



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

VARIABILNÍ DVOUPÁSMOVÁ REPRODUKTOROVÁ SOUSTAVA - LABORATORNÍ PŘÍPRAVEK

VARIABLE TWO-WAY LOUDSPEAKER CABINET - LABORATORY TOOL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Reháček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Miroslav Balík, Ph.D.

BRNO 2020

Bakalářská práce

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

Student: Jan Reháček

ID: 191626

Ročník: 3

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Variabilní dvoupásmová reproduktorová soustava - laboratorní přípravek

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Zhotovte dvoupásmovou reproduktorovou soustavu z dodaných polotovarů ozvučnice a jednotlivých konstrukčních prvků, která bude umožňovat změnu topologie vysokotónového a hlubokotónového reproduktoru vůči sobě. Návrh ozvučnice bude proveden vzhledem k minimalizaci možných difrakcí zvukových vln při změně topologie. Výsledná reproduktorová soustava bude podrobena měřením kmitočtových a směrových charakteristik, které budou dokumentovat vliv topologie reproduktorů na charakteristiky reproduktorové soustavy jako celku. Dalším výstupem budou laboratorní úlohy využívající navrženou a vyrobenou variabilní reproduktorovou soustavu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] OLSON, H. F. Direct Radiator Loudspeaker Enclosures [online]. 27.10.1950, 5 [cit.2018-12-14]. Dostupné z: <http://www.dwdrums.com/images/moonmic/olson_direct-radiator-loudspeaker-enclosures.pdf>

[2] TOMAN, K. Reprodukory a reprosoustavy II. [Česko: s.n.], 2010. ISBN 978-80-254-9510-0.

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 8.6.2020

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

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

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je zhotovit dvoupásmovou reproduktorovou soustavu, která bude umožňovat změnu vzájemné polohy reproduktorů, jak ve vertikální, tak v horizontální ose a navrhnout náplně laboratorních úloh. V teoretickém úvodu bude stručně uvedena problematika kmitočtových výhybek. Následně bude rozebírán vliv vzájemné topologie reproduktorů v reproduktorové soustavě na její vlastnosti v okolí mezního kmitočtu. Budou uvedeny modulové kmitočtové charakteristiky ozvučnic různých tvarů. Na těchto modulových kmitočtových charakteristikách bude demonstrován vliv vnějšího tvaru ozvučnice na její vlastnosti. Bude navržena variabilní dvoupásmová soustava s možností změny vzájemné topologie reproduktorů. Postup její výroby i výkresy jednotlivých součástí jsou součástí této práce. Tato dvoupásmová soustava bude podrobena měření a bude zhodnoceno, jestli jsou předpoklady, podle kterých byla navržena, správné. V poslední části práce bude popsán postup volby vhodných parametrů reproduktorové výhybky pro dosažení co nejlepších vlastností soustavy.

Klíčová slova

Reproduktor, soustava, interference, ozvučnice, výhybka, charakteristika, ohyb, topologie

Abstract

The objective of this work is to build a two-way loudspeaker system that will enable changing loudspeaker topology in both vertical and horizontal axes and to suggest two laboratory tasks. The theoretical part of this work will briefly discuss loudspeaker crossovers. Then it will discuss how topology of loudspeakers in a loudspeaker system can affect its behavior at crossover frequency. Frequency characteristics of various loudspeaker baffles will be shown. On these, the effect of a baffle's exterior on its behavior will be discussed. A two-way loudspeaker system will be designed. The construction process and drawings of each part are also included in this work. The finished product will be tested and, following from these tests, a conclusion will be drawn about the validity of the theoretical assumptions of its design. After that, appropriate parameters of a crossover for the two-way loudspeaker system will be chosen.

Keywords

Loudspeaker, system, interference, enclosure, crossover, characteristics, diffractions, topology

Citace tištěné práce:

REHÁK, Jan. *Variabilní dvoupásmová reproduktorová soustava - laboratorní přípravek*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125865>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Miroslav Balík.

Citace elektronického zdroje:

REHÁK, Jan. *Variabilní dvoupásmová reproduktorová soustava - laboratorní přípravek* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125865>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Miroslav Balík.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta: *Jan Rehák*

VUT ID studenta: *191626*

Typ práce: *Bakalářská práce*

Akademický rok: *2019/20*

Téma závěrečné práce: **Variabilní dvoupásmová reproduktorová soustava**

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho 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: **5. června 2020**

.....
Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Miroslavu Balíkovi, Ph.D. za odborné vedení při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: **5. června 2020**

.....
podpis autora

Obsah

Úvod	10
1 Směrová charakteristika dvoupásmové reproduktorové soustavy	11
1.1 Kmitočtová charakteristika reproduktoru	11
1.2 Směrová charakteristika reproduktoru	11
1.3 Kmitočtově-směrová charakteristika reproduktoru	12
1.4 Kmitočtové výhybky	12
1.4.1 Návrh přenosové funkce	13
Výhybka typu Butterworth 3. řádu	14
Výhybka typu Linkwitz-Riley 2. řádu	16
Výhybka typu Linkwitz-Riley 4. řádu	17
1.5 Vliv vzájemné topologie reproduktorů na vlastnosti dvoupásmové reproduktorové soustavy	17
1.5.1 Interferenční maximum a minimum	17
1.5.2 Poslechové místo a fázový rozdíl signálů středobasového a výškového reproduktoru	18
1.5.3 Směrová charakteristika reproduktorové soustavy na dělicím kmitočtu 20	
1.5.4 Interference vln vyzářených reproduktory v okolí mezního kmitočtu 20	
2 Způsoby konstrukce přední desky ozvučnice	25
2.1 Ozvučnice s rovnou přední deskou	25
2.2 Ozvučnice se zkosenou přední deskou	26
2.3 Ozvučnice s přední deskou s úkosem	26
2.4 Výpočet vhodné vertikální vzdálenosti reproduktorů ve dvoupásmové soustavě	27
3 Minimalizace vlivu interferencí na kmitočtovou charakteristiku dvoupásmové reproduktorové soustavy	28
3.1 Příklady modulových kmitočtových charakteristik v závislosti na tvaru ozvučnice	28
3.1.1 Kulová ozvučnice	28
3.1.2 Polokulová ozvučnice	29
3.1.3 Krychlová ozvučnice	29
3.1.4 Kvádrová ozvučnice	30

3.1.5	Krychlová ozvučnice se zkosenými hranami.....	30
3.1.6	Kvádrová ozvučnice se zkosenými hranami.....	31
3.2	Modulová-kmitočtově směrová charakteristika výškového reproduktoru v kvádrové ozvučnici s asymetrickým uložením reproduktoru	32
3.3	Modulová kmitočtově-směrová charakteristika ozvučnice pro výškový reproduktor ve tvaru kapky	33
4	Výroba variabilní dvoupásmové reproduktorové soustavy	35
4.1	Návrh tvaru variabilní dvoupásmové reproduktorové soustavy	35
4.2	Vzájemná topologie reproduktorů ve variabilní dvoupásmové reproduktorové soustavě	36
4.3	Konstrukce variabilní dvoupásmové reproduktorové soustavy	37
4.3.1	Nástavby pro změnu vzdálenosti os reproduktorů.....	38
4.3.2	Modul pro výškový reproduktor	40
4.3.3	Mechanismus pro posuv modulu s výškovým reproduktorem	41
4.3.4	Elektrické zapojení variabilní dvoupásmové reproduktorové soustavy	42
5	Kmitočtové a kmitočtově-směrové charakteristiky reproduktorů ve variabilní dvoupásmové reproduktorové soustavě	44
5.1	Měřicí systém a parametry měření kmitočtových a kmitočtově-směrových charakteristik.....	44
5.2	Vliv polohy modulu s výškovým reproduktorem na kmitočtově-směrové charakteristiky výškového reproduktoru ve variabilní dvoupásmové reproduktorové soustavě.....	45
5.3	Kmitočtově-směrové charakteristiky středobasového reproduktoru ve variabilní dvoupásmové reproduktorové soustavě	49
6	Volba parametrů aktivní výhybky pro dvoupásmovou reproduktorovou soustavu	51
6.1	Volba vhodného mezního kmitočtu, aproximace přenosové funkce a řádu filtrů aktivní parametrické výhybky.....	51
6.2	Volba vhodného nastavení Baffle step kompenzace	51
6.3	Volba vhodné atenuace výškového reproduktoru.....	52
6.4	Určení místa nulového rozdílu skupinových zpoždění výškového a středobasového reproduktoru ve variabilní dvoupásmové reproduktorové soustavě .	52
6.5	Modulová kmitočtově-směrová charakteristika variabilní dvoupásmové reproduktorové soustavy s vhodně nastavenou aktivní parametrickou výhybkou	54

Seznam obrázků

Obrázek 1-1 Směrová charakteristika reproduktoru VISATON TI 100 - 8 Ohm cit. [8]	12
Obrázek 1-2 Kmitočtová charakteristika výhybky s aproximací dle Butterwortha 3. řádu (v protifázi) cit. [3].....	15
Obrázek 1-3 Kmitočtová charakteristika výhybky s aproximací dle Butterwortha 3. řádu (ve fázi) cit. [3]	15
Obrázek 1-4 Kmitočtová charakteristika výhybky s aproximací Linkwitz-Riley 2. řádu (v protifázi) cit. [3]	16
Obrázek 1-5 Kmitočtová charakteristika výhybky s aproximací Linkwitz-Riley 4. řádu (ve fázi) cit. [3]	17
Obrázek 1-6 Poslechové místo a fázový rozdíl mezi signály středobasového a výškového reproduktoru.....	18
Obrázek 1-7 Vertikální směrová charakteristika na mezním kmitočtu. Výhybka s aproximací dle Butterwortha, 3. řád cit. [3].....	20
Obrázek 1-8 Dvoupásmová reproduktorová soustava s nulovým rozdílem skupinových zpoždění na referenční ose při použití výhybky 4. řádu s aproximací Linkwitz-Riley s mezním kmitočtem 3 kHz, topologie reproduktorů (a) a kmitočtová charakteristika (b) cit. [3].....	20
Obrázek 1-9 Dvoupásmová reproduktorová soustava s nulovým rozdílem skupinových zpoždění na referenční ose při použití výhybky 4. řádu s aproximací Linkwitz-Riley s mezním kmitočtem 3 kHz, porovnání modulové kmitočtové charakteristiky v geometrické ose soustavy a mimo ni cit. [3].....	21
Obrázek 1-10 : Dvoupásmová reproduktorová soustava s rozdílem skupinových zpoždění na referenční ose $\Delta t = 88 \mu s$ při použití výhybky 4. řádu s aproximací Linkwitz-Riley s mezním kmitočtem 3 kHz, topologie reproduktorů (a) a kmitočtová charakteristika (b) cit. [3].....	21
Obrázek 1-11 Vliv úhlu poslechu na modulovou kmitočtovou charakteristiku, výhybka s aproximací dle Butterwortha 3. řádu cit. [3].....	22
Obrázek 1-12 3D grafy ve kmitočtovém spektru měřené pod geometrickou osou referenčních bodů reproduktorů. (a) a (b) jsou grafy pro výhybku druhého řádu s reproduktory zapojenými ve fázi (a) a v protifázi (b). (c) je graf pro výhybku druhého řádu s reproduktory zapojenými ve fázi cit. [7].....	23
Obrázek 1-13 3D grafy ve kmitočtovém spektru měřené pod geometrickou osou referenčních bodů reproduktorů. (d) je graf pro výhybku třetího řádu s reproduktory zapojenými v protifázi. (e) a (f) jsou grafy pro výhybku čtvrtého řádu s reproduktory zapojenými ve fázi (e) a v protifázi (f) cit. [7]	24
Obrázek 2-1 Ozvučnice s rovnou přední deskou	25

Obrázek 2-2 Ozvučnice se zkosenou přední deskou	26
Obrázek 2-3 Ozvučnice s přední deskou s úkosem	26
Obrázek 3-1 Modulová kmitočtová charakteristika kulové ozvučnice cit. [1].....	29
Obrázek 3-2 Modulová kmitočtová charakteristika polokulové ozvučnice cit. [1].....	29
Obrázek 3-3 Modulová kmitočtová charakteristika krychlové ozvučnice cit. [1].....	30
Obrázek 3-4 Modulová kmitočtová charakteristika kvádrové ozvučnice cit. [1].....	30
Obrázek 3-5 Modulová kmitočtová charakteristika krychlové ozvučnice se zkosenými hranami cit. [1].....	31
Obrázek 3-6 Modulová kmitočtová charakteristika kvádrové ozvučnice se zkosenými hranami cit. [1].....	31
Obrázek 3-7 Kvádrová ozvučnice s asymetrickým uložením reproduktoru.....	32
Obrázek 3-8 Modulová kmitočtově-směrová charakteristika výškového reproduktoru v kvádrové ozvučnici	32
Obrázek 3-9 Ozvučnice ve tvaru kapky pro výškový reproduktor	33
Obrázek 3-10 Modulová kmitočtově-směrová charakteristika výškového reproduktoru v ozvučnici ve tvaru kapky	33
Obrázek 4-1 Hotový výrobek při použití nižší nastavby	35
Obrázek 4-2 Ozvučnice pro středobasové reproduktor bez nastavby, přední pohled a horní pohled.....	36
Obrázek 4-3 Hotový výrobek s nižší nastavbu – pohled z boku	38
Obrázek 4-4 Model nástaveb, vlevo nižší nastavba, vpravo vyšší nastavba – přední pohled	38
Obrázek 4-5 Model nástaveb, vlevo nižší nastavba, vpravo vyšší nastavba – zadní pohled	39
Obrázek 4-6 Nastavby po dokončení, vlevo nižší nastavba, vpravo vyšší nastavba – pohled zepředu	39
Obrázek 4-7 Nastavby po dokončení, vlevo nižší nastavba, vpravo vyšší nastavba – pohled zezadu.....	40
Obrázek 4-8 Zadní strana modulu pro výškový reproduktor - nahoře model s popisem, dole realizace	41
Obrázek 4-9 modul pro výškový reproduktor - boční pohled	41
Obrázek 4-10 Mechanismus pro posuv modulu s výškovým reproduktorem v nastavbách	42
Obrázek 4-11 Blokové schéma zapojení reproduktorů ve variabilní dvoupásmové ozvučnici	43
Obrázek 4-12 Konektory ozvučnice středobasového reproduktoru	43
Obrázek 5-1 Horizontální modulová kmitočtově-směrová charakteristika výškového reproduktoru při použití nižší nastavby a vzdálenosti předních hran košů	

reproduktorů $d_1 = 0$ mm (simulace ozvučnice s rovnou přední deskou)	45
Obrázek 5-2 Horizontální modulová kmitočtově-směrová charakteristika výškového reproduktoru při použití nižší nastavby a vzdálenosti předních hran košů reproduktorů $d_2 = 25$ mm (výškový reproduktor je zasunut vzad)	46
Obrázek 5-3 Horizontální modulová kmitočtově-směrová charakteristika výškového reproduktoru při použití nižší nastavby a vzdálenosti předních hran košů reproduktorů $d_3 = 55$ mm (výškový reproduktor je zasunut vzad)	46
Obrázek 5-4 Modulové kmitočtové charakteristiky výškového reproduktoru při použití nižší nastavby a vzdálenostech předních hran košů reproduktorů $d_1 = 0$ mm, $d_2 = 25$ mm a $d_3 = 55$ mm (ve vzdálenostech d_2 a d_3 je výškový reproduktor zasunut vzad)	47
Obrázek 5-5 Modulové kmitočtové charakteristiky výškového reproduktoru při použití vyšší nastavby a vzdálenostech předních hran košů reproduktorů $d_1 = 0$ mm, $d_2 = 25$ mm a $d_3 = 55$ mm (ve vzdálenostech d_2 a d_3 je výškový reproduktor zasunut vzad)	47
Obrázek 5-6 Horizontální modulová kmitočtově-směrová charakteristiky středobasového reproduktoru ve variabilní dvoupásmové reproduktorové soustavě	49
Obrázek 5-7 Modulová kmitočtová charakteristika středobasového reproduktoru ve variabilní dvoupásmové reproduktorové soustavě při použití nižší nastavby a bez nastavby	50
Obrázek 6-1 Test nulového rozdílu skupinových zpoždění mezi výškovým a středobasovým reproduktorem při použití aproximace Linkwitz-Riley 2. řádu s mezním kmitočtem 2,4 kHz, nízké nastavby a vzdálenosti předních hran košů reproduktorů $d = 42$ mm (výškový reproduktor je zasunut vzad)	53
Obrázek 6-2 Modulová kmitočtově-směrová charakteristika variabilní reproduktorové soustavy při použití aktivní parametrické výhybky	54

ÚVOD

Prvním cílem práce je navrhnout a vyrobit variabilní dvoupásmovou reproduktorovou soustavu s možností změny vzájemné topologie reproduktorů. Její vnější tvar musí být navržen s ohledem na minimalizaci jevů, které by negativně ovlivňovaly její vyzařovací charakteristiky. Vnější tvar a uspořádání reproduktorů v ozvučnicích konvenčních tvarů nepříznivě ovlivňují jakost zvukové reprodukce. Od ozvučnic konvenčních tvarů můžeme očekávat závislost kvality reprodukováného signálu na jeho kmitočtu a neproporcionální směrovou charakteristiku. Tyto negativní jevy mají být správným návrhem a konstrukcí variabilní dvoupásmové reproduktorové soustavy minimalizovány.

