

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

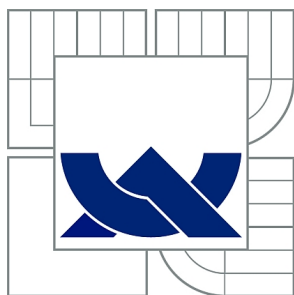
MĚŘENÍ CHARAKTERISTIK REPRODUKTORU V RŮZNÝCH TYPECH
OZVUČNICE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

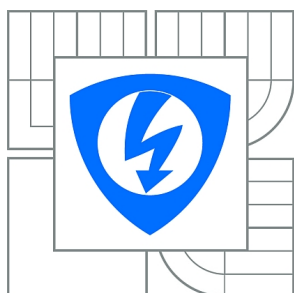
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

TOMÁŠ KONEČNÝ

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

MĚŘENÍ CHARAKTERISTIK REPRODUKTORU V RŮZNÝCH TYPECH OZVUČNICE

MEASUREMENT OF LOUDSPEAKER CHARACTERISTICS IN VARIOUS CABINET TYPES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

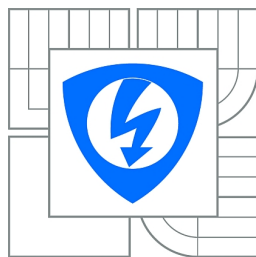
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

TOMÁŠ KONEČNÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ SCHIMMEL, Ph.D.

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Teleinformatika

Student: Tomáš Konečný

ID: 155133

Ročník: 3

Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Měření charakteristik reproduktoru v různých typech ozvučnice

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte problematiku návrhu uzavřené, polouzavřené a bassreflexové ozvučnice a navrhnete ozvučnice těchto typů pro reproduktor BRB 10"/250/01,8. Provedte simulace průběhu impedančních a modulových kmitočtových charakteristik reproduktoru v těchto ozvučnicích. Navrhnete a zkonstruuje univerzální ozvučnici, která bude umožňovat snadnou změnu mezi uzavřenou, polouzavřenou a bassreflexovou ozvučnicí s různým naladěním bassreflexového nátrubku. Provedte měření impedanční, směrové a modulové kmitočtové charakteristiky a měření TS-parametrů reproduktoru v jednotlivých variantách realizované ozvučnice.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] IEC 60268-5: Sound System Equipment – Part 5: Loudspeakers. International Electrotechnical Commission, 2003.
- [2] COLLOMS, M.; DARLINGTON, P. High Performance Loudspeakers, 6th ed. John Wiley & Sons, Ltd., 2005. 5352 s. ISBN 978-0-4-470094-30-3.
- [3] SVOBODA, L.; ŠTEFAN, M. Reprodukory a reproduktorové soustavy. SNTL, Praha, 1976. 328 s. 04-524-76.

Termín zadání: 9.2.2015

Termín odevzdání: 2.6.2015

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

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Tato práce se věnuje problematice návrhu reproduktorové ozvučnice pro laboratorní účely, zejména pak možnosti rychlé a snadné úpravě samotného reproboxu, pro střídání mezi uzavřenou, otevřenou a bassreflexovou ozvučnicí.

KLÍČOVÁ SLOVA

Elektrodynamický reproduktor, Ozvučnice, TS parametry, Bassreflex, Membrána, Otevřená ozvučnice, Uzavřená ozvučnice, Bassreflexová ozvučnice, Impedanční charakteristika, Modulová charakteristika

ABSTRACT

This work relates to problematics of design of loudspeaker box for laboratory purposes, especially for the option of fast and easy modification of cabinet itself in order to change between closed, open and vented loudspeaker box.

KEYWORDS

Electrodynamic loudspeaker, Loudspeaker enclosure, TS parameters, Bassreflex, Diaphragm, Open loudspeaker enclosure, Sealed loudspeaker enclosure, Vented loudspeaker enclosure, Impedance characteristics, Module characteristics

KONEČNÝ, Tomáš *Měření charakteristik reproduktoru v různých typech ozvučnice*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2014. 62 s. Vedoucí práce byl Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Měření charakteristik reproduktoru v různých typech ozvučnice“ 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/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Jiřímu Schimmelovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsáný v této bakalářské práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno

.....
(podpis autora)

OBSAH

Úvod	11
1 Elektrodynamický reproduktor	12
2 TS parametry reproduktoru	15
2.1 Rezonanční kmitočet	15
2.2 Mechanický činitel jakosti	16
2.3 Elektrický činitel jakosti	17
2.4 Celkový činitel jakosti	17
2.5 Ekvivalentní objem	17
3 Ozvučnice reproduktoru	18
3.1 Otevřená ozvučnice	18
3.2 Uzavřená ozvučnice	19
3.3 Bassreflexová ozvučnice	20
4 Simulace ozvučnice	23
5 Návrh ozvučnice	34
6 Princip měření TS parametrů	36
7 Aplikace jiného reproduktoru	38
8 Mechanická konstrukce	41
9 Měření ozvučnice	42
10 Výpočet TS parametrů	50
11 Závěr	51
Literatura	53
Seznam symbolů, veličin a zkratk	55
Seznam příloh	57
A Výkresy bočních stěn ozvučnice	58
B Výkresy podstavy, přední a zadní stěny ozvučnice	59

C	Výkres sestavené ozvučnice	60
D	Výkresy dílčích desek ozvučnice pro druhý reproduktor	61
E	Výkres vypáleného dílu pro víčka bassreflexů	62

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Flemingovo pravidlo levé ruky [10]	12
1.2	Schematický řez elektrodynamickým reproduktorem [12]	13
2.1	Impedanční a fázová charakteristika [3]	16
3.1	Řez otevřenou ozvučnicí [12]	19
3.2	Řez uzavřenou ozvučnicí [12]	20
3.3	Řez bassreflexovou ozvučnicí [12]	21
3.4	Porovnání impedanční charakteristiky ozvučnic	22
3.5	Porovnání modulové charakteristiky ozvučnic	22
4.1	Blokové schéma bassreflexové ozvučnice v programu LspCAD	23
4.2	Porovnání modulových charakteristik pro individuální ladění nátrubků	25
4.3	Charakteristiky ozvučnice 30l, nátrubek o rozměrech 120x81mm	26
4.4	Modulové kmitočtové charakteristiky pro nátrubek 120x81mm	27
4.5	Charakteristiky ozvučnice 30l, nátrubek o rozměrech 132,6x70 mm	28
4.6	Modulové kmitočtové charakteristiky pro nátrubek 132,6x70mm	29
4.7	Charakteristiky ozvučnice 30l, nátrubek o rozměrech 129x105,5 mm	30
4.8	Blokové schéma uzavřené ozvučnice v programu LspCAD	31
4.9	Charakteristiky uzavřené ozvučnice 30l	32
4.10	Charakteristiky uzavřené ozvučnice 20l	33
5.1	Model ozvučnice	35
6.1	Impedanční charakteristika [8]	37
7.1	Porovnání modulových a impedančních kmitočtových charakteristik pro 60mm nátrubek ve 12l ozvučnici	39
7.2	Porovnání modulových a impedančních kmitočtových charakteristik pro 100mm nátrubek ve 12l ozvučnici	40
9.1	Konfigurace, pro které proběhlo měření pouze impedančních charak- teristik	43
9.2	Charakteristiky uzavřené ozvučnice	44
9.3	Charakteristiky uzavřené ozvučnice s vloženým akustickým rounem	45
9.4	Charakteristiky otevřené ozvučnice	46
9.5	Charakteristiky ozvučnice se 60mm bassreflexem	47
9.6	Charakteristiky ozvučnice se 100mm bassreflexem	48
9.7	Porovnání charakteristik všech ozvučnic	49
A.1	Výkresy bočních stěn ozvučnice v programu SolidWorks 2013	58
B.1	Výkresy podstav, přední a zadní stěny ozvučnic v programu Soli- dWorks 2013	59
C.1	Výkres kompletně sestavené ozvučnice z různých pohledů v programu SolidWorks 2013	60

D.1	Výkres přední a zadní stěny, podstavy a obou bočních stěn ozvučnice pro reproduktor BRB 6"/50/01,8 v programu SolidWorks 2013	61
E.1	Nákres vypálené kovové krytky v programu SolidWorks 2013	62

ÚVOD

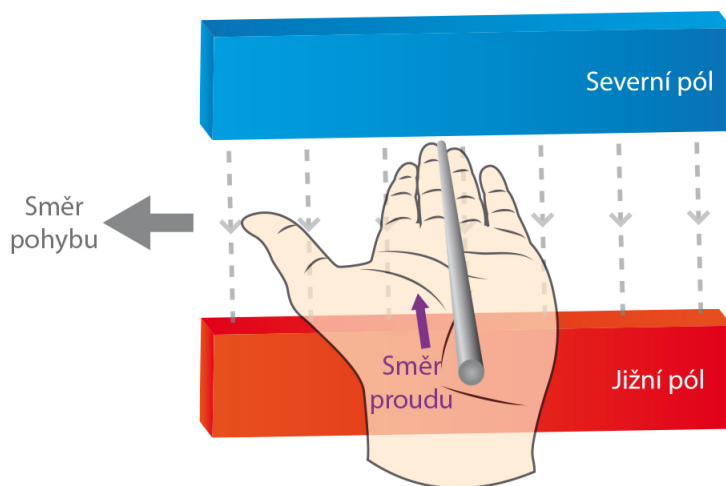
Zadání této bakalářské práce představuje kompletní návrh reproduktorové ozvučnice, konkrétně pak určení objemu a rozměrů ozvučnice. Pro co nejpřesnější splnění tohoto zadání je potřeba podrobně nastudovat funkci elektrodynamického přímo-vyzařujícího reproduktoru jak z hlediska elektrického, tak mechanického. S touto problematikou jsou úzce spojeny TS parametry reproduktoru, jejichž nastudování a pochopení tvoří základy pro návrh reproduktorové ozvučnice. Protože tato bakalářská práce obsáhne vícero konstrukcí ozvučnic, je třeba znát principy a funkce každé z nich. Modulární konstrukce mnou navrhované ozvučnice pak vyžaduje přehled v simulovaných charakteristikách, zejména kvůli rozhodnutí o správném objemu. Posledním aspektem pro úspěšné zvládnutí projektu je návrh vhodných mechanických prvků pro možnost záměny mezi různými druhy ozvučnic. Celkové splnění zadání pak představuje nastudování a provedení měřicích principů pro měření impedančních a modulových kmitočtových charakteristik, stejně jako výpočet TS parametrů z těchto naměřených hodnot.

1 ELEKTRODYNAMICKÝ REPRODUKTOR

Elektrodynamické přímovyzářující reproduktory tvoří ve většině případů základ reprosoustav. Při návrhu ozvučnice, jež takový reproduktor obsahuje, je tedy nezbytné pochopit funkci reproduktoru jako celku, i význam jeho dílčích součástí.

Existuje velké množství elektroakustických měničů a elektrodynamický reproduktor je jen jeden z nich. Nicméně právě s elektrodynamickým přímovyzářujícím reproduktorem pracuji v rámci svého projektu, budu se tedy teoreticky věnovat právě této konstrukci. Pojem přímovyzářující přímo vyplývá z konstrukce reproduktoru. Tímto termínem označujeme reproduktory, jejichž kmitající membrána je v přímém kontaktu s prostředím, do kterého vyzařuje akustickou energii.

Základním principem funkce elektrodynamického reproduktoru je pohyb cívky protékané střídavým elektrickým proudem v homogenním magnetickém poli. Toto pole, vytvářené permanentním magnetem, pak působí na vinutí cívky, které je umístěno ve vzduchové mezeře, v kolmém směru [14]. Zde se uplatní Flemingovo pravidlo levé ruky, znázorněno na přiloženém obrázku 1.1, které říká: „*Pokud prsty ukazují směr proudu a indukční siločáry vnějšího magnetického pole vstupují do dlaně, pak palec ukazuje směr síly, kterou působí vnější magnetické pole na vodič s proudem* [9].“ Z tohoto pravidla tedy plyne, že se změnou proudu, který protéká vinutí cívky



Obr. 1.1: Flemingovo pravidlo levé ruky [10]

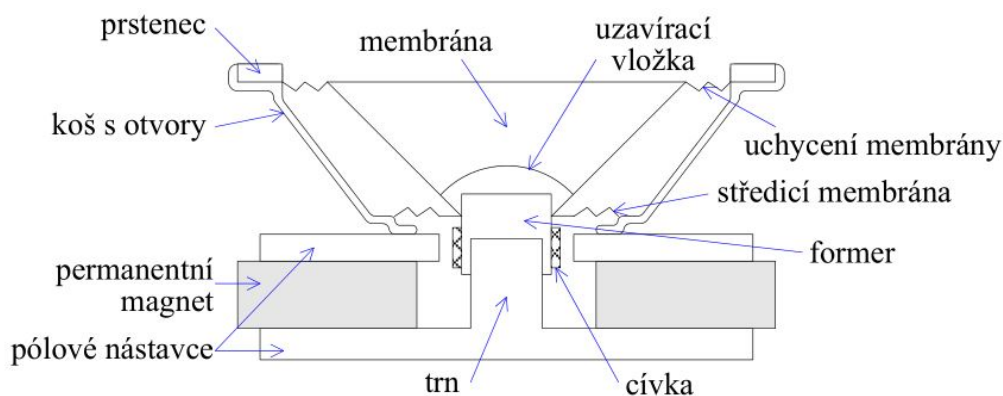
dochází ke změně velikosti a směru síly, která působí na cívku. Cívka je pak pevně spojena s membránou. Díky tomuto spoji dochází k přenosu síly až na membránu,

která svou plochou rozkmitává vzduch a vytváří tak akustický tlak, který pak vnímáme jako zvuk. Schematický řez elektrodynamickým reproduktorem je znázorněn na obrázku 1.2.

Základem je tedy magnetický obvod, tvořený permanentním magnetem a pólovými nástavci. Permanentní magnet slouží jako zdroj magnetického pole, pólové nástavce se pak starají o to, aby bylo toto pole rovnoměrně přeneseno a aby byl magnetický tok soustředěn do prostoru vzduchové mezery. Tato mezera musí být co nejužší, aby v ní bylo dosaženo co nejvyššího magnetického toku [14].

Trn je vyhotoven jako válec na pólovém nástavci, kolem kterého je ve vzduchové mezeře umístěn former. Tento former slouží jako nosný prvek pro cívku, která je na něj navinuta. Former může být vyroben z různých materiálů, například z papíroviny, kaptonu, skelných vláken, nebo hliníku. V některých případech může cívka fungovat samonosně, bez přítomnosti formery, pouze zpevněná vhodným lepidlem [11].

Samotná cívka je tvořena izolovaným vodičem, navinutým na former, který je pevně spojen s membránou. Konce cívky jsou pak vyvedeny na externí kontakty, aby bylo možné připojit reproduktor do zvukového systému. Tyto propoje musí být realizovány tak, aby vytvářely co nejméně nežádoucího zkreslení. To v praxi znamená, že vodiče nesmí být příliš krátké, ani příliš dlouhé a nepoddajné. Cívka musí být schopná snášet požadované výkony a musí být dostatečně tuhá, aby nedocházelo k deformacím [14, 11].



Obr. 1.2: Schematický řez elektrodynamickým reproduktorem [12]

Membrána reproduktoru by ideálně měla vykazovat pouze pístový pohyb. Pro zamezení pohybu mimo požadovanou osu jsou využity dva kotvící prvky, které pružně spojují membránu s košem reproduktoru. První z nich je středící membrána, která je ke kmitající membráně připojena v okolí formery. Tato středící membrána bývá vyrobena z impregnované textilie, na které jsou soustředně vylisovány vlnky, které zajišťují pružnost. Středící membrána musí být co nejvíce prodyšná, aby skrze ni

mohl proudit vzduch, jehož pohyb vyvolává kmitání membrány. Druhý kotvící prvek je uchycení kmitající membrány po jejím obvodu. Toto uchycení bývá tvořeno buďto přímo materiálem membrány, který je v oblasti uchycení zvlněný a zeslabený, nebo gumovou lamelou [12, 11, 14]. Membránu pak v jejím středu zakrývá uzavírací vložka, jinak také vrchlík. Funkcí tohoto prvku je zejména zamezení pronikání prachových částic dovnitř reproduktoru skrze otvor, který je ve středu membrány [2]. Některé reproduktory žádný vrchlík neobsahují, protože membrána samotná má tvar povrchu kulové úseče a žádného zakrytí není potřeba. Samotná membrána by měla teoreticky vykazovat co nejvyšší tuhost, aby nedocházelo ke zkreslení vznikem nežádoucích kmitů [15]. V praxi se pro výrobu membrány používají materiály jako papír, kov, kevlar, u některých výškových měničů se používá i hedvábí. Tvar membrány ve většině případů zastupuje kruh, existují ale i oválné, nebo s tvarem čtverce a obdélníku.

Poslední nepopsanou součástí reproduktoru je koš s otvory. Účel tohoto koše je zřejmý. Tvoří kostru a pevný základ pro všechny komponenty, které jsou k němu připevněny. Zároveň slouží jako prostředek pro osazení reproduktoru do ozvučnice. Otvory jsou v koši z toho důvodu, aby za membránou nevznikal nechtěný akustický obvod, který by vlastně tvořil ozvučnici o malém objemu [14].

2 TS PARAMETRY REPRODUKTORU

Pro správné a přesné projektování reproduktorové ozvučnice je třeba znát a chápat význam TS parametrů reproduktoru, neboť tyto parametry tvoří základní kameny pro návrh celého reproboxu.

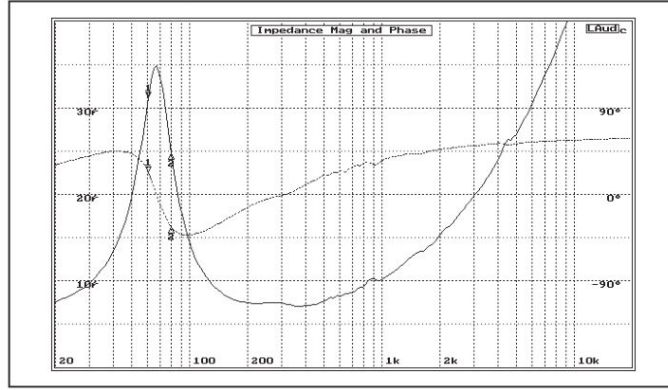
Parametry TS, nebo nezkráceně Thiele-Small, je označení pro soubor elektro-mechanických parametrů, které popisují chování měničů zejména v oblasti kolem rezonančního kmitočtu. Pomocí těchto parametrů je možné simulovat projevy reproduktorů v ozvučnici. Tyto parametry jsou tvořeny základními elektromechanickými veličinami, které jsou přímo dané konstrukcí reproduktoru a představují tak základ, k výpočtu dalších TS parametrů [12, 13]. Podle publikace Richarda T. Smalla jsou to tyto:

- C_{ms} – poddajnost zavěšení membrány
- M_{ms} – hmotnost kmitajícího systému a spolukmitajícího sloupce vzduchu
- R_{ms} – mechanický odpor zavěšení membrány
- S_d – plocha membrány
- R_e – stejnosměrný odpor vinutí cívky
- Bl – součin magnetické indukce a délky vodiče cívky ve vzduchové mezeře

Všechny tyto parametry jsou blíže popsány a vysvětleny níže u vzorců, ve kterých jsou obsaženy.

