

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2022

Jiří Tomešek



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

MĚŘICÍ REPRODUKTOROVÁ SOUSTAVA PRO LABORATORNÍ ÚLOHY

MEASURING LOUDSPEAKER SYSTEM FOR LABORATORY PRACTICES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jiří Tomešek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.

BRNO 2022

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Audio inženýrství**
specializace Zvuková technika
Ústav telekomunikací

Student: Jiří Tomešek

ID: 220785

Ročník: 3

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Měřicí reproduktorová soustava pro laboratorní úlohy

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte a realizujte dvoupásmovou pasivní reproduktorovou soustavu pro účely demonstračního měření impedančních a kmitočtových charakteristik jednotlivých reproduktorů i celé soustavy pro laboratorní cvičení předmětu Elektroakustika. Nejprve proveďte návrh uzavřené a bassreflexové ozvučnice a simulaci impedanční a kmitočtové charakteristiky hlubokotónového reproduktoru v těchto ozvučnicích v programu LspCAD. Proveďte také simulace při špatně zvolených objemech ozvučnic a parametrech bassreflexového nátrubku. Dále proveďte návrh výhybky a simulaci charakteristik celé reproduktorové soustavy v programu LspCAD, včetně simulací při špatně zvolených hodnotách součástí výhybky. Následně zkonstruuje reproduktorovou soustavu s navrženou bassreflexovou ozvučnicí a navrženou výhybkou a ověřte její charakteristiky měřením. Zkonstruuje také variabilní ozvučnici pro hlubokotónový reproduktor, která bude umožňovat rychlou změnu mezi polouzavřenou, uzavřenou a dvěma bassreflexovými ozvučnicemi z nichž jedna bude odpovídat navržené bassreflexové ozvučnici.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] COLLOMS, M., High Performance Loudspeakers, 6th ed. John Wiley & Sons, Ltd., 2005. ISBN 978-0-470094-30-3
- [2] HILL, G., Loudspeaker modelling and design: a practical introduction. New York: Routledge, 2019, xliii : ilustrace. ISBN 9780815361336.

Termín zadání: 7.2.2022

Termín odevzdání: 31.5.2022

Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Schimmel, 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

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem dvoupásmové reproduktorové soustavy a variabilní ozvučnice pro hlubokotónový reproduktor pro účely demonstračního měření v předmětu Elektroakustika. V teoretické části jsou vysvětleny jednotlivé reproduktory, TS parametry a vzorce pro jejich výpočet. Dále jsou vysvětleny různé typy a konstrukce ozvučnic a výhybek. Pomocí simulačního programu LspCAD byly doladěny a odsimulovány návrhy uzavřené a bassreflexové ozvučnice se správnými i špatnými parametry. Stejně tak byla odsimulována navržená výhybka pro dvoupásmovou reproduktorovou soustavu. K návrhům byla připravena výkresová dokumentace. Dále byly ozvučnice a výhybka realizovány a změřeny jejich charakteristiky. V poslední řadě byly přepracovány již existující laboratorní úlohy tak, aby při jejich vypracování studenti využili realizované ozvučnice a zvolený postup návrhu.

Klíčová slova

Dvoupásmová reproduktorová soustava, bassreflex, LspCAD, laboratorní úlohy, ozvučnice, reproduktor, simulace ozvučnice, simulace výhybky, TS parametry, variabilní ozvučnice.

Abstract

This bachelor's thesis deals with the design of a two-way speaker system and a variable baffle for a subwoofer for the purposes of demonstration measurement in the subject of Electroacoustics. The theoretical part explains the individual speakers, TS parameters and formulas for their calculation. Furthermore, various types and constructions of baffles and audio crossovers. Using the simulation program LspCAD, the designs of closed and bass reflex baffles with right and wrong parameters were fine-tuned and simulated. The proposed crossover for a two-way speaker system was also simulated. Drawing documentation was prepared for the designs. Furthermore, the baffles and crossovers were implemented, and their characteristics were measured. Finally, the existing laboratory tasks were reworked so that students could use the implemented baffles and the chosen design procedure.

Keywords

Two-way speaker system, bassreflex, LspCAD, laboratory tasks, baffle, loudspeaker, baffle simulation, crossover simulation, TS parameters, variable baffle.

Bibliografická citace

TOMEŠEK, Jiří. *Měřicí reproduktorová soustava pro laboratorní úlohy* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/141304>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Jiří Schimmel.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	<i>Jiří Tomešek</i>
VUT ID studenta:	220785
Typ práce:	<i>Bakalářská práce</i>
Akademický rok:	2021/22
Téma závěrečné práce:	<i>Měřicí reproduktorová soustava pro laboratorní úlohy</i>

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

V Brně dne: 26. května 2022

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Jiřímu Schimmelovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: 26. května 2022

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	9
ÚVOD	12
1. REPRODUKTOR	13
1.1 DĚLENÍ REPRODUKTORŮ PODLE FREKVENČNÍHO ROZSAHU	13
1.1.1 Širokopásmové reproduktory	13
1.1.2 Hlubokotónové reproduktory	13
1.1.3 Středotónový reproduktor	13
1.1.4 Vysokotónový reproduktor	14
1.2 CHARAKTERISTIKY A PARAMETRY REPRODUKTORŮ	14
1.2.1 Modulová kmitočtová charakteristika	14
1.2.2 Směrová charakteristika a index směrovosti	14
1.2.3 Modulová impedanční charakteristika	15
1.2.4 Činitele jakosti	16
1.2.5 Ekvivalentní objem a poddajnost	17
1.3 MĚŘENÍ TS PARAMETRŮ	18
1.3.1 Výpočet TS parametrů	19
2. OZVUČNICE	22
2.1 OZVUČNICE TYPU ROVINNÁ DESKA	22
2.2 OZVUČNICE OTEVŘENÁ	22
2.3 OZVUČNICE UZAVŘENÁ	23
2.4 OZVUČNICE TYPU BASSREFLEX	25
2.5 NÁVRH OZVUČNIC A SIMULACE	26
2.5.1 Uzavřená ozvučnice	26
2.5.2 Bassreflexová ozvučnice	27
3. VÝHYBKY	29
3.1 PARAMETRY VÝHYBKY	30
3.1.1 Amplitudová, fázová a impedanční charakteristika	30
3.1.2 Zvolení dělicích frekvencí	30
3.1.3 Zvolení aproximací a strmostí filtrů	30
3.2 KOMPENZACE PRŮBĚHU REPRODUKTORŮ	31
3.2.1 Kompenzace indukčnosti kmitačky	31
3.2.2 Kompenzace rezonance	32
3.2.3 Vyrovnaní citlivostí	32
3.3 NÁVRH A SIMULACE VÝHYBKY	33
3.3.1 Simulace a ladění výhybky	34
4. NÁVRH A KONSTRUKCE REPRODUKTOROVÉ SKŘÍNĚ	38
4.1 NÁVRH DVOUPÁSMOVÉ A VARIABILNÍ OZVUČNICE	39
5. REALIZACE	42
6. MĚŘENÍ PARAMETRŮ SOUSTAVY	44
6.1 MĚŘENÍ IMPEDANČNÍCH CHARAKTERISTIK REPRODUKTORU V OZVUČNICÍCH	44

6.1.1	<i>Bassreflexová ozvučnice</i>	44
6.1.2	<i>Uzavřená ozvučnice</i>	44
6.1.3	<i>Polootevřená ozvučnice</i>	45
6.2	MĚŘENÍ SPL CHARAKTERISTIKY REPRODUKTORŮ PRO NÁVRH A SIMULACI VÝHYBKY V PROGRAMU LSPCAD	45
6.3	MĚŘENÍ SPL CHARAKTERISTIKY REPRODUKTORŮ V REALIZOVANÉ BASSREFLEXOVÉ OZVUČNICI	47
6.3.1	<i>Měření hlubokotónového reproduktoru a bassreflexového nátrubku</i>	47
6.3.2	<i>Měření vysokotónového reproduktoru</i>	47
6.3.3	<i>Měření dvoupásmové reproduktorové soustavy s výhybkou</i>	48
6.3.1	<i>Měření zkreslení hlubokotónového reproduktoru</i>	49
6.3.2	<i>Měření směrové charakteristiky reproduktorů</i>	49
6.3.3	<i>Porovnání naměřené a simulované SPL charakteristiky</i>	50
6.4	MĚŘENÍ VÝHYBKY	51
7.	LABORATORNÍ ÚLOHY	52
	ZÁVĚR	54
	LITERATURA	55
	SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	56
	SEZNAM PŘÍLOH	58

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Příklad směrové charakteristiky reproduktorové soustavy.....	15
1.2	Popis impedanční křivky [1].	16
1.3	Příklad impedanční křivky [4].	18
1.4	Výpočet TS parametrů z modulové impedanční charakteristiky [4]......	19
1.5	Princip měření impedance reproduktoru [4].	21
2.1	Ozvučnice typu rovinná deska [3].	22
2.2	Otevřená ozvučnice [3].	23
2.3	Ozvučnice uzavřená [3].	24
2.4	Ozvučnice typu bassreflex [3]......	25
2.5	LspCAD zapojení pro simulaci uzavřené ozvučnice.	26
2.6	LspCAD zapojení pro bassreflexovou ozvučnici.....	28
3.1	Schéma filtru typu horní propust druhého řádu [1].	29
3.2	Schéma filtru typu dolní propust druhého řádu [1].	30
3.3	Schéma kompenzace indukčnosti RC členem [1].	32
3.4	Schéma kompenzace rezonance reproduktoru [1].	32
3.5	Schéma vyrovnání citlivosti reproduktoru [1].	33
3.6	Simulace výhybky se špatnou polaritou ideálních reproduktorů.	34
3.7	Simulace výhybky se správnou polaritou ideálních reproduktorů.	35
3.8	Simulace výhybky se správnou polaritou ideálních reproduktorů po doladění.....	35
3.9	Simulace reproduktorové soustavy s reálnými reproduktory s nedoladěnými součástkami.	36
3.10	Schéma zapojení výhybky	37
3.11	Simulace reproduktorové soustavy s reálnými součástkami.	37
4.1	Spojování stěn a) na tupo, b) na pokos, c) na zámeček a d) na zámeček se zkosením [1].	38
4.2	3D vizualizace dvoupásmové ozvučnice.	40
4.3	3D vizualizace variabilní ozvučnice.	40
5.1	Realizovaná dvoupásmová ozvučnice.....	43
5.2	Realizovaná variabilní ozvučnice.	43
6.1	Závislost modulu a fáze impedance na kmitočtu reproduktoru IRB v realizované dvoupásmové bassreflexové ozvučnici.	44
6.2	Závislost modulu a fáze impedance na kmitočtu reproduktoru IRB v realizované uzavřené ozvučnici.	45
6.3	Závislost modulu a fáze impedance na kmitočtu reproduktoru IRB v realizované polootevřené ozvučnici.	45
6.4	SPL charakteristiky reproduktorů pro návrh výhybky.....	46
6.5	SPL charakteristiky reproduktoru IRB a nátrubku v bassreflexové ozvučnici.	47
6.6	SPL charakteristika vysokotónového reproduktoru IRT.....	48
6.7	SPL charakteristiky reproduktorové soustavy s výhybkou.	48
6.8	SPL charakteristiky reproduktorové soustavy s výhybkou po kompenzaci.	49
6.9	Celkové harmonické zkreslení hlubokotónového reproduktoru.	49
6.10	Směrová charakteristika reproduktorové soustavy v ose vysokotónového reproduktoru.	50
6.11	Celkové harmonické zkreslení hlubokotónového reproduktoru.	51
A.1	Modulová a fázová impedanční charakteristika reproduktoru IRB mimo ozvučnici	59
A.2	Modulová a fázová impedanční charakteristika reproduktoru IRB v uzavřené ozvučnici	59
B.1	Simulovaná SPL charakteristika uzavřené ozvučnice.	62
B.2	Simulovaná impedanční charakteristika uzavřené ozvučnice.	62
B.3	Simulovaná SPL charakteristika uzavřené ozvučnice – špatný objem ozvučnice.....	63

B.4	Simulovaná impedanční charakteristika uzavřené ozvučnice – špatný objem ozvučnice.	63
B.5	Simulovaná SPL charakteristika bassreflexové ozvučnice – maximally flat.	64
B.6	Simulovaná impedanční charakteristika bassreflexové ozvučnice – maximally flat.	64
B.7	Simulovaná SPL charakteristika bassreflexové ozvučnice pro zmenšený objem 10 litrů.	65
B.8	Simulovaná fázová charakteristika bassreflexové ozvučnice pro zmenšený objem 10 litrů.	65
B.9	Simulovaná SPL charakteristika bassreflexové ozvučnice – špatný objem.	66
B.10	Simulovaná fázová charakteristika bassreflexové ozvučnice – špatný objem.	66
B.11	Simulovaná SPL charakteristika bassreflexové ozvučnice – špatný nátrubek.	67
B.12	Simulovaná fázová charakteristika bassreflexové ozvučnice – špatný nátrubek.	67
C.13	Dvoupásmová reprosoustava – Sestava 1.	68
C.14	Dvoupásmová reprosoustava – Deska 1.	69
C.15	Dvoupásmová a variabilní reprosoustava – Deska 2.	70
C.16	Dvoupásmová a variabilní reprosoustava – Deska 3.	71
C.17	Dvoupásmová a variabilní reprosoustava – Deska 4.	72
C.18	Variabilní ozvučnice – Sestava 2.	73
C.19	Variabilní ozvučnice – Deska 1.	74

Seznam tabulek

A.1	Vypočítané a katalogové hodnoty parametru reproduktoru IRB [8]	61
-----	--	----

ÚVOD

Tato bakalářská práce se zabývá kompletním návrhem a realizací dvoupásmové pasivní reproduktorové soustavy s použitím přidělených reproduktorů IRB 16/60/01,8 a reproduktoru IRT 10/80/01,8. Dále návrhem a realizací variabilní ozvučnice, která umožní rychlou změnu mezi polouzavřenou, uzavřenou a bassreflexovou ozvučnicí.

Cílem této práce je sjednotit již existující laboratorní úlohy v předmětu Elektroakustika a upravit je tak, aby si student v rámci těchto úloh vyzkoušel postupný návrh, simulaci a měření parametrů reproduktorů a reproduktorových soustav. Dříve se tyto úlohy prováděly na odlišných reproduktorech a reproduktorových soustavách a nenavazovaly na sebe.

Pro splnění zadání je potřeba nastudovat funkci reproduktoru, jeho vlastností a parametry. S tím souvisí TS parametry reproduktoru, které definují základy pro návrhy všech typů reproduktorových ozvučnic a je potřeba je změřit. Jelikož tato práce obsahuje více typů ozvučnic, je potřeba zabývat se konstrukcí a principy fungování každé z nich. Návrhy ozvučnic pasivní reprosoustavy jsou doladovány a simulovány v simulačním programu LspCAD, aby se potvrdila správnost parametrů pro navrhované ozvučnice. Dále se práce zabývá i návrhem a realizací pasivní reproduktorové výhybky pro dvoupásmovou reproduktorovou soustavu, která je následně také simulována a doladěna v simulačním programu LspCAD. V průběhu simulací jsou voleny i špatné hodnoty parametrů ozvučnic a výhybek z důvodu demonstrace jejich vlivu na správnost návrhu. Dále se práce zabývá vhodným konstrukčním řešením dvoupásmové a variabilní ozvučnice, jejich realizací a měřením jejich charakteristik. V poslední řadě byly pro práci s těmito ozvučnicemi předělány laboratorní úlohy do předmětu Elektroakustika.

1. REPRODUKTOR

Reproduktor je zařízení, které přiváděný elektrický signál mění na zvukové vlnění. Ideální reproduktor má vyrovnanou SPL (Sound pressure level) charakteristiku, směrovou charakteristiku bodového zářiče, konstantní impedanci, nulové nelineární zkreslení a libovolnou výchylku membrány. SPL charakteristika reproduktoru je závislost hladiny akustického tlaku na frekvenci.

1.1 Dělení reproduktorů podle frekvenčního rozsahu

Požadavky na reproduktor definuje kmitočtový rozsah, ve kterém má reproduktor hrát. Kmitočtový rozsah reproduktoru je od výrobce stanovené frekvenční pásmo, pro které je daný reproduktor určen. To znamená, že je třeba dát pozor, aby se na reproduktor dostaly jen signály z jeho kmitočtového rozsahu. V opačném případě hrozí zkreslení reprodukce, nebo i poškození reproduktoru.

1.1.1 Širokopásmové reproduktory

Širokopásmový reproduktor je anglicky nazýván *full-range* (celorozsahový) a je zkonstruován pro efektivní kmitočtový rozsah v celém slyšitelném spektru. Ten je definován pro pokles modulové kmitočtové charakteristiky reproduktoru o 10 dB oproti průměrné hodnotě akustického tlaku. Širokopásmový reproduktor má širokou škálu použití od stropních reproduktorů až po automobilové ozvučení.

1.1.2 Hlubokotónové reproduktory

Hlubokotónový reproduktor je anglicky nazýván *woofer* a je určen pro reprodukci nízkých kmitočtů od 20 Hz přibližně do 4 kHz. Platí, že reproduktory větších rozměrů většinou potřebují ozvučnici větších rozměrů než malé reproduktory, ale disponují lepším přenosem nízkých kmitočtů. Na druhou stranu reproduktory s menšími rozměry mívají lepší přenos středních a vysokých kmitočtů.

Parametry hlubokotónového reproduktoru jsou důležité pro návrh reproduktorové ozvučnice. Důležité jsou zejména jeho parametry, jako je rezonanční frekvence f_s , ekvivalentní objem V_{as} , celkový činitel jakosti Q_{ts} a jeho maximální dlouhodobý standardizovaný příkon, podle kterého se udává výkon celé reposoustavy.

1.1.3 Středotónový reproduktor

Středotónový reproduktor je anglicky nazýván *mid-range*. Je určen pro reprodukci zvuků v pásmu od 500 Hz do 4000 Hz. Pokud jde o konstrukci, středotónové reproduktory používají uzavřený nebo otevřený koš. Membrána je buďto kalota, nebo je kuželová. Reproduktor kalotové konstrukce dokáže zahrát vyšší frekvence s nižším zkreslením a s nižším zvlněním charakteristiky. Reproduktory kuželové konstrukce dokáží fungovat na nižších frekvencích, ale za cenu větší směrovosti na vyšších kmitočtech.

1.1.4 Vysokotónový reproduktor

Vysokotónový reproduktor je anglicky nazýván *tweeter*. Nejpoužívanější konstrukční řešení jsou s kuželovou membránou, kalotou, elektrostatické a piezoelektrické. Je určen pro reprodukci zvuku zpravidla v pásmu od 3 kHz.

Vysokotónový reproduktor má několik problémů. Jeho charakteristická citlivost je oproti zbylým reproduktorům v soustavě příliš velká, a proto se musí utlumit. Při velmi nízkém dělicím kmitočtu hrozí poškození reproduktoru.

1.2 Charakteristiky a parametry reproduktorů

1.2.1 Modulová kmitočtová charakteristika

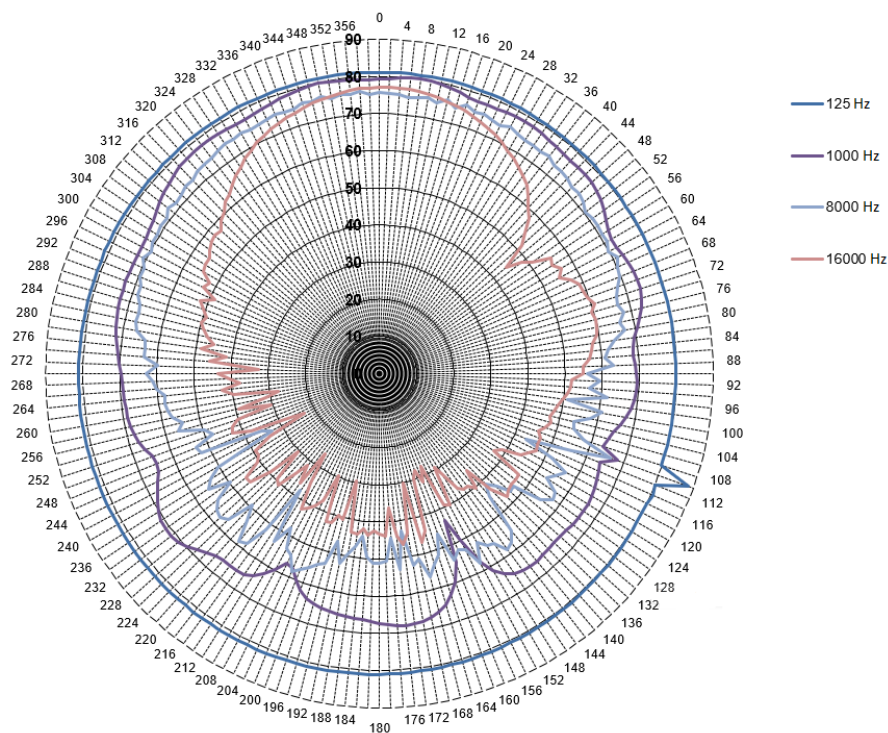
Udává závislost hladiny akustického tlaku v dB na frekvenci při konstantním napětí na reproduktoru v jeho akustické ose. Hodnota akustického tlaku je vztažena k referenční hodnotě $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$, což je hodnota blízká prahu slyšení na kmitočtu 1 kHz. Je měřena v bezodrazové komoře, aby se zamezilo ovlivnění charakteristiky odraženými zvukovými vlnami. Z této charakteristiky se stanovuje efektivní kmitočtový rozsah reproduktoru. Ten je definován jako pokles modulové kmitočtové charakteristiky reproduktoru o 10 dB oproti průměrné hodnotě akustického tlaku v oktávových pásmech.

1.2.2 Směrová charakteristika a index směrovosti

Reproduktor nevyzařuje všechna zvukové vlnění do všech směrů stejně. Směrová charakteristika reproduktoru nebo reproduktorové soustavy se obvykle vyjadřuje jako závislost hladiny akustického tlaku na úhlu natočení měřícího mikrofону od hlavní osy reproduktoru při určité frekvenci a konstantní vzdálenosti. Měření se provádí buď to otáčením mikrofónu kolem reproduktoru, nebo mikrofón stojí a otáčí se reproduktor.

Tóny se ve vyšších oblastech zvukového spektra šíří směrově a tato směrovost se s rostoucí frekvencí a velikostí membrány zvětšuje. Ve spodních oblastech tónového spektra tento problém nevzniká, protože se v této oblasti tóny šíří v kulových vlnoplochách. To znamená, že se šíří všesměrově.

Směrová charakteristika se vykresluje v polárních souřadnicích a je vykreslována s více křivkami, kde je každá křivka pro jinou frekvenci. Příklad směrové charakteristiky s více křivkami je na obrázku 1.1. Pro odměření směrové charakteristiky se využívají upravené místnosti s minimálním dozvukem (tzv. bezodrazové akustické komory).



Obr. 1.1 Příklad směrové charakteristiky reproduktorové soustavy.

Index směrovosti I_D je činitel směrovosti Q vyjádřený v decibelech. Je dán [3]

$$I_D = 10 \log(Q) [-] . \quad (1.1)$$

Činitel směrovosti Q je poměr akustického tlaku P_a v referenční ose soustavy ve vzdálenosti 1 metr k akustickému tlaku P_t vytvořenému ve stejném místě všesměrovým zdrojem se stejným akustickým výkonem [3]

$$Q = \frac{P_a^2}{P_t^2} [-] . \quad (1.2)$$

1.2.3 Modulová impedanční charakteristika

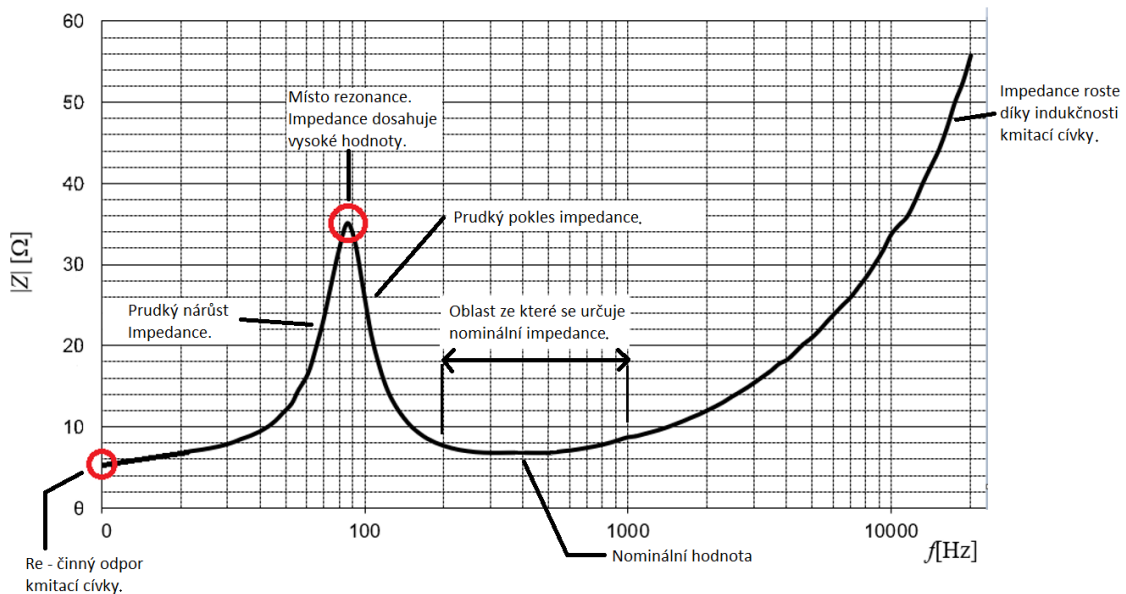
Grafem modulové impedanční charakteristiky je závislost modulu impedance reproduktoru na kmitočtu. Impedance reproduktoru je frekvenčně závislá. Impedanci můžeme vyjádřit jako komplexní číslo [1]

$$Z = R_e + jX_R [\Omega], \quad (1.3)$$

kde R_e je činná složka a X_R je reaktanční složka.

Když je měřena impedanční charakteristika, tak výsledkem je modul komplexního čísla impedance, který se dá zapsat jako [1]

$$|Z| = \sqrt{R_e^2 + X_R^2} \text{ [}\Omega\text{]}, \quad (1.4)$$



Obr. 1.2 Popis impedanční křivky [1].

Z impedanční charakteristiky na obrázku 1.2 se zjistí některé základní parametry reproduktoru, jako je rezonanční frekvence f_s . To je frekvence v místě charakteristiky, kde je absolutní hodnota impedance nejvyšší.

Maximální absolutní hodnota impedance Z_{MAX} je místo, které označuje rezonanci reproduktoru, zde má modul impedance největší hodnotu.

Činný odpor kmitací cívky R_e je hodnota impedance při frekvenci 0 Hz.

1.2.4 Činitele jakosti

Jedním z dalších důležitých parametrů pro návrh reproduktorové soustavy je činitel jakosti Q . Činitel jakosti souvisí s odporem, který způsobuje ztráty. Tyto ztráty se následně promítnou do horšího (menšího) činitele jakosti. Lze ho tedy považovat za míru kvality reproduktoru.

