

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTRONIKY A INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Změna akustických parametrů reproduktoru v závislosti
na zástavbě**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Miroslav KOTRCH
Osobní číslo:	E17N0070P
Studijní program:	N2612 Elektrotechnika a informatika
Studijní obor:	Dopravní elektroinženýrství a autoelektronika
Téma práce:	Změna akustických parametrů reproduktoru v závislosti na zástavbě
Zadávací katedra:	Katedra elektroniky a informačních technologií

Zásady pro vypracování

1. Zhodnoťte vliv krycích mřížek u vysokotónových reproduktorů na jejich akustické parametry.
2. Zhodnoťte vliv prostoru zástavby u vysokotónových reproduktorů na jejich akustické parametry.
3. Teoretické úvahy ověřte měřením.

Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Oldřich Tureček, Ph.D.**
Katedra materiálů a technologií

Oponent diplomové práce: **Ing. Ladislav Zuzjak, Ph.D.**
Katedra materiálů a technologií

Datum zadání diplomové práce: **9. října 2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **27. května 2021**



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.

děkan



Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.

vedoucí katedry

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na zkoumání vlivu zástavby výškového reproduktoru na jeho akustické parametry. Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. V teoretické části práce je popsána teorie elektrodynamického reproduktoru, elektromechanická analogie a Helmholtzův rezonátor, který je použit pro popis systému zástavby. V praktické části je popsána volba a výroba měřících přípravků zástavby a samotné měření v bezodrazové komoře. V další části jsou uvedené naměřené frekvenční charakteristiky zástaveb a zhodnocen vliv parametrů zástavby na akustické parametry reproduktoru. Ze změřených charakteristik byly vytvořeny grafy závislostí jednotlivých parametrů zástavby a vlivu na akustické parametry reproduktoru. V závěru je fyzikálně popsáno chování zástavby reproduktoru pomocí Helmholtzova rezonátoru.

Klíčová slova

Reproduktor, zástavba, výškový reproduktor, zvukovod, mřížka, akustika, frekvenční amplitudová charakteristika, impedanční charakteristika, rezonance, elektro-mechanická analogie, elektro-akustická analogie, akustické parametry, zástavba, frekvence, měření zástavby reproduktoru, impedance, Helmholtzův rezonátor

Abstract

The presented thesis is focused on the investigation of the influence of the tweeter installation on its acoustic parameters. The work is divided into theoretical and practical part. The theoretical part of the thesis describes the theory of electrodynamic loudspeaker, electromechanical analogy and Helmholtz resonator, which is used to describe the installation system. The practical part describes the selection and production of measuring jigs of the installation and the measurement itself in the non-reflecting chamber. In the next part, the measured frequency characteristics of the installations are presented and the influence of the installation parameters on the acoustic parameters of the loudspeaker is evaluated. Graphs of the dependence of individual parameters on the acoustic parameters of the loudspeaker were created. In the end, the behavior of the speaker installation using the Helmholtz resonator is physically described.

Key words

Loudspeaker, tweeter, loudspeaker measurement, perforated plate, sound pipe, frequency amplitude characteristic, impedance characteristic, resonance, acoustic parameters, electro-mechanical analogy, electro-acoustic analogy, speaker installation, frequency, impedance, Helmholtz resonator

Prohlášení

Tímto předkládám k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 270 trestního zákona č. 40/2009 Sb.

Také prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 7.6.2021

Bc. Miroslav Kotrch

.....
Podpis

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Oldřichu Turečkovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	IX
SEZNAM OBRÁZKŮ	XI
SEZNAM TABULEK.....	XII
ÚVOD	1
1 TEORIE REPRODUKTORŮ.....	2
1.1 PRINCIP PŘIMO VYZAŘUJÍCÍHO ELEKTRODYNAMICKÉHO REPRODUKTORU	2
1.2 ELEKTRODYNAMICKÝ REPRODUKTOR	3
1.3 NÁHRADNÍ SCHÉMA REPRODUKTORU	4
1.4 PARAMETRY REPRODUKTORŮ.....	6
2 TEORIE.....	11
2.1 ELEKTROMECHANICKÁ A ELEKTROAKUSTICKÁ ANALOGIE	11
2.2 VLIV ZÁSTAVBY NA PARAMETRY REPRODUKTORU	12
2.3 HELMHOLTZŮV REZONÁTOR.....	12
3 MĚŘENÍ VLIVU ZÁSTAVBY	16
3.1 MĚŘÍCÍ PŘÍPRAVKY.....	16
3.1.1 Krycí mřížky	16
3.1.2 Zvukovody	17
3.1.3 Montáž zástavby	18
3.2 PROSTORY PRO AKUSTICKÉ MĚŘENÍ.....	20
3.3 MĚŘENÍ FREKVENČNÍ AMPLITUDOVÉ CHARAKTERISTIKY	20
4 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ	23
4.1 ZPRACOVÁNÍ A ANALÝZA NAMĚŘENÝCH DAT.....	23
4.2 SAMOTNÝ ZVUKOVODU	25
4.3 VOLNÁ PLOCHA MŘÍŽKY	29
4.4 TLOUŠŤKA MŘÍŽKY	33
4.5 KOMBINACE ZÁSTAVEB	36
4.6 SHRnutí.....	37
5 TEORETICKÝ POPIS SYSTÉMU ZÁSTAVBY REPRODUKTORU.....	39
ZÁVĚR	42
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	43
PŘÍLOHA I	44
PŘÍLOHA II.....	45

Seznam symbolů a zkratk

f	Frekvence [Hz]
f_s	Rezonanční frekvence [Hz]
F	Síla [N]
B	Magnetická indukce [T]
U	Napětí [V]
I	Proud [A]
L_p	Hladina akustického tlaku [dB]
p	Akustický tlak [Pa]
p_o	Referenční akustický tlak [Pa]
p_x	Akustický tlak ve sledovaném směru [Pa]
p_s	Střední vyzářený akustický tlak [Pa]
L_s	Charakteristická citlivost [dB]
S_d	Efektivní plocha membrány [m ²]
m_{ms}	Hmotnost kmitajícího systému a spolukmitajícího sloupce vzduchu [kg]
c_{ms}	Poddajnost kmitacího systému zavěšení membrány $\left[\frac{mm}{N}\right]$
r_{ms}	Mechanický odpor zavěšení membrány $\left[\frac{N.s}{m}\right]$
R_e	Odpor vinutí cívky [Ω]
L_e	Elektrická indukčnost cívky [mH]
Q_{es}	Elektrický činitel jakosti [–]
Q_{ms}	Mechanický činitel jakosti [–]
Q_{ts}	Celkový činitel jakosti [–]
Z	Impedance
m	Hmotnost [kg]
k	Tuhost pružiny
c_{md}	Poddajnost kmitacího systému zavěšení membrány $\left[\frac{mm}{N}\right]$
m_{md}	Hmotnost kmitajícího systému a spolukmitajícího sloupce vzduchu [kg]

r_s	Poloměr membrány reproduktoru [m]
SPL	Sound pressure level. Hladina akustického tlaku
q	Činitel směrovosti [–]
I_q	Index směrovosti [dB]
LAN	Ethernetový kabel
M	Mikrofon
R	Reproduktor
T	Točna
PC	Počítač
V	Voltmetr
Z_{nom}	Noiminální impedance [Ω]
k_d	Činitel děrování
σ	Poměr volné plochy mřížky

Seznam obrázků

OBR. 1.1: ELEKTRODYNAMICKÝ REPRODUKTOR.....	4
OBR. 1.2: ANALOGICKÉ ELEKTROMECHANICKÉ SCHÉMA REPRODUKTORU	5
OBR. 1.3: NÁHRADNÍ SCHÉMA REPRODUKTORU (ELEKTRO-MECHANICKO-AKUSTICKÉ).....	5
OBR. 1.4: IMPEDANČNÍ CHARAKTERISTIKA REPRODUKTORU	9
OBR. 2.1: HELMHOLTZŮV REZONÁTOR: A) SCHÉMA, B) MECHANICKÝ MODEL, C) ANALOGICKÉ ELEKTRICKÉ SCHÉMA	13
OBR. 3.1: KRHOVÉ ŘADOVÉ DĚROVÁNÍ	16
OBR. 3.2: 3D MODEL VRTACÍ ŠABLONY	17
OBR. 3.3: ZVUKOVODY	18
OBR. 3.4: MĚŘENÝ REPRODUKTOR	19
OBR. 3.5: UCHYCENÍ MŘÍŽKY A ZVUKOVODU K REPRODUKTORU.....	19
OBR. 3.6: UCHYCENÍ REPRODUKTORU KE STATIVU	20
OBR. 3.7 BLOKOVÉ SCHÉMA MĚŘENÍ AMPLITUDOVÉ FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKY	21
OBR. 3.8: REFERENČNÍ MĚŘENÍ V BEZODRAZOVÉ KOMOŘE.....	22
OBR. 4.1: REFERENČNÍ MĚŘENÍ VÝŠKOVÉHO REPRODUKTORU (BEZ ZÁSTAVBY).....	23
OBR. 4.2: URČENÍ MAXIMÁLNÍCH HODNOT PEAK/CUT.....	24
OBR. 4.3: VLIV DÉLKY ZVUKOVODU (ZV6, ZV9, ZV12).....	26
OBR. 4.4: VLIV DÉLKY ZVUKOVODU (ZV20, ZV30, ZV40).....	27
OBR. 4.5: ZÁVISLOST REZONANČNÍ FREKVENCE NA DÉLCE ZVUKOVODU.....	27
OBR. 4.6: ZÁVISLOST ÚROVNĚ AKUSTICKÉHO TLAKU PŘI FREKVENCÍCH F_{PEAK1} A F_{CUT1} NA DÉLCE ZVUKOVODU.....	28
OBR. 4.7: POROVNÁNÍ REFERENČNÍHO MĚŘENÍ REPRODUKTORU A REPRODUKTORU SE ZVUKOVODEM 6 MM.....	29
OBR. 4.8: FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA ZÁSTAVBY – VRTANÉ MŘÍŽKY	30
OBR. 4.9: FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA ZÁSTAVBY – TAHOKOV.....	31
OBR. 4.10: ZÁVISLOST FREKVENCÍ F_{PEAK} A F_{CUT} NA VOLNÉ PLOŠE MŘÍŽKY	31
OBR. 4.11: ZÁVISLOST ÚROVNĚ AKUSTICKÉHO TLAKU PŘI FREKVENCI F_{PEAK} A F_{CUT} NA VOLNÉ PLOŠE MŘÍŽKY	32
OBR. 4.12: FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA ZÁSTAVBY S MŘÍŽKOU S VOLNOU PLOCHOU 7 % A RŮZNOU TLOUŠTKOU.....	33
OBR. 4.13: FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA ZÁSTAVBY S MŘÍŽKOU S VOLNOU PLOCHOU 19 % A RŮZNOU TLOUŠTKOU.....	34
OBR. 4.14: FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA ZÁSTAVBY S MŘÍŽKOU S VOLNOU PLOCHOU 35 % A RŮZNOU TLOUŠTKOU.....	34
OBR. 4.15 FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKY ZÁSTAVBY VP19T1 A VP28T3	35
OBR. 4.16: POROVNÁNÍ FREKVENČNÍCH CHARAKTERISTIK ZÁSTAVEB – Q3	36
OBR. 4.17: POROVNÁNÍ FREKVENČNÍCH CHARAKTERISTIK ZÁSTAVEB – ZV20.....	37
OBR. 5.1: MŘÍŽKA REZONÁTORU - ROZMĚRY	40

Seznam tabulek

TAB. 2.1: ELEKTRO-MECHANICKÁ ANALOGIE	11
TAB. 3.1: ROZMĚRY VRTANÝCH POM MŘÍŽEK	17
TAB. 3.2: ROZMĚRY MŘÍŽEK – MIKROTAHOKOV	17
TAB. 3.3: ZVUKOVODY	18
TAB. 4.1: MĚŘENÉ KOMBINACE ZÁSTAVBY	25
TAB. 0.1: ELEKTROMECHANICKÁ A ELEKTROAKUSTICKÁ ANALOGIE.....	45

Úvod

Tato práce je zaměřena na zkoumání změn akustických parametrů výškových reproduktorů v závislosti na zástavbě v automobilu. V automobilech se zástavba reproduktorů z velké části podřizuje možnostem konstrukce a designu. Z estetických i praktických důvodů se před reproduktor umisťuje zvukovod s mřížkou, který ovlivňuje akustické parametry reproduktoru.

Cílem této práce je posoudit vliv jednotlivých prvků zástavby na výstupní chování reproduktoru. Především se jedná o vliv délky zvukovodu a vliv různých typů mřížek. Akustické parametry reproduktoru jsou posuzovány naměřenými frekvenčními charakteristikami pro jednotlivé typy zvukovodů a mřížek. K měření byla použita bezodrazová akustická komora a vybavení firmy Bruel & Kjaer. Na základě naměřených charakteristik byly odvozeny závislosti parametrů zástavby na akustické parametry reproduktoru.

První část práce je zaměřena na teorii reproduktoru, elektro-mechanické analogie a Helmholtzova rezonátoru, kterým je možné popsat zástavbu reproduktoru. V praktické části jsou navrženy přípravky pro měření vlivu zástavby a samotné měření frekvenčních charakteristik v bezodrazové komoře. Výsledné naměřené charakteristiky jsou analyzovány a je vyhodnocen vliv jednotlivých prvků zástavby na akustické vlastnosti reproduktoru. V závěru je naznačen teoretický popis zástavby reproduktoru odvozený od Helmholtzova rezonátoru.

1 Teorie reproduktorů

Reproduktor je elektroakustický měnič, který převádí elektrickou energii na mechanickou energii a následně na akustický signál. Akustický vjem je vytvořen pohyblivou částí měniče. Elektrodynamické přímo vyzařující reproduktory jsou v současnosti nejrozšířenějším typem reproduktorů používaným nejen v automobilech. Pohyblivá část (membrána), je rozpořehována kmitáním cívky v magnetickém poli, která se vlivem elektrického signálu pohybuje a tím vytvoří akustickou vlnu. Ideální reproduktor by měl mít vyrovnanou a frekvenčně nezávislou charakteristiku. Vzhledem k vlastnostem reproduktorů, ale není možné vytvořit reproduktor, který rovnoměrně pokryje celé člověkem slyšitelné frekvenční pásmo. Malé a lehké membrány nemohou dosáhnout dostatečně velkých výchylek pro reprodukci na nízkých frekvencích, naopak velké a těžké membrány nemohou, díky setrvačnosti, dostatečně rychle kmitat na vysokých frekvencích. Pro co nejlepší reprodukci zvuku je nutné použít více různých reproduktorů, tak aby bylo možné kvalitně pokrýt celé frekvenční pásmo (20 Hz – 20 kHz).

Výškové reproduktory

Výškový reproduktor by měl vyzařovat tóny od horní mezní frekvence středového reproduktoru (2–4 kHz) až do horní oblasti člověkem slyšitelného pásma (20 kHz). Kmitací systém musí mít velmi malou hmotnost – setrvačnost, aby mohl reproduktor vyzářit vysoké tóny s dostatečnou účinností v tomto frekvenčním pásmu. Pro to má reproduktor velmi malé rozměry, tuhé uchycení kmitacího systému a vysokou rezonanční frekvenci. Koš výškového reproduktoru je vždy uzavřen. Lidský sluch je velmi citlivý ve vyšších frekvencích, proto je také velmi důležité, aby měl reproduktor na těchto frekvencích co nejmenší zkreslení.

1.1 Princip přímovyzařujícího elektrodynamického reproduktoru

Elektrodynamický reproduktor je elektrodynamický měnič využívající vzájemného působení sil, mezi magnetickým polem kmitací cívky, kterou prochází signálový proud i a konstantním magnetickým polem permanentního magnetu. Pole, vytvářené permanentním magnetem působí na vinutí cívky, které je umístěno ve vzduchové mezeře, v kolmém směru. Síla F je vyvolaná průchodem proudu kmitací cívkou a je úměrná magnetické indukci B a délce vodiče l kolmé ke směru vektoru indukce. Velikost síly F je úměrná proudu i a je dána vztahem 1.1. [2]

$$F = \int_0^l B i dl \quad [N; T, A, m] \quad (1.1)$$

Pro homogení magnetické pole platí:

$$F = Bli \quad [N; T, A, m] \quad (1.2)$$

Kde:

B	magnetická indukce [T]
l	délka vodiče [m]
i	okamžitá hodnota proudu [A]

Proud i může být časově proměnný, tzn. že i síla F bude časově proměnná.

