



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

NÁVRH A KONSTRUKCE REPRODUKTOROVÉ OZVUČNICE TRANSMISSION LINE

DESIGN AND CONSTRUCTION OF TRANSMISSION LINE LOUDSPEAKER CABINET

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jiří Dobiášovský

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Miroslav Balík, Ph.D.

BRNO 2020

Bakalářská práce

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

Student: Jiří Dobiášovský

ID: 195781

Ročník: 3

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Návrh a Konstrukce reproduktorové ozvučnice transmission line

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Nastudujte teorii a návrh reproduktorové ozvučnice typu transmission line. Následně pečlivě popište jednotlivé parametry reproduktoru, které figurují v návrhu, a definujte parametry reproduktoru vhodného pro tento typ ozvučnice. Nastudujte vhodné konstrukční prvky a postupy pro tuto ozvučnici, popište možné nedostatky ozvučnice a jejich vliv na výslednou kmitočtovou a transienční charakteristiku ozvučnice. Vzhledem ke zjištěným skutečnostem navrhnete variabilní řešení ozvučnice, na které bude snadno prezentovatelný její správný či nevhodný návrh a konstrukce. Popište postupy měření ozvučnic z více reproduktory či rezonátory. Dalším výstupem budou dvě laboratorní úlohy využívající navrženou a vyrobenou variabilní ozvučnici.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] AUGSPURGER, G. L. Loudspeakers in Damped Pipes -Part One: Modeling and Testing; and Part Two: Behavior. 107th JAES Convention, 24–27 Sep-tember, 1999, Preprint No. 5011.

[2] ESCOLANO, J. PUEO, B. LOPEZ, J. J. A comprehensive discrete-time computer modeling of acoustic Transmission Line loudspeakers. Applied Acoustics - APPL ACOUST. 72. 742-753.
10.1016/j.apacoust.2011.04.003.

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 18.8.2020

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

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

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Obsahem práce je zpracování problematiky návrhu a konstrukce ozvučnic typu transmission line. V teoretické části je nejprve zpracováno téma reproduktoru, jeho konstrukčních prvků a jejich vlivu na vlastnosti reproduktoru. Dále jsou zpracovány jednotlivé parametry reproduktoru, matematické vztahy pro jejich určení a je definován reproduktor vhodný pro ozvučnici typu transmission line. Bakalářská práce dále rozebírá princip funkce ozvučnice typu transmission line, její výhody a nevýhody oproti ostatním druhům ozvučnic. Zároveň jsou zpracované jednotlivé konstrukční prvky a jejich vliv na výsledné charakteristiky ozvučnice. V praktické části je s ohledem na skutečnosti uvedené v teoretické části práce vybrán vhodný reproduktor a popsán následný návrh a konstrukce variabilní ozvučnice typu transmission line, která následně může sloužit jako učební pomůcka. Součástí práce je také popsání postupů měření ozvučnic s více reproduktory či rezonátory.

Klíčová slova

reproduktor, ozvučnice, transmission line, návrh, konstrukce

Abstract

Thesis is dealing with the topic of design and construction of the transmission line loudspeaker enclosures. Theoretical part is focused on speaker choice, its design elements and their influence on parameters of the speaker. Individual parameters of the speaker, mathematical equations for their determination and choice of suitable speaker for transmission line loudspeaker enclosure is furthermore discussed and defined. Principle of transmission line enclosures is discussed together with its advantages and disadvantages compared to other types of enclosures. The individual design elements and their influence on the resulting characteristics of the enclosure are described. In the practical part, with regard to the facts stated in the theoretical part of the work, a suitable speaker is selected and the subsequent design and construction of a variable transmission line speaker is described. This might serve as a teaching aid in future. Part of the work is also a description of procedures for measuring loudspeakers with multiple speakers or resonators.

Keywords

speaker, enclosure, transmission line, design, construction

Bibliografická citace:

DOBIÁŠOVSKÝ, Jiří. *Návrh a Konstrukce reproduktorové ozvučnice transmission line* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-08-11]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/126156>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Miroslav Balík.

Prohlášení

*„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma *Návrh a Konstrukce reproduktorové ozvučnice transmission line* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.*

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

V Brně dne: **18. srpna 2020**

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Miroslavu Balíkovi, Ph.D. za trpělivost, účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: **18. srpna 2020**

.....
podpis autora

Obsah

1.	Úvod.....	13
2.	Reproduktor.....	14
2.1	TS Parametry reproduktoru.....	15
2.1.1	Rezonanční kmitočet.....	16
2.1.2	Mechanický činitel jakosti.....	17
2.1.3	Elektrický činitel jakosti.....	17
2.1.4	Celkový činitel jakosti.....	18
2.1.5	Ekvivalentní objem.....	18
2.2	Reproduktor vhodný pro ozvučnici typu transmission line.....	19
3.	Transmission line ozvučnice.....	20
3.1	Vývoj transmission line ozvučnic.....	21
3.1.1	Akustický labyrint.....	22
3.1.2	Vyplněná transmission line ozvučnice.....	22
3.1.3	Augspurgerův náhradní elektrický obvod.....	23
3.2	Kmitočtová a impedanční charakteristika.....	24
3.3	Náhradní elektrické schéma.....	26
3.4	Základní parametry.....	26
3.4.1	Délka zvukovodu.....	26
3.4.2	Plocha průřezu zvukovodu.....	27
3.4.3	Rezonanční kmitočet transmission line ozvučnice.....	28
4.	Konstrukční řešení transmission line ozvučnic.....	29
4.1	Vnitřní uspořádání.....	29
4.1.1	Transmission line s konstantní plochou průřezu.....	29
4.1.2	Transmission line se zužující se plochou průřezu.....	30
4.1.3	Transmission line se zvětšující se plochou průřezu.....	31
4.1.4	Offset reproduktor.....	32
4.2	Materiály a spojování stěn ozvučnice.....	32
4.3	Tlumení stojatého vlnění.....	33
5.	Měření kmitočtových charakteristik ozvučnic.....	35
5.1	Kvazi-anechoický způsob.....	35
5.2	V bezodrazové komoře.....	36

5.3	Ve volném poli	36
5.4	V blízkém poli	36
6.	Návrh ozvučnice	38
6.1	Požadované parametry	38
6.2	Výběr reproduktoru	38
6.3	Postup návrhu v HornResp	39
6.3.1	Délka zvukovodu a plocha průřezu zvukovodu	41
6.3.2	Offset reproduktoru	42
6.4	Návrh mechanického uspořádání ozvučnice	44
6.4.1	Návrh středobasových reproduktorových modulů	45
6.4.2	Návrh výškových reproduktorových modulů	48
7.	Realizace ozvučnice	49
8.	Závěr	51

Seznam symbolů, veličin a zkratek

Zkratky:

TS	Thiell/Small
MDF	Medium density fiber board / středně hustá dřevovláknitá deska
CNC	Computer numerical control / číslicové řízení pomocí počítače
VUT	Vysoké učení technické

Symbols:

R_v	stejnoseměrný odpor vinutí kmitací cívky
B	indukce magnetického pole v mezeře magnetického obvodu
l	délka vodiče v magnetickém poli
S_d	efektivní plocha membrány
C_{ms}	poddajnost závěsu membrány
M_{ms}	hmotnost membrány a spolukmitajícího sloupce vzduchu
R_{ms}	mechanický odpor kmitacího systému
Z_{max}	maximální impedance za rezonance
f_r	rezonanční kmitočet
Q_{ms}	mechanický činitel jakosti
Q_{es}	elektrický činitel jakosti
Q_{ts}	celkový činitel jakosti
V_{as}	ekvivalentní objem
p	akustický tlak
v	akustická rychlost
L	hladina akustického tlaku
ρ	hustota vzduchu
c	rychlost zvuku ve vzduchu
R_g	výstupní odpor zesilovače
L_{vc}	indukčnost kmitací cívky
L_{ced}	indukčnost vzhledem k poddajnosti závěsu reproduktor
C_{med}	kapacita vzhledem k hmotnosti měniče
R_{ed}	stejnoseměrný odpor vzhledem k tlumení zavěšení reproduktoru
Z_{el}	elektrická ekvivalentní impedanci transission line systému
L_z	délka zvukovodu
L_{eff}	efektivní délka zvukovodu
k	korekce
R	poloměr kruhu
f_t	dolní rezonanční kmitočet transmission line systému
m_{air}	hmotnost vzduchu uvnitř ozvučnice
f_{min}	horní mezní kmitočet Fourierovy transformace
t	čas do příchodu odražené vlny
f_{max}	horní mezní kmitočet pro měření v blízkém poli
D	průměr kruhu
p	akustický tlak

Seznam obrázků

Obr. 2.1 Řez elektrodynamickým přímovyzářujícím reproduktorem [1]	14
Obr. 2.2 Výpočet TS parametrů z modulové impedanční charakteristiky. [1]	16
Obr. 3.1 Transmission line ozvučnice [1]	20
Obr. 3.2 Akustický tlak a rychlost stojatého vlnění o délce $1/4$, $3/4$ a $5/4$ vlnové délky v polouzavřené trubici [15]	21
Obr. 3.3 Olneyho akustický labyrint [16]	22
Obr. 3.4 Augspurgerův náhradní elektrický obvod	23
Obr. 3.5 Kmitočtová charakteristika transmission line ozvučnice s konstantní plochou průřezu [20]	25
Obr. 3.6 Kmitočtová charakteristika otevřeného konce (modrá křivka) a reproduktoru (červená křivka) ozvučnice typu transmission line s konstantní plochou průřezu [20]	25
Obr. 3.7 Impedanční charakteristika transmission line ozvučnice [20]	25
Obr. 3.8 Náhradní elektrické schéma ozvučnice typu transmission line s konstantní plochou průřezu zvukovodu [15]	26
Obr. 4.1 Ozvučnice typu transmission line s konstantní plochou průřezu zvukovodu	29
Obr. 4.2 Ozvučnice typu transmission line se zužující se plochou průřezu zvukovodu	30
Obr. 4.3 Kmitočtová charakteristika otevřeného konce (modrá křivka) a reproduktoru (červená křivka) ozvučnice typu transmission line se zužující se plochou průřezu zvukovodu	30
Obr. 4.4 Ozvučnice typu transmission line se zvětšující se plochou průřezu zvukovodu	31
Obr. 4.5 Kmitočtová charakteristika otevřeného konce (modrá křivka) a reproduktoru (červená křivka) ozvučnice typu transmission line se zvětšující se plochou průřezu	31
Obr. 4.6 Ozvučnice typu transmission line s offset reproduktorem	32

Obr. 4.7 Kmitočtová charakteristika tlumené ozvučnice typu transmission line s konstantní plochou průřezu (hustota výplně polyesterovým vláknem 8 kg/m^3) [20]	33
Obr. 4.8 Impedanční charakteristika tlumené ozvučnice typu transmission line s konstantní plochou průřezu (hustota výplně polyesterovým vláknem 8 kg/m^3) [20]	33
Obr. 4.9 Princip tlumení pomocí sedvičové konstrukce	34
Obr. 5.1 Geometrie prvotního odrazu od podlahy	35
Obr. 6.1 Rozměry reproduktoru Monaco SPH-170	39
Obr. 6.2 Hlavní okno programu Hornresp	40
Obr. 6.3 Porovnání ozvučnice s konstantní (šedá křivka) a zužující se (červená křivka) plochou průřezu zvukovodu	41
Obr. 6.4 Porovnání minimálního (šedá křivka) a vhodného (červená křivka) offsetu reproduktoru	42
Obr. 6.5 Porovnání minimálního (šedá křivka) a příliš velkého (červená křivka) offsetu reproduktoru	43
Obr. 6.6 Vyrovnání kmitočtové charakteristiky za použití dvou reproduktorů s různými hodnotami offsetu a vhodného množství tlumicího materiálu (8 kg/m^3)	43
Obr. 6.7 Rozpad jednotlivých komponentů variabilní ozvučnice	44
Obr. 6.8 Reproduktorové moduly o délce 4 a 3 segmenty	45
Obr. 6.9 Symetrický modul pro výškový reproduktor	48
Obr. 6.10 Asymetrický modul pro výškový reproduktor	48
Obr. 7.1 Výsledná hlavní konstrukce s patou	49
Obr. 7.2 Výsledný reproduktorový modul	49

Seznam tabulek

Tabulka 6.1 Základní parametry reproduktoru Monacor SPH-170	38
Tabulka 6.2 Hodnoty vzdálenosti středu reproduktorů od okraje modulu	45
Tabulka 6.3 Offset jednoho reproduktoru (modul délky 240 mm vlevo, 320 mm vpravo)	46
Tabulka 6.4 Všechny hodnoty offsetu reproduktoru při střídání reproduktorových modulů	46
Tabulka 6.5 Vzájemná vzdálenost středů dvou reproduktorů	47

1. ÚVOD

Reproduktorová ozvučnice je prostředek, jehož hlavním účelem je zamezení akustického zkratu. Akustickým zkratem rozumíme vzájemnou interferenci přední a zadní akustické vlny vyzářené reproduktorem, které jsou v opačné fázi. Pokud nedojde k jejich oddělení reproduktorovou ozvučnicí, vlny vzájemně vyruší zejména na nízkých kmitočtech. Parametry a vlastnosti měniče určeného k reprodukci nízkých kmitočtů jsou tudíž jedním ze základních kritérií pro návrh a konstrukci reproduktorové ozvučnice.

Transmission line ozvučnice je druh ozvučnice směřující akustické vlny vyzářené zadní stranou reproduktoru do dlouhého tlumeného zvukovodu s otevřeným koncem. Rezonanční kmitočet systému je v tomto typu ozvučnice výrazně snížen oproti běžným typům ozvučnic díky hmotnosti vzduchu ve zvukovodu zatěžující hlubokotónový reproduktor. Transmission line ozvučnice v tomto důsledku tedy umožňuje reprodukci podstatně nižších kmitočtů než například běžnější ozvučnice uzavřená nebo ozvučnice typu bassreflex. Hmotnost vzduchu zároveň udržuje reproduktor dobře tlumený, což ve výsledku způsobí nižší úroveň zkreslení a dobrou transienční charakteristiku v porovnání s jinými druhy ozvučnic. Hlavní nevýhodou transmission line ozvučnic je mimo jejich velikosti komplexnost vlastního návrhu komplikovaná nutností přizpůsobení parametrům konkrétního reproduktoru. Bakalářská práce se zabývá tématem návrhu a konstrukce transmission line ozvučnice se zaměřením na vhodnost konstrukčních prvků a postupů pro měření ozvučnic s více reproduktory či rezonátory.

V rámci bakalářské práce byl zpracován návrh variabilní reproduktorové ozvučnice typu transmission line s ohledem na tyto konkrétní cíle:

1. Definovat parametry reproduktoru vhodného pro transmission line ozvučnici.
2. Definovat vhodné konstrukční prvky a postupy pro transmission line ozvučnici.
3. Popsat možné nedostatky transmission line ozvučnice a jejich vliv na výslednou kmitočtovou a transienční charakteristiku ozvučnice.
4. Navrhnout variabilní řešení konstrukce transmission line ozvučnice vhodné pro prezentaci správnosti/nevhodnosti možných konstrukčních řešení.
5. Popsat postupy měření ozvučnic s více reproduktory či rezonátory a navrhnout 2 laboratorní úlohy využívající konstruovanou variabilní ozvučnici.

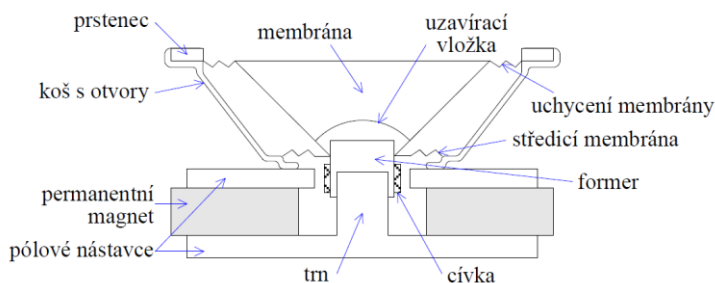
Ozvučnice konstruovaná v rámci této bakalářské práce je prototypem. Jedná se o variabilní řešení ozvučnice typu transmission line, které bude sloužit jako učební pomůcka a na kterém se bude dávat pozorovat správný nebo nevhodný návrh určitých konstrukčních prvků. Hlavním požadavkem pro jakoukoli reproduktorovou ozvučnici je především vyrovnaná kmitočtová charakteristika, které lze u ozvučnice typu transmission line dosáhnout několika způsoby. Vzhledem k jednotlivým konstrukčním prvkům a jejich vlivu na výslednou kmitočtovou charakteristiku bude konkrétně možné pozorovat vliv posunutí samostatného reproduktoru oproti uzavřenému konci ozvučnice, vzdálenosti středů dvojice reproduktorů i posunutí celé dvojice v délce zvukovodu, vliv vnitřního tlumení a charakteristické vlastnosti reproduktorového uspořádání D'Appolito.

2. REPRODUKTOR

Volba vhodného reproduktoru je prvním a důležitým krokem při návrhu reproduktorové ozvučnice. S ohledem na splnění jednoho z cílů této práce, a to definování reproduktoru vhodného pro ozvučnici typu transmission line, je v této kapitole rozebrán základní princip funkce reproduktoru, jeho jednotlivé konstrukční prvky a jejich vliv na parametry reproduktoru. Dále jsou popsány jednotlivé parametry, které určují jeho chování na nízkých kmitočtech. V závěru kapitoly je definován reproduktor vhodný pro ozvučnici typu transmission line, jejíž návrhem a konstrukcí se tato práce zabývá. Poznatky z této kapitoly jsou uplatněny při výběru reproduktoru pro variabilní ozvučnici typu transmission line v kapitole 6.2.