2.1 Rezananční kmitočet

Jedná se o parametr udávaný v hertzech. Při této hodnotě dosahuje impedanční charakteristika reproduktoru svého maxima a kmitající cívkou reproduktoru tak protéká nejmenší proud. Z toho tedy vyplývá, že se jedná o hodnotu frekvence, při které je vnitřní energie kmitajícího systému největší, protože pro její uvedení do pohybu je třeba dodat nejméně elektrické energie [16]. Impedanční charakteristika v oblasti před rezonančním kmitočtem prudce klesá a následné vyzařování těchto frekvencí je pak velmi neefektivní. Na obrázku 2.1 je znázorněna impedanční a fázová charakteristika reproduktoru, který bude použit v mé semestrální a bakalářské práci. Můžeme si všimnout lokálního maxima impedanční charakteristiky na rezonančním kmitočtu, který je podle výrobce 62,7 Hz. Rovněž je podle tohoto obrázku patrné, že na rezonančním kmitočtu dochází k otočení fáze (na rezonančním kmitočtu prochází fázová charakteristika nulou).



Obr. 2.1: Impedanční a fázová charakteristika [3]

Vzorec pro výpočet rezonančního kmitočtu má tvar

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_{ms} \cdot M_{ms}}}, \quad (2.1)$$

kde C_{ms} je poddajnost zavěšení membrány v m/N a M_{ms} je hmotnost celého kmitajícího systému, včetně spolukmitajícího sloupce vzduchu. Z tohoto vzorce tedy plyne, že čím těžší je kmitající systém, nebo čím poddajnější je zavěšení membrány, tím je rezonanční kmitočet nižší [18].

2.2 Mechanický činitel jakosti

Jedná se o bezrozměrný parametr, který uvažuje pouze mechanické vlastnosti reproduktoru. Mechanický činitel jakosti představuje ztráty, které jsou způsobeny tlumením pohybu membrány. Na velikosti Q_{ms} se tedy logicky podílí jak středící membrána, tak uchycení membrány. Další prvek, který se může podílet na snížení Q_{ms} je former, na kterém je navinuta cívka, pokud je z hliníku. V tomto hliníkovém formeru se indukují vířivé proudy, které pak působí jako brzdná síla pro kmitající cívku. Obecně platí, že čím vyšší je hodnota Q_{ms} , tím jsou ztráty nižší. Výpočet parametru Q_{ms} je uveden ve vzorci (2.2).

$$Q_{ms} = \frac{2\pi \cdot f_s \cdot M_{ms}}{R_{ms}}, \quad (2.2)$$

kde f_s je rezonanční kmitočet, M_{ms} je hmotnost celého kmitajícího systému, včetně spolukmitajícího sloupce vzduchu, stejně jako ve vzorci (2.1) a R_{ms} udává mechanický odpor zavěšení (kotvicích prvků) membrány v kg/s [18, 16].

2.3 Elektrický činitel jakosti

Stejně, jako Q_{ms} uvažuje pouze mechanické vlastnosti reproduktoru, tak Q_{es} uvažuje pouze ty elektrické. Opět se jedná o bezrozměrný parametr, který udává ztráty způsobené tlumením. V tomto případě se jedná o elektrické tlumení. Při pohybu cívky v magnetickém poli dochází ke generování proudu, který působí proti proudu jež prochází cívkou od zdroje. Tyto proudy se pak ve vinutí cívky odečítají a vzniká tak tlumení. Výpočet Q_{es} je znázorněn vzorcem

$$Q_{es} = \frac{2\pi \cdot f_s \cdot M_{ms} \cdot R_e}{(Bl)^2}, \quad (2.3)$$

jehož parametry f_s a M_{ms} představují tytéž proměnné jako při výpočtu Q_{ms} . Proměnná R_e vyjadřuje stejnosměrný odpor vinutí cívky. Součin Bl je pak součinem magnetické indukce a délky vodiče cívky ve vzduchové mezeře, uváděný v N/A [18, 16].

2.4 Celkový činitel jakosti

Tento parametr v sobě zahrnuje oba dva předchozí (Q_{ms} i Q_{es}). Platí, že čím menší je hodnota Q_{ts} , tím je systém tlumenější. Reprodukter s velmi nízkou hodnotou tohoto parametru tedy není možné použít pro uzavření do ozvučnice, protože ta by fungovala jako další tlumící prvek. Čím víc Q_{ts} roste, tím víc je reproduktor vhodný pro bassreflexovou ozvučnici. Při dalším zvyšování se pak reproduktor uzavírá do uzavřené ozvučnice. Vzorec (2.4) pak zobrazuje výpočet parametru Q_{ts} [18, 16]

$$Q_{ts} = \frac{Q_{es} \cdot Q_{ms}}{Q_{es} + Q_{ms}}. \quad (2.4)$$

2.5 Ekvivalentní objem

Ekvivalentní objem, vyjádřený vzorcem (2.5) představuje objem vzduchu, který má stejnou poddajnost jako zavěšení membrány reproduktoru, působící na ploše membrány S_d . Ve výpočtu parametru V_{as} figurují také hustota vzduchu ρ a rychlost zvuku ve vzduchu c . Oba tyto parametry jsou teplotně závislé, a proto i ekvivalentní objem vykazuje tuto závislost [18, 16].

$$V_{as} = \rho \cdot c^2 \cdot S_d^2 \cdot C_{ms} \quad (2.5)$$

Existuje celá řada dalších TS parametrů, které zde nejsou uvedeny. Nicméně rezonanční kmitočet, činitele jakosti a ekvivalentní objem, které jsou uvedeny výše, (označovány jako malosignálové TS parametry) tvoří základní kameny a je pomocí nich možné vypočítat a navrhnout celou ozvučnici [13].

3 OZVUČNICE REPRODUKTORU

Následující kapitola se věnuje problematice a porovnání jednotlivých typů reproduktorových ozvučnic. Pochopení funkce a významu jednotlivých konstrukcí ozvučnice je při jejím návrhu jedním z nejdůležitějších aspektů.

Jak už bylo popsáno v předchozí části, základem reproduktoru je membrána, která ideálně vykonává pístový pohyb. Tento pohyb membrány způsobuje zhušťování, nebo naopak, podle fáze membrány, zředování vzduchu, což pak vnímáme jako akustický tlak. Membrána má samozřejmě dvě strany. Přední, která ve většině případech směřuje a vyzařuje k posluchači, a zadní, která směřuje a vyzařuje do prostoru reproduktorového koše a magnetického obvodu daného reproduktoru. Reprodukter tedy vytváří dvě shodné akustické vlny, které jsou navzájem v protifázi, tedy na jedné straně vždy (kromě rovnovážné polohy) vzduch zhušťují a straně druhé zředují. Ve výsledku ale nastává jev, který se nazývá akustický zkrat. Jedná se o to, že se obě akustické vlny na rozmezí okolí přední a zadní strany membrány sčítají. Kvůli protifázi obou vln ale dochází k vykompenzování změn hustoty vzduchu a k pozorovatelné změně akustického tlaku pak v ideálním případě dochází, hlavně při nízkých kmitočtech, jen ve velmi omezené míře. Aby se akustickému zkratu zamezilo, je potřeba nějakým způsobem akusticky oddělit přední a zadní stranu membrány. Z hlediska zamezení akustického zkratu se jako teoreticky nejlepší jeví použití ozvučnice ve formě nekonečně velké a maximálně tuhé desky. Nekonečná délka je potřeba pro zamezení kontaktu akustických vln z obou stran membrány v jakékoliv vzdálenosti. Maximální tuhost je pak vyžadována proto, aby se kmity akustických vln nepřenášely přes desku ozvučnice na její druhou stranu. Toto řešení je poněkud nepraktické, proto se používá deska s konečnými rozměry, nebo se reproduktor uzavírá do ozvučnice ve tvaru kvádra, takzvaného reproboxu nebo reproduktorové skříně [15]. S přihlédnutím k zadání a realizaci mého semestrálního projektu se dají ozvučnice rozdělit následovně:

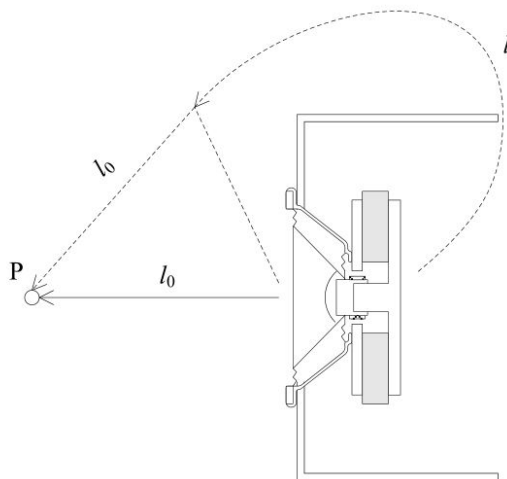
- Otevřená
- Uzavřená
- Bassreflex

3.1 Otevřená ozvučnice

Otevřená ozvučnice, která je znázorněna na obrázku 3.1, představuje určitý kompromis mezi deskovou a uzavřenou ozvučnicí (viz 3.2). Z tohoto obrázku je patrné, že ke vzniku akustického zkratu musí akustická vlna, vyzářená zadní částí membrány, urazit vzdálenost o l delší, než akustická vlna vyzářená její přední stranou. Přesněji

se jedná o polovinu vlnové délky dané vyzářené frekvence. Protože je vlnová délka nepřímo úměrná frekvenci (viz vzorec (3.1), kde c představuje rychlost zvuku ve vzduchu a f je frekvence vlnění), bude k akustickému zkratu docházet při nižších frekvencích. Pro stanovení a případné posunutí tohoto kmitočtu směrem dolů, například pod rezonanční kmitočet reproduktoru, je třeba operovat s hloubkou ozvučnice, což ovlivní vzdálenost l . V současné době se tento typ ozvučnice využívá zejména při konstrukci kytarového komba, kde je zadní stěna ozvučnice částečně, nebo zcela odstraněna [12].

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3.1)$$

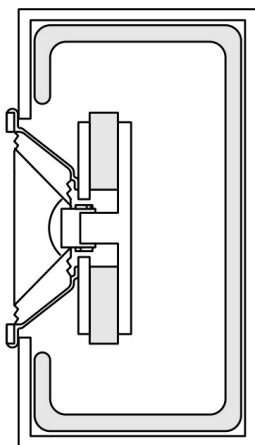


Obr. 3.1: Řez otevřenou ozvučnicí [12]

3.2 Uzavřená ozvučnice

Uzavřená ozvučnice se od otevřené logicky liší tím, že její zadní strana je tvořena nepropustnou plochou, stejně jako je to zobrazeno na obrázku 3.2. Principem této konstrukce je přeměnit veškeré akustické vlnění, které směrem do ozvučnice membrána reproduktoru vyzařuje, v teplo. Jedná se tedy o opačný princip jako například u skříní hudebních nástrojů, které díky vlastním rezonancím vytvářejí finální zvuk. Pokud by mělo docházet k ideální přeměně vyzářené akustické energie v tepelnou, je potřeba aby byla uzavřená ozvučnice vyrobena jako maximálně tuhá [15].

Jestli by tomu tak nebylo, šířilo by se stěnami ozvučnice vlnění, které by po interakci s okolním vzduchem vytvářelo kmity, jež by se sčítaly s kmity vyzářenými přední stranou membrány a vznikalo by tak nechtěné zkreslení akustického signálu. Dalším



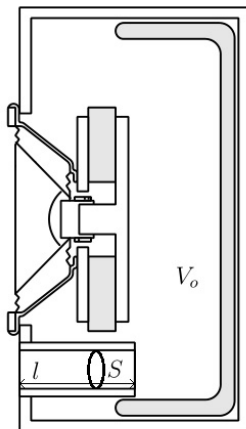
Obr. 3.2: Řez uzavřenou ozvučnicí [12]

aspektem, který je třeba vzít v úvahu při použití uzavřené ozvučnice, je fakt, že vzduch, kterým je vyplněn vnitřní objem reproduktorové skříně představuje přídavnou tuhost, která se sčítá s poddajností závěsu membrány (tuhost je převrácenou hodnotou poddajnosti). Touto skutečností je zajištěna základní ochrana hlubokotónových reproduktorů. Jsou to totiž zpravidla basové reproduktory, které mají velkou výchylku membrány. Akustický výkon je přímo úměrný ploše membrány, frekvenci kmitání a výchylce membrány. Plocha membrány je konstanta, a proto se snižujícím se kmitočtem musí pro zachování vyzářeného výkonu růst výchylka. Toto chování je po určité mezi nechtěné, nebo dokonce nebezpečné pro samotný reproduktor. Při zvyšování výchylky dochází k nelineárnímu zkreslení hned z několika důvodů. První z nich je, že se kmitající cívka dostane mimo prostor vzduchové mezery, tím se mění součin Bl , figurující ve vzorci (2.3) a tím dochází ke změně elektrického činitele jakosti. Další zkreslení vzniká důsledkem toho, že se závěs membrány až příliš natahuje a vykazuje pak nelineární vztah mezi přírůstkem síly a deformací závěsu. Jak už bylo popsáno výše, funguje vzduch v ozvučnici jako přídavná tuhost, která sice způsobí snížení citlivosti, ale basový reproduktor je tak chráněn, protože nedochází k tak velikým výchylkám membrány. Nevýhodou použití uzavřené ozvučnice je fakt, že vlivem součtu tuhosti vnitřního vzduchu a poddajnosti závěsu membrány dochází podle vzorce (2.1) ke zvýšení rezonančního kmitočtu a tím ke zvýšení dolního mezního kmitočtu efektivního rozsahu daného reproduktoru [12].

3.3 Bassreflexová ozvučnice

Zatímco účelem uzavřené ozvučnice je veškerou akustickou energii vyzářenou směrem do ozvučnice uchovat ve svých útrokách a přeměnit v teplo, principem bassreflexové ozvučnice je do jisté míry tuto energii využívat ve vlastní prospěch, konkrétně

pak pro posílení oblasti nízkých kmitočtů [15]. Tento typ ozvučnice je na první pohled dobře rozeznatelný podle často kruhového, nebo obdélníkového otvoru v některé ze stěn. Schematický řez bassreflexovou ozvučnicí je zobrazen na obrázku 3.3.



Obr. 3.3: Řez bassreflexovou ozvučnicí [12]

Celá ozvučnice vlastně funguje jako Helmholtzův rezonátor [12]. Tento rezonátor se hojně využívá pro pohlcení určitých nízkých frekvencí, v tomto případě ale funguje přesně naopak a sice jako pásmová propust, kdy kmitočty, které leží mimo zvolené pásmo, nepropouští. Proto se bassreflexová ozvučnice přesně ladí na určitý rezonanční kmitočet, který je dán vzorcem

$$f_{\text{br}} = \frac{c}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{S}{V_o \cdot l_c}}, \quad (3.2)$$

kde c je rychlost zvuku ve vzduchu, S je průřez bassreflexového nátrubku, V_o představuje objem ozvučnice v m^3 a l_c je délka nátrubku s koncovou korekcí, viz vzorec (3.3) [4].

$$l_c = l + 0,6 \cdot d \quad (3.3)$$

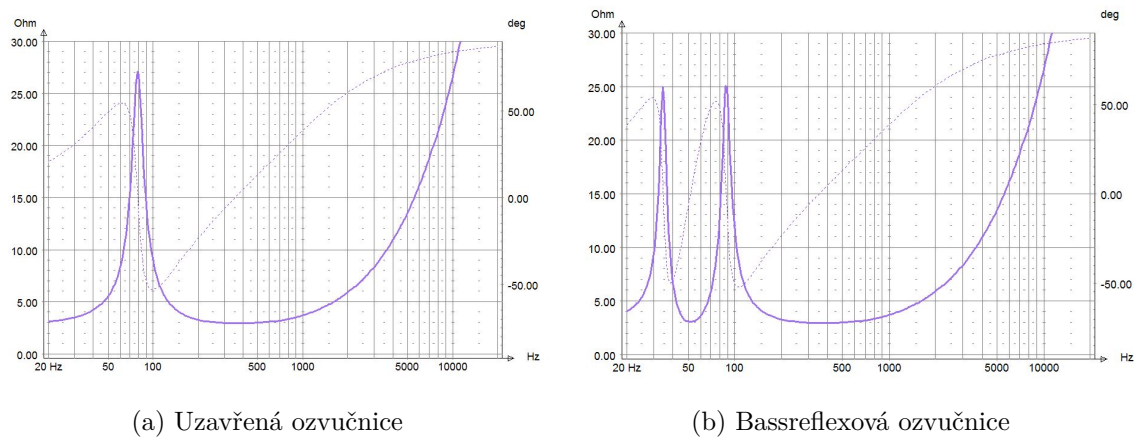
Tento vzorec je platný pro kruhové nátrubky, kde l je skutečná délka nátrubku a d představuje ekvivalentní průměr průřezu nátrubku. Pro obdélníkové nátrubky by vzorec vypadal

$$l_r = l + \frac{2 \cdot a \cdot b}{a + b}, \quad (3.4)$$

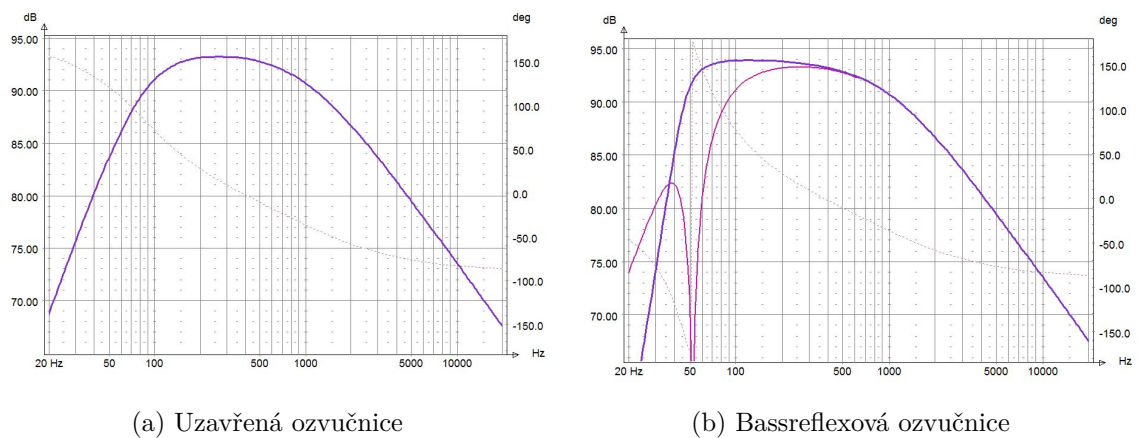
kde l je opět skutečná délka nátrubku a proměnné a a b představují délky stran obdélníku, který tvoří průřez nátrubku [5].