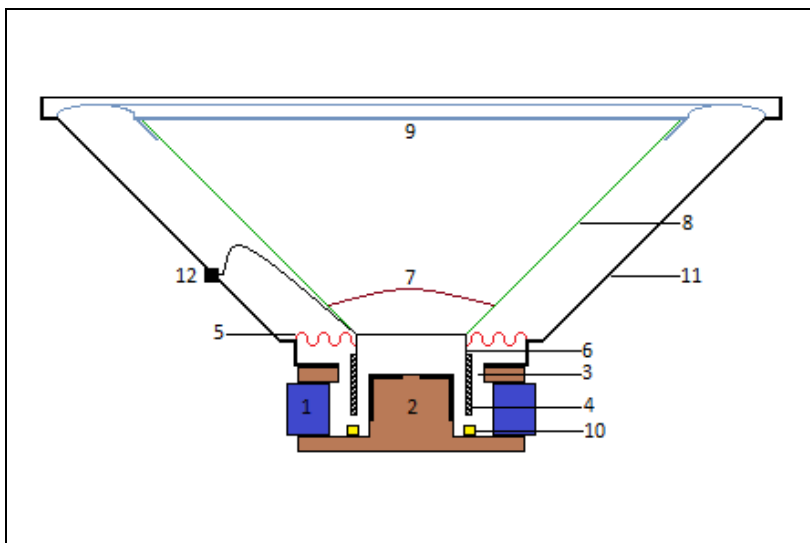
Směr působení síly je možné určit podle Flemingova pravidla levé ruky: „Pokud dáme levou ruku tak, že prsty ukazují směr proudu protékajícím vodičem cívky a indukční siločáry vnějšího magnetického pole směřují do dlaně, tak palec bude ukazovat ve směru síly působící na vodič.“ Z tohoto vyplývá, že se změnou proudu i , který protéká vinutím cívky dochází ke změně velikosti a směru síly působící na cívku, která je pevně spojena s membránou reproduktoru. Membrána rozkmitává vzduch a vytváří akustický tlak, který vnímáme jako zvuk. [9]

1.2 Elektrodynamický reproduktor

Základní části elektrodynamického reproduktoru tvoří membrána, která je pevně spojena s kmitací cívkou a středící membránou, která jí dovoluje pohyb v ose reproduktoru. Magnetický obvod je tvořen permanentním magnetem a pólovými nástavci. Pólovými nástavci je magnetický tok soustředěn do prostoru vzduchové mezery. Vzduchová mezera musí být co nejmenší, aby v ní bylo dosaženo co největšího magnetického toku. Kostra kmitací cívky je pevně spojena s membránou a je na ní navinuta kmitací cívka, která je tvořena izolovaným vodičem. Konce cívky jsou pak vyvedeny na koš reproduktoru a jako přívodní svorky reproduktoru. [6]

Připojíme-li na přívodní svorky reproduktoru střídavé napětí, bude procházet kmitací cívkou proud nepřímo úměrný impedanci vinutí. Cívka reproduktoru je v homogenním magnetickém poli kolmém na směr vinutí cívky, na které bude působit síla, která jí bude vychylovat v axiálním směru, v závislosti na okamžité polaritě střídavého proudu. Protože je membrána pevně spojena s cívkou, vykonává membrána pístový pohyb (ideální stav). Pro tímto pohybem stlačuje vzduch před i za membránou a tím vzniká akustická vlna. Membrána by měla být co nejlehčí a zároveň co nejtužší, aby při jejím pohybu nedocházelo k jejím deformacím a tím ke zkreslení vznikem nežádoucích kmitů. [1] Membrány mají nejčastěji kruhový nebo eliptický tvar. Jako materiál membrán se nejčastěji používá papír, kevlar, kov a

hedvábí pro výškové reproduktory. Aby bylo zamezeno pohybu mimo osu musí být membrána vhodně ukotvena. Spodní závěs membrány je tvořen středící membránou, která je s kmitací membránou spojena přes kostru cívky. Středící membrána musí být co možná nejvíce prodyšná, aby skrz-ní mohl proudit vzduch, jehož pohybem je vyvolán pohyb membrány. Horní závěs membrány po jejím obvodu je tvořeno přímo materiálem membrány, nebo gumou. Střed membrány zakrývá prachovka, někdy také označována jako vrchlík, která má zabránit vniknutí prachu dovnitř reproduktoru. Koš reproduktoru tvoří nosnou část pro všechny části reproduktoru a jeho uchycení do ozvučnice. [5]



1. Kruhový permanentní magnet
2. Pólové nástavce
3. Vzduchová mezera
4. Kmitací cívka
5. Středící membrána
6. Kostra kmitací cívky
7. Těsnění proti prachu
8. Membrána
9. Horní závěs membrány
10. Zkratovací prsteneček
11. Koš reproduktoru
12. Přívodní svorky

Obr. 1.1: Elektrodynamický reproduktor

1.3 Náhradní schéma reproduktoru

Náhradním schématem reproduktoru můžeme analogicky vyjádřit elektrické a mechanické prvky v jediném elektrickém obvodu. Takovéto elektrické schéma můžeme využít k simulacím a dalšímu zkoumání chování reproduktoru. V kapitole 1.2 byly popsány jednotlivé části reproduktoru. Z tohoto popisu je vidět, že je možné funkci reproduktoru rozdělit na dvě části, část elektrickou a část mechanickou. Spojení mezi elektrickým a mechanickým obvodem je zprostředkováno silovým působením, které je způsobené průchodem elektrického proudu vodičem v homogenním magnetickém poli.

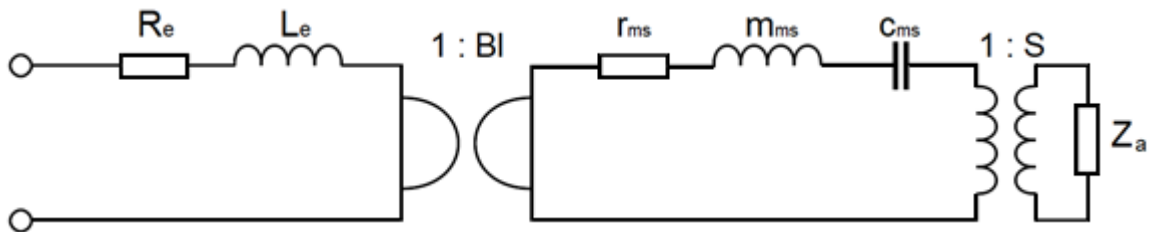
Pro sílu F vyvolanou kmitací cívkou reproduktoru podle vztahu 1.1, resp. 1.2 můžeme elektromechanickou analogií vyjádřit převod elektrické energie na mechanickou za použití konstanty Bl . Konstanta Bl je součin magnetické indukce a délky vodiče ve vzduchové mezeře reproduktoru. Tato konstanta je také označována jako gyrační nebo silová konstanta.

Elektromechanická analogie:

$$F = IBl \rightarrow U = Blv \quad (1.3)$$

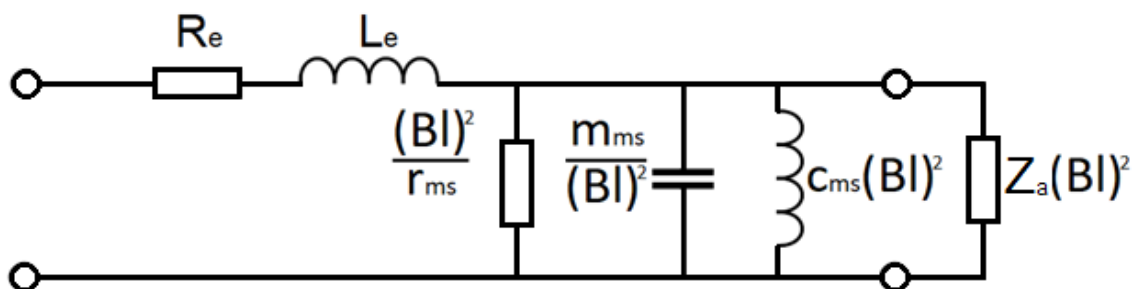
Na obrázku 1.3 je znázorněno analogické schéma reproduktoru s gyrátorem oddělenou elektrickou a mechanickou částí. Mechanická a akustická část reproduktoru jsou spojeny membránou reproduktoru, tzn. že akustický tlak p je závislý na efektivní ploše membrány a motorické síle. V schématu je tento převod vyjádřen transformátorem s převodem S : 1.

Elektrická část obsahuje elektrické prvky reproduktoru rezistor R_e a indukčnost L_e zapojené do série. Tyto prvky jsou určeny kmitací cívku reproduktoru. Mechanickou část představuje mechanický odpor reproduktoru r_{ms} , celková hmotnost kmitacího systému m_{ms} a poddajnost kmitacího systému c_{ms} . V akustické části je uvedena akustická impedance Z_a .



Obr. 1.2: Analogické elektromechanické schéma reproduktoru

Převodníkem mezi mechanickou a elektrickou částí je gyrátor. Gyrátor transformuje impedanci, proto se druhá část při převodu na elektrickou stranu invertuje. Použitím elektromechanické analogie převedeme mechanickou a akustickou část do jednoho elektrického obvodu obrázek 1.4.



Obr. 1.3: Náhradní schéma reproduktoru (elektro-mechanicko-akustické)

Velmi často se místo odporu reproduktoru r_{ms} používá mechanická vodivost g_{ms} .

$$g_{ms} = \frac{1}{r_{ms}} \quad (1.4)$$

Detailní odvození náhradního schématu reproduktoru a elektro-mechanicko-akustické analogie jsou uvedeny v literatuře [2].

1.4 Parametry reproduktorů

Parametry reproduktorů lze rozdělit na všeobecné, mechanické a grafické. Všeobecné parametry udávají maximální příkon, jmenovitou impedanci, citlivost atd. Mezi mechanické parametry patří rozměry a hmotnost reproduktoru. Grafické parametry reproduktoru udávají frekvenční, impedanční a směrové charakteristiky. Parametry Thiele-Small, nebo také TS parametry, jsou označovány elektromechanické parametry reproduktoru, popisující jeho chování v oblasti rezonanční frekvence jako elektromechanickou soustavu. Tyto parametry jsou vyjádřeny základními elektromechanickými veličinami, které jsou dané konstrukcí reproduktoru. Tyto parametry se používají k výpočtu dalších TS parametrů. [1]

Frekvenční amplitudová charakteristika

Frekvenční amplitudová charakteristika reproduktoru vyjadřuje frekvenční závislost hladiny akustického tlaku v určitém bodě před reproduktorem. Převod mezi hladinou akustického tlaku a akustickým tlakem je vyjádřen vztahem 2.1. [1]

$$L_p = SPL = 20 \log_{10} \left(\frac{p}{p_0} \right) \quad [dB] \quad (1.5)$$

Kde:

$$\begin{array}{ll} p & \text{Akustický tlak [Pa]} \\ p_0 & \text{Referenční akustický tlak, } p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ [Pa]} \end{array}$$

Frekvenční charakteristika je nejčastěji měřena v ose reproduktoru v dostatečně vzdálenosti měřicího mikrofону od reproduktoru a ve volném prostoru. Pro korektnost měření musí být známá přesná vzdálenost mikrofону od měřeného reproduktoru a měření musí probíhat při konstantním výkonu. Tato vzdálenost musí být dostatečně velká kvůli potlačení vlivu interferencí ve výstupním poli vznikajících na vyšších frekvencích. Kvalitní reproduktor by měl mít vyrovnanou amplitudovou charakteristiku. Ideální charakteristika by byla rovná přímkou přes celý frekvenční rozsah reproduktoru. Takový reproduktor by hrál na všech frekvencích rozsahu stejně nahlas. Na základě této frekvenční amplitudové charakteristiky můžeme určit frekvenční rozsah reproduktoru. [7]

Charakteristická citlivost reproduktoru

Často je zaznamenávána charakteristická citlivost L_S . Podle normy ČSN EN 60268-5 je charakteristická citlivost L_S definovaná jako citlivost průměrné úrovně hladiny akustického tlaku v ose reproduktoru měřené ve vzdálenosti 1 m od reproduktoru a příkonu 1 VA. Tato charakteristika se měří při konstantním výkonu a přesné vzdálenosti měřícího mikrofону od měřeného reproduktoru. Bez známosti těchto dvou údajů je charakteristika značně znehodnocená, protože změnou vzdálenosti měřícího mikrofону nebo příkonu reproduktoru se změní i měřená charakteristika. Charakteristická citlivost není tedy určena jednoznačně.

Frekvenční rozsah reproduktoru

Frekvenční rozsah reproduktoru je definován jako interval frekvencí, na kterých je jeho citlivost vysoká a výrazně se nemění. Tento interval je vymezený horní a dolní frekvencí. Tyto frekvence jsou určeny na základě vymezení přijatelného zkreslení frekvenční charakteristiky. Mezi těmito frekvencemi je určeno, jak se může hladina akustického tlaku měnit. Tento rozsah není přesně vymezen, ale běžně se používají rozsahy ± 3 až ± 6 dB.

Frekvenční rozsah je také možné odhadnout z parametrů reproduktoru. Dolní mezní frekvenci pásma je možné určit na základě rezonančního kmitočtu f_s . Horní mezní frekvence může být určena z frekvenční charakteristiky, kdy se od určité frekvence začne charakteristika deformovat. [6]

Směrová frekvenční charakteristika

Směrová charakteristika vyjadřuje závislost akustického tlaku na úhlu natočení od referenční osy a frekvence signálu. Reprodukter nevyzařuje akustickou energii na všech frekvencích stejně do všech směrů. Nízké frekvence vyzařuje reproduktor všesměrově – hladina akustického tlaku je ve všech směrech a stejné vzdálenosti stejná. S rostoucí frekvencí klesá ale výkon vyzářený mimo akustickou osu reproduktoru. Pro zobrazení směrové charakteristiky se používají polární souřadnice, ve kterých jsou zobrazeny frekvenční charakteristiky pro různé úhly vzhledem k ose reproduktoru. Činitel směrovosti je poměr akustického tlaku v ose a sledovaném směru vyzarování reproduktoru. [1][7]

Thiele-Small parametry

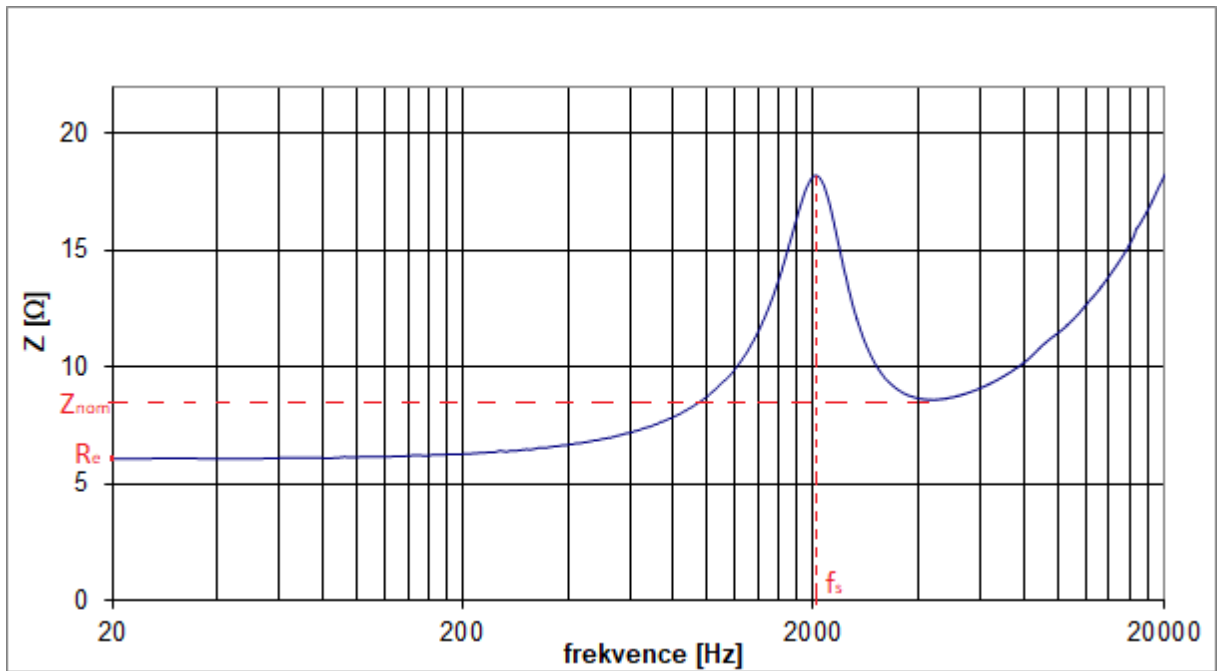
Thiele-Small parametry je označení pro soubor veličin, definujících vlastnosti reproduktoru jako elektroakustického měniče, které popisují chování v oblasti kolem rezonančního kmitočtu.

