369	-0,48166
85	18,4	-2,1	18,38764	-0,67424
90	17,8	-10	17,52958	-3,09094
100	15	-20,4	14,05923	-5,22858
125	10,6	-22,8	9,771749	-4,10767
160	8,9	-15,5	8,576311	-2,37842
200	8,3	-9,9	8,176407	-1,42701
250	8,2	-5,5	8,162249	-0,78594
315	8,1	-3	8,088899	-0,42392
400	8,2	4	8,180025	0,572003
500	8,4	7,3	8,331913	1,067343
630	8,6	10,2	8,464082	1,522929
800	9	12,8	8,776344	1,993936
1000	9,1	16,5	8,72526	2,58454
1250	9,6	20	9,021049	3,283393
1600	10,2	23	9,38915	3,985458
2000	11	26,8	9,818444	4,959653
2500	11,8	29,5	10,2702	5,810598
3150	13	32	11,02463	6,88895
4000	14	34	11,60653	7,828701
5000	15,7	36	12,70157	9,228228
6300	17,6	37,1	14,03748	10,61646
8000	19,8	38,8	15,43089	12,40676
10000	21,8	40	16,69977	14,01277
12500	23,8	41	17,96209	15,6142
16000	26,7	42	19,84197	17,86579
20000	29	43	21,20926	19,77795

Příloha 10: Naměřené údaje pro ozvučnici typu bassreflex

f [Hz]	Reproduktorová soustava	
	IMPORT	L [dB <sub>SPL</sub> ]
20	59.7	59.7
22,4	61.6	61.6
25	63.8	63.8
28	65.9	65.9
31,5	69.0	69
35,5	72.5	72.5
40	76.3	76.3
45	79.3	79.3
50	74.6	74.6
56	70.7	70.7
63	64.5	64.5
71	63.8	63.8
80	70.5	70.5
90	72.0	72
100	73.9	73.9
112	76.1	76.1
125	79.2	79.2
140	81.2	81.2
160	82.4	82.4
180	84.5	84.5
200	83.9	83.9
224	84.1	84.1
250	83.0	83
280	78.7	78.7
315	79.3	79.3
355	83.6	83.6
400	85.2	85.2
450	82.2	82.2
500	84.0	84
560	86.9	86.9
630	86.8	86.8
710	86.8	86.8
800	85.8	85.8
900	82.6	82.6
1000	81.8	81.8
1120	80.5	80.5
1250	79.4	79.4
1400	81.9	81.9
1600	85.0	85
1800	83.8	83.8
2000	84.3	84.3
2240	85.9	85.9
2500	87.1	87.1
2800	87.1	87.1
3150	83.7	83.7
3550	89.2	89.2
4000	85.2	85.2
4500	88.6	88.6
5000	85.2	85.2
5600	84.2	84.2
6300	84.5	84.5
7100	82.9	82.9
8000	81.9	81.9
9000	80.1	80.1
10000	82.4	82.4
11200	85.2	85.2
12500	85.1	85.1
14000	85.4	85.4
16000	83.1	83.1
18000	83.0	83
20000	83.0	83

f	Z	arg(Z)	Re(Z)	Im(Z)
[Hz]	[Ω]	[°]	[Ω]	[Ω]
20	8,6	16	8,266851	2,370481
25	9,5	20,5	8,898386	3,32697
31,5	10,8	21,5	10,04851	3,958213
35	13,8	14	13,39008	3,338522
38	14,5	7,2	14,38566	1,817332
39	14,6	4	14,56444	1,018445
39,5	14,7	2,5	14,68601	0,641205
40	14,6	-2	14,59111	-0,50953
40,5	14,5	-2	14,49117	-0,50604
41	14,2	-2,5	14,18648	-0,6194
42	13,6	-4,5	13,55808	-1,06704
50	10,2	-3	10,18602	-0,53383
58	9,1	-3,5	9,083027	-0,55554
59	9,1	-3,8	9,079993	-0,60309
60	9	-5,3	8,961522	-0,83134
61	9	-6,1	8,949041	-0,95638
62	9,1	7,1	9,030221	1,124773
80	12,3	3	12,28314	0,643732
96	16,5	21	15,40408	5,913071
97	16,6	28	14,65693	7,793228
98	16,9	2,5	16,88391	0,737168
99	17,1	4,5	17,04729	1,341651
100	17	-6,5	16,89072	-1,92445
101	16,8	-8,1	16,6324	-2,36714
125	11,5	-22,7	10,60919	-4,43792
160	9	-15,9	8,655672	-2,46563
200	8,3	-10	8,173904	-1,44128
250	8,2	-5,1	8,167537	-0,72893
315	8,1	-2	8,095066	-0,28269
400	8,1	-4	8,080269	-0,56503
500	8,4	7,2	8,333763	1,052799
630	8,5	10,5	8,357667	1,549002
800	8,9	13,1	8,668386	2,017197
1000	9,1	16,5	8,72526	2,58454
1250	9,6	20,3	9,003734	3,330582
1600	10,3	23,1	9,474161	4,041072
2000	10,9	22	10,1063	4,083212
2500	11,7	28	10,33049	5,492817
3150	12,8	32,2	10,83127	6,820816
4000	14,1	34	11,68943	7,88462
5000	15,9	36	12,86337	9,345786
6300	17,7	37	14,13585	10,65213
8000	19,6	38,9	15,25357	12,30808
10000	21,6	40	16,54656	13,88421
12500	23,8	40,8	18,01648	15,55141
16000	26,8	41,5	20,07201	17,75822
20000	29,8	42,8	21,86515	20,24735