Činitele jakosti jsou následující:

- Q_{ms} je mechanický činitel jakosti a zahrnuje v sobě vliv mechanických ztrát pohyblivých částí reproduktoru.
- Q_{es} je elektrický činitel jakosti a zahrnuje vliv elektrických ztrát v kmitací cívce.
- Q_{ts} je tzv. celkový činitel jakosti.

Činitel jakosti je obecně definován jako poměr šířky pásma k frekvenci. Činitel jakosti lze posuzovat z impedanční charakteristiky, z úzké a vysoké rezonanční špičky plyne vysoký činitel jakosti. Při pozvolné špičce rezonance je činitel jakosti nižší. Jeho vliv lze také zjistit na dolních kmitočtech frekvenční charakteristiky. Při velkém překmitu je činitel jakosti opět velký. Toto je také možné vidět na impulzní odezvě. Ta při velkém činiteli jakosti bude obsahovat více větších zákmitů.

Činitel jakosti pro mechanický systém je definován jako [1]

$$Q_{ms} = 2\pi f_s \frac{m_{ms}}{r_{ms}} \quad [-], \quad (1.5)$$

kde f_s je rezonanční kmitočet reproduktoru, m_{ms} je hmotnost kmitacího systému a sloupce vzduchu a r_{ms} je mechanický odpor. Vztah pro elektrický činitel jakosti vychází z činného odporu cívky R_e a hmotnosti kmitacího systému m_{ms} a platí [1]

$$Q_{es} = 2\pi f_s \frac{m_{ms} R_e}{Bl^2} \quad [-]. \quad (1.6)$$

Zde je Bl silový faktor neboli gyrační konstanta. Pro výpočet celkového činitele jakosti, který je jakýmsi zastřešujícím parametrem činitele jakosti pro mechanický systém a elektrický činitel jakosti, je definován vztahem [1]

$$Q_{ts} = \frac{Q_{ms} Q_{es}}{Q_{ms} + Q_{es}} \quad [-]. \quad (1.7)$$

1.2.5 Ekvivalentní objem a poddajnost

Ekvivalentní objem je parametr odvozený. Je definován jako objem vzduchu v uzavřené ozvučnici, který by měl stejnou poddajnost, jako je hodnota mechanické poddajnosti kmitacího systému c_{ms} . Pro ekvivalentní objem V_{as} platí vztah [1]

$$V_{as} = c_{ms} c_0^2 \rho S_d^2 = 1,4 \cdot 10^5 c_{ms} S_d^2 \quad [m^3], \quad (1.8)$$

kde c_0 je rychlost šíření zvuku (340 m/s), ρ je měrná hmotnost vzduchu (1,21 kg/m³) a S_d efektivní plocha membrány reproduktoru. Reprodukter s nižší hodnotou ekvivalentního objemu V_{as} má tužší závěs, zpravidla vydrží více hrubého zacházení a potřebuje menší objem pro zajištění nízkých frekvencí než reproduktor s vyšší hodnotou ekvivalentního objemu.

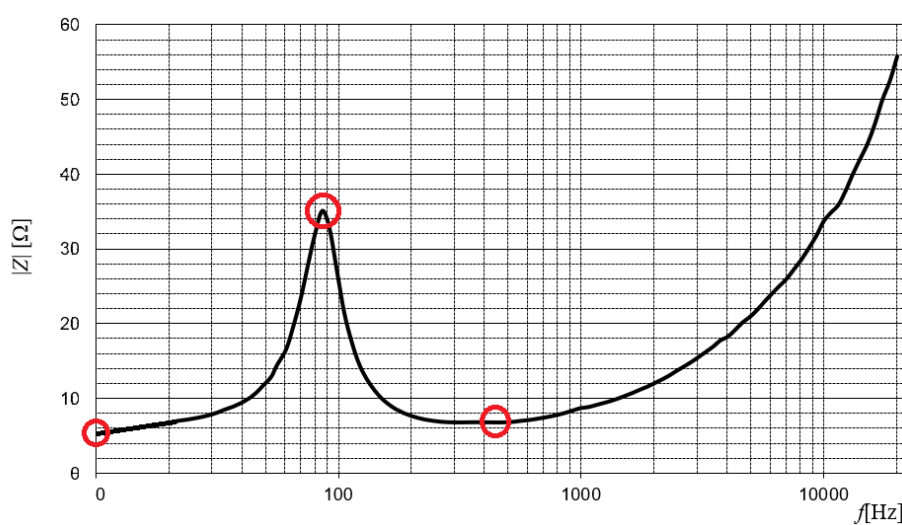
Mezi další odvozené parametry patří akustická poddajnost kmitacího systému c_a . Jedná se o přepočet ekvivalentního objemu V_{as} přes parametry prostředí, do kterého reproduktor vyzařuje [1]

$$c_a = \frac{V_{as}}{c_0^2 \rho} = \frac{V_{as}}{139876} \left[\frac{\text{m}^5}{\text{N}} \right]. \quad (1.9)$$

1.3 Měření TS parametrů

Pro vypočtení TS parametrů reproduktoru je potřeba změřit kmitočtovou impedanční charakteristiku přímovyzářujícího hlubokotónového reproduktoru. Jelikož se tato práce zabývá dvoupásmovou reproduktorovou soustavou, tak byl změřen jen hlubokotónový reproduktor. Tato charakteristika má charakteristický průběh. Na obrázku 1.3 je příklad charakteristiky pro hlubokotónový reproduktor ve volném poli s vyznačenými důležitými body:

- 1) stejnosměrný odpor cívky R_e – bod 1 na obr. 1.3,
- 2) rezonanční kmitočet f_s – bod 2 na obr. 1.3,
- 3) jmenovitá impedance Z_0 – bod 3 na obr. 1.3.



Obr. 1.3 Příklad impedanční křivky [4].

Při umístění reproduktoru do ozvučnice dojde ke změně akustické zátěže, do které elektroakustický měnič pracuje. To se projeví jako změna poddajnosti kmitacího systému. Poddajnost závisí hlavně na typu a objemu ozvučnice. Změna poddajnosti má za následek změnu rezonančního kmitočtu, činitele kvality a charakteristiky citlivosti reproduktoru. Reproduktor v uzavřené ozvučnici bude mít vyšší rezonanční kmitočet f_c . Platí pro něj vztah [4]

$$\frac{f_c}{f_s} = \sqrt{\frac{V_{as}}{V_c} + 1}, \quad (1.10)$$

kde f_s je rezonanční kmitočet reproduktoru, V_{as} je ekvivalentní objem reproduktoru a V_c je objem uzavřené ozvučnice. Z rovnice (1.10) plyne, že je rezonanční kmitočet závislý na objemu ozvučnice a také, že čím bude menší objem ozvučnice, tím bude vyšší rezonanční kmitočet. Zvýší se také celkový činitel jakosti elektroakustického měniče a díky tomu dojde k nárůstu amplitudy reprodukováných signálů v místě dolního mezního kmitočtu soustavy. Současně nastane zvýšení strmosti impedanční charakteristiky v místě rezonančního kmitočtu.

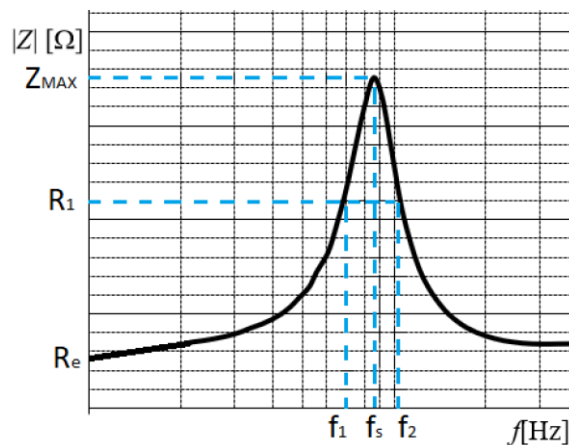
1.3.1 Výpočet TS parametrů

Je to skupina elektromechanických parametrů, které definují chování měniče v místě kolem rezonančního kmitočtu reproduktoru. Díky tomu lze simulovat nízkofrekvenční chování reproduktoru v ozvučnici. Základní TS parametry vycházejí z impedanční charakteristiky reproduktoru. Průběh impedanční charakteristiky je zjištěn měřením. Na impedanční charakteristice se nachází rezonanční kmitočet f_s a maximální impedance za rezonance Z_{MAX} , stejnosměrný odpor R_e a impedance na kmitočtu f_1 a f_2 . Frekvence f_1 a f_2 odpovídají poklesu elektrické impedance na hodnotu [4]

$$R_1 = R_e \sqrt{R_0} = 7,18 \sqrt{4,26} = 14,83 \text{ } [\Omega] , \quad (1.11)$$

kde

$$R_0 = \frac{Z_{MAX}}{R_e} = \frac{30,62}{7,18} = 4,26 \text{ } [\Omega] . \quad (1.12)$$



Obr. 1.4 Výpočet TS parametrů z modulové impedanční charakteristiky [4].

Dále lze vypočítat parametry Q_{ms} , Q_{es} a Q_{ts} . Mechanický činitel jakosti je bezrozměrný parametr a je definován vztahem [4]

$$Q_{ms} = f_s \frac{\sqrt{R_0}}{f_2 - f_1} = 60,4 \frac{\sqrt{4,26}}{90 - 37} = 2,35 \text{ } [-] , \quad (1.13)$$

kde f_s je rezonanční kmitočet a frekvence f_1 a f_2 jsou frekvence při impedanci R_1 .

Další parametr je elektrický činitel jakosti Q_{es} . Je dán rovnicí [4]

$$Q_{es} = \frac{Q_{ms}}{R_0 - 1} = \frac{2,35}{4,26 - 1} = 0,72[-] . \quad (1.14)$$

Q_{ts} celkový činitel jakosti se vypočte pomocí parametru Q_{es} a parametru Q_{ms} . Vypočítá se z rovnice [4]

$$Q_{ts} = \frac{Q_{ms} \times Q_{es}}{Q_{ms} + Q_{es}} = \frac{2,35 \times 0,72}{2,35 + 0,72} = 0,55[-] . \quad (1.15)$$

Z charakteristiky modulu impedance elektroakustického měniče je možné dále vypočítat indukčnost kmitací cívky L_e [4]

$$L_e = \frac{\sqrt{Z_0^2 - R_e^2}}{2\pi f_0} = \frac{\sqrt{8,84^2 - 7,18^2}}{2 \times \pi \times 1000} \times 10^3 = 0,82 \text{ [mH]}, \quad (1.16)$$

kde Z_0 je minimální hodnota impedance za rezonančním maximem impedance charakteristiky reproduktoru a f_0 je kmitočet, na kterém se toto minimum impedance nachází. Je možné zvolit frekvenci f_0 blízkou 1 kHz a Z_0 je modul impedance na této frekvenci.

Pro vypočítání dalších TS parametrů je potřeba porovnání měření s přidanou zátěží a měření bez zátěže. Existují dva způsoby, jak lze měření provést. Jeden ze způsobů je zvýšení mechanické hmotnosti kmitacího systému přidáním zátěže známé hmotnosti. Druhý způsob je zvýšení akustické zátěže vložením reproduktoru do uzavřené ozvučnice známého objemu. [4] V této práci byl zvolen druhý způsob. Reprodukter byl nainstalován do ozvučnice s čistým objemem $V_c = 10,3$ litru.

Pro určení akustické poddajnosti c_{as} je potřeba znát ekvivalentní objem ozvučnice V_{as} , který se určí pomocí vzorce [4]

$$V_{as} = \left(\left(\frac{f_c}{f_s} \right)^2 - 1 \right) V_c = \left(\left(\frac{80,6}{60,4} \right)^2 - 1 \right) \times 10,3 = 8,04 \text{ [l]}, \quad (1.17)$$

kde V_c je čistý objem uzavřené ozvučnice a f_c je rezonanční kmitočet v ozvučnici, ve které proběhlo měření. Pak se akustická poddajnost určí ze vzorce [4]

$$c_{as} = \frac{V_{as}}{\rho_0 c_0^2} = \frac{8,04 \times 10^{-3}}{1,2 \times 344^2} = 5,66E - 08 \text{ [m}^5/\text{N]}, \quad (1.18)$$

kde $\rho_0 = 1,2 \text{ kg/m}^3$ je hustota vzduchu a $c_0 = 344 \text{ m/s}$ je rychlost zvuku ve vzduchu. Následně se může určit mechanická poddajnost c_{ms} , která je definována rovnicí [4]

$$c_{ms} = \frac{c_{as}}{S_d^2} = \frac{5,66E - 08}{0,0119^2} \times 10^3 = 0,400 \text{ [mm/N]}. \quad (1.19)$$

S_d je aktivní plocha membrány reproduktoru, která je udávána výrobcem. Hmotnost kmitacího systému m_{ms} je dána rovnicí [4]

$$m_{ms} = \frac{1}{(2\pi f_s)^2 \times c_{ms}} = \frac{1}{(2\pi \times 60,4)^2 \times 0,400 \times 10^{-3}} \times 10^3 = 17,36 \text{ [g]}, \quad (1.20)$$

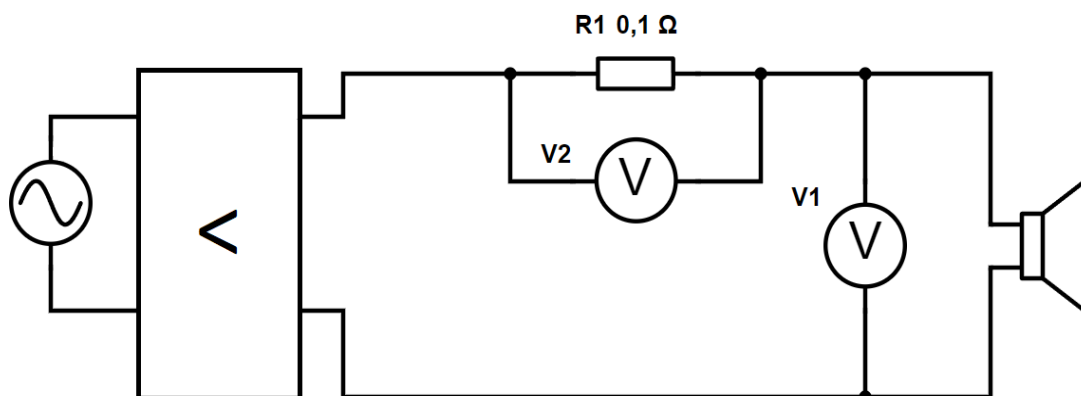
z ní lze určit mechanický odpor kmitacího systému jako [4]

$$r_{ms} = \frac{2\pi f_s m_{ms}}{Q_{ms}} = \frac{2\pi \times 60,4 \times 17,36 \times 10^{-3}}{2,35} = 2,80 \text{ [Ns/m]}. \quad (1.21)$$

Gyrační konstantu elektroakustického měniče lze určit z definice elektrického činitele jakosti jako [4]

$$Bl = \sqrt{2\pi f_s \frac{R_e}{Q_{es}} m_{ms}} = \sqrt{2\pi \times 60,4 \frac{7,18}{0,72} \times 17,36} = 8,1 \text{ [N/A]}. \quad (1.22)$$

Ke zjištění impedance elektroakustického měniče byla využita metoda měření napětí na svorkách reproduktoru a proudu protékajícího reproduktorem. Hodnota proudu byla měřena jako napětí na normálovém odporu. Ten byl zapojen do série s měřeným reproduktorem IRB 16/60/01,8. Schéma zapojení je na obrázku 1.5. K měření byl využit elektroakustický analyzátor s generátorem NTi Audio RT-2B.



Obr. 1.5 Princip měření impedance reproduktoru [4].

Z tabulky A.1 v příloze A.4, ve které jsou uvedeny vypočítané TS parametry a parametry uváděné výrobcem, je patrné, že měřené TS parametry se od parametrů uváděných výrobcem liší. Tyto odchylky mohly být způsobeny například již při výrobě reproduktorů jejich výrobní tolerancí. Při následujícím návrhu ozvučnic se bude vycházet z naměřených TS parametrů.

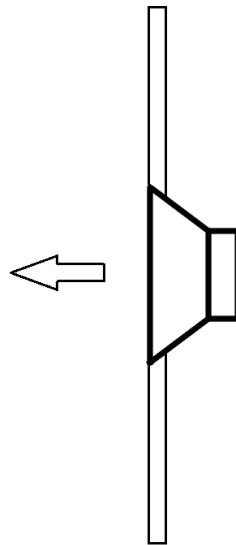
Průběhy modulu a fáze impedanční charakteristiky reproduktoru mimo ozvučnici a v uzavřené ozvučnici o známém objemu jsou v příloze A.1 na obrázku A.1 a A.2.

2. OZVUČNICE

Reproduktory jsou nejčastěji umístěny v reproduktorové skříni. Ta se odborně nazývá ozvučnice, ale reproduktorovou ozvučnicí může být i rovinná deska. Reproktory se dávají do ozvučnice z důvodu, aby se oddělily přední a zadní zvukové vlny a zamezilo se tím akustickému zkratu. Při akustickém zkratu se přední a zadní zvuková vlna šířená z reproduktoru v určitých kmitočtech vzájemně vyruší. Vliv reproduktorové skříně je zejména na nižších kmitočtech, proto se její návrh vztahuje především k hlubokotónovému reproduktoru.

2.1 Ozvučnice typu rovinná deska

Rovinná deska je z konstrukčního hlediska nejjednodušší ozvučnicí, ale disponuje špatnou účinností zejména na nízkých frekvencích. Z teoretického hlediska jde o rovinné desce uvažovat, jako o ozvučnici s nekonečnými rozměry, to ale v praxi nelze použít, proto se používala s konečnými rozměry pro plošné ozvučování například u zařízení místních rozhlasů v budovách. Dnes se místo těchto ozvučnic používají ozvučnice skříňové. Příklad rovinné ozvučnice je na obrázku 2.1.



Obr. 2.1 Ozvučnice typu rovinná deska [3].

2.2 Ozvučnice otevřená

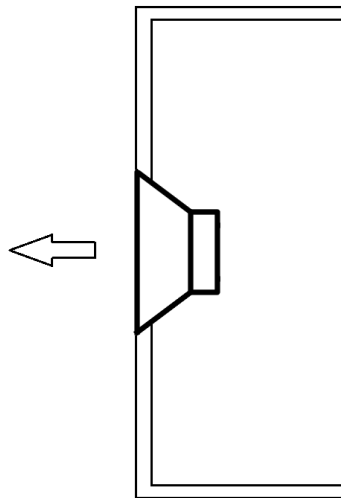
Tento typ ozvučnice byl rozšířen u televizních a rozhlasových přijímačů, u kterých ozvučnice sloužila k zakrytí přístroje a akusticky otevřená zadní stěna ozvučnice sloužila ke chlazení přístroje. Příklad takové ozvučnice je na obrázku 2.2. U tohoto typu ozvučnice také dochází k akustickému zkratu pro vlnovou délku srovnatelnou s minimální

vzdáleností přední a zadní strany membrány. V dnešní době je otevřená ozvučnice používána zejména u kytarových komb, které mají zadní část skříně otevřenou. Z toho důvodu je u tohoto provedení ozvučnice akustický zkrat omezen jen částečně. Omezení akustického zkratu je dáno hloubkou skříně.

Pro mezní kmitočet f_m takové skříně platí [1]

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

kde a je výška ozvučnice a h je hloubka. Tento vztah lze použít pouze pro skříně s malou hloubkou.

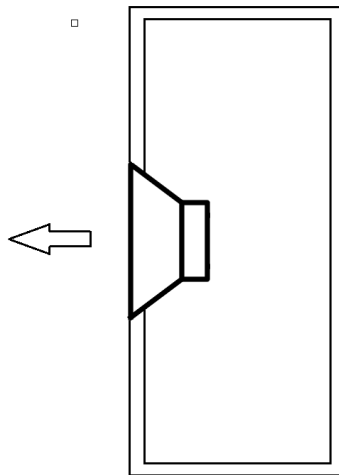


Obr. 2.2 Otevřená ozvučnice [3].

2.3 Ozvučnice uzavřená

Díky použití uzavřené ozvučnice se dokonale odstraní akustický zkrat. Její příklad je na obrázku 2.3. Je to dokonale hermeticky utěsněná skříň určitého objemu. Kvůli tomu se mechanická energie zadní vlny přeměňuje na teplo a zároveň dochází ke snížení účinnosti reproduktoru, protože membrána je akusticky zatížena uzavřeným objemem vzduchu. Z tohoto důvodu dochází k potlačení nepříznivého ovlivnění přední a zadní vlny z reproduktoru.

Uzavřený typ ozvučnice patří mezi ozvučnice, které jsou jednodušší na stavbu a návrh. Z důvodu, že je reproduktor v uzavřené ozvučnici, se mění jeho vlastnosti. Při pohybu membrány reproduktoru dovnitř se vzduch uvnitř ozvučnice bude stlačovat a při pohybu membrány ven se vzduch uvnitř ozvučnice bude roztahovat. Vzduch, který je v ozvučnici uzavřen, působí na membránu reproduktoru jako pružina, která svou tuhostí posunuje rezonanční kmitočet reproduktorové soustavy k vyšším frekvencím.



Obr. 2.3 Ozvučnice uzavřená [3].

Nový vyšší rezonanční kmitočet se označuje jako f_c a platí pro něj [1]

$$f_c = f_s \sqrt{\frac{V_{as}}{V_b} + 1} \text{ [Hz]} , \quad (2.2)$$

kde f_s je rezonanční frekvence ozvučnice, V_{as} je ekvivalentní objem ozvučnice a V_b je zvolený objem ozvučnice. Z tohoto vzorce plyne, že čím má ozvučnice menší objem, tím bude vyšší rezonanční kmitočet.

Činitel jakosti Q_{ts} se také zvýší podobně jako rezonanční kmitočet [1]

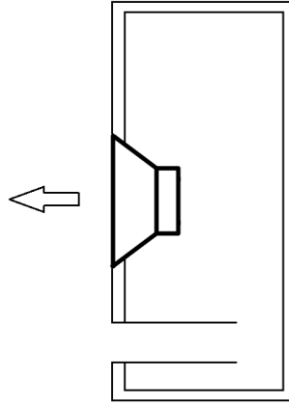
$$\frac{Q_{tc}}{Q_{ts}} = \sqrt{\frac{V_{as}}{V_b} + 1} \text{ [Hz]} , \quad (2.3)$$

z tohoto vzorce plyne, že Q_{ts} vždy přechází ve větší činitel jakosti celé uzavřené reprosoustavy Q_{tc} . To znamená, že když je reproduktor dán do uzavřené ozvučnice, jeho frekvenční charakteristika se na spodním okraji vychýlí a rezonance v kmitočtové závislosti modulu impedance se zúží.

U uzavřené ozvučnice nejde jenom o návrh z hlediska frekvenční charakteristiky, ale dost důležitý je fakt, že může nastat zmenšení charakteristické citlivosti. Charakteristická citlivost je většinou dána pro reproduktor v poloprostoru. Poloprostoru lze docílit pouze nekonečnou rovinnou deskou. Jelikož je reproduktor umístěný v ozvučnici, tak už není v poloprostoru, ale v prostoru. Kvůli tomu může nastat snížení charakteristické citlivosti o 6 dB. Tento pokles není konstantní pro všechny frekvence a nemusí být vždy tak znatelný.

2.4 Ozvučnice typu bassreflex

Bassreflexová ozvučnice se pozná díky bassreflexovému nátrubku, který může být obdélníkového nebo kruhového tvaru. Je to otvor v některé ze stěn ozvučnice, jako je na obrázku 2.4.



Obr. 2.4 Ozvučnice typu bassreflex [3].

Konkrétněji se většinou jedná o krátký kus trubky, který je zasazen do ozvučnice a vyčnívá směrem dovnitř ozvučnice. Díky bassreflexovému nátrubku u těchto ozvučnic dochází k částečnému využití zadní vlny reproduktoru a roste tím účinnost v okolí rezonančního kmitočtu akustické soupravy, která je tvořená nátrubkem a ozvučnicí. Další výhody bassreflexové ozvučnice jsou, že jí stačí menší objem skříně pro stejný dolní mezní kmitočet, dolní mezní kmitočet je menší a v místě rezonance je velmi malá výchylka membrány a nízké zkreslení. Bassreflexovou ozvučnicí je vhodné použít, pokud je činitel *EBP* (Efficiency Bandwidth Product) větší než 50. Činitel *EBP* je definován jako [1]

$$EBP = \frac{f_s}{Q_{es}} \text{ [Hz]}, \quad (2.4)$$

kde f_s je rezonanční kmitočet reproduktoru a Q_{es} je elektrický činitel jakosti. Pokud je *EBP* menší než 50, tak je reproduktor vhodný do uzavřené ozvučnice.[1] Celá bassreflexová ozvučnice funguje jako Helmholtzův rezonátor. Tento rezonátor se používá pro pohlčení nízkých frekvencí, ale u bassreflexové ozvučnice funguje jako pásmová propust, tudíž nepropouští frekvence, které leží mimo zvolené pásmo. Právě proto se ozvučnice musí přesně naladit na rezonanční kmitočet, který je dán vzorcem [1]

$$f_b = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{V_b(l+0,96\sqrt{S})}} = 54,6 \sqrt{\frac{S}{V_b(l+0,96\sqrt{S})}} \text{ [Hz]}, \quad (2.5)$$

kde S je průřez nátrubku, l je délka nátrubku, c_0 rychlost zvuku a V_b je objem ozvučnice.

2.5 Návrh ozvučnic a simulace

Návrh ozvučnic a jejich následné simulace budou prováděny pomocí simulačního programu LspCAD. Ozvučnice budou navrženy pro přidělený reproduktor od firmy DEXON model IRB 16/60/01,8. Jde o 6,5 palcový středobasový reproduktor s nominálním výkonem 60 W s membránou z kevlaru.

2.5.1 Uzavřená ozvučnice

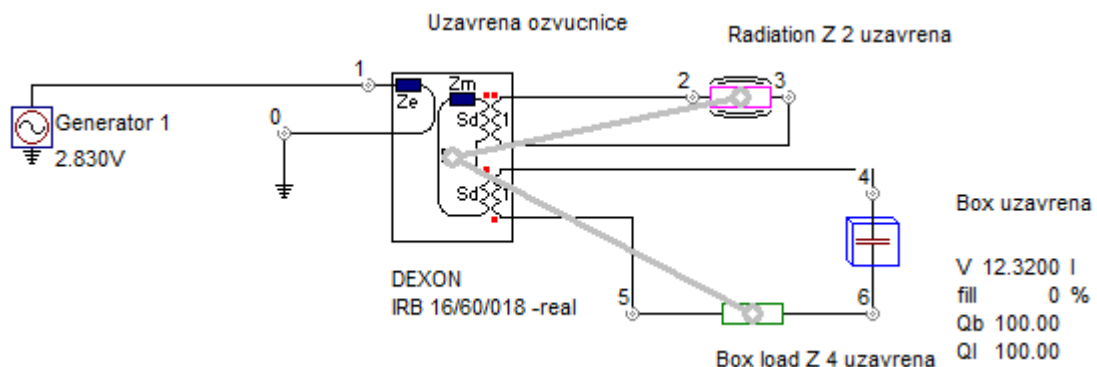
Reproduktor IRB 16/60/01,8 je určen pro použití jako basový nebo středový reproduktor. Návrh bude vycházet ze změřených TS parametrů z kapitoly 1.3.2.