Využitím těchto parametrů je možné simulovat reproduktor. Jako základní parametry jsou udávány tyto [1][13]:

S_d [m ²]	efektivní plocha membrány
M_{ms} [kg]	hmotnost kmitajícího systému a spolukmitajícího sloupce vzduchu
C_{ms} [m/N]	poddajnost kmitacího systému zavěšení membrány
f_r [Hz]	rezonanční frekvence
Bl [T.m]	součin magnetické indukce a délky vodiče cívky ve vzduchové mezeře
R_{ms} [N.s/m]	mechanický odpor (tlumení) kmitacího systému
R_e [Ω]	stejnoseměrný odpor vinutá cívky
L_e [H]	elektrická indukčnost
Q_{es} [-]	elektrický činitel jakosti
Q_{ms} [-]	mechanický činitel jakosti
Q_{ts} [-]	celkový činitel jakosti

Impedanční charakteristika

Impedanční charakteristika vyjadřuje závislost impedance na frekvenci. Kvůli kmitací cívce reproduktoru má impedanční charakteristika induktivní charakter. Při nízké (nulové) frekvenci se projevuje pouze činný odpor kmitací cívky R_e . S rostoucí frekvencí je vidět strmý růst impedance. V nejvyšší hodnotě impedance dochází k rezonanci, za tímto bodem impedance prudce klesá. Následuje oblast, kde se impedance ustálí (téměř neroste). V této oblasti je určena nominální hodnota impedance Z_{nom} . V tomto frekvenčním pásmu je také ideální provozní pásmo reproduktoru. Při dalším zvyšování frekvence dochází opět k nárůstu impedance vlivem indukčnosti kmitací cívky. Nominální impedance Z_{nom} udává minimální hodnotu impedance na frekvencích vyšších než rezonanční frekvence f_s . To znamená, že impedanční charakteristika nepřekročí nominální hodnotu udávanou výrobcem. Tato hodnota souvisí s maximálním příkonem reproduktoru. Impedanční charakteristika jako taková nepatří přímo mezi TS parametry, ale některé TS parametry se z této charakteristiky odvozují.[6]



Obr. 1.4: Impedanční charakteristika reproduktoru

Rezonanční frekvence

Rezonanční frekvence f_s je definována jako frekvence, na které absolutní hodnota impedance dosáhne maximální hodnoty na stoupající frekvenční stupnici. Rezonanční frekvence je jedním z hlavních parametrů kurčení použitelného frekvenčního pásma reproduktoru. Rezonanční frekvence je vyznačena na Obr. 1.4: Impedanční **charakteristika reproduktoru**

. Při rezonanční frekvenci f_s dosahuje impedanční charakteristika reproduktoru maximální hodnoty a kmitací cívkou reproduktoru tak protéká nejmenší proud. Při této frekvenci je v kmitacím systému reproduktoru největší energie. Při provozování reproduktoru na této frekvenci může dojít k jeho poškození. Impedanční charakteristika na frekvencích nižších, než je f_s prudce klesá, proto je reproduktor na těchto frekvencích neefektivní a jako dolní mezní frekvence reproduktoru se označuje právě rezonanční frekvence. [1]

Činitele jakosti

Činitel jakosti je bezrozměrný parametr popisující, jak moc je rezonanční obvod tlumen, popř. popisuje šířku pásma rezonanční frekvence ke střední frekvenci. Každý kmitací systém obsahuje konečnou hodnotu odporu, který působí proti vzniku kmitání a vznikají tím na něm ztráty. Míru ztrát lze vyjádřit činitelem jakosti Q . Činitel jakosti lze dobře pozorovat na impedanční charakteristice reproduktoru. Velké a úzké rezonanční špičky ukazují na velké

činitele jakosti, a naopak méně výrazné špičky ukazují na malé hodnoty činitele jakosti. Z toho lze usuzovat, že čím bude vyšší činitel jakosti Q , tím strmější změny křivky budou. Protože reproduktor je elektromechanický měnič, jsou ztráty vyjadřovány třemi činiteli jakosti. [6]

- Elektrický činitel jakosti Q_{es} zahrnuje elektrické ztráty v kmitací cívce reproduktoru
- Mechanický činitel jakosti Q_{em} zahrnuje mechanické ztráty pohyblivých částí reproduktoru
- Celkový činitel jakosti Q_{ts} , zahrnuje v sobě elektrický a mechanický činitel jakosti

2 Teorie

2.1 Elektromechanická a elektroakustická analogie

Jak bylo zmíněno v první kapitole, elektroakustické měniče mění elektrickou energii na akustickou (reproduktory) nebo naopak (mikrofony). Pro vyjádření těchto jevů lze využít analogii mezi elektrickými, mechanickými a akustickými soustavami. Tato analogie je metoda, jak vyjádřit mechanické a elektrické jevy, které mají stejná matematická a grafická řešení. Právě shoda matematického řešení je podmínkou této analogie. Elektrická, mechanická a akustická soustava jsou popsány řadou vztahů mezi jednotlivými veličinami. Tyto vztahy jsou si velmi podobné jak po formální, tak po funkční stránce, proto je možné jednotlivé veličiny k sobě navzájem přirovnat a vytvořit tak náhradní elektrický obvod. V takto analogické elektrické soustavě platí stejné postupy a zákony jako u elektrických obvodů. [2]

Mechanickou soustavu vyjádřenou náhradním elektrickým obvodem můžeme analyzovat jako běžný elektrický obvod. Budou v něm tedy platit všechna pravidla a zákony elektrických obvodů. Elektrická soustava je vhodnější pro další analýzy a simulace. V následující tabulce jsou uvedeny základní vztahy mezi elektrickou a mechanickou soustavou.

Typ soustavy	Fyzikální veličina		Impedance		
	extenzivní	intenzivní	Odpor	Indukčnost	Kapacita
	$i(t)$	$e(t)$	$\frac{e(t)}{i(t)}$	$\frac{e(t)}{\frac{di(t)}{dt}}$	$\frac{i(t)}{\frac{de(t)}{dt}}$
Elektrická	Elektrický proud	Elektrické napětí	El. odpor	El. Indukčnost	El. Kapacita
	$i(t)$ [A]	$u(t)$ [V]	R [Ω]	L [H]	C [F]
Mechanická	Síla	Rychlost	Mechanický odpor	Mechanická poddajnost	Hmotnost
	$F(t)$ [N]	$v(t)$ [m/s]	$r_m = \frac{1}{G_m}$ [kg·s ⁻¹]	c_m [m/N]	L_m [kg]

Tab. 2.1: Elektro-mechanická analogie [20]

2.2 Vliv zástavby na parametry reproduktoru

Zástavba reproduktorů v automobilech je často kompromisem mezi možnostmi zástavby v interiéru, estetikou a kvalitou ozvučení automobilu. Navrhnout a zkonstruovat dobré ozvučení interiéru vozidla není jednoduché. Vnitřní prostor automobilu je relativně malý, členitý a je zde velká různorodost použitých materiálů. Navíc některé části zástavby reproduktorů mohou podléhat více estetické stránce a možnostem zástavby než stránce funkční. Jednou z těchto částí může být například krycí mřížka reproduktoru nebo jeho umístění a následná konstrukce a rozměry jeho zvukovodu. Zvuk se odrazí od překážky, pokud narazí na objekt větší, než je $1/4$ vlnové délky daného zvuku. Je-li objekt menší vznikne difrakce zvuku kdy se vlny zakříví kolem tohoto objektu. Akustický tlak může způsobovat rezonance a vibrace, které potom budou vydávat vlastní zvukové vlny a ovlivňovat tak výsledné parametry reproduktoru. Tento jev je nejmarkantnější na nižších frekvencích, s rostoucími frekvencemi bude tento jev zanikat.

Jednou z hlavních částí zástavby reproduktoru v automobilu je krycí mřížka, která ovlivňuje šíření akustických vln k posluchači. Z pohledu akustiky by bylo ideální nepoužívat před výškovými reproduktory žádnou krycí mřížku. S tímto konstrukčním řešením se ale v automobilech nesetkáváme, protože krycí mřížka tady má důležitou ochranou a estetickou úlohu. Každá, byť i jen částečně odrazivá plocha před reproduktorem ovlivní poslední 2 oktávy rozsahu lidského sluchu. Mezi krycí mřížkou, zvukovodem a membránou reproduktoru mohou vznikat několikanásobné odrazy. Tyto odrazy mohou způsobit zvlnění frekvenční charakteristiky. Největší vliv bude mít pravděpodobně délka zvukovodu a volná plocha mřížky, proto byly pro zkoumání vlivu zástavby výškového reproduktoru zvoleny tři parametry zástavby:

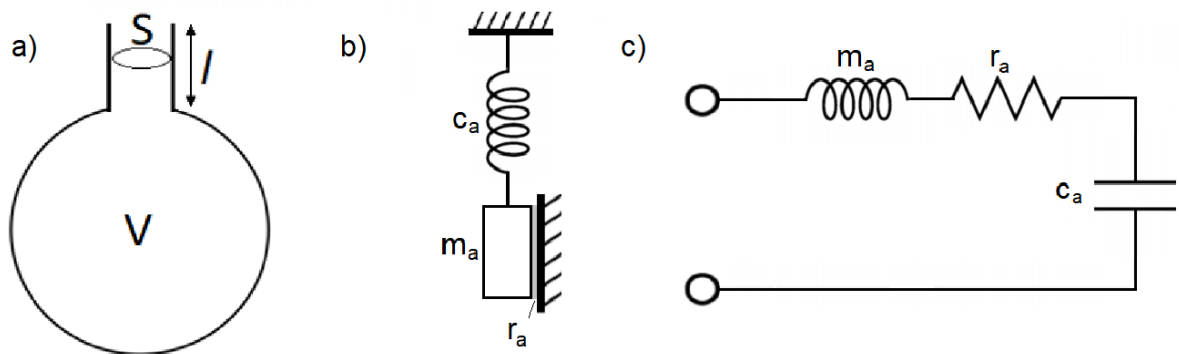
- volná plocha krycí mřížky
- tloušťka krycí mřížky
- délka zvukovodu

Vlivem zástavby reproduktoru může docházet ke změnám spektrálního výkonu soustavy a ke zvlnění frekvenční charakteristiky. Tyto vlivy je možné kompenzovat buď změnou zástavby, což není vždy možné, volbou jiného reproduktoru nebo použitím ekvalizéru.

2.3 Helmholtzův rezonátor

Helmholtzův rezonátor tvoří uzavřený objem vzduchu s alespoň jedním zúženým podélným otvorem. Jedná se o rezonanční soustavu složenou ze soustředěných parametrů

akustické hmotnosti m_a kmitající přes akustickou poddajnost c_a tlumenou akustickým odporem r_a . Tento princip je znázorněn na obrázku 2.1 [3]



Obr. 2.1: Helmholtzův rezonátor: a) Schéma, b) mechanický model, c) analogické elektrické schéma

Budeme-li předpokládat že soustava není tlumená, lze rezonanční frekvenci f_r vyjádřit rovnicí 2.1. Zahrnutím tlumení se rezonanční frekvence sníží. [3]

$$j\omega m_a + \frac{1}{j\omega c_a} = 0 \rightarrow f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{m_a c_a}} \quad (2.1)$$

Helmholtzův rezonátor tvoří uzavřená dutina o objemu V , která je spojena přes úzké hrdlo o průřezu S a délce l s okolním prostředím (obr 2.1). Poddajnost c_a je možné si představit jako objem vzduchu v dutině, který mění svůj tlak v celém objemu rovnoměrně v jeden okamžik. Objem hrdla představuje akustickou hmotnost m_a , které klade odpor tření vzduchu r_a . Oblast s vysokým akustickým tlakem (čelní plocha rezonátoru kam dopadá akustická vlna), se přemění na oblast s vysokou rychlostí částic (hrdlo otvoru rezonátoru). Principu Helmholtzova rezonátoru se často využívá u akustických absorbérů ve formě děrovaných desek, které uzavírají určitý objem vzduchu za nimi. Pro dosažení co největšího tlumení se za hrdlo umísťují porézní absorbéry.

Třením v hrdle vzniká akustický odpor r_a a takové soustavě odpovídá sériové spojení elementů m_a , r_a , c_a . Všemi elementy této soustavy protéká stejný proud částic prostředí o objemové rychlosti W . Soustava se chová jako akustická impedance, kterou lze vyjádřit rovnicí 2.2. [3][7]

$$Z_{HRa} = r_a + j\omega m + \frac{1}{j\omega c_a} = r_a + j\left(\omega m - \frac{1}{\omega c_a}\right) \quad (2.2)$$

Hmotnost vzduchu m v hrdle kruhového průřezu lze vyjádřit:

$$m = \frac{\rho_0 l}{S} = \frac{\rho_0 l}{\pi r^2} \quad (2.3)$$

Zavedením činitele děrování ε můžeme vyjádřit hmotnost vzduchu v hrdle m_a pro více otvorů vztahem 2.5.

$$\varepsilon = \frac{\pi r^2}{D^2} \quad (2.4)$$

$$m_a = \frac{\rho_0 l}{S} = \frac{\rho_0 l}{\varepsilon} \quad (2.5)$$

Kde:

ρ_0	hustota vzduchu [kg.m ⁻³]
c_0	rychlost zvuku [m.s ⁻¹]
S	průřez otvoru [m ²]
l	délka hrdla [m]
r	poloměr hrdla [m]
D	rozteč otvorů [m]
ε	činitel děrování

Akustickou poddajnost c_a si můžeme představit jako dutinu naplněnou vzduchem a uzavřenou nehmotným pístem s plochou S , pohybujícím se bez tření. Akustická poddajnost je definována jako objem vzduchu, který je silou stlačen, ale nevznikne žádné zrychlení. [2]

$$c_a = \frac{V}{c_0^2 \rho_0} \quad (2.6)$$

Rezonanční frekvenci f_r :

$$\omega_r m_a = \frac{1}{\omega_r c_a} \quad (2.7)$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{m_a c_a}} \quad (2.8)$$

U Helmholtzova rezonátoru je nutné zohledňovat spolukmitající vzduchový sloupec v hrdle a tím kompenzovat jeho efektivní délku (resp. tloušťku děrované desky). Tato rovnice platí za předpokladu, kdy je $l \ll \frac{1}{4} \lambda$ a rozměry dutiny jsou menší než $\frac{1}{4} \lambda$. Protože hmotnost vzduchu není určena pouze plochou hrdla a jeho délkou, ale také hmotností spolukmitajícího vzduchu

zavádí se efektivní délka hrdla l' . Je-li l dostatečně dlouhé v porovnání s poloměrem hrdla r můžeme položit $l \approx l'$. Kde Pro velmi malé, nebo žádné hrdlo kruhového průřezu je nutné kompenzovat délku hrdla $l \rightarrow l'$. [3]

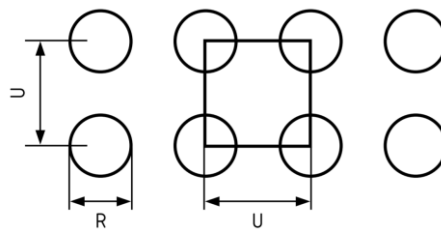
$$l' = \frac{16}{3\pi} r \quad (2.9)$$

3 Měření vlivu zástavby

3.1 Měřicí přípravky

3.1.1 Krycí mřížky

Krycí mřížky jsou definovány volnou plochou a tloušťkou mřížky. Jako materiál mřížek byl zvolen bílý Polyoxymethylen (POM) z důvodu dobré třískové obrobitelnosti. POM byl dodán v deskách o tloušťkách 1, 2 a 3 mm. Desky byly naformátovány na destičky o rozměrech 40x40mm. Z důvodu snadnější ruční výroby bylo zvoleno kruhové řadové uspořádání.

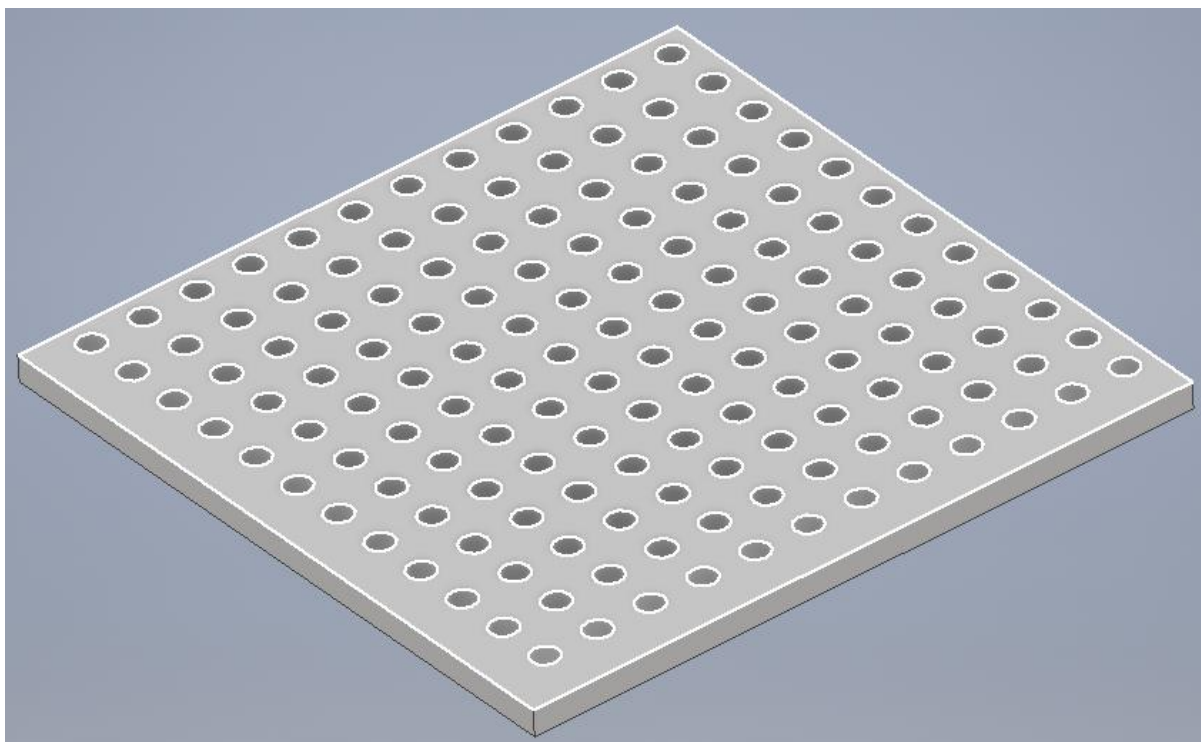


Obr. 3.1: Kruhové řadové děrování [19]

Mřížky byly vyráběny ručně na stojanové vrtačce. Pro dosažení větší přesnosti vrtání byla vytvořena kovová šablona, resp. destička s rozměry mřížky (Obr. 3.2). Na CNC na ní byla přesně naznačena rozteč otvorů mřížky. Potom byla tato šablona ručně dovrtnána skrz s průměr otvoru 1 mm. Všechny mřížky byly nejprve předvrtány přes tuto šablonu a až potom byly finálně dokončeny – dovrtnány na průměr otvoru podle požadované volné plochy. Pro zkoumání vlivu zástavby byly zohledněny volné plochy mřížek používané v praxi, nakonec byly zvoleny volné plochy mřížek 7–35 %. Všechny vrtané mřížky jsou uvedeny v tabulce 3.1. Výpočet volné plochy mřížky VP pro kruhové řadové děrování je dán vztahem 3.1. [19]

$$VP = \frac{R^2 \cdot 78,5}{U^2} \quad [\%] \quad (3.1)$$

Rozměry vrtaných mřížek jsou uvedeny v následující tabulce 4.1. Všechny mřížky byly vyhotoveny v tloušťkách TL 1, 2 a 3 mm. Pro větší volné plochy byly použity vzorky mikrotahokovu uvedené v tabulce 3.2. Volnou plochu u mikrotahokovu uvádí výrobce pouze u typu Q3. U ostatních typů uvádí pouze orientační, nebo žádné hodnoty.