Pro správnou funkci bassreflexové ozvučnice je důležitá skutečnost, že v oblasti nátrubku dochází k otočení fáze o 180° . Díky tomu je akustická vlna vyzářená zadní

stranou membrány vhodně fázově posunuta, aby ven z nátrubku vyzařovala se shodnou fází, jako má přední strana membrány a ve výsledku se tam obě vlny akusticky podporují. Z důvodu, že bassreflexová ozvučnice má svůj vlastní rezonanční kmitočet, dojde na impedanční a modulové frekvenční charakteristice ke změně v podobě dalšího převýšení na impedanční charakteristice (obrázek 3.4) a rozšíření vrcholu na modulové charakteristice v oblasti nižších kmitočtů (obrázek 3.5). Zároveň je z přiložených obrázků patrné, že dojde vlivem bassreflexu ke strmějšímu poklesu modulové charakteristiky a při nejnižších frekvencích má modul menší úroveň, než při použití ozvučnice uzavřené. Nicméně v tomto pásmu se reprodukce nevyžaduje, proto tento jev není důležitý.



Obr. 3.4: Porovnání impedanční charakteristiky ozvučnic

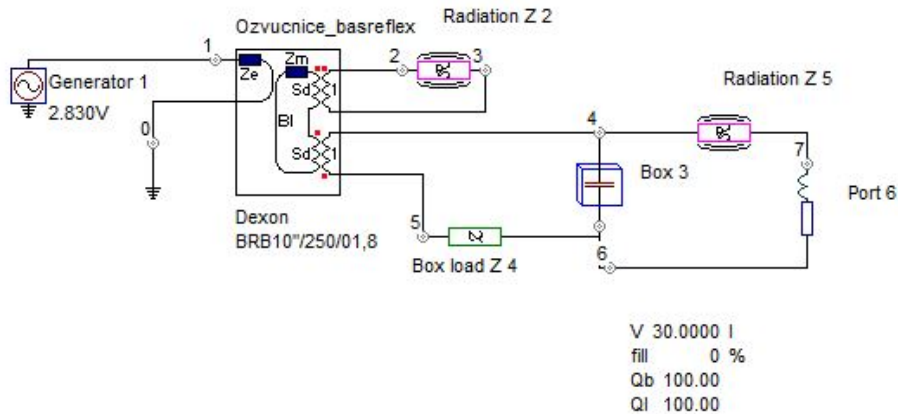


Obr. 3.5: Porovnání modulové charakteristiky ozvučnic

4 SIMULACE OZVUČNICE

Simulace za použití příslušného simulačního software je důležitým krokem při návrhu ozvučnice, neboť se dá, při analýze simulovaných charakteristik, poměrně snadno dosáhnout určení požadovaných parametrů, jako v mém případě stanovení objemu ozvučnice.

Návrh mnou vytvářené ozvučnice nepodléhal klasickým pravidlům a kvůli určení pro laboratorní použití se jednalo o návrh na míru tomuto účelu. Hlavní požadavek na celou konstrukci byl, aby se zřetelně projevil vliv bassreflexu na impedanční a modulové kmitočtové charakteristiky. Pro návrh ozvučnice jsem použil software LspCAD, se kterým jsem se už dříve setkal v rámci předmětu Elektroakustika. Na obrázku 4.1 je zobrazeno schéma, pomocí kterého se simuluje bassreflexová ozvučnice. Začal jsem právě touto ozvučnicí, protože až podle charakteristik bassreflexové ozvučnice jsme se spolu s vedoucím mé práce rozhodli, jaký objem bude výsledná ozvučnice mít. Při rozhodování, jestli je lepší umístit reproduktor do uzavřené, nebo



Obr. 4.1: Blokové schéma bassreflexové ozvučnice v programu LspCAD

bassreflexové ozvučnice, slouží parametr EBP (Efficiency Bandwidth Product). Pokud $EBP < 50$, je vhodné použít uzavřenou ozvučnici. Při $60 < EBP < 90$ je to libovolné a je vhodné vyzkoušet jak uzavřenou, tak bassreflexovou ozvučnici. Hodnota $EBP > 100$ pak určuje vsazení reproduktoru do bassreflexové ozvučnice [18].

$$EBP = \frac{f_s}{Q_{es}} = \frac{62,7}{0,5} = 125,4 \text{ Hz} \quad (4.1)$$

Pro základní stanovení objemu ozvučnice je zapotřebí stanovit průběh aproximace kmitočtové modulové charakteristiky. Pro určení objemu uzavřené ozvučnice by se využilo vztahu

$$V_{bu} = \frac{V_{as}}{\left(\frac{Q_{tc}}{Q_{ts}}\right)^2 - 1}, \quad (4.2)$$

kde V_{as} je ekvivalentní objem reproduktoru, Q_{ts} je celkový činitel jakosti a Q_{tc} je hodnota reprezentující požadovanou aproximaci [17]. Častá hodnota $Q_{tc}=0,707$, což odpovídá aproximaci typu Butterworth. Existují ještě jiné aproximace, například Chebysheva, nebo Besselova. Po dosazení do vzorce vychází objem uzavřené ozvučnice

$$V_{bu} = \frac{25}{\left(\frac{0,707}{0,45}\right)^2 - 1} = 17,025l. \quad (4.3)$$

Pro výpočet objemu bassreflexové ozvučnice by se využilo jiného vzorce a jiné aproximace. V případě mého semestrálního projektu jsem se při ladění bassreflexové ozvučnice snažil dosáhnout co možná nejrovnější modulové kmitočtové charakteristiky, což odpovídá aproximaci s názvem maximally flat. Výpočet objemu ozvučnice podle této aproximace je pak uveden vzorcem (4.4), kde V_{as} je ekvivalentní objem reproduktoru a Q_{ts} je celkový činitel jakosti [17]. Po dosazení do vzorce

$$V_{bb} = 15,33 \cdot V_{as} \cdot Q_{ts}^{2,86} \quad (4.4)$$

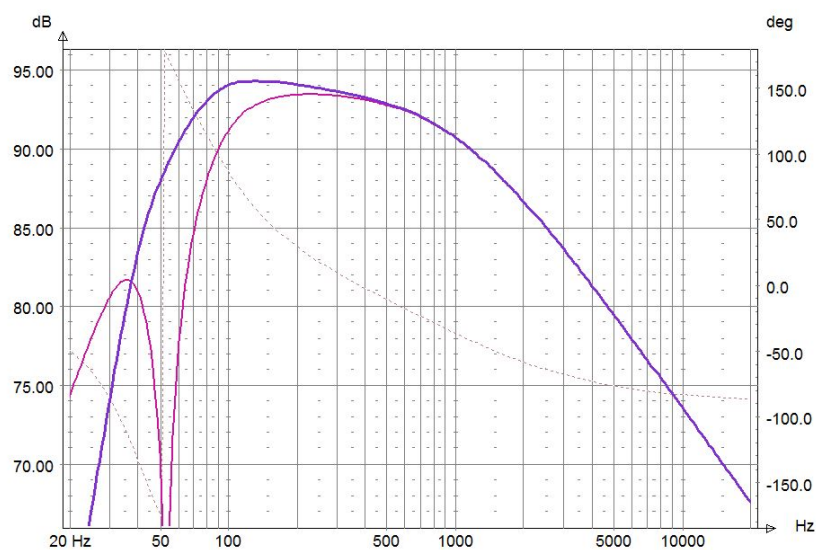
vychází objem

$$V_{bb} = 15,33 \cdot 25 \cdot 0,45^{2,86} = 39,05l. \quad (4.5)$$

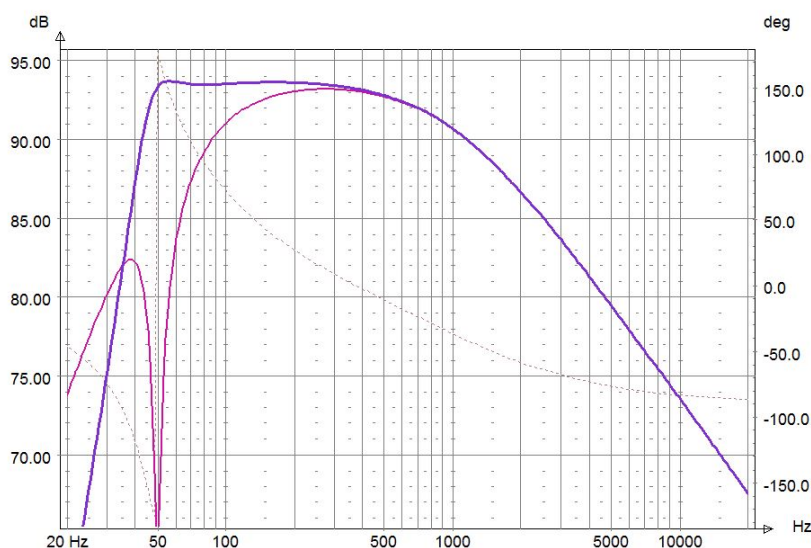
Tento výsledek je z praktického hlediska nechtěný, protože už by se jednalo o poměrně rozměrnou ozvučnici. Vedoucí práce se z tohoto důvodu klonil spíše k objemu uzavřené ozvučnice, který jsem zaokrouhlil na 20 litrů. Výsledný objem ozvučnice byl stanoven na 30 litrů na základě simulací. Tento objem tvoří kompromis mezi objemy vypočtenými pomocí výše uvedených vzorců. Ozvučnice o objemu 30 litrů má oproti typu maximally flat kompaktnější rozměry při zachování co možná nejrovnější modulové kmitočtové charakteristiky. Pro porovnání jsem vždy nasimuloval všechny tři objemy ozvučnic, při zachování parametrů bassreflexových nátrubků vypočtených programem LspCAD pro 30l ozvučnici. Při simulacích bylo třeba přihlídnout k reálným rozměrům nátrubků nabízených na trhu. Já jsem vybíral z nabídky firmy Dexon, konkrétně se pak jedná o nátrubky o rozměrech 170x81 mm a 170x70 mm s tím, že délky nátrubků se musí zkrátit na výsledných 120x81 mm a 132,6x70 mm, kvůli přesnému naladění na požadované rezonanční frekvenci. Rezanční frekvence nátrubků spočítal LspCAD automaticky po zadání délky a průměru každého z nátrubků. Nátrubek o rozměrech 120x81 mm je naladěn na 51,69 Hz, což odpovídá

modulové kmitočtové charakteristice se zachováním co možná nejrovnějšího průběhu. Druhý nátrubek o rozměrech 132,6x70 mm je pak laděný na 44,10 Hz. Na obrázku 4.2a je patrné nechtěné převýšení o 1 dB v oblasti nižších kmitočtů. Právě nemožnost dosažení co nejrovnější přenosové charakteristiky vedla k použití větší, 30l ozvučnice.

Simulace modulové kmitočtové charakteristiky ozvučnice o ideálním objemu podle vzorce (4.5) je zobrazena na obrázku 4.2b.



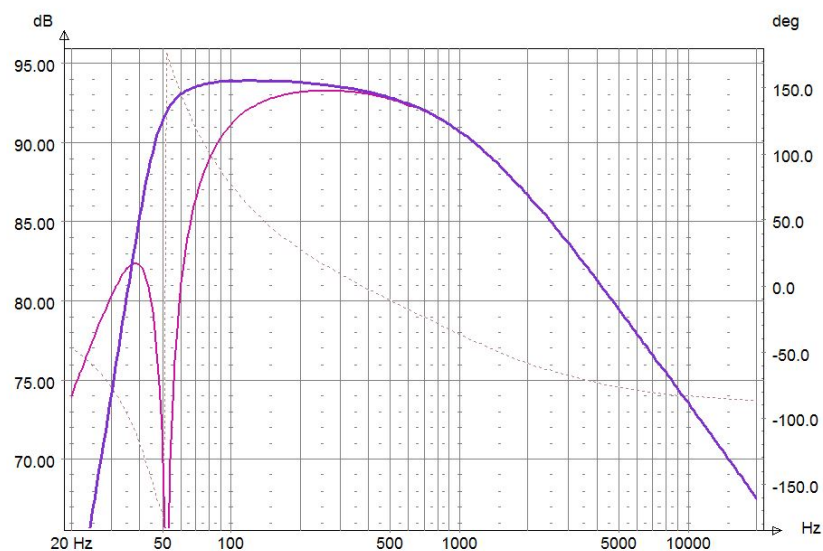
(a) Modulová kmitočtová charakteristika 20l ozvučnice



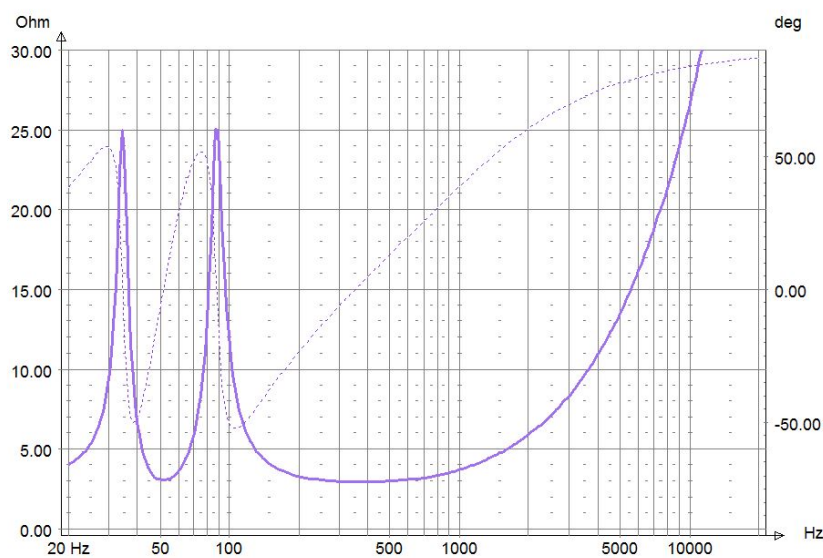
(b) Modulová kmitočtová charakteristika 39,05l ozvučnice

Obr. 4.2: Porovnání modulových charakteristik pro individuální ladění nátrubků

Na obrázku 4.3 jsou zobrazeny charakteristiky pro ladění ozvučnice pro co nejrovnější tvar modulové charakteristiky při objemu 30l.



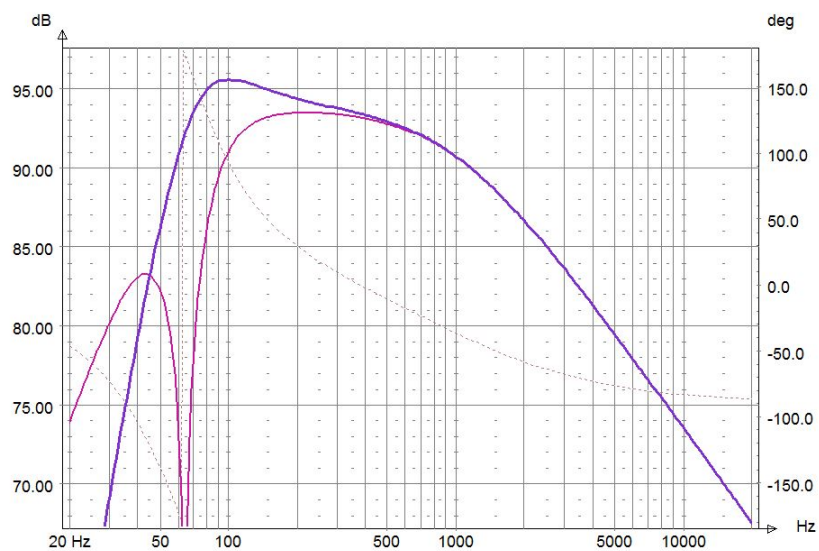
(a) Modulová kmitočtová charakteristika



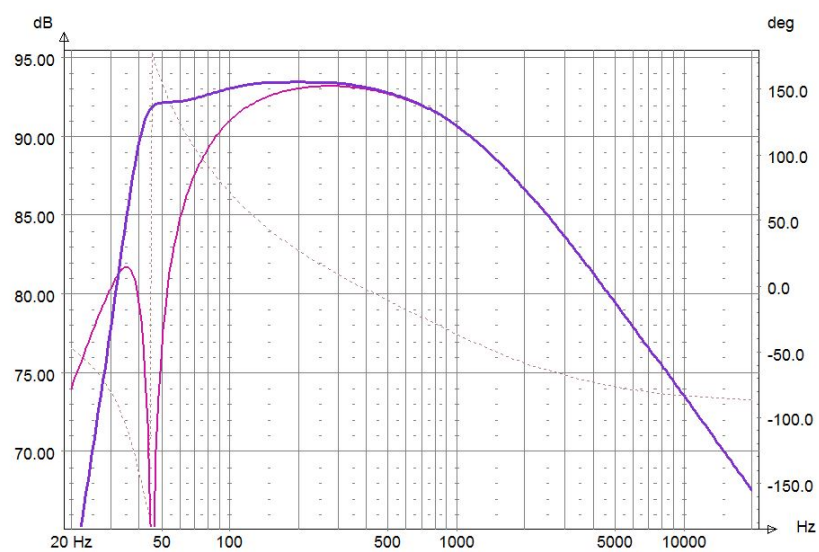
(b) Impedanční kmitočtová charakteristika

Obr. 4.3: Charakteristiky ozvučnice 30l, nátrubek o rozměrech 120x81mm

Pro porovnání jsou na obrázku 4.4 zobrazeny modulové charakteristiky 20l a 39,05l ozvučnic, při rozměrech nátrubku 120x81mm jako pro 30l ozvučnici.



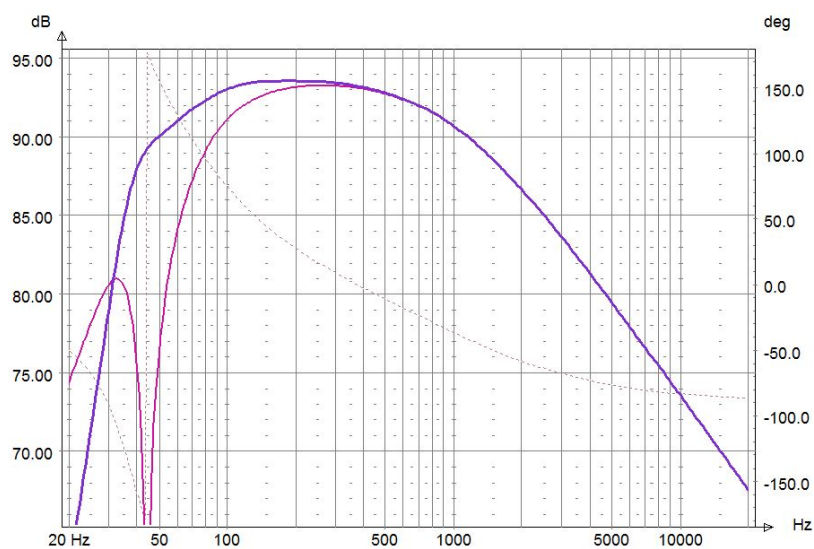
(a) Modulová kmitočtová charakteristika 20l ozvučnice



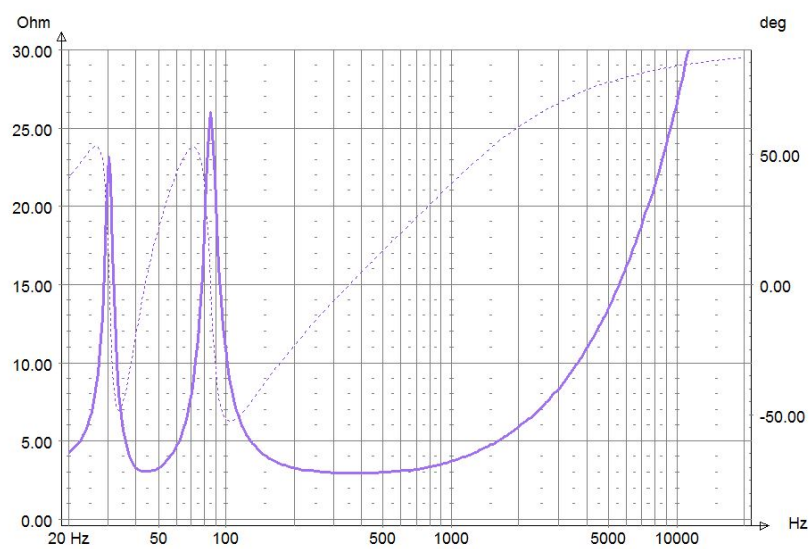
(b) Modulová kmitočtová charakteristika 39,05l ozvučnice

Obr. 4.4: Modulové kmitočtové charakteristiky pro nátrubek 120x81mm

Protože mnou navržená konstrukce obsahuje nátrubky dva, bylo potřeba nasimulovat ozvučnici i pro druhý nátrubek o rozměrech 132,6x70 mm.