Druhým cílem této práce je vytvořit dvě laboratorní úlohy. Tyto úlohy budou sloužit k seznámení studentů s problematikou vlivu vnějšího tvaru ozvučnic na jejich vlastnosti a volbou vhodných parametrů reproduktorové výhybky pro vyrobenou dvoupásmovou soustavu.

V teoretické části se práce zabývá nejdříve vlivem kmitočtových výhybek a vzájemné topologie reproduktorů na směrové charakteristiky reproduktorové soustavy. Následně je řešen vliv vnějšího tvaru ozvučnice na její vlastnosti. Kvůli názornosti je vliv vnějšího tvaru demonstrován na jednodušších modelech ozvučnic.

Poznatky z teoretické části práce jsou následně aplikovány při návrhu a výrobě variabilní dvoupásmové reproduktorové soustavy. Hotový výrobek je podroben měření frekvenčních charakteristik, na kterých je demonstrováno, zda jsou teoretické předpoklady použité při jejím návrhu správné.

1 SMĚROVÁ CHARAKTERISTIKA DVOUPÁSMOVÉ REPRODUKTOROVÉ SOUSTAVY

Cílem této kapitoly je popsat vliv jednotlivých konstrukčních prvků dvoupásmové soustavy na její směrovou charakteristiku. Nejprve budou teoreticky rozebrány základy návrhu kmitočtových výhybek pro dvoupásmové reproduktorové soustavy. Poté bude popsáno, jakým způsobem reproduktorová výhybka ovlivňuje směrovou charakteristiku soustavy a jaký vliv má vzájemná topologie reproduktorů v ozvučnici na tuto charakteristiku. Z těchto poznatků bude čerpáno při návrhu ozvučnice reproduktorové soustavy popisovaném v kapitole 4.

1.1 Kmitočtová charakteristika reproduktoru

Kmitočtová charakteristika reproduktoru je závislost akustického tlaku na kmitočtu budícího signálu při konstantním napětí. Ukáže, jak reproduktor reaguje na buzení signálem o různých kmitočtech. Na vstup reproduktoru je přivedeno napětí s harmonickým průběhem o konstantní amplitudě a s definovaným krokem se mění kmitočet v měřeném rozsahu. Mikrofonem umístěným v referenční ose reproduktoru se pak měří velikost akustického tlaku při daném kmitočtu budícího signálu. Podle vzdálenosti měřicího mikrofonu od referenčního bodu reproduktoru se rozlišuje měření v blízkém a volném poli (*angl. near-field a far-field*). V případě měření kmitočtové charakteristiky reproduktorové soustavy je nutné stanovit její referenční osu. Ta může být určena jako kolmice ke geometrickému středu mezi všemi použitými reproduktory. Této kolmici se říká geometrická osa reproduktorové soustavy. Referenční osa soustavy může být taky přímo shodná s referenční osou vysokotónového reproduktoru. V některých případech referenční osu určuje výrobce reproduktorové soustavy.

1.2 Směrová charakteristika reproduktoru

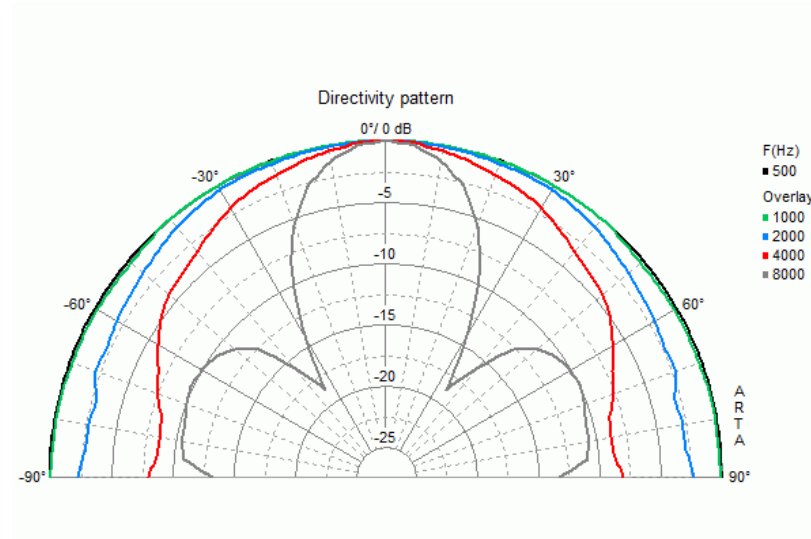
Směrová charakteristika reproduktoru je závislost charakteristické citlivosti na úhlu α od referenční osy reproduktoru. Jinak řečeno, směrová charakteristika ukazuje rozložení vyzařování reproduktoru do prostoru při určité frekvenci. Pro její grafické znázornění se využívá polární diagram. Pro popis směrové charakteristiky se používá tzv. index směrovosti, definovaný jako

$$I_d = 10 \log \frac{P_a}{P_t}, \quad (1.1)$$

kde P_a je akustický výkon izotropního (nesměrového) zářiče a P_t je výkon vyzařený reproduktorem.

Index směrovosti je kmitočtově závislý. Při posuzování směrové charakteristiky index směrovosti říká, jak velká je charakteristická citlivost v akustické ose reproduktoru oproti

bočním směrem. [2]



Obrázek 1-1 Směrová charakteristika reproduktoru VISATON TI 100 - 8 Ohm cit. [8]

1.3 Kmitočtově-směrová charakteristika reproduktoru

Tato charakteristika je kombinací kmitočtové a směrové charakteristiky. Získá se změřením modulové kmitočtové charakteristiky pod různými úhly α . Oproti směrové charakteristice je tak dosaženo výrazně většího rozlišení na kmitočtové ose. Z grafu modulové kmitočtově-směrové charakteristiky lze tedy získat komplexní obraz o závislosti akustického tlaku na kmitočtu budícího signálu nejen v referenční ose reproduktoru, ale také mimo tuto osu. Vysoké rozlišení kmitočtově-směrové charakteristiky na kmitočtové ose je zásadní pro správný návrh vnějšího tvaru ozvučnic reproduktorů a reproduktorových soustav a rozmístění jednotlivých reproduktorů v reproduktorové soustavě.

1.4 Kmitočtové výhybky

Ideálně by reproduktorová soustava měla mít vyrovnanou kmitočtovou charakteristiku, která je zachována v dostatečně velkém úhlu, aby pokryla oblast poslechu. Také by měla být schopna reprodukovat vstupní signál bez nelineárního zkreslení. V praxi tohoto není možné dosáhnout použitím pouze jednoho reproduktoru. Proto se používají reproduktorové soustavy se dvěma a více reproduktory, kdy je každý reproduktor buzen jen určitou částí kmitočtového spektra. Pro rozdělení spektra se používají kmitočtové výhybky.

Každý reproduktor splňuje požadované parametry na reprodukci jen v určitém rozsahu kmitočtového spektra, a proto je nutné potlačit pásma kmitočtů mimo tento rozsah. Není možné navrhnout kmitočtový filtr s nekonečnou strmostí, a tudíž vzniká přesah. Výhybka proto musí být navržena tak, aby zajistila vyrovnanou odezvu v oblasti přesahu a zároveň byla složena z filtrů vhodných pro dané reproduktory. [3]

Rozsah této práce nedovoluje podrobně popisovat tuto problematiku, a proto se práce bude věnovat jen stručnému úvodu a parametrům výhybek, které budou použity na hotovém výrobku. Více o návrhu výhybek v literatuře [3] a [11].

1.4.1 Návrh přenosové funkce

Uvažuje se dvoupásmová soustava složená ze středobasového a výškového reproduktoru. Návrh přenosové funkce vyžaduje, aby byly celkové elektro-akustické odezvy každého reproduktoru a jeho filtru uvažovány dohromady. Systém je pak navržen tak, aby jeho celkový přenos odpovídal

$$T(f) = H(f)S(f), \quad (1.2)$$

kde $H(f)$ je přenos filtru a $S(f)$ je přenos reproduktoru za reálných podmínek $T(f)$ si zvolíme dle potřeby, $S(f)$ určíme měřením a $H(f)$ je nutné navrhnout podle

$$H(f) = \frac{T(f)}{S(f)}. \quad (1.3)$$

Celkový přenos systému je potom určen vektorovým součtem dílčích přenosů. Pro dvoupásmovou soustavu platí, že

$$T_s(f) = T_L(f) + T_H(f), \quad (1.4)$$

kde $T_s(f)$ je celkový přenos a $T_L(f)$ a $T_H(f)$ jsou dílčí přenosy podle

$$T_L(f) = H_L(f)S_L(f) \quad (1.5)$$

a

$$T_H(f) = H_H(f)S_H(f). \quad (1.6)$$

$S_L(f)$ a $S_H(f)$ jsou změřené přenosy středobasového a výškového reproduktoru. $H_L(f)$ a $H_H(f)$ jsou přenosové funkce horní a dolní propusti, které dohromady tvoří výhybku.

V reproduktorových soustavách se používají výhybky, které spojují dostatečnou strmost filtrů v nich použitých, vyrovnaný přenos v okolí mezního kmitočtu a nepřilíšnou náročnost realizace. Například výhybka 1. řádu s aproximací dle Butterwortha splňuje

podmínku pro vyrovnaný přenos a je konstrukčně jednoduchá. Má však příliš nízkou strmou a při jejím použití by nedošlo k dostatečnému potlačení kmitočtů mimo rozsah, na kterém je daný reproduktor schopný efektivně pracovat. Druhým příkladem může být výhybka s aproximací Linkwitz-Riley 6. řádu. Ta kombinuje dostatečnou strmou s vyrovnaným přenosem, ale její realizace je technicky příliš náročná. Tři nejčastěji používané typy výhybek pro reproduktorové soustavy jsou představeny níže.

Výhybka typu Butterworth 3. řádu

Přenosová funkce dolní propusti této výhybky je

$$T_L(f) = \frac{1}{1+2s_n + 2s_n^2 + s_n^3}. \quad (1.7)$$

Kde s_n je normovaný Laplaceův operátor definovaný jako

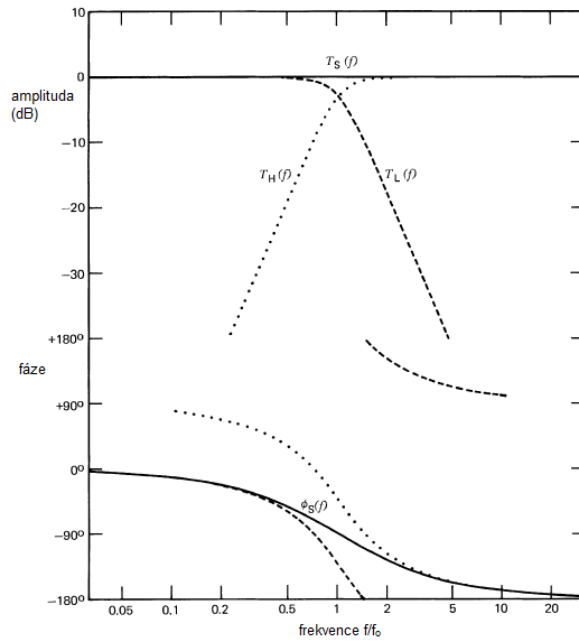
$$s_n = j \frac{f}{f_0}. \quad (1.8)$$

Přenosová funkce horní propusti této výhybky je

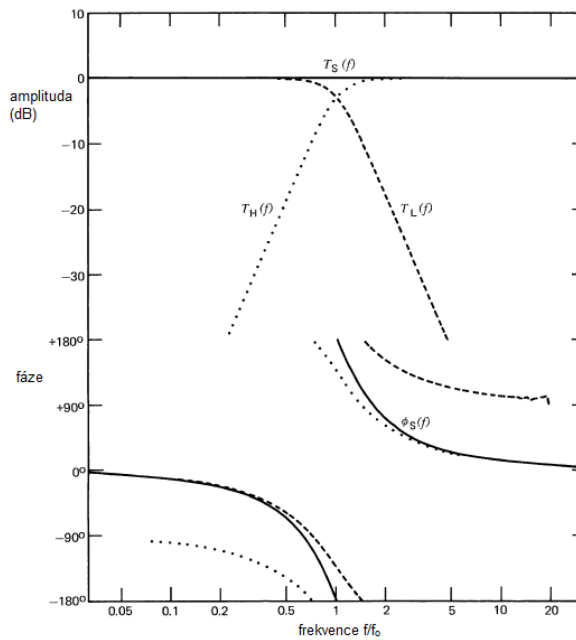
$$T_H(f) = \frac{s_n^3}{1+2s_n + 2s_n^2 + s_n^3}. \quad (1.9)$$

Při zapojení obou reproduktorů ve fázi platí

$$T_S(f) = T_L(f) + T_H(f) = \frac{(1-s_n+s_n^2)}{(1+s_n+s_n^2)}. \quad (1.10)$$



Obrázek 1-2 Kmitočtová charakteristika výhybky s aproximací dle Butterwortha 3. řádu (v protifázi) cit. [3]



Obrázek 1-3 Kmitočtová charakteristika výhybky s aproximací dle Butterwortha 3. řádu (ve fázi) cit. [3]

Na obrázcích 1-2 a 1-3 jsou kmitočtové charakteristiky výhybek s aproximací dle Butterwortha při zapojení reproduktorů ve fázi a v protifázi. Výhybka 3. řádu způsobuje na mezním kmitočtu fázový rozdíl $\Delta\varphi = 90^\circ$.

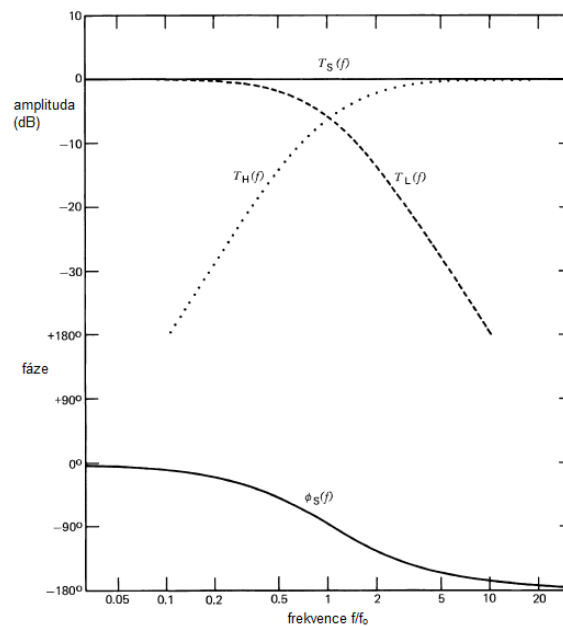
Výhybka typu Linkwitz-Riley 2. řádu

Další aproximací, která má vyrovnaný přenos je aproximace Linkwitz-Riley. Tato aproximace složená ze dvou filtrů s Butterworthovou aproximací v kaskádě. Přenosová funkce filtrů s aproximací Linkwitz-Riley druhého řádu popsány dle

$$T_L(f) = \frac{1}{(1+s_n)^2} \text{ a } T_n(f) = \frac{s_n^2}{(1+s_n)^2}. \quad (1.11)$$

Zapojí-li se v protifázi, poskytne tento typ aproximace rovnou modulovou kmitočtovou charakteristiku popsanou dle

$$T_S(f) = T_L(f) - T_H(f) = \frac{(1-s_n^2)}{(1+s_n^2)} = \frac{1-s_n}{1+s_n}. \quad (1.12)$$



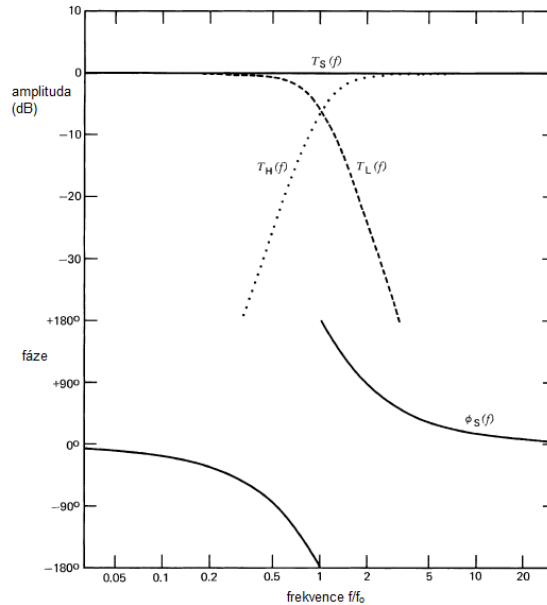
Obrázek 1-4 Kmitočtová charakteristika výhybky s aproximací Linkwitz-Riley 2. řádu (v protifázi) cit. [3]

Na obrázku 1-4 je kmitočtová charakteristika výhybky s aproximací Linkwitz-Riley 2. řádu. Výhybka 2. řádu způsobuje na mezním kmitočtu fázový rozdíl $\Delta\varphi = 180^\circ$. Přepólováním jednoho z reproduktorů je tak dosaženo přenosu 0 dB na mezním kmitočtu.