Obr. 3.2: 3D model vrtací šablony

Označení	Průměr otvoru R [mm]	Rozteč U [mm]	Volná plocha mřížky VP [%]
M7	1,2	4	7,07
M12	1,2	3	12,56
M19	1,5	3	19,60
M28	1,8	3	28,26
M35	2,0	3	34,88

Tab. 3.1: Rozměry vrtaných POM mřížek

Označení	Rozměr oka			Volná plocha [%]
	Délka oka	Šířka oka	Můstek	
LD0.85	0,85	0,65	0,23 x 0,15	-
LD1.5	1,5	1,0	0,35 x 0,15	≈43
LD2.5	2,5	1,5	0,35 x 0,25	≈53
Q3	3	2,2	0,3 x 0,4	70

Tab. 3.2: Rozměry mřížek – mikrotahokov

3.1.2 Zvukovody

Zvukovody byly zhotovené z PVC trubky o průměru 32 mm. Tento průměr přesně odpovídá hraně reproduktoru. Zvukovody byly zhotoveny v několika délkách viz tabulka 3.3.

Nejkratší zvukovod přesně odpovídá hraně reproduktoru, takže umožňuje montáž mřížky přesně s rovinou reproduktoru.

Označení	Délka zvukovodu [mm]
ZV6	6
ZV9	9
ZV12	12
ZV20	20
ZV30	30
ZV40	40

Tab. 3.3: Zvukovody



Obr. 3.3: Zvukovody

Příklady značení zástavby

ZV6M35T2

ZV6	Délka zvukovodu 6 mm
M35	Typ mřížky (viz tab. 4.1)
T2	Tloušťka mřížky 2 mm

ZV12Q3

ZV12	Délka zvukovodu 12 mm
Q3	Typ tahokovu (viz tab. 4.2)

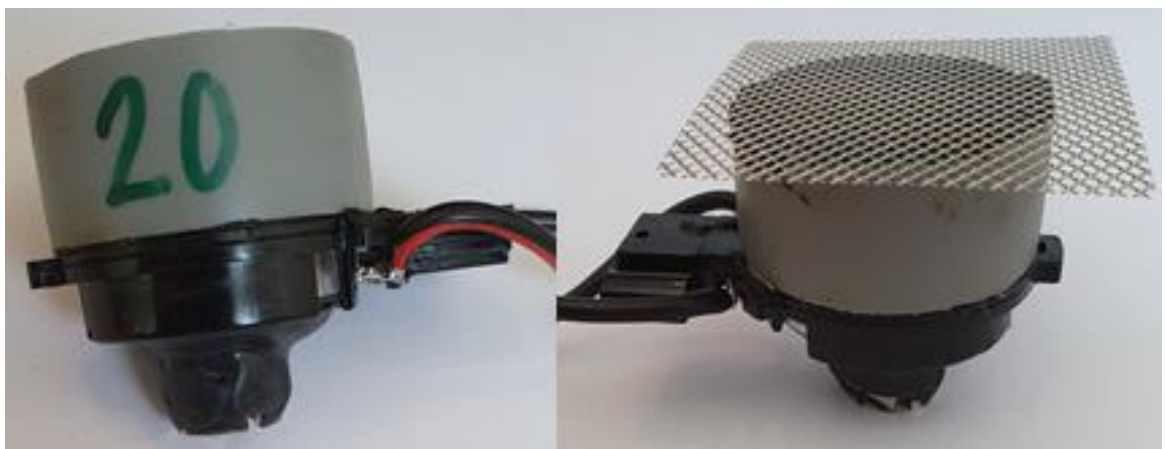
3.1.3 Montáž zástavby

Pro různé kombinace zástavby bylo nutné velmi často měnit mřížky a zvukovody. K upevnění zvukovodu k reproduktoru byl použitý silikonový tmel. Vystředění zvukovodu bylo zajištěné hranou reproduktoru, která přesně odpovídá vnitřnímu průměru zvukovodu. K upevnění a utěsnění mřížky k zvukovodu byl také použitý tmavý silikonový tmel. Mřížka byla přilepena přímo na zvukovod. Při lepení mřížky bylo třeba dát pozor, aby se nedostal tmel do otvorů mřížky a aby byla mřížka utěsněna k zvukovodu. Tmavý tmel byl použit z důvodu optické kontroly čistoty otvorů mřížky. Po každé změně zástavby bylo nutné zkontrolovat

otvory mřížky, jestli nejsou zanesené silikonem. Pro uchycení reproduktoru byl přímo na něj přilepen šroubový nástavec epoxidovým lepidlem, který je možné uchytit do stativů, dostupných v laboratoři. To velmi zjednodušilo nastavování vzdálenosti od mikrofonu pro různé zástavby.



Obr. 3.4: Měřený reproduktor



Obr. 3.5: Uchycení mřížky a zvukovodu k reproduktoru



Obr. 3.6: Uchycení reproduktoru ke stativu

3.2 Prostory pro akustické měření

Všechna měření proběhla v laboratořích Západočeské univerzity, kde je pro tyto účely bezodrazová komora. Ta je přímo navržena tak, aby se její parametry co nejvíce blížily volnému poli. Těmto podmínkám se dá přiblížit v dostatečně velkém uzavřeném a utlumeném prostoru. Bezodrazová komora nemá dostatečné rozměry, aby podmínky blízké volnému poli splnila, proto je realizována tak, že má všechny stěny pokryté tlumícím materiálem ve tvaru klínů, které tlumí frekvence od 100 Hz výše. Pro přesná měření je požadován činitel pohltivosti obložení stěn 99 %.

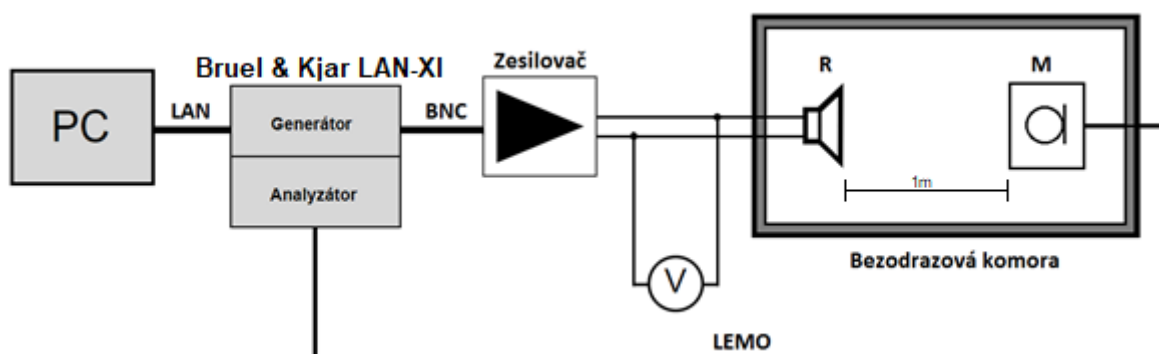
3.3 Měření frekvenční amplitudové charakteristiky

Před začátkem měření amplitudových frekvenčních charakteristik bylo nutné spočítat příkon reproduktoru, na kterém se bude měřit. Citlivost byla měřena příkonem 1 W a mikrofon byl umístěný v ose reproduktoru ve vzdálenosti 1 m od roviny reproduktoru. Tato vzdálenost byla upravována pro jednotlivé typy zástavby tak, aby rovina zástavby byla reproduktoru byla vždy 1 m. Pro měření byl použitý výškový reproduktor s nominální impedancí $X_{nom} = 4 \Omega$.

$$P = \frac{U^2}{R} \rightarrow U = \sqrt{P \cdot R} \quad (3.2)$$

$$U = \sqrt{P \cdot X_{nom}} = \sqrt{1 \cdot 4} = \underline{2 \text{ V}} \quad (3.3)$$

Měřicí obvod byl zapojen podle schématu na obrázku 3.7.



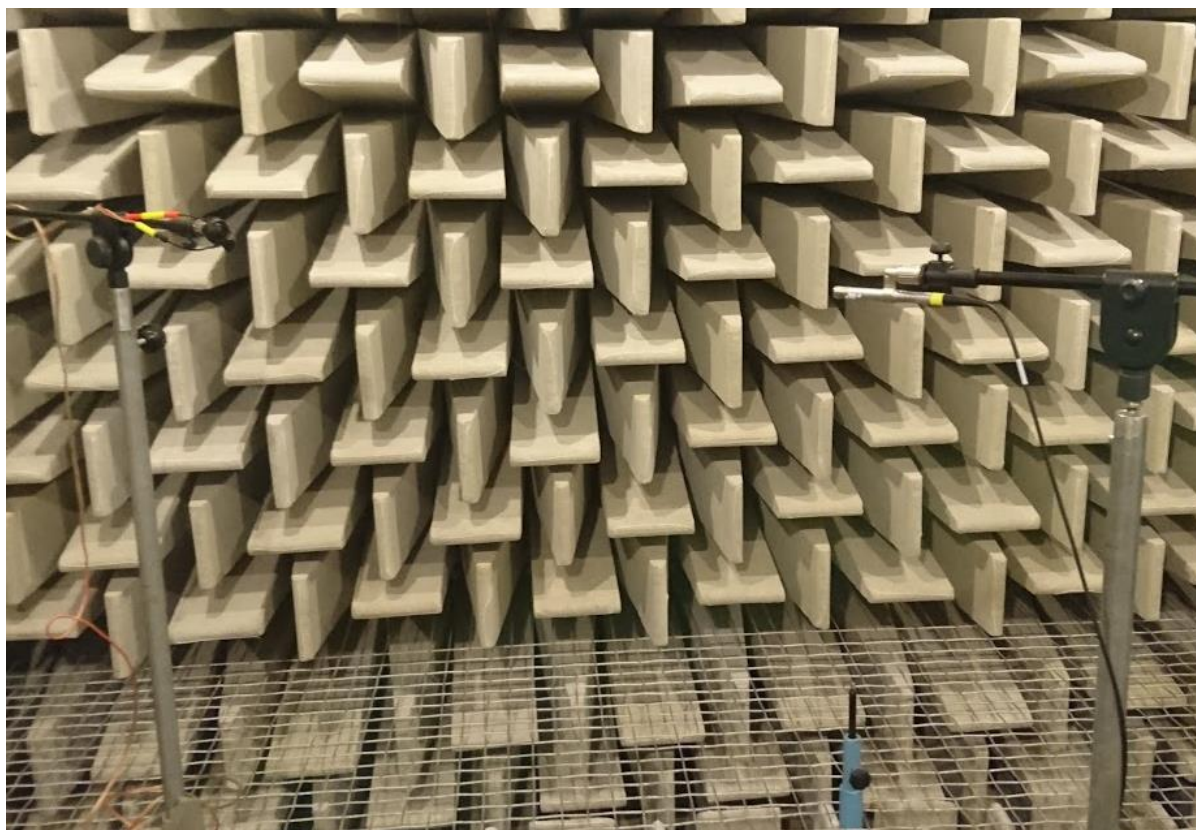
Obr. 3.7 Blokové schéma měření amplitudové frekvenční charakteristiky

Popis schématu zapojení:

PC	Počítač se softwarem PULSE LabShop
Generátor	Výstup analyzátoru Bruel & Kjar LAN-XI (výstup sig. generátoru)
Analyzátor	Vstup analyzátoru Bruel & Kjar LAN-XI
Zesilovač	Yamaha CP2000
V	Digitální multimetr Agilent 34401A
R	Měřený reproduktor
M	Měřicí mikrofon 4190 C1
LAN	Ethernet
BNC	Koaxiální kabel s BNC konektorem pro připojení zesilovače
LEMO	Kabel s LEMO konektory pro připojení měřícího mikrofonu

Generátor signálu měl nastavený testovací signál bílý šum a byl nastaven na 1 Vrms. Signál byl zesilovačem Yamaha zesílen na hodnotu vypočítanou podle vztahu 3.3. Analyzátor byl nastaven na měřené pásmo od 4 Hz do 25600 Hz s krokem 4 Hz, to odpovídá 6400 spektrálními čarám. Průměrování měření bylo nastaveno na 1000 vzorků a doba měření byla vždy delší než 1 minuta. Po nastavení analyzátoru bylo provedené zkušební měření, aby se ověřila funkčnost zapojení a nastavení citlivosti mikrofonu tak, aby mikrofon nebyl přebuzený.

Nejprve byly změřeny referenční charakteristiky samotného reproduktoru bez zvukovodů a mřížek. Následně proběhlo měření pro jednotlivé kombinace mřížek a zvukovodů. Vzdálenost reproduktoru a měřícího mikrofonu byla vždy 1 m od roviny reproduktoru. Tato vzdálenost byla nastavována vždy se změnou zvukovodu, tzn., že při použití zvukovodu o délce 20 mm, musel být reproduktor posunut o 20 mm. Na obrázku 3.8 je vidět následné umístění měřícího mikrofonu a měřeného reproduktoru v bezodrazové komoře.



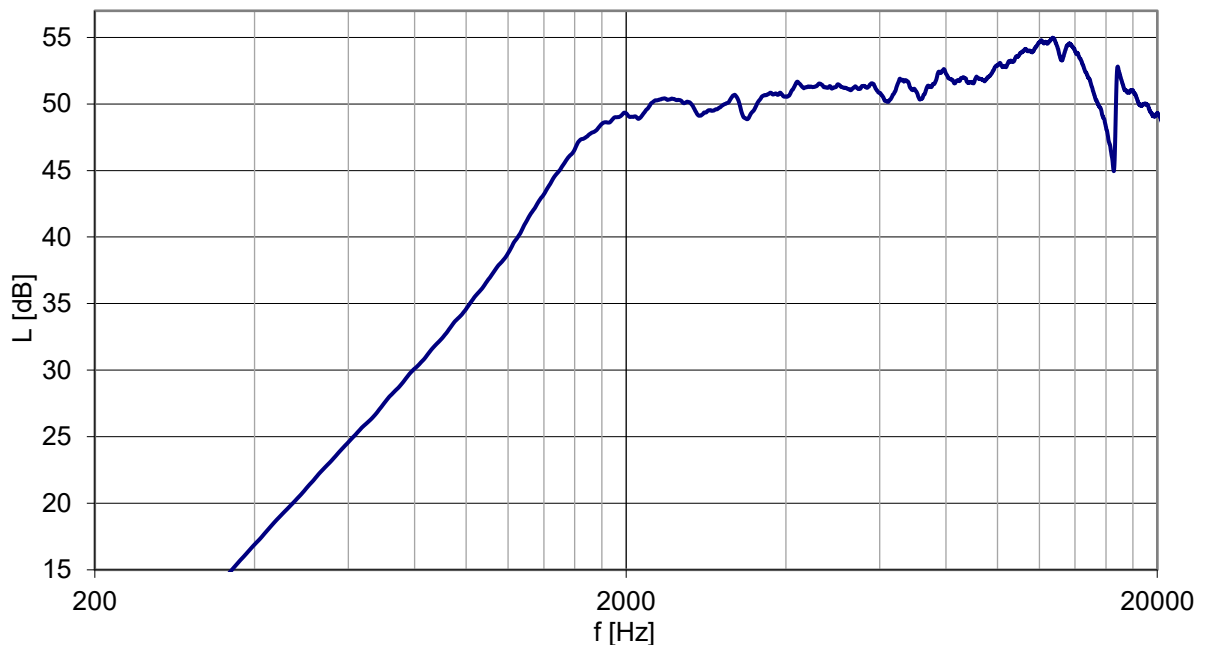
Obr. 3.8: Referenční měření v bezodrazové komoře

4 Vyhodnocení měření

4.1 Zpracování a analýza naměřených dat

Data z analyzátoru musela být ještě následně zpracována, protože nastavený rozsah měření 4–25600 Hz není využitelný v celém rozsahu. Na obrázku 4.1 je referenční charakteristika reproduktoru. Z této charakteristiky je možné určit pracovní frekvenci reproduktoru. Pracovní frekvence reproduktoru byla určena na základě vymezení přijatelného zkreslení frekvenční charakteristiky. Při hraničním zkreslení ± 6 dB, byl pracovní rozsah reproduktoru určen od 1,6 kHz do 20 kHz. Volbou frekvenčního rozsahu jsou vyloučeny nízké frekvence, na kterých může vznikat chyba daná rozměry bezodrazové komory, resp. nedostatečným tlumením nízkých frekvencí.