Reproduktory slouží ke vzniku akustických vln, které reprezentují průběh vstupního elektrického signálu. Jsou to tedy zařízení přeměňující elektrickou energii na energii mechanickou ve formě zvuku, tzv. elektroakustické měniče. Pro jejich správné fungování je nutné umístění v ozvučnici, nebo zatížení zvukovodem. Měníče mohou být rozděleny podle kmitočtového rozsahu určené na měniče širokopásmové, hlubokotónové, středotónové, vysokotónové a jejich kombinace. Podle principu činnosti a konstrukčního uspořádání se dále rozlišují měniče elektrodynamické, elektromagnetické, elektrostatické, piezoelektrické a reproduktory s neresipročními převodníky, jako jsou například pneumatické a tepelné. V rámci bakalářské práce je pracováno s elektrodynamickým přímovyzářujícím reproduktorem, který je v dnešní době nejrozšířenějším typem. Tento typ reproduktoru vyzařuje akustickou energii kmitací membránou, která je v přímém kontaktu s okolním prostředím. [1] [2]

Základními prvky elektrodynamického reproduktoru jsou membrána pevně spojená s kmitací cívkou a permanentní magnet. Funkce elektrodynamického reproduktoru spočívá v pohybu cívky v homogenním magnetickém poli, kterou protéká střídavý elektrický proud. Magnetické pole působí na vinutí kmitací cívky, které se nachází ve vzduchové mezeře v kolmém směru. Změnou proudu protékajícího vinutím cívky se poté mění velikost a směr síly působící na cívku. Tato síla je následně přenesena na membránu, která svým pohybem rozkmitává vzduch. Kmitáním vzduchu dochází ke změně akustického tlaku, kterou vnímáme jako zvuk. [2]



Obr. 2.1 Řez elektrodynamickým přímovyzářujícím reproduktorem [1]

Membrána reproduktoru by měla za ideálních podmínek provádět pístový pohyb. K zamezení pohybu mimo požadovanou osu slouží středící membrána a poddajný závěs. Zároveň by membrána měla vykazovat co nejvyšší tuhost pro omezení nežádoucích parazitních kmitů vedoucích ke zkreslení. [1] [2]

Pólové nástavce zajišťují rovnoměrné přenesení magnetického pole a soustředění magnetického toku do vzduchové mezery. K dosažení co nejvyššího magnetického toku je za potřebí co nejúžší vzduchová mezera. [2]

Trnem se rozumí válec na pólovém nástavci, kolem kterého se nachází former, který je nosným prvkem pro cívku. Former bývá nejčastěji vyroben z papíroviny, hliníku, skleněných vláken nebo kaptonu. [3]

Cívka se vyskytuje v podobě vinutí izolovaného vodiče navinutého na former spojený s membránou. Vinutí bývá nejčastěji ve dvou, méně často v jedné či čtyřech vrstvách. Aby nedošlo k deformaci cívky, musí vykazovat dostatečnou tuhost. Konce vodičů jsou vyvedeny externě, aby mohly být připojeny ke zvukovému systému. [2] [3]

Nosnou částí celého magnetického obvodu i membrány je koš reproduktoru. Nejčastěji je vyroben z výlisku plechu nebo slitin hliníku. Koše pro hlubokotónové reproduktory jsou opatřeny co největšími dírami, aby v prostoru za membránou nevznikl nevhodný akustický obvod. [2] [3]

2.1 TS Parametry reproduktoru

Thiele/Small parametry, nebo zkráceně TS parametry, jsou soubor elektromechanických parametrů reproduktoru. Jsou pojmenovány podle dvou matematiků - Alberta N. Thiela a Richarda H. Smalla a určují chování reproduktoru na nízkých kmitočtech v oblasti kolem rezonančního kmitočtu. Pomocí těchto parametrů lze snadno simulovat chování reproduktoru v ozvučnicích. [1]

Základní TS parametry jsou dány konstrukcí reproduktoru a podle publikace Richarda T. Smalla [4] jsou to následující:

- R_v – stejnosměrný odpor kmitací cívky
- Bl – součin indukce magnetického pole v mezeře magnetického obvodu a délky vodiče v magnetickém poli
- S_d – efektivní plocha membrány
- C_{ms} – poddajnost závěsu membrány
- M_{ms} – hmotnost membrány a spolukmitajícího sloupce vzduchu
- R_{ms} – mechanický odpor kmitacího systému

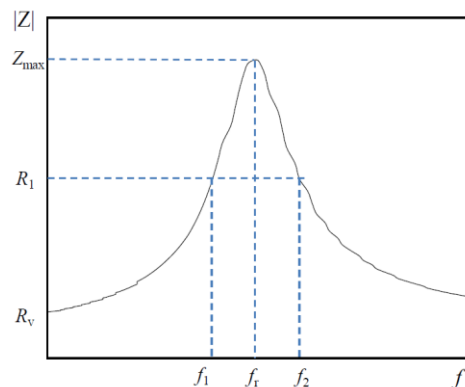
Tyto parametry jsou základem pro výpočet dalších TS parametrů, které jsou popsány v následujících podkapitolách.

Elektrickým měřením lze zjistit impedanční charakteristiku reproduktoru a v ní typické body:

- Z_{\max} – maximální impedance za rezonance
- R_v – stejnosměrný odpor vinutí cívky
- f_r – rezonanční kmitočet
- f_1, f_2 – kmitočty odpovídající poklesu elektrické impedance na hodnotu R_1

$$R_1 = R_v \sqrt{R_0}, \quad (2.1)$$

kde $R_0 = Z_{\max}/R_e$



Obr. 2.2 Výpočet TS parametrů z modulové impedanční charakteristiky. [1]

Z hodnot těchto typických bodů lze podle rovnic uvedených v následujících kapitolách snadno dopočítat skutečné hodnoty TS parametrů a předejít tak možným chybám v návrhu ozvučnice vzhledem ke skutečnosti, že hodnoty parametrů udávané výrobcem se často liší od skutečnosti. [1]

2.1.1 Rezonanční kmitočet

Rezonanční kmitočet reproduktoru ve volném prostoru je parametr udávající kmitočet, při kterém je hodnota jmenovité impedance reproduktoru nejvyšší a kmitací cívku reproduktoru protéká nejmenší proud. Při tomto kmitočtu je energie pohyblivých částí reproduktoru nejvyšší a k uvedení systému do pohybu je tedy potřeba nejmenší množství elektrické energie. Platí, že poddajnější závěs reproduktoru nebo vyšší hmotnost membrány a spolukmitajícího sloupce vzduchu vedou k nižšímu rezonančnímu kmitočtu a naopak. Rezonanční kmitočet reproduktoru je velmi proměnlivý parametr. Provozem reproduktorů se poddajnost závěsů zvyšuje, a tím klesá i rezonanční kmitočet. Na poddajnost závěsu má vliv také okolní teplota. Obecně platí, že vstupní signály o kmitočtu výrazně nižším než je rezonanční kmitočet reproduktoru mohou způsobit příliš velkou výchylku membrány. To může mít za důsledek vyklouznutí kmitací cívky z magnetické mezery, nebo zasažení její spodní části, a následné poškození reproduktoru. Z impedanční charakteristiky reproduktoru lze vyčíst lokální maximum, na kterém

se nachází rezonanční kmitočet reproduktoru. Na rezonančním kmitočtu prochází fázová charakteristika nulou a dochází k otočení fáze. Pro výpočet rezonančního kmitočtu lze použít následující vzorec. [5] [6] [7]

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_{ms} \cdot M_{ms}}} \quad (2.2)$$

2.1.2 Mechanický činitel jakosti

Tato bezrozměrná veličina udává mechanické ztráty způsobené tlumením pohybu membrány. Na těchto ztrátách se podílí především středící membrána a závěs membrány. Hodnota mechanického činitele jakosti může být také ovlivněna materiálem formeru. Pokud je vyroben z hliníku, tak dochází ke vzniku vířivých proudů, které působí proti pohybu cívky. Z nevodivých materiálů formeru se běžně používá skleněné vlákno nebo kapton. Další faktor, který tuto veličinu může ovlivnit je vzduch pod uzavírací vložkou. Pokud tento prostor není dostatečně odvětráván, je zde vzduch stlačován a rozpínán. Tento problém může být vyřešen perforací formeru nebo otvorem v trnu. Platí, že čím vyšší je hodnota mechanického činitele jakosti, tím menší jsou mechanické ztráty reproduktoru. Hlavní efekt lze pozorovat na impedanční charakteristice reproduktoru. Vysoký mechanický činitel jakosti způsobí vyšší hodnotu maximální impedance za rezonance reproduktoru. [1][6]

Hodnotu mechanického činitele jakosti lze vypočítat z hodnot daných výrobcem reproduktoru podle následujícího vzorce. [5]

$$Q_{ms} = \frac{2\pi \cdot f_s \cdot M_{ms}}{R_{ms}} \quad (2.3)$$

Podle hodnot odečtených z naměřené impedanční charakteristiky reproduktoru lze mechanický činitel jakosti určit následovně. [1]

$$Q_{ms} = f_s \cdot \frac{\sqrt{R_0}}{f_2 - f_1} \quad (2.4)$$

2.1.3 Elektrický činitel jakosti

Elektrický činitel jakosti na rozdíl od mechanického činitele jakosti nebere v potaz mechanické vlastnosti reproduktoru, ale vlastnosti elektrické. Je bezrozměrný a udává ztráty způsobené elektrickým tlumením. Cívka pohybující se v magnetickém poli generuje vlastní proud, který působí proti směru proudu ze vstupního signálu. Odečtením těchto proudů se snižuje celkový proud protékající cívkou v oblasti kolem rezonančního kmitočtu a tím snižuje pohyb membrány a zvyšuje impedanci. U většiny reproduktorů je elektrický činitel jakosti dominantním faktorem pro hodnotu celkového činitele jakosti.

Jeho hodnota závisí na výstupní impedanci zesilovače. Pokud je hodnota výstupní impedance zesilovače nezanedbatelná, měla by být pro správný výpočet přičtena k hodnotě stejnosměrného odporu vinutí cívky. Pro výpočet hodnoty Q_{es} lze využít následující vzorec. [1][5]

$$Q_{es} = \frac{2\pi \cdot f_s \cdot M_{ms} \cdot R_v}{(Bl)^2} \quad (2.5)$$

Podle hodnot z naměřené impedanční charakteristiky se dá hodnota Q_{es} určit následně. [1]

$$Q_{es} = \frac{Q_{ms}}{R_0 - 1} \quad (2.6)$$

2.1.4 Celkový činitel jakosti

Tento parametr udává celkové tlumení reproduktoru. Jedná se o kombinaci Q_{es} a Q_{ms} . Obecně platí, že čím menší je jeho hodnota, tím je systém tlumenější. Podle hodnoty celkového činitele jakosti lze určit vhodnost reproduktoru pro různé typy ozvučnic. Reproductory s nízkou hodnotou Q_{ts} bývají vhodné pro ozvučnice typu horn nebo transmission line, s rostoucí hodnotou bývá vhodnější ozvučnice typu bassreflex, uzavřená ozvučnice a pro reproduktory s velmi vysokou hodnotou Q_{ts} je vhodná ozvučnice otevřená. Vzorec (2.7) určuje jeho hodnotu.

$$Q_{ts} = \frac{Q_{ms} \cdot Q_{es}}{Q_{ms} + Q_{es}} \quad (2.7)$$

2.1.5 Ekvivalentní objem

Ekvivalentní objem je parametr udávající objem vzduchu, který disponuje ekvivalentní poddajností jako závěs reproduktoru C_{ms} při efektivní ploše membrány S_d . Vyšší hodnoty V_{as} znamenají vyšší poddajnost a obecně vyžadují ozvučnice většího objemu. Hodnota poddajnosti závěsu reproduktoru a hustota vzduchu je tepelně závislá. Vzhledem k této skutečnosti je tepelně závislá i hodnota ekvivalentního objemu daná vzorcem

$$V_{as} = \rho \cdot c^2 \cdot S_d^2 \cdot C_{ms}, \quad (2.8)$$

kde ρ je hustota vzduchu a c je rychlost zvuku ve vzduchu.

Ve skutečnosti je TS parametrů reproduktoru daleko více. Výše uvedené parametry jsou označovány jako tzv. malosignálové TS parametry a tvoří základ pro návrh reproduktorových ozvučnic.

2.2 Reprodukter vhodný pro ozvučnici typu transmission line

Základem návrhu reproduktorových ozvučnic je volba vhodného reproduktoru. Vzhledem ke komplexnosti návrhu transmission line ozvučnic nelze určit přesná kritéria pro reproduktor samotný, ale často je nutností parametrům reproduktoru uzpůsobit parametry ozvučnice. U ozvučnic typu transmission line je reproduktor spojený s velkým sloupcem vzduchu. Hmotnost sloupce vzduchu snižuje rezonanční kmitočet reproduktoru. Kromě toho vyžaduje ovládání tohoto sloupce vzduchu velmi tuhou membránu, aby nedošlo k její deformaci a následnému zkreslení. Toto je rozdílné například od běžnějších ozvučnic typu bassreflex, kde se běžně používají měniče s vysokým výkonem navržené jako velmi lehké, flexibilní a s poddajným závěsem. [8]

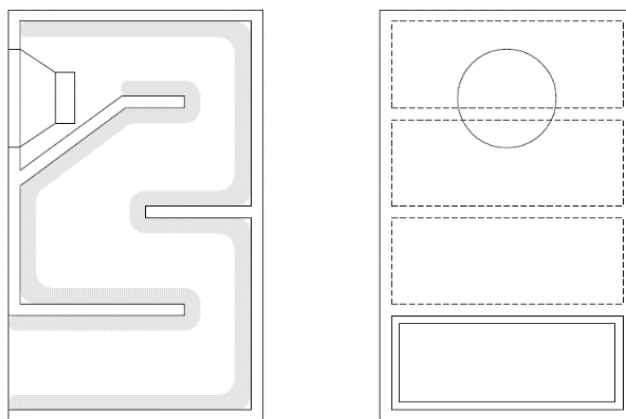
Obecně platí, že pro ozvučnici typu transmission line bývají vhodné reproduktory s hodnotou Q_{ts} 0,3-0,5. Reproktory s vyšší nebo nižší hodnotou Q_{ts} mají rozdílné impedanční a kmitočtové charakteristiky při použití v transmission line systému. Podrobnosti vlivu Q_{ts} na soustavu jsou popsány v kapitole 3.4. Pro zamezení poklesu kmitočtové charakteristiky na nízkých kmitočtech je vhodné se vyvarovat reproduktorům s příliš vysokou hodnotou V_{as} [9] [10].

3. TRANSMISSION LINE OZVUČNICE

Reproduktorová ozvučnice neboli reproduktorová skříň je prostředek, jehož hlavním účelem je zamezení akustického zkratu. Akustickým zkratem rozumíme vzájemnou interferenci přední a zadní akustické vlny vyzářené reproduktorem, které jsou v opačné fázi. Pokud nedojde k jejich oddělení reproduktorovou ozvučnicí tak se vlny vzájemně vyruší, zejména na nízkých kmitočtech. Návrh ozvučnice se tedy odvíjí od parametrů a vlastností měniče určeného k reprodukci nízkých kmitočtů.

Sekundární funkcí reproduktorové ozvučnice je ochrana basového reproduktoru. Umístěním reproduktoru do ozvučnice dojde ke zmenšení maximální výchylky reproduktoru pod určitým kmitočtem a tudíž ke zvýšení jeho zatížitelnosti. [11]

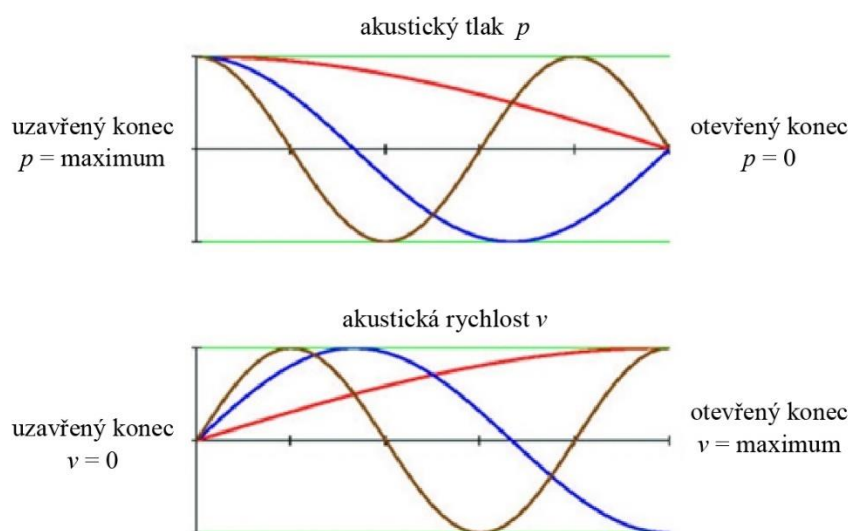
Transmission line ozvučnice je druh ozvučnice, který směřuje akustické vlny vyzářené zadní stranou reproduktoru do dlouhého zvukovodu s otevřeným koncem. Tento zvukovod bývá vyplněn tlumícím materiálem a vzhledem k praktičnosti a jeho poměrně velké délce bývá složen.



Obr. 3.1 Transmission line ozvučnice [1]

Ve zvukovodu vzniká stojaté vlnění o délce jedné čtvrtiny vlnové délky a jeho liché násobky viz Obr. 3.2. Pro účinné využití akustické energie vyzářené zadní stranou reproduktoru se délka zvukovodu volí tak, aby odpovídala čtvrtině vlnové délky rezonančního kmitočtu reproduktoru. Díky stojatému vlnění v polouzavřené trubici dojde k otočení fáze vlny vyzářené zadní stranou reproduktoru, ta se sečte s vlnou vyzářenou přední stranou reproduktoru a dojde k podstatnému zesílení nízkých kmitočtů.

Výhodou ozvučnice typu transmission line je, že hmotnost vzduchu ve zvukovodu zatěžuje hlubokotónový reproduktor a tím snižuje rezonanční kmitočet systému. To má za důsledek reprodukci podstatně nižších kmitočetů než při použití běžnější uzavřené ozvučnice nebo ozvučnice typu bassreflex. Hmotnost vzduchu také udržuje reproduktor dobře tlumený, což ve výsledku způsobuje nižší úroveň zkreslení a velmi dobrou transientní charakteristiku ozvučnice v porovnání s jinými druhy ozvučnic. Hlavní nevýhodou transmission line ozvučnic je jejich velikost a komplexnost návrhu. [12] [13] [14]



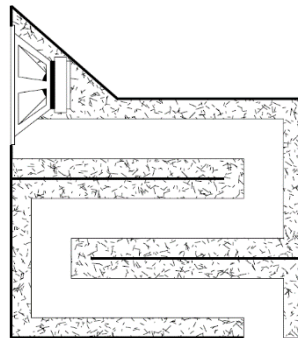
Obr. 3.2 Akustický tlak a rychlost stojatého vlnění o délce 1/4 (červená křivka), 3/4 (modrá křivka) a 5/4 (hnědá křivka) vlnové délky v polouzavřené trubici [15]

3.1 Vývoj transmission line ozvučnic

Existuje pouze několik článků, které se přímo vztahují k reproduktorovým ozvučnicím typu transmission line. Chronologicky první tři články [16], [17], [18] popisují návrhy, ale nestanovují žádné konstrukční rovnice. Poslední práce [19], představující model analogického elektrického obvodu pro transmission line ozvučnici, je jediná, která představuje konstrukční nástroj, ale postrádá rovnice pro výpočet parametrů ozvučnice a vyžaduje opakované použití softwaru pro simulaci obvodů. Tyto práce jsou shrnuty v následujících podkapitolách.

3.1.1 Akustický labyrint

Ve snaze zlepšit odezvu otevřených ozvučnic rádiových přijímačů na nízkých kmitočtech vyvinul Benjamin Olney [16] v roce 1936 to, čemu říkal akustický labyrint: skládaný zvukovod, který měl stěny lemované materiálem pohlcujícím zvuk. Reprodukční jednotka byla umístěna na jednom konci labyrintu, druhý konec byl otevřený a směřoval do podlahy. Schéma znázorňující průřez Olneyho akustického labyrintu lze vidět na **Obr. 3.3**.



Obr. 3.3 Olneyho akustický labyrint [16]

Olney zaznamenal četné nežádoucí vlastnosti v souvislosti s v té době typickou otevřenou ozvučnicí. Poznamenal, že její kmitočtová charakteristika disponuje vrcholy způsobenými rezonancemi ozvučnice a jejím obvyklým umístěním blízko zdi. Reprodukce nízkých kmitočtů u otevřených ozvučnic není výrazně posílena vzhledem k akustickému zkratu. Řízení reproduktoru v takovéto ozvučnici zesilovačem citlivým na zatížení by mohlo vyvolat další zkreslení. Olney doufal, že tyto problémy napraví použitím akustického labyrintu.