Výhybka typu Linkwitz-Riley 4. řádu

Přenosové funkce horní a dolní propusti výhybky s aproximací Linkwitz-Riley 4. řádu jsou

$$T_L(f) = \frac{1}{(1+\sqrt{2}s_n+s_n^2)^2}; T_H(f) = \frac{s_n^4}{(1+\sqrt{2}s_n+s_n^2)^2}. \quad (1.13)$$



Obrázek 1-5 Kmitočtová charakteristika výhybky s aproximací Linkwitz-Riley 4. řádu (ve fázi) cit. [3]

Na obrázku 1-5 je kmitočtová charakteristika výhybky s aproximací Linkwitz-Riley 2. řádu. Výhybka 4. řádu způsobuje na mezním kmitočtu fázový rozdíl $\Delta\varphi = 360^\circ$. Pro dosažení přenosu 0 dB na mezním kmitočtu pro zapojíme reproduktory ve fázi.

1.5 Vliv vzájemné topologie reproduktorů na vlastnosti dvoupásmové reproduktorové soustavy

Topologie reproduktorů ovlivňuje vlastnosti reproduktorové soustavy. V této podkapitole je zmíněna problematika vlastností soustavy na dělicím kmitočtu.

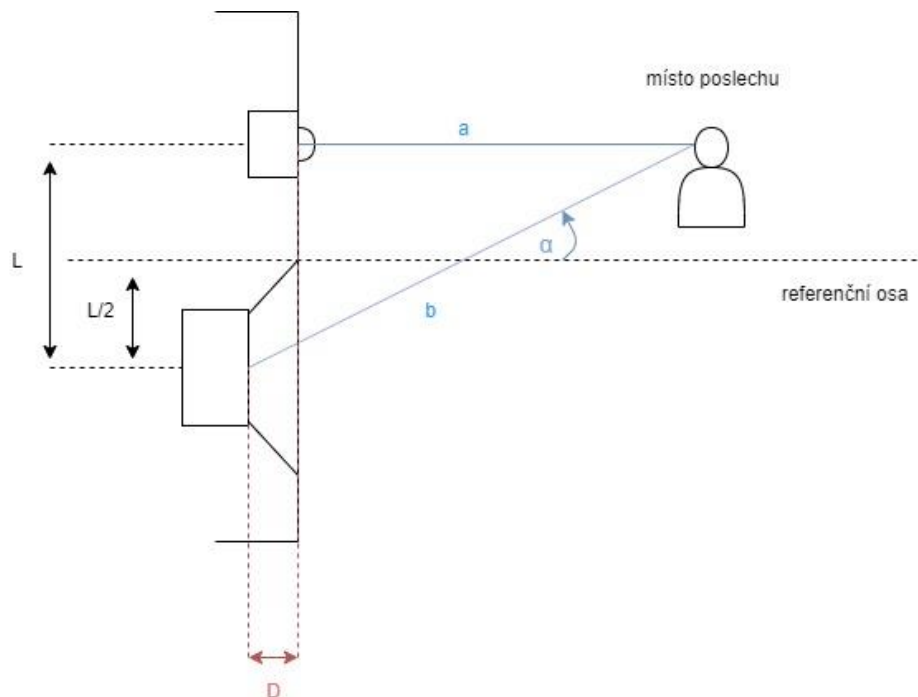
1.5.1 Interferenční maximum a minimum

Dorazí-li více vln do stejného místa dochází k jejich skládání. Výsledná vlna je pak určena superpozicí všech vln v daném místě. Pro jednoduchost uvažujme 2 koherentní vlny. Setkají-li se tyto dvě vlny s fázovým rozdílem $\Delta\varphi = 360^\circ \cdot 2k; k \in N_0$, vzniká interferenční maximum. Setkají-li se tyto dvě vlny s fázovým rozdílem $\Delta\varphi = 180^\circ \cdot (2k + 1); k \in N_0$, vzniká interferenční minimum. Při interferenčním

maximu je výsledná amplituda dána součtem amplitud dílčích koherentních vln. Při interferenčním minimu je výsledná amplituda dána rozdílem dílčích amplitud.

1.5.2 Poslechové místo a fázový rozdíl signálů středobasového a výškového reproduktoru

Uvažuje se dvoupásmová soustava, kdy referenční body reproduktorů neleží v jednom místě. Leží-li místo poslechu mimo referenční osu, vzniká mezi reproduktory rozdíl skupinových zpoždění, který může v okolí mezního kmitočtu způsobovat problematické interference mezi signály výškového a středobasového reproduktoru. [9]



Obrázek 1-6 Poslechové místo a fázový rozdíl mezi signály středobasového a výškového reproduktoru

Na obrázku 1-6 je znázorněn případ, kdy místo poslechu leží v ose výškového reproduktoru. Jde pouze o jednu ze situací, které mohou nastat. Vzdálenost od jednotlivých reproduktorů k místu poslechu se počítá od jejich referenčních bodů.

Vzdálenost b dle obrázku 1-6 vypočítáme podle

$$b = \sqrt{(a + D)^2 + L^2} . \quad (1.14)$$

Rozdíl vzdáleností $b-a$ způsobuje, že koherentní vlny vyzářené jednotlivými reproduktory dorazí na místo poslechu s rozdílem skupinových zpoždění Δt určeným dle

$$\Delta t = \frac{b-a}{v_z} = \frac{\sqrt{(a+D)^2+L^2}-a}{v_z}, \quad (1.15)$$

kde v_t je rychlost zvuku. [6]

Pro fázový rozdíl pak platí

$$\Delta\varphi = \omega\Delta t = \frac{(b-a)2\pi f}{v_z} = \frac{(\sqrt{(a+D)^2+L^2}-a)2\pi f}{v_z}. \quad (1.16)$$

Tabulka 1: Příklad rozměrů pro obrázek 1-6

Rozměr	Hodnota (m)
a	1
L	0,1524
D	0,05

Pro rozdíl skupinových zpoždění reproduktorů pro rozměry uvedené v tabulce 1 a rychlost zvuku při 20°C $v_z = 343 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ platí

$$\Delta t = \frac{(\sqrt{(a+D)^2+L^2}-a)}{v_z} = \frac{(\sqrt{(1+0,05)^2+0,1524^2}-1)}{343} = 176 \mu\text{s}. \quad (1.17)$$

Při kmitočtu $f = 2840 \text{ Hz}$ odpovídá fázový rozdíl $\Delta\varphi$

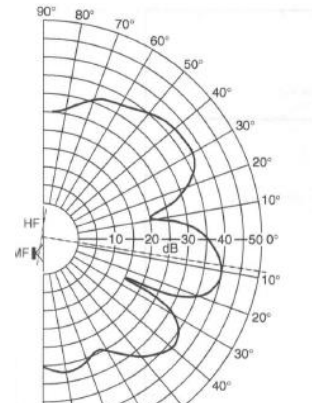
$$\Delta\varphi = \omega\Delta t = 2\pi f\Delta t = 2\pi 2840 \cdot 0,000176 = \pi \text{ rad} \sim 180^\circ. \quad (1.18)$$

Při kmitočtu $f = 2840 \text{ Hz}$ tedy na poslechovém místě dojde vlivem vzájemné topologie reproduktorů k interferenčnímu minimu vln vyzářených středobasovým a výškovým reproduktorem.

1.5.3 Směrová charakteristika reproduktorové soustavy na dělicím kmitočtu

Je uvažována dvoupásmová reproduktorová soustava, kdy jsou referenční body reproduktorů umístěny nad sebou v ose kolmé k horizontální rovině. Chování soustavy může být problematické v okolí mezního kmitočtu.

Jestliže není soustava navržena správně, může docházet k naklápění hlavního laloku vertikální směrové charakteristiky mimo geometrickou osu soustavy, viz obrázek 1-7.[5] Ve vertikální směrové charakteristice lze pozorovat uzly. Tyto uzly jsou interferenční minima vln středobasového a výškového reproduktoru. Uzly ve vertikální směrové charakteristice nelze odstranit. Můžeme však, pomocí návrhu správného typu výhybky a změnou vzájemného zapaštění referenčních bodů reproduktorů, měnit úhel naklopení hlavního laloku vertikální směrové charakteristiky. [10]

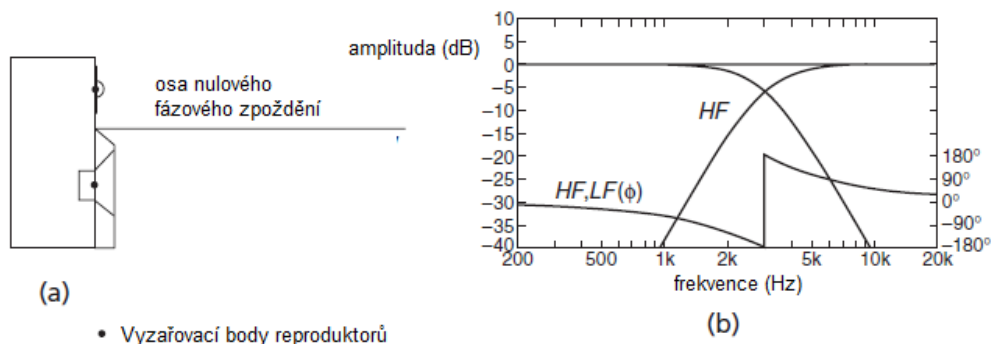


Obrázek 1-7 Vertikální směrová charakteristika na mezním kmitočtu. Výhybka s aproximací dle Butterwortha, 3. řád cit. [3]

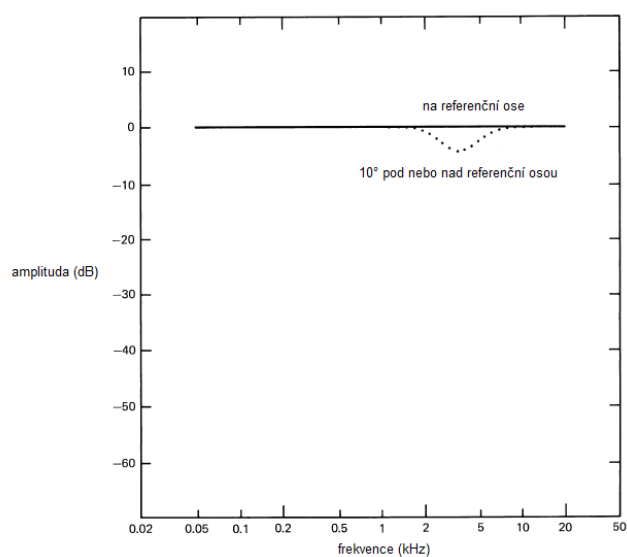
Platí, že čím větší je vertikální vzdálenost referenčních bodů reproduktorů, tím více uzlů vzniká.

1.5.4 Interference vln vyzářených reproduktory v okolí mezního kmitočtu

Jak je zmíněno v podkapitole 1.5.2, nejsou-li referenční body reproduktorů ve stejné vzdálenosti od místa poslechu, způsobí jejich vzájemný fázový rozdíl zvlnění modulové kmitočtové charakteristiky soustavy v okolí mezního kmitočtu vlivem interferencí vlnění středobasového a výškového reproduktoru. Interference lze minimalizovat volbou vhodného rozložení reproduktorů v ozvučnici a návrhem jejího tvaru. Kromě vzájemné topologie reproduktorů v ozvučnici ovlivňuje vznik interferencí také reproduktorová výhybka.

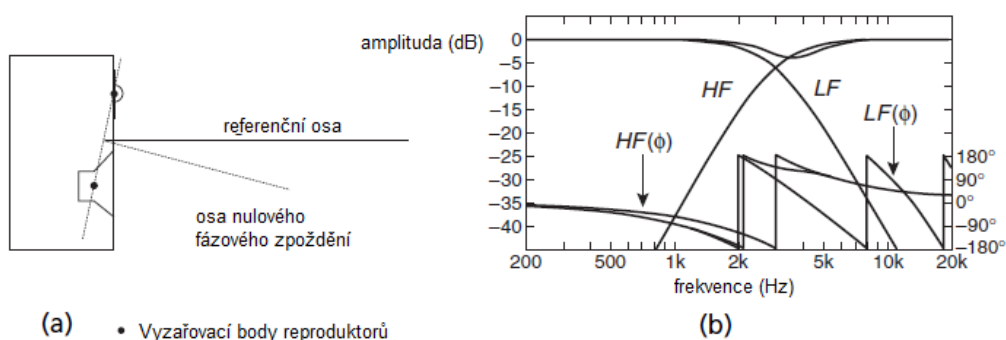


Obrázek 1-8 Dvoupásmová reproduktorová soustava s nulovým rozdílem skupinových zpoždění na referenční ose při použití výhybky 4. řádu s aproximací Linkwitz-Riley s mezním kmitočtem 3 kHz, topologie reproduktorů (a) a kmitočtová charakteristika (b) cit. [3]



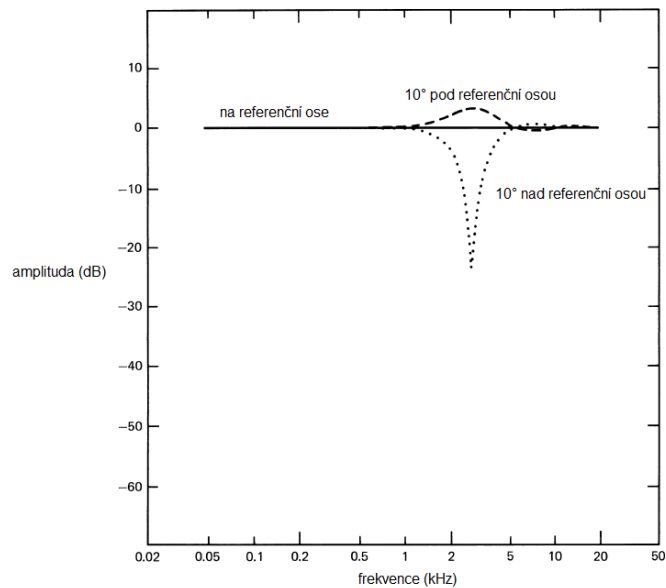
Obrázek 1-9 Dvoupásmová reproduktorová soustava s nulovým rozdílem skupinových zpoždění na referenční ose při použití výhybky 4. řádu s aproximací Linkwitz-Riley s mezním kmitočtem 3 kHz, porovnání modulové kmitočtové charakteristiky v geometrické ose soustavy a mimo ni cit. [3]

Ideální uspořádání reproduktorů ve dvoupásmové soustavě s výhybkou čtvrtého řádu s aproximací Linkwitz-Riley a dělicím kmitočtem $f = 3$ kHz je ukázáno na obrázku 1-8. Použití výhybky s aproximací Linkwitz-Riley zaručí, že bude hlavní lalok symetrický kolem referenční osy soustavy. Akustický tlak v 10° nad i pod referenční osou soustavy je stejný, viz obrázek 1-9. To je jeden z důvodů, proč je tato aproximace často používána pro návrh výhybek kvalitních reproduktorových soustav. [3]