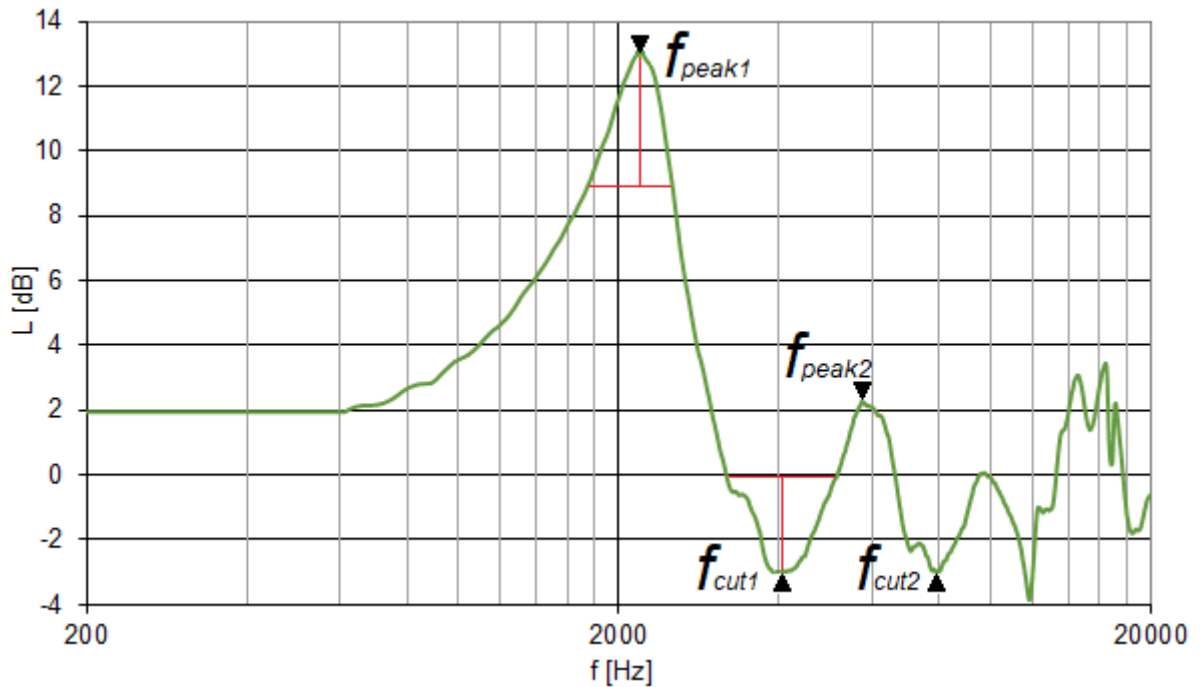
Naměřená data byla ještě následně filtrována. Jako kompromis mezi vyhlazením charakteristik a zachováním vypovídající hodnoty byla zvolena metoda klouzavého průměru se 150 vzorky. Větší počet vzorků už zkresloval a frekvenčně posouval špičky charakteristik. U některých měření byly oříznuty frekvence nižší než 600 Hz tak, aby nezhoršovaly čitelnost charakteristik. Tyto frekvence nemají vliv na vyhodnocování vlivu zástavby.



Obr. 4.1: Referenční měření výškového reproduktoru (bez zástavby)

Z referenčního měření je vidět propad úrovně akustického tlaku okolo 16 kHz. Tento propad mohl být způsoben odrazy v měřicí komoře, nebo nevhodně zvoleným mikrofonem pro měření na těchto frekvencích – pro frekvence nad 15 kHz by měl být zvolen jiný typ mikrofonu. Z tohoto důvodu byla analyzována měření pouze do 15 kHz.

Tato práce je zaměřena na zkoumání vlivu zástavby reproduktoru, proto bylo nutné odečíst vliv reproduktoru. Pro eliminaci vlivu reproduktoru bylo od všech měření amplitudových frekvenčních charakteristik zástavby odečteno referenční měření reproduktoru. Výsledné charakteristiky tedy zobrazují přímo vliv zástavby na frekvenční charakteristiku. Jako referenční hodnoty je dále použito odečtené měření reproduktoru se zvukovodem 6 mm. V naměřených charakteristikách se často objevovaly lokální extrémy, které bylo potřeba správně rozpoznat a analyzovat. Na Obr. 4.2 je naznačeno určování těchto extrémů.



Obr. 4.2: Určení maximálních hodnot peak/cut

Lokální extrémy naměřených a odečtených charakteristik byly analyzovány ručně, protože nebylo možné nastavit jednotná kritéria pro automatickou analýzu všech měření. Nejprve byly analyzovány extrémy vizuálně z grafů a určen interval frekvence na kterém je daný extrém. V tomto intervalu byla následně nalezena největší hodnota lokálního extrému a jeho frekvence. Tyto závislosti byly vyneseny do grafů jako závislosti jednotlivých parametrů zástavby a lokálních extrémů.

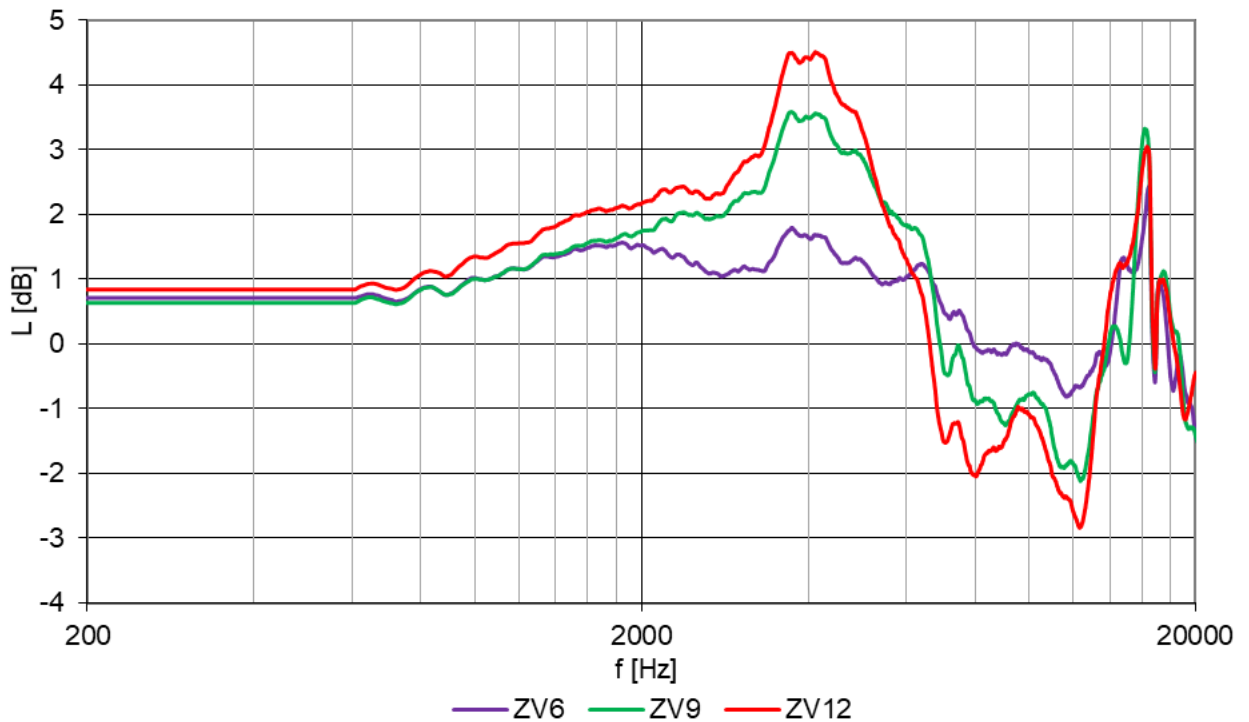
Měřené zástavby							
Tloušťka	Typ mřížky	Délka zvukovodu					
		6 mm	9 mm	12 mm	20 mm	30 mm	40 mm
1 mm	VP7	X	X	X	X	X	X
	VP12	X	X	X	X	X	X
	VP19	X	X	X	X	X	X
	VP28	X	X	X	X	X	X
	VP35	X	X	X	X	X	X
2 mm	VP7	X	X	X	X	X	X
	VP12		X	X	X	X	X
	VP19		X	X	X	X	X
	VP28		X		X	X	
	VP35		X		X	X	
3 mm	VP7	X	X	X	X	X	X
	VP12	X	X	X	X	X	X
	VP19	X	X	X	X	X	X
	VP28	X	X	X	X	X	X
	VP35	X	X	X		X	X
	LD0.85	X	X	X	X		X
	LD1.5	X	X	X	X		X
	LD2.5	X	X	X	X		X
	Q3	X	X	X	X		X
	Referenční měření ¹	X	X	X	X	X	X

Tab. 4.1: Měřené kombinace zástavby

4.2 Samotný zvukovodu

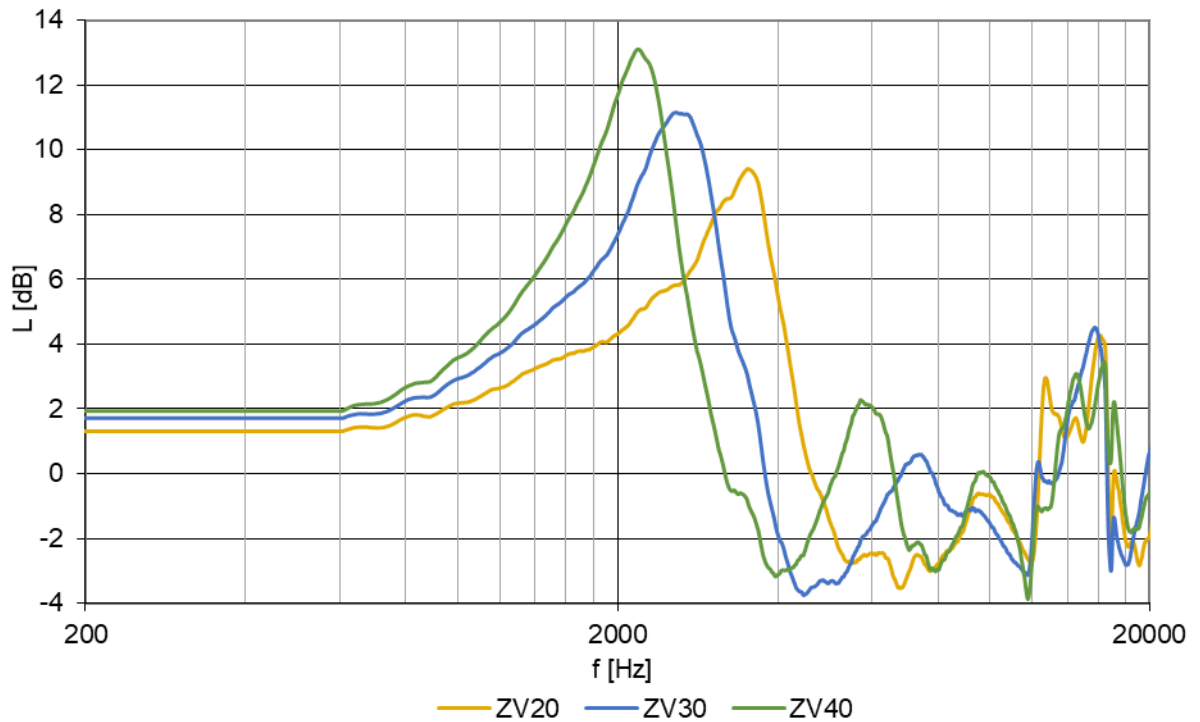
Na obrázku 4.3 a 4.4 je vidět závislost různé délky zvukovodu na frekvenční charakteristiku. S rostoucí délkou zvukovodu dochází ke zvlnění charakteristiky v oblasti dolní mezní frekvence reproduktoru. Nárůst akustického tlaku mezi 2–5 kHz a pokles mezi 6–10 kHz souvisí s objemem zvukovodu a větší hmotností vzduchu přivedeného na membránu reproduktoru – vliv rezonance. Při použití zvukovodu o délkách 9 a 12 mm je zvlnění charakteristiky relativně malé, ± 3 dB na celém rozsahu. Na zvukovodech o délce 12 mm a více, je vidět ztelnější zkreslení frekvenční charakteristiky.

¹ Měření samotného reproduktoru a reproduktoru pouze se zvukovodem



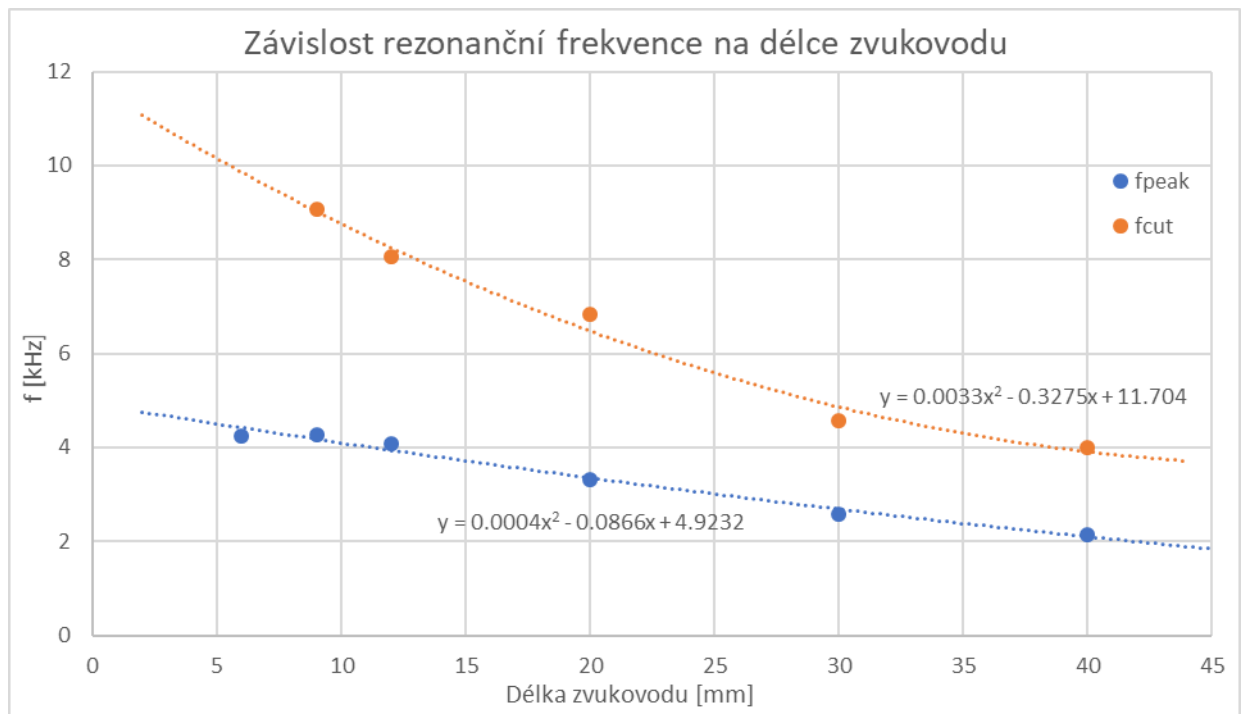
Obr. 4.3: Vliv délky zvukovodu (ZV6, ZV9, ZV12)

U zvukovodu o délce 40 mm dochází k největšímu zvlnění charakteristiky. Na vyšších frekvencích se začínají projevovat odrazy v závislosti na délkách zvukovodů. Z naměřených charakteristik je také dobře patrná závislost rezonanční frekvence na délce zvukovodu, kdy s rostoucí délkou, resp. objemem zvukovodu rezonanční frekvence klesá. Na charakteristikách je možné pozorovat opakující se trend, který je vyznačený na obr. 4.5. Ve všech naměřených charakteristikách je výrazné lokální maximum, označené jako f_{peak1} a výrazné lokální minimum označené jako f_{cut1} , která jsou závislé na délce zvukovodu. Těchto extrémů, avšak už menších, je v naměřených charakteristikách více. Na frekvencích mezi 5,8 kHz a 9,5 kHz lze pozorovat nárůst úrovně akustického tlaku. Velikost zvlnění charakteristiky je závislé na délce zvukovodu – s větší délkou zvukovodu je na těchto frekvencích i vyšší akustický tlak. Jak je patrné z charakteristik na obr. 4.5, s rostoucí délkou zvukovodu klesá rezonanční frekvence (f_{peak1}).