Akustické vlny vyzářené přední a zadní stranou reproduktoru jsou v protifázi. Výstup ze zvukovodu a vlna vyzářená přední stranou membrány jsou ve fázi, pokud je délka zvukovodu lichým násobkem poloviční vlnové délky kmitočtu, který je zesílen. Olney předpokládal, že tlumicí materiál ve zvukovodu akustické vlny tlumil více s jejich narůstajícím kmitočtem. Po změření kmitočtové charakteristiky Olneyho akustického labyrintu se ukázalo, že rezonance byly opravdu sníženy a reprodukce nízkých kmitočtů byla posílena. Dokázal, že rezonance zvukovodu samotného na vyšších kmitočtech byly sníženy tlumicím materiálem. Ačkoli byly jeho výsledky především experimentální, na základě kvalitního odůvodnění Olney dosáhl svého cíle. Dokázal, že akustický labyrint byl vylepšením oproti ozvučnici otevřené.

3.1.2 Vyplněná transmission line ozvučnice

V roce 1965 Arthur R. Bailey [17] představil ozvučnici, kterou nazval nerezonanční reprodukcí ozvučnice. Tento design v roce 1972 zdokonalil. [18] Stejně jako u Olneyho bylo jeho záměrem eliminovat rezonanční efekty. Spíše než o otevřené ozvučnice se ale zajímal o ozvučnice typu bassreflex. Využití akustické vlny vyzářené

zadní stranou reproduktoru pomocí ozvučnice typu bassreflex bylo a stále je velmi populární. Bailey však věřil, že tento typ ozvučnice zbytečně zkresluje zvukový výstup reproduktoru.

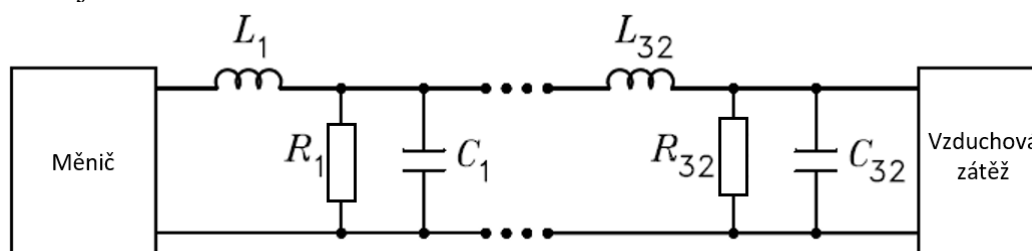
Měření ukázalo, že impulzní odezvy ozvučnic typu bassreflex nejsou příliš dobré. Tento jev byl způsoben absencí tlumicího materiálu a vlastními rezonancemi skříňe i bassreflexového nátrubku.

Bayleho ozvučnice byla efektivně modifikovanou verzí Olneyho akustického labyrintu. Neměla zadní skříň, a proto nezkreslovala zvuk jako ozvučnice typu bassreflex. Jednalo se v podstatě o dlouhý zvukovod, který byl vyplněn akusticky pohltivým materiálem, namísto aby byly jeho stěny tímto materiálem pouze obloženy. Na jeho jednom konci byl namontovaný reproduktor a druhý konec byl otevřený a zároveň se nacházel v rovině s reproduktorem. Celkový výstup zvuku z ozvučnice byl kombinací akustických vln vyzářených reproduktorem a otevřeným koncem zvukovodu. Zvukovod se v tomto případě choval jako filtr typu dolní propust. Nízké kmitočty byly tlumeny pouze lehce a byly ve fázi s výstupem z reproduktoru. Došlo k sečtení a to zlepšilo celkovou odezvu systému na nízkých kmitočtech. Vyšší kmitočty byly tlumeny razantně a ze zvukovodu jich vycházelo pouze zanedbatelné množství. Bailey experimentoval s tlumicími materiály pro jeho ozvučnici. Po pokusech s vlnou s různě dlouhými vlákny a skleněným vláknem zvolil vlnu s dlouhým vláknem jako nejvhodnější materiál pro tlumení transmission line ozvučnice. Bailey ve své publikaci uvedl, že rychlost zvuku je ovlivněna tlumicím materiálem a že výstup zvukovodu může být změněn délkou trubice. Poznamenal několik praktických úvah ohledně konstrukce ozvučnic typu transmission line, ale nepředložil žádnou experimentální metodu ani rovnice pro návrh. Bez rovnic lze určit potřebnou délku zvukovodu a množství tlumicího materiálu pouze metodou pokus-omyl.

3.1.3 Augspurgerův náhradní elektrický obvod

Vzhledem k tomu, že objektivní informace o ozvučnicích typu transmission line byly vzácné, vyvinul G. L. Augspurger v roce 2000 schéma náhradního elektrického obvodu, který lze použít k simulaci tohoto typu ozvučnic. Jeho model byl modifikovanou verzí Locanthiho obvodu [21], který byl původně vyvinut pro simulaci horn ozvučnic.

Augspurgerův model se sestával z 32 sekcí obsahujících rezistory, indukory a kondenzátory, které reprezentují akustické parametry systému. Změnou parametrů v každé sekci modeloval různé geometrické prvky ozvučnice, kterými může být například zvětšující se nebo zmenšující se plocha průřezu zvukovodu. Zohlednil také změny útlumu v závislosti na kmitočtu. Schéma jeho náhradního elektrického obvodu je znázorněno na následujícím obrázku.



Obr. 3.4 Augspurgerův náhradní elektrický obvod [19]

Cívky ve výše znázorněném obvodu představují poddajnost vzduchu a kondenzátory představují hmotnost vzduchu ve zvukovodu. Oproti Locanthiho obvodu Augspurger přidal také zkratové rezistory pro znázornění útlumu zvuku výplní zvukovodu. Pro přesnější simulaci tlumicího materiálu nechal Augspurger kolísat hodnotu rezistorů s kmitočtem. Nikdy neodhalil způsob, jakým určoval hodnoty odporů nebo jejich kmitočtovou závislost. Jeho model nezahrnoval jakýkoli pohyb vláken tlumicího materiálu, ale také prohlásil, že není jisté, zda je pohyb vláken důležitý. Pomocí programu pro simulaci elektrických obvodů Augspurger opakovaně prováděl simulace svého modelu, zatímco upravoval hodnoty parametrů reproduktoru a zvukovodu. Tímto způsobem získal několik návrhů, které označil za optimalizované. Strmost změny jejich kmitočtové charakteristiky pod rezonančním kmitočtem systému odpovídala 12 dB/okt a disponovaly minimálním zvlněním propustného pásma, zatím co měly účinnost odpovídající účinnosti ekvivalentní uzavřené ozvučnice.

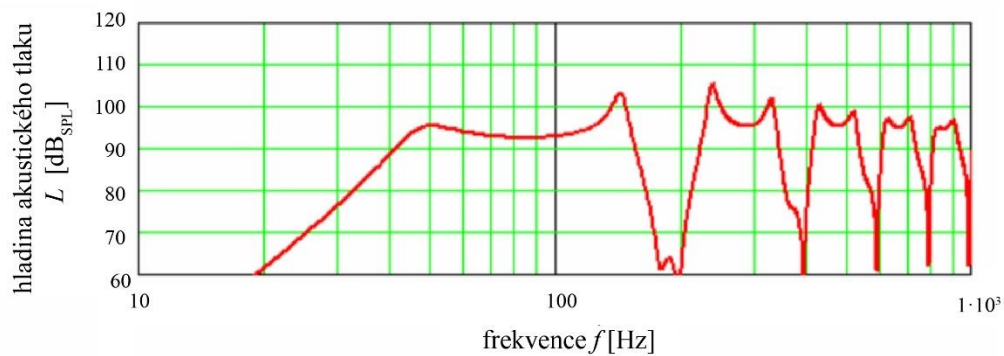
Augspurger prokázal, že je možné simulovat ozvučnice typu transmission line s vnitřním tlumením pomocí náhradního elektrického obvodu a zvažil, jaké účinky má změna geometrie zvukovodu oproti běžnému zvukovodu s konstantní plochou průřezu. Přestože prezentoval mnoho simulovaných grafů pro ozvučnice s různými geometriemi, předložil pouze několik experimentálních výsledků. Uvedl, že simulované průběhy přesně odpovídají naměřeným výsledkům. K realizaci ozvučnic typu transmission line, které nebyly výslovně simulovány a předloženy společností Augspurger, by bylo nutné projít procesem simulace obvodu a stanovení jednotlivých hodnot pomocí metody pokus-omyl.

3.2 Kmitočtová a impedanční charakteristika

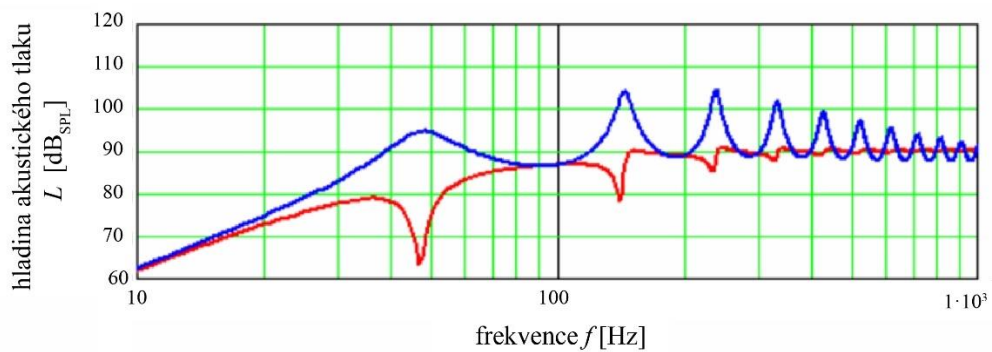
Kmitočtová charakteristika je definována jako závislost hladiny akustického tlaku při konstantním napětí na svorkách reproduktoru a většinou se udává pro bod v akustické ose reproduktoru. Vyrovnaná kmitočtová charakteristika je výsledkem správně navržené reproduktorové ozvučnice. Impedanční charakteristika poté udává závislost impedance systému na kmitočtu.

Z kmitočtové charakteristiky ozvučnice typu transmission line s konstantní plochou průřezu (Obr. 3.5) lze snadno vyčíst hodnoty jednotlivých rezonancí ozvučnice, kterými jsou liché násobky kmitočtu čtvrtinové vlny, na kterou je ozvučnice lazena. Při absenci tlumicího materiálu je velmi zvlněná již od třetího násobku.

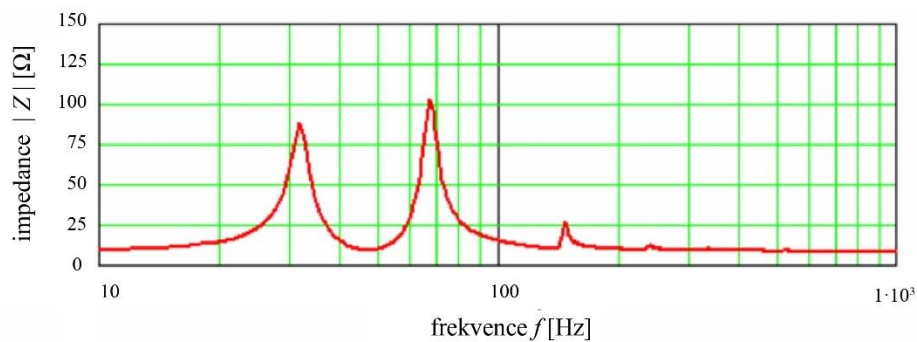
Impedanční charakteristika s několika lokálními maximy (Obr. 3.7) je typická pro ozvučnici typu transmission line. Kombinace reproduktoru a ozvučnice, které mají stejný rezonanční kmitočet, má za následek dvě lokální maxima přičemž jedno se nachází nad a jedno pod původním rezonančním kmitočtem. V lokálním minimu mezi těmito píky impedanční charakteristiky ozvučnice vyznačuje nejvíce zvuku, zatím co pohyb reproduktoru je minimální. Lokální maxima na vyšších kmitočtech poté odpovídají rezonancím na lichých násobcích ladícího kmitočtu. [20]



Obr. 3.5 Kmitočtová charakteristika transmission line ozvučnice s konstantní plochou průřezu [20]



Obr. 3.6 Kmitočtová charakteristika otevřeného konce (modrá křivka) a reproduktoru (červená křivka) ozvučnice typu transmission line s konstantní plochou průřezu [20]



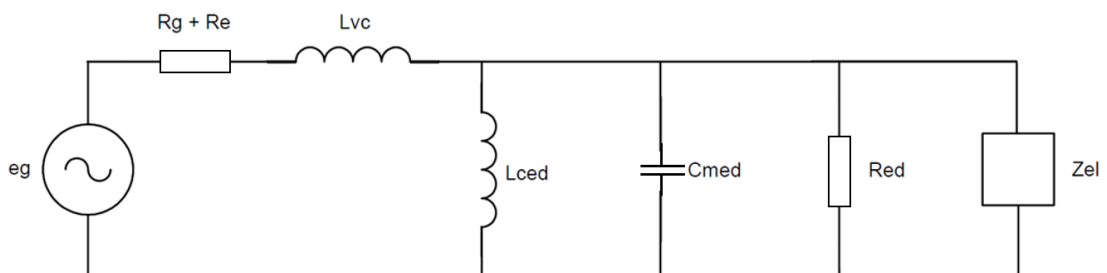
Obr. 3.7 Impedanční charakteristika transmission line ozvučnice s konstantní plochou průřezu [20]

3.3 Náhradní elektrické schéma

Pro analýzu chování elektroakustických měničů jsou velmi důležité mechanické a akustické vlastnosti měničů. Pro zjištění, jakým způsobem se tyto vlastnosti projeví na elektrické straně měniče se používá elektromechanická a elektroakustická analogie.

Jelikož lze chování mechanických, akustických i elektrických soustav popsat diferenciálními rovnicemi, lze použít teorii elektrických soustav k popisu soustav mechanických a akustických, což v praxi znamená přiřazení mechanických a akustických veličin veličinám elektrickým.

Náhradní elektrické schéma pro ozvučnici typu transmission line lze vidět na následujícím obrázku.



Obr. 3.8 Náhradní elektrické schéma ozvučnice typu transmission line s konstantní plochou průřezu zvukovodu [15]

kde e_g reprezentuje zdroj střídavého napětí, $R_g + R_e$ stejnosměrný výstupní odpor zesilovače, kabelů a kmitací cívky reproduktoru, L_{vc} indukčnost kmitací cívky, L_{ced} indukčnost vzhledem k poddajnosti závěsu reproduktoru, C_{med} kapacitu vzhledem k hmotnosti měniče, R_{ed} stejnosměrný odpor vzhledem k tlumení závěsu reproduktoru a Z_{el} elektrickou ekvivalentní impedanci transmission line systému.

3.4 Základní parametry

Vlastnosti ozvučnice typu transmission line lze snadno popsat pomocí několika základních parametrů, které jsou popsány v následujících podkapitolách. Hodnoty těchto parametrů jsou často orientační, vzhledem k velkému vlivu parametrů reproduktoru, tlumení a vnitřnímu uspořádání na charakteristiky ozvučnice.

3.4.1 Délka zvukovodu

Základním a stěžejním parametrem pro správný návrh ozvučnice typu transmission line je délka zvukovodu. Pro účinné využití energie vyzářené zadní stranou reproduktoru se volí délka zvukovodu odpovídající čtvrtině vlnové délky rezonančního kmitočtu reproduktoru. Délku zvukovodu lze spočítat pomocí vzorce (3.1). Vzhledem k tomu, že parametry jako celkový činitel jakosti reproduktoru nebo poměr plochy průřezu uzavřeného a otevřeného konce zvukovodu mají vliv na výsledný tvar kmitočtové

charakteristiky, je vhodné použít simulační software a pro optimální tvar charakteristiky délku zvukovodu ověřit.

$$L_z = \frac{c}{4 \cdot f_r}, \quad (3.1)$$

kde c je rychlost zvuku a f_r odpovídá rezonančnímu kmitočtu reproduktoru. [15]

Vzhledem k akustické impedanci otevřeného konce zvukovodu je délka zvukovodu zdánlivě větší, než jeho skutečná délka. Efektivní délku zvukovodu s konstantní plochou průřezu (3.2) lze spočítat jako součet skutečné délky a korekce pro otevřený konec se zárubou.

$$L_{\text{eff}} = L + k \cdot R, \quad (3.2)$$

kde k odpovídá korekci podle zakončení trubice. Obvykle se používá hodnota 0,732 pro zakončení zvukovodu přírubou. Hodnota R odpovídá poloměru ekvivalentního kruhu, jehož plocha odpovídá ploše otevřeného konce zvukovodu.

U měničů s velmi nízkou hodnotou Q_{ts} lze pozorovat propad kmitočtové charakteristiky mezi hodnotou ladícího kmitočtu a hodnotou následující vyšší rezonance. Se zvyšující se hodnotou Q_{ts} se tento propad vyrovnává a nakonec může stát širokým hrbem. Tento efekt lze eliminovat volbou délky zvukovodu. Pro reproduktory s nízkou hodnotou Q_{ts} se doporučuje ladit zvukovod 5 až 10 Hz nad a pro vysokou hodnotu Q_{ts} naopak 5 až 10 Hz pod rezonanční kmitočet reproduktoru. [9]

3.4.2 Plocha průřezu zvukovodu

Pro správný návrh ozvučnice typu transmission line je nutné zvolit vhodnou hodnotu plochy průřezu zvukovodu. U ozvučnic s konstantní plochou průřezu se volí plocha odpovídající efektivní ploše membrány reproduktoru, ale vzhledem ke konstrukci a tvaru reproduktoru a ozvučnice bývá tato plocha větší, což nemá za důsledek příliš znatelný rozdíl v kmitočtové charakteristice. U ozvučnic s rozšiřující se nebo zužující se plochou průřezu platí tato hodnota pro oblast na začátku zvukovodu, tzn. hned za reproduktorem. Plocha průřezu se poté zmenšuje nebo zvětšuje, obvykle v poměru 1:3–1:4, nicméně některé experimentální designy došly k zajímavým výsledkům i s většími poměry. [13][19]

3.4.3 Rezonanční kmitočet transmission line ozvučnice

Uzavřením reproduktoru s rezonančním kmitočtem f_r do ozvučnice typu transmission line získáme nový rezonanční kmitočet f_t , pro který platí, že $f_t < f_r$. Ke snížení rezonančního kmitočtu dojde kvůli přičtení hmotnosti vzduchu uvnitř ozvučnice k hmotnosti membrány a spolukmitajícího sloupce vzduchu. Hodnotu f_t lze spočítat podle vzorce (3.3) nebo snadno vyčíst z grafu impedanční charakteristiky konkrétní transmission line ozvučnice.

$$f_t = \frac{1}{2\pi} \cdot \left(\frac{1}{C_{ms} \cdot (M_{ms} + M_{air})} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.3)$$

Kde C_{ms} odpovídá poddajnosti závěsu membrány, M_{ms} hmotnosti membrány a spolukmitajícího sloupce vzduchu a M_{air} odpovídá hmotnosti vzduchu uvnitř ozvučnice.

4. KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ TRANSMISSION LINE OZVUČNIC

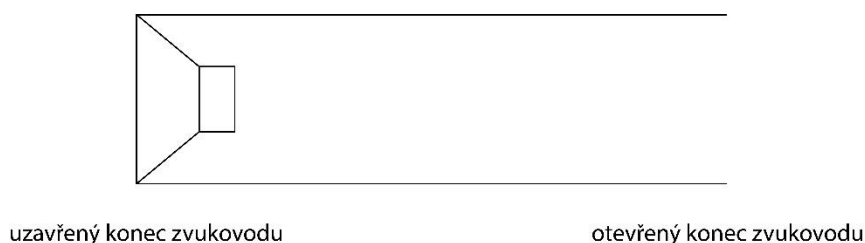
Mezi hlavní nevýhody ozvučnic typu transmission line patří především složitost jejich konstrukce. S ohledem na zvolený reproduktor je potřeba vybrat vhodné vnitřní uspořádání. Při následné konstrukci je nutné dosáhnout ozvučnice dostatečně robustní, aby nedošlo k rozkmitání stěn. Je tedy nutné zvolit dostatečně tuhý materiál. Provedení spojů musí být co nejtěsnější, aby nedocházelo k únikům vzduchu. Jako poslední krok je nutné zvolit vhodný tlumicí materiál a jeho množství. [11]

4.1 Vnitřní uspořádání

Vnitřní uspořádání transmission line ozvučnice má velký vliv na výsledné charakteristiky ozvučnice. V následujících podkapitolách jsou popsány jednotlivé geometrické prvky, kterými transmission line může disponovat, jejich výhody a nevýhody. Pro názornost jsou použity grafy z publikace M. J. Kinga [20]. Simulované ozvučnice jsou zde dimenzovány tak, aby efektivní délka zvukovodu odpovídala vždy stejnému ladicímu kmitočtu.

4.1.1 Transmission line s konstantní plochou průřezu

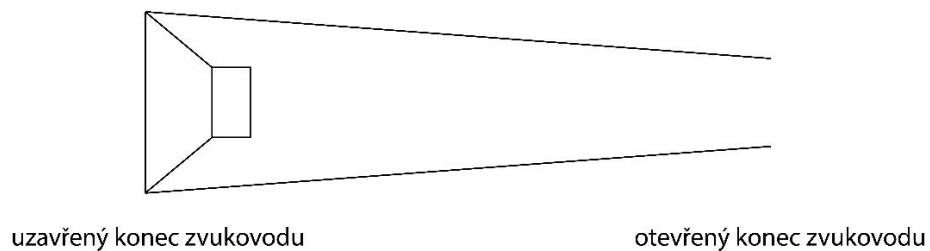
Ozvučnice typu transmission line s konstantní plochou průřezu je nejjednodušší typ, vzhledem k nenáročné konstrukci a jednoduchému výpočtu délky zvukovodu podle vzorce (3.2). I když je tato konstrukce hojně používána, disponuje několika nevýhodami. Při konstantní ploše průřezu může mezi jednotlivými stěnami snadno vzniknout parazitní stojaté vlnění, které bude mít za důsledek nerovnosti ve výsledné kmitočtové charakteristice. Další nevýhodou tohoto typu transmission line ozvučnice jsou velké rozměry. Kmitočtová a impedanční charakteristiku netlumené transmission line ozvučnice s konstantní plochou průřezu lze vidět na Obr. 3.5, Obr. 3.6 a Obr. 3.7. [20]



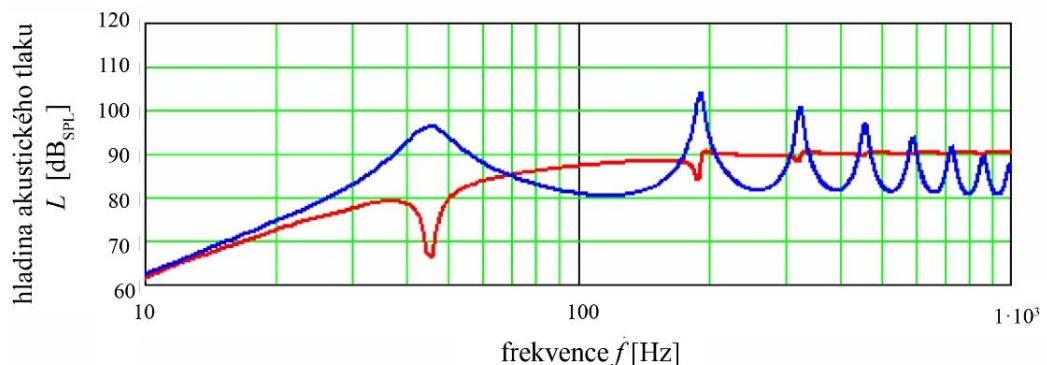
Obr. 4.1 Ozvučnice typu transmission line s konstantní plochou průřezu zvukovodu

4.1.2 Transmission line se zužující se plochou průřezu

Tento typ vnitřního uspořádání transmission line ozvučnice se řadí mezi nejpoužívanější, vzhledem k několika znatelným výhodám, kterými disponuje oproti ostatním geometriím. Při porovnání kmitočtových charakteristik otevřeného konce zvukovodu (Obr. 3.6 a Obr. 4.2) lze pozorovat, že zužující se plocha průřezu zvukovodu má za následek lepší potlačení vyšších rezonancí. Dochází také k útlumu parazitního stojatého vlnění mezi stěnami zvukovodu a tím pádem vyrovnanější kmitočtové charakteristice. Vzhledem k akustické impedanci otevřeného konce zvukovodu je tento typ transmission line ozvučnice zdánlivě delší než ozvučnice s konstantní plochou průřezu zvukovodu stejné délky. To způsobuje snížení kmitočtu čtvrtinové stojaté vlny a tím pádem lepší reprodukci nižších kmitočtů. Za zmínku také stojí umístění vyšších rezonancí vzhledem k poměru ploch uzavřeného a otevřeného konce zvukovodu. Čím vyšší tento poměr je, tím vyšší je efektivní délka zvukovodu a rezonance jsou rozloženy s větším rozestupem. K dalším výhodám patří i kompaktnější rozměry ozvučnice. Výpočet efektivní délky ozvučnice se zužující se plochou průřezu zvukovodu je poměrně složitý, v praxi lze použít tabulku závislosti efektivní délky zvukovodu na kmitočtu a ploše průřezu zvukovodu M. Kinga. [9] [20]



Obr. 4.2 Ozvučnice typu transmission line se zužující se plochou průřezu zvukovodu

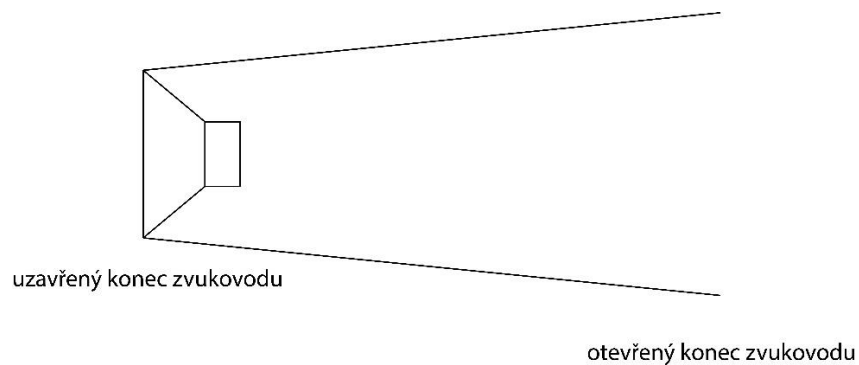


Obr. 4.3 Kmitočtová charakteristika otevřeného konce (modrá křivka) a reproduktoru (červená křivka) ozvučnice typu transmission line se zužující se plochou průřezu zvukovodu

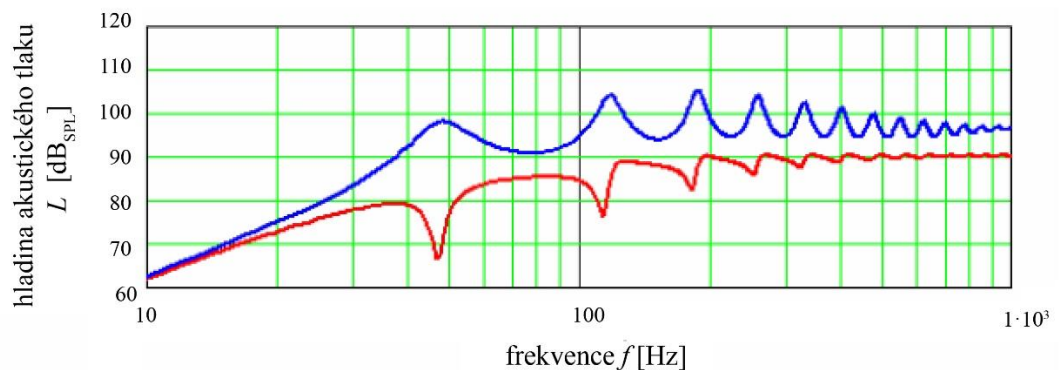
4.1.3 Transmission line se zvětšující se plochou průřezu

Ne příliš využívaná geometrie transmission line ozvučnice je ta s rozšiřující se plochou průřezu zvukovodu. Vyznačuje se velkými rozměry a složitým návrhem. Zvukovod je vzhledem k akustické impedanci zdánlivě nejkratší v porovnání s geometriemi popsanými v předchozích podkapitolách. K posílení nízkých kmitočtů je tedy za potřebí nejdelší zvukovod. Potlačení vyšších rezonancí není příliš znatelné. Se zvětšujícím se poměrem plochy průřezu uzavřeného a otevřeného konce zvukovodu dochází nejenom k snižování rozestupů mezi jednotlivými rezonancemi, ale také se tento typ ozvučnice začíná chovat více jako ozvučnice typu back-loaded horn. Dochází k přizpůsobení akustické impedance otevřeného konce zvukovodu a okolního prostředí a tudíž k potlačení stojatého vlnění.

Vzhledem k tomu, že je akustická impedance kmitočtově závislá nelze přesně určit hranici mezi ozvučnicí typu transmission line s rozšiřující se plochou průřezu a ozvučnicí typu back-loaded horn. [20] [22]



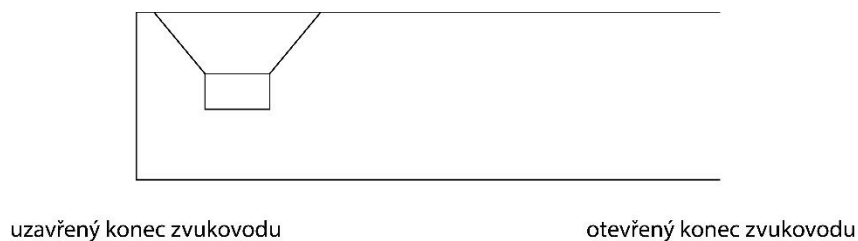
Obr. 4.4 Ozvučnice typu transmission line se zvětšující se plochou průřezu zvukovodu



Obr. 4.5 Kmitočtová charakteristika otevřeného konce (modrá křivka) a reproduktoru (červená křivka) ozvučnice typu transmission line se zvětšující se plochou průřezu

4.1.4 Offset reproduktor

Offsetem reproduktoru rozumíme posunutí v celkové délce zvukovodu vůči jeho konci. Umístěním reproduktoru na úplný začátek zvukovodu dojde k maximální excitaci čtvrtinového stojatého vlnění a všech jeho lichých násobků. Po offsetu reproduktoru bude stále docházet k excitaci čtvrtinového stojatého vlnění, ale dojde k potlačení vyšších rezonancí a tudíž k vyrovnanější kmitočtové charakteristice. Offset reproduktoru má zásadní vliv na výslednou kmitočtovou charakteristiku. Pro potlačení vyšších rezonancí je nutné umístit reproduktor blízko uzlu stojatého vlnění, které chceme potlačit. Doporučuje se reproduktor umístit do vzdálenosti maximálně jedné třetiny celkové délky od uzavřeného konce zvukovodu. Platí, že čím větší je vzdálenost reproduktoru od uzavřeného konce zvukovou, tím méně dochází k posílení reprodukce nízkých kmitočtů vlivem čtvrtinového stojatého vlnění. [23]



Obr. 4.6 Ozvučnice typu transmission line s offsetem reproduktoru

4.2 Materiály a spojování stěn ozvučnice

Při konstrukci ozvučnic je důležité brát zřetel na vhodný způsob spojování stěn a na výběr vhodného materiálu.

Volba materiálu závisí na více faktorech a nelze přesně určit nejvhodnější. Během výběru je nutné brát v potaz hmotnost, tuhost, dostupnost, cenu a vhodnost pro konkrétní konstrukční řešení. Mezi materiály, které se běžně používají, patří především dřevovláknité desky různé hustoty, dřevěné překližky, plast a kámen.

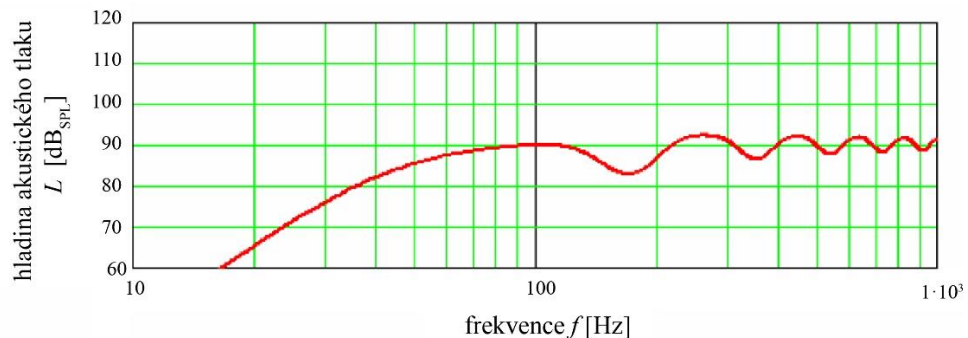
Během spojování stěn je potřeba dbát na co nejvyšší těsnost a tuhost spoje tak, aby mezi stěnami neunikal žádný vzduch. Stěny z dřevěných materiálů, které se používají nejčastěji, lze následně spojovat několika způsoby. Nejjednodušší je spoj na tupo, kdy jsou k sobě desky spojeny přímo pod pravým úhlem. Dále se často využívá spojení stěn na pokos nebo na zámek, hojně se také využívá zpevňovacích hranolů podél vnitřních hran a kolíků zastrčených do obou desek pro zvýšení celkové pevnosti spoje.

K dosažení potřebné tuhosti spoje dřevěného materiálu lze použít spojení pomocí vrutů, stěžejní je ovšem volba správného lepidla. K lepení běžných ozvučnic, které bývají z dřevovláknitých desek nebo překližek, je vhodné použít kvalitní disperzní nebo epoxidové lepidlo. [2]

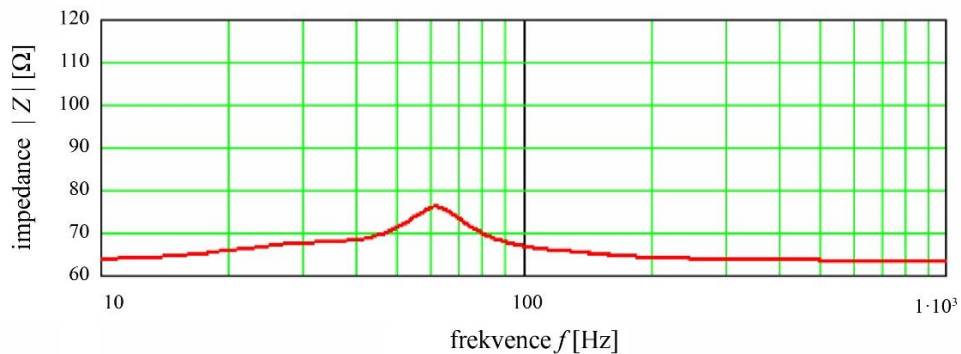
4.3 Tlumení stojatého vlnění

Pro zajištění vyrovnané kmitočtové charakteristiky je potřeba potlačit vyšší rezonance ozvučnice. Toho lze dosáhnout mimo volby vhodné geometrie především správným tlumením ozvučnice. V praxi patří mezi běžná řešení umístění tlumícího materiálu na stěny ozvučnice. Tloušťka tlumícího materiálu se může lišit podle konkrétních vlastností ozvučnice, nicméně je nutné brát v potaz, že čím je tloušťka tlumícího materiálu vyšší, tím větší má účinnost na nižších kmitočtech.

Nejběžnější metoda tlumení stojatého vlnění u transmission line ozvučnice je výplň celého objemu zvukovodu akusticky pohltivým materiálem s nízkou hustotou. Bayley ve své práci [18] experimentálně zjistil, že vhodným materiálem pro tento účel je vlna s dlouhými vlákny. V dnešní době se využívá snadno dostupných polyesterových vláken, která mají velmi podobné vlastnosti. Kritická je správná volba hustoty výplně. Zvyšování hustoty výplně snižuje amplitudu vyšších rezonancí a vede k vyrovnanější kmitočtové charakteristice (Obr. 4.7), ale také snižuje odezvu na nízkých kmitočtech. Vlivem tlumení lze pozorovat změny nejenom na kmitočtové charakteristice, ale i na charakteristice impedanční (Obr. 4.8). Se zvyšující se hustotou tlumícího materiálu se snižuje hodnota prvního lokálního maxima a může dojít i k jeho potlačení. Vlivem tlumení lze také pozorovat snížení kmitočtu vyšších rezonancí ozvučnice, které je způsobeno snížením rychlosti zvuku vzhledem k výplni. [20]

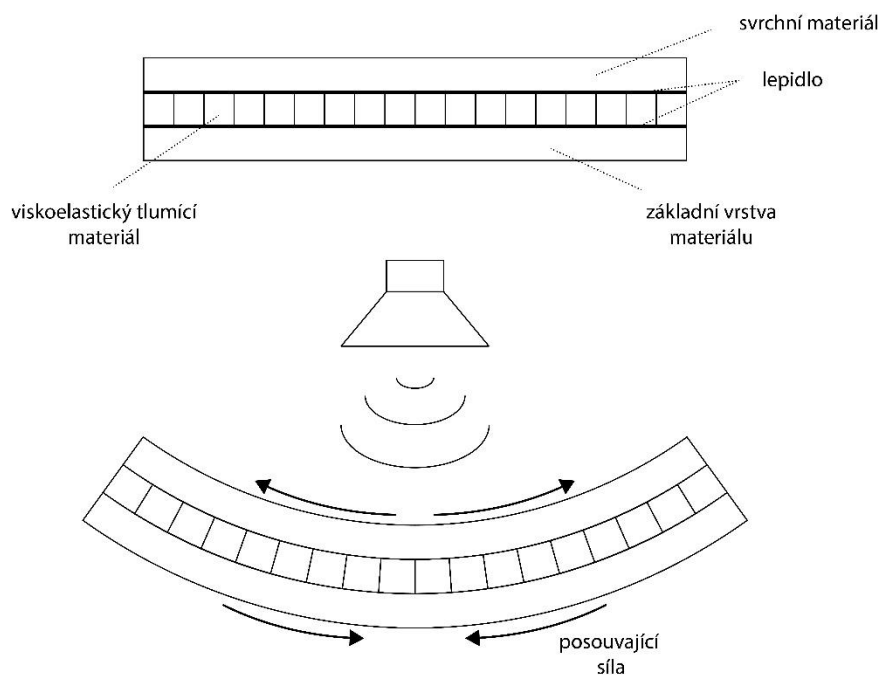


Obr. 4.7 Kmitočtová charakteristika tlumené ozvučnice typu transmission line s konstantní plochou průřezu (hustota výplně polyesterovým vláknem 8 kg/m^3) [20]



Obr. 4.8 Impedanční charakteristika tlumené ozvučnice typu transmission line s konstantní plochou průřezu (hustota výplně polyesterovým vláknem 8 kg/m^3) [20]

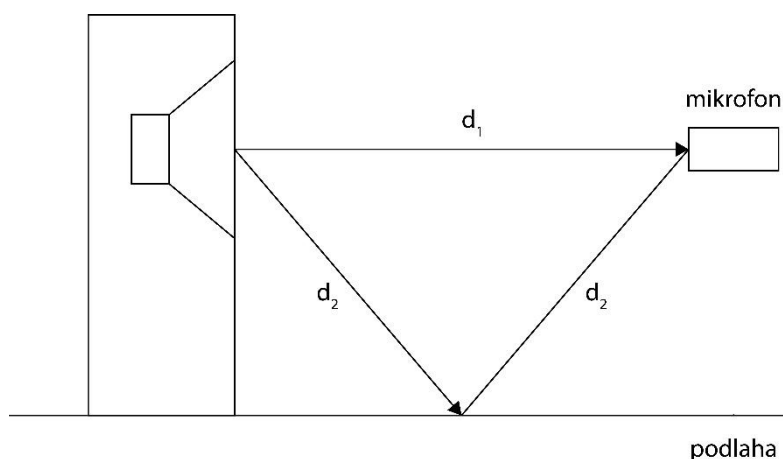
Tlumení ozvučnice lze také provést pomocí sendvičové konstrukce. Obvykle je viskoelastický nebo jiný tlumící materiál sendvičován mezi dvěma vrstvami tuhých materiálů, které samy o sobě postrádají dostatečné tlumení. Při nárazu zvukovou vlnou dojde k ohybu materiálu a vzniku posouvající síly, která působí na tlumící materiál. Vnitřní síla natáhne tlumící materiál a dojde k přeměně kinetické (akustické) energie na energii tepelnou. S ohledem na potřebný ohyb materiálu je za potřebí zvolit materiál správné tloušťky a tuhosti. Věci, který omezují ohyb materiálu mají za důsledek menší tlumení. Pokud jde o tloušťku tlumící vrstvy, je prokázáno, že příliš tlustá vrstva má menší tlumící kapacitu, než vrstva tenká. [24]



Obr. 4.9 Princip tlumení pomocí sedvičové konstrukce

5. MĚŘENÍ KMITOČTOVÝCH CHARAKTERISTIK OZVUČNIC

Měření kmitočtové charakteristiky ozvučnice je velmi důležitým krokem v procesu návrhu, výroby a následné optimalizace ozvučnice. Aby byly výsledky měření relevantní, je nutné měřit správným způsobem a vyvarovat se jakýmkoliv vlivům okolního prostředí. Cílem je změřit kmitočtovou charakteristiku v ose reproduktoru bez jakéhokoliv vlivu místnosti. Akustickou vlnu odraženou od podlahy, stěny a stropu zachytí mikrofon později než vlnu přímo z reproduktoru. V závislosti na rozdílu délky dráhy, a tedy i fázovém rozdílu mezi dvěma vlnami, se mohou odražené vlny sečíst nebo odečíst s vlnou přímou. Obvykle, pokud je testovaný reproduktor umístěn na středu podlahy, daleko od jiných odrazných povrchů, přijde první odraz z podlahy. Na Obr. 5.1 je tato situace znázorněna.