Podle rovnice (2.3) se určí doporučený objem uzavřené ozvučnice [1]

$$V_b = \frac{V_{as}}{\left(\frac{Q_{tc}}{Q_{ts}}\right)^2 - 1} = \frac{8,04}{\left(\frac{0,707}{0,55}\right)^2 - 1} = 12,32 \text{ [l]},$$

kde V_{as} je ekvivalentní objem reproduktoru a Q_{ts} je celkový činitel jakosti. Q_{tc} je celkový činitel jakosti reproduktoru v ozvučnici a volí se podle zvolené aproximace modulové kmitočtové charakteristiky. V tomto případě je použita aproximace Butterworth, kde je $Q_{tc} = 0,707$ [1].

Dále bylo v programu LspCAD sestaveno zapojení pro simulaci a návrh uzavřené ozvučnice pro zvolený reproduktor, viz obrázek 2.5. [5]



Obr. 2.5 LspCAD zapojení pro simulaci uzavřené ozvučnice.

Do programu LspCAD byly vloženy vypočítané TS parametry reproduktoru a vypočtený objem uzavřené ozvučnice 12,32 litru. Simulovaná kmitočtová modulová a fázová charakteristika pro správně zvolené parametry ozvučnice je v příloze B na obrázku B.1 a B.2. Simulovaná kmitočtová modulová a fázová charakteristika pro špatně zvolené parametry ozvučnice je v příloze B na obrázku B.3 a B.4. Špatný objem ozvučnice byl zvolen 3 litry. Tento objem byl zvolen pro demonstraci vlivu objemu ozvučnice na její SPL charakteristiku.

2.5.2 Bassreflexová ozvučnice

Nejprve je třeba určit objem ozvučnice pro zvolenou aproximaci podle vzorce (2.6). V tomto případě bude použita aproximace „maximally flat“, která se snaží dosáhnout co nejvíce vyrovnané modulové kmitočtové charakteristiky reproduktoru v bassreflexové ozvučnici [1]

$$V_b = 15,33V_{as}Q_{ts}^{2,86} = 15,33 \times 8,04 \times 0,55^{2,86} = 22,24 \text{ [l]}. \quad (2.6)$$

Průměr nátrubku je volen podle průměru reproduktoru. Pro 6 palcový reproduktor je vhodný nátrubek s průměrem kolem 50 mm [1]. Pro návrh tedy bude použit nátrubek s průměrem 50 mm.

Rezonanční kmitočet f_b je určen pomocí vztahu [1]

$$f_b = \frac{0,42f_s}{Q_{ts}^{0,9}} = \frac{0,42 \times 60,5}{0,55^{0,9}} = 43,52 \text{ [Hz]}. \quad (2.7)$$

Délka nátrubku pro tyto parametry je dána vzorcem [1]

$$l = \frac{2361d^2}{f_b^2V_b} - 0,732d = \frac{2361 \times 0,05^2}{43,52^2 \times 22,24} - 0,732 \times 0,05 = 0,104 \text{ [m]}. \quad (2.8)$$

Jelikož je 22,24 litrová ozvučnice příliš rozměrově náročná, bude její objem snížen na 10 litrů. Kvůli tomu je potřeba provést změny v ladění a znovu určit rezonanční kmitočet pro objem $V_b' = 10 \text{ l}$ [1]

$$f'_b = f_s \left(\frac{V_{as}}{V_b'} \right)^{0,32} = 60,5 \left(\frac{8,02}{10} \right)^{0,32} = 56,38 \text{ [Hz]}. \quad (2.9)$$

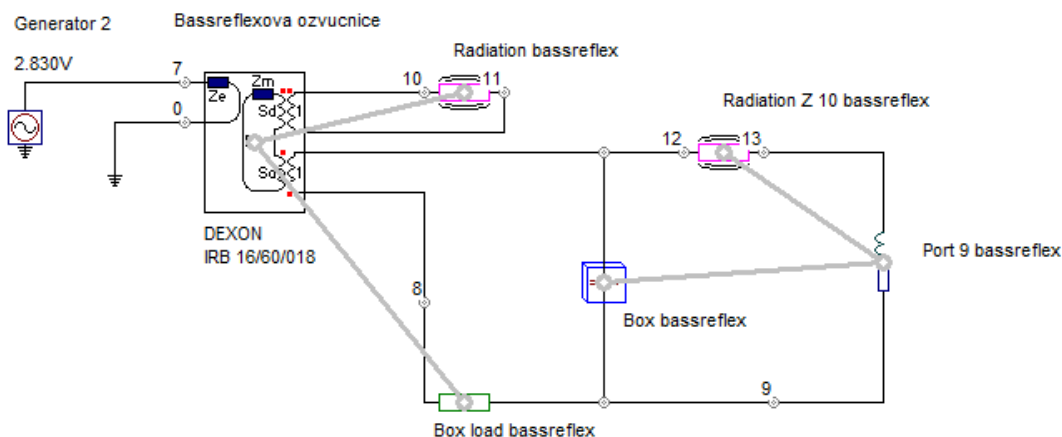
Pro tento kmitočet je tedy potřeba ještě přeladit délku bassreflexového nátrubku [1]

$$l' = \frac{2361 \times d^2}{f_b'^2 V_b'} - 0,732d = \frac{2361 \times 0,05^2}{56,38^2 \times 10} - 0,732 \times 0,05 = 0,149 \text{ [m]}. \quad (2.10)$$

Při zmenšení objemu ozvučnice nastalo to, že objem 10 litrů už neodpovídá objemu pro maximálně plochou charakteristiku, který byl stanoven na 22,24 litru, pro který by byl špičkový nárůst hladiny akustického tlaku na nízkých kmitočtech SPL_{peak} téměř roven 0 dB. SPL_{peak} pro zmenšenou ozvučnici lze vypočítat pomocí vzorce [1]

$$SPL_{\text{peak}} = 20 \log \left[2,6Q_{ts} \left(\frac{V_{as}}{V_b'} \right)^{0,35} \right] = 20 \log \left[2,6 \times 0,55 \times \left(\frac{8,02}{10} \right)^{0,35} \right] = 2,44 \text{ [dB]}. \quad (2.11)$$

Dále bylo v programu LspCAD sestaveno zapojení pro simulaci a návrh bassreflexové ozvučnice pro zvolený reproduktor, viz obrázek 2.6. [5]



Obr. 2.6 LspCAD zapojení pro bassreflexovou ozvučnici.

Vypočtené TS parametry reproduktoru IRB 16/50/01,8, parametry ozvučnice a nátrubku byly vloženy do programu LspCAD. Simulovaná kmitočtová přenosová a fázová charakteristika bassreflexové ozvučnice pro aproximaci „maximally flat“ je vidět v příloze B na obrázku B.5 a B.6. Simulovaná kmitočtová přenosová a fázová charakteristika pro zmenšenou bassreflexovou ozvučnici na 10 litrů je vidět v příloze B na obrázku B.7 a B.8. Ze simulace zmenšené bassreflexové ozvučnice je patrný nárůst parametru SPL_{peak} , který téměř odpovídá vypočtené hodnotě 2,44 dB.

Dále byly provedeny simulace bassreflexové ozvučnice pro špatně zvolený objem a špatné rozměry nátrubku. Simulované charakteristiky bassreflexové ozvučnice pro špatně zvolený objem ozvučnice jsou v příloze B na obrázku B.9 a B.10. Objem byl zvolen 35 litrů.

Pro simulaci bassreflexové ozvučnice se špatným rozměrem nátrubku byl zvolen nátrubek s průměrem 50 mm a délkou 4 cm. Průběhy charakteristik jsou v příloze B na obrázku B.11 a B.12.

Špatný objem a rozměry nátrubku bassreflexové ozvučnice byly voleny pro názornou demonstraci vlivů těchto parametrů na SPL charakteristiku ozvučnice.

3. VÝHYBKY

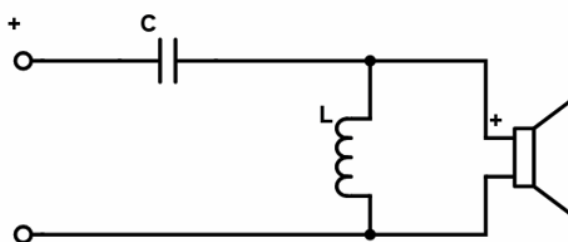
Výhybka u reproduktorových soustav slouží jako soustava filtrů určená k rozdělení frekvenčního pásma do několika pásem pro jednotlivé reproduktory. Výhybky se u reproduktorových soustav používají, protože prakticky neexistuje reproduktor, který by dokázal zahrát celé slyšitelné frekvenční pásmo bez velkého zkreslení, s minimální směrovostí a dostatečným akustickým výkonem. To souvisí se vztahem pro akustický výkon [1]

$$P_a = 0,859 \times S_d^2 \times X \times f^4 [\text{W}], \quad (3.1)$$

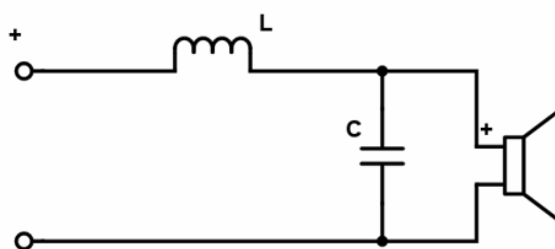
kde S_d je plocha membrány, X je výchylka membrány a f je frekvence. Plyne z něj, že pro nízké frekvence je potřeba větší výchylka membrány a větší velikost membrány než pro vyšší frekvence pro dosažení stejného akustického výkonu. Z toho důvodu se pro pásmo nízkých kmitočtů používají reproduktory s větším průměrem membrány a pro vyšší kmitočty zase s menším průměrem membrány.

Výhybky se dělí na dva typy, a to na aktivní a pasivní. Aktivní výhybky jsou v obvodu zapojeny mezi zdroj signálu a zesilovač, který následně zesiluje už jen ořezaný signál. Jejich výhodou je v tom, že díky nim lze realizovat přenosovou charakteristiku požadovaného tvaru. Pasivní výhybky jsou v obvodu zapojeny mezi zesilovačem a reproduktory. Tato práce se dále bude zabývat pouze pasivními výhybkami.

Výhybka používá ke své funkci filtry. Pro hlubokotónový reproduktor se používá filtr typu dolní propust, příklad filtru typu dolní propust je na obrázku 3.1, který propouští signál do určité frekvence. Pro středotónový reproduktor se využívá filtr pásmová propust, který propouští signál od frekvence x do frekvence y . Pro výškový reproduktor se využívá filtr typu horní propust, jeho příklad je na obrázku 3.2, který propouští signál od určité frekvence.



Obr. 3.1 Schéma filtru typu horní propust druhého řádu [1].



Obr. 3.2 Schéma filtru typu dolní propust druhého řádu [1].

3.1 Parametry výhybky

Výhybka musí být navržena tak, aby každý reproduktor pracoval ve správném režimu z hlediska kmitočtu a i amplitudy. Také musí splňovat podmínku, aby se reprodukováný signál co nejvíce podobal signálu, který je do něj přiváděn.

3.1.1 Amplitudová, fázová a impedanční charakteristika

Při návrhu výhybky je snaha docílit vyrovnané kmitočtové charakteristiky reproduktorové soustavy v akustické ose, ale také i mimo ni. To je však náročný požadavek, protože platí, že čím větší strmost výhybky, tím větší deformace nastává u fázové charakteristiky. V praxi se nejčastěji návrh výhybky odvíjí od ploché amplitudové charakteristiky. [1]

V případě impedanční charakteristiky je důležité dbát na to, aby vstupní impedance představovala bezpečnou zátěž pro připojený zesilovač. Nesmí dojít k jeho přetížení a následnému selhání. Toto může nastat při dělicím kmitočtu, když vstupní impedance klesne pod jmenovitou hodnotu. Proto je potřeba při návrhu myslet i na tento parametr.

3.1.2 Zvolení dělicích frekvencí

Pro správné zvolení dělicích kmitočtů je důležité zvážit vlastnosti použitých reproduktorů. U hlubokotónového reproduktoru v některých případech nastává problém, že při vyšších frekvencích má nevyrovnanou kmitočtovou charakteristiku a s rostoucí frekvencí se zvyšuje jeho činitel směrovosti. U středového reproduktoru je zapotřebí, aby hrál v pásmu impedančního minima, protože v tomto pásmu má jeho impedance převážně odporový charakter. Na nízkých kmitočtech roste zkreslení, protože se zvětšuje výchylka membrány. U vysokotónových reproduktorů se nedoporučuje volit dělicí kmitočet pod frekvencí, kterou udává výrobce. [1] Pro reproduktor je výhodné, aby dělicí kmitočet byl položen aspoň o oktávu výše od dělicí frekvence, která je udávána výrobcem. Při zvolení příliš nízké dělicí frekvence může dojít ke zničení vysokotónového reproduktoru.

3.1.3 Zvolení aproximací a strmostí filtrů

Podle zvolené aproximace bude vypadat průběh kmitočtové charakteristiky výhybky.

Nejčastěji používané aproximace jsou filtry typu Butterworth. Tento typ filtru splňuje podmínku konstantního příkonu a amplitudy ($Q = 0,707$). Další typ filtru je Bessel ($Q = 0,570$) a Linkwitz – Riley, který splňuje podmínku konstantní amplitudy ($Q = 0,500$). [1] Použití těchto aproximací není zcela správné, protože reálný elektroakustický měnič 1. skupiny vykazuje výhradně impedanci indukčního charakteru.

Co se týče strmosti výhybky, v reproduktorových soustavách jsou často použity výhybky se strmostí 12 dB/okt.

Návrh výhybky je hodně o kompromisu. Výhybka se strmostí 12 dB/okt je nejlepší kompromis z hlediska kmitočtové charakteristiky, výrobních nákladů, směrové charakteristiky v oblasti dělicí frekvence a oddělení pásem reproduktorů. [1] Strmost výhybky také souvisí s počtem součástek pro výrobu výhybky (čím větší strmost, tím více součástek).

Výhybka jednodušší konstrukce se strmostí 6 dB/okt je vhodná pouze pro basový reproduktor, ale pro správnou činnost je potřeba použít velmi kvalitní reproduktor. U výškového reproduktoru je vhodné volit výhybku se strmostí minimálně 12 dB/okt, ale častěji se používají výhybky se strmostí 18 dB/okt. Hlavní výhodou je, že reproduktor nebude tolik zatížen, bude nízké zkreslení a dojde k účinnějšímu potlačení signálu pod dělicím kmitočtem. Při zvolení velké strmosti můžou nastat nekontrolovatelné fázové posuny a zkreslení. [1]

3.2 Kompenzace průběhu reproduktorů

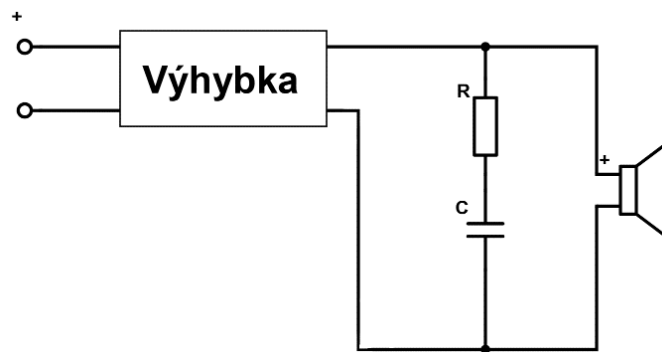
3.2.1 Kompenzace indukčnosti kmitačky

Kompenzace se provádí nejčastěji pomocí sériového zapojení rezistoru a kondenzátoru, příklad zapojení na obrázku 3.3. Tomuto zapojení se říká sériový RC člen a je to nejjednodušší varianta této kompenzace. Funguje tak, že impedance RC členu se zkombinuje s impedancí reproduktoru a tím na výhybce vznikne téměř činná zátěž. Tento typ kompenzace je nejčastěji použit u hlubokotónových reproduktorů, ale lze ji využít u ostatních reproduktorů v ozvučnici. Hodnoty součástek kompenzace indukčnosti se vypočítají ze vzorců [1]

$$R = 1,25 \times R_e [\Omega], \quad (3.2)$$

$$C = \frac{L_e}{R^2} [\mu\text{F}], \quad (3.3)$$

kde R_e je stejnosměrný odpor vinutí, R je odpor kompenzace, C je kapacita kompenzace a L_e je indukčnost vinutí.



Obr. 3.3 Schéma kompenzace indukčnosti RC členem [1].

3.2.2 Kompenzace rezonance

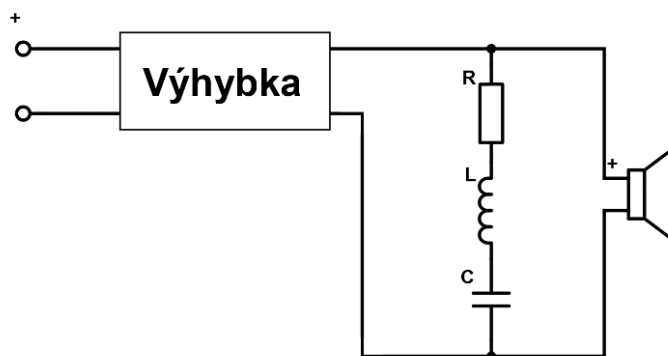
Na rozdíl od basových reproduktorů se u výškových reproduktorů využívá kompenzace rezonance. Tento způsob kompenzace kompenzuje rezonanční kmitočet reproduktoru v případě, že se přiblíží k dělicí frekvenci výhybky. Hodnoty součástek lze přibližně vypočítat pomocí vzorců[1]

$$C = \frac{0,03003}{f_s} [\mu\text{F}], \quad (3.4)$$

$$L = \frac{0,02252}{f_s^2 \times C} [\text{mH}], \quad (3.5)$$

$$R = R_e + 0,5 [\mu\text{F}]. \quad (3.6)$$

Příklad zapojení kompenzace rezonance do výhybky je na obrázku 3.4.

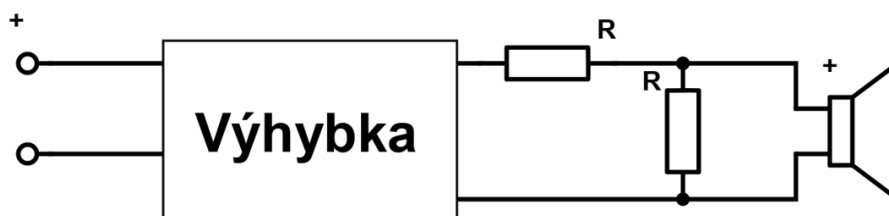


Obr. 3.4 Schéma kompenzace rezonance reproduktoru [1].

3.2.3 Vyrovnání citlivostí

Vyrovnání citlivostí je nejčastěji použito k vyrovnání citlivosti výškového a hlubokotónového reproduktoru. Kdyby se vyrovnání citlivostí neprovedlo, výškový

reproduktor by hrál oproti hlubokotónovému podstatně hlasitěji, což je pro reprodukci nežádoucí. Nejčastěji je citlivost vyrovnána pomocí odporového děliče, který je vřazen mezi horní propust a samotný výškový reproduktor jako na obrázku 3.5. Někdy je také využita varianta s jedním předřadným rezistorem, který je sériově vřazen za filtr typu horní propust a před vysokotónový reproduktor. Takové zapojení je označováno jako násobný kmitočtově závislý dělič. [7]



Obr. 3.5 Schéma vyrovnání citlivosti reproduktoru [1].

3.3 Návrh a simulace výhybky

K návrhu a simulaci bude opět použit simulační program LspCAD. Jak již bylo zmíněno, před návrhem výhybky je potřeba zjistit parametry reproduktorů, zejména jejich frekvenční rozsah, a u výškového reproduktoru doporučenou dělicí frekvenci. Pro tuto práci byl přiřazen reproduktor IRB 16/60/01,8, který bude použit jako středobasový reproduktor, a výškový reproduktor IRT 10/80/01,8. Výrobce v katalogovém listu pro basový reproduktor uvádí frekvenční rozsah reproduktoru od 40 Hz do 4500 Hz. [8] Výškový reproduktor má zase rozsah 1,5 kHz až 20 kHz [9] a doporučený dělicí kmitočet nad 1700 Hz. Jak již bylo psáno, při návrhu výhybky je potřeba udělat několik kompromisů. Po zvážení kvality reproduktorů a doporučení z odborné literatury [1] byla zvolena konstrukce výhybky s horní a dolní propustí druhého řádu, tedy se strmostí ± 12 dB/okt. Pro základní odhad hodnot součástek pro horní a dolní propust druhého řádu byly použity rovnice (3.6) a (3.7). Na základě parametrů reproduktorů, byl zvolena dělicí frekvence 2000 Hz. Parametry součástek pro filtry horní a dolní propust jsou tedy [1]

$$L = \frac{|Z|}{4f_d} = \frac{8}{4 \times 2000} = 1,00 \text{ [mH]}, \quad (3.7)$$

$$C = \frac{1}{4 \times \pi \times f_d \times |Z|} = \frac{1}{4 \times \pi \times 2000 \times 8} = 4,97 \text{ [\mu F]}, \quad (3.8)$$

kde Z je hodnota impedance reproduktoru pro horní a dolní propust, f_d je dělicí frekvence výhybky. Pro hlubokotónový reproduktor je potřeba ještě vypočítat hodnoty součástek pro kompenzaci indukčnosti kmitačky podle vzorce (3.2) a (3.3)

$$R = 1,25 \times R_e = 1,25 \times 7,18 = 8,975 \text{ [\Omega]},$$

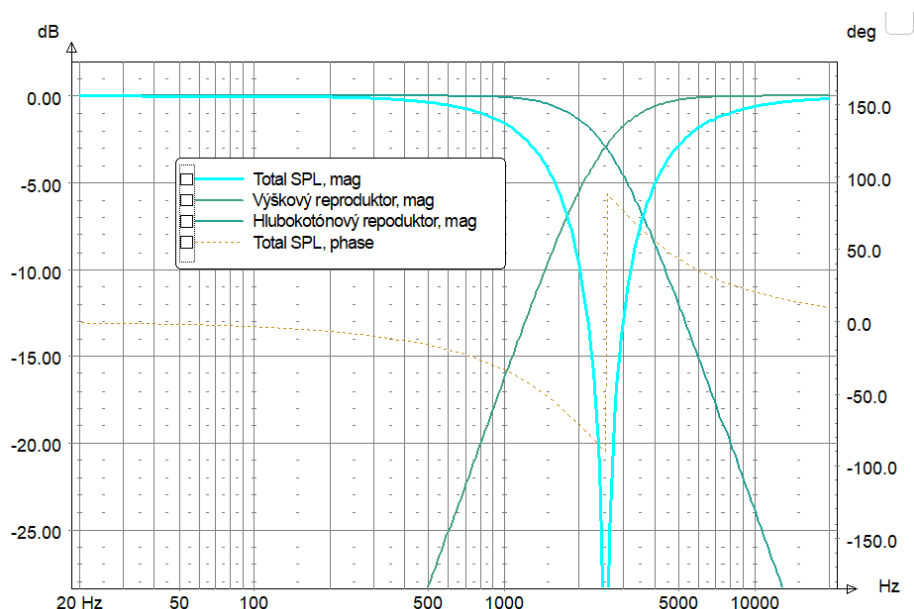
$$C = \frac{L_e}{R^2} = \frac{0,82}{8,975^2} = 10,18[\mu\text{F}].$$

Pro vysokotónový reproduktor bude nejspíše ještě potřeba určit hodnoty útlumového článku, ale ty budou určeny na základě simulace výhybky v simulačním programu LspCAD.

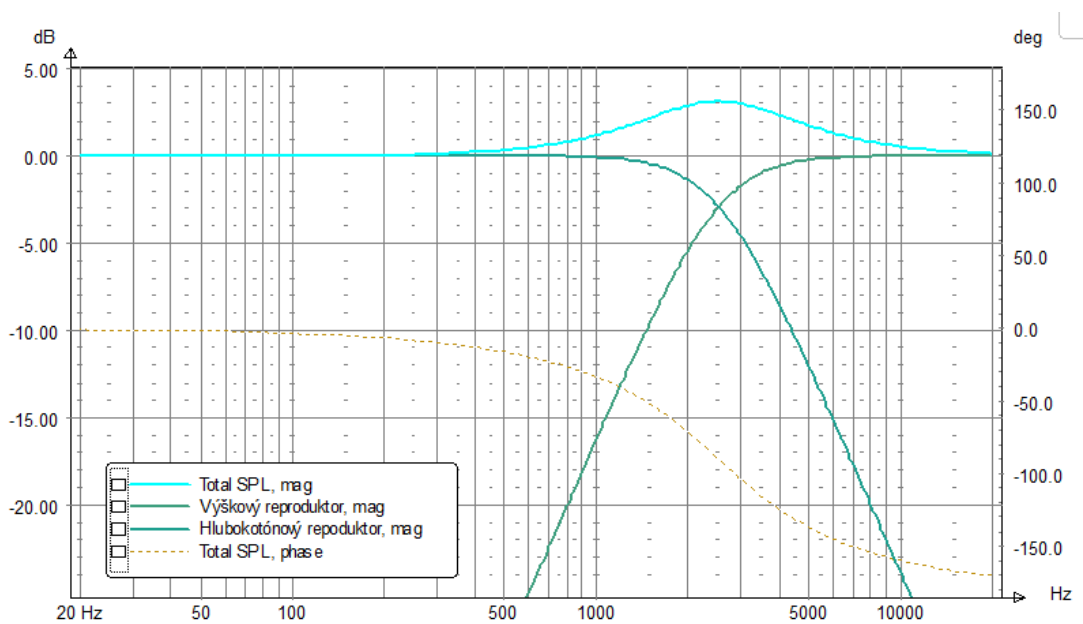
3.3.1 Simulace a ladění výhybky

Nejdříve je potřeba v programu LspCAD vytvořit zapojení výhybky druhého řádu pro hlubokotónový a výškový reproduktor, jako je na obrázku 3.1 a 3.2. Dále je potřeba nastavit vypočtené hodnoty součástek z předchozí kapitoly a importovat naměřené průběhy reproduktorů. V první simulaci byly vloženy impedanční charakteristiky ideálního 8Ω hlubokotónového a výškového reproduktoru, aby bylo co nevíce patrné, jak se výhybka chová.

Z první simulace na obrázku 3.6 je patrné, že na dělicím kmitočtu dochází k velkému propadu SPL charakteristiky, který je nežádoucí. To je způsobeno sousedními reproduktory, protože každý z nich vyzařuje v okolí mezního kmitočtu s opačnou fází. Tento jev je způsoben filtry druhého řádu. Z tohoto důvodu je potřeba výškový reproduktor přepólovat, to znamená prohodit + a – na reproduktoru. Po přepólování tento propad zmizí tak jako na obrázku 3.7. Na mezním kmitočtu vznikne naopak nárůst hladiny akustického tlaku. Tohoto nárůstu se dá poměrně jednoduše zbavit doladěním hodnot součástek.