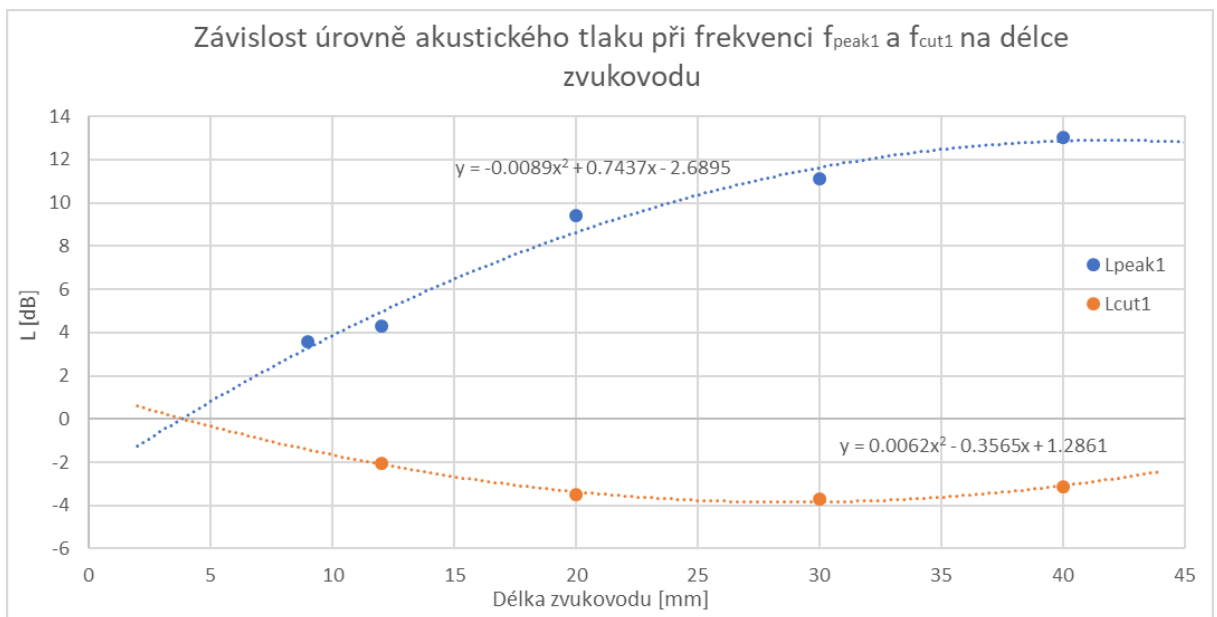
Obr. 4.4: Vliv délky zvukovodu (ZV20, ZV30, ZV40)

Na obrázku je 4.5 jsou znázorněny závislosti rezonanční frekvence a délky zvukovodu, kde je vidět trend klesající rezonanční frekvence s rostoucí délkou zvukovodu.



Obr. 4.5: Závislost rezonanční frekvence na délce zvukovodu

Na obrázku je 4.6 je znázorněny závislost akustického tlaku a délky zvukovodu, kde je vidět trend klesající rezonanční frekvence s rostoucí délkou zvukovodu.



Obr. 4.6: Závislost úrovně akustického tlaku při frekvencích f_{peak1} a f_{cut1} na délce zvukovodu

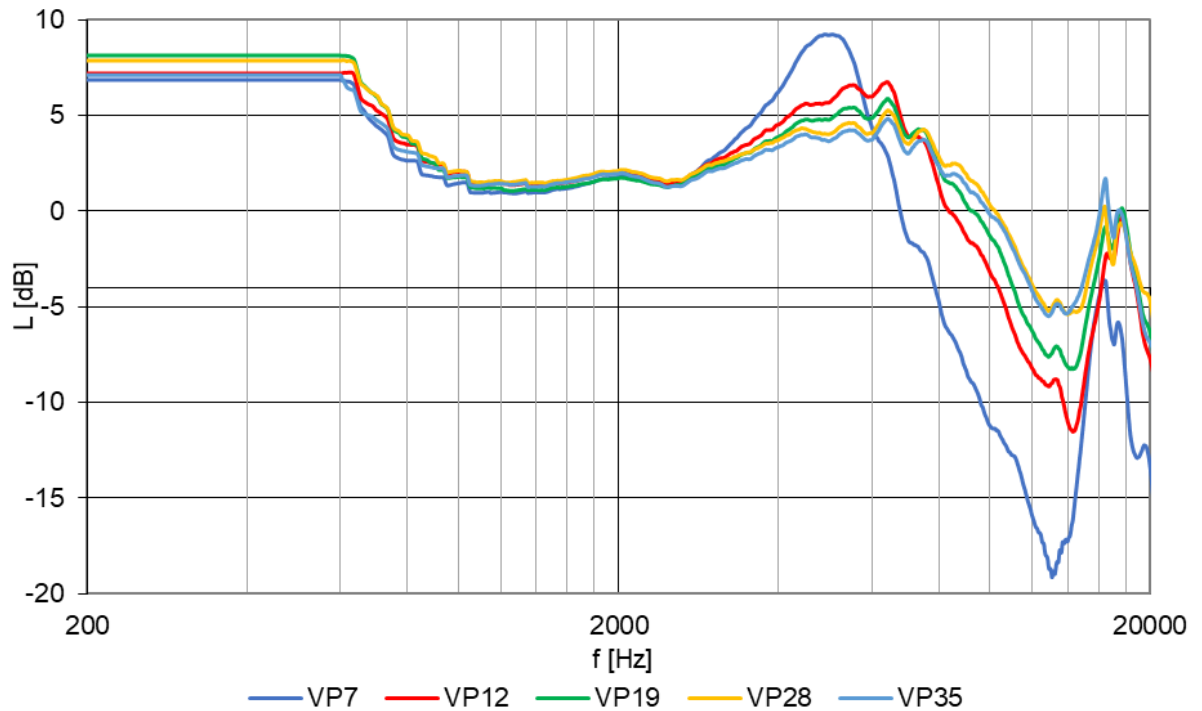
4.3 Volná plocha mřížky

Pro měření vlivu mřížky musel být použitý nejkratší zvukovod, aby bylo možné mřížky uchytit k reproduktoru. Na Obr. 4.7 Porovnání referenčního měření reproduktoru a reproduktoru se zvukovodem 6 mm je porovnání referenční charakteristiky reproduktoru bez zástavby a s nejkratším možným zvukovodem 6 mm. Od měření zástavby s mřížkou bylo odečteno měření se zvukovodem 6 mm, aby byl potlačen vliv zvukovodu.



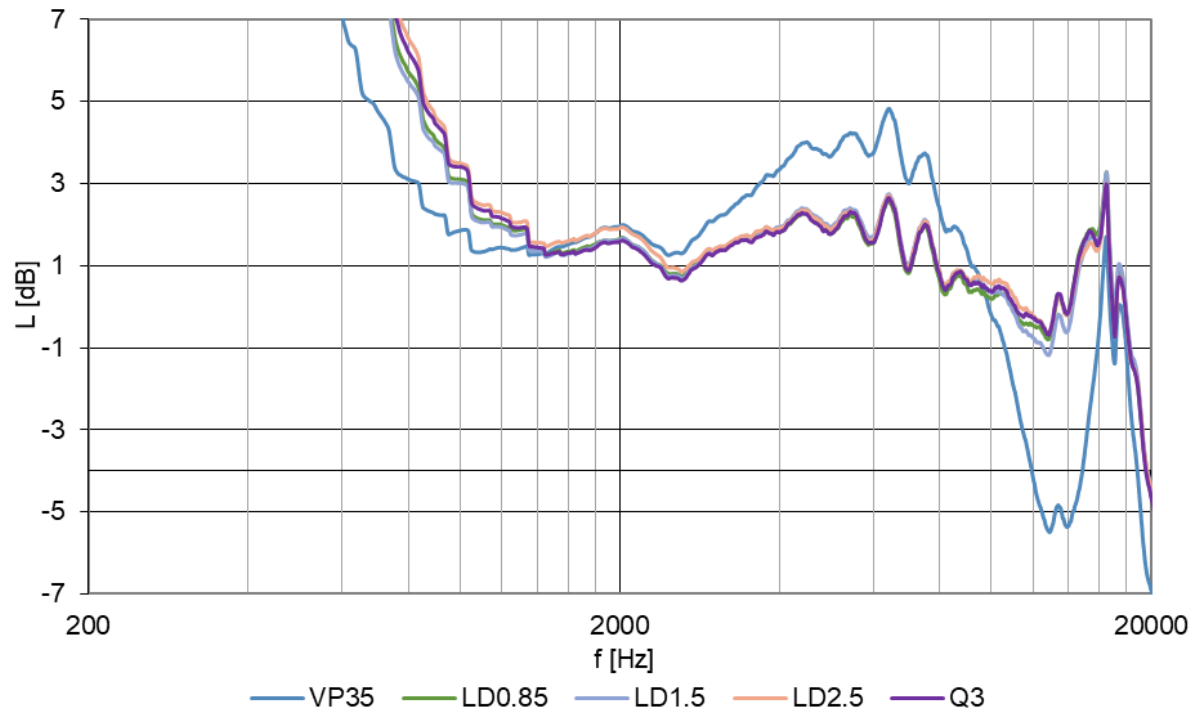
Obr. 4.7: Porovnání referenčního měření reproduktoru a reproduktoru se zvukovodem 6 mm

Všechny měřené mřížky v této kapitole měly tloušťku 1 mm, aby se potlačil vliv tloušťky mřížky. Na Obr. 4.8 jsou uvedeny naměřené charakteristiky zástavby s vrstvenými mřížkami s volnou plochou od 7 do 35% volné plochy. Rozměry mřížek jsou uvedeny v tabulce 3.1. Z charakteristik je vidět nárůst akustického tlaku mezi 3–7 kHz a strmý pokles mezi 7–10 kHz. Zde se projevuje vliv rezonance zástavby, resp. krycí mřížky, která působí jako odpor. Strmost a velikost nárůstu akustického tlaku je závislá na volné ploše mřížky. U zástavby s mřížkou s malou volnou plochou je vidět snížení rezonanční frekvence a strmější nárůst, resp. pokles akustického tlaku. Na první pohled je také patrný velký rozdíl mezi mřížkou VP7 a VP12, kdy zmenšení volné plochy o 5 % už velmi zkresluje frekvenční charakteristiku. Naopak u mřížek VP28 a VP35 je rozdíl mezi jejich charakteristikami téměř zanedbatelný.



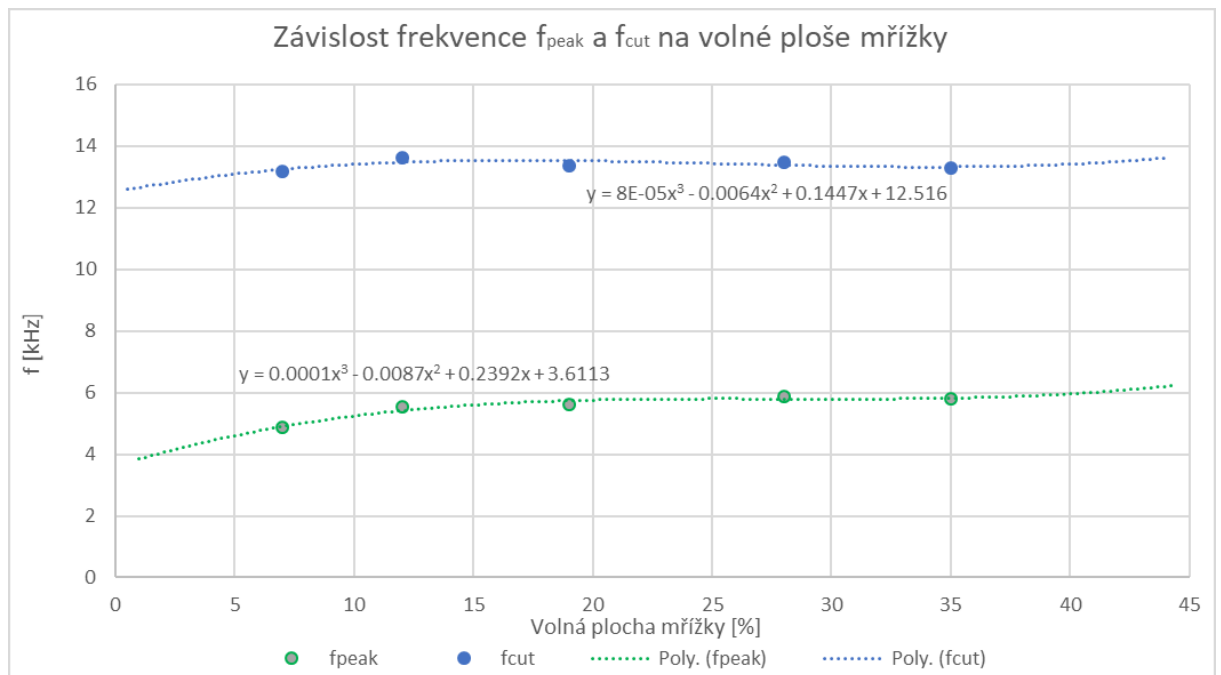
Obr. 4.8: Frekvenční charakteristika zástavby – vrtané mřížky

Na obrázku. 4.9 jsou charakteristiky zástavby s mřížkami z tahokovu a vrtaná mřížka s největší volnou plochou 35 %. Na první pohled je vidět velmi malé zvlnění charakteristiky všech tahokovů oproti vrtané mřížce. Zde je vidět velký rozdíl ve volné ploše vrtané mřížky a tahokovů, které mají oproti vrtaným mřížkám daleko větší volnou plochu. Při porovnání tahokovu typu Q3, který má největší volnou plochu přes 70 % a tahokovu LD1.5, který má přibližně o 14 % menší volnou plochu, jsou charakteristiky téměř shodné, kdy největší rozdíl je 0,6 dB a to pouze mezi 14 – 16 kHz. Na ostatních frekvencích je rozdíl vždy maximálně $\pm 0,4$ dB.

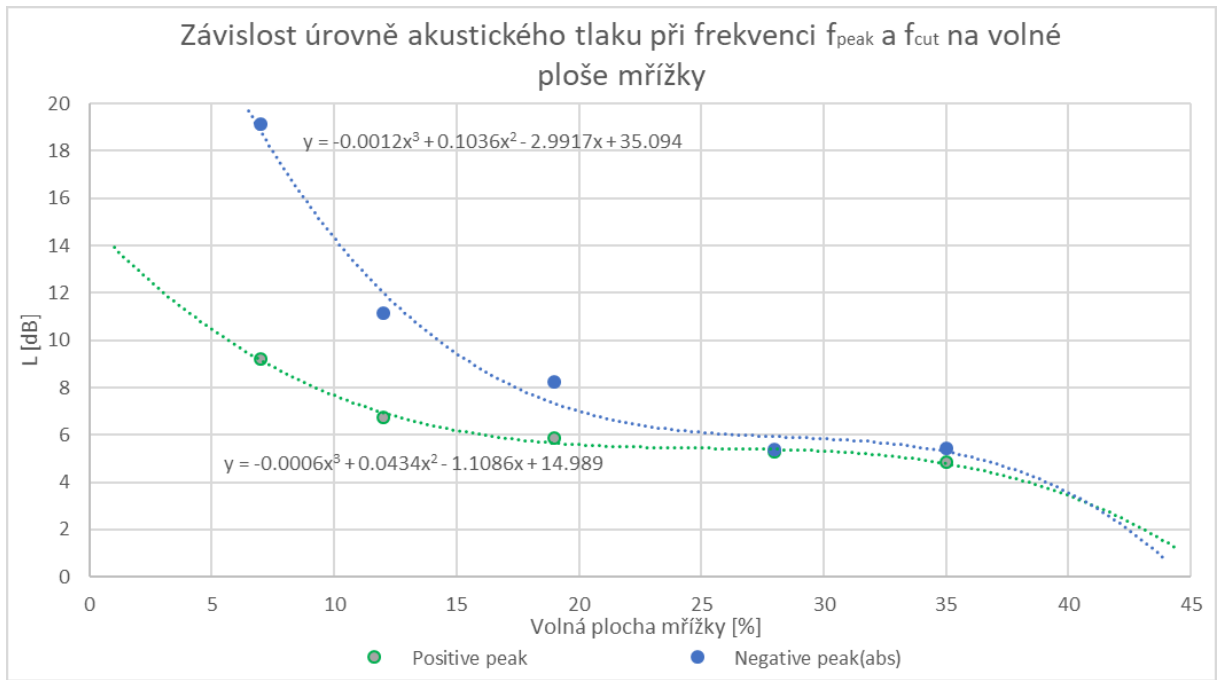


Obr. 4.9: Frekvenční charakteristika zástavby – tahokov

Na obrázku 4.10 a 4.11 jsou vyneseny závislosti lokálních extrémů na volné ploše mřížky. V těchto závislostech nejsou zahrnuty mřížky z tahokovu, ale i tak je vidět trend vlivu volné plochy mřížky, který odpovídá hodnotám změřených na mřížkách s velkou volnou plochou.