Obr. 5.1 Geometrie prvotního odrazu od podlahy

Kdykoli se vzdálenost $2 \cdot d_2 - d_1$ rovná stejnému násobku vlnové délky, přímé a odražené vlny se sečtou přímo. Kdykoliv je tato vzdálenost lichý počet polovičních vlnových délek, odražená vlna bude v opačné fázi a odečte se od vlny přímé. Při středních poměrech vzdálenosti k vlnové délce dojde k částečnému sčítání nebo odčítání. Odražená vlna bude poněkud slabší než přímá vlna, protože prochází delší vzdáleností, takže nedojde k úplnému vyrušení přímé vlny. [25]

5.1 Kvazi-anechoický způsob

K získání kmitočtové odezvy reproduktoru lze postupovat s pomocí impulsní charakteristiky reproduktoru. Impulsní charakteristika je ekvivalentem kmitočtové charakteristiky v časové oblasti a obě jsou spojeny Fourierovou transformací. Z impulsní

odezvy reproduktoru lze odečíst časový rozdíl mezi přímou vlnou a vlnou odraženou. Analýzou dat z časové oblasti do příchodu vlny odražené lze získat relativně hladkou kmitočtovou charakteristiku. Vzhledem k použití pouze krátkého časového úseku jsou platné výsledky až od určitého mezního kmitočtu, který lze spočítat podle vzorce (5.1). Jakákoliv část křivky vynesená pod tímto kmitočtem je artefakt Fourierovy transformace a nepředstavuje platná data. [25]

$$f_{\min} = \frac{1}{t} \quad (5.1)$$

Kde t odpovídá času do příchodu odražené vlny.

5.2 V bezodrazové komoře

Jedním ze způsobů, jak změřit kmitočtovou charakteristiku reproduktorové ozvučnice bez vlivů okolního prostředí je použití bezodrazové komory, která eliminuje odrazy místnosti. Měřicí mikrofon je obvykle připevněn na nenápadném stojanu (aby nedošlo k odrazům) na akusticky průhledné podlahové mříži. Ačkoliv se tento způsob měření zdá jednoduchý a účinný, pro výsledky platné na nízkých kmitočtech je za potřeby poměrně velká bezodrazová komora s velkými absorpčními prvky na všech stěnách. Naprostá většina bezodrazových komor není navržena pro přesné měření až do dolní hranice slyšitelnosti – 20 Hz.

5.3 Ve volném poli

Dalším způsobem, jak lze eliminovat vliv okolního prostředí na výslednou kmitočtovou charakteristiku je umístění systému do tzv. volného pole. V podstatě jde o umístění systému dostatečně daleko od veškerých možných ploch odrazu tak, aby nemohly znehodnotit měření. Teoreticky se jedná o dokonalou metodu měření kmitočtové charakteristiky, nicméně v praxi je téměř nemožné takovéto prostředí vytvořit.

5.4 V blízkém poli

Měření v blízkém poli je způsob, jak změřit kmitočtovou charakteristiku ozvučnice s jakýmkoliv počtem reproduktorů či rezonátorů bez použití bezodrazové komory nebo volného pole. Měřicí mikrofon je umístěn velmi blízko membráně reproduktoru, aby se zamezilo vlivu difrakcí ozvučnice a místnosti. Na nízkých kmitočtech, kdy se reproduktor chová jako tuhý píst, je měřená odezva v blízkém poli přímo úměrná odezvě ve volném poli a nezávislá na prostředí, do kterého vyzářuje. D. B. Keele popisuje tuto techniku ve svém článku. [26] Aby tato technika fungovala správně, musí být mikrofon umístěn co nejbližší středu reproduktoru. Keele ukazuje, že vzdálenost mikrofonu od reproduktoru menší než 0,11 násobek efektivního poloměru membrány má za důsledek chyby menší než 1 dB. Na vyšších kmitočtech, kdy se membrána reproduktoru přestává chovat jako tuhý píst a dochází k vzniku parazitních kmitů

membrány mohou tyto kmity dorazit k mikrofonu s různou fází a měření znehodnotit. Z tohoto důvodu je definována horní hranice f_{max} . Pro reproduktor namontovaný na fyzikálně dokonalé nekonečně rovinné desce je tento limit definován pomocí následujícího vzorce

$$f_{max} = \frac{4,311}{D}, \quad (5.2)$$

kde D je průměr reproduktoru udávaný v palcích. Pro ozvučnice s konečnými rozměry je tato hranice mírně nižší.

Na otázku co se stane, pokud reproduktorová ozvučnice disponuje více reproduktory či rezonátory D.B. Keele odpověděl následovně. Individuální kmitočtové charakteristiky v blízkém poli lze sečíst. Pokud mají rezonátory různé plochy, je nutno provést škálování křivek vzhledem k jejich efektivní ploše. Pokud jsou všechny zdroje zvuku kruhové, lze pro jejich součet použít následující vzorec

$$p_{tot} = D_1 \cdot p_1 + D_2 \cdot p_2 + D_3 \cdot p_3 \dots + D_n \cdot p_n, \quad (5.3)$$

kde p_{tot} reprezentuje celkový akustický tlak v blízkém poli, p_n tlak n -tého kruhového rezonátoru v blízkém poli a D_n korespondující průměr kruhového rezonátoru. Pokud některý z rezonátorů není kruhového tvaru, lze použít průměr ekvivalentního kruhu se stejnou plochou.

Ačkoli se Keelův způsob zdá jednoduchý, je zde několik věcí, na které je nutné si dát pozor. Keele předpokládá vyzařování do poloprostoru, nebo do pevného úhlu 2π . Naprostá většina reproduktorů má ale konečné rozměry a stává se všesměrovými na nízkých kmitočtech, což má za důsledek pokles kmitočtové charakteristiky až o 6 dB oproti hodnotám naměřeným v blízkém poli. Pokud je do testování zapojeno více vyzařovacích ploch, nestačí měřit pouze akustický tlak, ale je za potřebí použít systém, který měří velikost i fázi akustického tlaku. Pokud jsou vyzařovací plochy blízko sebe, může být měření znehodnoceno přeslechy. Pro získání odezvy reproduktorové ozvučnice v celém pásmu slyšitelnosti je za potřebí odezvu na nízkých kmitočtech změřenou v blízkém poli škálovat podle rozdílů vzdáleností a následně spojit ve vhodném bodě s charakteristikou změřenou například v bezodrazové komoře. [25]

6. NÁVRH OZVUČNICE

V této kapitole bude probrán postupný návrh ozvučnice typu transmission line. Konstruovanou ozvučnicí bude možné využít jako učební pomůcku, na které bude možné pozorovat správný nebo špatný návrh ozvučnice. Dále bude možné sledovat vliv různých konstrukčních prvků na výslednou kmitočtovou charakteristiku.

6.1 Požadované parametry

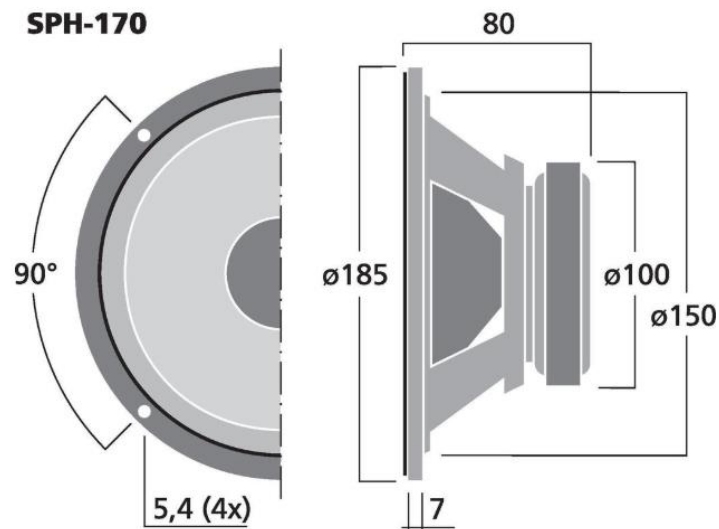
Výsledný výrobek by měl být variabilní řešení ozvučnice, na kterém bude snadno reprezentovatelný správný nebo špatný návrh ozvučnice. Obecně je hlavní požadavkem u reproduktorových ozvučnic vyrovnaná kmitočtová charakteristika. Vzhledem k jednotlivým konstrukčním prvkům, jejich vlivu na výslednou kmitočtovou charakteristiku a složitosti řešení se bude jednat o modulární ozvučnici, na které se za pomoci různě dlouhých modulů bude dát snadno měnit hodnota offsetu reproduktoru a pozorovat její vliv na výslednou kmitočtovou charakteristiku. Další způsob, jak lze teoreticky dosáhnout vyrovnané kmitočtové charakteristiky je umístění dvou reproduktorů s různými hodnotami offsetu, což bude také možné. Vzhledem k excitaci stojatého vlnění v různých místech dojde podle předpokladu k sečtení dvou různě zvlněných charakteristik a vyrovnání kmitočtové charakteristiky celkové.

6.2 Výběr reproduktoru

Při výběru reproduktoru byly brány v potaz reproduktory již zavedené v rámci laboratorních úloh, vzhledem k jejich již změřeným charakteristikám, ověřeným vlastnostem a zjednodušení postupu v případě poškození některého z výrobků. Pro ozvučnici typu transmission line se nabízely středobasové reproduktory Monacor SPH-210 a Monacor SPH-170. Při zohlednění poznatků z kapitoly 2.2 a následných simulacích vyšel jednoznačně lépe reproduktor Monacor SPH-170. Oproti svému konkurentovi disponuje podstatně menší hodnotou V_{as} a ne příliš nízkou hodnotou Q_{ts} . Základní parametry tohoto reproduktoru jsou shrnuty v následující tabulce a rozměry na Obr. 6.1.

Tabulka 6.1 Základní parametry reproduktoru Monacor SPH-170

Impedance Z	8 Ω
Rezonanční kmitočet f_s	38 Hz
Charakteristická citlivost	90 dB/W/m
Poddajnost závěsu C_{ms}	1,43 mm/N
Hmotnost membrány a spolukmitajícího sloupce vzduchu M_{ms}	12,5 g
Mechanický činitel jakosti Q_{ms}	2,38
Elektrický činitel jakosti Q_{es}	0,55
Celkový činitel jakosti Q_{ts}	0,44
Ekvivalentní objem V_{as}	37 l
Stejnoseměrný odpor kmitací cívky R_v	6,2 Ω
Silový faktor Bl	5,90 Tm
Indukce kmitací cívky L_e	0,45 mH
Efektivní plocha membrány	137 cm ²



Obr. 6.1 Rozměry reproduktoru Monacor SPH-170

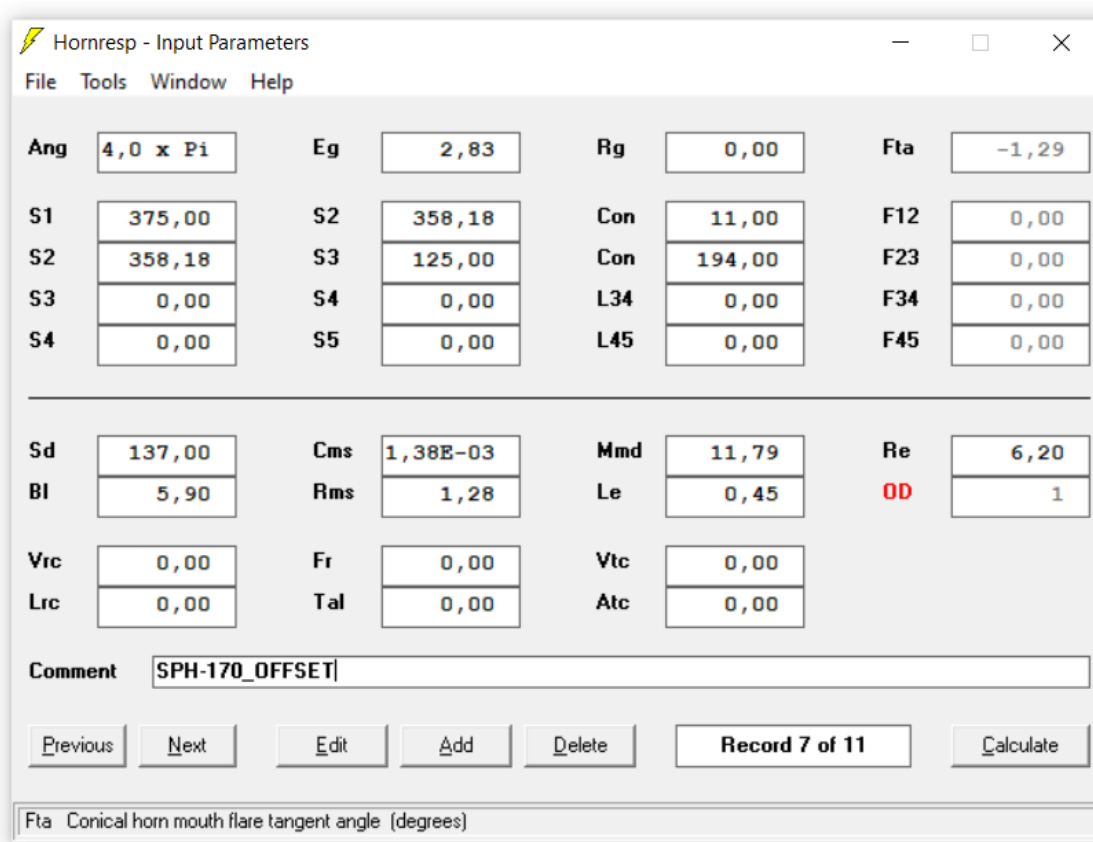
6.3 Postup návrhu v HornResp

Situace s dostupnými programy určenými k simulaci transmission line ozvučnice je poměrně složitá. Ačkoli bylo v minulosti volně dostupných programů několik, aktuálně je možné použít pouze jeden z nich. Z nedostupných stojí za zmínku software od firmy Leonard Audio, která následně tento projekt opustila. Dále byly k dispozici šablony do programu MathCad, vytvořené M. J. Kingem, který se bezesporu řadí mezi průkopníky v oblasti návrhu a simulace ozvučnic typu horn a transmission line. Na svém webu [15] má King dostupné velké množství kvalitní materiálů, nicméně podklady pro simulaci v prostředí MathCad, které byly k dispozici zcela zdarma, stáhl z důvodu častého zneužívání komerčními firmami. Jediným v současnosti dostupným programem pro simulaci ozvučnic typu transmission line je Hornresp od Davida J. McBeana, který je k dispozici zdarma.

Program Hornresp dokáže předpovědět odezvu ozvučnic uzavřených, bassreflexových, pásmová propust čtvrtého a šestého řádu, front a back loaded horn, transmission line. Zvukovody a porty mohou mít různé plochy průřezu – rozšiřující se, konstantní, zužující se. Hornresp umí zobrazit výsledky ve 4, 2, 1 nebo 0,5 π prostoru a při jakémkoli specifikovaném vstupním napětí. Mimo jiné nabízí i možnost simulace offsetu reproduktoru v délce zvukovodu.

Při spuštění programu se zobrazí hlavní okno (Obr. 6.2). Horní lišta nabízí menu File, které slouží především k otevírání a ukládání projektů. Menu Tools nabízí možnost volby vyzařovacího úhlu, druhu ozvučnice, uspořádání reproduktorů a důležitý nástroj Loudspeaker Wizard. V kolonce Window lze přepínat mezi jednotlivými okny programu - vstupní parametry, schematický diagram, jednotlivé grafy simulovaných veličin. V posledním menu horní lišty s názvem Help lze otevřít manuál programu, ale především je zde velmi užitečný Input Wizard, který po zadání parametrů ozvučnice

zobrazí schematický diagram a předdefinuje projekt, čímž značně usnadní práci. Horní polovina hlavního okna programu slouží k zadání vyzařovacího úhlu, vstupního napětí a výstupního odporu zesilovače a následně ploch průřezu a délek jednotlivých segmentů ozvučnice. Dolní část programu slouží k zadání parametrů reproduktoru. Snazší orientaci v programu a zadávaných hodnotách zajistí vysvětlivky, které se zobrazí v dolní části hlavního okna po namíření kurzoru na danou veličinu. Po zadání všech hodnot v hlavním okně je nejlepší otevřít Loudspeaker Wizzard z menu Tools. V levé části okna Loudspeaker Wizzard je vyobrazen zvolený graf, v pravé části lze snadno pomocí posuvníků měnit parametry reproduktoru nebo ozvučnice a pozorovat vliv jejich změny na zobrazenou charakteristiku.