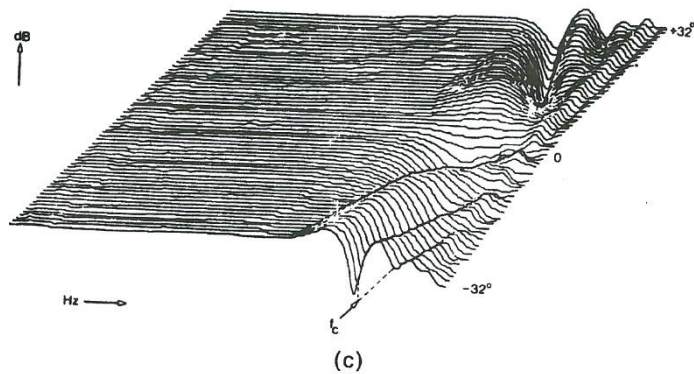
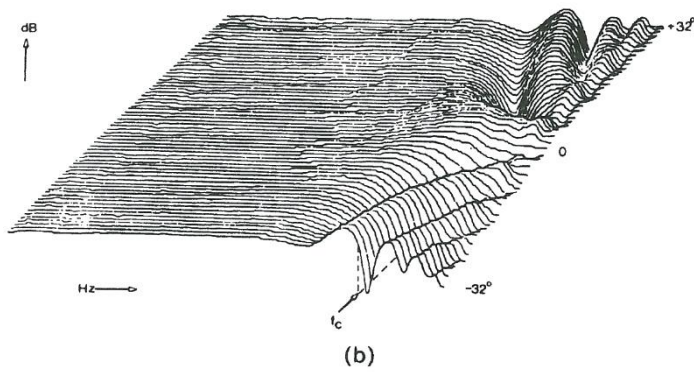
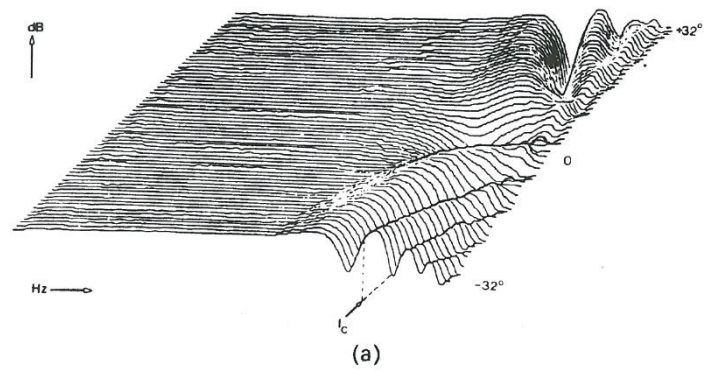
Obrázek 1-10 : Dvoupásmová reproduktorová soustava s rozdílem skupinových zpoždění na referenční ose $\Delta t = 88 \mu s$ při použití výhybky 4. řádu s aproximací Linkwitz-Riley s mezním kmitočtem 3 kHz, topologie reproduktorů (a) a kmitočtová charakteristika (b) cit. [3]

Na obrázku 1-10 je ozvučnice s rovnou přední deskou. Na referenční ose vzniká, vlivem zapuštění referenčního bodu středobasového reproduktoru oproti referenčnímu bodu výškového reproduktoru o 30 mm, rozdíl skupinových zpoždění výškového a středobasového reproduktoru $\Delta t = 88 \mu s$. Na kmitočtu $f = 3,6 \text{ kHz}$ lze v modulové kmitočtové charakteristice vlivem tohoto rozdílu pozorovat propad asi -4 dB. [3] Kompenzace rozdílu skupinových zpoždění výškového a středobasového reproduktoru může být provedena přivedením skupinového zpoždění do signálové cesty výškového reproduktoru. To může být realizováno např. kaskádou fázovacích článků.

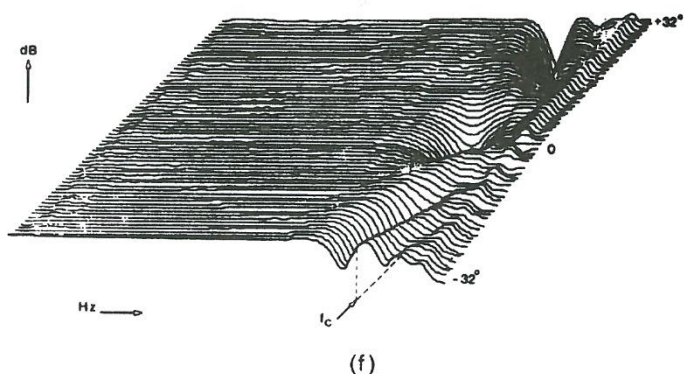
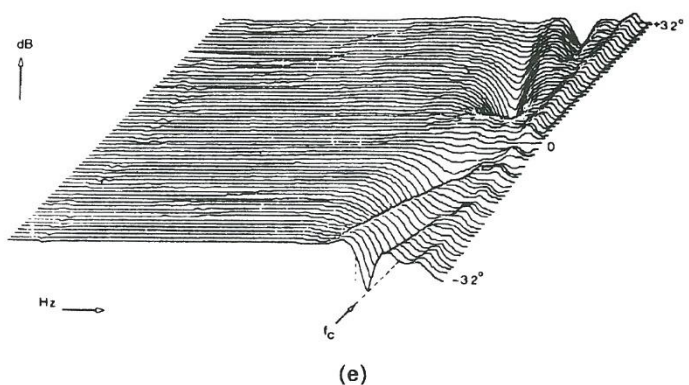
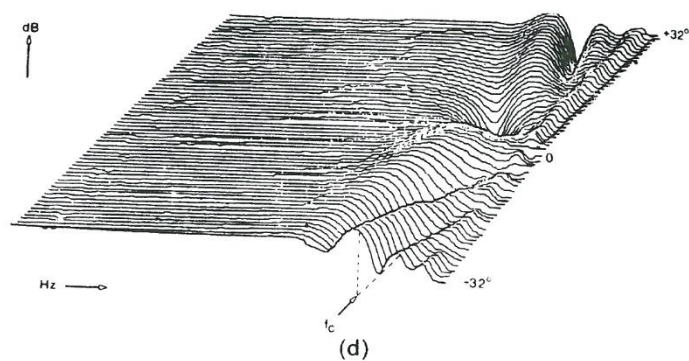


Obrázek 1-11 Vliv úhlu poslechu na modulovou kmitočtovou charakteristiku, výhybka s aproximací dle Butterwortha 3. řádu cit. [3]

Na obrázku 1-11 je znázorněna situace při použití ozvučnice s rovnou přední deskou, výhybky 3. řádu s aproximací dle Butterwortha a mezního kmitočtu $f = 3 \text{ kHz}$. Samotná výhybka 3. řádu způsobí, že na mezním kmitočtu bude fázový rozdíl mezi signály středobasového a výškového reproduktoru roven $\Delta\varphi = 90^\circ$. Osy reproduktorů v ozvučnici jsou od sebe vzdáleny o 170 mm, což při kmitočtu $f = 3 \text{ kHz}$ odpovídá 1,5x násobku vlnové délky. Jak je vidět na obrázku 1-11, akustický tlak v 10° pod referenční osou je o 3 dB větší než na referenční ose. Velká část energie je tak odkloněna od referenční osy. [3] Nad referenční osou je oblast, ve které se začíná projevovat rozdíl fázových zpoždění reproduktorů. V 10° nad poslechovou dochází vlivem interference vlnění středobasového a výškového reproduktoru k interferenčnímu minimu. Na tomto místě je zhruba 25 dB pokles hladiny akustického tlaku oproti referenční ose reproduktorové soustavy.



Obrázek 1-12 3D grafy ve kmitočtovém spektru měřené pod geometrickou osou referenčních bodů reproduktorů. (a) a (b) jsou grafy pro výhybku druhého řádu s reproduktory zapojenými ve fázi (a) a v protifázi (b). (c) je graf pro výhybku druhého řádu s reproduktory zapojenými ve fázi cit. [7]



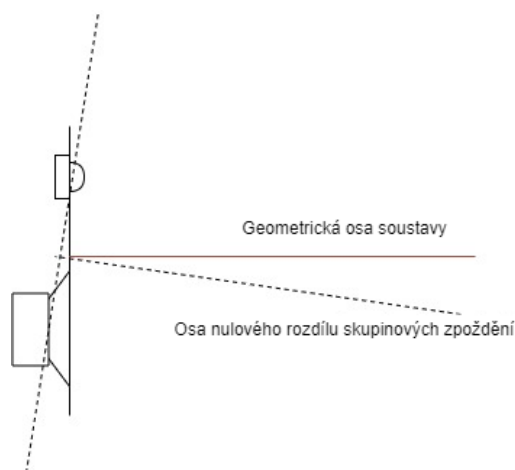
Obrázek 1-13 3D grafy ve kmitočtovém spektru měřené pod geometrickou osou referenčních bodů reproduktorů. (d) je graf pro výhybku třetího řádu s reproduktory zapojenými v protifázi. (e) a (f) jsou grafy pro výhybku čtvrtého řádu s reproduktory zapojenými ve fázi (e) a v protifázi (f) cit. [7]

Na obrázcích 1-12 a 1-13 jde vidět, že systém s výhybkou druhého řádu je více směrový a má na bočních lalocích větší rozkmit než systém s výhybkou čtvrtého řádu. V 3D grafu systému třetího řádu, při obrácení polarity výškového reproduktoru, lze pozorovat stranovou asymetrii kmiten a uzlů a směrování hlavního laloku nahoru.

2 ZPŮSOBY KONSTRUKCE PŘEDNÍ DESKY OZVUČNICE

V této kapitole budou popsány různé způsoby konstrukce předních desek ozvučnic a jejich vliv na směřování osy nulového fázového zpoždění mezi reproduktory. V podkapitole 1.5 bylo uvedeno, jaký vliv má vzájemná topologie reproduktorů na vlastnosti reproduktorové soustavy. Nyní budou uvedeny praktické možnosti řešení této problematiky a jejich vliv na směřování osy nulového rozdílu skupinových zpoždění reproduktorů. Osa nulového rozdílu skupinových zpoždění je osa, na které je rozdíl skupinových zpoždění reproduktorů roven nule a tím pádem na ní nevzniká fázové zpoždění mezi vlnami středobasového a výškového reproduktoru. Pro názornost se uvažuje nulové skupinové zpoždění jednotlivých reproduktorů.

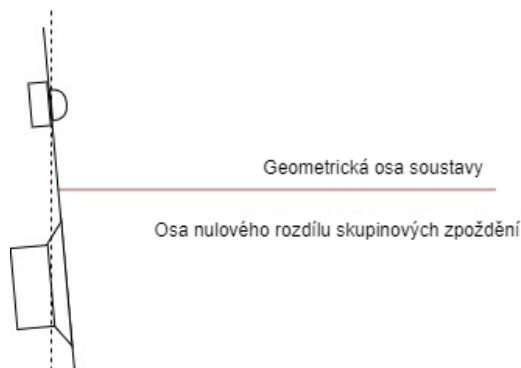
2.1 Ozvučnice s rovnou přední deskou



Obrázek 2-1 Ozvučnice s rovnou přední deskou

Jak jde vidět na obrázku 2-1, osa protínající referenční body reproduktorů není při použití ozvučnice s rovnou přední deskou kolmá k horizontální rovině a osa nulového rozdílu skupinových zpoždění výškového a středobasového reproduktoru tak bude směřovat dolů. Na geometrické ose soustavy dochází ke zvlnění kmitočtové charakteristiky vlivem fázového zpoždění mezi reproduktory. Soustava se pro ideální poslech bude muset umístit nad posluchače. [3] Směřování osy nulového rozdílu skupinových zpoždění výškového a středobasového reproduktoru lze ovlivnit přivedením dodatečného skupinového zpoždění do signálové cesty jednoho z reproduktorů. Výhodou ozvučnice s rovnou přední deskou je její jednoduchá konstrukce. [2]

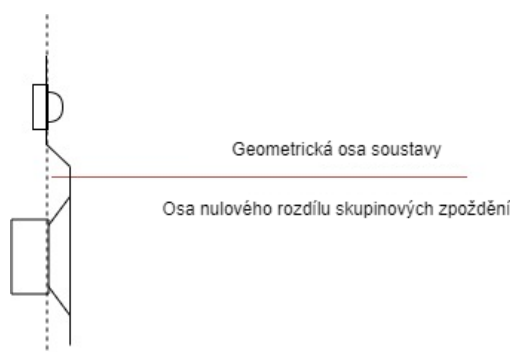
2.2 Ozvučnice se zkosenou přední deskou



Obrázek 2-2 Ozvučnice se zkosenou přední deskou

Jedním ze způsobů zajištění nulového rozdílu skupinových zpoždění výškového a středobasového reproduktoru v geometrické ose soustavy je zkosení přední desky ozvučnice. Úkosem se dosáhne toho, že osa nulového rozdílu skupinových zpoždění výškového a středobasového reproduktoru bude rovnoběžná s horizontální rovinou. Ideální poslechové místo tak bude před soustavou v její geometrické ose. Nevýhoda tohoto uspořádání je naklopení reproduktorů, jejichž referenční osy budou směřovat vzhůru.

2.3 Ozvučnice s přední deskou s úkosem



Obrázek 2-3 Ozvučnice s přední deskou s úkosem

Zapuštěním výškového reproduktoru oproti středobasovému reproduktoru lze zajistit to, že osa procházející referenčními body reproduktorů bude kolmá k horizontální rovině. Osa nulového rozdílu skupinových zpoždění výškového a středobasového reproduktoru bude rovnoběžná s horizontální rovinou a ideální místo poslechu bude, jako v předchozím případě, před ozvučnicí v její geometrické ose. Oproti předchozímu řešení nejsou reproduktory naklopeny a jejich referenční osy jsou tudíž rovnoběžné s geometrickou osou soustavy.

2.4 Výpočet vhodné vertikální vzdálenosti reproduktorů ve dvoupásmové soustavě

Vertikální vzdálenost referenčních bodů reproduktorů by měla být co nejmenší. Ideálně ne větší než 1/4 vlnové délky mezního kmitočtu. V praktické konstrukci však nelze tak malé vzdálenosti dosáhnout kvůli rozměrům reproduktorů. Proto se používá vzdálenost referenčních bodů reproduktorů rovna 5/4 vlnové délky mezního kmitočtu použité výhybky. Pro výpočet vzdálenosti můžeme použít následující vzorec:

$$d = \frac{5}{4} \frac{v_z}{f_d} \quad (2.1)$$

kde v_z je rychlost zvuku a f_d je dělicí kmitočet použité výhybky. [2]

3 MINIMALIZACE VLIVU INTERFERENCÍ NA KMITOČTOVOU CHARAKTERISTIKU DVOUPÁSMOVÉ REPRODUKTOROVÉ SOUSTAVY

Cílem této kapitoly je představit různé tvary ozvučnic a jejich vliv na kmitočtovou charakteristiku a představit konstrukční prvky ozvučnic, které tento vliv zmenší.

Jedním z méně zmiňovaných jevů, které mají vliv na kmitočtovou charakteristiku reproduktorových soustav je ohyb vlnění na hranách ozvučnice. Vlna šířící se po ozvučnici narazí na ostrou hranu, kde dojde ke snížení akustické impedance, které zapříčiní posun její fáze. To je zmiňovaný ohyb. [1] Místo, na kterém k ohybu dochází se pak stává novým zdrojem vlnění.

Vlnění přímo vyzářené reproduktorem bude označováno jako primární. Vlnění, které je produkováno ohnutím, odrazem nebo ohnutím a odrazem bude označováno jako sekundární.

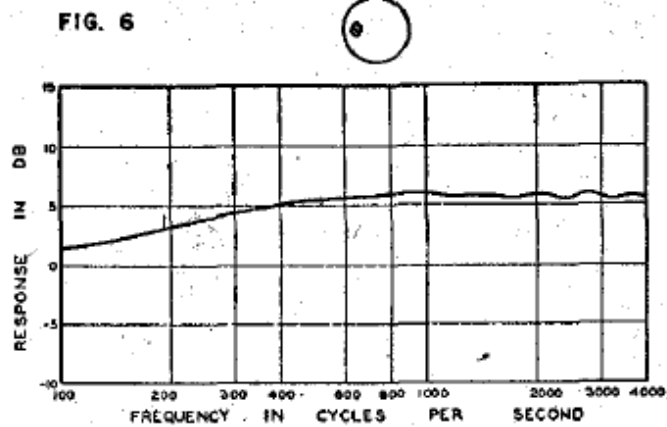
Interference primárního a sekundárního ovlivňují modulovou kmitočtovou charakteristiku reproduktorové soustavy. Na nižších kmitočtech, kde je vlnová délka vln větší než rozměry ozvučnice, nebude modulová kmitočtová charakteristika interferencemi primárního a sekundárního vlnění výrazně ovlivněna. [4]

3.1 Příklady modulových kmitočtových charakteristik v závislosti na tvaru ozvučnice

Při návrhu reproduktorové ozvučnice má na vznik ohybů vliv její vnější tvar. Ohyby je možné minimalizovat odstraněním ostrých hran a přechodů. [1] Je nutné myslet i na zapuštění úchyty reproduktoru do přední desky ozvučnice a volbu šroubů se zapuštěnými hlavami. Je také vhodné umístit reproduktor tak, aby vzdálenost jeho referenčního bodu nebyla od všech hran stejná, čímž dojde k lepšímu rozptylu vlivu interferencí primárního a sekundárního vlnění.