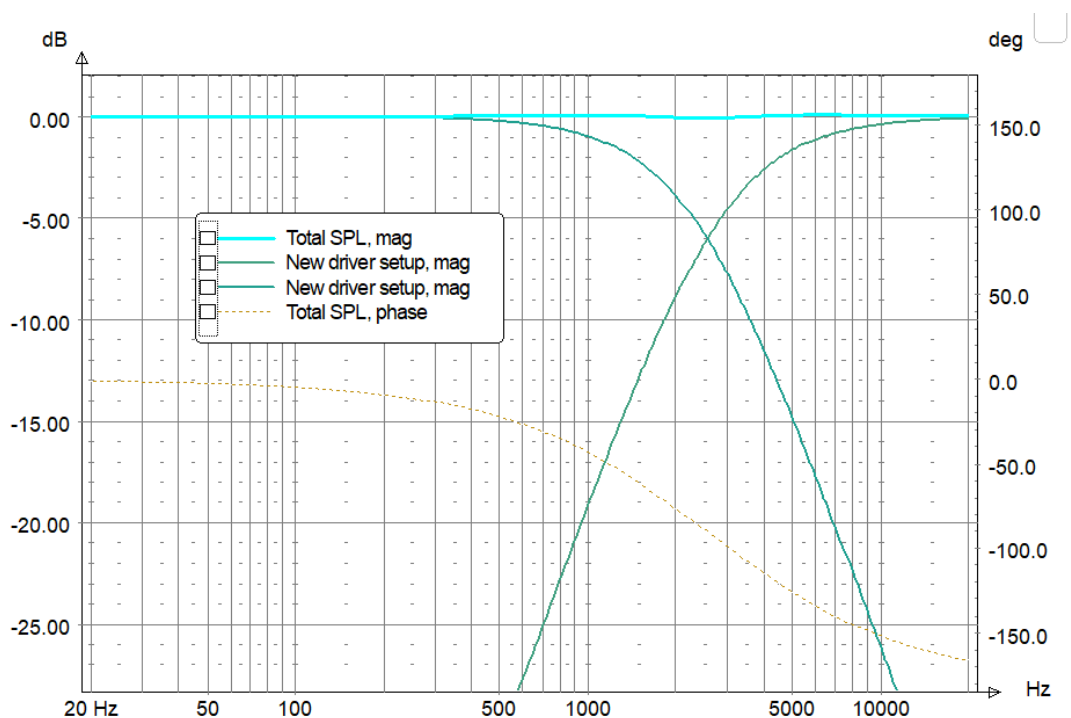


Obr. 3.6 Simulace výhybky se špatnou polaritou ideálních reproduktorů.



Obr. 3.7 Simulace výhybky se správnou polaritou ideálních reproduktorů.

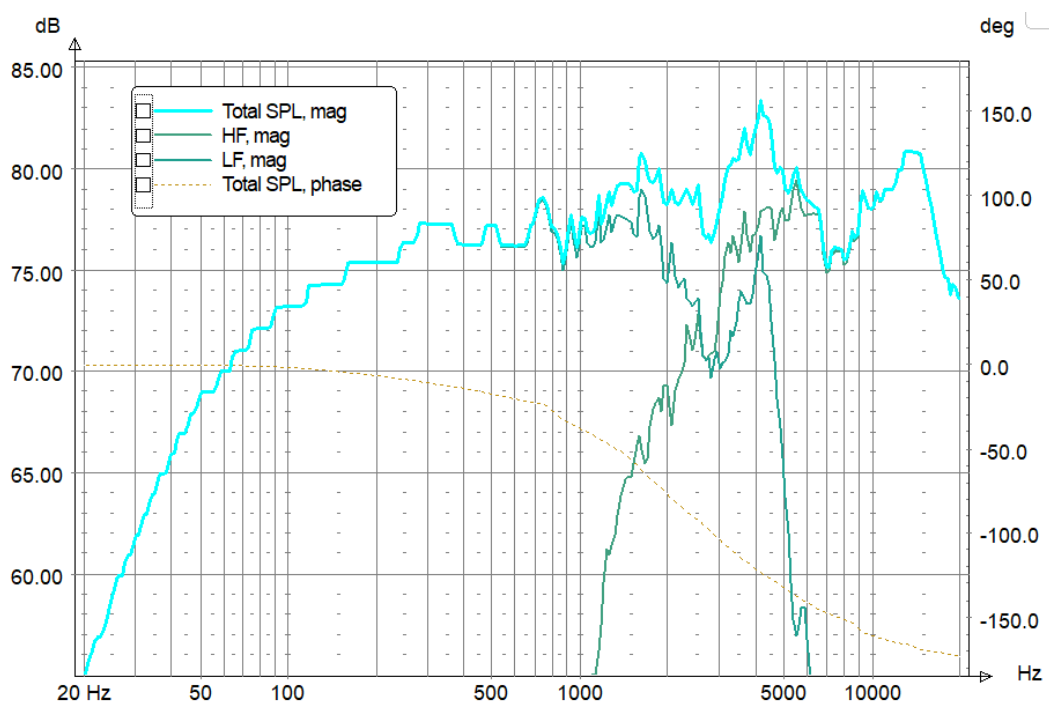
Po doladění součástek výhybky v simulačním programu vznikl poměrně vyhlazený průběh charakteristiky bez větších nerovností, který je na obrázku 3.8.



Obr. 3.8 Simulace výhybky se správnou polaritou ideálních reproduktorů po doladění.

Dále bylo potřeba do programu vložit reálné naměřené impedanční charakteristiky reproduktorů, které jsou v příloze A.1 a A.2. Dále amplitudové charakteristiky obou

reproduktorů, které jsou v příloze A.3. Podrobnější informace o měření těchto SPL charakteristik se nachází v kapitole 6.2. Tím dojde ke značné změně průběhů simulované charakteristiky, která je na obrázku 3.9. Z charakteristiky je patrné, že po vložení charakteristik reálných reproduktorů nastaly velké změny v průběhu charakteristiky. Ze simulace je patrné, že je potřeba doladit hodnoty součástek v reproduktorové výhybce tak, aby simulovaná charakteristika byla co nejvyrovnanější. K ladění velikostí součástek byl použit i nástroj Optimizer, kterým LspCAD disponuje.

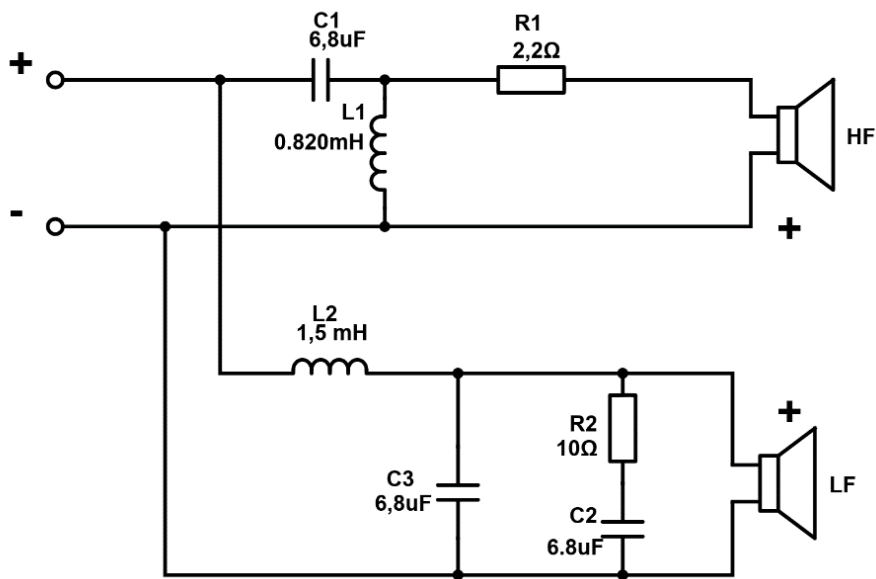


Obr. 3.9 Simulace reproduktorové soustavy s reálnými reproduktory s nedoladěnými součástkami.

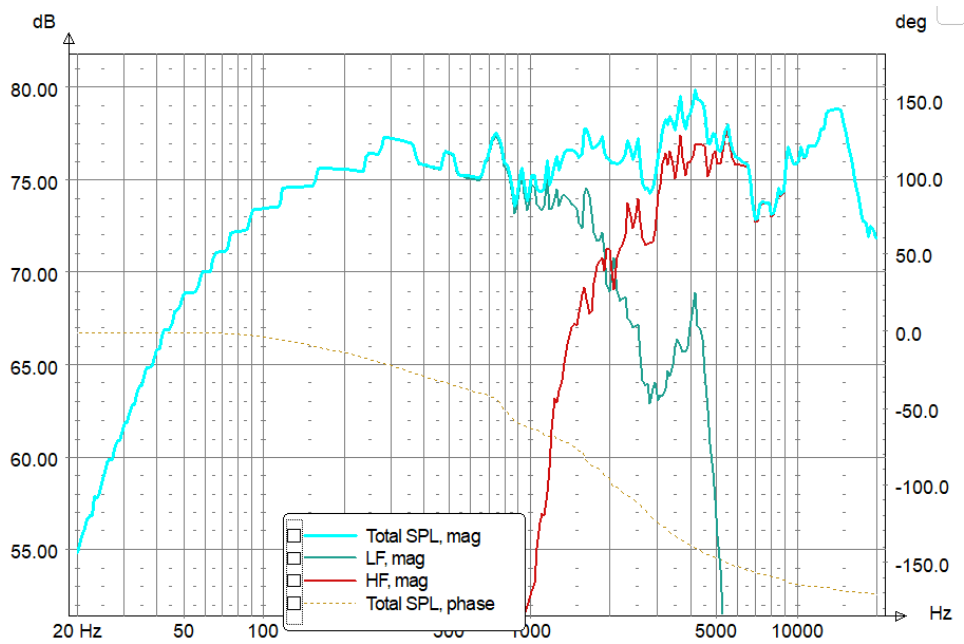
Během ladění výhybky byla použita i kmitočtově závislá kompenzace citlivosti pro vysokotónový reproduktor, která je tvořena jedním rezistorem. Velikost tohoto rezistoru byla laděna pomocí simulace.

Nyní je výhybka složena z filtrů horní a dolní propust druhého řádu, kompenzace citlivosti vysokotónového reproduktoru a kompenzace indukčnosti hlubokotónového reproduktoru. Podle simulace v programu LspCAD bylo dosaženo chyby 0,906 dB v pásmu 100 Hz až 20 kHz. Po naladění bylo potřeba do simulačního programu vložit reálné parametry součástek, které se dají koupit. Vycházelo se ze součástek, které nabízel firma Dexon. Součástky byly voleny tak, aby jejich odchylka od ideální hodnoty měla co nejmenší vliv na SPL charakteristiku reproduktorové soustavy.

Schéma zapojení s hodnotami reálných součástek je na obrázku 3.10 a její charakteristika je na obrázku 3.11.



Obr. 3.10 Schéma zapojení výhybky .



Obr. 3.11 Simulace reproduktorové soustavy s reálnými součástkami.

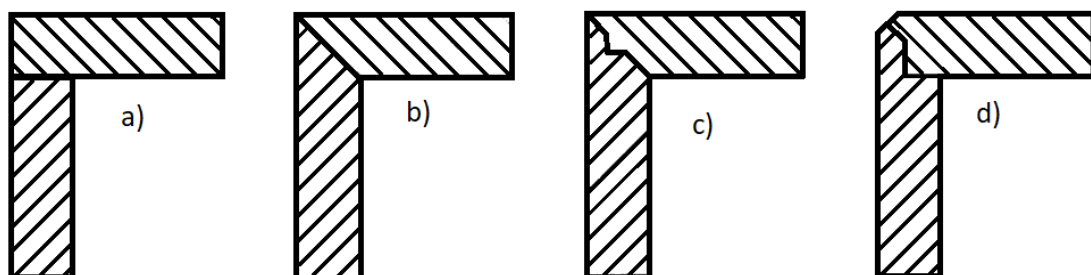
4. NÁVRH A KONSTRUKCE REPRODUKTOROVÉ SKŘÍNĚ

Při konstrukci skříně je důležité vybrat správný materiál pro její stavbu. Takový materiál by měl mít co největší vnitřní tlumení, měl by být nejtěžší a zároveň co nejtěžší. Reproduktorová skříň musí mít nejen dostatečnou pevnost, ale také musí mít dostatečnou vzduchotěsnost. Proto reproduktorovou skříň nestačí zhotovit pouze z pevných a tlumících desek, ale je i potřeba utěsnit spoje desek. Je také zapotřebí utěsnit i prostor mezi reproduktorem a ozvučnicí, připojovacím terminálem a bassreflexovým nátrubkem.[1]

Při návrhu rozměrů ozvučnice je důležité, aby rozměry vycházely z vypočteného čistého objemu ozvučnice. Čistým objemem se rozumí objem bez reproduktorů, nátrubků a ostatních prvků v ozvučnici. Takže čistý objem je třeba navýšit o objemy těchto prvků v ozvučnici. Poměry stran ozvučnic často vycházejí ze „zlatého řezu“. Dodržení tohoto poměru je vhodný základ pro minimalizaci vlastních kmitočtů skříně, ale není to kritický parametr, který by bylo potřeba dodržet. Zlatý řez má poměr stran (šířka : výška : hloubka) roven $0,62 : 1,62 : 1$ nebo také $0,8 : 1,25 : 1$. [1]

Stavebních materiálů pro výrobu reproduktorových skříní je celá řada. Používají se například MDF (Medium density fiber) desky, DTD (dřevovláknité) desky, překližky, beton, kámen a i plast. V této práci bude bedna vyrobena z MDF desek, protože tento materiál má výborné parametry pro výrobu ozvučnice. Je těžký, hustý, má velké vnitřní tlumení a je jednoduše zpracovatelný.

Důležitým faktorem je i spojování samotných stěn. Způsobů je mnoho a každý má jiné vlastnosti. Příklady spojů jsou na obrázku 4.1. Spoj na tupo má menší pevnost a vzniká u něj nevzhledná spára. Na pokos je vzhlednější způsob spojení, ale pořád má malou pevnost. Na pokos se zámkem je z hlediska pevnosti nejlepší, ale má vysoké nároky na přesnost. Nejlepší vlastnosti má spoj na zámek s následným zkosením hran. Tento způsob má dobrou pevnost a zkosení nebo zaoblení hran snižuje difrakční vyzařování. Všechny typy spoje je ale potřeba utěsnit. [1]



Obr. 4.1 Spojování stěn a) na tupo, b) na pokos, c) na zámek a d) na zámek se zkosením [1].

Dalším důležitým faktorem je tlumení stojatých vln v ozvučnici, které jsou nežádoucí. Pro tlumení se využívá například tlumící rouno, které je nejvhodnější. Dále se používají různé molitany a vaty, které už nejsou natolik účinné. Nejčastěji použitým druhem tlumení je tlumení na stěny reproduktorové skříně. Dalším kompromisem je tloušťka tlumícího materiálu. Lze říct, že čím větší vrstva, tím lépe, protože tím větší bude mít účinek na nižších frekvencích. S tím vzniká problém, protože tlumení ovlivňuje poddajnost vnitřního prostoru, a to způsobuje přeladění reprosoustavy.

4.1 Návrh dvoupásmové a variabilní ozvučnice

V předchozí kapitole, která se zabývala návrhem bassreflexové ozvučnice, bylo vypočítáno a odsimulováno, že pro reproduktor IRB 16/60/01,8 je potřebná ozvučnice o čistém objemu 10 litrů. K tomuto objemu je potřeba připočíst objem částí reproduktorů, který zasahuje do objemu ozvučnice, objem bassreflexového nátrubku a tlumení. Objem hlubokotónového reproduktoru nelze přesně určit, ale je odhadován na 0,4 litru. Objem vysokotónového reproduktoru není třeba odhadovat, protože nezasahuje do objemu ozvučnice. Objem bassreflexu je 0,3 litru. Objem tlumícího rouna na utlumení ozvučnice je odhadnut na 0,75 litru při pokrytí všech volných míst na stěnách uvnitř ozvučnice s porézností materiálu 90 % a tloušťkou 4 cm. Výhybka nebude umístěna uvnitř ozvučnice, takže její objem není třeba zahrnout v celkovém objemu ozvučnice. Celkový objem ozvučnice je tedy 11,45 litru.

Reproduktory od sebe musí mít maximálně rozteč podle vzorce [1]

$$\lambda = \frac{v}{f_d} = \frac{343}{2000} = 0,1715[\text{m}], \quad (4.1)$$

kde λ je vlnová délka, v je rychlost zvuku 343 m/s a f_d je dělicí frekvence navržené výhybky. Z toho plyne, že vzdálenost mezi reproduktory od jejich středů musí být menší nebo rovna 17,15 cm. Vnitřní rozměry ozvučnice jsou tedy šířka = 184 mm, výška = 284 mm a hloubka = 219 mm. Ke všem rozměrům je potřeba dvakrát přičíst tloušťku materiálu, která je 18 mm, takže finální vnější rozměry jsou 320 mm x 220 mm x 255 mm. 3D vizualizace ozvučnic jsou na obrázku 4.2 a 4.3.

Ozvučnice jsou navrženy se spoji na tupo a s vyztužením pomocí kolíků. Spoje na tupo budou z vnitřní strany potaženy lepidlem, aby se docílilo co nejlepší těsnosti. Mezi reproduktory a ozvučnicí bude vloženo reproduktorové těsnění. Bassreflexový nátrubek bude použit Monacor MBR-50 o průměru 50 mm a délce 149 mm. Detailnější výkresová dokumentace je v příloze C.1.



Obr. 4.2 3D vizualizace dvoupásmové ozvučnice.



Obr. 4.3 3D vizualizace variabilní ozvučnice.

Modulární ozvučnice bude zkonstruována podobným způsobem jako předešlá bassreflexová ozvučnice. Rozdíl v konstrukci bude především v zadním víku, které je navrženo tak, aby bylo rychle a jednoduše odnímatelné. Byl zvolen způsob uchycení zadního víka přes tzv. bednové uzávěry, které umožní rychlou změnu ozvučnice a zajistí přitom dostatečně pevný spoj. Mezi zadním víkem ozvučnice a ozvučnicí bude také těsnění. Bassreflexový nátrubek je opatřený zátkou s těsněním, která je uchycena pomocí dvou šroubů a křídlové matice. Tento způsob uchycení zátky byl zvolen kvůli snadné demontáži, aby bylo možné v krátkém časovém okamžiku zvolit jeden ze 3 typů ozvučnice, kterou má variabilní ozvučnice představovat. Po dohodě s vedoucím práce bylo upuštěno od původního návrhu variabilní ozvučnice, která byla konstrukčně navržena tak, že měla dva bassreflexové nátrubky umístěné v zadním odnímatelném víku, z nichž jeden byl naladěn k ozvučnici a druhý měl chybné parametry. Toto řešení nebylo vhodné, protože výsledné ozvučnice by si nebyly dostatečně podobné a při měření by nebylo dosaženo dostatečných rozdílů mezi jednotlivými nátrubky. Detailnější výkresová dokumentace je v příloze C.2.

5. REALIZACE

Při realizaci ozvučnice byly dodrženy všechny parametry z kapitoly 4.1, která se zabývala jejich návrhem.

Ozvučnice byly zhotoveny z M.D.F. desky o tloušťce 18 mm, jak bylo plánováno. Spoje desek byly zhotoveny na tupo a vyztuženy pomocí truhlářských kolíků o délce 40 mm a průměru 8 mm. Jako lepidlo do spojů bylo použito vysokopevnostní vodě odolné lepidlo na dřevo, které zaručí dostatečnou pevnost spoje. Lepidlo bylo nanášeno po celé délce spoje bez přerušování, aby se docílilo, že spoj bude dokonale těsnit. V poslední řadě byla celá ozvučnice stažena truhlářskými svěrkami, aby na sebe desky těsně přiléhaly a ve spoji nevznikaly nedokonalosti, které by mohly zapříčinit netěsnost ozvučnice.

Při montáži reproduktorů byla na spoj mezi ozvučnicí a reproduktorem nalepena reproduktorová těsnicí páska. Ta byla také použita na spoje při montáži bassreflexového nátrubku, terminálu a speakon konektoru. Variabilní ozvučnice byla osazena 2 pinovým terminálem pro banánkové konektory. Dvoupásmová ozvučnice byla osazena 4 pinovým konektorem speakon. Na piny speakon konektoru +1 a -1 byl zapojen hlubokotónový reproduktor a na piny +2 a -2 vysokotónový reproduktor. Do ozvučnic bylo pomocí tavného lepidla nalepeno tlumící rouno, aby došlo k potlačení stojatého vlnění. Reproduktorové ozvučnice byly také opatřeny gumovými nožičkami, aby se zamezilo nežádoucím vibracím ozvučnice při měření.

Při realizaci výhybky byl také dodržen její návrh z předchozí kapitoly. Výhybka byla realizována jako externí, kvůli možnosti samostatného měření reproduktorů a výhybky v rámci možných modifikací laboratorních úloh. Byla osazena na univerzální desku plošného spoje o rozměrech 100 x 150 mm, na kterém byly vytvořeny vodivé cesty. Tato deska plošného spoje byla vložena do plastové krabičky a opatřena dvěma 4 pinovými konektory speakon typu samice pro vstup a výstup. Pro vstup do výhybky byly zapojeny pouze piny speakon konektoru +1 a -1, které se následně přivedly na větve výhybky pro hlubokotónový a vysokotónový reproduktor. Jako výstup byly zapojeny všechny 4 piny. Piny +1 a -1 byly použity jako výstup pro hlubokotónový reproduktor a piny +2 a -2 jako výstup pro vysokotónový reproduktor. Výstup pro vysokotónový reproduktor musel být tak jako v návrhu výhybky přepólován a přepólování bylo realizováno právě na výstupních pinech speakon konektoru +2 a -2 výhybky. K propojení výhybky a ozvučnice bude sloužit 4 žilový kabel s konektory speakon.

Fotografie realizovaných ozvučnic jsou na obrázku 5.1 a 5.2.



Obr. 5.1 Realizovaná dvoupásmová ozvučnice.



Obr. 5.2 Realizovaná variabilní ozvučnice.

6. MĚŘENÍ PARAMETRŮ SOUSTAVY

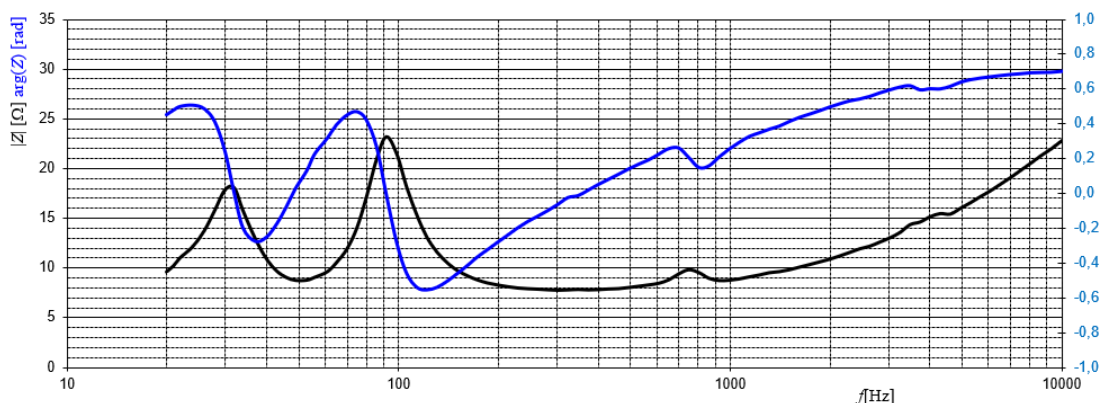
6.1 Měření impedančních charakteristik reproduktoru v ozvučnicích

Pro měření modulu impedance reproduktoru v ozvučnici byla využita metoda měření napětí na svorkách reproduktoru a proudu protékajícího reproduktorem jako v kapitole 1.3, kde je tato metoda podrobněji vysvětlena.

6.1.1 Bassreflexová ozvučnice

Na obrázku 6.1 je naměřená závislost modulu a fáze impedance na kmitočtu reproduktoru IRB 16/60/0,18 v realizované bassreflexové ozvučnici.

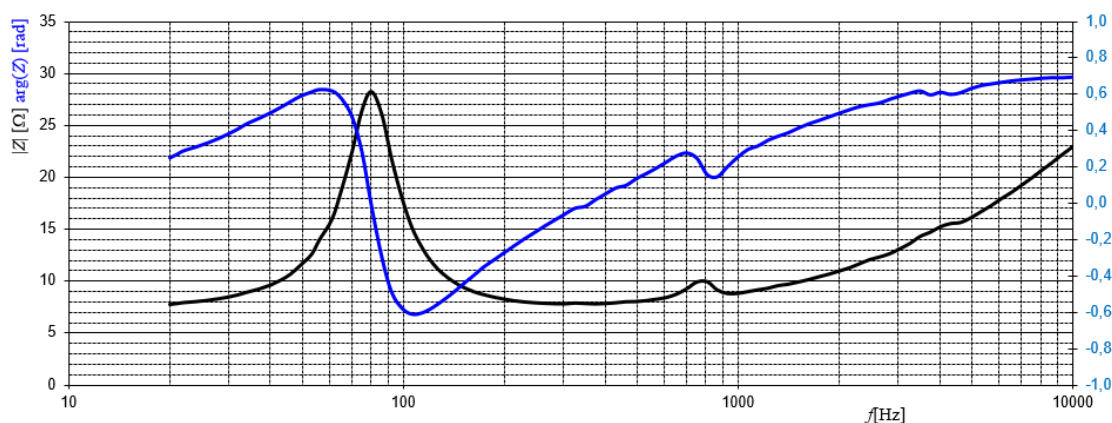
Tato ozvučnice byla v předchozí kapitole simulována a její simulace je v příloze B na obrázku B.8. Mezi impedanční charakteristikou ze simulace a reálnou naměřenou jsou značné rozdíly zejména ve velikosti impedancí, ale rezonanční kmitočty téměř odpovídají simulaci.



Obr. 6.1 Závislost modulu a fáze impedance na kmitočtu reproduktoru IRB v realizované dvoupásmové bassreflexové ozvučnici.

6.1.2 Uzavřená ozvučnice

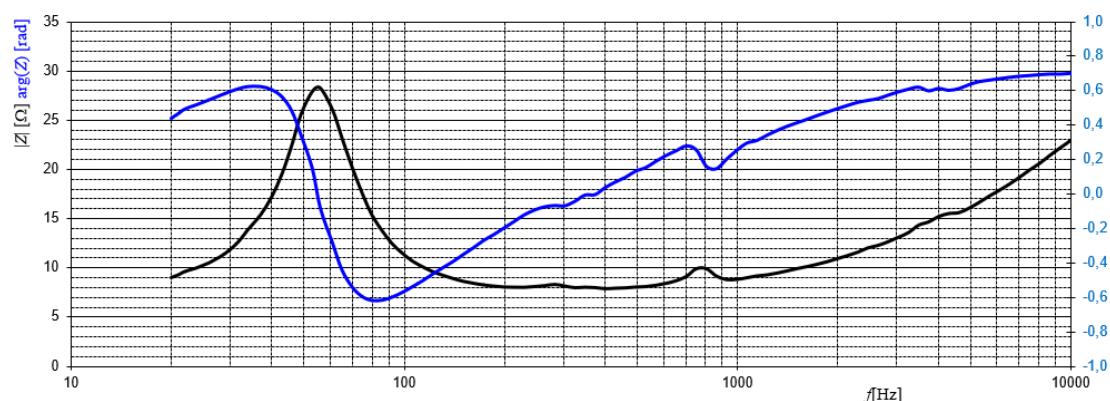
Na obrázku 6.2 je naměřená závislost modulu a fáze impedance na kmitočtu reproduktoru IRB 16/60/0,18 v uzavřené ozvučnici, která byla realizována pomocí variabilní ozvučnice.