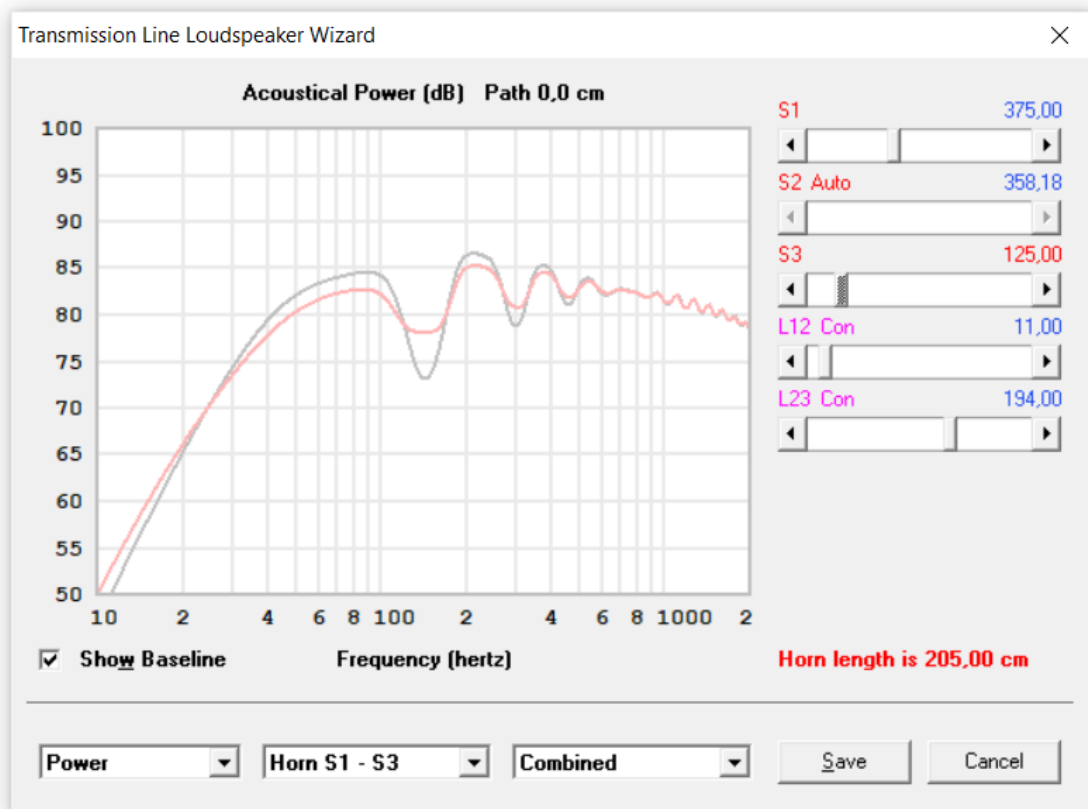
Obr. 6.2 Hlavní okno programu Hornresp

V následujících podkapitolách bude prezentován postup volby parametrů pro konkrétní variabilní řešení ozvučnice konstruované v rámci bakalářské práce a jejich vliv na kmitočtovou charakteristiku. V potaz je brán zvolený reproduktor Monacor SPH-170. Pro jednodušší orientaci a vyšší názornost je ve všech následujících grafech simulováno lehké tlumení ozvučnice.

6.3.1 Délka zvukovodu a plocha průřezu zvukovodu

Jak bylo popsáno v kapitolách 3.4.1 a 3.4.2, efektivní délka zvukovodu a plocha průřezu zvukovodu spolu vzhledem k akustické impedanci otevřeného konce zvukovodu souvisí a mají vliv na výslednou kmitočtovou charakteristiku a vlastnosti ozvučnice. Vzhledem ke svým značným výhodám a kompaktnějším rozměrům jsem zvolil geometrii se zmenšující se plochou průřezu zvukovodu v poměru 3:1. Délka zvukovodu závisí na několika faktorech. Mezi ně patří efektivní délka zvukovodu, Q_{ts} a f_s reproduktoru [9]. Po sérii simulací jsem nakonec výslednou délku zvolil 205 cm. Na

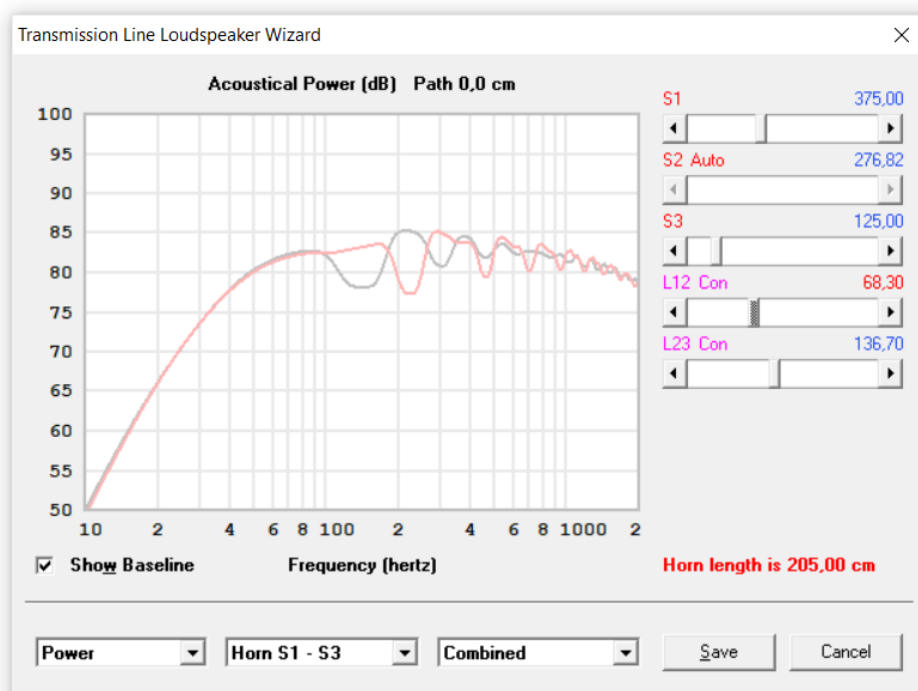
Obr. 6.3 lze pozorovat vliv zvolené geometrie na amplitudy rezonancí vedoucí k vyrovnanější kmitočtové charakteristice. Hodnota offsetu reproduktoru je nastavena na 110 mm, jelikož je to nejmenší možná hodnota offsetu reproduktoru u konkrétního řešení variabilní ozvučnice, kterou se zabývá tato práce.



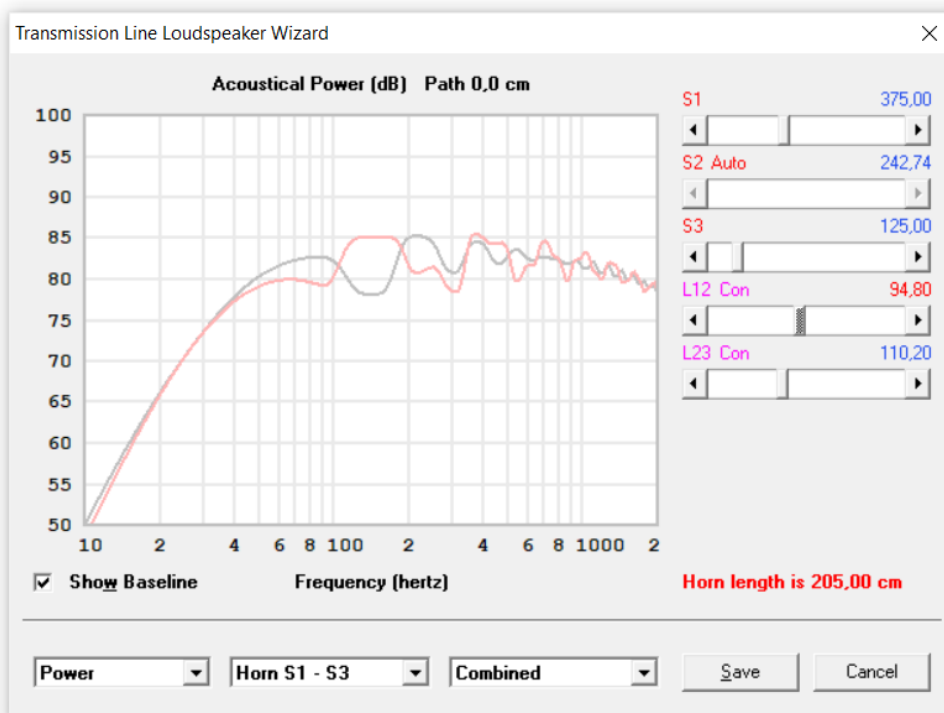
Obr. 6.3 Porovnání ozvučnice s konstantní (šedá křivka) a zužující se (červená křivka) plochou průřezu zvukovodu

6.3.2 Offset reproduktoru

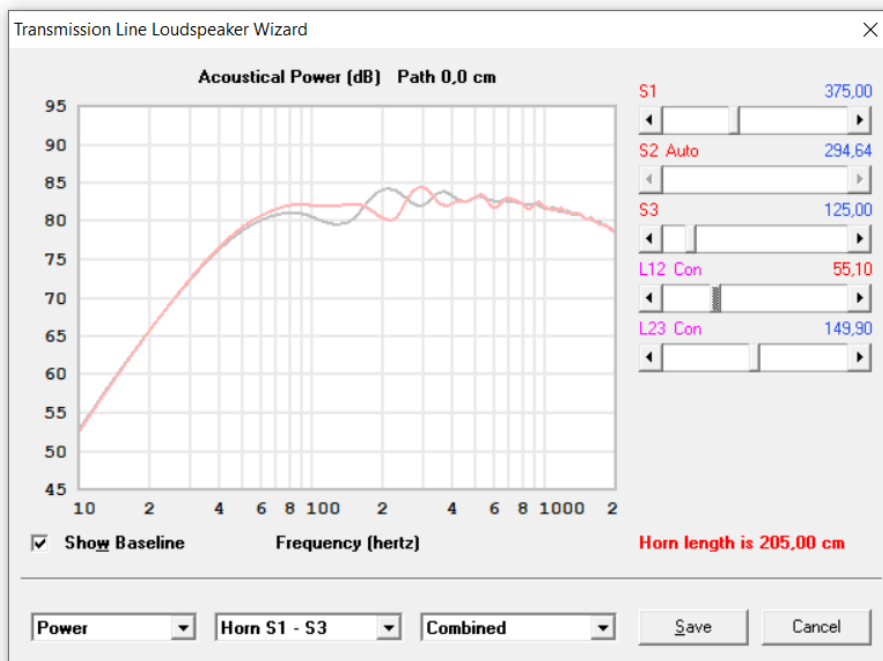
Offset reproduktoru má zásadní vliv na tvar výsledné kmitočtové charakteristiky a z tohoto důvodu bude u navržené ozvučnice možnost měnit hodnotu offsetu reproduktoru za pomoci výměnných modulů. Následující grafy demonstrují vliv správného (Obr. 6.4) a příliš velkého (Obr. 6.5) offsetu reproduktoru oproti výchozí poloze na začátku zvukovodu. Je důležité brát v potaz především vyrovnanost kmitočtové charakteristiky na nízkých kmitočtech, které nelze příliš ovlivnit vnitřním tlumením ozvučnice. Podle teoretických předpokladů lze dosáhnout vyrovnané kmitočtové charakteristiky umístěním dvou reproduktorů s různými hodnotami offsetu a správně zvoleným množstvím tlumícího materiálu (Obr. 6.6).



Obr. 6.4 Porovnání minimálního (šedá křivka) a vhodného (červená křivka) offsetu reproduktoru



Obr. 6.5 Porovnání minimálního (šedá křivka) a příliš velkého (červená křivka) offsetu reproduktoru

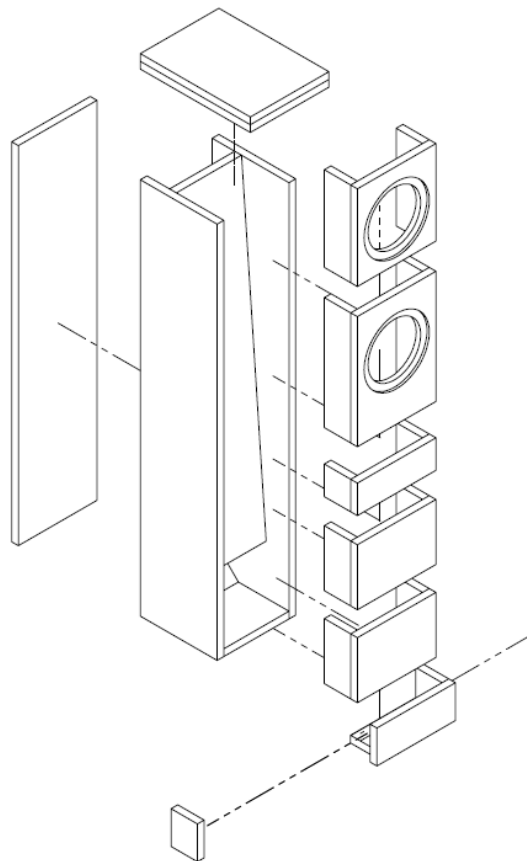


Obr. 6.6 Vyrovnání kmitočtové charakteristiky za použití dvou reproduktorů s různými hodnotami offsetu a vhodného množství tlumicího materiálu (8 kg/m^3)

6.4 Návrh mechanického uspořádání ozvučnice

V podkapitolách 4.1.4 a 6.3.2 byl popsán a simulován vliv hodnoty offsetu reproduktoru na výslednou kmitočtovou charakteristiku. Na základě těchto poznatků jsem navrhl variabilní reproduktorovou ozvučnici, která vychází ze základního tvaru ozvučnice typu transmission line se zužující se plochou průřezu zvukovodu. S ohledem na délku zvukovodu a co nejužší konstrukci jsem zvolil vnější rozměry ozvučnice $223 \cdot 1111 \cdot 331$ (Š · V · H). Šikmá vnitřní příčka zajišťuje zvolený poměr 3:1 uzavřeného a otevřeného konce zvukovodu. Výztuhy v dolní části zvyšují celkovou tuhost konstrukce a zamezují excitaci rohů a možnost vzniku turbulencí.

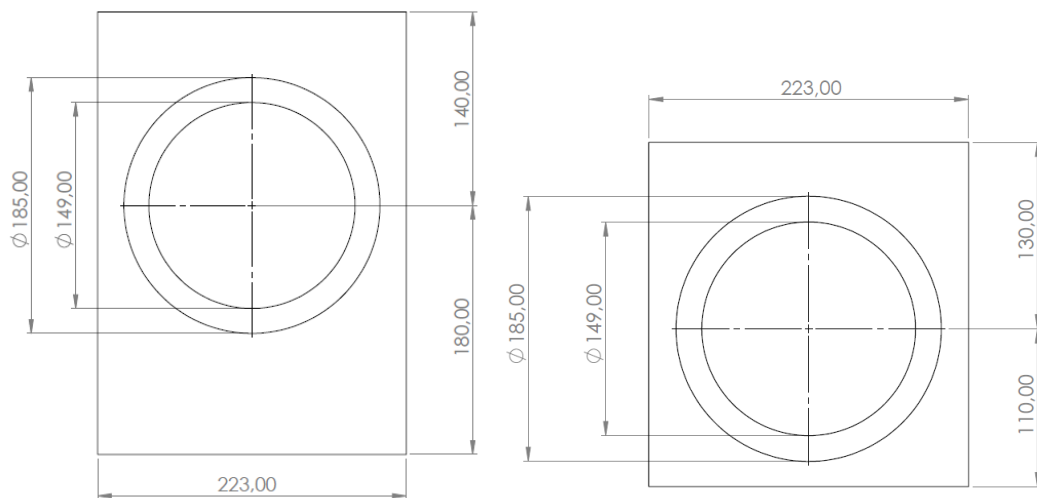
Celou konstrukci jsem následně rozdělil na několik samostatných částí, které zajišťují variabilitu celého řešení. Hlavní samonosnou konstrukci lze považovat za základní stavební kámen celé konstrukce. Pomocí pákových uzávěrů se k hlavní konstrukci bude dát připevnit vrchní víko, zadní víko, reproduktorové moduly a vložky. Možnost odepnutí veškerých komponentů zajišťuje snadný přístup do vnitřních prostor konstrukce, což usnadní možnou výměnu tlumicího materiálu. Samotné reproduktorové moduly a vložky různých velikostí potom zajistí snadnou změnu offsetu reproduktoru v délce zvukovodu, možnost změny vzdálenosti dvou reproduktorů a posuv celé reproduktorové dvojice.



Obr. 6.7 Rozpad jednotlivých komponentů variabilní ozvučnice

6.4.1 Návrh středobasových reproduktorových modulů

Přední část ozvučnice, která bude sloužit pro umístění reproduktorových modulů a vložek, jsem s ohledem na rozměry zvoleného reproduktoru rozdělil do dvanácti segmentů o délce 80 mm. Následně jsem navrhl dva reproduktorové moduly o délce 3 a 4 segmenty. Reprodukter se ani v jednom případě nenachází ve středu modulu, ale je vychýlen takovým způsobem, aby otočením modulu došlo ke změně hodnoty offsetu reproduktoru v délce zvukovodu. Střídáním a otáčením těchto modulů, popřípadě přidáním vložky o délce 1-5 segmentů na začátek zvukovodu lze poté snadno měnit hodnotu offsetu reproduktoru. Na následujícím obrázku lze vidět nákres obou reproduktorových modulů.



Obr. 6.8 Reproduktorové moduly o délce 4 a 3 segmenty

Tabulka 6.2 Hodnoty vzdálenosti středu reproduktorů od okrajů modulu

vzdálenost středu reproduktoru od okrajů modulu o velikost 4 [mm]	x	140
	y	180
vzdálenost středu reproduktoru od okrajů modulu o velikost 3 [mm]	a	110
	b	130

V následujících tabulkách je znázorněn postup výpočtu offsetu reproduktorů pro jednotlivé moduly a výčet všech možných hodnot offsetu reproduktoru. Vzhledem k násobnosti a snaze potlačit především vlnu o délce 3/4 vlnové délky se za běžných okolností volí hodnota offsetu maximálně do jedné třetiny délky zvukovodu. Umístěním reproduktoru za tuto hodnotu se bude dát pozorovat snížení reprodukce nízkých kmitočtů způsobené nedostatečnou excitací vlny o délce 1/4 vlnové délky.