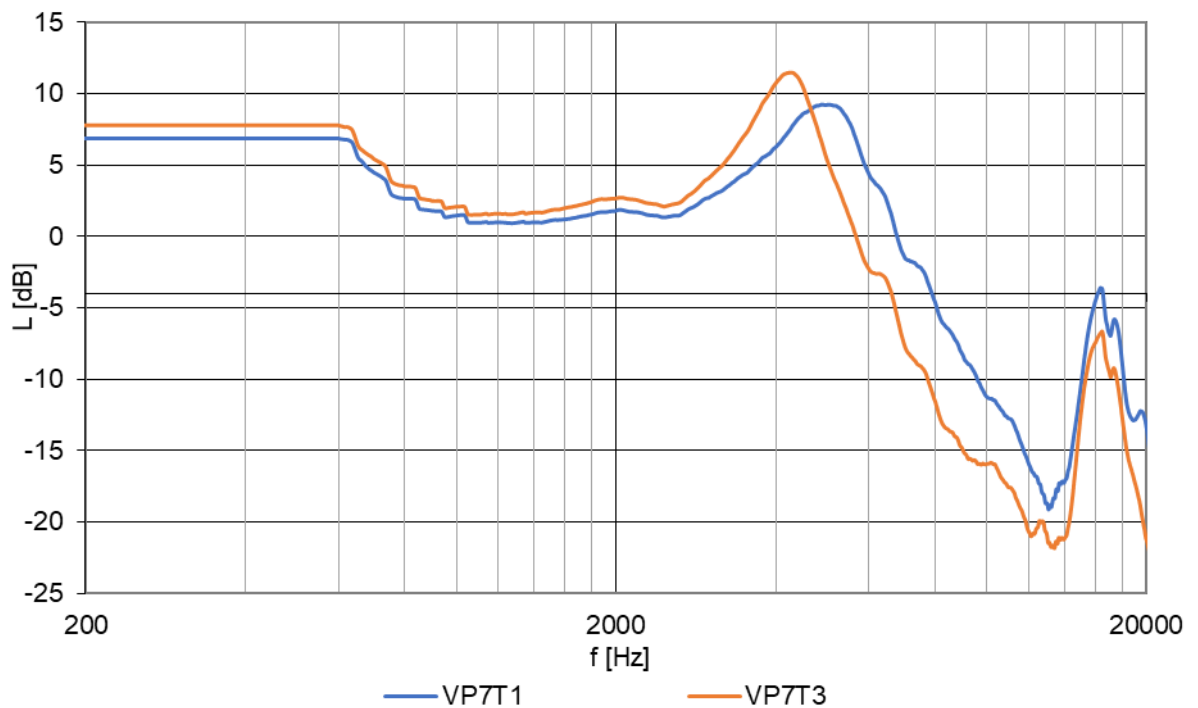
Obr. 4.10: Závislost frekvencí f_{peak} a f_{cut} na volné ploše mřížky



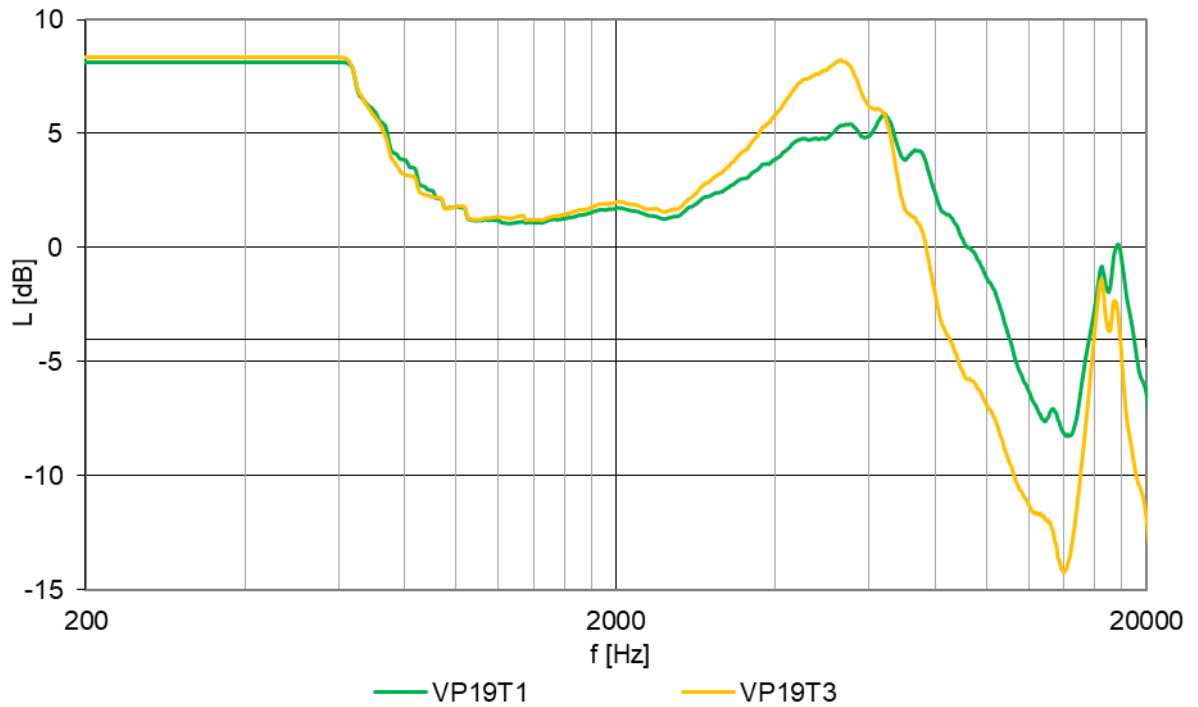
Obr. 4.11: Závislost úrovně akustického tlaku při frekvenci f_{peak} a f_{cut} na volné ploše mřížky

4.4 Tloušťka mřížky

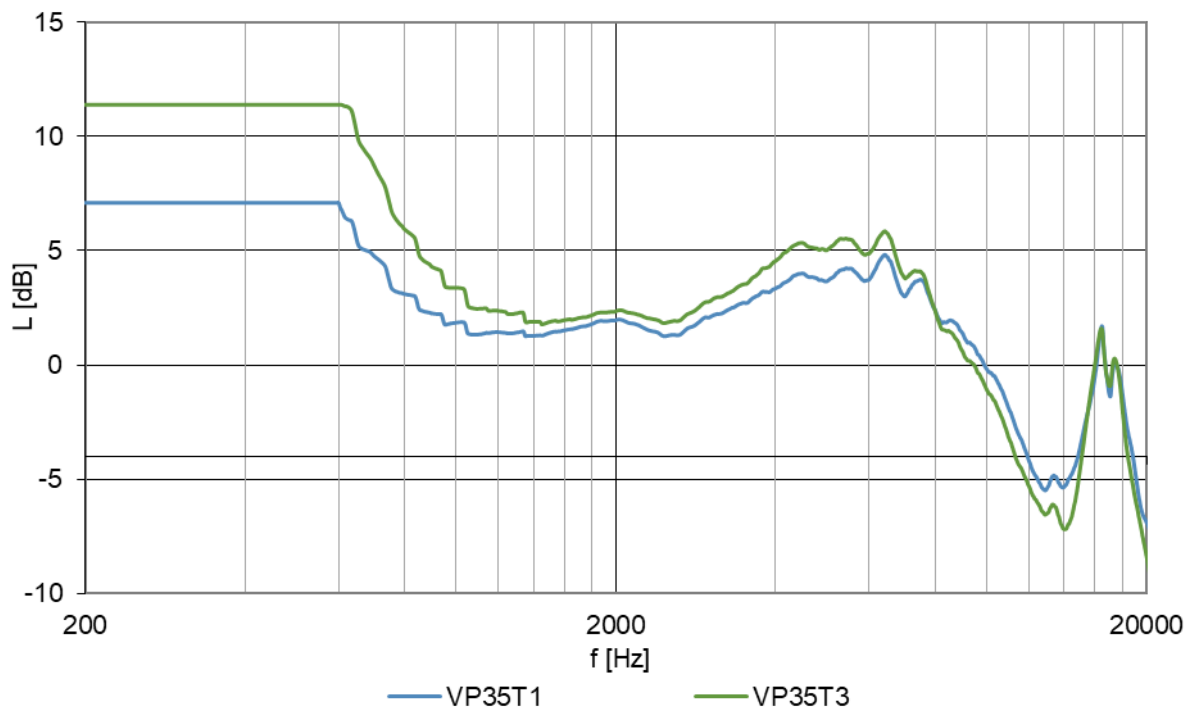
Posledním zkoumaným parametrem je vliv tloušťky mřížky. Pro měření byl opět použitý zvukovod o délce 6 mm, který byl následně odečten jako reference. Na Obr. 4.12 je frekvenční charakteristika mřížky s nejmenší volnou plochou 7 % a tloušťkou mřížky 1 a 3 mm. S rostoucí tloušťkou mřížky se zmenšuje rezonanční frekvence a zároveň se zvětšuje strmost růstu úrovně akustického tlaku při rezonanční frekvenci. Tento trend je možné pozorovat i na dalších mřížkách s větší volnou plochou na obrázku 4.13 a 4.14. S rostoucí volnou plochou mřížek je tento trend částečně potlačován a frekvenční charakteristika se vyrovnává. Na obrázku 6.14 jsou zobrazené charakteristiky mřížek s volnou plochou 35 %. U takto velké volné plochy už není posunutí rezonanční frekvence téměř znát, ale stále je vidět rozdíl akustického tlaku na těchto frekvencích, kdy mřížka s větší tloušťkou má na těchto frekvencích vyšší úroveň akustického tlaku.



Obr. 4.12: Frekvenční charakteristika zástavby s mřížkou s volnou plochou 7 % a různou tloušťkou



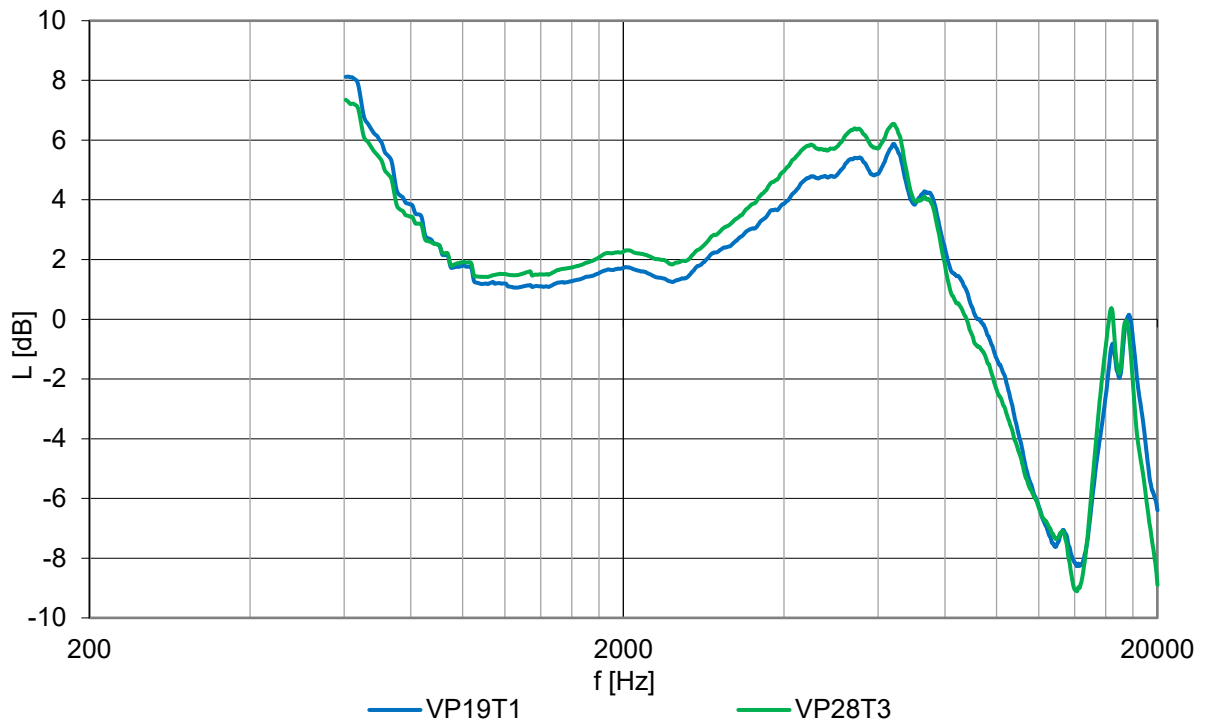
Obr. 4.13: Frekvenční charakteristika zástavby s mřížkou s volnou plochou 19 % a různou tloušťkou



Obr. 4.14: Frekvenční charakteristika zástavby s mřížkou s volnou plochou 35 % a různou tloušťkou

Pro vyjádření vlivu tloušťky mřížky na frekvenční charakteristiku zástavby nebylo změřeno dostatečné množství různých tlouštěk mřížky se stejnou volnou plochou. Z naměřených kombinací zástaveb je možné pozorovat potlačení vlivu tloušťky mřížky volnou

plochou mřížky. Na obrázku 4.15 je vidět, že frekvenční charakteristika zástavby s mřížkou s menší volnou plochou a tloušťkou je téměř totožná jako zástavba s mřížkou, která má o 9% větší volnou plochu a její tloušťka je 3x větší.

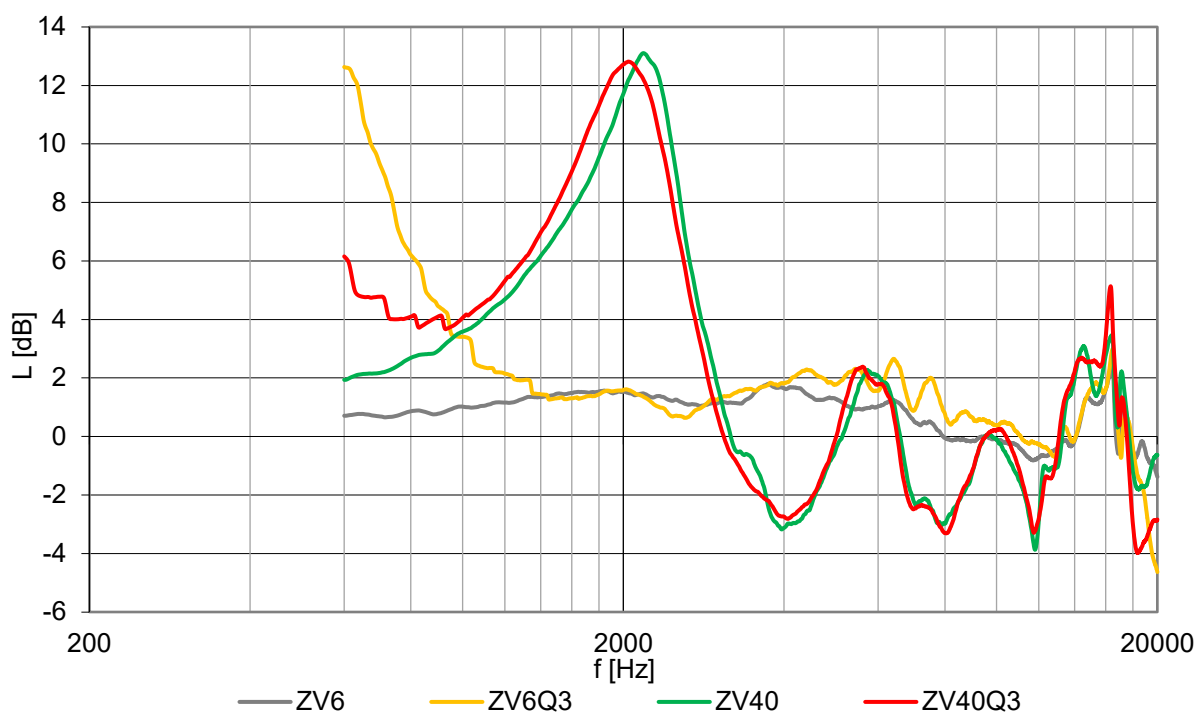


Obr. 4.15 Frekvenční charakteristiky zástavby VP19T1 a VP28T3

4.5 Kombinace zástaveb

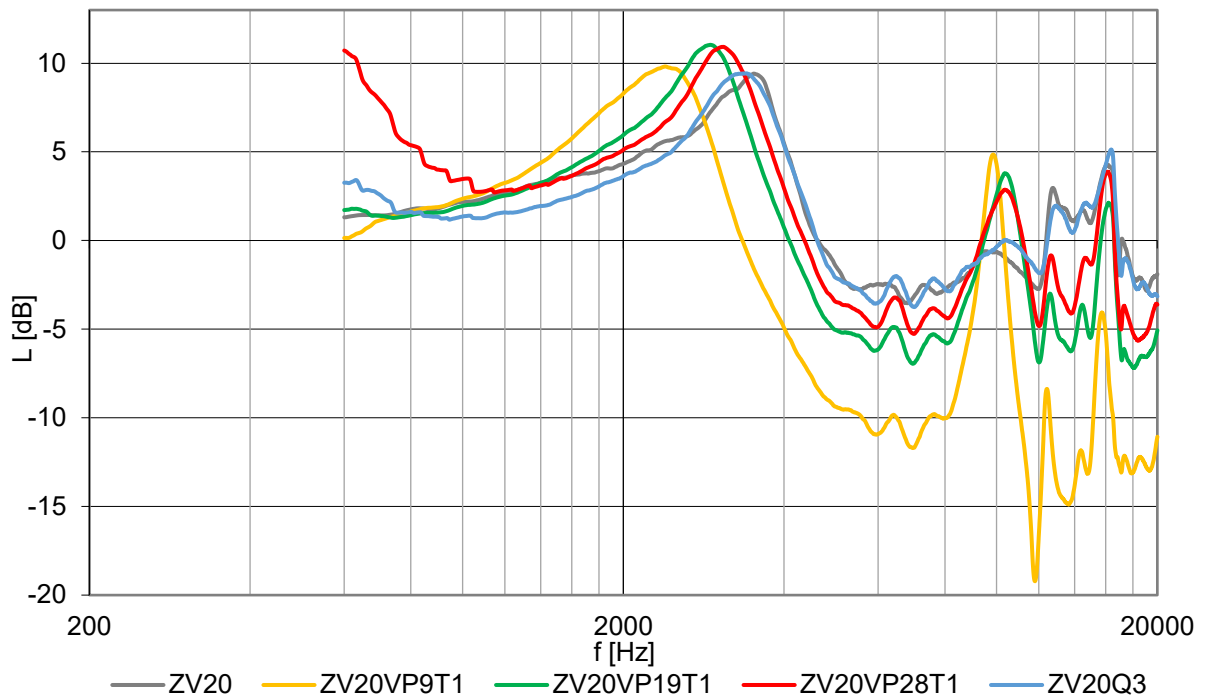
Zde byly schválně vybrány nejextrémnější kombinace zástaveb pro porovnání jednotlivých vlivů parametrů zástavby. Pro názornost je vždy uvedena i frekvenční charakteristika zástavby s nejkratším zvukovodem ZV6, kterou v tomto případě můžeme považovat za referenční.