Obr. 6.2 Závislost modulu a fáze impedance na kmitočtu reproduktoru IRB v realizované uzavřené ozvučnici.

6.1.3 Polootevřená ozvučnice

Na obrázku 6.3 je naměřená závislost modulu a fáze impedance na kmitočtu reproduktoru IRB 16/60/0,18 v polootevřené ozvučnici, která byla realizována pomocí variabilní ozvučnice tím, že byla odejmuta zadní stěna a utěsněn bassreflexový nátrubek.



Obr. 6.3 Závislost modulu a fáze impedance na kmitočtu reproduktoru IRB v realizované polootevřené ozvučnici.

6.2 Měření SPL charakteristiky reproduktorů pro návrh a simulaci výhybky v programu LspCAD

Před simulací výhybky pro dvoupásmovou soustavu, bylo potřeba změřit SPL charakteristiky reproduktorů. Měření probíhalo v bezodrazové komoře UTKO. Při měření vysokotónového reproduktoru byla využita ozvučnice typu rovinná deska o rozměrech 700 mm × 800 mm. Pozice vysokotónového reproduktoru byla od středu

rovinné desky vychýlena o 100 mm ve směru 800 mm hrany a o 50 mm ve směru 700 mm hrany. Toto umístění vysokotónového reproduktoru bylo zvoleno z důvodu potlačení vlivu difrakcí na měřenou charakteristiku. Mikrofon byl umístěn ve vzdálenosti 1 metru v ose vysokotónového reproduktoru. Při měření hlubokotónového reproduktoru byl reproduktor ve variabilní ozvučnici a bylo využito měření ve vzdálenosti 1 metru od hlubokotónového reproduktoru a rovněž měření v blízkém poli. Měření v blízkém poli bylo využito, protože v bezodrazové komoře UTKO na nízkých kmitočtech vznikají stojatá vlnění. Tento jev nastává, protože bezodrazová komora nemá na nízkých kmitočtech dostatečnou pohltivost. Pro měření v blízkém poli je mikrofon umístěn maximálně ve vzdálenosti od prachové vložky reproduktoru [6]

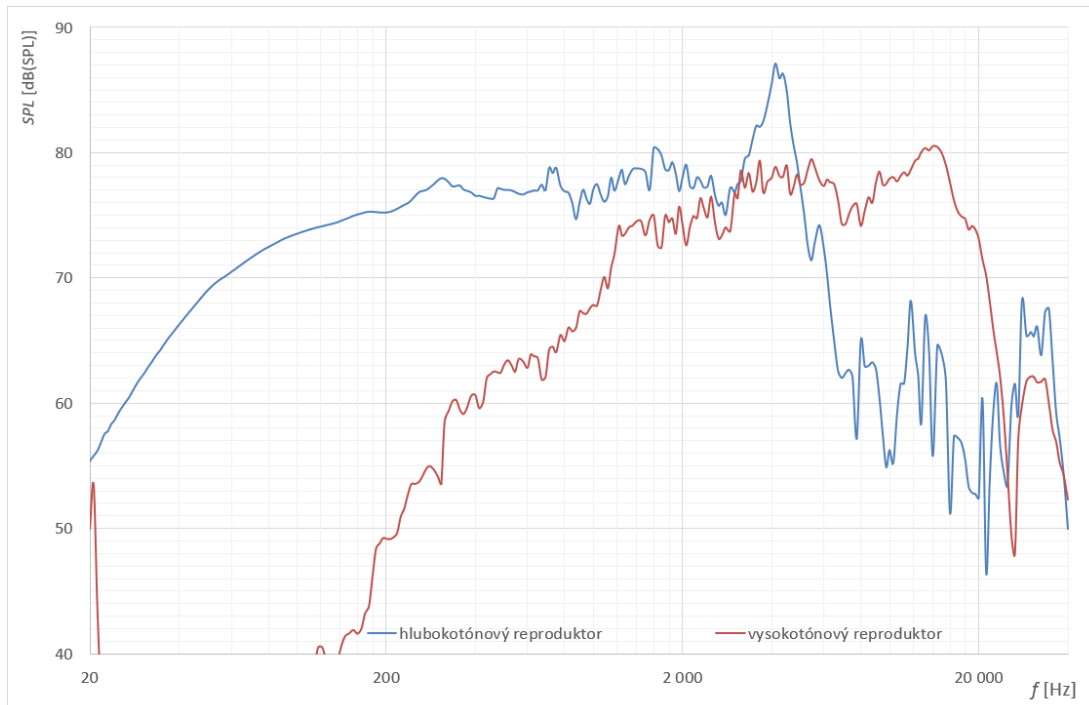
$$x = 0,11 \times r = 0,11 \times 8,255 = 0,9 \text{ [cm]}, \quad (6.1)$$

kde r je poloměr membrány reproduktoru.

Toto měření je ale omezené frekvencí f_{\max} , do které je platné [6]

$$f_{\max} = \frac{c_0}{\pi M} = \frac{343}{\pi \times 0,32} = 341,4 \text{ [Hz]}, \quad (6.2)$$

kde c_0 je rychlost zvuku a M je největší rozměr ozvučnice, což je v tomto případě rozměr přední desky ozvučnice, a to $M = 0,32$ m. SPL charakteristika hlubokotónového reproduktoru byla vytvořena kombinací charakteristiky měření v blízkém a vzdáleném poli. Naměřené průběhy jsou na obrázku 6.4.



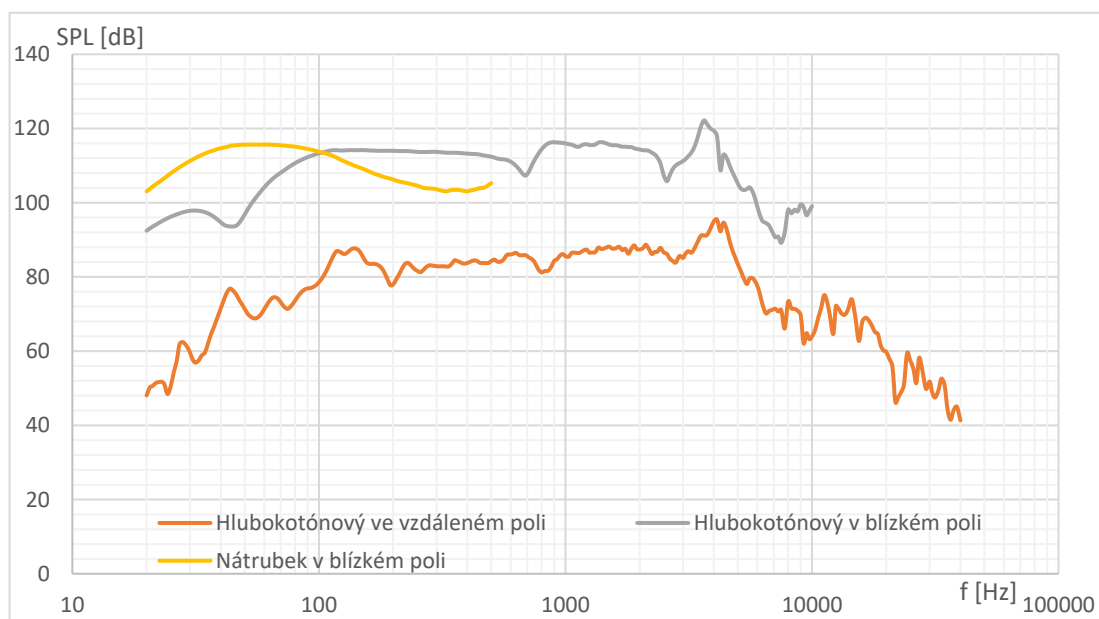
Obr. 6.4 SPL charakteristiky reproduktorů pro návrh výhybky.

6.3 Měření SPL charakteristiky reproduktorů v realizované bassreflexové ozvučnici

6.3.1 Měření hlubokotónového reproduktoru a bassreflexového nátrubku

Hlubokotónový reproduktor IRB 16/60/01,8 byl nainstalován do realizované bassreflexové ozvučnice. Měření se provedlo ve vzdáleném a blízkém poli v ose reproduktoru. Bassreflexový nátrubek byl měřen pouze v blízkém poli nátrubku. Ze vzorce (6.1) plyne, že měření v blízkém poli je platné pouze do 341 Hz.

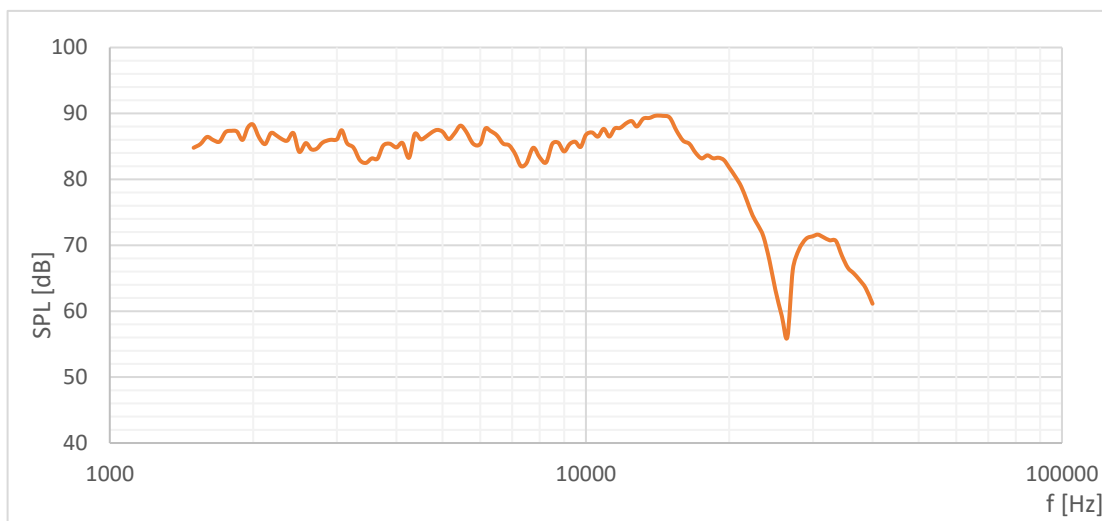
Z naměřených charakteristik na obrázku 6.5 je vidět, že bassreflexový nátrubek, který byl pomocí výpočtů a simulace v LspCAD naladěn na 56,38 Hz, má ve skutečnosti rezonanční kmitočet na 53 Hz. Z toho je zřejmé, že teoretický návrh bassreflexového nátrubku téměř odpovídá skutečnosti a nedopouští se při něm nepřijatelných chyb. Oranžová křivka znázorňuje naměřený průběh hlubokotónového reproduktoru ve vzdáleném poli (tedy v 1 m) a šedá průběh hlubokotónového reproduktoru v blízkém poli.



Obr. 6.5 SPL charakteristiky reproduktoru IRB a nátrubku v bassreflexové ozvučnici.

6.3.2 Měření vysokotónového reproduktoru

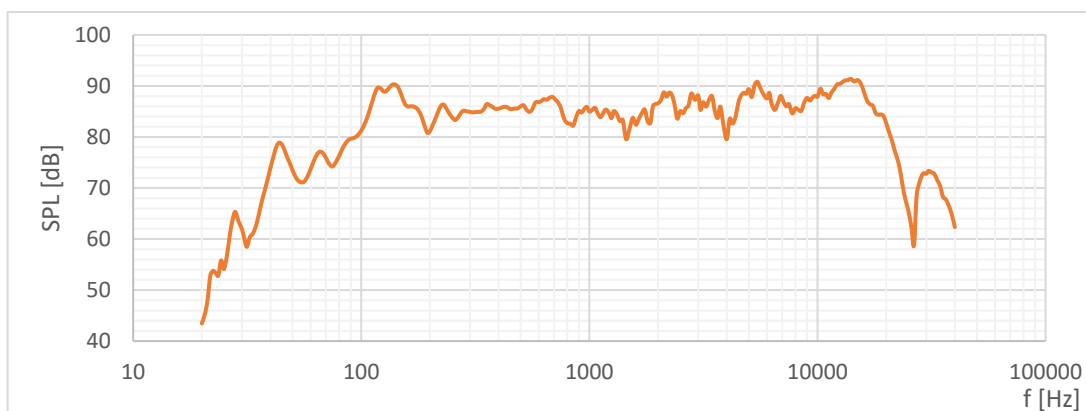
Měření vysokotónového reproduktoru nainstalovaného v realizované dvoupásmové bassreflexové ozvučnici bylo provedeno v ose reproduktoru IRT 10/80/01,8 pro kmitočtové pásmo 1500 Hz až 40 kHz. Charakteristika je na obrázku 6.6.



Obr. 6.6 SPL charakteristika vysokotónového reproduktoru IRT.

6.3.3 Měření dvoupásmové reproduktorové soustavy s výhybkou

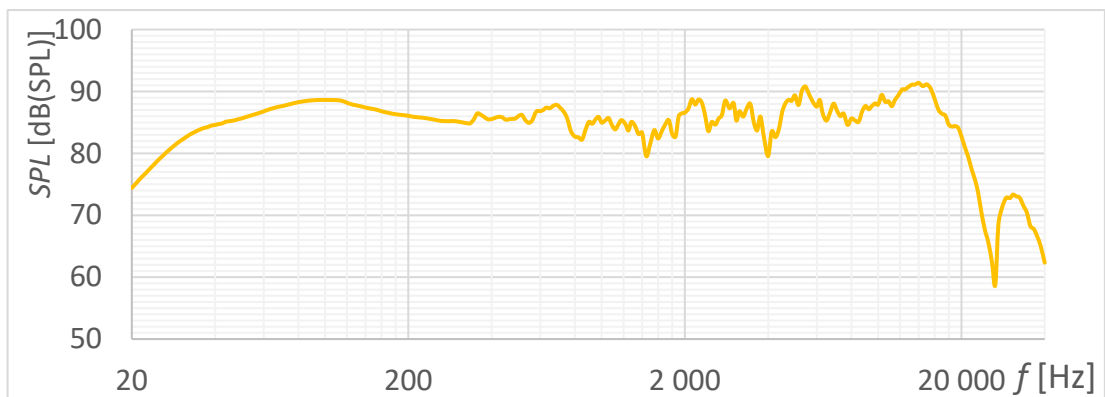
Měření bylo provedeno již se zapojenou reproduktorovou výhybkou mezi zesilovač a reproduktorovou soustavu, která byla navržena v předchozí kapitole. Měření bylo provedeno ve vzdáleném poli. Charakteristiku je možné vidět na obrázku 6.7.



Obr. 6.7 SPL charakteristiky reproduktorové soustavy s výhybkou.

Na obrázku 6.8 je SPL charakteristika celé dvoupásmové reproduktorové soustavy se zapojenou výhybkou s vykompenzovaným průběhem hlubokotónového reproduktoru na nízkých kmitočtech pomocí charakteristiky změřené v blízkém poli, která je dána součtem charakteristik pro hlubokotónový reproduktor a bassreflexový nátrubek. Součet byl proveden podle rovnice [6]

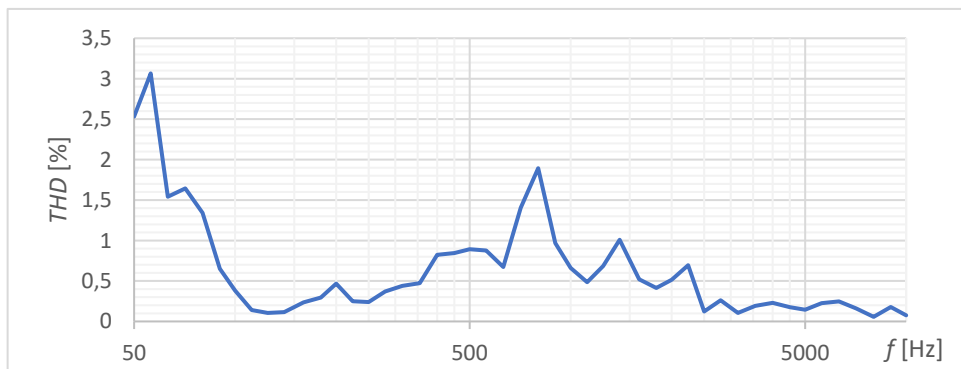
$$L_{pc} = 20 \log \sqrt{10^{L_{p1}/10} + 10^{L_{p2}/10} + 2 \times 10^{(L_{p1}+L_{p2})/20}} \text{ [dB]}. \quad (6.3)$$



Obr. 6.8 SPL charakteristiky reproduktorové soustavy s výhybkou po kompenzaci.

6.3.1 Měření zkreslení hlubokotónového reproduktoru

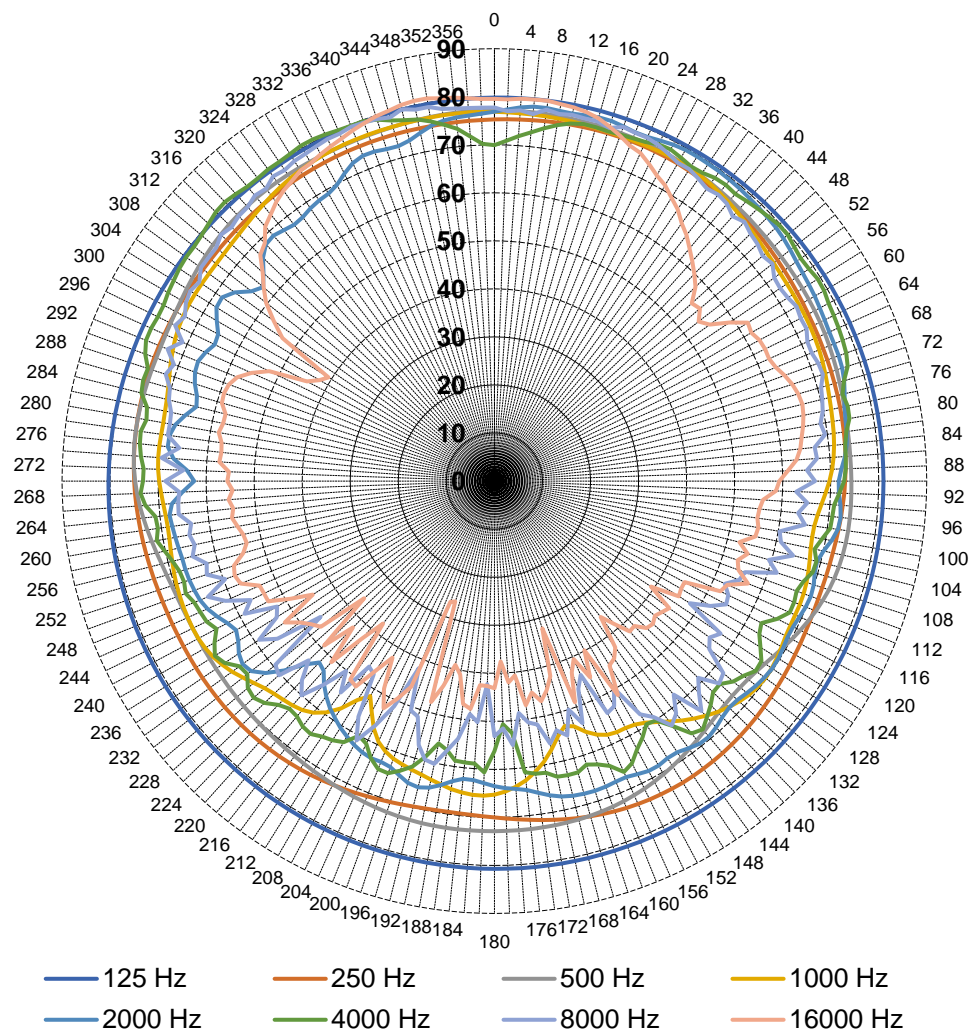
Měření zkreslení reproduktoru bylo provedeno pomocí systému Pulse v bezodrazové komoře. Mikrofon byl umístěn v ose hlubokotónového reproduktoru a ve vzdálenosti 1 m při výkonu 1 W. Změřená charakteristika je na obrázku 6.9.



Obr. 6.9 Celkové harmonické zkreslení hlubokotónového reproduktoru.

6.3.2 Měření směrové charakteristiky reproduktorů

Měření směrové charakteristiky také probíhalo v bezodrazové komoře s pomocí otočného ramene a systému Pulse. Krok měření byl nastaven na 2° . V každé pozici byla změřena hladina akustického tlaku v oktávových intervalech od 125 Hz do 16 kHz. Mikrofon byl umístěn ve vzdálenosti 1 m od osy reproduktorové soustavy v ose vysokotónového reproduktoru. Změřené směrové charakteristiky jsou na obrázku 6.10. Z charakteristiky je patrné, že při nízkých kmitočtech se reproduktorová soustava chová všesměrově a s rostoucím kmitočtem začíná směřovat.



Obr. 6.10 Směrová charakteristika reproduktorové soustavy v ose vysokotónového reproduktoru.

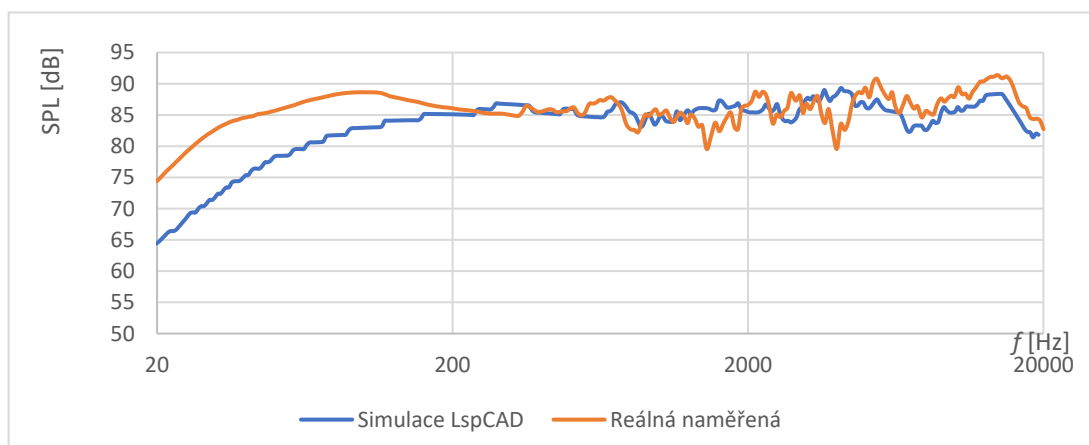
6.3.3 Porovnání naměřené a simulované SPL charakteristiky

Na obrázku 6.11 je porovnání simulované SPL charakteristiky dvoupásmové reproduktorové soustavy a reálné naměřené SPL charakteristiky soustavy. Z charakteristik je patrný rozdíl zejména na nižších kmitočtech od 20 do 200 Hz. Tento rozdíl nastal hlavně kvůli tomu, že reálná charakteristika byla změřena na realizované dvoupásmové reproduktorové soustavě s bassreflexovou ozvučnicí, která podporuje reprodukci na nízkých kmitočtech, a při návrhu v simulačním programu byla použita naměřená SPL charakteristika hlubokotónového reproduktoru z polouzavřené ozvučnice.

Tato ozvučnice také nebyla navržena pro maximálně plochou SPL charakteristiku. Její čistý objem byl zmenšen na 10 litrů a tím došlo k dalšímu nárůstu hladiny akustického

tlaku v okolí 95 Hz. Kdyby byl dodržen potřebný objem ozvučnice, který byl stanoven pomocí aproximace maximally flat pro maximálně plochou charakteristiku, tak by k tomuto nárůstu hladiny akustického tlaku na nízkých kmitočtech nedošlo a charakteristika by byla v této oblasti vyrovnanější.

Rozdíl na vysokých kmitočtech, které reprodukoval vysokotónový reproduktor, může být způsoben zejména vlivem difrakcí. SPL charakteristika vysokotónového reproduktoru pro použití v simulaci byla měřena v ozvučnici typu rovinná deska, která měla potlačit vliv difrakcí a při měření ve dvoupásmové soustavě se tyto difrakce mohli projevit.



Obr. 6.11 Simulovaná a reálná SPL charakteristika reproduktorové soustavy.

6.4 Měření výhybky

Charakteristiky výhybky byly změřeny s připojenou reálnou zátěží 6,6 Ω , která je dostupná v laboratoři Elektroakustiky UTKO. Byla změřena kmitočtová charakteristika přenosu výhybky mezi vstupem a jednotlivými výstupy pro vysokotónový a hlubokotónový reproduktor. Dále byla změřena její fázová kmitočtová charakteristika mezi vstupem a oběma výstupy, skupinové zpoždění a její harmonické zkreslení THD. Změřené charakteristiky jsou v příloze D.

7. LABORATORNÍ ÚLOHY

V rámci bakalářské práce byly také upraveny již existující laboratorní úlohy z předmětu Elektroakustika, a to úloha č. 7 – „Měření TS parametrů reproduktoru“, úloha č. 8 – „Návrh reproduktorové soustavy“ a úloha č. 9 – „Měření charakteristik reproduktorové soustavy“.

Úloha č. 7 byla upravena tak, aby měření modulových impedančních charakteristik probíhalo na variabilní ozvučnici, která byla navržena a realizována v rámci této bakalářské práce, a aby byly měřeny parametry použitého reproduktoru IRB 16/60/01,8. K měření impedance reproduktoru bude využita metoda měření napětí na svorkách reproduktoru a proudu protékajícího reproduktorem, tak jako v této práci. K tomu bude využit měřicí systém RT-2M. Student v rámci této laboratorní úlohy bude měřit modul impedance reproduktoru v polouzavřené ozvučnici, která bude realizována odejmutím zadní stěny variabilní ozvučnice a utěsněním bassreflexového nátrubku. Dále bude měřit impedanci reproduktoru v uzavřené ozvučnici a v bassreflexové ozvučnici. Uzavřená ozvučnice bude realizována pomocí variabilní ozvučnice s utěsněným bassreflexovým nátrubkem a nainstalovanou zadní stěnou ozvučnice. Bassreflexová ozvučnice bude realizována tak, že bude odmontováno víko bassreflexového nátrubku a zadní stěna zůstane nainstalována na ozvučnici. Z naměřených charakteristik student vypočítá TS parametry reproduktoru a porovná je s parametry od výrobce.