3.1.1 Kulová ozvučnice

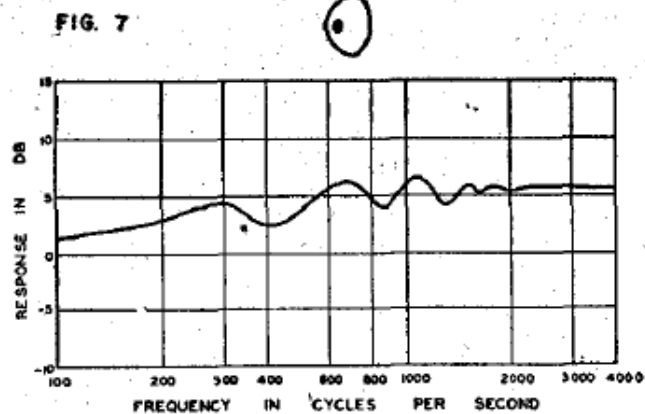
Modulová kmitočtová charakteristika kulové ozvučnice je vyrovnaná. Na jejím tvaru nejsou žádné ostré hrany nebo přechody, na kterých by docházelo ke vzniku ohybů. Na kmitočtech nižších, než 600 Hz je vidět pokles citlivosti reproduktoru v ozvučnici vlivem akustického zkratu.



Obrázek 3-1 Modulová kmitočtová charakteristika kulové ozvučnice cit. [1]

3.1.2 Polokulová ozvučnice

Ostrá hrana na přechodu z kulaté na rovinou část dává vzniknout ohybům. Interference primárního a sekundárního vlnění výrazně ovlivňuje modulovou kmitočtovou charakteristiku soustavy. Ta je oproti modulové kmitočtové charakteristice kulové ozvučnice zvlněná. Vzdálenost referenčního bodu reproduktoru je k celému obvodu hrany stejná. Interference primárního a sekundárního vlnění tak nejsou rozloženy do kmitočtového spektra a vzniká efekt hřebenového filtru. Směrem k vyšším kmitočtům je rozkmit méně výrazný.

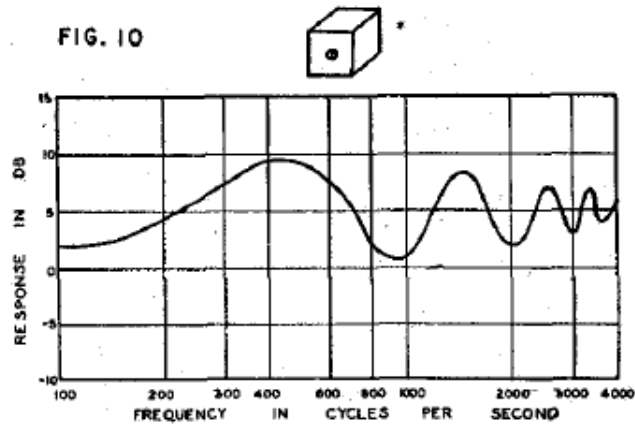


Obrázek 3-2 Modulová kmitočtová charakteristika polokulové ozvučnice cit. [1]

3.1.3 Krychlová ozvučnice

Vzdálenost referenčního bodu reproduktoru od hran uvažované ozvučnice je 36 cm. Na ostrých hranách dochází k ohybům vlnění. Vlna šířící se po ozvučnici narazí na ostrou hranu, kde dojde ke snížení akustické impedance, která zapříčiní otočení fáze o 180°. [1] Vlnová délka 36 cm odpovídá kmitočtu $f = 944,4$ Hz. Vlivem interferencí primárního a

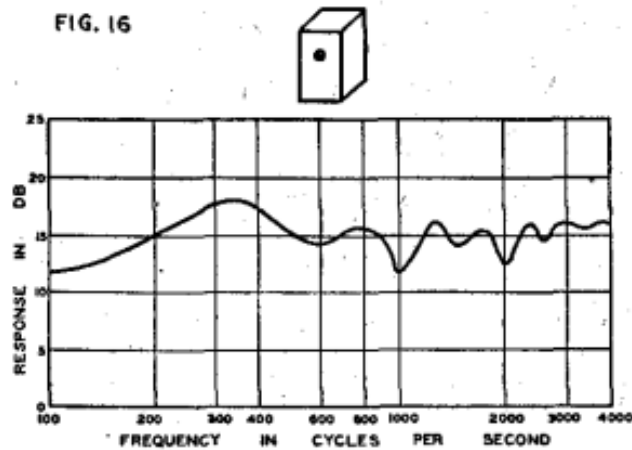
sekundárního vlnění můžeme očekávat lokální minima modulové kmitočtové charakteristiky na sudých násobcích f a maxima na lichých násobcích $f/2$.



Obrázek 3-3 Modulová kmitočtová charakteristika krychlové ozvučnice cit. [1]

3.1.4 Kvádrová ozvučnice

Tento tvar ozvučnice je používán nejčastěji kvůli jednoduchosti jeho konstrukce. Různá vzdálenost hran od referenčního bodu reproduktoru způsobuje zvlnění modulové kmitočtové charakteristiky na více kmitočtech než u krychlové ozvučnice. Vlivem této rozdílné vzdálenosti k jednotlivým hranám však špičky a propady modulové kmitočtové charakteristiky nedosahují tak rozdílných hodnot jako u krychlové ozvučnice.

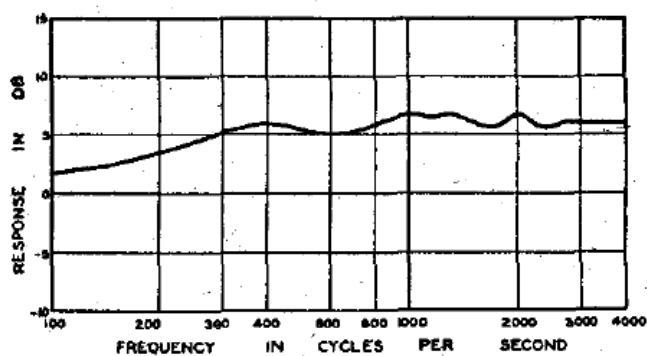


Obrázek 3-4 Modulová kmitočtová charakteristika kvádrové ozvučnice cit. [1]

3.1.5 Krychlová ozvučnice se zkosenými hranami

Jsou-li přední hrany krychle zkoseny pod 45° , jsou odrazy ohnutého vlnění od ozvučnice lépe rozptýleny do prostoru. Pozorujeme tak mnohem menší zvlnění modulové kmitočtové charakteristiky vlivem interferencí primárního a sekundárního vlnění než u krychlové ozvučnice.

FIG. 15

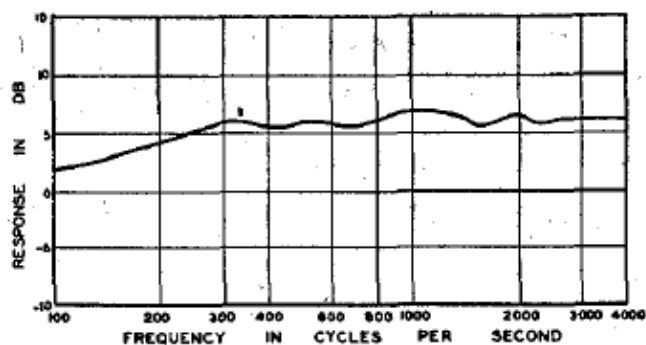


Obrázek 3-5 Modulová kmitočtová charakteristika krychlové ozvučnice se zkosenými hranami cit. [1]

3.1.6 Kvádrová ozvučnice se zkosenými hranami

Zvlnění modulové kmitočtové charakteristiky je výraznější, je-li vzdálenost referenčního bodu reproduktoru od všech hran stejná. Kvádrová ozvučnice se zkosenými hranami je navržena tak, aby zredukovala ostré přechody na přední desce ozvučnice a zároveň zaručila proměnou vzdálenost referenčního bodu reproduktoru od hran ozvučnice. Díky zkoseným hranám je dosaženo dobrého rozptylu odrazů ohnutého vlnění. Modulová kmitočtová charakteristika kvádrové ozvučnice se zkosenými hranami je poměrně vyrovnaná a bez výrazných špiček a propadů.

FIG. 17



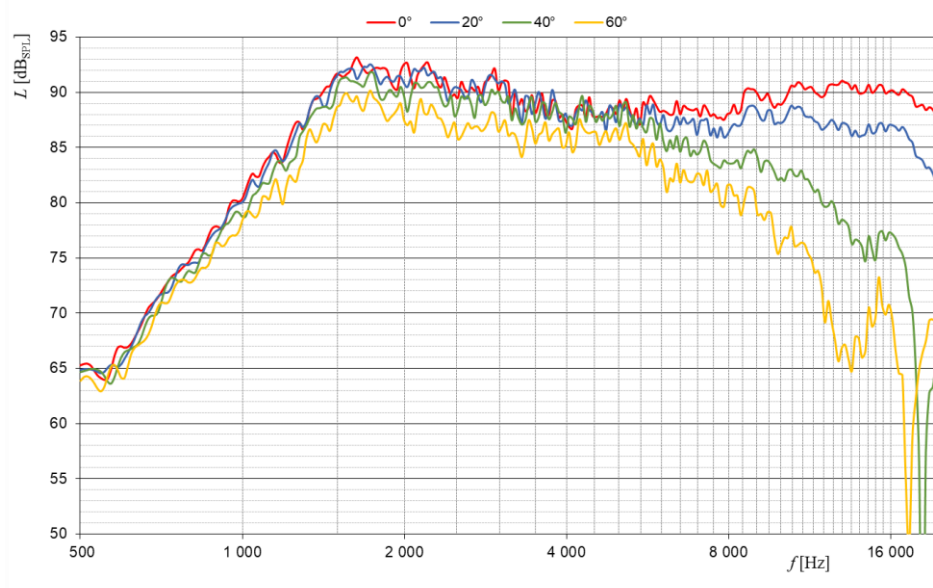
Obrázek 3-6 Modulová kmitočtová charakteristika kvádrové ozvučnice se zkosenými hranami cit. [1]

3.2 Modulová-kmitočtově směrová charakteristika výškového reproduktoru v kvádřové ozvučnici s asymetrickým uložením reproduktoru

Kvádřová ozvučnice je nejvíce používaným tvarem ozvučnic. Je zde uvedena, aby byla demonstrována její neproporcionální směrovost, kdy hladina akustického tlaku neklesá úměrně s úhlem odklonu od referenční osy reproduktoru. Přední deska ozvučnice má obdélníkový tvar a je potažena tkaninou. Hloubka bočnic je 15 cm. Ozvučnice má zaoblené vnější hrany. Reproductor je umístěn mimo horizontální i vertikální osu přední desky ozvučnice a vzdálenost hran ozvučnice od referenčního bodu reproduktoru je tak různá. Je tak dosaženo lepšího rozptylu ohnutých vln odražených od ozvučnice. Reproductor je zapuštěn do přední desky ozvučnice. Tím se minimalizuje zvlnění charakteristiky na kmitočtech vyšších, než které odpovídají vlnové délce odvozené z poloměru těla reproduktoru.



Obrázek 3-7 Kvádřová ozvučnice s asymetrickým uložením reproduktoru



Obrázek 3-8 Modulová kmitočtově-směrová charakteristika výškového reproduktoru v kvádřové ozvučnici

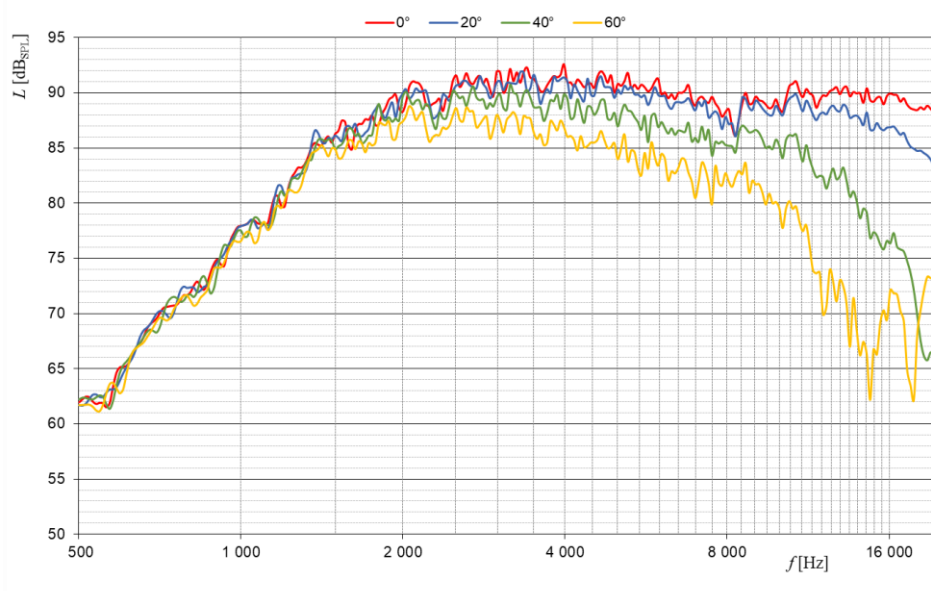
Na modulové kmitočtově-směrové charakteristice na obrázku 3-8 je patrná neproporcionální směrovosti, kdy je hladina akustického tlaku na daném kmitočtu v referenční ose reproduktoru nižší než mimo ni. To je typická negativní vlastnost ozvučnic konvenčních tvarů. Tato charakteristika byla změřena za podmínek popsanych v kapitole 5.1.

3.3 Modulová kmitočtově-směrová charakteristika ozvučnice pro výškový reproduktor ve tvaru kapky

Tvar ozvučnice je založen na eliminaci ostrých hran. Od přední zaoblené hrany se tvar postupně zužuje, viz obrázek 3-9. Tím je docíleno rozptýlení odražených vln do prostoru za ozvučnicí a je tak minimalizován vliv tvaru ozvučnice na modulovou kmitočtovou charakteristiku ve směru referenční osy reproduktoru. Poloměr této ozvučnice je 4,2 cm. Vlnové délce 4,2 cm odpovídá kmitočet 8166 Hz. V okolí tohoto kmitočtu se vyskytuje lokální minimum modulové kmitočtově-směrové charakteristiky a je poměrně výrazné. Zmenšením průměru ozvučnice by bylo dosaženo posunutí lokálního minima směrem k vyšším kmitočtům do méně významného kmitočtového rozsahu zvukových signálů. Minimální poloměr ozvučnice je však ovlivněn rozměry a konstrukcí reproduktoru. Při menším průměru ozvučnice by však nebylo možné dosáhnout takového zaoblení přední hrany, a to by mělo negativní dopad na vznik ohybů na této hraně.



Obrázek 3-9 Ozvučnice ve tvaru kapky pro výškový reproduktor



Obrázek 3-10 Modulová kmitočtově-směrová charakteristika výškového reproduktoru v ozvučnici ve tvaru kapky

Na obrázku 3-10 je vidět proporcionální směrovost výškového reproduktoru v ozvučnici ve tvaru kapky. Změřená hladina akustického tlaku klesá úměrně s úhlem odchýlení od

referenční osy reproduktoru. Použitím tohoto tvaru je dosaženo vyrovnané modulové kmitočtové charakteristiky nejen v referenční ose reproduktoru ale i mimo ni. Tato charakteristika byla změřena za podmínek popsanych v kapitole 5.1.

4 VÝROBA VARIABILNÍ DVOUPÁSMOVÉ REPRODUKTOROVÉ SOUSTAVY

Cílem této kapitoly je popis návrhu a výroby variabilní dvoupásmové reproduktorové soustavy. V diplomové práci [12], na kterou tato práce navazuje, byla navržena ozvučnice inspirovaná kvádrovou ozvučnicí se zkosenými hranami, popisovanou v podkapitole 3.1.6. Dodaný polotovár ozvučnice byl v rámci této práce dokončen a byly k němu vyrobeny dvě nástavby a modul pro výškový reproduktor. Reproduktorová soustava je variabilní v tom smyslu, že je možné měnit vzájemnou topologii výškového a středobasového reproduktoru. Výrobek bude sloužit k ověření teoretických předpokladů uvedených v předchozích kapitolách.

4.1 Návrh tvaru variabilní dvoupásmové reproduktorové soustavy

V podkapitole 3.1 byly uvedeny modulové kmitočtové charakteristiky reproduktoru uloženého v ozvučnicích různých tvarů. Na základě těchto poznatků byla navržena ozvučnice, která vychází z kvádrové ozvučnice se zkosenými hranami popisované v podkapitole 3.1.6. Vnější rozměry ozvučnice jsou 40 x 54 x 30 cm (Š x V x H). Tyto rozměry zaručují vnitřní objem 46 l, který umožňuje věrnou reprodukci kmitočtů již od 50 Hz. [12] Její boční hrany jsou zkoseny pod úhlem 45° s hloubkou 10 cm. Tato zkosení by měla přispět k rozptýlení odrazů vlnění ohnutého na hranách ozvučnice a zajistit tak vyrovnaný průběh modulové kmitočtové charakteristiky reproduktoru v ozvučnici.