Tabulka 6.3 Offset jednoho reproduktoru (modul délky 240 mm vlevo, 320 mm vpravo)

Vzorec pro výpočet offsetu reproduktoru (délka modulu 240mm)	Výsledná hodnota offsetu [mm]	Vzorec pro výpočet offsetu reproduktoru (délka modulu 320mm)	Výsledná hodnota offsetu [mm]
$O1.1 = a$	110	$O2.1 = x$	140
$O1.2 = b$	130	$O2.2 = y$	180
$O1.3 = a + 80$	190	$O2.3 = x + 80$	220
$O1.4 = b + 80$	210	$O2.4 = y + 80$	260
$O1.5 = a + 2 \cdot (80)$	270	$O2.5 = x + 2 \cdot (80)$	300
$O1.6 = b + 2 \cdot (80)$	290	$O2.6 = y + 2 \cdot (80)$	340

Tabulka 6.4 Všechny hodnoty offsetu reproduktoru při střídání reproduktorových modulů

Vzorec pro výpočet hodnoty offsetu reproduktoru	Výsledná hodnota offsetu reproduktoru [mm]
$O1.1 = a$	110
$O1.2 = b$	130
$O2.1 = x$	140
$O2.2 = y$	180
$O1.3 = a + 80$	190
$O1.4 = b + 80$	210
$O2.3 = x + 80$	220
$O2.4 = y + 80$	260
$O1.5 = a + 2 \cdot (80)$	270
$O1.6 = b + 2 \cdot (80)$	290
$O2.5 = x + 2 \cdot (80)$	300
$O2.6 = y + 2 \cdot (80)$	340
$O1.5 = a + 3 \cdot (80)$	350
$O1.6 = b + 3 \cdot (80)$	370
$O2.5 = x + 3 \cdot (80)$	380
$O2.6 = y + 3 \cdot (80)$	420
$O1.5 = a + 4 \cdot (80)$	430
$O1.6 = b + 4 \cdot (80)$	450
$O2.5 = x + 4 \cdot (80)$	460
$O2.6 = y + 4 \cdot (80)$	500
$O1.5 = a + 5 \cdot (80)$	510
$O1.6 = b + 5 \cdot (80)$	530
$O2.5 = x + 5 \cdot (80)$	540
$O2.6 = y + 5 \cdot (80)$	580
$O1.5 = a + 6 \cdot (80)$	570
$O1.6 = b + 6 \cdot (80)$	590
$O2.5 = x + 6 \cdot (80)$	600
$O2.6 = y + 6 \cdot (80)$	640
$O1.5 = a + 7 \cdot (80)$	650
$O1.6 = b + 7 \cdot (80)$	670
$O2.5 = x + 7 \cdot (80)$	680
$O2.6 = y + 7 \cdot (80)$	720
$O1.5 = a + 8 \cdot (80)$	730
$O1.6 = b + 8 \cdot (80)$	750
$O2.5 = x + 8 \cdot (80)$	760
$O2.6 = y + 8 \cdot (80)$	800
$O2.5 = x + 9 \cdot (80)$	810
$O2.6 = y + 9 \cdot (80)$	830

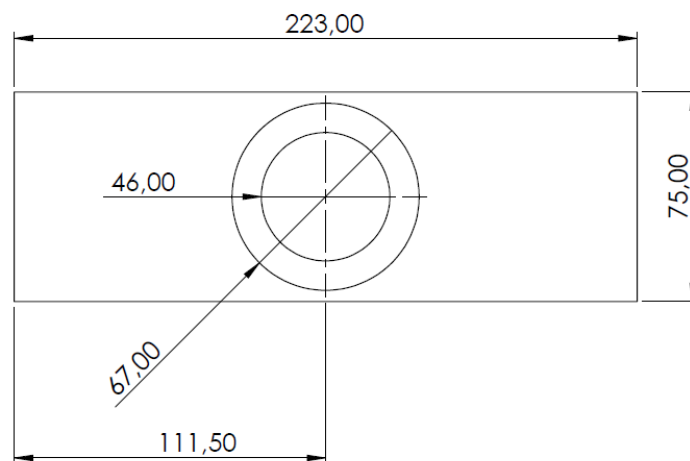
Volba správného offsetu jednoho reproduktoru je způsob, kterým lze docílit vyrovnané kmitočtové charakteristiky. Další možností, kterou tohoto lze dosáhnout je umístění dvou reproduktorů s různými hodnotami offsetu. Pomocí navržených reproduktorových modulů lze otáčením, popřípadě vsunutím vložky mezi moduly, snadno měnit vzdálenost dvou reproduktorů. Celou dvojici reproduktorů lze poté také posouvat v délce zvukovodu buď jejím otočení (o 50 mm), nebo přidáním vložky libovolné velikosti (o $n \cdot 80$ mm) mezi reproduktorové moduly. Při použití dvou reproduktorů se nabízí využití reproduktorového uspořádání D'Appolito, které spočívá v umístění výškového reproduktoru přesně do středu mezi dva reproduktory středobasové. Směrová charakteristika tohoto uspořádání bude vždy vertikálně symetrická. [1] Ačkoli to není cílem této práce, s ohledem na možnost využití tohoto výrobku k měření reproduktorového uspořádání D'Appolito jsem vyrobil 2 reproduktorové moduly o délce 3 segmenty. To v budoucnu umožní měřit vlastnosti tohoto reproduktorového uspořádání ve dvou variantách.

Tabulka 6.5 Vzájemná vzdálenost středů dvou reproduktorů

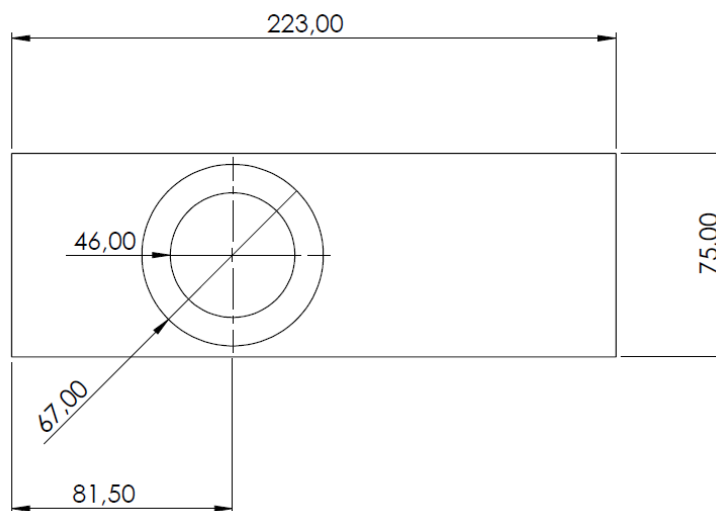
Vzorec pro výpočet vzdálenosti středů reproduktorů	Vzdálenost středů reproduktorů [mm]
$L1 = x + a$	250
$L2 = x + b$	270
$L3 = y + a$	290
$L4 = y + b$	310
$L5 = L1 + 80$	330
$L6 = L2 + 80$	350
$L7 = L3 + 80$	370
$L8 = L4 + 80$	390
$L9 = L1 + 2 \cdot 80$	410
$L10 = L2 + 2 \cdot 80$	430
$L11 = L3 + 2 \cdot 80$	450
$L12 = L4 + 2 \cdot 80$	470
$L13 = L1 + 3 \cdot 80$	490
$L14 = L2 + 3 \cdot 80$	510
$L15 = L3 + 3 \cdot 80$	530
$L16 = L4 + 3 \cdot 80$	550
$L17 = L1 + 4 \cdot 80$	570
$L18 = L2 + 4 \cdot 80$	590
$L18 = L3 + 4 \cdot 80$	610
$L20 = L4 + 4 \cdot 80$	630
$L21 = L1 + 5 \cdot 80$	650
$L22 = L2 + 5 \cdot 80$	670
$L23 = L3 + 5 \cdot 80$	690
$L24 = L4 + 5 \cdot 80$	710

6.4.2 Návrh výškových reproduktorových modulů

Vzhledem k plánovanému vývoji tohoto projektu do budoucna a sestrojení plnohodnotné ozvučnice s možností reproduktorového uspořádání D'Appolito je za potřebí výroba modulu pro výškový reproduktor. Tento modul jsem realizoval jako vložku o délce jednoho segmentu s výřezem pro reproduktor Monacor DT-25N, který se již osvědčil při jiných aplikacích v kombinaci se mnou zvoleným středobasovým reproduktorem. V rámci tohoto projektu je modul pro výškový reproduktor realizován dvěma způsoby, kdy jednou je reproduktor ve středu modulu a v druhém případě je vychýlen na nenásobnou hodnotu kvůli zamezení nežádoucích difrakcí.



Obr. 6.9 Symetrický modul pro výškový reproduktor



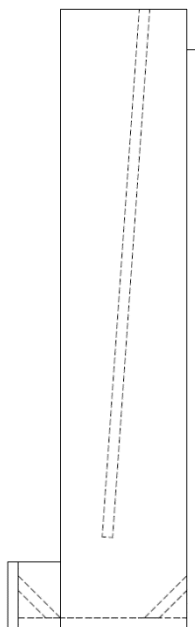
Obr. 6.10 Asymetrický modul pro výškový reproduktor

7. REALIZACE OZVUČNICE

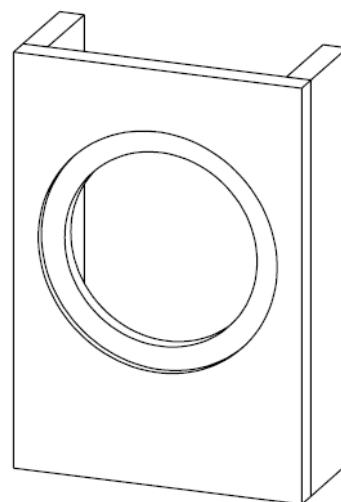
Hlavní konstrukce, zadní a vrchní víko i reproduktorové moduly a vložky jsem navrhl z 18mm MDF desky. Tento materiál je hojně využíván při konstrukci reproduktorových ozvučnic, jelikož je hustý a disponuje dobrým tlumením. Důležitá je také homogennost, díky které lze materiál snadno obrábět. Jednotlivé díly byly vyrobeny podle výkresů, které se nachází v elektronické příloze této práce.

S ohledem na mechanické uspořádání ozvučnice bylo nutné reproduktorové moduly a vložky navrhnout jako přední desku s bočnicemi, tedy profil tvaru U, což je zásadní změnou oproti původnímu návrhu, kdy byly tyto díly pouze deskou. Tento tvar dodá celkovou tuhost konstrukce a možnost použití větších pákových uzávěrů. Pokud by byly reproduktorové moduly a vložky realizovány pouze jako deska, mohlo by používáním dojít k přílišnému namáhání uzávěrů a následnému mechanickému poškození příliš úzké desky. Této skutečnosti byla uzpůsobena hlavní konstrukce, která byla v přední části zkrácena s ohledem na rozměry modulů. Celý návrh byl v průběhu řešení průběžně modelován v softwaru Solidworks pro snadnou vizualizaci a jednoduché zpracování výkresů pro jednotlivé části.

Prvním krokem následné realizace bylo sestavení hlavní konstrukce. Boky ozvučnice, vnitřní příčku, dno a vnitřní výztuhu jsem k sobě spojil vruty na tupo a následně slepil disperzním lepidlem na dřevo Soudal 67A. Součástí hlavní konstrukce je pata, kterou jsem obdobným způsobem vyrobil samostatně, následně spasoval na potřebné rozměry a přilepil.



Obr. 7.1 Výsledná hlavní konstrukce s patou



Obr. 7.2 Výsledný reproduktorový modul

Stejným procesem výroby prošly i reproduktorové moduly a vložky. Jednotlivé díly v této fázi výroby jsou v příloze 5. Poté jsem provedl zábrus a tmelení spojů na potřebných místech. Následně jsem zarovnal výšky jednotlivých modulů tak, aby byly všechny možné kombinace vložek a modulů stejně vysoké. Během tohoto procesu došlo ke zničení některých modulů a vložek a bylo nutné tyto díly vyrobit opakovaně. Ačkoli byly dodané díly vyrobeny za použití CNC obráběcího stroje, u některých byly odchylky reálných rozměrů od výkresu až o 2 milimetry. Tato skutečnost celý výrobní proces značně zpomalila. Při použití velmi tuhého těsnění jsou zde extrémní nároky na přesnost, a proto bylo k nutně některé díly zdlouhavě dolepuvat dýhami, jindy bylo případné nerovnosti potřeba dotmelit. Jakákoli menší nerovnost nebo nepřesná výška by způsobila, že by nebylo možné ozvučnici utěsnit a přípravek by byl do značné míry znehodnocen. Následovalo zabroušení předních hran ozvučnice pro zamezení difrakcí a mírné zabroušení některých hran konstrukce a vík, aby nedošlo k poškození potahovací látky během její aplikace. Vzhledem k tomu, že MDF je savý materiál, bylo potřeba všechny plochy před aplikací samolepicího těsnění a potahovací látky napenetrovat ředěným chemoprenem. Dalším krokem k dokončení ozvučnice bylo nalepení samolepicího těsnění na všechny potřebné plochy. Poté jsem veškeré vnější plochy potáhl speciální samolepicí potahovací látkou (příloha 7). Jelikož ani výřezy pro středobasový reproduktor nebyly přesné, bylo nutné dorovnat hloubku výřezu tak, aby byl reproduktor v rovině s přední deskou. Posledním krokem k funkční variabilní ozvučnici je namontování pákových uzávěrů, které zajistí dostatečné přitlačení těsnění. Těsnění modulů a vložek ve vertikální rovině zajistí pákové uzávěry namontované přímo na bočnicích jednotlivých modulů, vložek a hlavní konstrukce, těsnění v horizontální rovině potom dodá vrchní přitlačné víko. To je konstruováno jako dvě identické desky splepené k sobě pro zvýšení celkové tuhosti a eliminaci možného mechanického poškození při používání uzávěrů.

8. ZÁVĚR

Ačkoliv ozvučnice typu transmission line vykazuje několik výhod oproti běžnějším typům ozvučnic, je oblast její konstrukce v současné době zkoumána minimálně. Množství publikovaných materiálů je malé, případně se často jedná o texty bez vědeckého podkladu. Konkrétní konstrukční prvky a postupy řeší pouze dva autoři (G. L. Augspurger a M. J. King). V průběhu bakalářské práce byly definovány vhodné konstrukční prvky a postupy spolu s popisem možných nedostatků a jejich vlivu především na výslednou kmitočtovou charakteristiku. Spolu s charakterizováním kritérií výběru vhodného reproduktoru s ohledem na nemožnost určení přesných parametrů v důsledku komplexnosti návrhu konstrukce daného typu ozvučnice dává bakalářská práce základy pro určení vhodných konstrukčních prvků ozvučnice a její následný návrh a konstrukci. Bylo navrženo řešení variabilní ozvučnice použitelné jako učební pomůcka pro demonstraci vlivu konstrukčních prvků právě na výslednou kmitočtovou charakteristiku.

Návrh konstrukce byl realizován v několika fázích. Prvním krokem konstrukčního řešení ozvučnice byla volba vhodné vnitřní geometrie, která je posléze již pevnou součástí konstrukce bez možnosti změny. Na základě rozboru konstrukčních parametrů byla zvolena ozvučnice se zmenšující se plochou průřezu zvukovodu v kombinaci s offset reproduktorem. Volba vhodného reproduktoru proběhla po zvážení analyzovaných parametrů a po následných simulacích byly konkrétní parametry ozvučnice uzpůsobeny podle zvoleného reproduktoru.

Variabilita ozvučnice spočívá v možnosti změny umístění samostatného reproduktoru nebo reproduktorové dvojice v délce zvukovodu. Pomocí konstruovaných reproduktorových modulů a vložek různé délky lze demonstrovat vliv několika konstrukčních prvků - offset samostatného reproduktoru, vzájemná vzdálenost reproduktorové dvojice a offset reproduktorové dvojice v délce zvukovodu. Různých hodnot těchto vzdáleností lze dosáhnout otočením nebo změnou umístění zmiňovaných modulů a vložek. Jednotlivé možné hodnoty offsetu samostatného reproduktoru jsou uvedeny v tabulce 6.4 a možné hodnoty vzdálenosti středů dvojice reproduktorů jsou v tabulce 6.5. Konstrukce je navržena vzhledem k možnému plánovanému vývoji ozvučnice do budoucna a jsou tudíž přidány také moduly pro výškový reproduktor. Po návrhu vhodné výhybky a při použití dvou identických reproduktorových modulů bude možné demonstrovat chování reproduktorového uspořádání D'Appolito. Zároveň je počítáno s možnou aplikací a výměnou vnitřního tlumení ozvučnice, což umožní pozorování jeho vlivu na výslednou kmitočtovou charakteristiku.

Měření kmitočtových charakteristik konstruované ozvučnice je možné v bezodrazové komoře s dostatečnými rozměry, která ovšem není v rámci VUT dostupná. Možným řešením by bylo například navázání spolupráce s jiným pracovištěm nebo pro ozvučnici s více reproduktory či rezonátory využití metody měření v blízkém poli. Toto měření vyžaduje nejenom hodnoty hladiny akustického tlaku, ale také fáze. Ačkoli VUT disponuje systémem, který umožňuje měření fáze, je toto měření komplikované a fáze v bezodrazové komoře nevychází konstantní. Pro získání směrodatných charakteristik je za potřeby vyvinout spolehlivou metodu pro měření ozvučnic s více reproduktory či rezonátory.

Konstruovaná variabilní ozvučnice typu transmission line je prototypem, výrobek obdobného typu nebyl doposud nikdy konstruován. Složitost konstrukce si vyžádala

množství optimalizací bez možnosti předchozího předvídání, které způsobily zpoždění a časovou náročnost práce. Pro plně funkční výrobek bude v budoucnu nutné před zadáním vlastních laboratorních úloh změřit kmitočtové charakteristiky, například některým z výše popisovaných řešení. Vzhledem k variabilitě konstruované ozvučnice bude ovšem možné zpracovat zadání více úloh založených na zkoumání několika konstrukčních prvků ozvučnice s důrazem na co nejvyrovnanější kmitočtovou charakteristiku – vhodná hodnota offsetu jednoho reproduktoru, vhodná vzájemná vzdálenost reproduktorové dvojice a její vhodné umístění v délce zvukovodu, vliv vnitřního tlumení. V budoucnu bude teoreticky možné také měření kmitočtových a směrových charakteristik reproduktorového uspořádání D'Appolito.

Literatura

- [1] SCHIMMEL, J. Elektroakustika – skripta, první vydání. VUT v Brně FEKT UTKO, 2013. 167 stran. ISBN 978-80-214-4716-5., [cit. 20. 03. 2020]
- [2] SVOBODA, L.; ŠTEFAN, M. Reproduktory a reproduktorové soustavy. SNTL, Praha, 1976. 328 s. 04-524-76., [cit. 15. 03. 2020].
- [3] *Reproduktor*, Wikipedia [online]. 2020, poslední aktualizace 14.02.2020 [cit. 15. 03. 2020]. Dostupné z URL: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Reproduktor>>.
- [4] SMALL H. R. Direct-Radiator Loudspeaker System Analysis. IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics. 1971, AU-19, s. 269-281. [cit. 20. 03. 2020].
- [5] *Thiele/Small*, Wikipedia [online]. 2020, poslední aktualizace 06.01.2020 [cit. 20. 03. 2020]. Dostupné z URL: <<http://en.wikipedia.org/wiki/Thiele/Small>>.
- [6] *Význam TS parametrů*, Audioweb [online]. 2007, poslední aktualizace 14. 4. 2007 [cit. 20. 03. 2020]. Dostupné z URL: <<http://www.audioweb.cz/viewtopic.php?id=15624&p=2>>.
- [7] *Excursion (audio)*, Wikipedia [online]. 2020, poslední aktualizace 07.01.2020 [cit. 20. 03. 2020]. Dostupné z URL: <[https://en.wikipedia.org/wiki/Excursion_\(audio\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Excursion_(audio))>.
- [8] NEWELL, Philip a Keith HOLLAND. *Loudspeakers: For music recording and reproduction*. Burlington: Focal Press, 2007. ISBN 0-2405-2014-9. [cit. 25. 03. 2020].
- [9] KING, Martin J. *Classic Transmission Line Enclosure Alignment Tables* [online]. 20.10.2006, , 20-27 [cit. 2020-03-29]. Dostupné z: http://www.quarter-wave.com/TLS/Alignment_Tables.pdf
- [10] *Quarter Wave Resonators* [online]. 4.10.2002 [cit. 2020-03-29]. Dostupné z: http://www.geocities.ws/rbrines1/Pages/Quarter_Wave_Resonators.html#TL
- [11] TOMAN, Kamil. Reproduktory a reprosoustavy 1. díl [Česko: s.n.], 2001. ISBN 859-14-592-8080-5.