Úloha č. 8, která se zabývá návrhem reproduktorové soustavy, byla upravena tak, aby student při návrhu používal reproduktor IRB 16/60/01,8 jako hlubokotónový reproduktor a IRT 10/80/01,8 jako vysokotónový reproduktor. První část úlohy se zabývá návrhem a simulací uzavřené a bassreflexové ozvučnice pro hlubokotónový reproduktor na základě TS parametrů změřených v úloze 7. Při návrhu bassreflexové ozvučnice student bude muset vypočítat parametry ozvučnice a nátrubku pro aproximaci maximally flat a následně objem zmenšit a přeladit parametry nátrubku, aby navrhovaná ozvučnice odpovídala dvoupásmové ozvučnici z této bakalářské práce. Následně provede jejich simulace v simulačním programu LspCAD. Druhá část této úlohy je zaměřena na návrh a optimalizaci dvoupásmové reproduktorové výhybky. Student v programu LspCAD vytvoří zapojení kmitočtových filtrů typu horní a dolní propust 2. řádu se strmostí 12 dB/okt a pomocí vzorečků vypočítá velikosti použitých součástek. Provede simulace za použití ideální 8Ω zátěže, aby pochopil základní principy fungování výhybky. Následně do simulačního programu vloží charakteristiky reálných reproduktorů a provede optimalizaci výhybky pomocí optimalizačního nástroje *Optimizer*, který je součástí programu LspCAD. Pro dosažení co nejvyrovnanější charakteristiky také použije kompenzaci citlivosti vysokotónového reproduktoru. Z důvodu časové náročnosti této úlohy bylo upuštěno od toho, aby student musel použít i kompenzaci indukčnosti.

V úloze č. 9, která se zabývá měřením charakteristik reproduktorové soustavy, student bude měřit charakteristiky realizované dvoupásmové reproduktorové soustavy

s výhybkou a ozvučnicí navrženou v úloze 8. K měření bude využit měřicí systém Pulse a bezodrazová komora. V prvním bodě bude změřena modulová kmitočtová charakteristika ve vzdáleném a blízkém poli. Ve druhém bodě budou určeny parametry reproduktorové soustavy, jako je efektivní kmitočtový rozsah, zvlnění kmitočtové charakteristiky a charakteristická citlivost. Ve třetím bodě budou změřeny směrové charakteristiky reproduktorové soustavy pomocí mikrofону na točně, kterou disponuje bezodrazová komora. Z grafu pak bude zjištěn úhel pokrytí a vyzařovací úhel. Na závěr bude změřena kmitočtová charakteristika ve směru 60° od akustické osy reproduktoru v 1 metru.

Návody laboratorních úloh jsou součástí elektronické přílohy.

ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo sjednotit laboratorní úlohy 7, 8 a 9. K tomu bylo potřeba vytvořit návrh a realizovat dvoupásmovou reproduktorovou soustavu s bassreflexovou ozvučnicí a variabilní ozvučnicí pro hlubokotónový reproduktor. Tato variabilní ozvučnice umožňuje rychlou změnu mezi polouzavřenou, uzavřenou a bassreflexovou ozvučnicí pro laboratorní úlohy do předmětu Elektroakustika. Pro zjištění parametrů hlubokotónového reproduktoru byla využita metoda měření v uzavřené ozvučnici o známém objemu. Z naměřených dat byly vypočítány TS parametry reproduktoru, ze kterých bylo následně vycházeno při návrhu ozvučnic. Navrhnuté ozvučnice byly odsimulovány v programu LspCAD s reálnými parametry reproduktoru IRB 16/50/01,8. Simulace byly provedeny i pro nesprávné parametry ozvučnic. Pro uzavřenou ozvučnici byl vypočítán a odsimulovaný čistý objem 12,32 litrů, pro bassreflexovou ozvučnici byl vypočítán a odsimulovaný čistý objem 22,24 litrů. Tento objem byl následně zmenšen na 10 litrů a bassreflexový nátrubek o průměru 50 mm byl pro tuto zmenšenou ozvučnici přeladěn na délku 149 mm. Dále byl proveden návrh externí výhybky pro dvoupásmovou reproduktorovou soustavu. Ze vzorců byly vypočítány přibližné hodnoty součástek filtru horní a dolní propust pro výhybku se strmostí 12 dB/okt a ty byly vloženy do simulačního programu LspCAD. Do konstrukce výhybky byla ještě vložena kompenzace impedance pro hlubokotónový reproduktor a útlumový rezistor pro snížení citlivosti vysokotónového reproduktoru. Parametry součástek výhybky byly doladěny a simulovány pomocí simulačního programu LspCAD tak, aby výsledná charakteristika byla co nejvyrovnanější v celém frekvenčním rozsahu reproduktorů. Následně byly navrženy reproduktorové skříně pro dvoupásmovou a variabilní ozvučnici. Návrh vycházel z čistého objemu bassreflexové ozvučnice, ke kterému byly přičteny objemy součástek v ozvučnici. Výsledný objem ozvučnice byl stanoven 11,45 l. Z tohoto objemu následně vychází rozměry obou ozvučnic. Konstrukce ozvučnic je téměř totožná, ale liší se v zadním víku, které není u variabilní ozvučnice uchyceno napevno, ale je přichyceno pomocí bednových uzávěrů pro rychlou změnu typu ozvučnice. Po konzultaci s vedoucím této práce bylo upuštěno od variabilní ozvučnice se dvěma bassreflexovými nátrubky na zadní straně ozvučnice. Byl použit pouze jeden správně naladěný nátrubek s možností uzavření a ten byl umístěn na přední stranu ozvučnice tak jako na dvoupásmové reproduktorové soustavě, aby se docílilo co největší podobnosti mezi variabilní a bassreflexovou ozvučnicí. Následně byly tyto ozvučnice realizovány z materiálu MDF podle předchozích návrhů. Byla také zkonstruována externí reproduktorová výhybka. Výhybka byla realizována na univerzální desce plošného spoje ze součástek od firmy Dexon. Dále bylo provedeno měření charakteristik reproduktorových ozvučnic a také výhybky. V poslední řadě byly upraveny již existující laboratorní úlohy do předmětu Elektroakustika tak, aby studenti využili realizované ozvučnice a postupy návrhů reproduktorových soustav při laboratorních cvičeních.

LITERATURA

- [1] TOMAN, Kamil. Reproduktory a reprosoustavy I. Karviná: Dexon, 2001. ISBN 859-1459280805. [cit. 5. 12. 2021].
- [2] SVOBODA, Ladislav a Miloslav ŠTEFAN. Reproduktory a reproduktorové soustavy. 3. přeprac. vyd., dot. Praha: SNTL, 1983. Malá radiotechnická knihovna. [cit. 5. 12. 2021].
- [3] SCHIMMEL, J. Elektroakustika. Brno. Vysoké učení technické v Brně, 2013. s. 1-167. ISBN 978-80-214-4716-5. [cit. 5. 12. 2021].
- [4] SCHIMMEL, J. Návody do laboratoří BPC-ELA: ELEKTROAKUSTIKA, Laboratorní úloha č. 7- Měření TS parametrů reproduktoru.
- [5] LspCAD tutorial. IJData [online]. Luleå, 2005 [cit. 2021-12-05]. Dostupné z: <http://www.ijdata.com/LspCAD%206%20tutorial.pdf>
- [6] SCHIMMEL, J. Návody do laboratoří BPC-ELA: ELEKTROAKUSTIKA, Laboratorní úloha č. 9- Měření charakteristik reproduktorové soustavy.
- [7] BALÍK, M. Návody do laboratoří BPC-REP: Reproduktorové soustavy, Laboratorní úloha č. 3- Návrh kmitočtové výhybky, korekčních a kompenzačních obvodů pro pasivní reproduktorové soustavy.
- [8] Katalogový list IRB 16/60/01,8 [online]. [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <https://www.dexon.cz/data/popisy/05071.pdf>
- [9] Katalogový list IRT 10/80/01,8 [online]. [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <https://www.dexon.cz/data/popisy/05076.pdf>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

DTD	dřevovláknitá deska
FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
MDF	polotvrdá dřevovláknitá deska
okt	oktáva
P.A.	Veřejné ozvučení
SPL	Sound Pressure Level
T.S.	Thiele-Small
UTKO	Ústav telekomunikací
VUT	Vysoké učení technické v Brně

Symboly:

a	výška	(m)
Bl	gyrační konstanta	(N/A)
C	kapacita kondenzátoru	(F)
c_o	rychlost šíření zvuku	(m/s)
c_a	poddajnost	(m ⁵ /N)'
c_{ms}	mechanická poddajnost kmitacího systému	(m/N)
d	průměr	(m)
EBP	Efficiency Bandwidth Product	(Hz)
f_0	kmitočet na minimu impedance okolo 1 kHz	(Hz)
f_1, f_2	pomocné frekvence	(Hz)
f_b, f_b'	rezonanční kmitočet bassreflexové ozvučnice	(Hz)
f_c	rezonanční kmitočet uzavřené ozvučnice	(Hz)
f_d	dělicí frekvence výhybky	(Hz)
f_m	mezní kmitočet ozvučnice	(Hz)
f_{max}	omezená frekvence	(Hz)
f_s	rezonanční frekvence	(Hz)
h	hloubka	(m)
I	proud	(A)
ID	index směrovosti	(-)
l, l'	délka	(m)
λ	vlnová délka	(m)
L	indukčnost cívky	(H)
L_e	indukčnost kmitací cívky	(H)
M	největší rozměr ozvučnice	(m)
m_{md}	hmotnost kmitacího systému	(kg)
m_{ms}	hmotnost kmitacího systému a sloupce vzduchu	(kg)

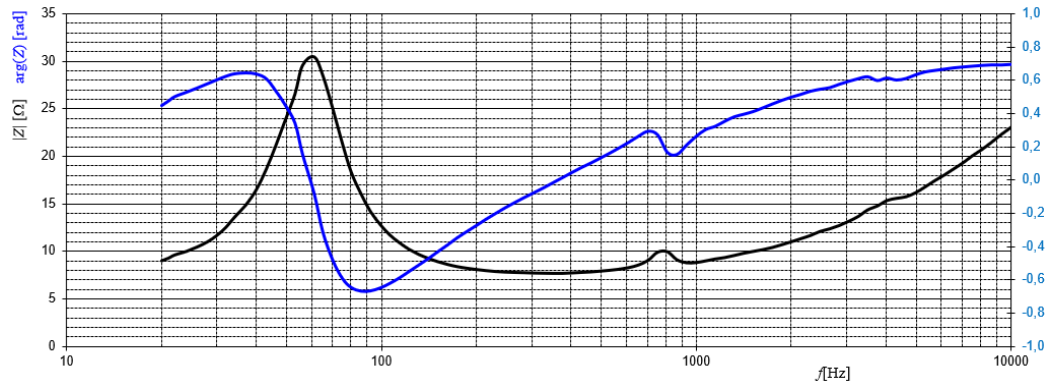
P_0	referenční hodnota tlaku	(Pa)
P_a	akustický výkon	(W)
P_t	akustický výkon pro neizotropní zářič	(W)
Q_{es}	elektrický činitel jakosti	(-)
Q_{ms}	mechanický činitel jakosti	(-)
Q_{tc}	činitel jakosti celé ozvučnice	(-)
Q_{ts}	celkový činitel jakosti	(-)
r	měrná hmotnost vzduchu	(kg/m ³)
R	odpor	(Ω)
R_0	pomocná hodnota odporu	(Ω)
R_1	hodnota odporu při f_1 , f_2	(Ω)
R_e	činná složka impedance	(Ω)
r_{ms}	mechanický odpor pružiny	(Ns/m)
R_z	hodnota impedance reproduktoru	(Ω)
S_d	obsah plochy membrány	(m ²)
SPL_{peak}	špičkový nárůst hladiny akustického tlaku	(dB)
U	napětí	(V)
v	výška	(m)
V_{as}	ekvivalentní objem	(m ³)
V_b	zvolený objem ozvučnice	(m ³)
V_c	objem uzavřené ozvučnice	(m ³)
X	výchylka membrány	(m)
x	vzdálenost mikrofonu od prachové vložky	(m)
X_R	reaktanční složka impedance	(Ω)
Z	impedance	(Ω)
Z_0	jmenovitá impedance	(Ω)
Z_{MAX}	maximální absolutní hodnota impedance	(Ω)

SEZNAM PŘÍLOH

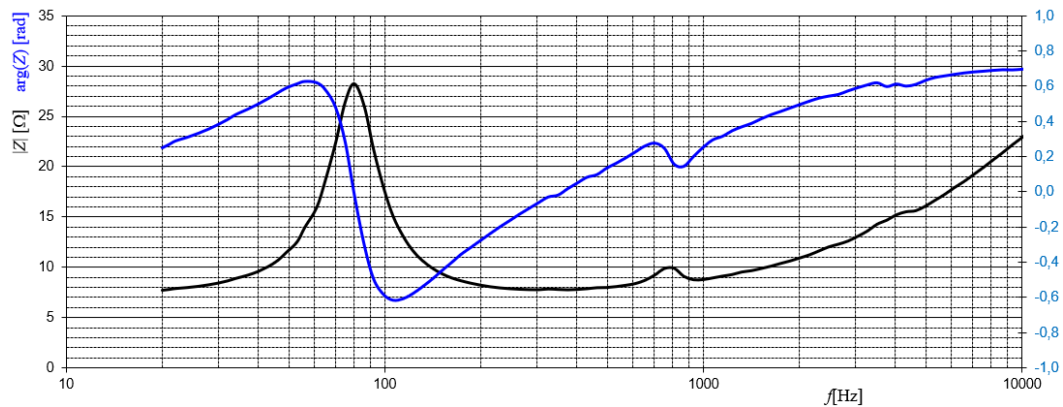
PŘÍLOHA A - CHARAKTERISTIKY PRO SIMULACE A VÝPOČET TS PARAMETRŮ	59
PŘÍLOHA B - SIMULACE OZVUČNIC.....	62
PŘÍLOHA C - VÝKRESOVÁ DOKUMENTACE OZVUČNIC	68
PŘÍLOHA D - MĚŘENÍ VÝHYBKY	75

Příloha A - Charakteristiky pro simulace a výpočet TS parametrů

A.1 Impedanční charakteristiky pro IRB



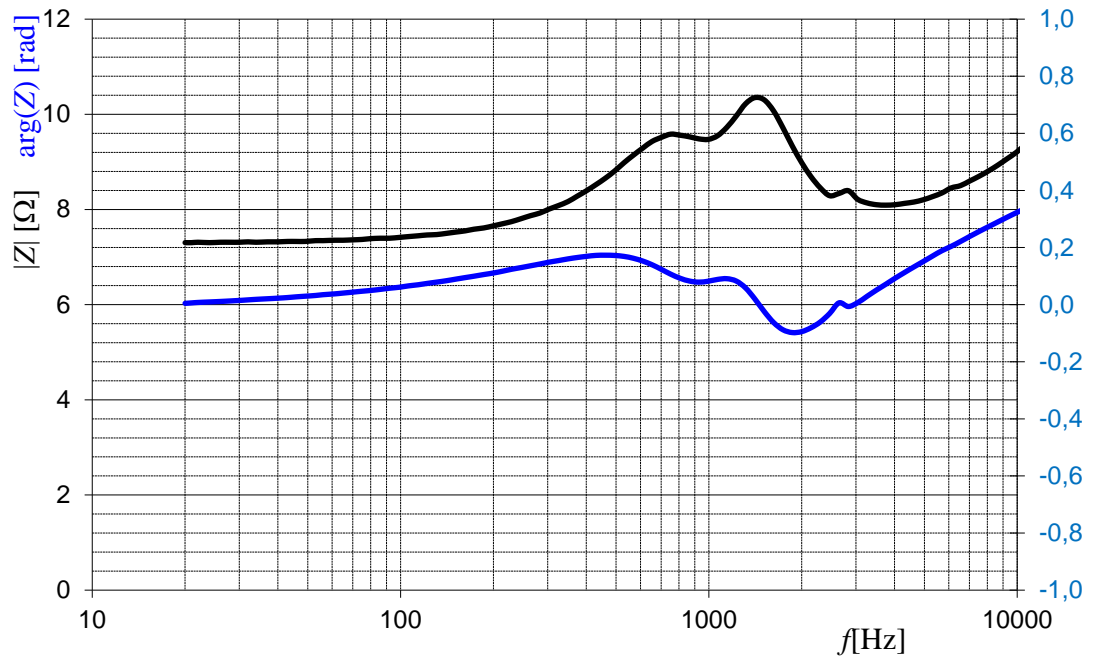
Obr. A.1 Modulová a fázová impedanční charakteristika reproduktoru IRB mimo ozvučnici



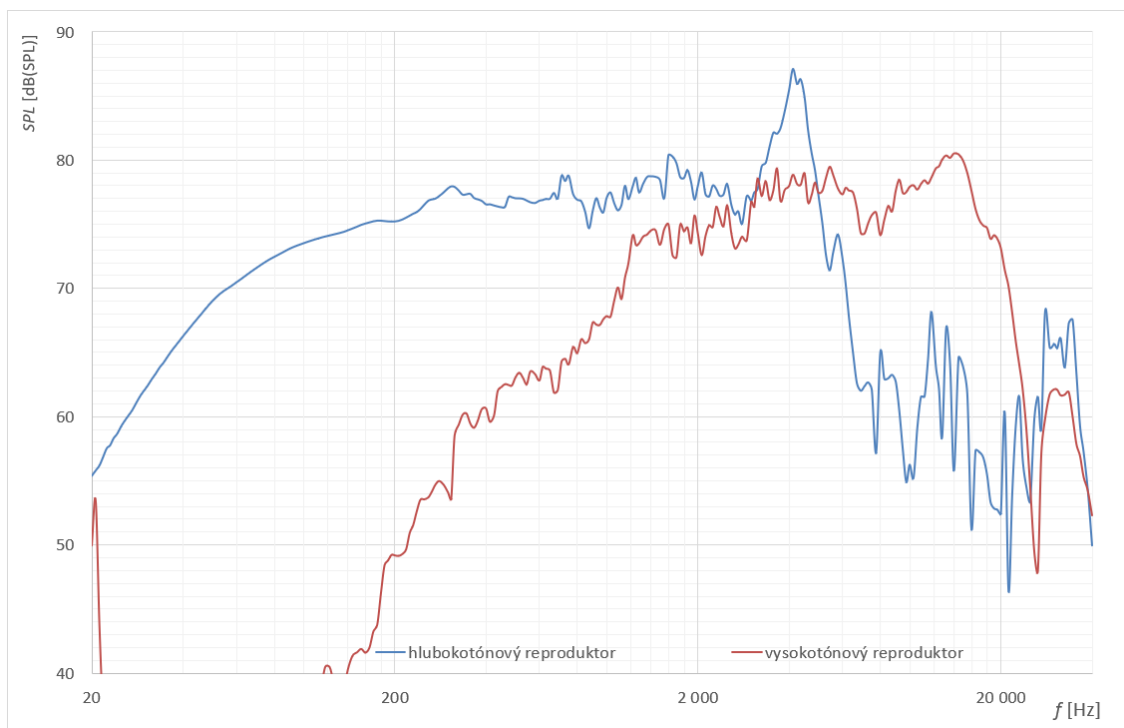
Obr. A.2 Modulová a fázová impedanční charakteristika reproduktoru IRB v uzavřené ozvučnici

A.2 Impedanční charakteristika pro IRT

Závislost modulu a fáze impedance na kmitočtu - IRT



A.3 SPL charakteristika hlubokotónového a vysokotónového reproduktoru



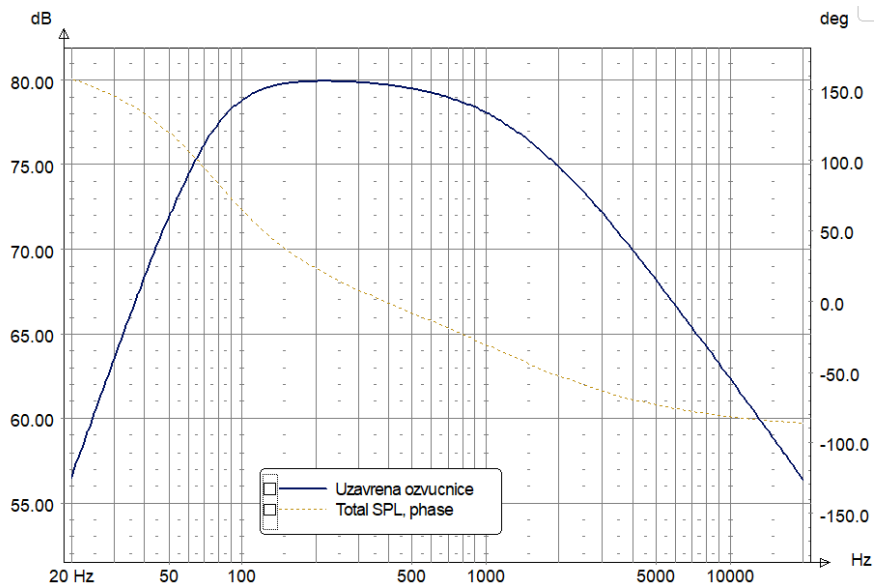
A.4 Vypočítané a katalogové TS parametry

Tabulka A.1 Vypočítané a katalogové hodnoty parametru reproduktoru IRB [8]

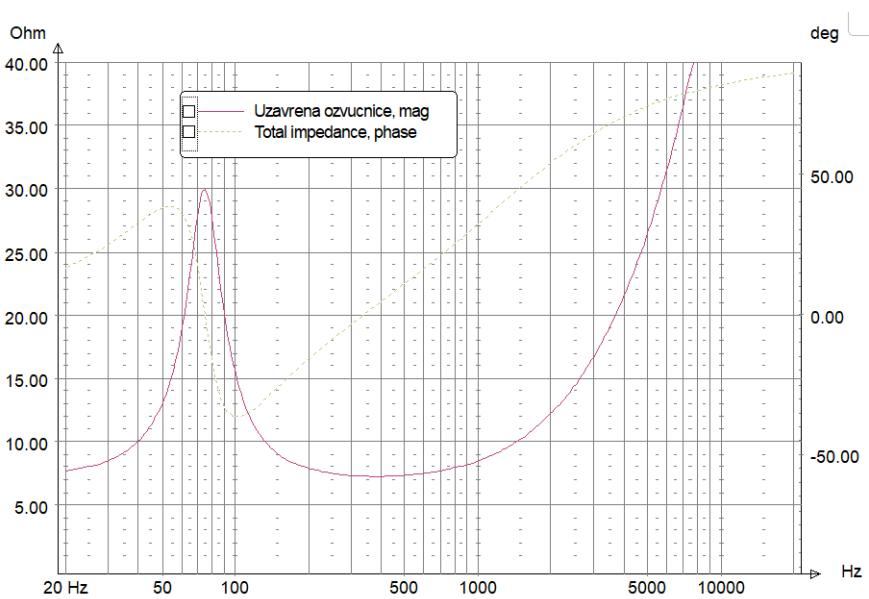
veličina	změřená hodnota	hodnota podle katalogu	jednotka
R_e	7,18	7,33	Ω
Z_{max}	30,62	28	Ω
R_0	4,26		Ω
R_1	14,83		Ω
f_s	60,4	56,2	Ω
f_1	37		Hz
f_2	90		Hz
Q_{ms}	2,35	2,31	-
Q_{es}	0,72	0,7	-
Q_{ts}	0,55	0,54	-
f_0	1000		Hz
Z_0	8,84	9,3	Ω
L_e	0,82	0,41	mH
f_c	80,6		Hz
V_c	10,3		l
V_{as}	8,04	11,8	l
c_{as}	5,6629E-08	8,40E-08	m^5/N
S_d		0,0119	m^2
c_{ms}	0,400	0,595	mm/N
m_{ms}	17,36	13,49	g
r_{ms}	2,80	2,06	Ns/m
Bl	8,10	7,05	N/A

Příloha B - Simulace ozvučnic

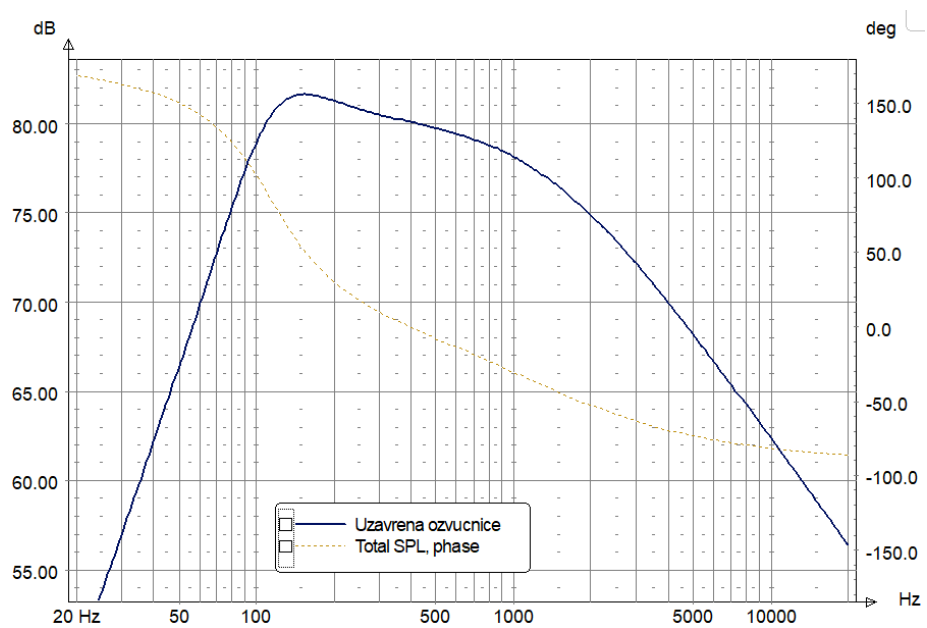
B.1 Simulace uzavřené ozvučnice



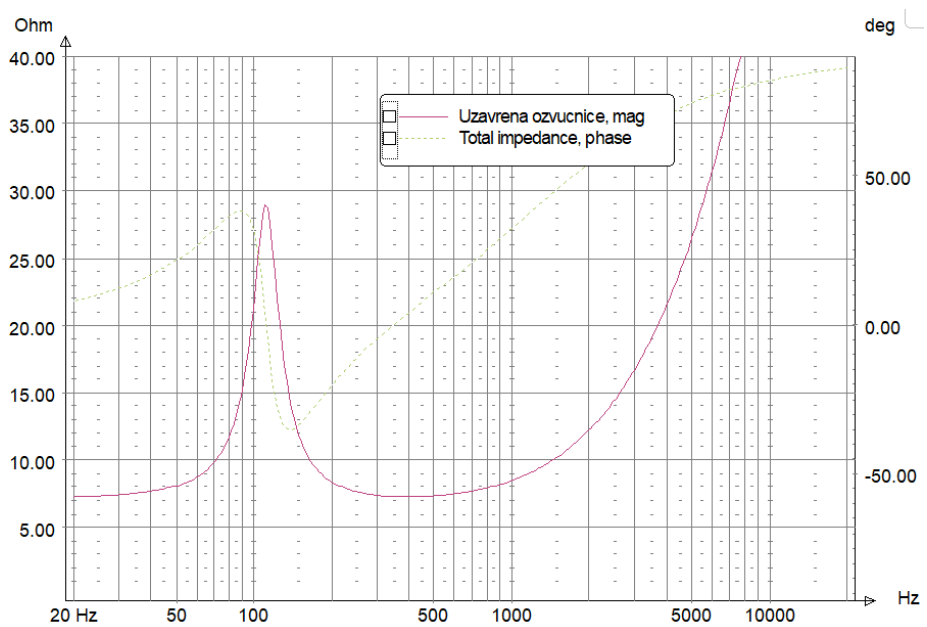
Obr. B.3 Simulovaná SPL charakteristika uzavřené ozvučnice.