Obrázek 4-1 Hotový výrobek při použití nižší nástavby



Obrázek 4-2 Ozvučnice pro středobasové reproduktor bez nástavby, přední pohled a horní pohled

Popisované prvky lze vidět na obrázku 4-1.

Obě vyrobené nástavby mají stejný půdorys jako víko ozvučnice na obrázku 4-2 a jsou také zkoseny pod 45° . Všechny hrany ozvučnice a nástaveb jsou zaobleny s poloměrem $r = 7$ mm, aby nikde na ozvučnici nevznikal ostrý předěl. Kvůli eliminaci ostrých hran je středobasový reproduktor zapuštěn do přední desky ozvučnice. Středobasový reproduktor je umístěn tak, aby byla vzdálenost horní a spodní hrany přední desky ozvučnice od referenčního bodu reproduktoru rozdílná. Tím je dosaženo lepšího rozložení negativních vlivů interferencí primárního a sekundárního vlnění na modulovou kmitočtovou charakteristiku reproduktoru v ozvučnici. Celá ozvučnice i nástavby jsou potaženy čalounickou tkaninou a vnitřní prostor ozvučnice je vyplněný tlumícím materiálem, který omezuje vznik stojatého vlnění uvnitř ozvučnice.

4.2 Vzájemná topologie reproduktorů ve variabilní dvoupásmové reproduktorové soustavě

Celá soustava je navržena tak, aby bylo možné měnit vzájemnou topologii reproduktorů. V horizontální rovině je možné měnit vzájemnou topologii reproduktorů díky polohovatelnému modulu výškového reproduktoru. Konstrukce nástavby, ve které by bylo možné plynule měnit polohu ve vertikální i horizontální ose by byla příliš složitá, a proto bylo použito řešení, kdy se změna vertikální vzdálenosti os reproduktorů provádí výměnou celé horní nástavby. Byly vyrobeny dvě nástavby pro vzdálenost os reproduktorů ve vertikální ose 179 mm a 236 mm. Vzdálenosti os reproduktorů ve vertikále byly stanoveny výpočtem dle teorie v kapitole 2.4. Mezní kmitočty, pro které byly vypočítány vzdálenosti os reproduktorů ve vertikále 1,8 kHz a 2,375 kHz byly určeny v zadání práce. Výpočet vzdálenosti os reproduktorů ve vertikále je proveden dle

$$d = \frac{5}{4} \frac{v_z}{f_d} \quad (4.1)$$

Při mezním kmitočtu 1,8 kHz je vzdálenost os reproduktorů ve vertikále

$$d_1 = \frac{5}{4} \frac{340}{1800} m = 0,236 m. \quad (4.2)$$

Při mezním kmitočtu 2,375 kHz je vzdálenost os reproduktorů ve vertikále

$$d_2 = \frac{5}{4} \frac{340}{2375} m = 0,179 m. \quad (4.3)$$

Ve výpočtech se uvažuje rychlost zvuku při 15°C $v_t = 340$ m/s.

Modul s výškovým reproduktorem je možné v nástavbách posouvat a měnit tak jeho polohu v horizontální ose, případně ho vyjmout.

Podrobnější popis jednotlivých konstrukčních částí následuje v dalších podkapitolách. K soustavě byla, v rámci jiné diplomové práce, dodána aktivní parametrická výhybka. Její popis je v podkapitole 6.1.

4.3 Konstrukce variabilní dvoupásmové reproduktorové soustavy

Tělo přípravku je vyrobeno z materiálu MDF, který je často používán při výrobě reproduktorových ozvučnic. Tento materiál je hustý a má velké vnitřní tlumení. Struktura materiálu umožňuje zpracování povrchu lakováním. Důležitou vlastností je také homogenost, materiál lze obrábět ze všech stran stejným způsobem. K výrobě byly použity desky o tloušťce 18 mm. Polotovary ozvučnice a modulu byl dodán jako výstup diplomové práce [12].

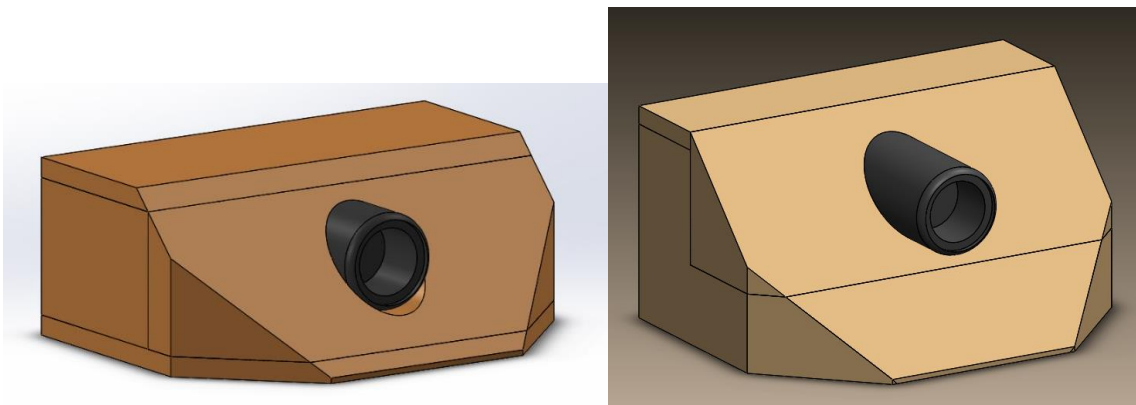
Celý přípravek byl potažen černou čalounickou tkaninou a opatřen plastovými rohy. K ozvučnici lze nástavby připevnit pomocí přezkových zámků umístěných na boku ozvučnice a nástaveb.



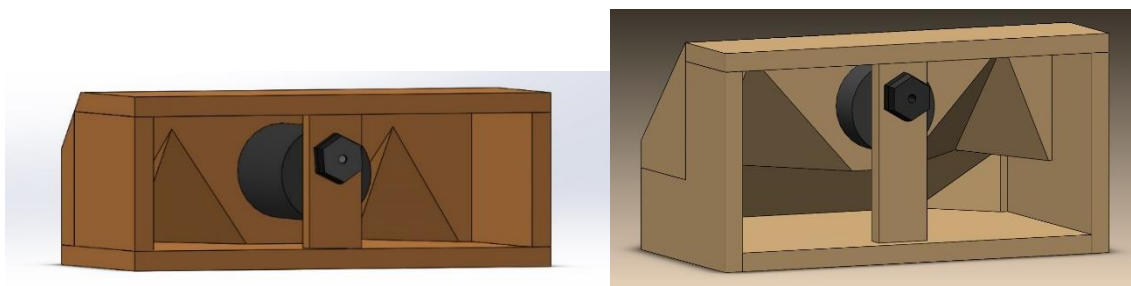
Obrázek 4-3 Hotový výrobek s nižší nástavbu – pohled z boku

4.3.1 Nástavby pro změnu vzdálenosti os reproduktorů

Jak již bylo zmíněno, soustava umožňuje dvě různé vzdálenosti os reproduktorů ve vertikále- 179 mm a 236 mm. Toho je docíleno možností výměny celé horní nástavby. Výkresy jednotlivých dílů nástaveb jsou v přílohách č. 1 a 2.



Obrázek 4-4 Model nástaveb, vlevo nižší nástavba, vpravo vyšší nástavba – přední pohled



Obrázek 4-5 Model nástaveb, vlevo nižší nástavba, vpravo vyšší nástavba – zadní pohled

Každá z nástaveb umožňuje uložení modulu s výškovým reproduktorem. Tento modul pojíždí v masivním hranolu tvořícím přední desku nástavby. Hranol je vyroben slepením osmi kusů MDF desek. Před slepením desek bylo nutné vyfrézovat přesný otvor do každé z desek a následně je slepit tak, aby byly otvory soustředné. Z důvodu vysoké hustoty použitého materiálu byl celý přípravek poměrně těžký, proto byly provedeny odlehčovací řezy v hranolu, viz obrázek 4-5.

Zadní strana nástaveb je otevřená kvůli snazšímu přístupu ke kabeláži, manipulaci s posuvným mechanismem a nižší hmotnosti přípravku.



Obrázek 4-6 Nástavby po dokončení, vlevo nižší nástavba, vpravo vyšší nástavba – pohled zepředu

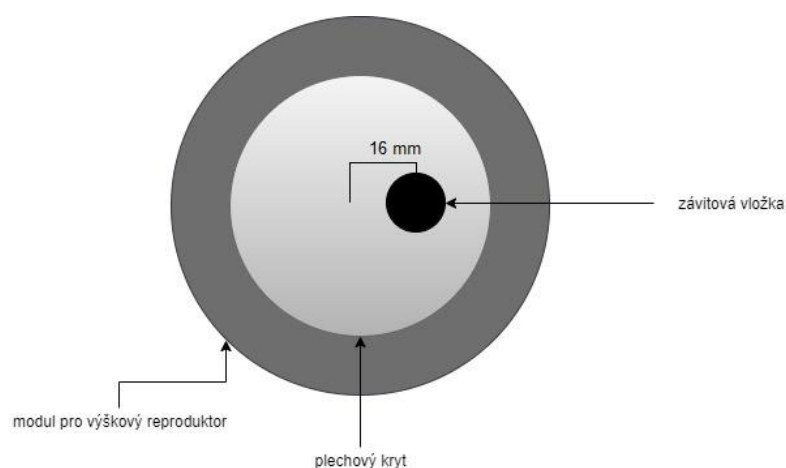


Obrázek 4-7 Nástavby po dokončení, vlevo nižší nástavba, vpravo vyšší nástavba – pohled zezadu

4.3.2 Modul pro výškový reproduktor

Modul výškového reproduktoru lze z jednotlivých nástaveb vyjmout. Je tak použit pouze jeden modul pro obě nástavby. Jeho tvar vychází z ozvučnice pro výškový reproduktor ve tvaru kapky, která je popsána v kapitole 3.3. Modul je však válcového tvaru z důvodu jeho uchycení v nástavbách. Zajistit pevné, a přitom proměnné uložení modulu ve tvaru kapky by bylo konstrukčně příliš náročné. Výkres modulu je uveden v práci [12].

Modul je vyroben z MDF desek slepených k sobě. Po úpravě vnějšího tvaru byl vybroušen, nastříkán akrylovou barvou ve spreji v několika vrstvách a následně nalakován dvousložkovým bezbarvým lakem. V zadní straně modulu je závitová vložka pro uchycení do posuvného mechanismu, viz kapitola 4.3.3, a plechový kryt chrání modul před poškozením při uchycování do posuvného mechanismu. Závitová vložka je uložena mimo osu modulu, aby se modul při vysouvání neotáčel kolem své osy.





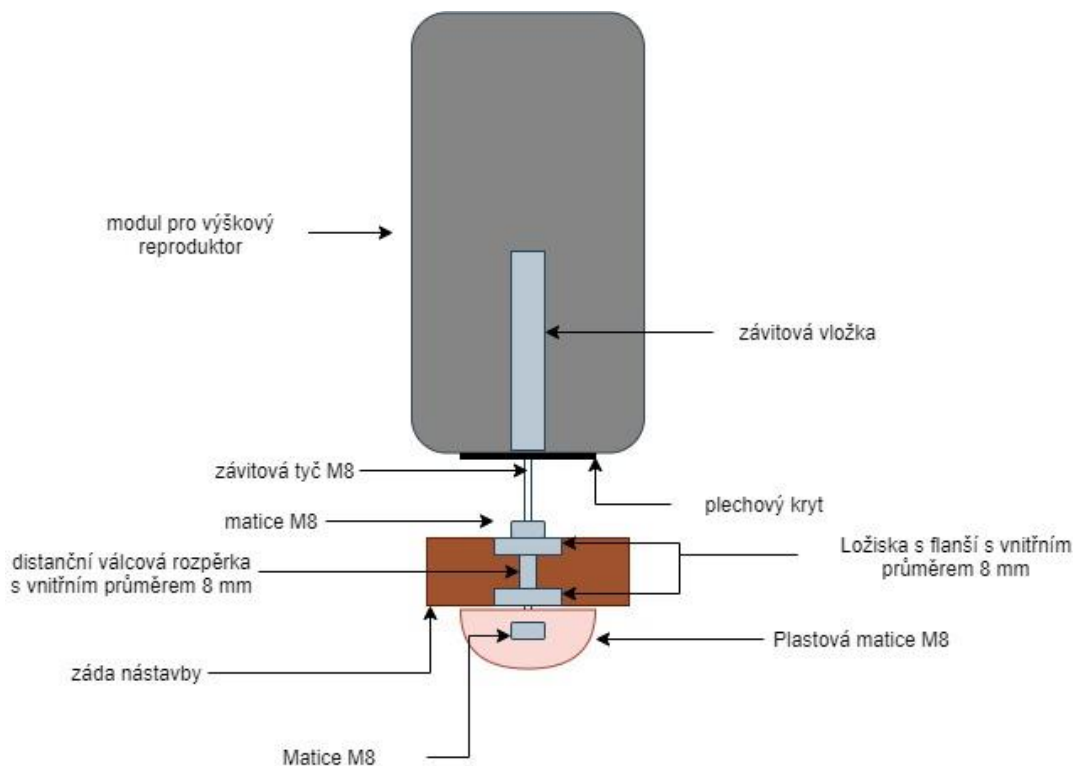
Obrázek 4-8 Zadní strana modulu pro výškový reproduktor - nahoře model s popisem, dole realizace



Obrázek 4-9 modul pro výškový reproduktor - boční pohled

4.3.3 Mechanismus pro posuv modulu s výškovým reproduktorem

Otvory v hranolech, ve kterých pojíždí modul s výškovým reproduktorem jsou vyložkovány fólií z neměkčeného PVC. Na této fólii je nalepena samolepící tkanina. To zajišťuje hladký chod modulu a dostatečnou pevnost jeho uložení.



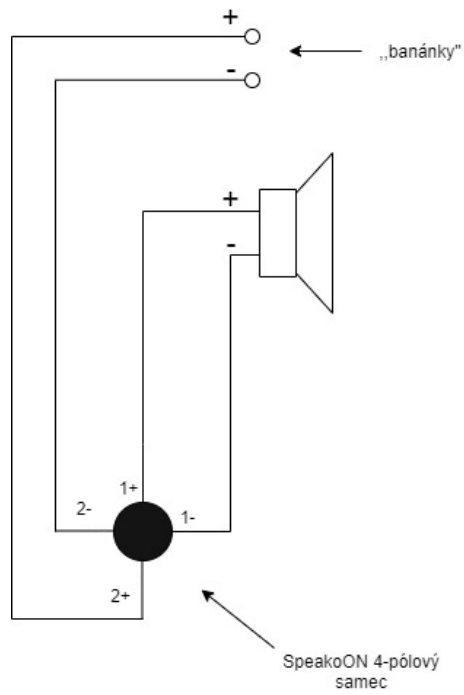
Obrázek 4-10 Mechanismus pro posuv modulu s výškovým reproduktorem v nástavbách

Nákres mechanismu je na obrázku 4-10. V zádech každé nástavby jsou umístěna dvě ložiska s přírubou F 698 ZZ oddělená distanční válcovou rozpěrkou o vnitřním průměru 8 mm. Závitová tyč M8 je pomocí kontramatic upevněna v ložiscích. Plastová matice slouží k otáčení se závitovou tyčí. V modulu je ve vzdálenosti 16 mm od jeho osy uložena závitová vložka, do které je našroubována závitová tyč. Excentrické uložení závitové vložky v modulu zajišťuje, že se modul vysouvá a zasouvá bez protáčení.

Při použití nižší nástavby lze modul s výškovým reproduktorem zasouvat v rozsahu 55 mm až -25 mm. Při použití vyšší nástavby lze modul s výškovým reproduktorem zasouvat v rozsahu 55 mm až -15 mm. Kladné číslo značí zasunutí přední hrany modulu s výškovým reproduktorem za přední desku ozvučnice, záporné číslo značí vysunutí před přední desku ozvučnice.

4.3.4 Elektrické zapojení variabilní dvoupásmové reproduktorové soustavy

Ve spodní části zadní strany ozvučnice je umístěn 4-pólový konektor SpeakON. Ten je reproduktorovým kabelem připojen ke svorkám středobasového reproduktoru a ke dvěma konektorům typu „banánek“ v horní části zadní strany ozvučnice. K „banánkům“ lze z vnější strany ozvučnice připojit výškový reproduktor.



Obrázek 4-11 Blokové schéma zapojení reproduktorů ve variabilní dvoupásmové ozvučnici

Blokové schéma zapojení je na obrázku 4-11.