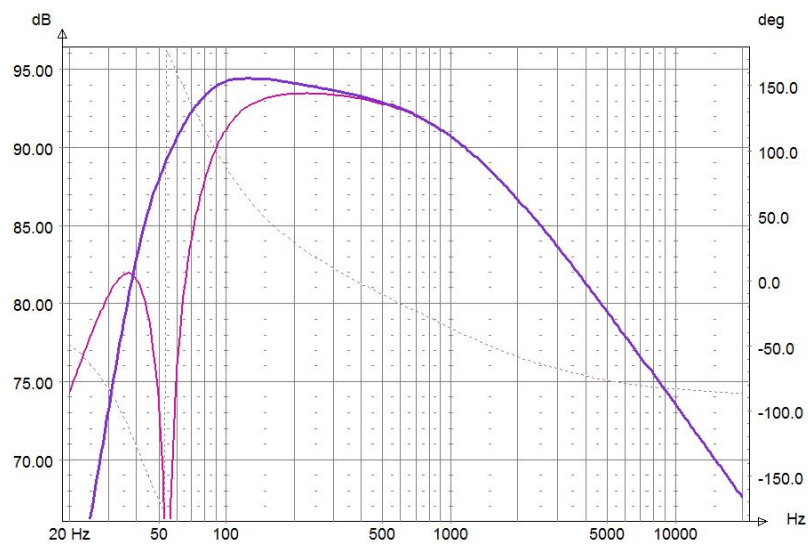
(a) Modulová kmitočtová charakteristika



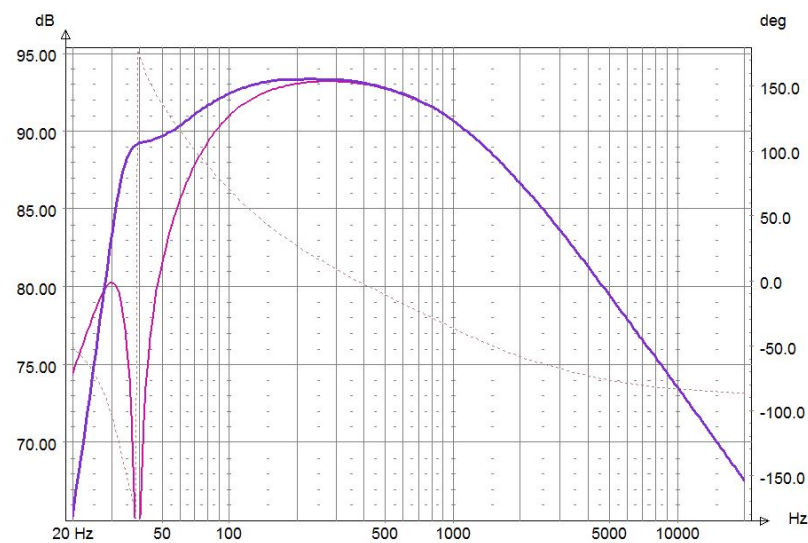
(b) Impedanční kmitočtová charakteristika

Obr. 4.5: Charakteristiky ozvučnice 30l, nátrubek o rozměrech 132,6x70 mm

Na obrázku 4.6 jsou opět přiloženy modulové kmitočtové charakteristiky ostatních objemů při rozměrech nátrubku 132,6x70mm pro porovnání s 30l ozvučnicí.



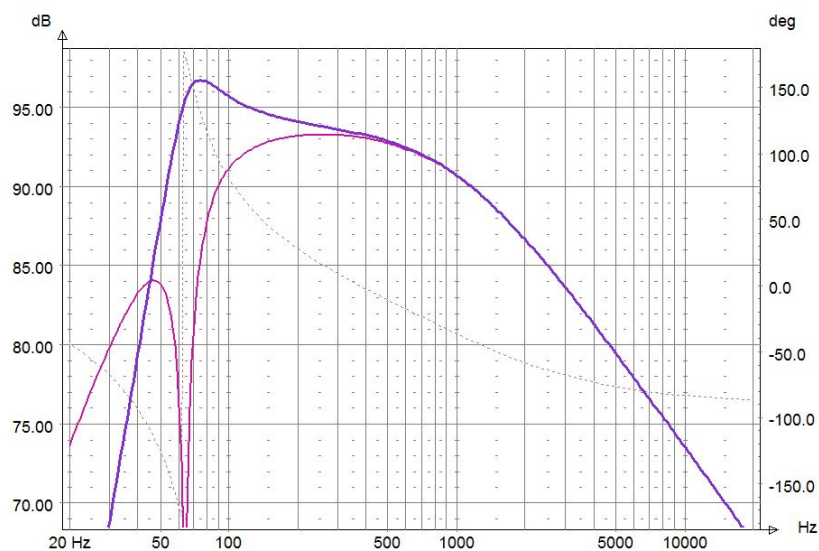
(a) Modulová kmitočtová charakteristika 20l ozvučnice



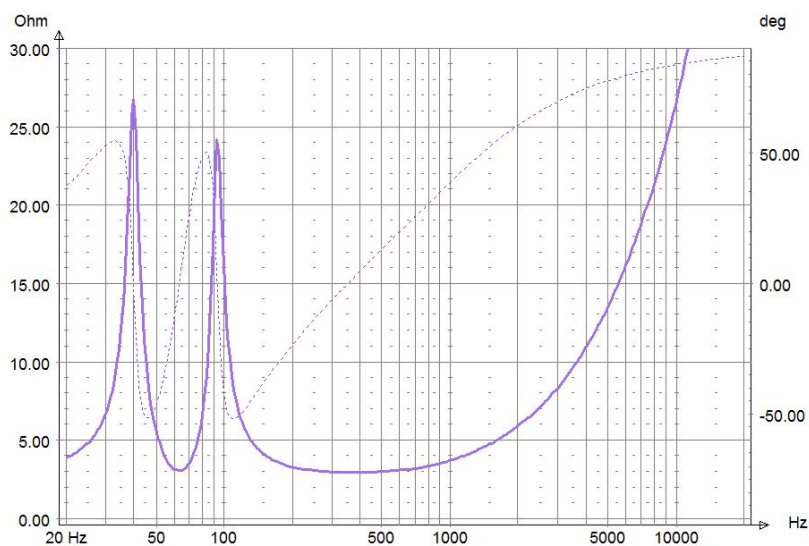
(b) Modulová kmitočtová charakteristika 39,05l ozvučnice

Obr. 4.6: Modulové kmitočtové charakteristiky pro nátrubek 132,6x70mm

Poslední zobrazenou charakteristikou bassreflexové ozvučnice je varianta použití obou nátrubků současně. LspCAD neumí pracovat se dvěma nátrubky různých rozměrů, proto jsem musel objemy dílčích nátrubků superponovat do jednoho objemu jediného nátrubku o rozměrech 129x105,5mm.



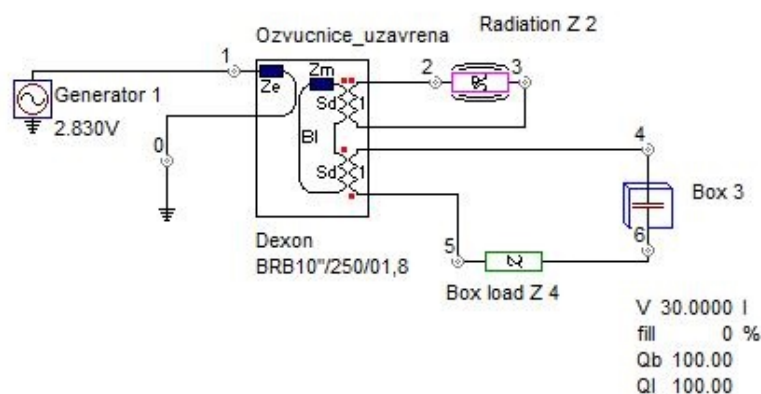
(a) Modulová kmitočtová charakteristika



(b) Impedanční kmitočtová charakteristika

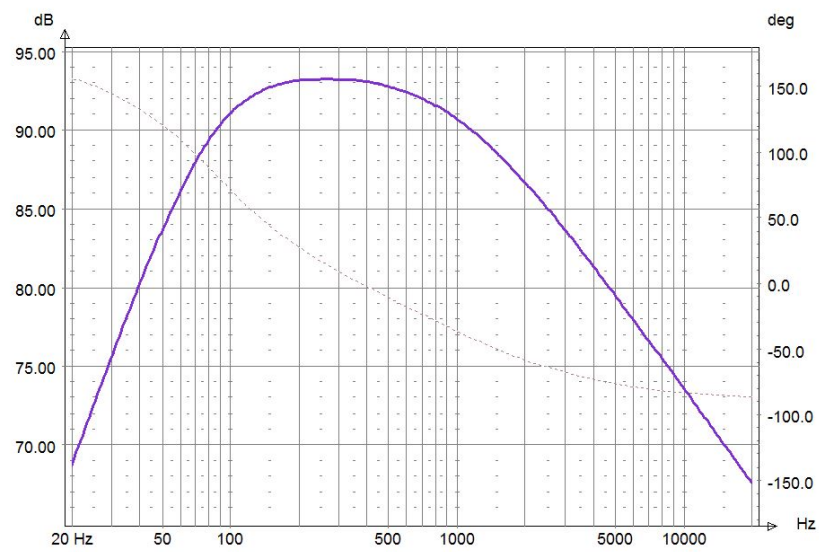
Obr. 4.7: Charakteristiky ozvučnice 301, nátrubek o rozměrech 129x105,5 mm

Po odsimulování bassreflexových ozvučnic jsem modifikoval schéma v LspCADu, jako je to zobrazeno na obr. 4.8, aby bylo možné nasimulovat charakteristiky pro uzavřenou ozvučnici. Pro tuto variantu jsem provedl simulaci modulové a kmitočtové charakteristiky pouze pro objem 30l, jakožto mnou použitý a 20l, jakožto objem odpovídající vypočítanému a zaokrouhlenému objemu, podle vzorce 4.3.

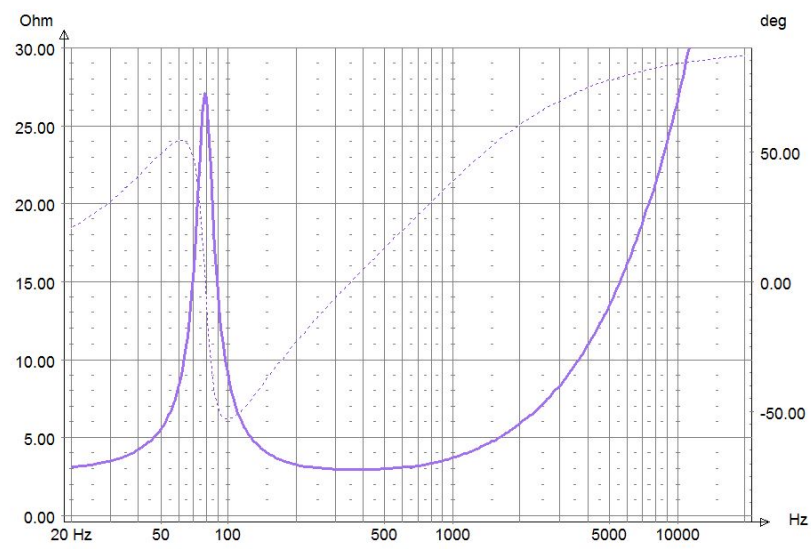


Obr. 4.8: Blokové schéma uzavřené ozvučnice v programu LspCAD

Při porovnání impedančních charakteristik pro různé objemy (obr. 4.9b a 4.10b) je dobře vidět, že ozvučnice o objemu 30l má rezonanční kmitočet přibližně 79 Hz, při impedanci 27Ω , zatímco 20l ozvučnice má rezonanční kmitočet o hodnotě přibližně 87 Hz, při impedanci $26,7 \Omega$. Tento fakt koresponduje s tím, že menší objem znamená větší tuhost, což podle vzorce (2.1) zvyšuje rezonanční kmitočet. Nepatrný rozdíl v hodnotě impedance je způsoben tím, že vlivem zvýšené tuhosti musí procházet kmitající cívkou větší proud pro její uvedení do pohybu. Podle Ohmova zákona je odpor(impedance) nepřímo úměrný protékajícímu proudu. Modulové kmitočtové charakteristiky jsou si velmi podobné a není na nich příliš pozorovatelný rozdíl.

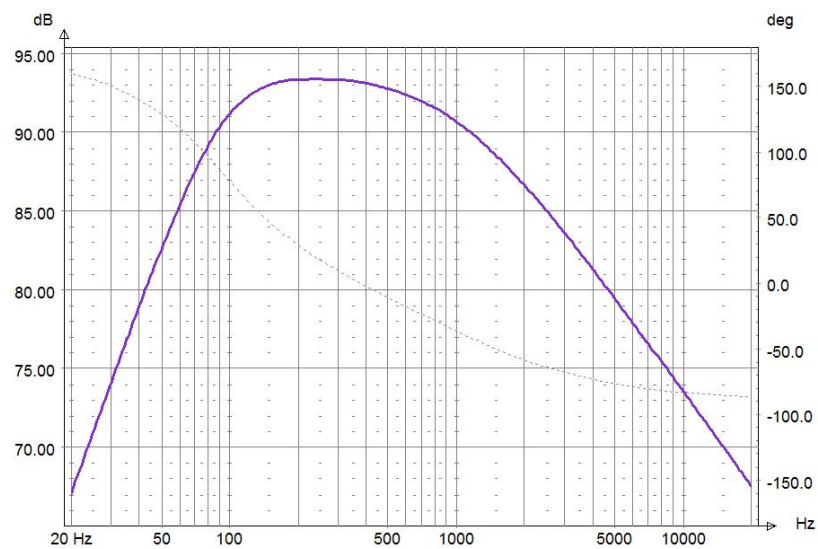


(a) Modulová kmitočtová charakteristika

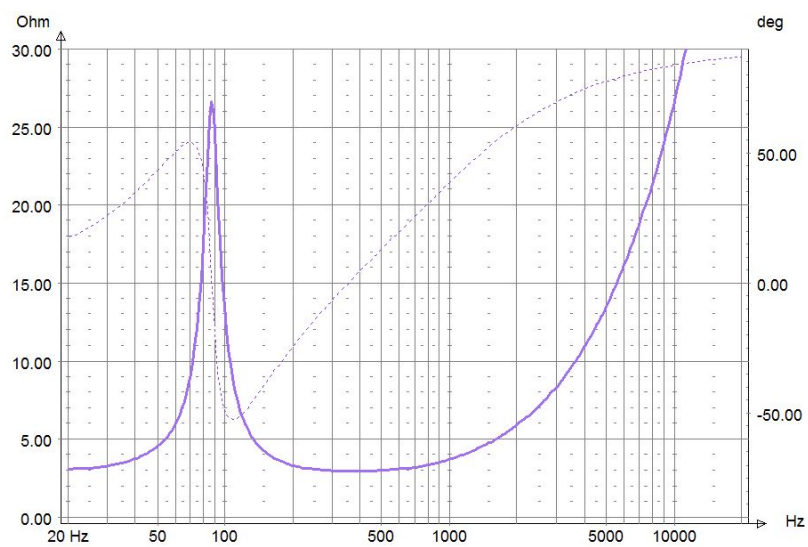


(b) Impedanční kmitočtová charakteristika

Obr. 4.9: Charakteristiky uzavřené ozvučnice 301



(a) Modulová kmitočtová charakteristika



(b) Impedanční kmitočtová charakteristika

Obr. 4.10: Charakteristiky uzavřené ozvučnice 20l

5 NÁVRH OZVUČNICE

V následující kapitole se práce zaměřuje na finální rozměry, konstrukci ozvučnice a na mechanické provedení změny mezi otevřenou, uzavřenou a bassreflexovou ozvučnicí.

Objem ozvučnice jsem v předchozí kapitole stanovil na 30l. Před výpočtem samotných rozměrů skříně bylo potřeba určit poměry jednotlivých stran skříně. Důležitým aspektem je, aby ozvučnice netvořila krychli. Uvnitř ozvučnice by se vytvářelo stojaté vlnění s délkou vlny rovnou dvojnásobku délky jednotlivých stěn ozvučnic. Z tohoto důvodu se volí šířka, výška a hloubka ozvučnice různé, kdy sice taky dochází ke stojatému vlnění, nicméně se jedná o rozdílné délky vln, tedy i rozdílné frekvence, které se nesčítají, jako v případě shodných frekvencí. Objem 30l se po převodu rovná $0,03\text{m}^3$.

$$V = \check{s} \cdot v \cdot h = 0,03\text{m}^3 = 30000000\text{mm}^3 \quad (5.1)$$

Postupným dělením této hodnoty danými délkami stran nakonec získám všechny potřebné vnitřní rozměry ozvučnice. Potřebný průměr pro montáž reproduktoru je podle katalogového listu výrobce 261 mm, šířku ozvučnice jsem tedy s mírnou rezervou zvolil 270 mm. S vedoucím práce jsme se dohodli na výšce celé ozvučnice 500 mm. Protože bude ozvučnice zkonstruována z materiálu o síle 18 mm, bylo potřeba od dané výšky odečíst dvakrát sílu materiálu, abych dostal vnitřní rozměr, který po tomto výpočtu vychází na 464 mm. Hloubku ozvučnice jsem získal již předem zmíněným dělením a zaokrouhlením, jak je uvedeno ve vzorci

$$h = \frac{V}{\check{s} \cdot v} \quad (5.2)$$

$$h = \frac{30000000}{270 \cdot 464} \doteq 240\text{mm}. \quad (5.3)$$

Podle konstrukčního provedení celé ozvučnice se k daným vnitřním rozměrům musela přičíst síla materiálu. Již zmíněná výška činí 500 mm, šířka 306 mm a hloubka 276 mm. Konstrukce ozvučnice je kompletně zobrazena v příloze C.1, ve které jsou obsaženy technické výkresy jednotlivých dílčích stěn ozvučnice, včetně celé sestavy z více pohledů. Obdélníkový výřez na jedné ze stran slouží pro osazení terminálu pro připojení audiokabelů. Dva kruhové výřezy na zadní straně slouží pro instalaci bassreflexových nátrubků a velký kruhový výřez na přední straně je logicky rezervován reproduktorem. Již dříve zmíněná možnost modifikace ozvučnice bude probíhat jednak demontáží celé zadní stěny díky stahovacím kovovým pantům, bez nutnosti použití speciálního nářadí, pro měření otevřené ozvučnice, případně pak ucpávání jednotlivých nátrubků za pomoci gumových zátek, které budou mít pro lepší těsnící vlastnosti možnost dotažení přes metrický závit a křídlových matek, což rovněž umožní tuto manipulaci bez použití nářadí.