Na obrázku 4.16 je znázorněna zástavba s největší volnou plochou mřížky Q3. V tomto případě je vidět, že největší vliv na frekvenční charakteristiku má extrémní délka zvukovodu a mřížka s takto velkým poměrem volné plochy nemá žádný zásadní vliv na frekvenční charakteristiku.



Obr. 4.16: Porovnání frekvenčních charakteristik zástaveb – Q3

Pokud použijeme středně dlouhý zvukovod ZV20 je zajímavé pozorovat vliv volné plochy mřížky na frekvenční charakteristiku. U poloviční délky zvukovodu než v předchozím případě, by se mohla významně projevit volná plocha mřížky. Na obrázku 4.17 jsou zobrazeny frekvenční charakteristiky pěti zástaveb s různou volnou plochou mřížky (9–100 %). Z naměřených charakteristik je vidět, že extrémně malá volná plocha mřížky (9 %) má za následek snížení rezonanční frekvence a následný velký pokles úrovně akustické tlaku. S rostoucí volnou plochou mřížky se její vliv snižuje, ale převládá vliv délky zvukovodu. Mezi mřížkami VP28 a VP35 je zanedbatelný rozdíl, měřitelný rozdíl je až u mřížek z tahokovu (maximálně 3 dB) – zde je ale rozdíl volné plochy mřížek téměř dvojnásobný.



Obr. 4.17: Porovnání frekvenčních charakteristik zástaveb – ZV20

4.6 Shrnutí

Z naměřených charakteristik zástaveb je vidět velký vliv zástavby na výslednou frekvenční charakteristiku celkového řešení. Nejprve byl analyzován vliv délky samotného zvukovodu. S rostoucí délkou zvukovodu, dochází ke zvlnění frekvenční charakteristiky, které lze výrazněji pozorovat od délky zvukovodu 20 mm. S rostoucí délkou zvukovodu je vidět trend snižování rezonančních frekvencí a nárůst nebo pokles (f_{peak} , f_{cut}) úrovně akustického tlaku lokálních extrémů.

Přidáme-li na konec zvukovodu mřížku, bude patrný vliv rezonance objemu zástavby, který můžeme vyjádřit jako poddajnost, a mřížky, která bude působit jako odpor a hmotnost. Popis tohoto chování je v kapitole 2.3 a 5.

K jednotlivým parametrům zástavby nelze přistupovat úplně samostatně, protože se v případě zástavby reproduktoru v automobilu vždy bude jednat o nějakou z kombinací zvukovodu a mřížky. Obecně lze na základě měření říct, že čím kratší bude zvukovod a čím větší bude volná plocha mřížky tím bude frekvenční charakteristika vyrovnanější. V některých případech kombinací zástavby dochází k tomu, že převládá vliv jednoho parametru zástavby. Například pro zástavby s dlouhým zvukovodem nebude mít na výslednou charakteristiku použitá mřížka, která má 19 a více procent volné plochy, takový vliv jako právě délka zvukovodu. Vzhledem k tomu, že byl naměřen dostatečně velký vzorek různých kombinací zástaveb, je možné z naměřených dat popsat vliv parametrů zástavby na frekvenční

charakteristiku.² Vlivy jednotlivých parametrů jsou vyneseny do grafů, ze kterých je možné sledovat trend vlivu jednotlivých parametrů zástavby na frekvenční charakteristiku.

² Všechna měření jsou přiložena samostatně k této práci

5 Teoretický popis systému zástavby reproduktoru

Zkoumání vlivu mřížky a zvukovodu je možné připodobnit k rezonančnímu systému Helmholtzova rezonátoru s tím rozdílem, že v tomto případě působí zdroj akustického tlaku vně nádoby. Hrdlo rezonátoru je zde tvořeno děrovanou deskou, která rozdělí hrdlo na n otvorů, podobně jako mřížka. Tyto otvory si lze představit jako další samostatné zvukovody. Mřížka zvýší odpor a hmotnost systému, v závislosti na typu děrování mřížky – tloušťka mřížky, velikost otvorů mřížky a poměr děrování, proto musí být vztah 2.2 rozšířen o impedanci mřížky. Celkovou impedanci Helmholtzova rezonátoru můžeme potom vyjádřit analogicky rovnicí 5.1.[14]

$$Z_{HR} = r_a + j\omega m_a + \frac{1}{j\omega c_a} + Z_{MR} = r_a + j\left(\omega m_a - \frac{1}{\omega c_a}\right) + Z_{MR} \quad (5.1)$$

Podobnou problematikou se zabýval D.-Y Maa, který odvodil rovnici pro impedanci děrované desky o n otvorech, na které je nahlíženo jako na n elementárních zvukovodů o délce l , která odpovídá tloušťce mřížky. Pro mřížku se stejně velkými kruhovými, rovnými otvory lze vyjádřit impedanci přenosu zvuku, bez koncových korekcí vztahem 5.2. [8][14]

$$Z_{Maa} = \frac{\Delta p}{v} = j\omega\rho_0 l \left[1 - \frac{2}{k_d\sqrt{-j}} \frac{J_1(k_d\sqrt{-j})}{J_0(k_d\sqrt{-j})} \right]^{-1} \quad (5.2)$$

Kde je:

Δp	rozdíl akustických tlaků na koncích zvukovodu
v	rychlost částic média
l	délka otvoru, resp. tloušťka mřížky
k_d	konstanta děrování
J_0	Besselova funkce prvního druhu a 0. řádu
J_1	Besselova funkce prvního druhu a 1. řádu
ω	úhlová rychlost
ρ_0	hustota vzduchu

Konstanta děrování k_d vyjadřuje důležitost setrvačných sil ve srovnání s viskózními silami a lze ji vyjádřit vztahem:

$$k_d = r \sqrt{\frac{\rho_0 \omega}{\eta}} \quad (5.3)$$

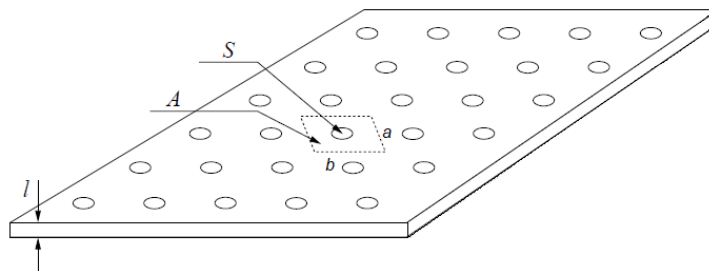
Kde:

r poloměr otvoru

η viskozita média

Tato rovnice ale stále ještě plně neodpovídá řešenému případu zástavby, resp. tato rovnice je odvozena pouze pro jeden Helmholtzův rezonátorový otvor. V tomto případě se jedná o mřížku s co největší volnou plochou, to znamená že se navzájem ovlivňuje proudění vzduchu sousedních otvorů, pro které je potřeba zavést určité korekce. Na obrázku 5.1 je znázorněna mřížka s vyznačenými rozměry rezonátoru. kde S je plocha otvoru, A je plocha jednoho elementu a l tloušťka mřížky. Volná plocha σ může být pro kruhové nepřesazené otvory vyjádřena podle rovnice 4.1 nebo obecně jako poměr volné plochy S a plochy elementu A , viz rovnice 4.4. [14]

$$\sigma = \frac{S}{A} = \frac{\pi r^2}{ab} \quad (5.4)$$



Obr. 5.1: Mřížka rezonátoru – rozměry

Ke korekci spolukmitajícího vzduchu v okolí otvorů lze využít Fokovu funkci ψ_{Fok} . Tato funkce je používána k celkové koncové korekci pro případ několika vzájemně se ovlivňujících otvorů. [15]

$$\psi_{Fok}(\sigma) = (1 + a_1\sigma + a_2\sigma^2 + \dots)^{-1} \quad (5.5)$$

První koeficienty polynomu:

$$\begin{aligned} a_1 &= -1,4092 & a_2 &= 0 \\ a_3 &= 0,33818 & a_4 &= 0 \\ a_5 &= 0,06793 & a_6 &= -0,02287 \end{aligned}$$

$$a_7 = 0,03015 \quad a_8 = -0,01641$$

$$\psi(\sigma) = (1 - 1,4092\sigma + 0,33818\sigma^{3/2} + 0,06793\sigma^{5/2} - 0,02287\sigma^3 + 0,03015\sigma^{7/2} - 0,01641\sigma^4)^{-1}$$

Celkové odvození impedance děrovaného panelu s možnými koncovými korekcemi, vycházející z modelu Helmholtzova rezonátoru, jsou detailně popsány v literatuře [13][14][15][16].

Závěr

V této práci jsem se zabýval zkoumáním vlivu zástavby na akustické parametry reproduktoru. Na začátku bylo nutné určit prvky zástavby reproduktoru, které budou mít vliv na výsledné akustické parametry. Pro zkoumání vlivu jsem zvolil 3 základní parametry zástavby: délku zvukovodu, volnou plochu mřížky a tloušťku mřížky. Na základě těchto parametrů jsem vyrobil přípravky pro simulace různých typů zástaveb. Pro zhodnocení vlivu zástavby byla měřena frekvenční charakteristika různých kombinací zástaveb. Vyhodnocení vlivu zástavby bylo prováděno na odečtených charakteristikách, tak aby byl vyhodnocován pouze vliv zástavby bez reproduktoru.

Naměřené charakteristiky potom byly analyzovány a na základě jejich lokálních extrémů byly vyjádřeny závislosti jednotlivých parametrů na frekvenční charakteristiku zástavby. Tyto závislosti mají určitý trend a na jejich základě je možné určit vliv na frekvenční charakteristiku reproduktoru. Z naměřených charakteristik také bylo vidět, že od určitých velikostí parametrů, může převládat právě jeden vliv parametru tak, že řešit ostatní parametry už nemusí být tak výhodné. Toho by mohlo být využito při návrhu zástavby.

Tato práce by mohla posloužit jako základ pro vytvoření modelu zástavby, protože byla měřena velká škála zástaveb, a to od běžných kombinací až po extrémní případy zástavby, jako velmi malé volné plochy mřížky a velké délky zvukovodů a z vyhodnocovaných charakteristik jsou vidět určité trendy, na jejichž základě by se model mohl sestavit. V práci nebyly uvedeny všechny změřené frekvenční charakteristiky, protože byl vytvořen jednoduchý zobrazovací nástroj pro porovnání všech naměřených charakteristik.

V závěru jsem se ještě pokusil o fyzikální popis celku zástavby vycházející z Maa-ova modelu Helmholtzova rezonátoru, ale tato část už nebyla dokončena.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] SVOBODA, Ladislav a Miloslav ŠTEFAN. Reproductory a reproduktorové soustavy. 3. přeprac. vyd., dot. Praha: SNTL, 1983.
- [2] MERHAUT, Josef. Teoretické základy elektroakustiky: učebnice pro elektrotechnické fakulty. 3., přeprac. a rozš. vyd. Praha: Academia, 1976.
- [3] KOLMER, Felix a Jaroslav KYNCL. Prostorová akustika: vysokoškolská příručka pro vysoké školy technického směru. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1980.
- [4] SMETANA, Ctirad. Praktická elektroakustika. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1981.
- [5] ŠKVOR, Zdeněk. Elektroakustika a akustika: vysokoškolská učebnice. V Praze: České vysoké učení technické, 2012. ISBN 978-80-01-05034-7.
- [6] TOMAN, Kamil. Reproductory a reprosoustavy I. [Česko: s.n.], c2003. ISBN 978-80-254-9510-0.
- [7] OLDFIELD, R.. Improved membrane absorbers - thesis. Salford (VB). University of Salford. 2006. 194 s.
- [8] MAA, D., Potential of microperforated panel absorber J. Acoust. Soc. Am. 1998, 104 (5), 2861–2866.
- [9] ČESKÝ, Milan a Josef BEDNAŘÍK, ed. Radioelektronická příručka I. Praha: Práce, 1972. Technické příručky Práce.
- [10] ČESKÝ, Milan a Josef BEDNAŘÍK, ed. Radioelektronická příručka II. Praha: Práce, 1972. Technické příručky Práce.
- [11] ČSN EN 60268-5. Elektroakustická zařízení - Část 5: Reproductory Praha: Český normalizační institut, 2004.
- [12] SALAVA, Tomáš. Elektroakustická a elektromechanická měření. Praha: SNTL, 1979. Řada elektrotechnické literatury.
- [13] Maa, D.Y. Practical single MPP absorber. Int. J. Acoust. Vib. 2007, 12, 3–6.
- [14] RANDEBERG, Rolf Tore. Perforated Panel Absorbers with Viscous Energy Dissipation Enhanced by Orifice Design. Trondheim, 2000. Doctoral thesis. Norwegian University of Science and Technology.
- [15] MELLING T H. The acoustic impedance of perforates at medium and high sound pressure levels. *Journal of Sound and Vibration*, 29(1), 1–65 (1973)
- [16] Falaize, Antoine & Hélie, Thomas. (2020). Passive modelling of the electrodynamic loudspeaker: from the Thiele–Small model to nonlinear port-Hamiltonian systems. *Acta Acustica*. 4. 1. 10.1051/aacus/2019001.
- [17] SMETANA, Ctirad. Měření hluku a chvění. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1974.
- [18] SCHIMMEL, J. Elektroakustika. Brno: VUT Brno, 2012, 167 s. ISBN: 978-80-214-4450-8.
- [19] PERFO LINEA a.s. *Perfolinea.cz* [online]. Dostupné z: <https://www.perfolinea.cz/derovane-plechy-kruhove-otvory>
- [20] NOSKIEVIČ, P. Modelování a identifikace systémů, MONTNEX a.s., Ostrava, 1999, ISBN 80-7225-030-2
- [21] Eelektroakustika[online]. Dostupné z: <https://www.elektroakustika.cz/reprosloup.html>

Příloha I

Přiložené soubory:

- Měření_data.xlsx – všechny měřené zástavby a referenční měření
- Šum_komora.xlsx – šumové pozadí komory
- f_char_odečtené_vyhlazené.xlsx – zobrazení a porovnání všech naměřených charakteristik
- f_char_vyhlazené.xlsx – zobrazení a porovnání všech naměřených charakteristik

Příloha II

Elektrická soustava			Mechanická soustava			Akustická soustava		
El. napětí	u	[V]	síla	F	[N]	Akus. tlak	p	[Nm ⁻²]
El. proud	i	[A]	rychlost	v	[ms]	Akus. rychlost	v	[m ³ s ⁻¹]
El. náboj	q	[C]	výchylka	ξ	[m]	Objemová rychlost	W	[m ³]
El. impedance	Z	[Ω]	Mech. impedance	Z _m	[ΩNSm ⁻¹]	Akus. impedance	Z _a	[ΩNSm ⁻¹]
rezistor	r	[Ω]	Mech. odpor	r _m	[Ω]	Akus. odpor	r _a	[Ω]
indukčnost	L	[H]	hmotnost	m	[kg]	Akus. hmotnost	m _a	[kg.m ⁻⁴]
kapacita	C	[F]	poddajnost	c _m	[mN ⁻¹]	Akus. poddajnost	c _a	[m ⁴ Sk ⁻¹]

Tab. 0.1: Elektromechanická a elektroakustická analogie [5]