- [12] COLLOMS, Martin a Paul DARLINGTON. *High Performance Loudspeakers: Optimising High Fidelity Loudspeaker Systems*. Seventh Edition. John Wiley & Sons, 2018. ISBN 9781118706251.
- [13] Transmission line loudspeaker. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Transmission_line_loudspeaker#cite_note-tdl_reference-2
- [14] Transmission line white paper. *Sanders Sound Systems* [online]. [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: <http://www.sanderssound.com/technical-white-papers/56-transmission-line-white-paper>
- [15] KING, Martin J. *Quarte Wavelenght Loudspeaker Design* [online]. 2002, 27.1.2019 [cit. 2020-03-31]. Dostupné z: <http://www.quarter-wave.com/>
- [16] OLNEY, Benjamin. A method of eliminating cavity resonance, extending low frequency response and increasing acoustical damping in cabinet type loudspeakers. *The Journal of the Acoustical Society of America*. Acoustical Society of America, 1936, (8).
- [17] BAILEY, Arthur R. A non-resonant loudspeaker enclosure. *Wireless World*. 1965.
- [18] BAILEY, Arthur R. The transmission line loudspeaker enclosure. *Wireless World*. 1972.
- [19] AUGSPURGER, George L. Loudspeakers on damped pipes. *Journal of Audio Engineering Society*. 2000, (48), 426-436.
- [20] KING, Martin J. *Anatomy of a Transmission Line Loudspeaker* [online]. 17.5.2006 [cit. 2020-05-29]. Dostupné z: http://www.quarter-wave.com/TLs/TL_Anatomy.pdf
- [21] LOCANTHI, B.N. Application of electric circuit analogies to loudspeaker design problems. *Journal of Audio Engineering Society*. 1971, (19), 778-785
- [22] KING, Martin J. *Transmission Line and Back Loaded Horn Physics* [online]. 29.3.2013 [cit. 2020-07-26]. Dostupné z: http://www.quarter-wave.com/Horns/TL_and_BLH_Physics.pdf

- [23] KING, Martin J. Transmission line theory: Advanced Transmission Line Modeling Techniques [online]. 05.07.2002, , 1-5 [cit. 2020-08-02]. Dostupné z: http://www.quarter-wave.com/TLS/Advanced_Models.pdf
- [24] How does constrained layer damping work? [online]. [cit. 2020-08-02]. Dostupné z: https://www.soundproofingcompany.com/soundproofing_101/comp-how-does-constrained-layer-damping-work
- [25] D'APPOLITO, Joe. Measuring Loudspeaker Low-Frequency Response [online]. [cit. 2020-08-02]. Dostupné z: <http://www.audiomatica.com/wp/wp-content/uploads/Testing-Loudspeakers-at-low-Frequencies-with-CLIO.pdf>
- [26] KEELE, D.B., “Low-Frequency Loudspeaker Assessment by Near-Field Sound Pressure Measurement”, J. Audio Engineering Society, 04. 1974, (22), 154-162

Seznam příloh

Příloha 1 - Výsledná sestava pro měření vlivu offsetu samostatného reproduktoru	57
Příloha 2 - Výsledná sestava pro měření dvojice reproduktorů	58
Příloha 3 - Výsledná sestava pro měření reproduktorového uspořádání D'Appolito	59
Příloha 4 - Rozložení pákových uzávěrů	60
Příloha 5 - Fotografie jednotlivých vložek a modulů po sešroubování a slepení	61
Příloha 6 - Fotografie jednotlivých vložek a modulů po aplikaci potahovací látky a těsnění	64
Příloha 7 - Fotografie hlavní konstrukce po aplikaci potahovací látky a těsnění	69

Součástí této práce je i elektronická příloha obsahující výkresy, které byly předlohou pro výrobu jednotlivých dílů konstrukce, modulů a jednotlivých vložek. Uspořádání elektronické přílohy je uvedeno v souboru *tree.txt*, nacházející se v hlavní složce přílohy.


Příloha 1 - Výsledná sestava pro měření vlivu offsetu samostatného reproduktoru

1		2		3		4			
								A	
								B	
								C	
								D	
								E	
Material:						Description: konstrukce_seslava_spatou			
Finish:						Drawn by:		Drawn Date:	
		Document Type:				Checked/Approved by:		Checked/Approved Date:	
Drawing Scale:		Legal Owner:				Part Number:			
Approx Weight: Kg		Projection Method: THIRD ANGLE				Drawing Number:		Sheet:	Revision:
Sheet Size: A4						1 of 1			
F									

Příloha 3 - Výsledná sestava pro měření reproduktorového uspořádání D'Appolito

1		2		3		4		
								A
								B
								C
								D
								E
Material:				Description:		konstrukce_sestava_spatou		
Finish:				Drawn by:		Drawn Date:		
Drawing Scale:		Document Type:		Checked/Approved by:		Checked/Approved Date:		
Approx Weight:		Legal Owner:		Part Number:		F		
Projection Method:		Sheet Size:		Drawing Number:		Sheet		
THIRD ANGLE		A4				1 of 1		
						Revision:		

Příloha 4 - Rozložení pákových uzávěrů

1		2		3		4		A	
									B
									D
Material:				Description:		konstrukce_seslava_spalou_zamky_		F	
Finish:				BF					
Drawing Scale:		Document Type:		Drawn by:		Drawn Date:			
Approx Weight:		Legal Owner:		Checked/Approved by:		Checked/Approved Date:			
Kg				Part Number:					
Projection Method:		Sheet Size:		Drawing Number:		Sheet:			
THIRD ANGLE		A4				1 of 1			
						Revision:			

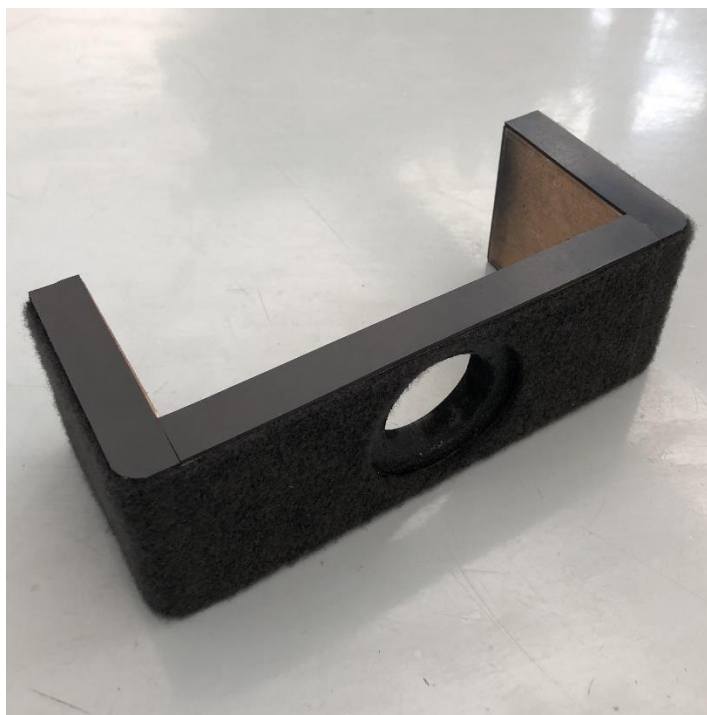
Příloha 5 - Fotografie jednotlivých vložek a modulů po sešroubování a slepení

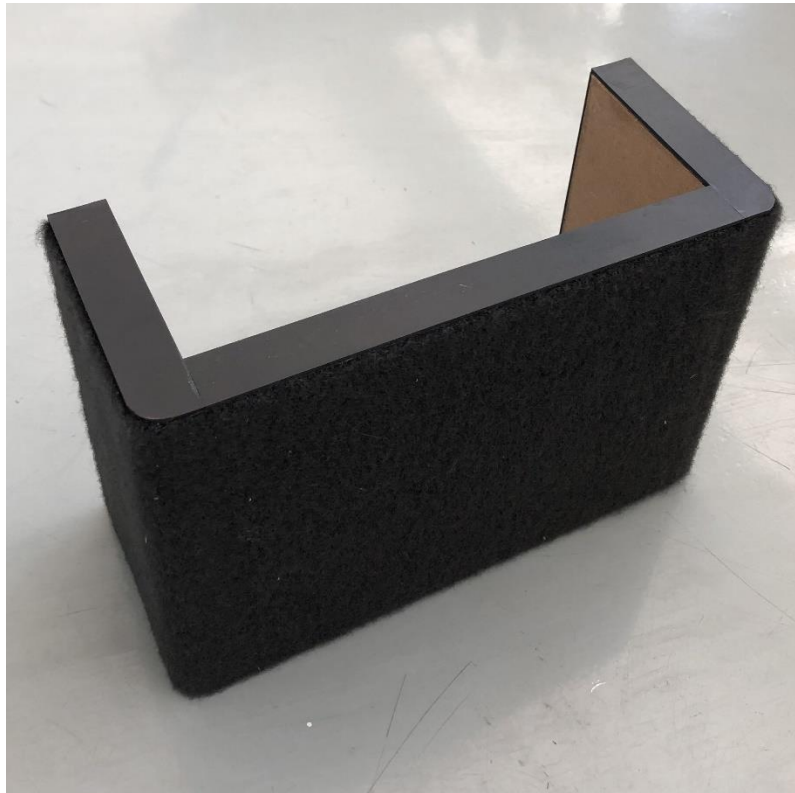
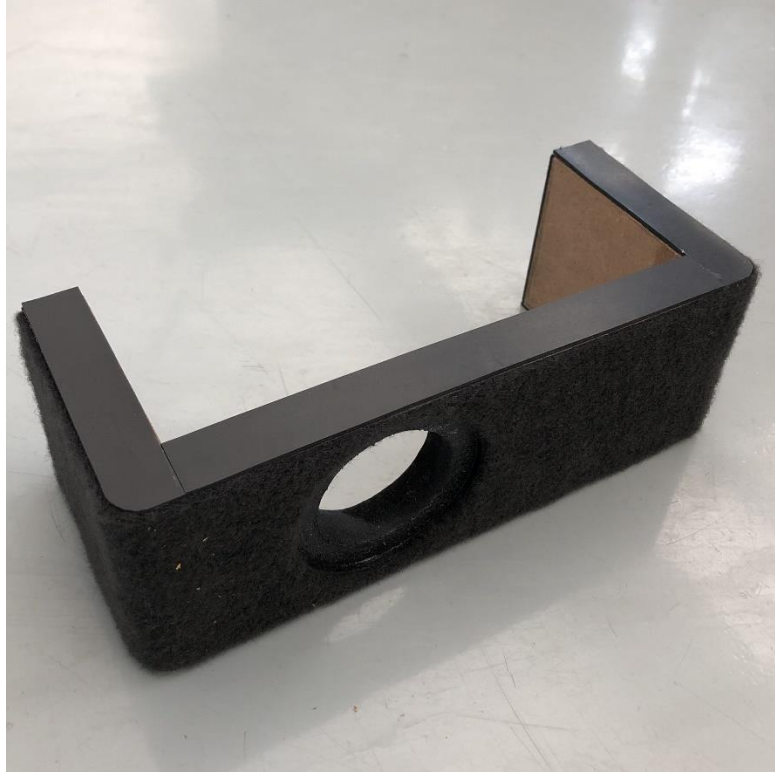


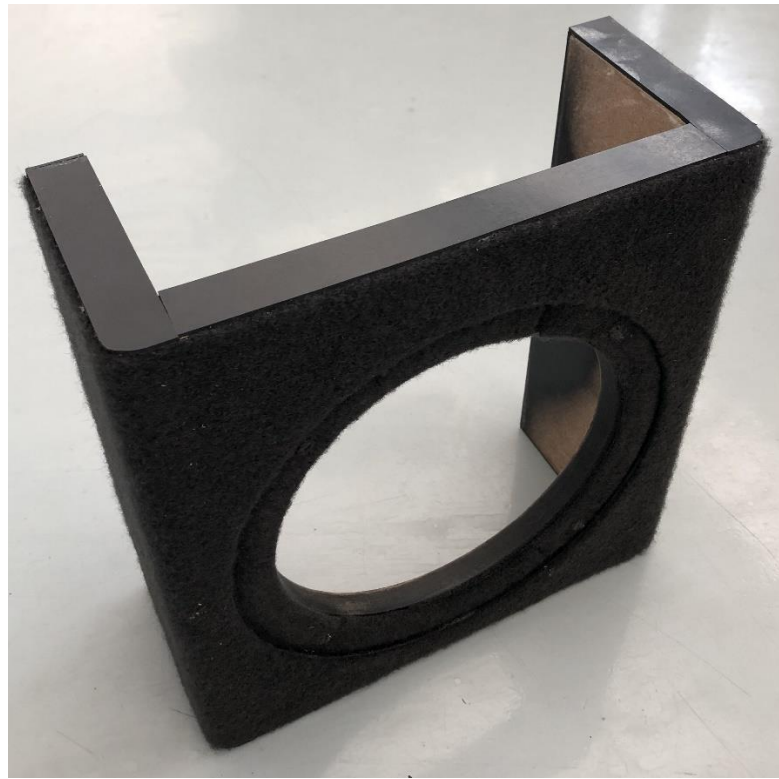


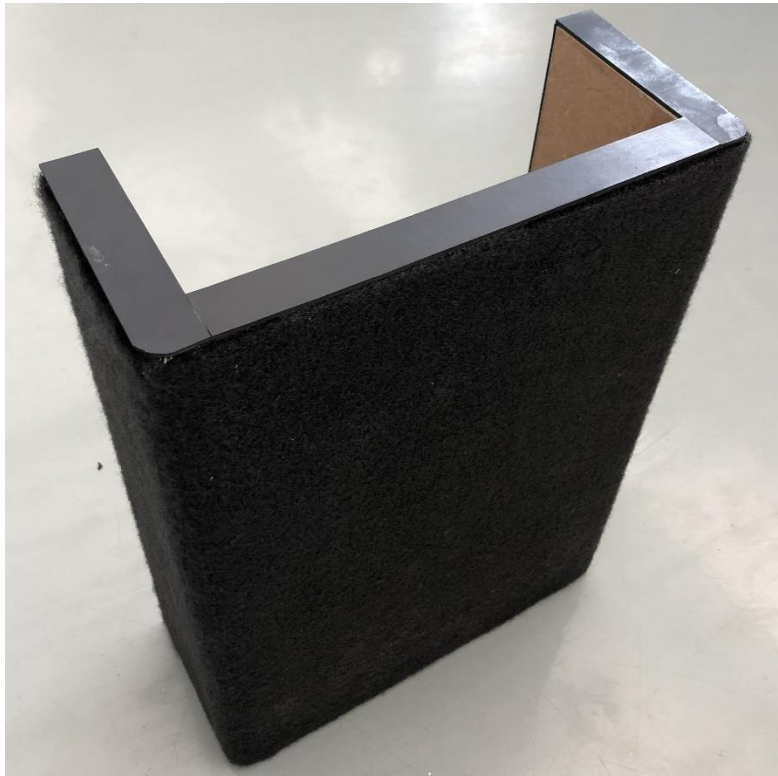
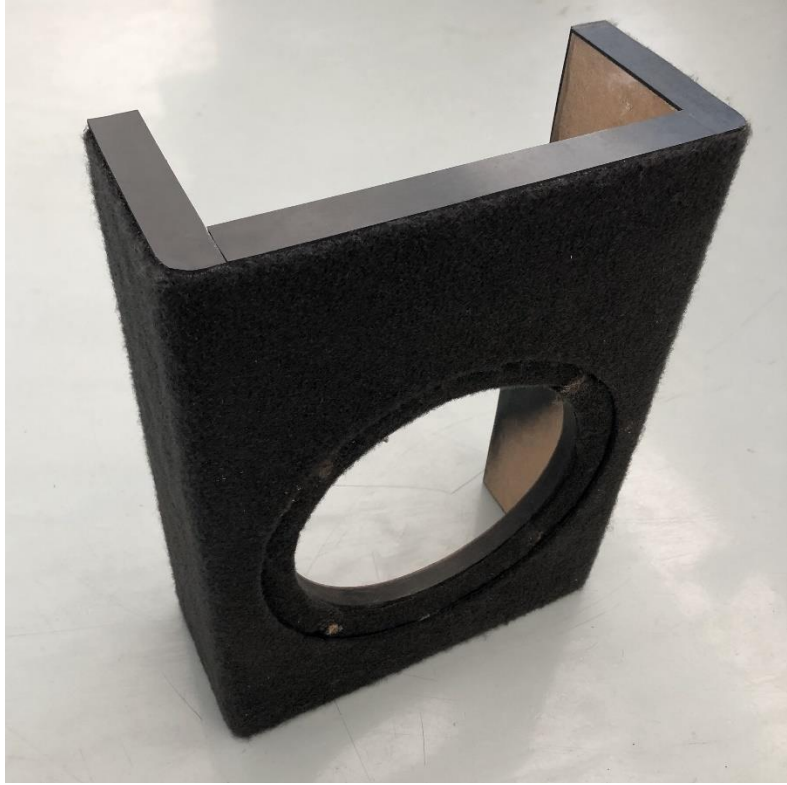


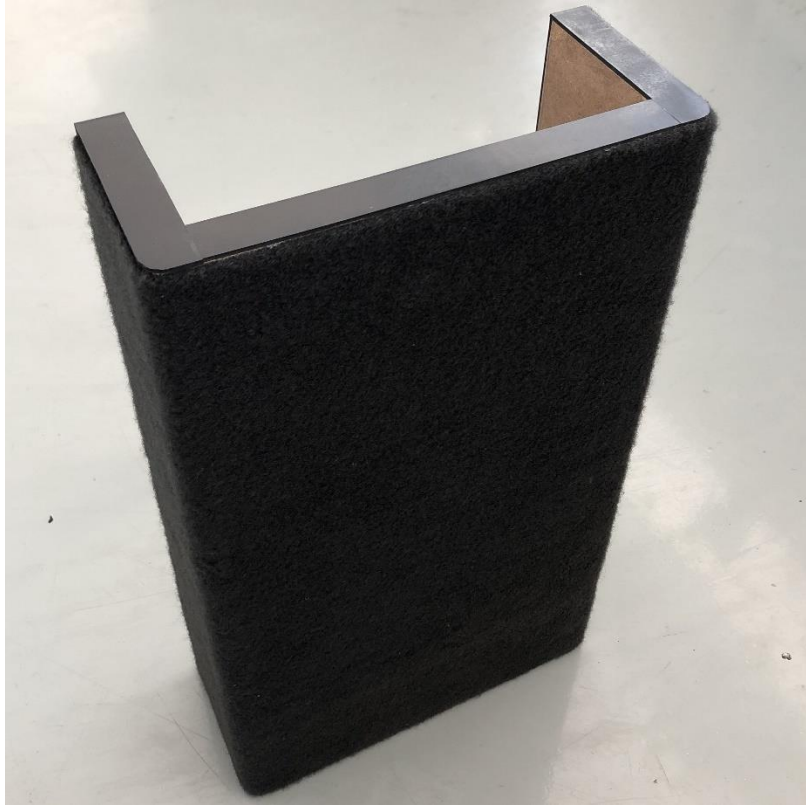
Příloha 6 - Fotografie jednotlivých vložek a modulů po aplikaci potahovací látky a těsnění











Příloha 7 - Fotografie hlavní kosntrukce po aplikaci potahovací látky a těsnění