Na obrázku 5.1 je zobrazena ozvučnice vymodelovaná v programu SolidWorks 2013.



Obr. 5.1: Model ozvučnice

6 PRINCIP MĚŘENÍ TS PARAMETRŮ

Následující kapitola se zabývá metodami měření TS parametrů, které byly popsány v kapitole 2. Vlastní měření prohloubí teoretické znalosti elektrodynamických reproduktorů, což je vzhledem k určení výsledné reproduktorové skříně přínosem. Zároveň se tak dají ověřit údaje, které ke svým produktům dodávají výrobci.

Prvním z těchto parametrů, který je potřebný pro měření těch ostatních, je rezonanční frekvence. Hodnota rezonanční frekvence se dá velmi snadno odečíst z impedanční charakteristiky reproduktoru a rovněž její měření není příliš obtížné. Měření této charakteristiky musí probíhat v prostředí bez rušivých vlivů, jako například hluk, nebo průvan. Reprodukter je nejčastěji umístěn na stabilní podložku magnetem směrem k této podložce. Protože je impedanční charakteristika reproduktoru závislostí impedance na frekvenci, je na kontakty reproduktoru přiveden signál o konstantní úrovni a přeladovanou frekvencí. V místě, kde dosáhne tato charakteristika maxima, odečteme hodnotu frekvence, která odpovídá f_s a hodnotu impedance značenou $Z_{\max}$. Pro další měření je potřeba určit stejnosměrný odpor cívky reproduktoru R_e , což je parametr změřitelný i obyčejným ohmmetrem. Vzájemným podílem $Z_{\max}$ a R_e získáme hodnotu odporu R_0 , která je použita pro výpočty činitelů jakosti:

$$R_0 = \frac{Z_{\max}}{R_e}. \quad (6.1)$$

Poslední parametr, který bude potřebný jako pomocná proměnná pro výpočet konkrétních TS parametrů, je hodnota odporu R_1 :

$$R_1 = \sqrt{R_0} \cdot R_e. \quad (6.2)$$

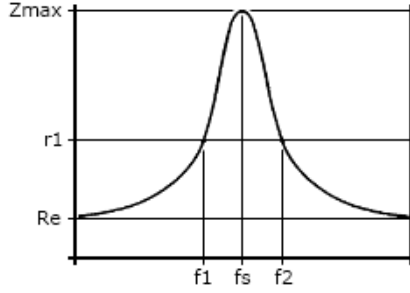
To je hodnota na impedanční charakteristice, na které následně odečteme dvě hodnoty frekvence (f_1 , f_2). Tyto hodnoty by měly být v ideálním případě umístěny symetricky kolem hodnoty rezonanční frekvence. V reálném případě není toto rozložení plně symetrické, protože tvar impedanční charakteristiky taky není zcela symetrický. Tvar ovlivňuje indukčnost cívky a pohyb závěsů (proto je třeba měřit nízkou úroveň signálu, aby se vliv závěsů projevoval co nejméně) [7]. Pro ověření správnosti hodnot f_1 a f_2 můžeme použít vztah

$$f_s = \sqrt{f_1 \cdot f_2}. \quad (6.3)$$

Pro lepší představu je vše znázorněno na obrázku 6.1.

Nyní již zbývá pouze dosadit do vzorců pro výpočet hledaných činitelů jakosti:

$$Q_{\text{ms}} = \frac{f_s \cdot \sqrt{R_0}}{f_2 - f_1} \quad (6.4)$$



Obr. 6.1: Impedanční charakteristika [8]

$$Q_{es} = \frac{Q_{ms}}{R_0 - 1} \quad (6.5)$$

$$Q_{ts} = \frac{Q_{es} \cdot Q_{ms}}{Q_{es} + Q_{ms}}. \quad (6.6)$$

Posledním parametrem, který je třeba změřit, je ekvivalentní objem V_{as} . Ekvivalentní objem se dá určit dvěma metodami. První z nich je použití malého závaží, které se spojí s membránou reproduktoru, druhá metoda spočívá v použití ozvučnice o známém objemu. Jelikož je taková ozvučnice produktem mé bakalářské práce, bude využito právě této metody. Samotné měření probíhá tak, že se měřený reproduktor vsadí do reproduktorové skříně známého objemu a změří se rezonanční kmitočet. Pro snížení chyby při určování vnitřního objemu ozvučnice s nainstalovaným reproduktorem je potřeba brát v úvahu i objem samotného reproduktoru. Tento objem je závislý zejména na způsobu montáže reproduktoru do ozvučnice. Pokud reproduktor umístíme přední stranou membrány dovnitř ozvučnice, musíme k objemu skříně přičíst objem, který vytváří prohnutý tvar membrány. Pokud umístíme reproduktor přední stranou membrány směrem ven z ozvučnice, musíme naopak od jejího objemu odečíst objem nosného koše, magnetu a všech ostatních částí zadní strany reproduktoru [6].

Po změření rezonančního kmitočtu a přesného určení vnitřního objemu ozvučnice stačí dosadit do jednoduchého vzorce 6.7, kde V_o je námi určený vnitřní objem, f_b je rezonanční kmitočet reproduktoru v ozvučnici o objemu V_o a f_s představuje rezonanční kmitočet samotného reproduktoru [6].

$$V_{as} = V_o \cdot \left(\left(\frac{f_b}{f_s} \right)^2 - 1 \right). \quad (6.7)$$

7 APLIKACE JINÉHO REPRODUKTORU

Následující kapitola se věnuje použití výše zmíněných principů simulace a návrhu ozvučnice i pro jiný typ reproduktoru, než byl v původním zadání, protože se v laboratoři nachází i druhý reproduktor s označením BRB 6"/50/01,8.

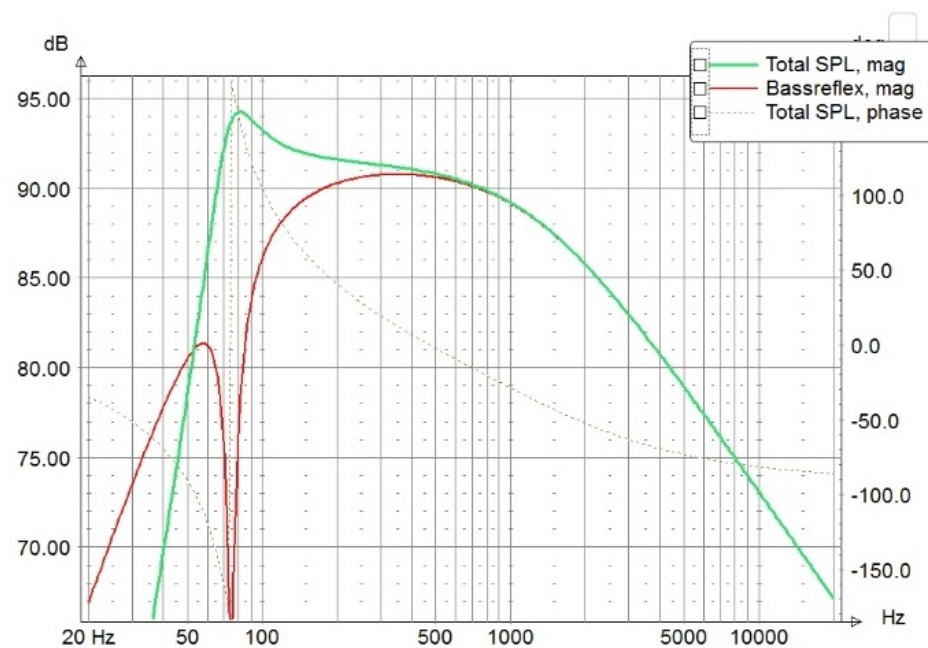
Aplikoval jsem postup z kapitol 4 a 5 i pro tento model reproduktoru. Opět jsem pomocí vzorců 4.2 a 4.4 stanovil rozmezí objemu ozvučnice.

$$V_{bu} = \frac{7,23}{\left(\frac{0,707}{0,46}\right)^2 - 1} = 5,307\text{l.} \quad (7.1)$$

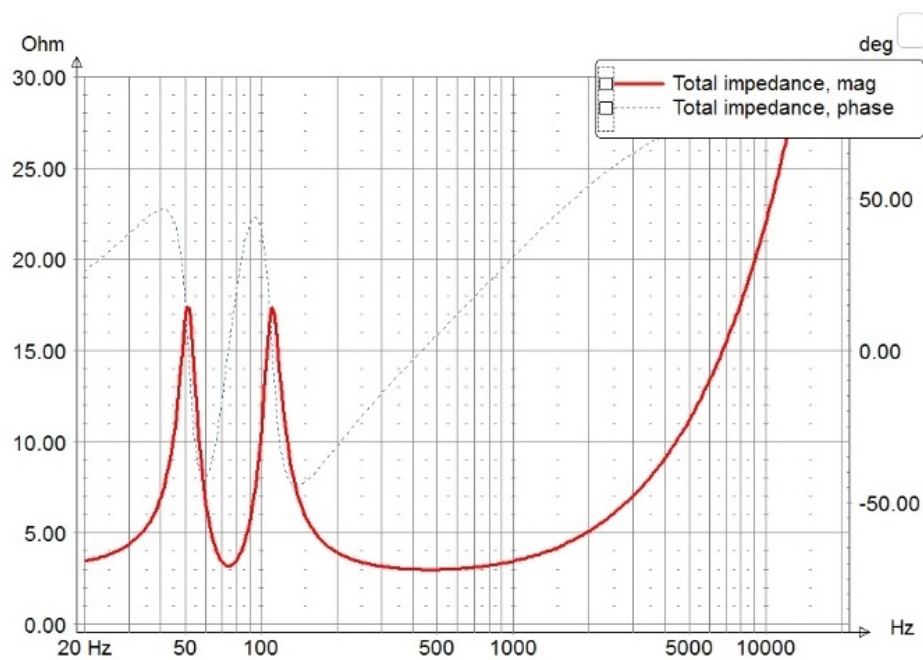
$$V_{bb} = 15,33 \cdot 7,23 \cdot 0,46^{2,86} = 12,027\text{l.} \quad (7.2)$$

Jelikož objem pro bassreflexovou ozvučnici vychází v tomto případě na 12,027 l, není třeba uchylovat se ke kompromisu. Objem ozvučnice jsem tedy stanovil na zaokrouhlených 12 l. Bassreflexové nátrubky byly opět použity dva. Oba tyto nátrubky mají shodný průměr, ale různé délky, aby byl dobře patrný vliv změny délky nátrubku na výslednou modulovou charakteristiku. Jednotlivé charakteristiky různě laděných nátrubků jsou zobrazeny na 7.1. Cílem bylo dosáhnout dvou modulových kmitočtových charakteristik, na kterých byl bylo znázorněno lokální převýšení charakteristiky 7.1a a vyrovnaná charakteristika 7.2a.

Co se týká konkrétních rozměrů ozvučnice, tak jsem se opět musel řídit zejména montážním otvorem pro reproduktor, který u tohoto modelu činí 150 mm. Druhým aspektem při určování délek jednotlivých stran ozvučnice byla snaha o různorodost těchto rozměrů, kvůli zamezení stojatého vlnění. Finální rozměry jsou stanoveny na 236 mm šířky, 306 mm výšky a 258 mm hloubky.

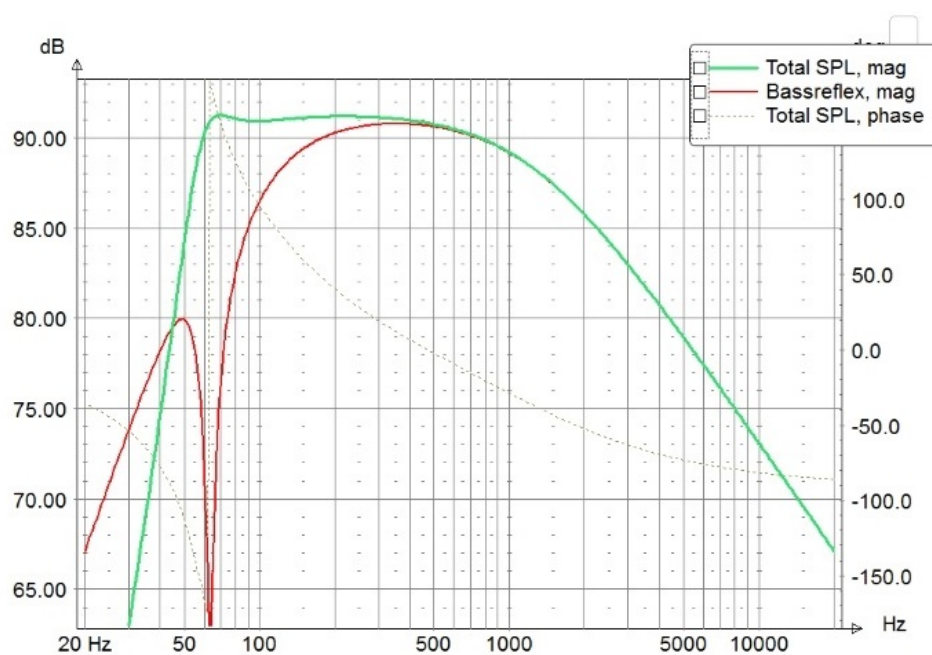


(a) Modulová charakteristika
pro nátrubek 60x55 mm

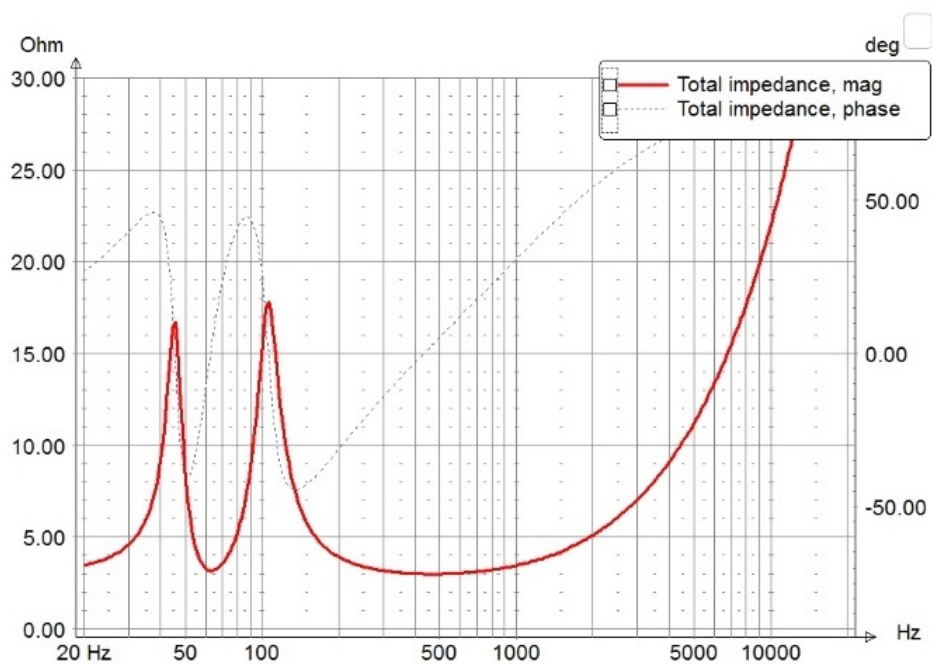


(b) Impedanční charakteristika
pro nátrubek 60x55 mm

Obr. 7.1: Porovnání modulových a impedančních kmitočtových charakteristik pro 60mm nátrubek ve 12l ozvučnici



(a) Modulová charakteristika
pro nátrubek 100x55 mm



(b) Impedanční charakteristika
pro nátrubek 100x55 mm

Obr. 7.2: Porovnání modulových a impedančních kmitočtových charakteristik pro 100mm nátrubek ve 12l ozvučnici

8 MECHANICKÁ KONSTRUKCE

Následující kapitola se zabývá mechanickou konstrukcí ozvučnice, zejména pak spojováním jednotlivých desek reproboxu a realizací odnímatelné zadní stěny spolu s ucpávkami bassreflexových nátrubků.

Sestavení ozvučnice probíhalo v souladu s výkresovou dokumentací, uvedenou v příloze C.1, kde je zobrazen princip spojování jednotlivých desek dohromady, a D.1, kde jsou uvedeny rozměry ozvučnice pro reproduktor BRB 6"/50/01,8. Jak je dobře patrné z příložené dokumentace, spojovala se ozvučnice tzv. natupo. Tento způsob je nejjednodušší na přípravu desek, protože není třeba vyřezávat úkosy, nebo spojovací drážky. Na druhou stranu je při kompletaci třeba dbát na přesné slícování jednotlivých stěn. Pro zvýšení pevnosti celé konstrukce jsou mezi stěnami použity dřevěné kolíky o průměru 8 mm rozestupech přibližně 60 mm. Na styčné plochy jednotlivých desek jsem aplikoval lepidlo na dřevo, stáhl svorkami a nechal řádně vytvrdnout 7 dní.

Zadní stěna ozvučnice, ve které jsou usazené bassreflexové nátrubky, je k celé konstrukci přimontována rozebíratelným spojem za použití čtyř bednových uzávěrů. Toto řešení umožňuje velmi rychlou a snadnou montáž a demontáž zadní stěny pro potřeby konkrétního měření. Co se samotných nátrubků týče, bylo třeba pro možnost záměny mezi bassreflexovou a uzavřenou ozvučnicí aplikovat systém ucpávání vyústění obou nátrubků, který by byl rychlý a snadný, stejně jako odnímatelná zadní stěna ozvučnice, ale spolehlivý, aby při měření nedocházelo k nepřesnostem. Tuto záměnu jsem vyřešil použitím 8mm plechu vypáleného na průmyslovém laseru, viz příloha E.1. Na tento plech byla nalepena měkká guma ve tvaru kruhu. Pomocí dvou šroubů a křídlových matic je plech s nalepenou gumou stahován směrem k vyústění nátrubku a dochází tak k zamezení proudění akustických vln nátrubkem do prostoru.