Obr. B.4 Simulovaná impedanční charakteristika uzavřené ozvučnice.

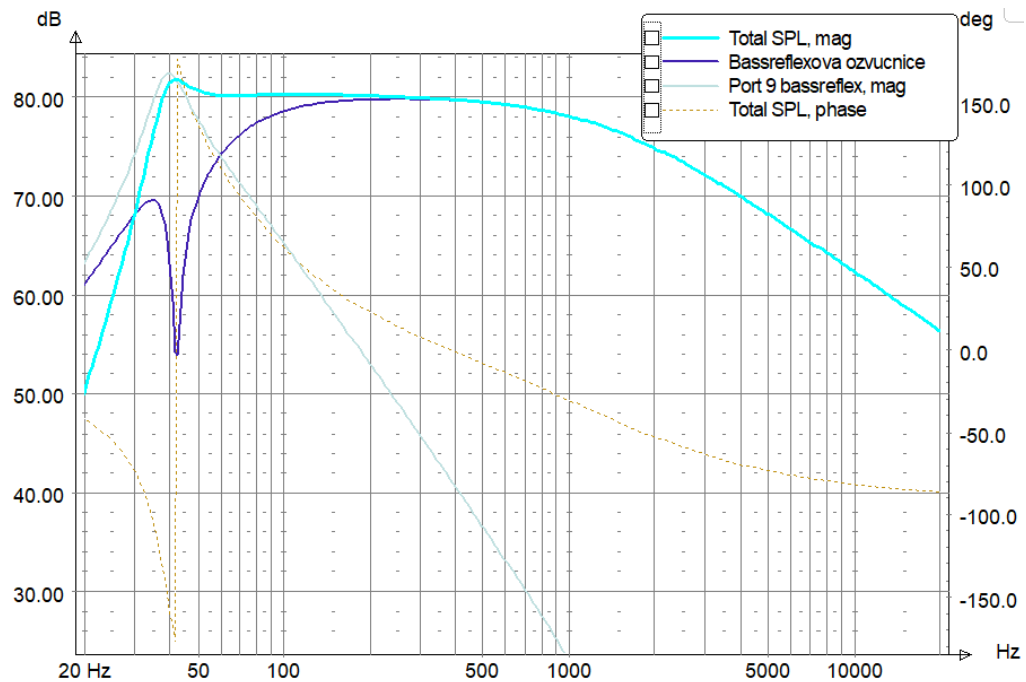


Obr. B.5 Simulovaná SPL charakteristika uzavřené ozvučnice – špatný objem ozvučnice.

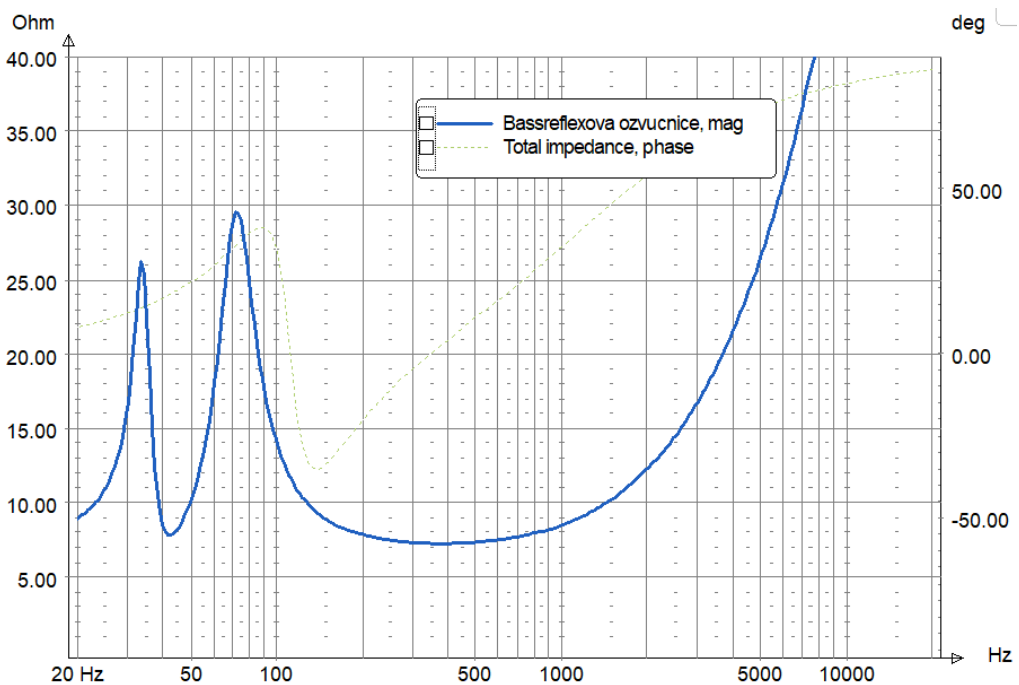


Obr. B.6 Simulovaná impedanční charakteristika uzavřené ozvučnice – špatný objem ozvučnice.

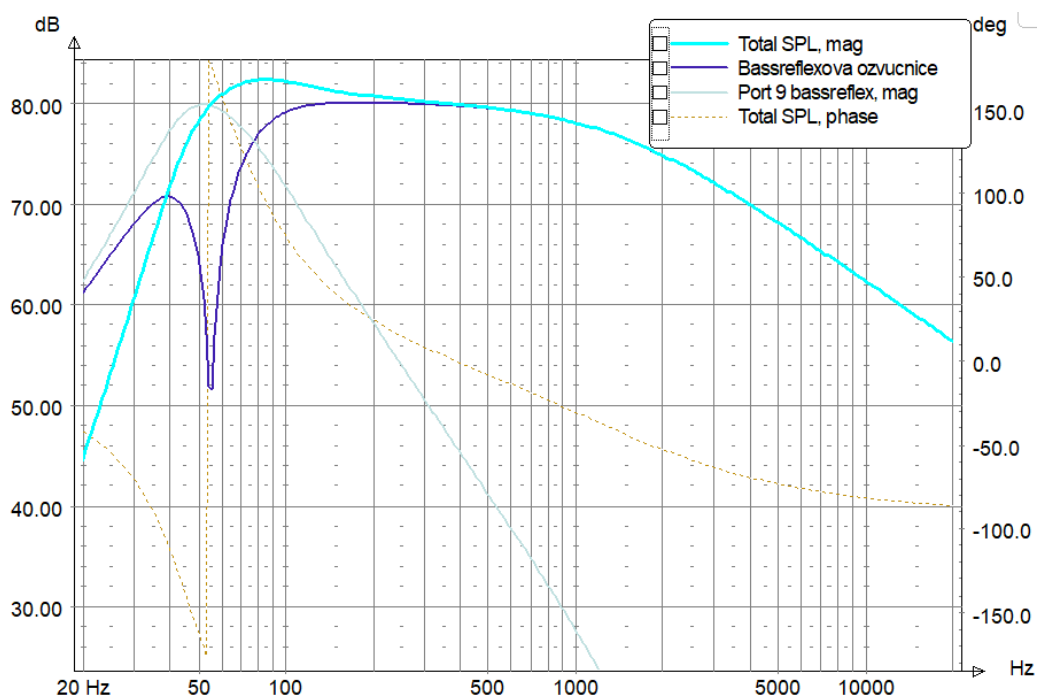
B.2 Simulace bassreflexové ozvučnice



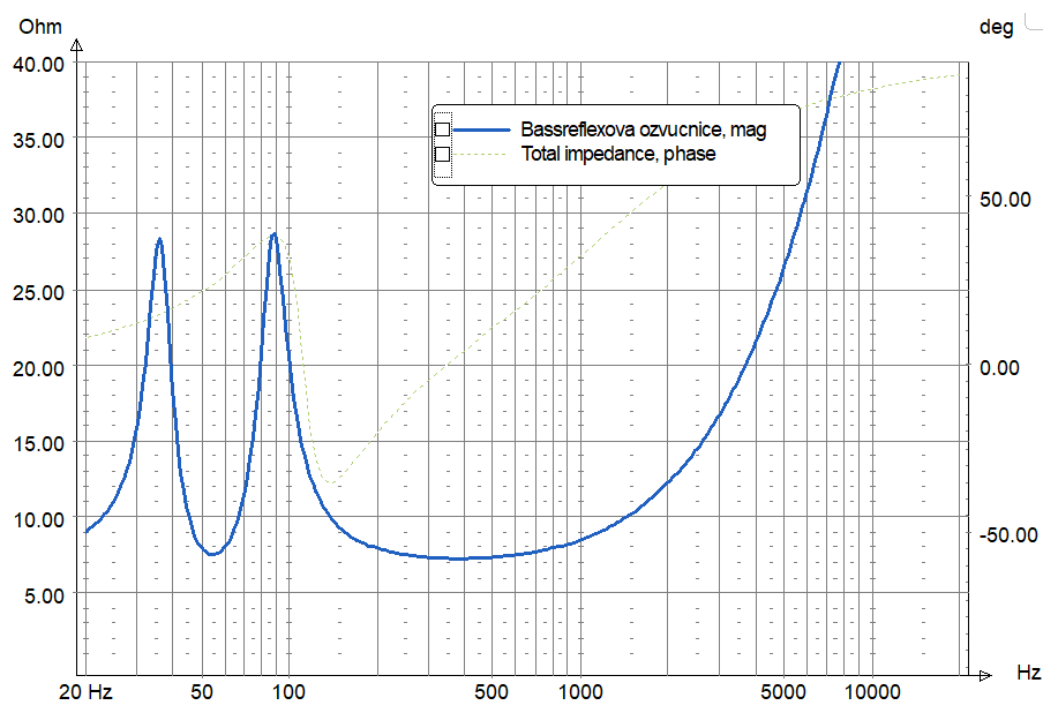
Obr. B.7 Simulovaná SPL charakteristika bassreflexové ozvučnice – maximally flat.



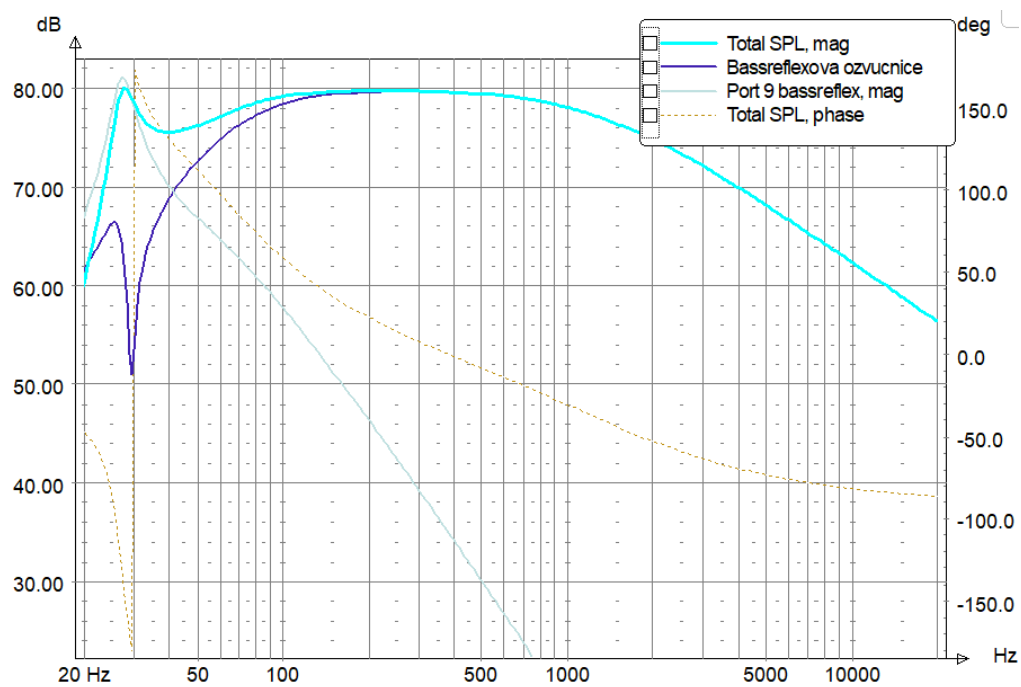
Obr. B.8 Simulovaná impedanční charakteristika bassreflexové ozvučnice – maximally flat.



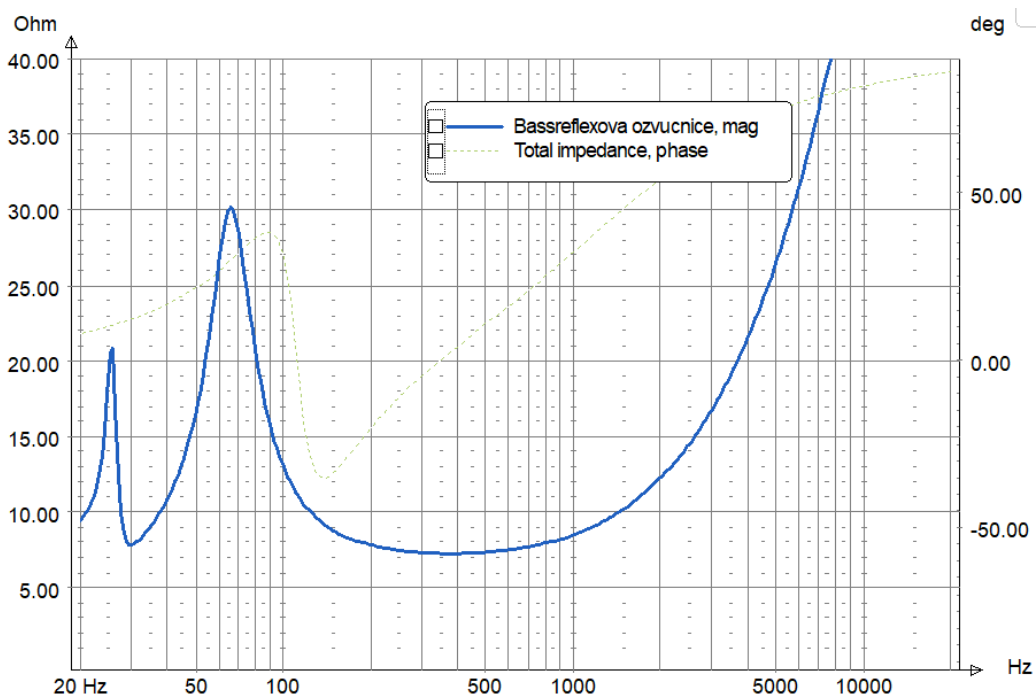
Obr. B.9 Simulovaná SPL charakteristika bassreflexové ozvučnice pro zmenšený objem 10 litrů.



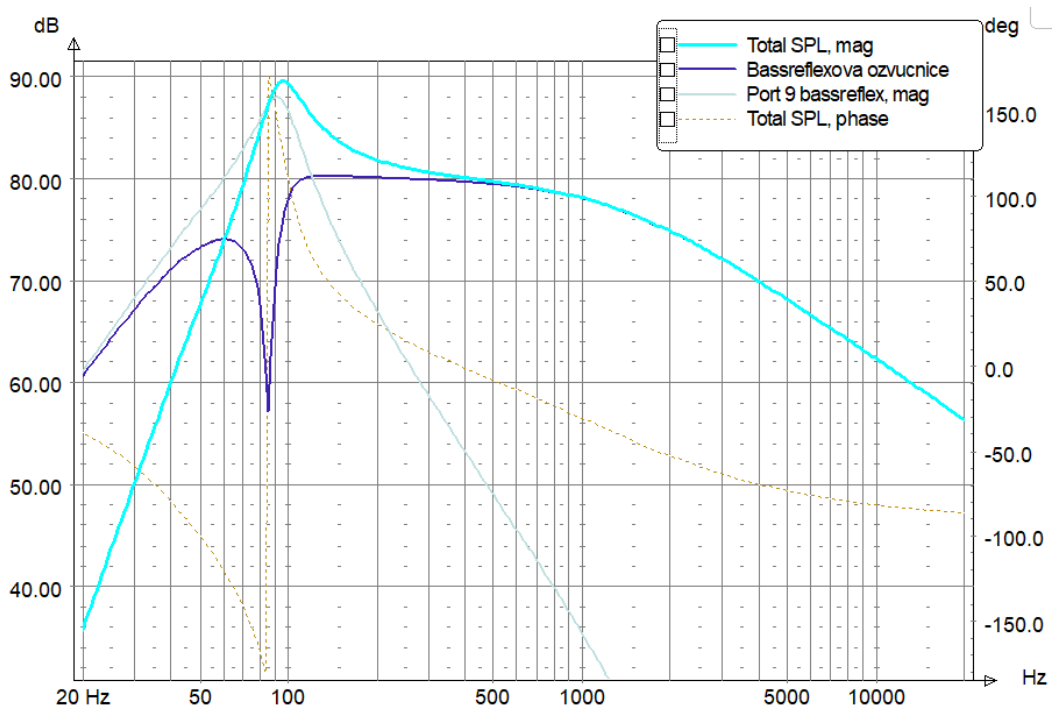
Obr. B.10 Simulovaná fázová charakteristika bassreflexové ozvučnice pro zmenšený objem 10 litrů.



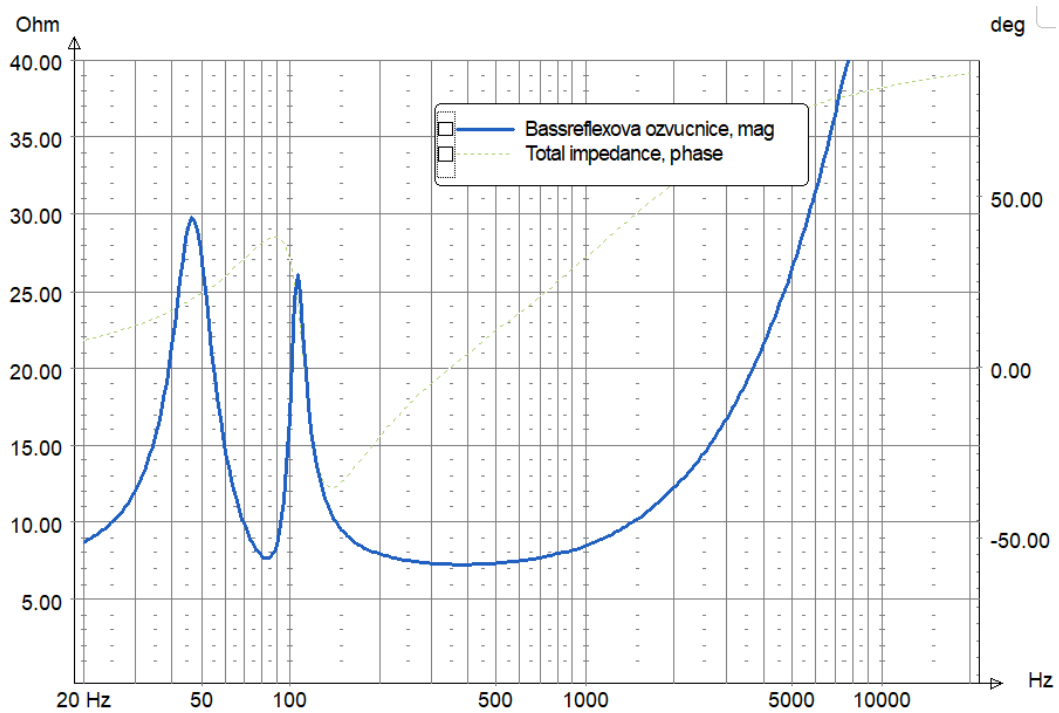
Obr. B.11 Simulovaná SPL charakteristika bassreflexové ozvučnice – špatný objem.



Obr. B.12 Simulovaná fázová charakteristika bassreflexové ozvučnice – špatný objem.



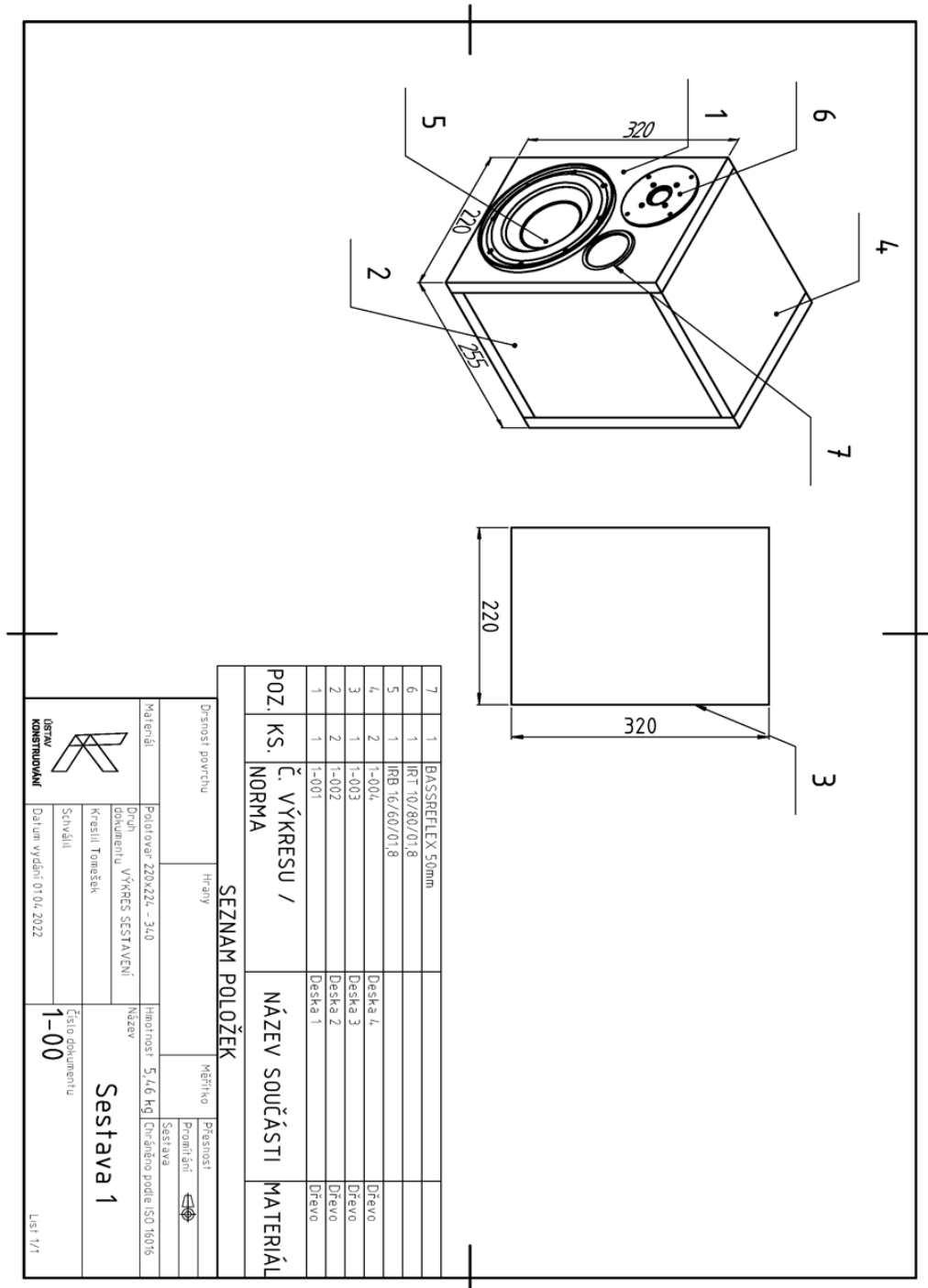
Obr. B.13 Simulovaná SPL charakteristika bassreflexové ozvučnice – špatný nátrubek.



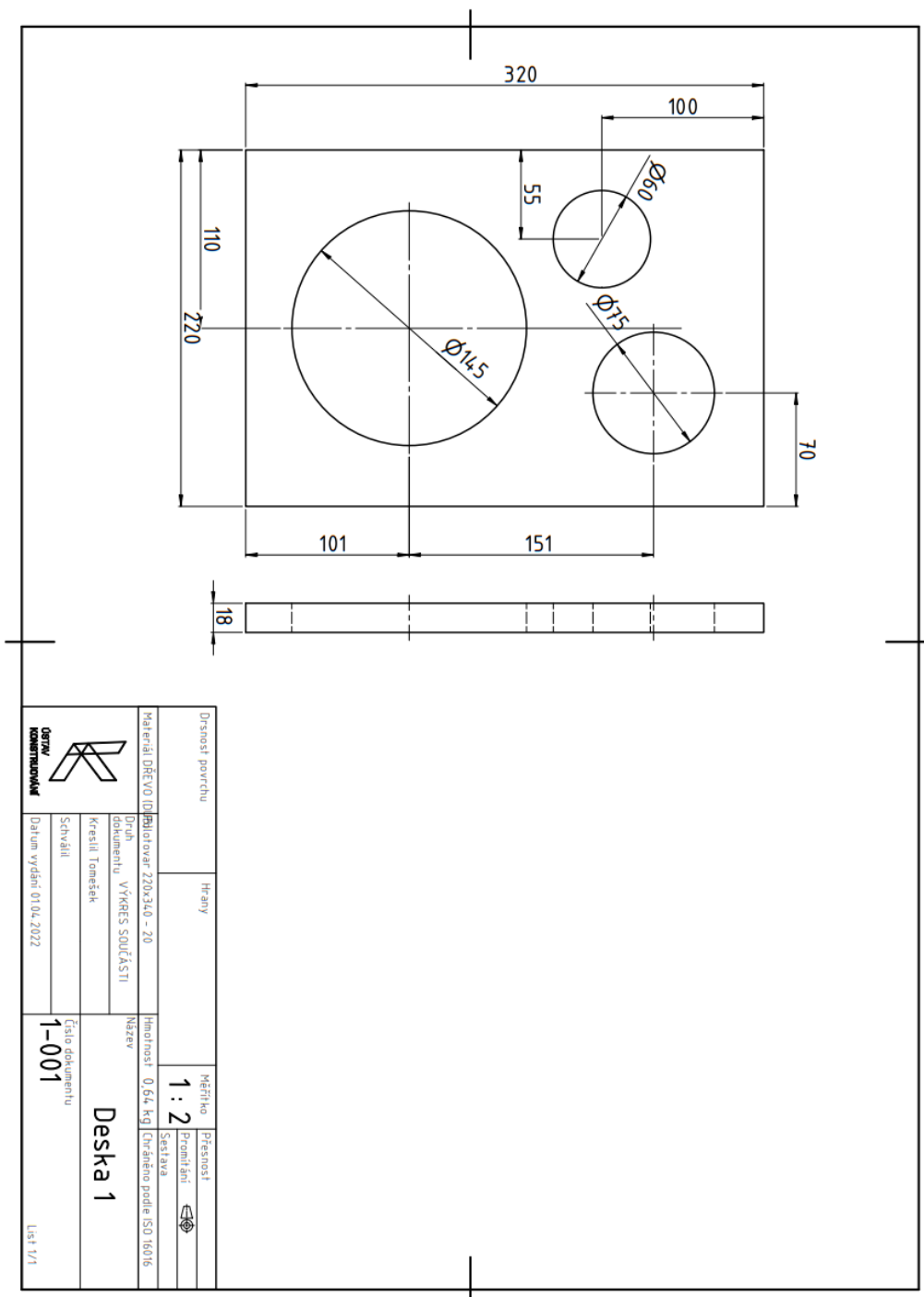
Obr. B.14 Simulovaná fázová charakteristika bassreflexové ozvučnice – špatný nátrubek.