Obrázek 4-12 Konektory ozvučnice středobasového reproduktoru

5 KMITOČTOVÉ A KMITOČTOVĚ-SMĚROVÉ CHARAKTERISTIKY REPRODUKTORŮ VE VARIABILNÍ DVOUPÁSMOVÉ REPRODUKTOROVÉ SOUSTAVĚ

Cílem této kapitoly je analýza vlastností reproduktorů ve variabilní dvoupásmové reproduktorové soustavě a analýza vlivu změny vzájemné topologie reproduktorů v této soustavě. V kapitole 3 bylo popsáno, jaký vliv má vnější tvar reproduktorové ozvučnice na vznik interferencí primárního a sekundárního vlnění. Pro demonstraci tohoto vlivu byly změřeny modulové-kmitočtově směrové charakteristiky reproduktorů ve variabilní dvoupásmové reproduktorové soustavě při různých nastaveních vzájemné topologie reproduktorů.

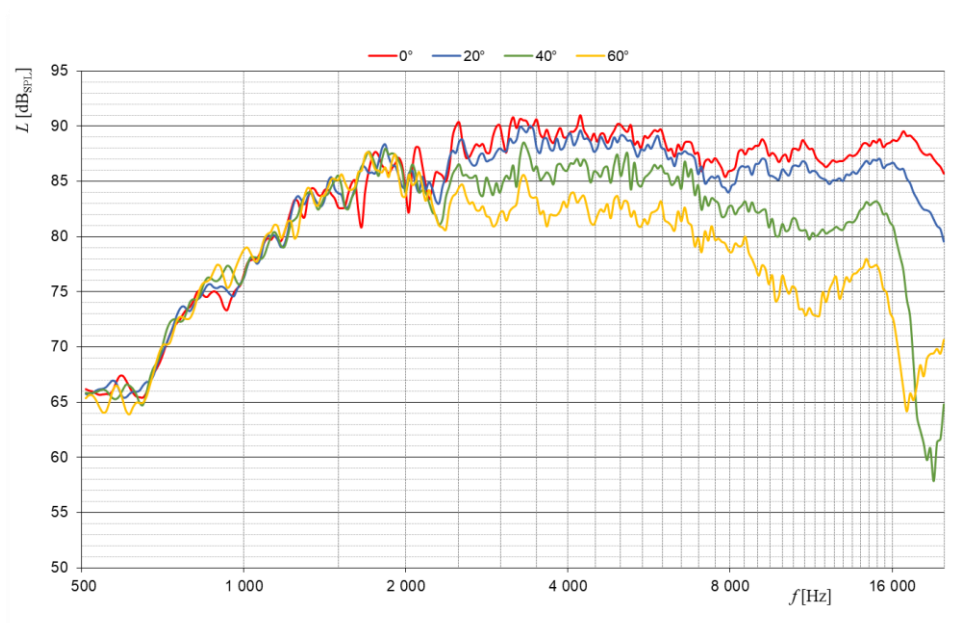
5.1 Měřicí systém a parametry měření kmitočtových a kmitočtově-směrových charakteristik

Všechna měření, jejichž výsledky jsou v této podkapitole prezentovány, byla provedena na měřicím systému Pulse LabShop. Systém je složen z hardwarové a softwarové části. Hardwarová část LAN-XI je analogové rozhraní schopné generovat měřicí signál a zároveň slouží jako předzesilovač měřicího mikrofону. Dále je systém připojen k točně s měřicím mikrofónem, která umožňuje automatická měření směrových a kmitočtově-směrových charakteristik. Softwarová část měřicího systému Pulse LabShop, ovládaná z počítače, nabízí sadu elektroakustických měření. Pro účely této práce byla využita měření modulových kmitočtových charakteristik s možností nastavení otáčení točny s měřicím mikrofónem, čímž byly získány modulové kmitočtově-směrové charakteristiky. Kmitočtový rozsah při měření kmitočtových a kmitočtově-směrových charakteristik samotného středobasového reproduktoru, popřípadě celé reproduktorové soustavy s výhybkou je 20 Hz – 20 kHz. Při měření vlastností výškového reproduktoru byl zvolen kmitočtový rozsah 500 Hz – 20 kHz. Buzení bylo nastaveno na 1,73 V_{RMS}. Tato hodnota odpovídá výkonu 0,5 W výškového reproduktoru DT-25N. Měřicí mikrofón byl umístěn ve vzdálenosti 1 m od přední desky ozvučnice. Výchozí poloha 0° při měření kmitočtově-směrových charakteristik znamená umístění měřicího mikrofónu v geometrické ose reproduktorové soustavy. Všechna měření probíhala v bezodrazové komoře.

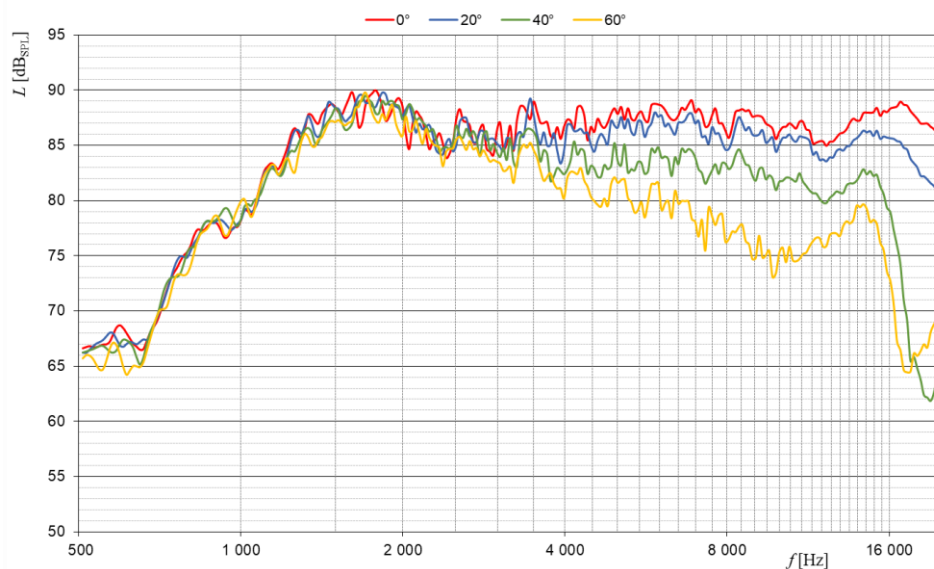
Ve výsledcích měření vertikálních modulových kmitočtově-směrových charakteristik záporné úhly značí umístění měřicího mikrofónu nad geometrickou osou soustavy a kladné úhly umístění pod geometrickou osou soustavy.

5.2 Vliv polohy modulu s výškovým reproduktorem na kmitočtově-směrové charakteristiky výškového reproduktoru ve variabilní dvoupásmové reproduktorové soustavě

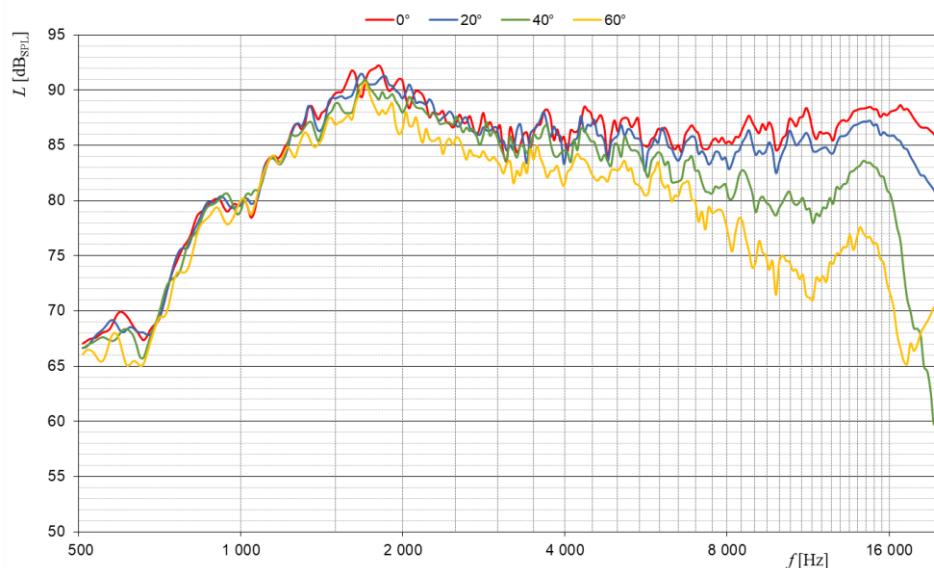
V kapitolách 4.2.1 a 4.2.3 jsou popsány způsoby změny vzájemné topologie reproduktorů ve variabilní dvoupásmové reproduktorové soustavě. Změna vzdálenosti os reproduktorů ve vertikále je prováděna výměnou nastavby s modulem pro výškový reproduktor a jsou k dispozici dvě nastavby pro vzdálenosti os reproduktorů 179 mm a 236 mm. Výškový reproduktor lze vysouvat a zasouvat v jeho ose referenční ose. Změnou polohy modulu s výškovým reproduktorem, popř. výměnou nastavby, dojde ke změně vnějšího tvaru variabilní dvoupásmové reproduktorové soustavy. Způsob vzniku ohybů vlnění na ozvučnici je přímo ovlivněn jejím vnějším tvarem. Při změně vnějšího tvaru ozvučnice tak dojde rozdílnému vlivu interferencí primárního a sekundárního vlnění na modulovou kmitočtově-směrovou charakteristiku soustavy.



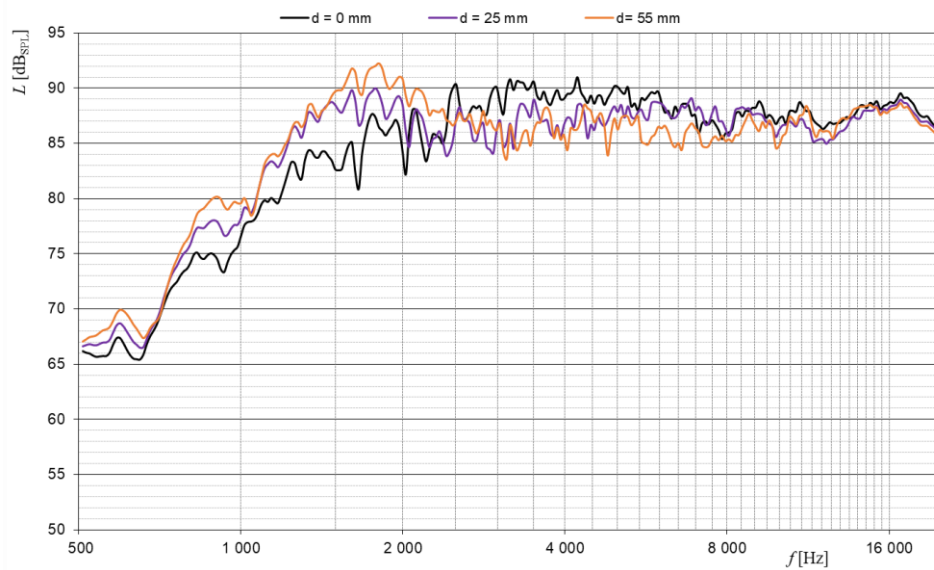
Obrázek 5-1 Horizontální modulová kmitočtově-směrová charakteristika výškového reproduktoru při použití nižší nastavby a vzdálenosti předních hran košů reproduktorů $d_1 = 0$ mm (simulace ozvučnice s rovnou přední deskou)



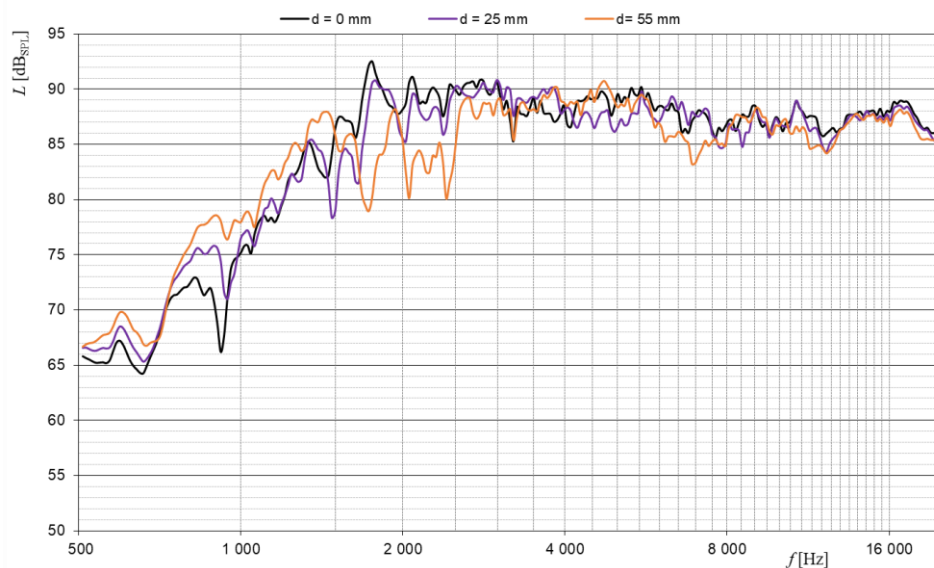
Obrázek 5-2 Horizontální modulová kmitočtově-směrová charakteristika výškového reproduktoru při použití nižší nastavby a vzdálenosti předních hran košů reproduktorů $d_2 = 25 \text{ mm}$ (výškový reproduktor je zasunut vzad)



Obrázek 5-3 Horizontální modulová kmitočtově-směrová charakteristika výškového reproduktoru při použití nižší nastavby a vzdálenosti předních hran košů reproduktorů $d_3 = 55 \text{ mm}$ (výškový reproduktor je zasunut vzad)



Obrázek 5-4 Modulové kmitočtové charakteristiky výškového reproduktoru při použití nižší nastavby a vzdálenostech předních hran košů reproduktorů $d_1 = 0$ mm, $d_2 = 25$ mm a $d_3 = 55$ mm (ve vzdálenostech d_2 a d_3 je výškový reproduktor zasunut vzad)



Obrázek 5-5 Modulové kmitočtové charakteristiky výškového reproduktoru při použití vyšší nastavby a vzdálenostech předních hran košů reproduktorů $d_1 = 0$ mm, $d_2 = 25$ mm a $d_3 = 55$ mm (ve vzdálenostech d_2 a d_3 je výškový reproduktor zasunut vzad)

Na obrázcích 5-1 až 5-4 je patrný vliv posunutí modulu s výškovým reproduktorem. Při zvětšování zasunutí výškového reproduktoru oproti středobasovému reproduktoru za

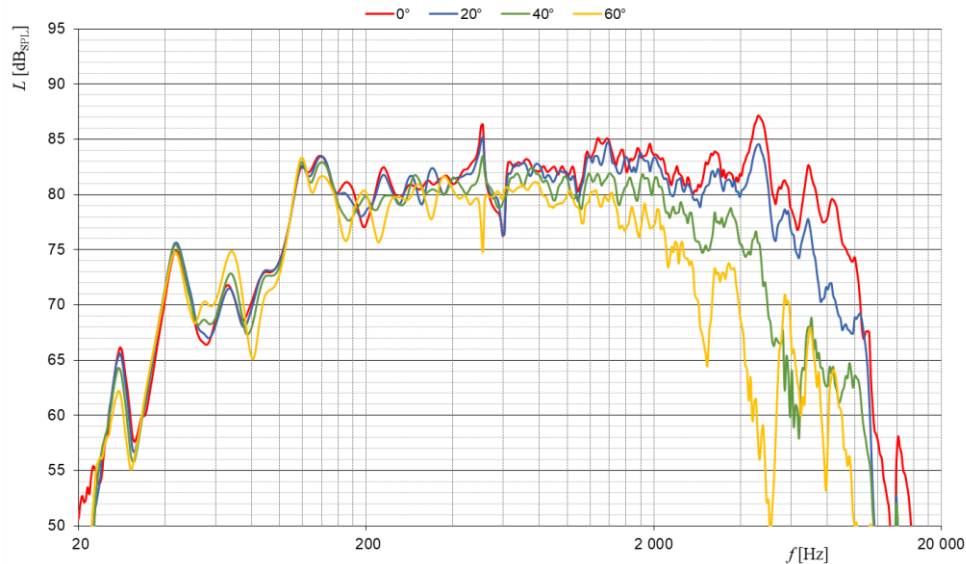
použití nižší nastavby vzniká v modulové kmitočtové charakteristice v 0° nárůst akustického tlaku v okolí 1,7 kHz, patrný na obrázku 5-4. Při srovnání průběhů zasunutí modulu s výškovým reproduktorem do vzdálenosti $d_1 = 0$ mm a $d_3 = 55$ mm je rozdíl v akustických tlacích na tomto kmitočtu $\Delta L_{SPL} = 4$ dB. Při použití vyšší nastavby akustický tlak v okolí kmitočtu 1,7 kHz naopak klesá se zasunutím výškového reproduktoru, viz obrázek 5-5. Tento nárůst citlivosti reproduktoru v okolí 1,7 kHz lze kompenzovat volbou vhodného mezního kmitočtu a dostatečné strmosti horní propusti reproduktorové výhybky. Nad kmitočtem 12 kHz je pak vliv zasunutí na modulovou kmitočtovou charakteristiku v 0° minimální pro obě nastavby.