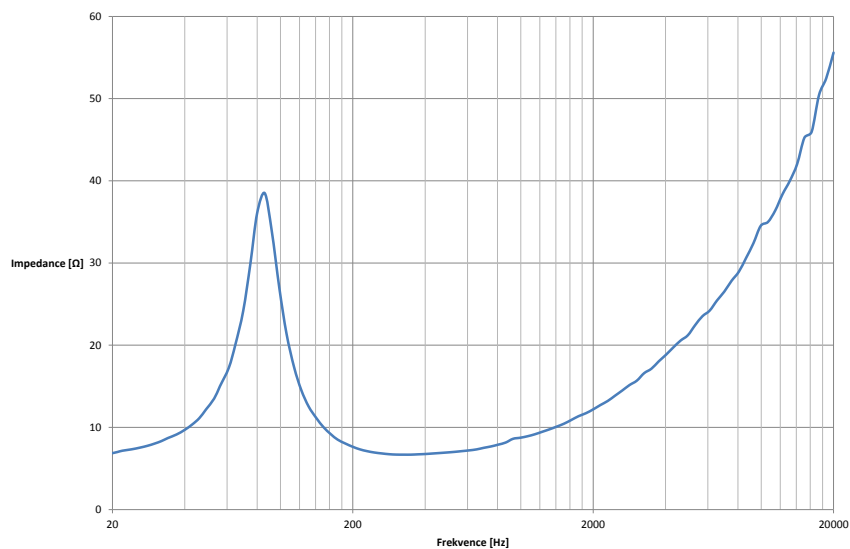
Dokončení ozvučnice ještě představovalo oblepit vnitřní prostor akusticky pohltivým materiálem, který by část akustické energie zadní vlny reproduktoru přeměnil v teplo a tím omezil maxima vlastních frekvencí (módů) uvnitř ozvučnice. Tuto úpravu jsem ale provedl až v průběhu samotného měření, protože jsem změřil ozvučnici i bez vnitřního tlumení pro demonstraci vlivu takové úpravy na impedanční charakteristiku.

9 MĚŘENÍ OZVUČNICE

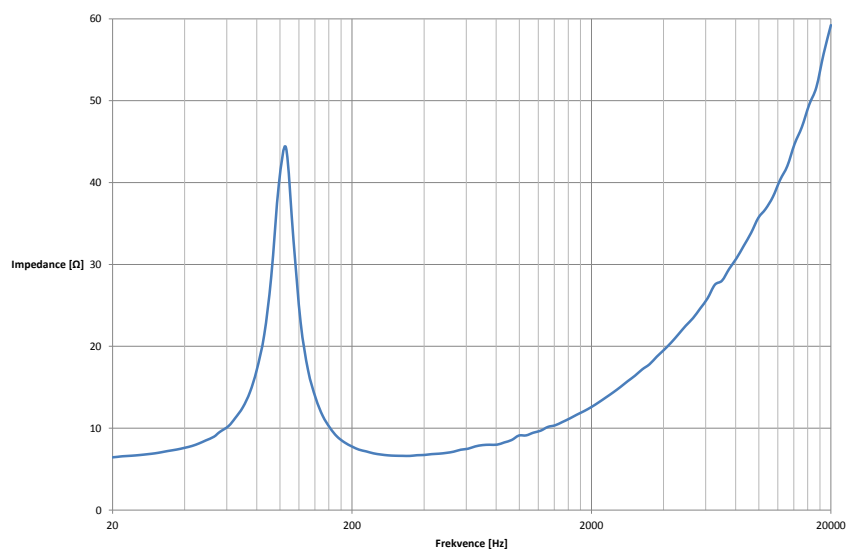
Tato kapitola pojednává o výsledném měření požadovaných charakteristik ozvučnice pro všechny její modifikace.

Měření i výsledná data jsou rozdělena do dvou celků. Jedná se o impedanční kmitočtové charakteristiky a modulové kmitočtové charakteristiky, stejně jako v simulacích 4. Při měřících postupech jsem nemusel začínat úplně od nuly. Pro obě metody měření existují laboratorní úlohy v rámci předmětu Elektroakustika, jejichž návody jsem využil. Začal jsem měřením impedančních charakteristik. Princip měření impedanční charakteristiky spočívá v měření napětí a proudu, který protéká měřeným reproduktorem. Měření proudu je realizováno měřením úbytku napětí na normálovém odporu, který je zapojený do série s měřeným reproduktorem. Tyto dvě měřené veličiny jsou přiváděny do akustického analyzátoru NTi Audio RT-2B, který pomocí těchto veličin určuje impedanci v daném měřícím kroku. Analyzátor má integrovaný generátor, který rozmítá měřící signál do měřeného reproduktoru a umožňuje tak měřit v celém požadovaném rozsahu frekvencí ve velmi krátké době. Zároveň je celý systém napojený na počítač, kde se veškerá naměřená data dají zobrazit a dále s nimi pracovat. Měření modulové kmitočtové charakteristiky pak probíhá na principu přivádění signálu o známé, konstantní úrovni do reproduktoru. Zvuk vyzářený reproduktorem je pak snímán měřícím mikrofonom. Závislost měřeného signálu z mikrofonu na přehrávané frekvenci pak tvoří modulovou kmitočtovou charakteristiku. Přeladování frekvence, stejně jako ukládání dat každého měřeného kroku obstarává počítač. Nejprve jsem měřil samotný reproduktor, poté uzavřenou ozvučnici bez vnitřního tlumení. Poté jsem tlumení přilepil na vnitřní strany ozvučnice. Už s vytlumenou skříní jsem změřil i zbylé varianty, konkrétně pak ozvučnici uzavřenou, otevřenou bez zadní stěny, dále s využitím nejprve jednoho a pak i druhého bassreflexového nátrubku. Poslední variantou bylo měření uzavřené ozvučnice s využitím akustického rouna, které posiluje funkci vnitřního tlumení, které již bylo nalepeno na vnitřních stěnách. Po odměření všech impedančních charakteristik jsem přistoupil k měření charakteristik modulových. Toto měření probíhalo stejně jako předchozí pouze s tím rozdílem, že nedošlo k měření nevytlumené ozvučnice, protože v momentě měření modulových charakteristik bylo tlumení již pevně nalepeno na vnitřní strany ozvučnice. Modulové kmitočtové charakteristiky nemají velkou výpovědní hodnotu pro kmitočty pod 100 Hz, což je kritický kmitočet bezodrazové komory, ve které měření probíhalo.

Pokud se porovnají grafy 9.1a a 9.4a je dobře vidět, že umístění reproduktoru do otevřené ozvučnice nemá oproti použití reproduktoru bez ozvučnice z pohledu impedanční charakteristiky téměř žádný vliv.



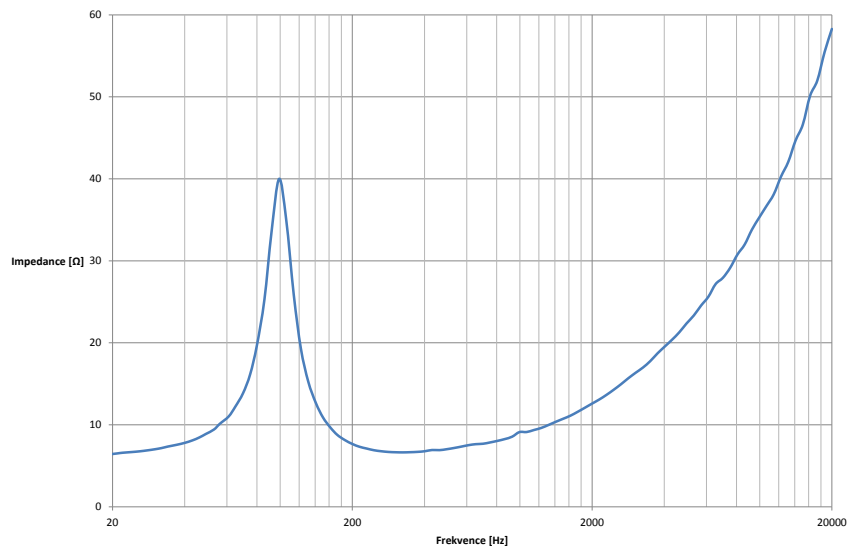
(a) Impedanční kmitočtová charakteristika samostatného reproduktoru



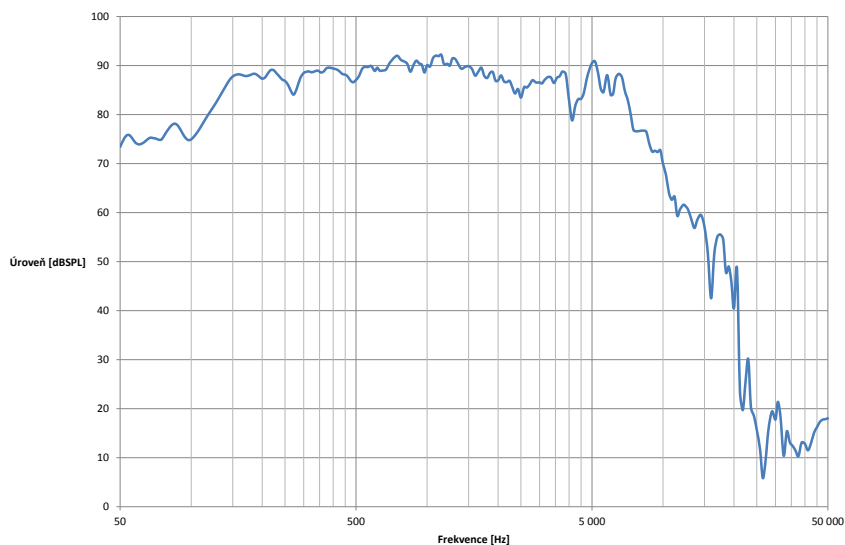
(b) Impedanční kmitočtová charakteristika uzavřené ozvučnice bez tlumícího materiálu

Obr. 9.1: Konfigurace, pro které proběhlo měření pouze impedančních charakteristik

Při porovnání grafů 9.1b a 9.2a je patrné, jaký vliv má tlumení na vlastnosti reproduktoru. Při aplikaci tlumení dochází k nepatrnému snížení rezonančního kmitočtu a snížení hodnoty impedance v rezonanci přibližně o $5\ \Omega$.



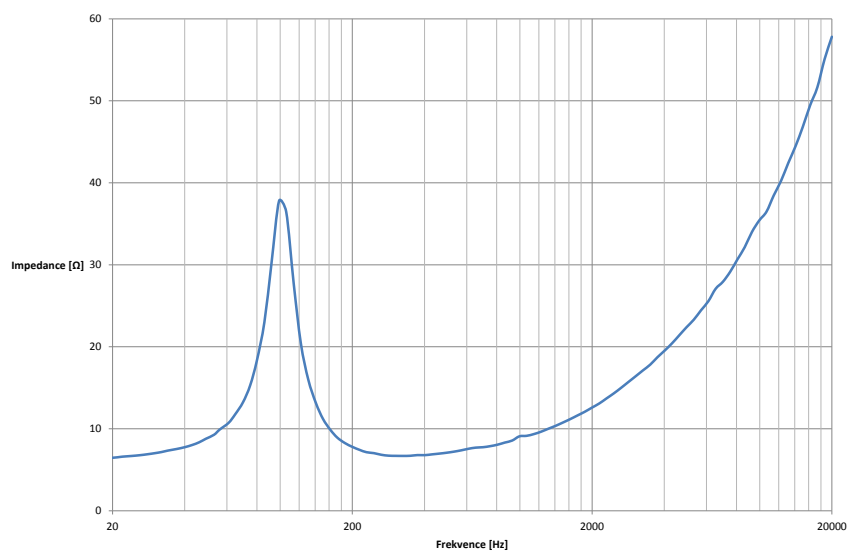
(a) Impedanční kmitočtová charakteristika uzavřené ozvučnice



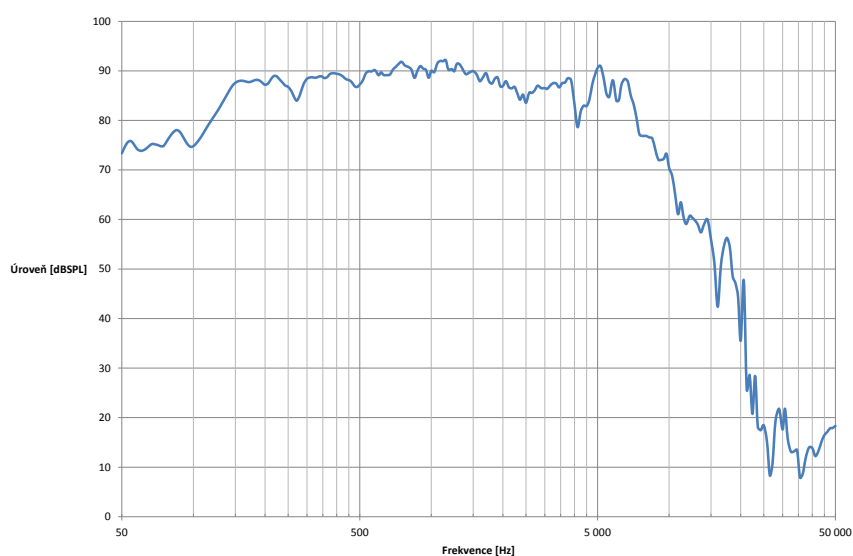
(b) Modulová kmitočtová charakteristika uzavřené ozvučnice

Obr. 9.2: Charakteristiky uzavřené ozvučnice

Dle grafů 9.2a a 9.3a je patrné, že použití akustického rouna způsobuje další pokles impedance na rezonančním kmitočtu. Tyto poklesy jsou způsobeny snižováním objemu ozvučnice, což vede ke zvýšení tuhosti kmitajícího systému i akustického odporu uvnitř ozvučnice. Rezananční kmitočet zůstává beze změn.



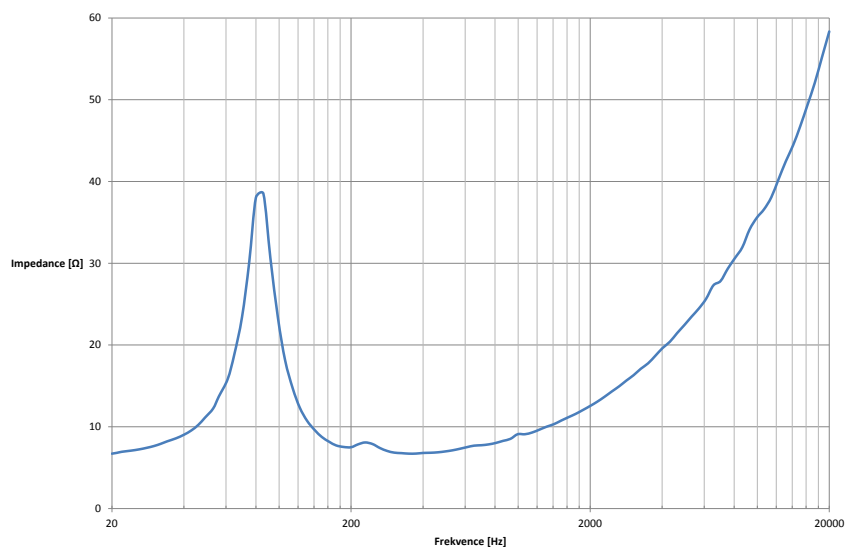
(a) Impedanční kmitočtová charakteristika uzavřené ozvučnice s rounem



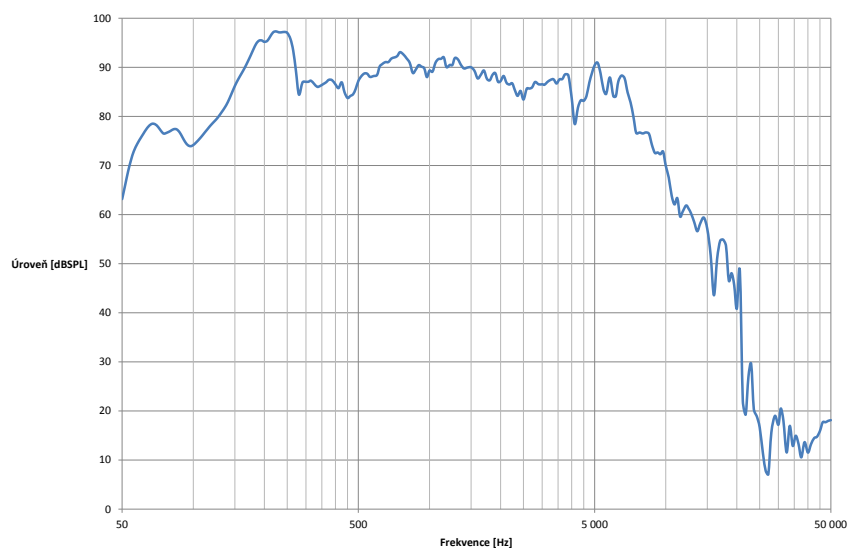
(b) Modulová kmitočtová charakteristika uzavřené ozvučnice s rounem

Obr. 9.3: Charakteristiky uzavřené ozvučnice s vloženým akustickým rounem

Impedanční charakteristika otevřené ozvučnice 9.4a vykazuje v porovnání s ozvučnicí uzavřenou 9.2a další snížení rezonančního kmitočtu přibližně o 20 Hz a nepatrným snížením hodnoty impedance při tomto kmitočtu. Toto chování je v souladu s předpokládanou teorií 3.2.



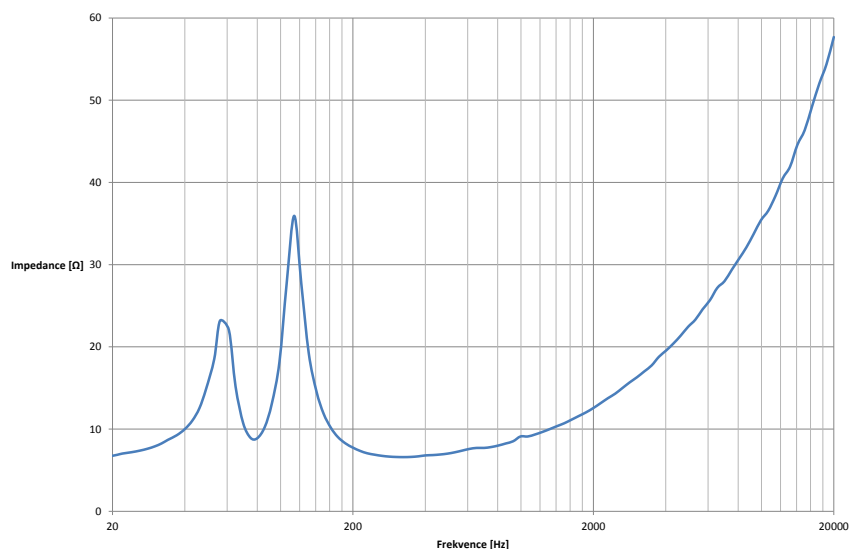
(a) Impedanční kmitočtová charakteristika otevřené ozvučnice



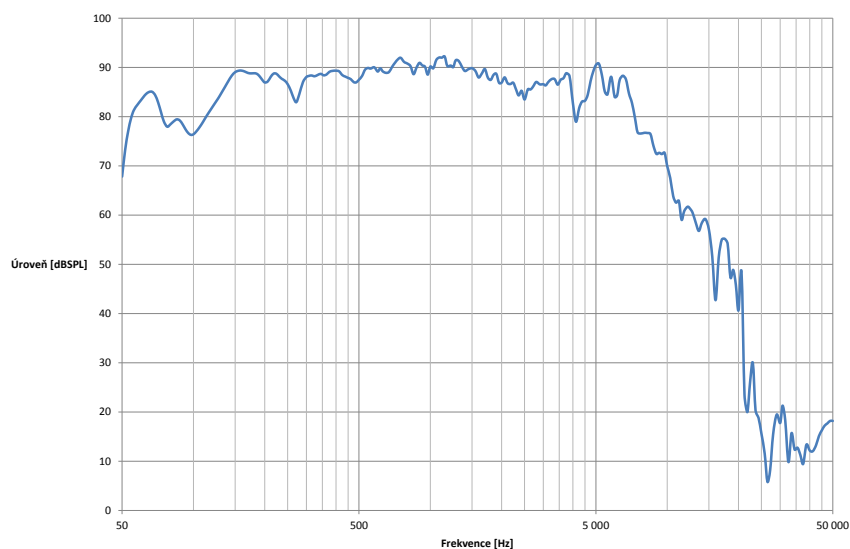
(b) Modulová kmitočtová charakteristika otevřené ozvučnice

Obr. 9.4: Charakteristiky otevřené ozvučnice

Na grafech 9.5a a 9.6a je dobře patrný vliv bassreflexových nátrubků na impedanční charakteristiky v podobě lokálních extrémů na kmitočtech 40-60 Hz. Dobře viditelné je také rozdílné ladění obou nátrubků.