Příloha C - Výkresová dokumentace ozvučnic

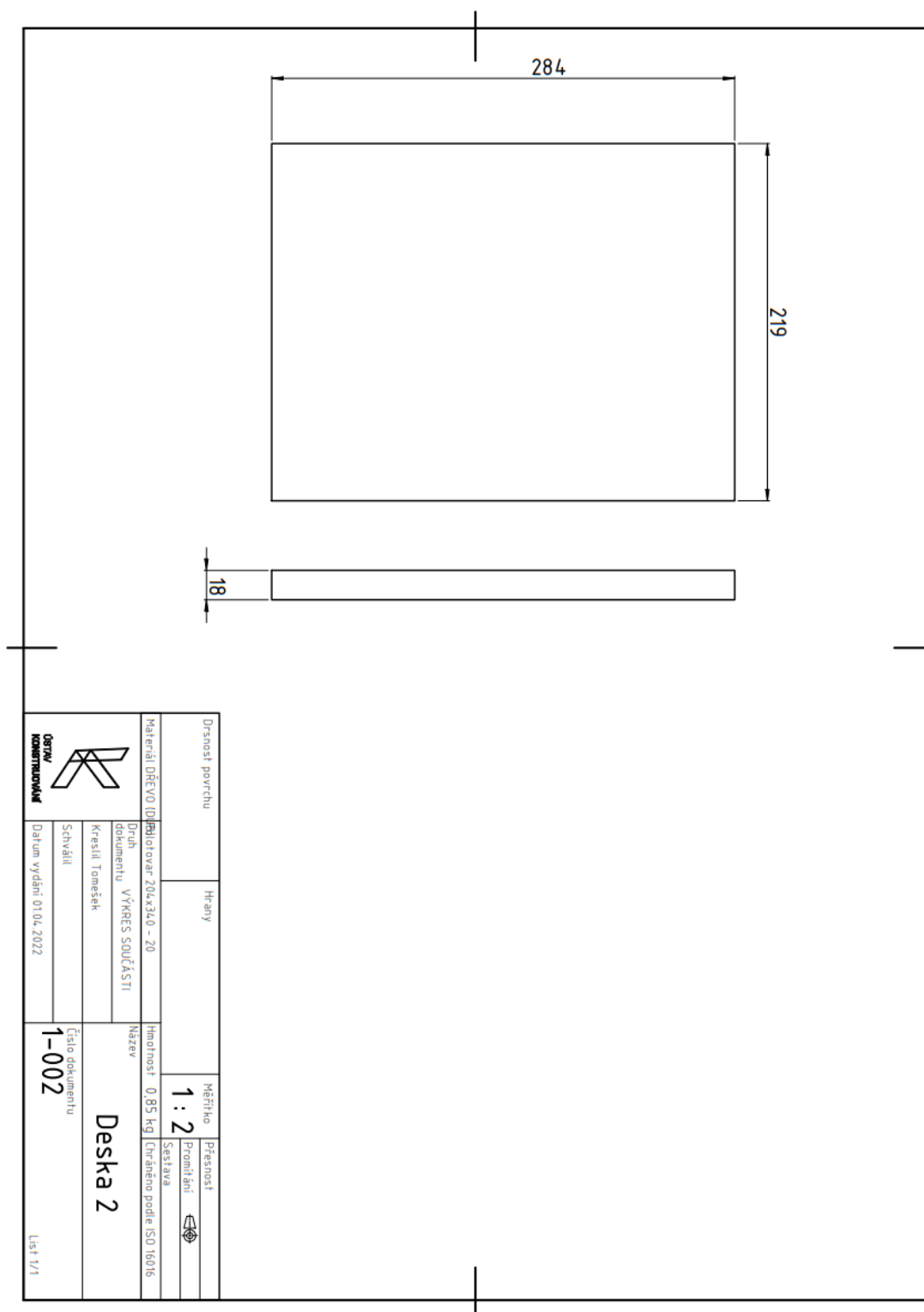
C.1 Výkresová dokumentace dvoupásmové ozvučnice



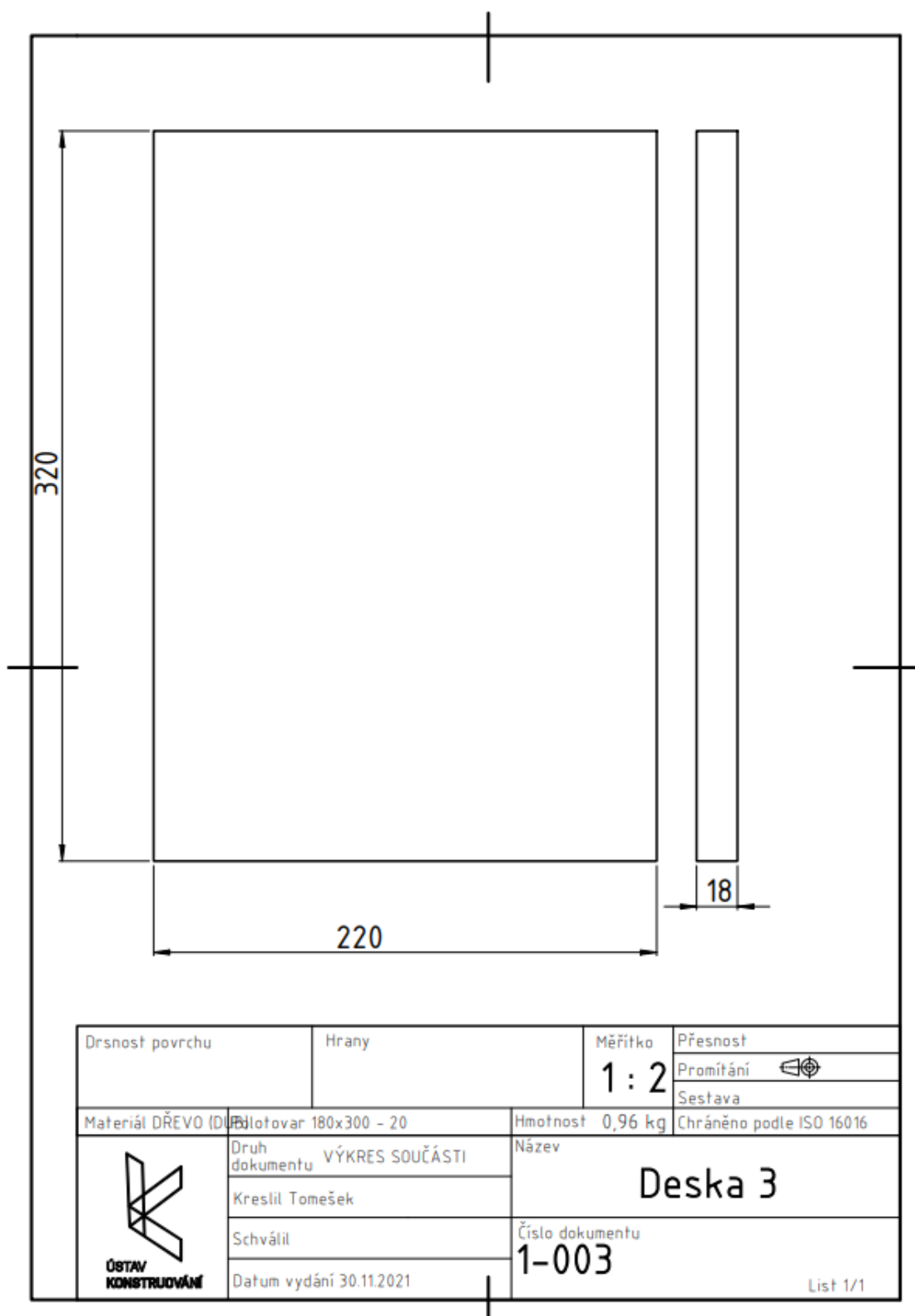
Obr. C.15 Dvoupásmová reprosoustava – Sestava 1



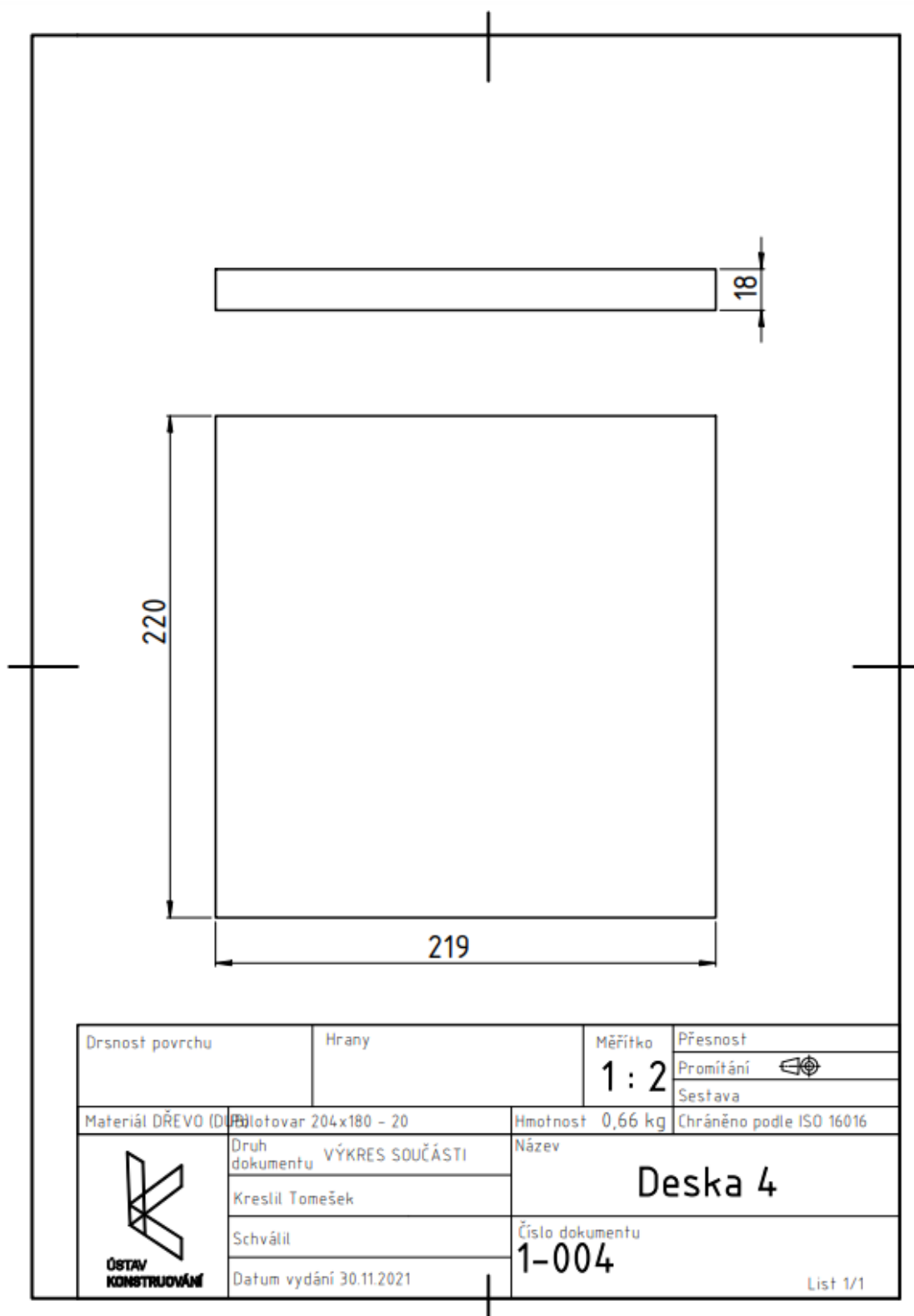
Obr. C.16 Dvoupásmová reprosoustava – Deska 1



Obr. C.17 Dvoupásmová a variabilní reprosoustava – Deska 2

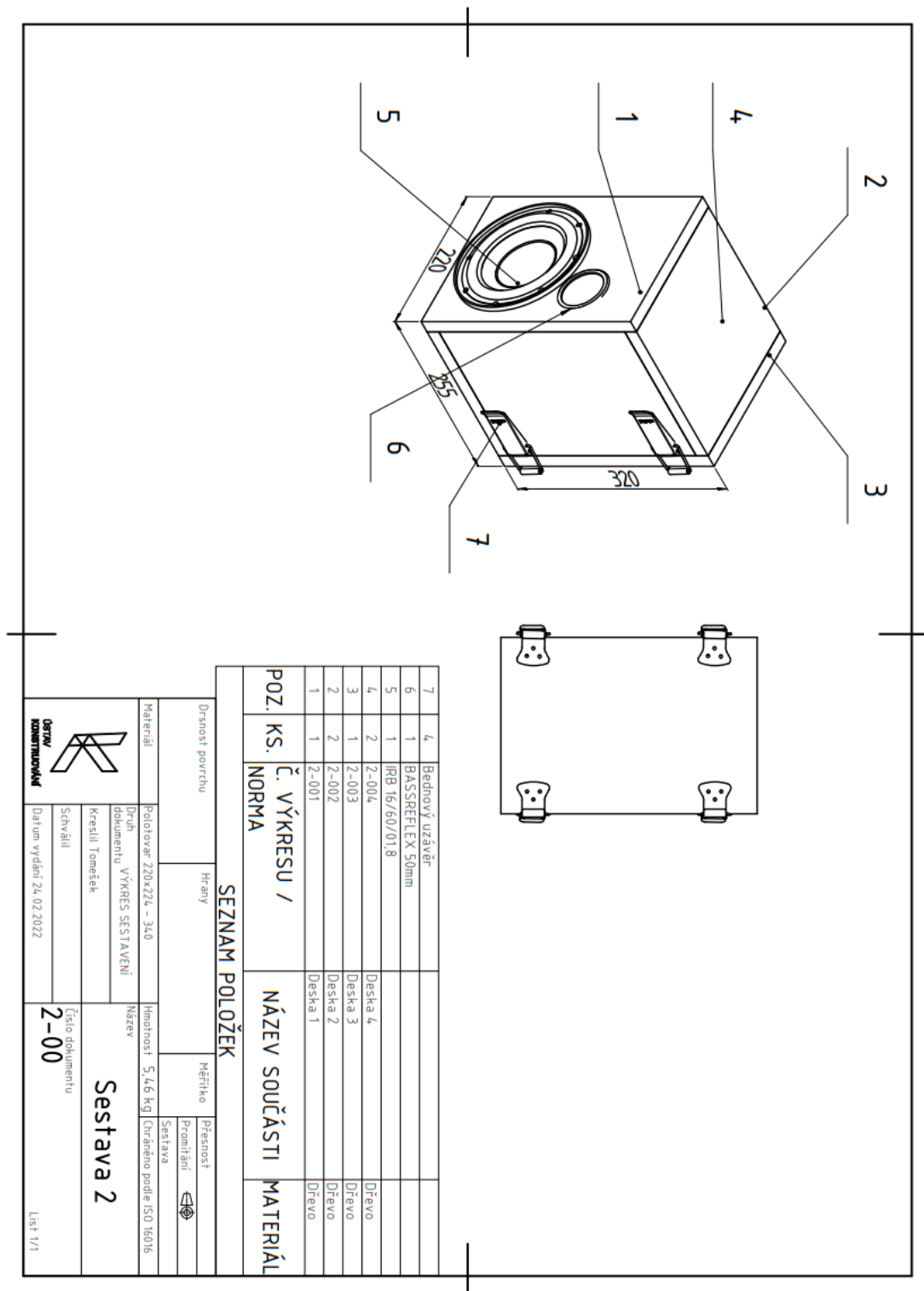


Obr. C.18 Dvoupásmová a variabilní reprosoustava – Deska 3

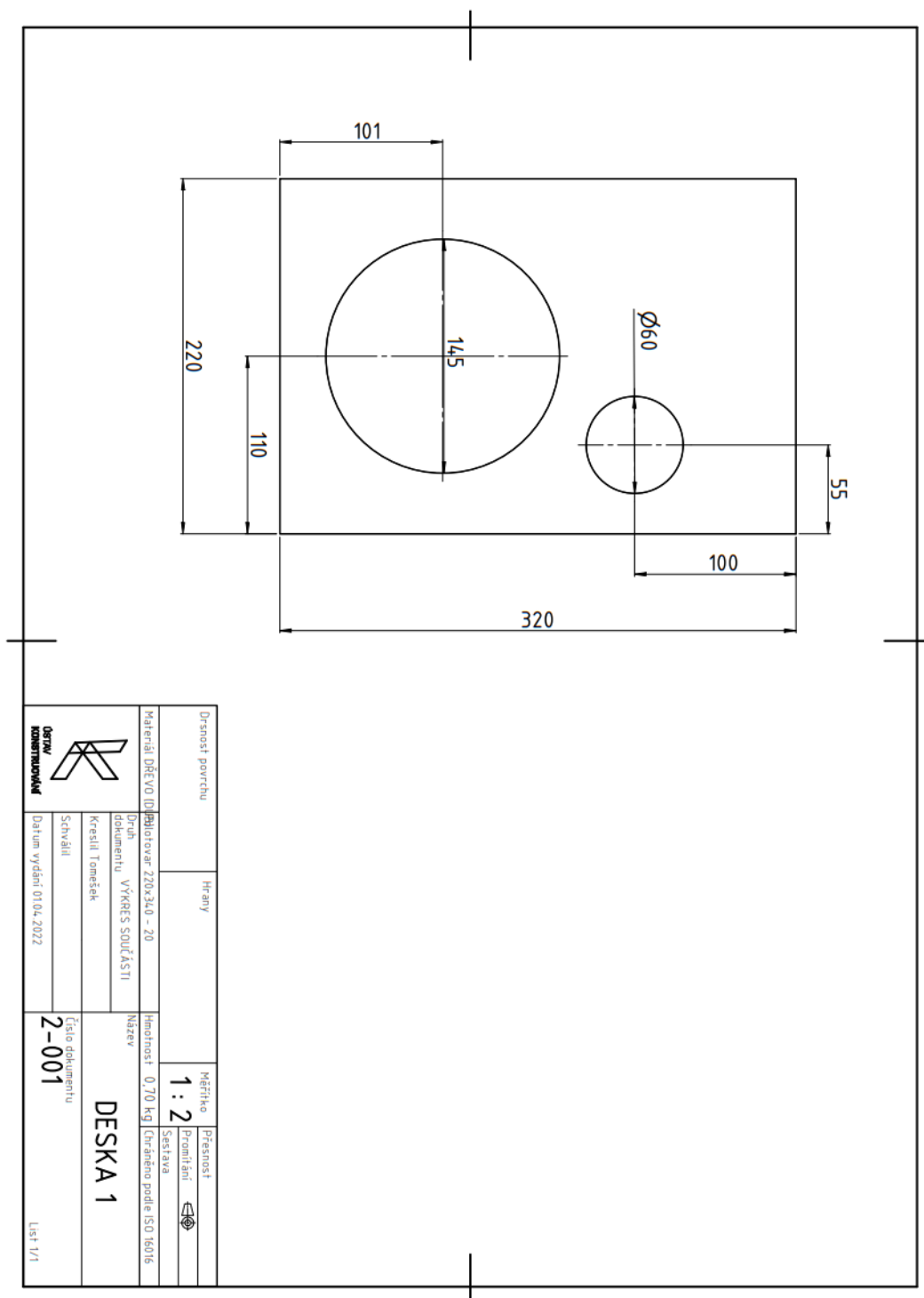


Obr. C.19 Dvoupásmová a variabilní reprosoustava – Deska 4

C.2 Výkresová dokumentace variabilní ozvučnice



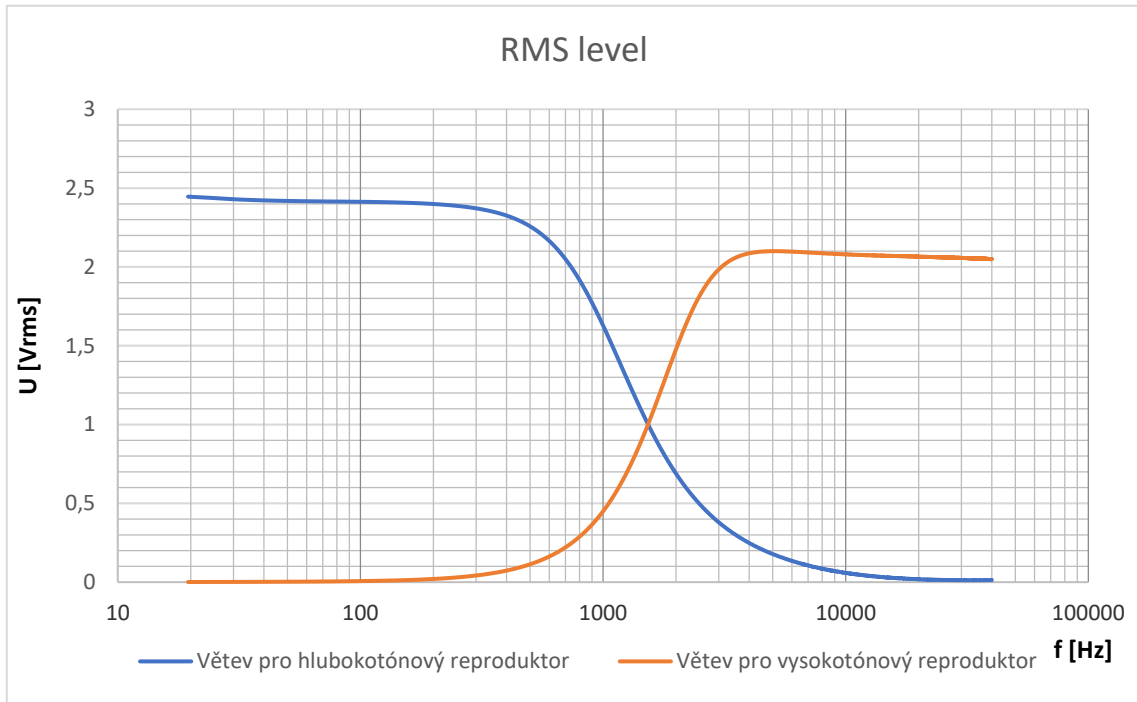
Obr. C.20 Variabilní ozvučnice – Sestava 2



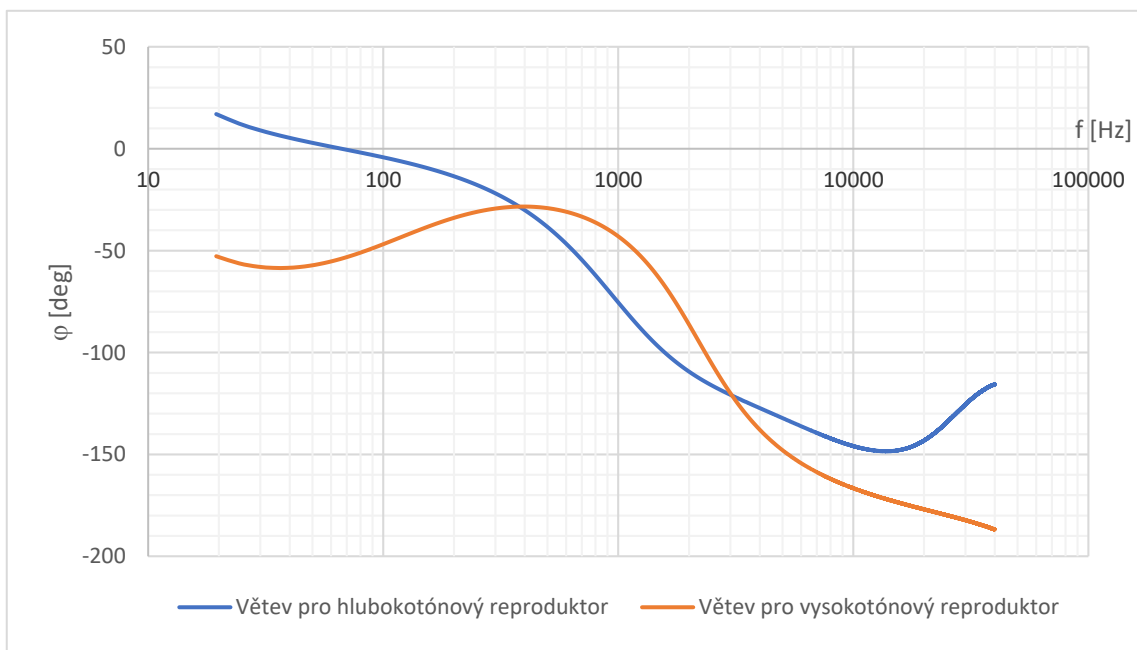
Obr. C.21 Variabilní ozvučnice – Deska 1

Příloha D - Měření výhybky

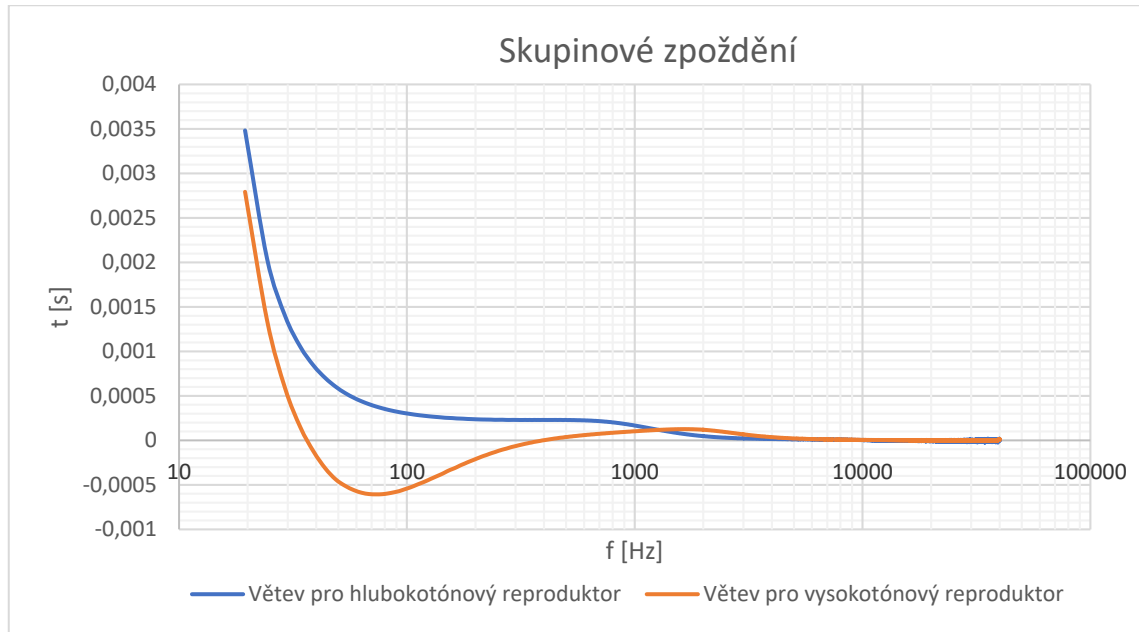
D.1 RMS level



D.2 Fáze mezi výstupník a vstupním signálem



D.3 Skupinové zpoždění



D.4 Činitel harmonického zkreslení