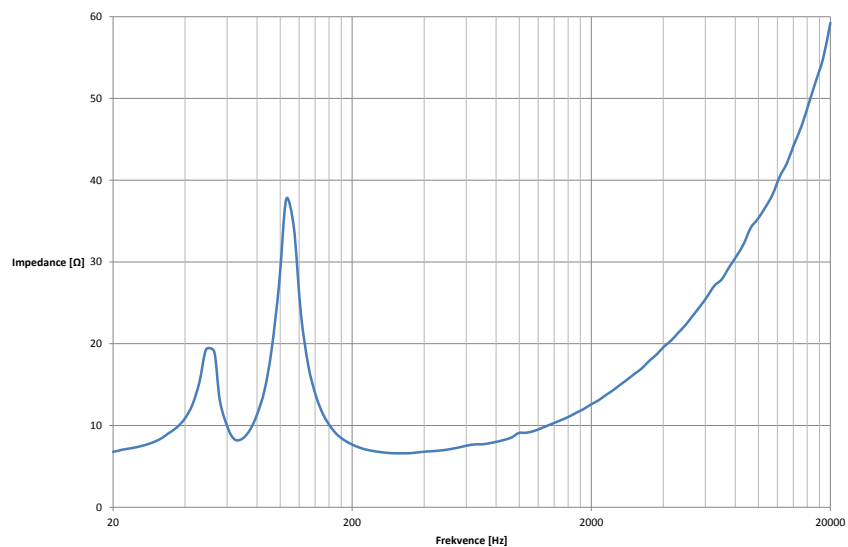


(a) Impedanční kmitočtová charakteristika ozvučnice se 60mm bassreflexem

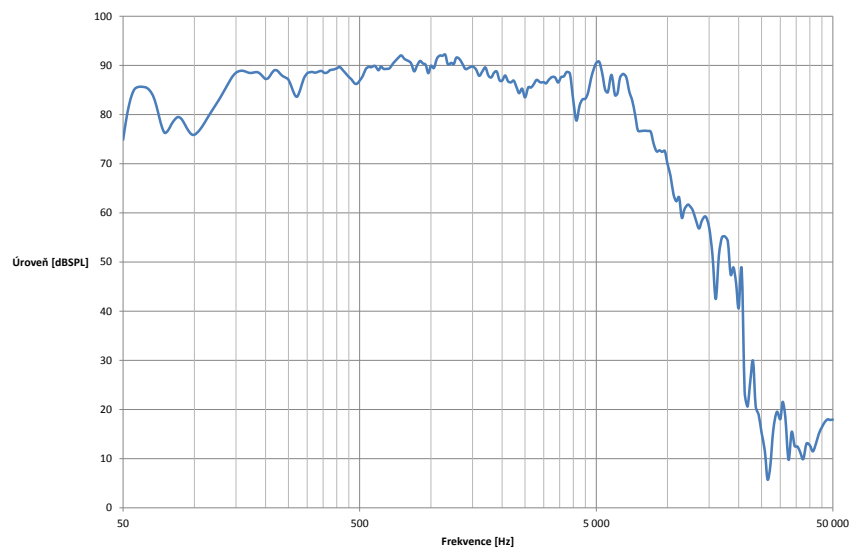


(b) Modulová kmitočtová charakteristika ozvučnice se 60mm bassreflexem

Obr. 9.5: Charakteristiky ozvučnice se 60mm bassreflexem



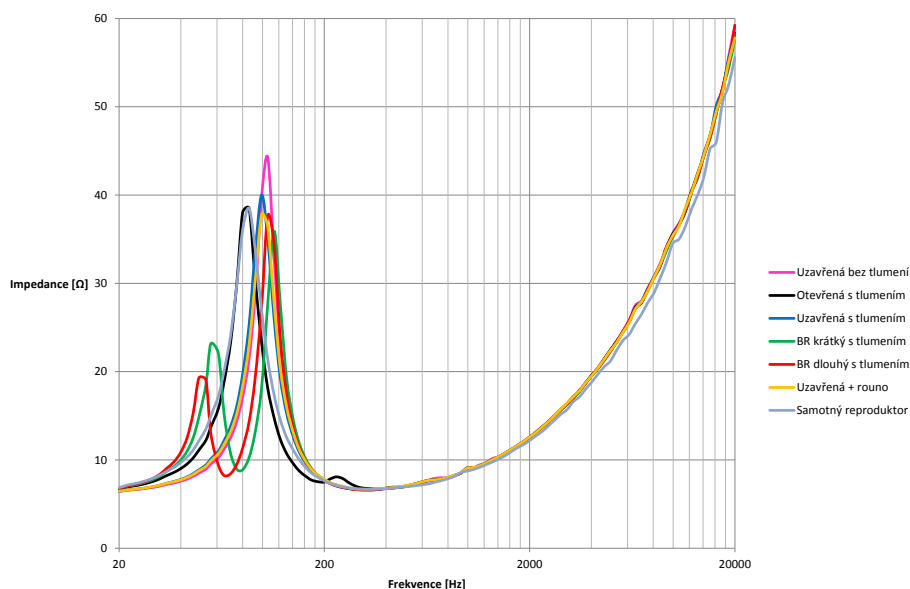
(a) Impedanční kmitočtová charakteristika ozvučnice se 100mm bassreflexem



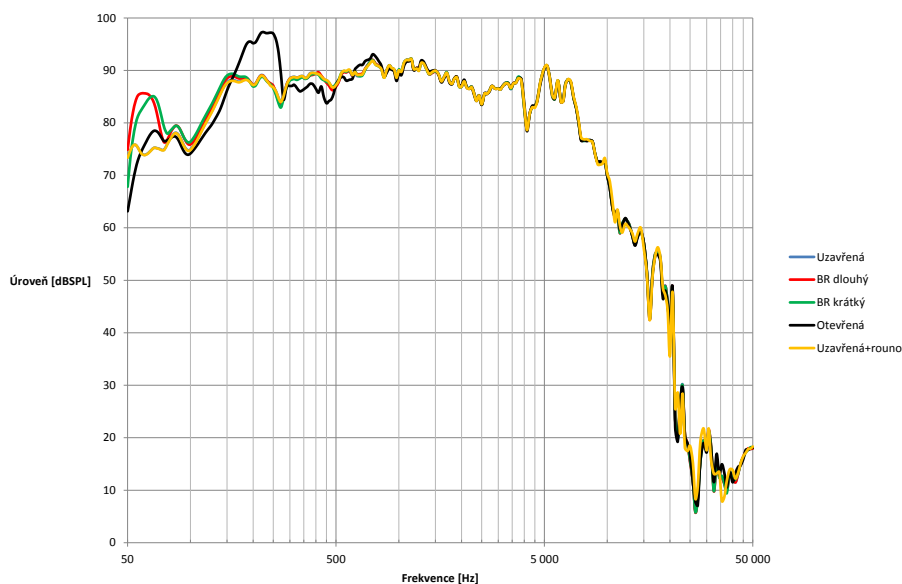
(b) Modulová kmitočtová charakteristika ozvučnice se 100mm bassreflexem

Obr. 9.6: Charakteristiky ozvučnice se 100mm bassreflexem

Na grafech 9.7a a 9.7b jsou vidět veškeré charakteristiky proložené přes sebe, takže jsou dobře patrné veškeré rozdíly mezi jednotlivými modifikacemi ozvučnice. Převýšení otevřené ozvučnice na modulové charakteristice je způsobeno tím, že otevřená ozvučnice ve skutečnosti tvoří bassreflex s obdélníkovým průřezem laděným přibližně na 256 Hz, podle vzorce 3.2.



(a) Porovnání impedančních kmitočtových charakteristik všech měření



(b) Porovnání modulových kmitočtových charakteristik všech ozvučnic

Obr. 9.7: Porovnání charakteristik všech ozvučnic

10 VÝPOČET TS PARAMETRŮ

Následující kapitola se věnuje výpočtu TS parametrů reproduktoru, usazeného v ozvučnici, na základě hodnot získaných z měření popsaného v kapitole 9. Výpočet se bude řídit teorií popsanou v kapitole 6. Veškeré výpočty budou provedeny pro hodnoty uzavřené ozvučnice s vlepeným vnitřním tlumením. Hodnoty R_0 a R_1 jsou:

$$R_0 = \frac{Z_{\max}}{R_e} \quad (10.1)$$

$$R_0 = \frac{40}{5,97} = 6,70\Omega \quad (10.2)$$

$$R_1 = \sqrt{R_0} \cdot R_e \quad (10.3)$$

$$R_1 = \sqrt{6,70} \cdot 5,97 = 15,45\Omega \quad (10.4)$$

Hodnoty dvou frekvencí, které odpovídají R_1 na impedanční charakteristice jsou: $f_1 = 75$ Hz a $f_2 = 131$ Hz. Kontrolní výpočet uvedený ve vzorci 10.6 jen s velmi malou nepřesností splňuje podmínku rovnosti rezonančního kmitočtu (99 Hz). Tato nepřesnost může být způsobena velkým krokem ve změně frekvence při měření impedanční charakteristiky. Hodnoty rezonančního kmitočtu, mechanického, elektrického a celkového činitele jakosti a ekvivalentního objemu jsou:

$$f_s = \sqrt{f_1 \cdot f_2} \quad (10.5)$$

$$f_s = \sqrt{75 \cdot 131} = 99,12\text{Hz} \quad (10.6)$$

$$Q_{\text{ms}} = \frac{f_s \cdot \sqrt{R_0}}{f_2 - f_1} \quad (10.7)$$

$$Q_{\text{ms}} = \frac{90 \cdot \sqrt{6,70}}{131 - 75} = 4,16 \quad (10.8)$$

$$Q_{\text{es}} = \frac{Q_{\text{ms}}}{R_0 - 1} \quad (10.9)$$

$$Q_{\text{es}} = \frac{4,16}{6,70 - 1} = 0,73 \quad (10.10)$$

$$Q_{\text{ts}} = \frac{Q_{\text{es}} \cdot Q_{\text{ms}}}{Q_{\text{es}} + Q_{\text{ms}}} \quad (10.11)$$

$$Q_{\text{ts}} = \frac{0,73 \cdot 4,16}{0,73 + 4,16} = 0,62 \quad (10.12)$$

$$V_{\text{as}} = V_o \cdot \left(\left(\frac{f_b}{f_s} \right)^2 - 1 \right) \quad (10.13)$$

$$V_{\text{as}} = 12 \cdot \left(\left(\frac{99}{80,1} \right)^2 - 1 \right) = 6,331 \quad (10.14)$$

11 ZÁVĚR

V rámci bakalářské práce bylo potřeba teoreticky navrhnout dvě ozvučnice pro dva různé reproduktory, z nichž jedna se dočkala i praktické realizace a měření. Návrh probíhal díky simulacím v programu LspCAD, kde jsem pro první reproduktor vybíral vhodný objem v rozsahu 20–39 l, což jsou hodnoty, které jsem spočítal podle teorie. Výsledný objem ozvučnice je 30 l. Tento objem tvoří kompromis mezi kompaktností uzavřené ozvučnice a maximally flat charakteristikou ozvučnice bassreflexové. Objem druhé ozvučnice byl stanoven na 12 l. Tato menší ozvučnice byla vyrobena a měřena. Měření bylo provedeno pro veškeré modifikace, které vyrobená ozvučnice umožňovala. Výstupem této práce je především samotná ozvučnice a změněné charakteristiky. Modulové kmitočtové charakteristiky nemají bohužel velkou výpovědní hodnotu, protože frekvenční oblast, kde by byly dobře patrné jednotlivé rozdíly v ozvučnicích, se nachází pod kritickým kmitočtem bezodrazové komory. Vlnová délka těchto frekvencí je totiž srovnatelná, nebo větší se samotnými rozměry komory. Tato skutečnost nicméně není stěžejní, protože mnou vyrobená ozvučnice bude sloužit laboratorně pouze pro měření impedančních charakteristik a měření modulových charakteristik bylo provedeno jen pro úplnost bakalářské práce. Jediným aspektem na modulových charakteristikách, který stojí za zmínku je charakteristika otevřené ozvučnice, kde se projevuje převýšení okolo 250 Hz, které je způsobeno chováním samotné otevřené ozvučnice jako bassreflexu. Na impedančních charakteristikách jsou už rozdíly velmi dobře patrné. Referenční hodnotou je hodnota rezonančního kmitočtu 106 Hz při měření uzavřené ozvučnice bez tlumení. Při měření uzavřené ozvučnice s vlepeným tlumením došlo k posunutí rezonančního kmitočtu na 99 Hz z důvodu umělého navýšení objemu díky materiálu tlumící pěny. Při aplikaci akustického rouna mělo dojít s posílením tohoto chování, nicméně rezonanční kmitočet zůstal 99 Hz zřejmě z důvodu přílišného množství rouna, kdy se požadovaný efekt obrací a místo zvýšení objemu dochází k jeho snížení. Další snížení rezonančního kmitočtu na hodnotu 86 Hz následovalo při měření otevřené ozvučnice. Toto snížení nastalo z důvodu absence celé zadní stěny, takže objem vzduchu působící na membránu znatelně vzrostl. Toto je taky důvod, proč se charakteristika otevřené ozvučnice prakticky neliší od charakteristiky při absenci jakékoliv ozvučnice. Pro měření s kratším, 60 mm nátrubkem vycházely rezonanční kmitočty na 56 a 114 Hz. Pro delší 100 mm nátrubek jsou tyto hodnoty potom 49 a 106 Hz. Většina TS parametrů, které jsem získal výpočtem z naměřených hodnot vzrostly oproti těm uváděným výrobcem. Jmenovitě pak rezonanční kmitočet f_s z 80,1 Hz na 99 Hz, mechanický činitel jakosti Q_{ms} z 2,77 na 4,16, elektrický činitel jakosti Q_{es} z 0,55 na 0,73 a celkový činitel jakosti Q_{ts} z 0,46 na 0,62. Tyto nárůsty jsou způsobeny usazením reproduktoru do uzavřené ozvučnice. Jediný TS parametr, který svou hod-

notu oproti katalogovému listu výrobce snížil, je ekvivalentní objem V_{as} , který po výpočtu vyšel 6,33l oproti katalogovým 7,23l. Tato nepřesnost je způsobena příliš velkým krokem změny frekvence při měření impedanční charakteristiky.

LITERATURA

- [1] BOLDIŠ, P. *Bibliografické citace dokumentů podle ČSN ISO 690 a ČSN ISO 690-2* [online]. 2001, poslední aktualizace 11. 11. 2004 [cit. 17. 2. 2005]. Dostupné z URL: <<http://www.boldis.cz/citace/citace.html>>.
- [2] COLLOMS, M.; DARLINGTON, P. *High Performance Loudspeakers, 6th ed.*. John Wiley & Sons, Ltd., 2005. 5352 s. ISBN 978-0-4-470094-30-3., [cit. 6. 11. 2014].
- [3] *Dexon reproduktor*, Dexon [online]. 2014, poslední aktualizace 20. 11. 2014 [cit. 11. 11. 2014]. Dostupné z URL: <<http://www.dexon.cz/data/popisy/05025.pdf>>.
- [4] *Helmholtz resonance*, Wikipedia [online]. 2014, poslední aktualizace 2. 8. 2014 [cit. 12. 11. 2014]. Dostupné z URL: <http://en.wikipedia.org/wiki/Helmholtz_resonance>.
- [5] *Hydraulic diameter*, Wikipedia [online]. 2014, poslední aktualizace 12. 11. 2014 [cit. 12. 11. 2014]. Dostupné z URL: <http://en.wikipedia.org/wiki/Hydraulic_diameter>.
- [6] *Measuring Thiele/Small Loudspeaker Parameters*, sound.westhost [online]. 2014, poslední aktualizace květen 2014 [cit. 25. 3. 2015]. Dostupné z URL: <<http://sound.westhost.com>>.
- [7] *Měření TS parametrů*, Audioweb [online]. 2007, poslední aktualizace 3. 3. 2012 [cit. 14. 3. 2015]. Dostupné z URL: <<http://www.audioweb.cz/viewtopic.php?id=15625>>.
- [8] *Měření TS parametrů, obrázek*, Audioweb [online]. 2007, poslední aktualizace 3. 3. 2012 [cit. 14. 3. 2015]. Dostupné z URL: <<http://www.audioweb.cz/mer/imp-popis.png>>.
- [9] *Pravidlo levé ruky*, Wikipedia [online]. 2014, poslední aktualizace 17. 6. 2014 [cit. 11. 11. 2014]. Dostupné z URL: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Flemingovo_pravidlo_lev%C3%A9_ruky>.
- [10] *Pravidlo levé ruky–obrázek*, Wikiskripta [online]. 2014, poslední aktualizace 19. 2. 2014 [cit. 11. 11. 2014]. Dostupné z URL: <http://www.wikiskripta.eu/index.php/Flemingovo_pravidlo_lev%C3%A9_ruky>.

- [11] *Reproduktor*, Wikipedia [online]. 2014, poslední aktualizace 14. 5. 2014 [cit. 11. 11. 2014]. Dostupné z URL:
<<http://cs.wikipedia.org/wiki/Reproduktor>>.
- [12] SCHIMMEL, J. *Elektroakustika – skripty, první vydání*. VUT v Brně FEKT UTKO, 2013. 167 stran. ISBN 978-80-214-4716-5., [cit. 6. 11. 2014].
- [13] SMALL H. R. *Direct-Radiator Loudspeaker System Analysis*. IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics. 1971, AU-19, s. 269-281. [cit. 12. 11. 2014].
- [14] SVOBODA, L.; ŠTEFAN, M. *Reproduktory a reproduktorové soustavy*. SNTL, Praha, 1976. 328 s. 04-524-76., [cit. 6. 11. 2014].
- [15] SÝKORA, B. *Stavíme reproduktorové soustavy*. Amatérské rádio: Praktická elektronika. 1997-2001, 1-48. [cit. 6. 11. 2014].
- [16] *Thiele/Small*, Wikipedia [online]. 2014, poslední aktualizace 27. 10. 2014 [cit. 12. 11. 2014]. Dostupné z URL:
<<http://en.wikipedia.org/wiki/Thiele/Small>>.
- [17] TOMAN, KAMIL *Reproduktory a reprosoustavy 1*. Dexon, Karviná, 2001. ISBN 859-1459280805 [cit. 23. 5. 2015].
- [18] *Význam TS parametrů*, Audioweb [online]. 2007, poslední aktualizace 14. 4. 2007 [cit. 12. 11. 2014]. Dostupné z URL:
<<http://www.audioweb.cz/viewtopic.php?id=15624&p=2>>.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

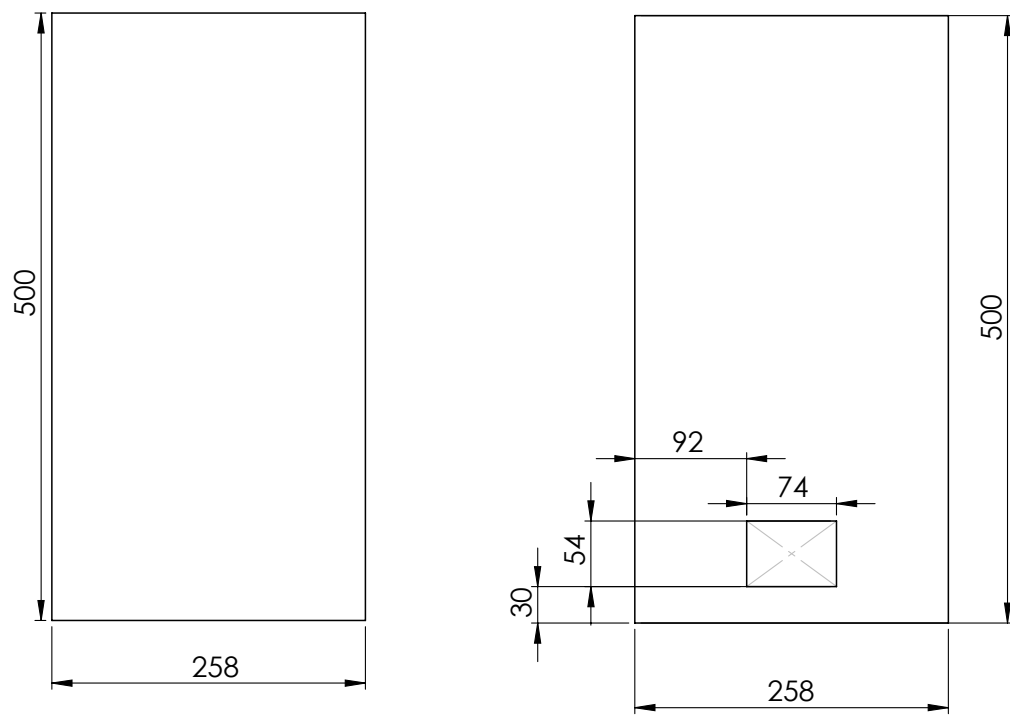
Bl	součin magnetické indukce a délky vodiče ve vzduchové mezeře [N/A]
c	rychlost zvuku ve vzduchu [m/s]
C_{ms}	poddajnost zavěšení membrány [m/N]
d	ekvivalentní průměr průřezu nátrubku [m]
EBP	Efficiency Bandwidth Product [-]
f_1, f_2	hodnoty pomocných frekvencí [Hz]
f_b	rezonanční kmitočet ozvučnice [Hz]
f_{br}	rezonanční kmitočet bassreflexové ozvučnice [Hz]
f_s	rezonanční kmitočet [Hz]
l_c	délka kruhového nátrubku s koncovou korekcí [m]
l_r	délka obdélníkového nátrubku s koncovou korekcí [m]
M_{ms}	hmotnost kmitajících systému a spolukmitajícího sloupce vzduchu [kg]
Q_{es}	elektrický činitel jakosti [-]
Q_{ms}	1 mechanický činitel jakosti [-]
Q_{tc}	činitel jakosti aproximace [-]
Q_{ts}	celkový činitel jakosti [-]
R_0, R_1	pomocné hodnota odporů [Ω]
R_e	stejnoseměrný odpor vinutí cívky [Ω]
R_{ms}	mechanický odpor zavěšení membrány [kg/s]
S	Průřez bassreflexového nátrubku [m ²]
S_d	plocha membrány [m ²]
TS	Thiele-Small
V	vnitřní objem ozvučnice [l]
V_{as}	ekvivalentní objem [l]

V_{bb}	objem bassreflexové ozvučnice [l]
V_{bu}	objem uzavřené ozvučnice [l]
V_o	objem ozvučnice [m ³]
Z_{max}	hodnota impedance na rezonančním kmitočtu [Ω]
λ	vlnová délka [m]
ρ	hustota vzduchu [kg/m ³]

SEZNAM PŘÍLOH

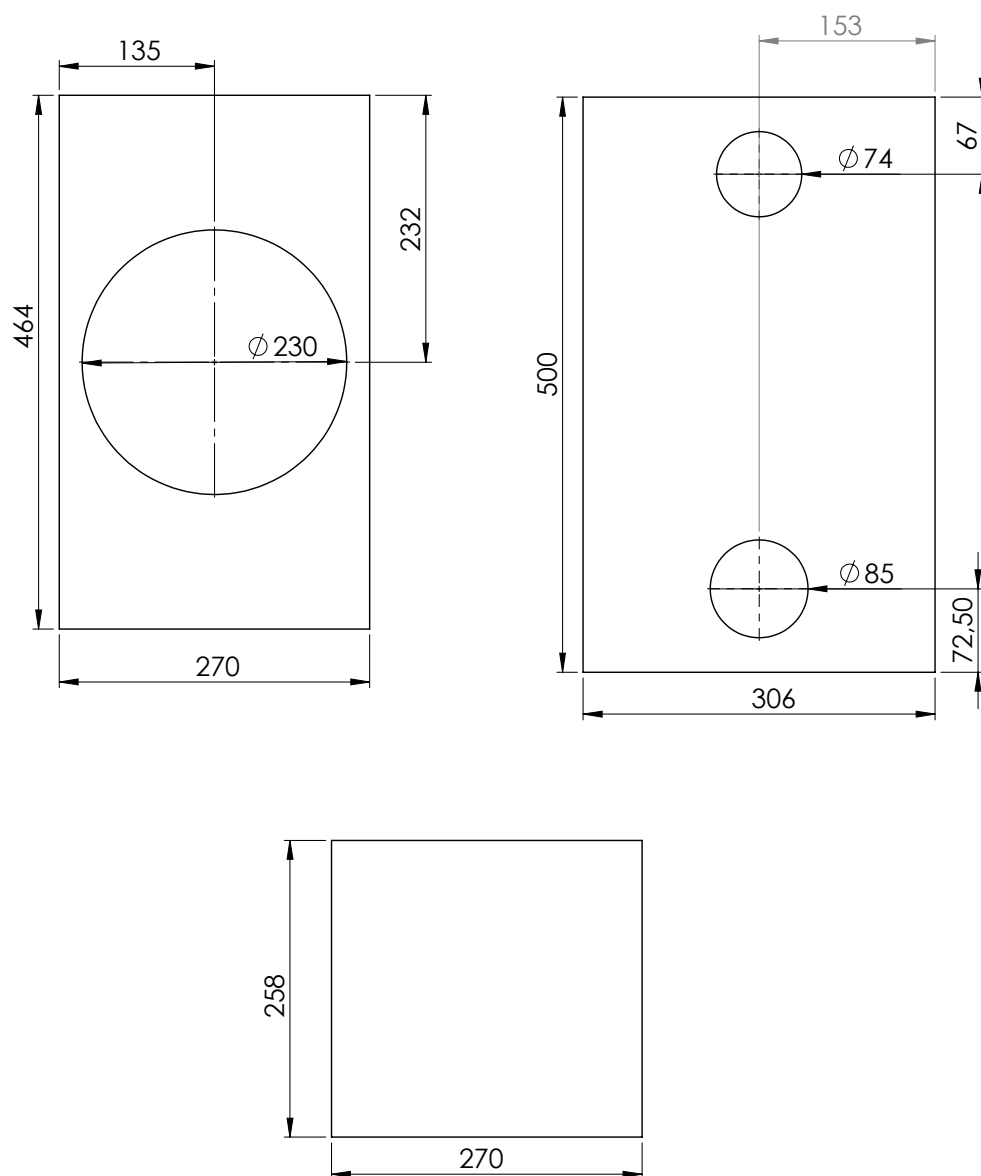
A	Výkresy bočních stěn ozvučnice	58
B	Výkresy podstavy, přední a zadní stěny ozvučnice	59
C	Výkres sestavené ozvučnice	60
D	Výkresy dílčích desek ozvučnice pro druhý reproduktor	61
E	Výkres vypáleného dílu pro víčka bassreflexů	62

A VÝKRESY BOČNÍCH STĚN OZVUČNICE



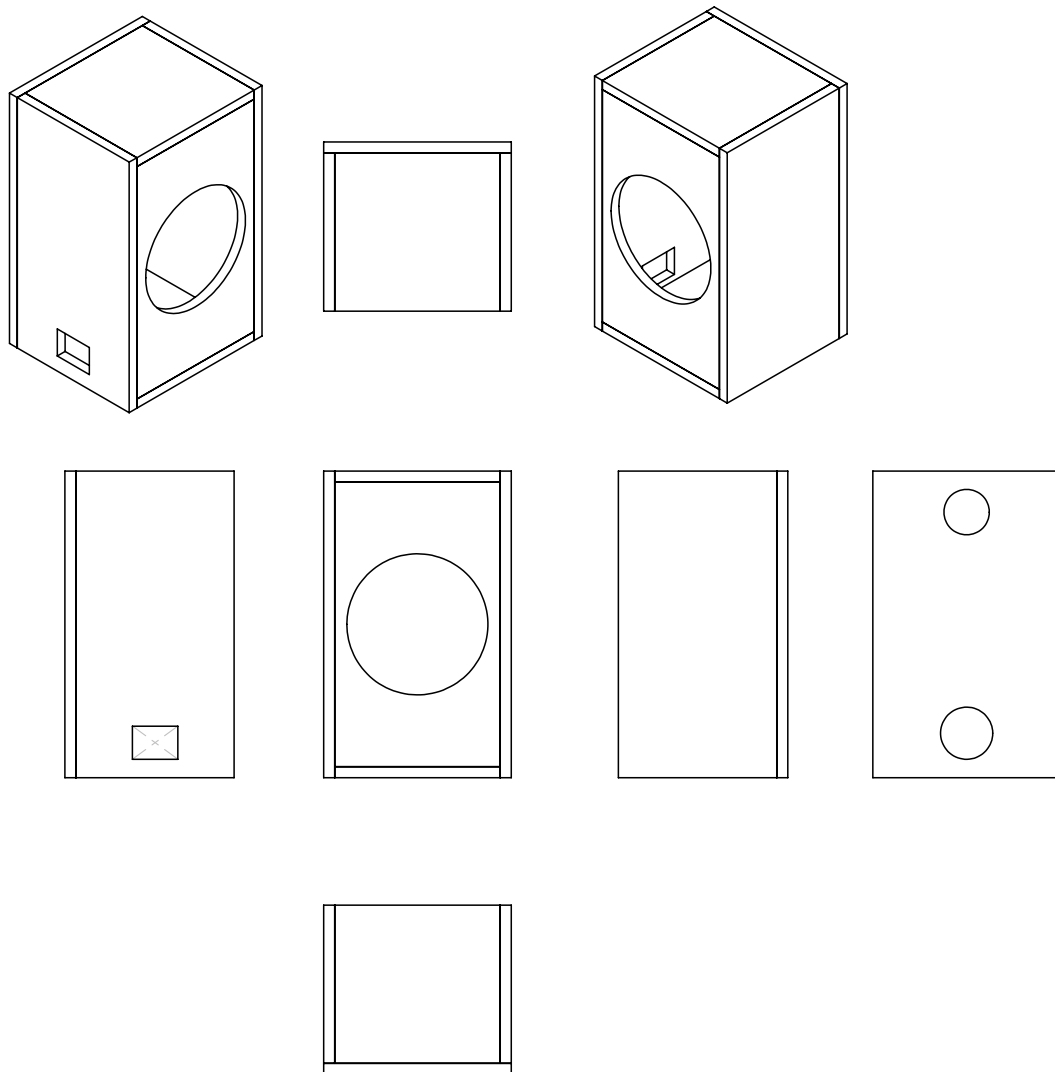
Obr. A.1: Výkresy bočních stěn ozvučnice v programu SolidWorks 2013

B VÝKRESY PODSTAVY, PŘEDNÍ A ZADNÍ STĚNY OZVUČNICE



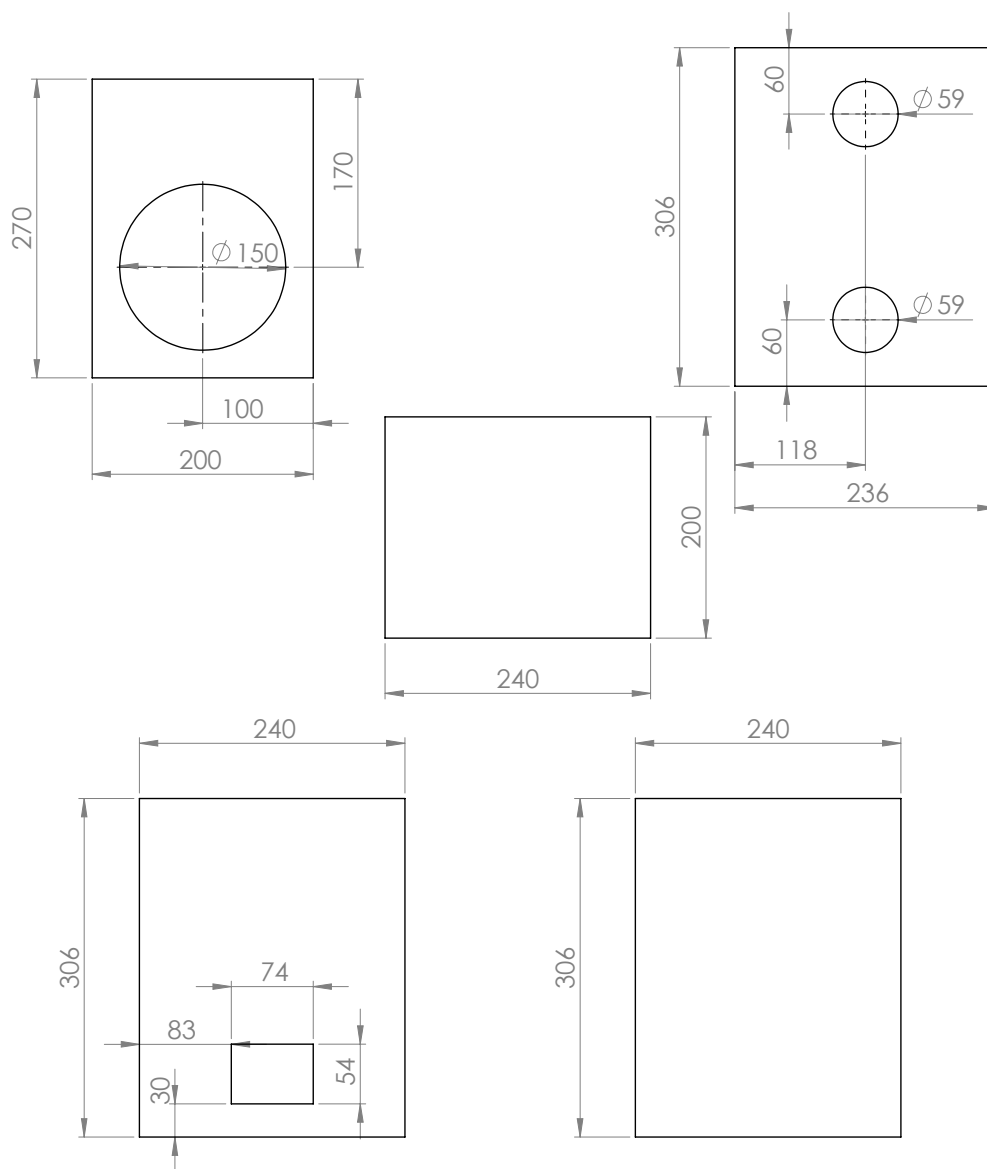
Obr. B.1: Výkresy podstav, přední a zadní stěny ozvučnic v programu SolidWorks 2013

C VÝKRES SESTAVENÉ OZVUČNICE



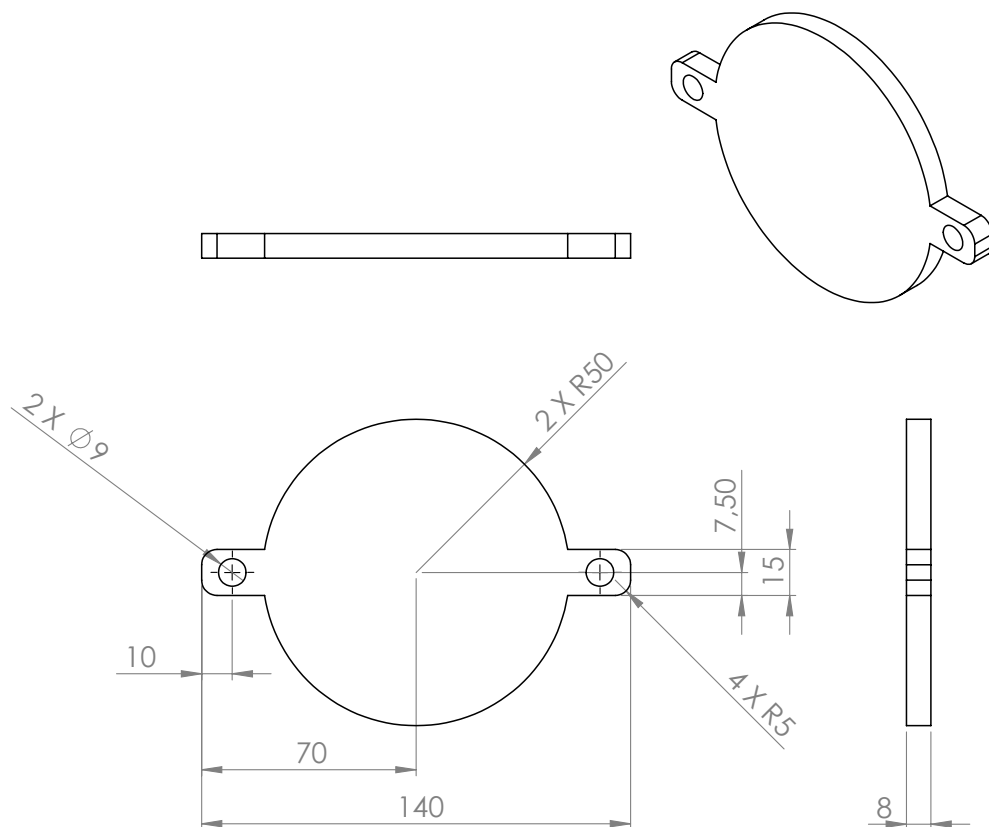
Obr. C.1: Výkres kompletně sestavené ozvučnice z různých pohledů v programu SolidWorks 2013

D VÝKRESY DÍLČÍCH DESEK OZVUČNICE PRO DRUHÝ REPRODUKTOR



Obr. D.1: Výkres přední a zadní stěny, podstavy a obou bočních stěn ozvučnice pro reproduktor BRB 6"/50/01,8 v programu SolidWorks 2013

E VÝKRES VYPÁLENÉHO DÍLU PRO VÍČKA BASSREFLEXŮ



Obr. E.1: Nákres vypálené kovové krytky v programu SolidWorks 2013