Na obrázcích 5-1 až 5-4 lze také pozorovat změnu směrovosti výškového reproduktoru se změnou jeho zasunutí. Při vzdálenosti předních hran košů reproduktorů $d_1 = 0$ mm a použití nižší nastavby začíná být reproduktor směrový na kmitočtech vyšších než 2 kHz. Při vzdálenosti předních hran košů reproduktorů $d_1 = 25$ mm začíná být reproduktor při použití nižší nastavby směrový až na kmitočtech nad 3 kHz. V přílohách č. 10 až 12 jsou k nahlédnutí horizontální modulové kmitočtově-směrové charakteristiky výškového reproduktoru ve variabilní dvoupásmové reproduktorové soustavě při použití vyšší nastavby. Tato měření však nepřinesla tak uspokojivé výsledky jako při použití nižší nastavby. Průběhy jsou více zvlněné pro všechna nastavená zasunutí modulu s výškovým reproduktorem. Konfigurace s nižší nastavbou je proto vhodnější pro dosažení vyrovnané modulové-kmitočtově směrové charakteristiky.

Porovnáme-li charakteristiku na obrázku 5-1 s charakteristikou výškového reproduktoru v ozvučnici ve tvaru kapky na obrázku 3-9, lze konstatovat, že předpoklady, podle kterých byl navržen vnější tvar variabilní dvoupásmové reproduktorové soustavy jsou správné. Při umístění výškového reproduktoru do variabilní dvoupásmové reproduktorové soustavy byla zachována proporcionální směrovost, kdy akustický tlak na daném kmitočtu klesá úměrně s úhlem odklonění místa poslechu od geometrické osy reproduktorové soustavy v horizontální rovině. Modulová kmitočtově-směrová charakteristika výškového reproduktoru ve variabilní dvoupásmové reproduktorové soustavě je vyrovnaná bez výrazných špiček a propadů. Bylo tedy dosaženo dobrého rozptylu sekundárního vlnění, jehož interference s primárním vlněním výrazně neovlivňují modulovou kmitočtovou charakteristiku. Toho je dosaženo díky konstrukčním prvkům, které jsou popsány v kapitole 4.1.

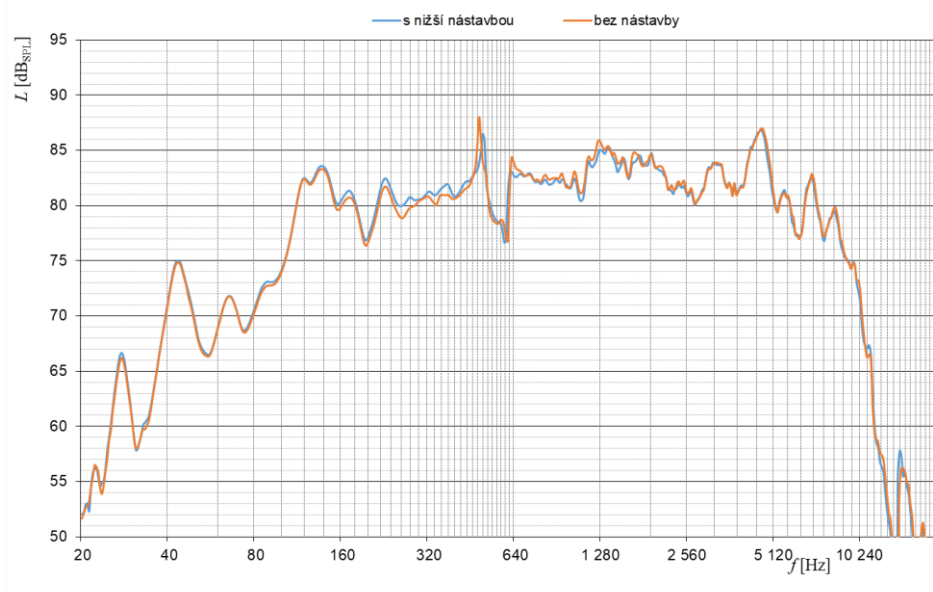
V přílohách č. 4 až 9 jsou vertikální modulové kmitočtově-směrové charakteristiky výškového reproduktoru ve variabilní dvoupásmové reproduktorové soustavě při použití nižší i vyšší nastavby. Nejlepších výsledků vertikální charakteristiky bylo dosaženo při použití nižší nastavby a vzdálenosti předních hran košů reproduktorů $d = 55$ mm (největší zasunutí), viz příloha č. 9. V úhlu -60° (nad geometrickou osou soustavy) vznikají vlivem interferencí primárního a sekundárního vlnění špičky a propady modulové kmitočtové charakteristiky tvořící hřebenový filtr. Tento jev je pozorovatelný u nižší i vyšší nastavby a při všech vzdálenostech předních hran košů reproduktorů.

5.3 Kmitočtově-směrové charakteristiky středobasového reproduktoru ve variabilní dvoupásmové reproduktorové soustavě



Obrázek 5-6 Horizontální modulová kmitočtově-směrová charakteristiky středobasového reproduktoru ve variabilní dvoupásmové reproduktorové soustavě

Na průběhu horizontální modulové kmitočtově-směrové charakteristiky středobasového reproduktoru na obrázku 5-6 lze pozorovat vliv konstrukce ozvučnice na vlastnosti středobasového reproduktoru. Pokles citlivosti na kmitočtech pod 100 Hz je dán vlastnostmi měniče. Na kmitočtech do 400 Hz je vidět poměrně nízká směrovost. Mezi kmitočty 200 Hz a 700 Hz je patrný baffle step. Prudký nárůst a pokles citlivosti mezi 500 Hz a 600 Hz patrný na 0°, 20° a 40° je nežádoucí jev, který vzniká při použití dané ozvučnice. Jeho příčinu se nepodařilo zjistit ani odstranit. Na kmitočtech nad 1 kHz vzrůstá směrovost reproduktoru v ozvučnici. Směrovost je proporcionální a hladina akustického tlaku na daném kmitočtu klesá s úměrně s úhlem mezi místem poslechu a geometrickou osou soustavy.



Obrázek 5-7 Modulová kmitočtová charakteristika středobasového reproduktoru ve variabilní dvoupásmové reproduktorové soustavě při použití nižší nastavby a bez nastavby

Odejmutí nastavby, a tím způsobená změna vnějšího tvaru ozvučnice, nemá zásadní vliv na modulovou kmitočtovou charakteristiku středobasového reproduktoru ve variabilní dvoupásmové reproduktorové soustavě, viz obrázek 5-7.

V příloze č. 3 jsou vertikální modulové kmitočtově-směrové charakteristiky středobasového reproduktoru ve variabilní dvoupásmové reproduktorové soustavě. Je zde vidět poměrně nízká směrovost mezi kmitočty 200 Hz a 2 kHz. Nad geometrickou osou soustavy lze při stejném kmitočtu pozorovat nižší hladiny akustického tlaku než nad ní. To je způsobeno 45° zkosením nastavby. Odrazy zvukového vlnění od zkosené nastavby jsou totiž více rozptýleny do prostoru než odrazy od rovné části přední desky pod geometrickou osou soustavy.

6 VOLBA PARAMETRŮ AKTIVNÍ VÝHYBKY PRO DVOUPÁSMOVOU REPRODUKTOROVOU SOUSTAVU

V této kapitole bude popsáno vhodné nastavení aktivní parametrické výhybky používané s vyrobenou variabilní dvoupásmovou reproduktorovou soustavou. Výhybka byla vyrobena v rámci jiné diplomové práce. Motivací k nastavení vhodných parametrů aktivní výhybky je dosažení vyrovnaného a proporcionálního průběhu modulové kmitočtově-směrové charakteristiky variabilní dvoupásmové reproduktorové soustavy.

Výhybka je sestavena ze dvou řetězců chain 1 a chain 2. Chain 1 je primárně určen pro připojení středobasového reproduktoru a chain 2 pro připojení výškového reproduktoru. Do jednotlivých řetězců lze vkládat moduly s různými obvody. K dispozici jsou moduly horních a dolních propustí. Dále modul pro kompenzaci baffle stepu a fázovací článek pro kompenzaci skupinového zpoždění. Výhybka podporuje symetrický i nesymetrický vstup s možností nastavení vstupního zisku v rozsahu -7,5 dB až 9 dB s krokem 1,5 dB a nabízí linkový výstup i výstup koncového zesilovače. Oba výstupy mohou pracovat zároveň. Chain 2 nabízí možnost atenuace výstupního signálu v rozsahu 0 dB až -11 dB pro kompenzaci odlišné citlivosti výškového a středobasového reproduktoru. V následujících podkapitolách jsou jednotlivé funkce a moduly aktivní parametrické výhybky rozebrány podrobněji.

6.1 Volba vhodného mezního kmitočtu, aproximace přenosové funkce a řádu filtrů aktivní parametrické výhybky

Na aktivní výhybce jsou k dispozici moduly horních a dolních propustí s aproximací dle Butterwortha 3. řádu a Linkwitz-Riley 2. a 4. řádu. Na každém modulu lze volit tyto mezní kmitočty 1,8 kHz, 2,1 kHz, 2,4 kHz, 2,7 kHz, 3,1 kHz, 3,6 kHz. Lze tedy sestavit výhybku, ve které se liší aproximace, řád i mezní kmitočty horní a dolní propusti.

Pro horní i dolní propust výhybky byl zvolen mezní kmitočet 2,4 kHz, který souvisí s vertikální vzdáleností os reproduktorů ve variabilní dvoupásmové reproduktorové soustavě za použití nižší nastavy. Vztah vertikální vzdálenosti os reproduktorů a mezního kmitočtu výhybky je popsán v kapitole 2.4. Byly zvoleny filtry 4. řádu s aproximací Linkwitz-Riley. Ty zajišťují vyrovnanou modulovou kmitočtovou charakteristiku v okolí mezního kmitočtu, správné směřování hlavního laloku vertikální směrové charakteristiky a dostatečnou strmost. Oproti filtrům 2. řádu se stejnou aproximací by také měly zaručit menší směrovost a vyrovnanější modulovou kmitočtovou charakteristiku soustavy při odklonu od referenční osy, viz kapitola 1.5.4.

6.2 Volba vhodného nastavení Baffle step kompenzace

Na nízkých kmitočtech, kdy jsou rozměry ozvučnice malé vůči vlnové délce, vyzařuje reproduktor do celého prostoru. Na vyšších kmitočtech, jejichž vlnová délka je

srovnatelná s rozměry ozvučnice, je vyzařování omezeno do poloprostoru vymezeného rovinou přední desky ozvučnice. Stejný výkon je tak vyzářen do polovičního prostoru. Na kmitočtech, jejichž vlnová délka je menší, než je rozměr ozvučnice, to má za následek zvýšení citlivosti reproduktoru umístěného v dané ozvučnici.

Modul pro kompenzaci baffle stepu je realizací low shelving filtru s možností nastavení zisku. V propustném pásmu je možné nastavit zisk 0 dB až 9 dB s krokem 3 dB. V nepropustném pásmu je přenos modulu 0 dB. Na modulu lze také nastavit kmitočet, na kterém klesne nastavený zisk na polovinu v rozsahu 200 Hz až 900 Hz.

Na obrázku 5-6 v kapitole 5.3 je horizontální modulová kmitočtově směřová charakteristika středobasového reproduktoru ve variabilní dvoupásmové reproduktorové soustavě. Na průběhu měřeném v 0° lze pozorovat klesání hladiny akustického tlaku na kmitočtech nižších než 600 Hz vlivem baffle stepu a nižší citlivosti reproduktoru na nízkých kmitočtech. V okolí kmitočtu $f_1 = 260$ Hz je hladina akustického tlaku o zhruba 1,5 dB nižší než v okolí kmitočtu $f_2 = 800$ Hz. Jako kmitočet, na kterém klesne zisk baffle step kompenzace na polovinu byl vybrán kmitočet f_1 a zisk baffle step kompenzace byl nastaven na +3 dB.

6.3 Volba vhodné atenuace výškového reproduktoru

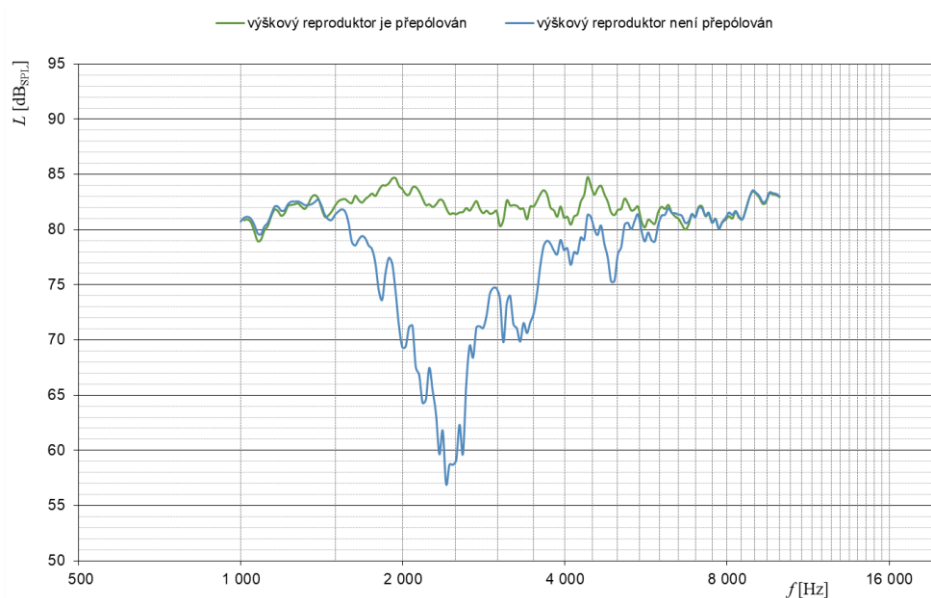
Výškové reproduktory mají obecně vyšší citlivost než reproduktory středobasové. Proto je na chainu 2 aktivní parametrické výhybky možnost nastavení atenuace v rozsahu 0 dB až -11 dB s krokem 1 dB. Správným nastavením atenuace výškového reproduktoru je možné vykompenzovat rozdílné citlivosti výškového a středobasového reproduktoru a dosáhnout tak vyrovnanějšího průběhu modulové kmitočtové charakteristiky.

V reproduktorové soustavě vyrobené v rámci této práce je použit středobasový reproduktor Monacor SPH-170 a výškový reproduktor Monacor DT-25N. Dle výrobce je citlivost středobasového reproduktoru 90 dB_{SPL}, zatímco citlivost výškového reproduktoru je 95 dB_{SPL}. Citlivost reproduktorů je však kmitočtově závislá. Citlivost výškového reproduktoru se navíc mění se změnou polohy modulu s výškovým reproduktorem ve variabilní dvoupásmové reproduktorové soustavě, viz kapitola 5.2. Na průběh modulové kmitočtové charakteristiky dvoupásmové soustavy má vliv také řád, aproximace a mezní kmitočet reproduktorové výhybky. Ideální nastavení atenuace výškového reproduktoru bude proto odlišné pro různé konfigurace systému. Pro konfiguraci s nižší nástavbou, filtry 4. řádu s aproximacemi Linkwitz-Riley a mezním kmitočtem 2,4 kHz, nastavením baffle step kompenzace dle předchozí podkapitoly a vzdálenosti předních hran košů reproduktorů $d = 42$ mm (popsáno v následující podkapitole) byla na základě změřených průběhů reproduktorů zvolena atenuace výškového reproduktoru 5 dB.

6.4 Určení místa nulového rozdílu skupinových zpoždění výškového a středobasového reproduktoru ve variabilní dvoupásmové reproduktorové soustavě

Návrhy přenosových funkcí reproduktorové výhybky popsané v kapitole 1.4.1 uvažují

nulový rozdíl skupinových zpoždění výškového a středobasového reproduktoru. Nebude-li tato podmínka splněna, a v místě poslechu vznikne fázový posuv mezi výškovým a středobasovým reproduktorem, dojde v okolí mezního kmitočtu ke zvlnění modulové kmitočtové charakteristiky. V případě variabilní dvoupásmové reproduktorové soustavy tedy změnou zasunutí modulu s výškovým reproduktorem měníme rozdíl skupinových zpoždění výškového a středobasového reproduktoru. V praxi je problémem najít takové zasunutí výškového reproduktoru, aby referenční body výškového a středobasového reproduktoru ležely v ose kolmé k horizontální rovině. Referenční body reproduktorů, jakožto místa vzniku vlnění v měničích, totiž nejsou v tomto případě výrobcem stanoveny. Empiricky lze správné zasunutí modulu s výškovým reproduktorem najít tak, že je zvolena taková polarizace reproduktorů, aby byly reproduktory při použití výhybky s daným řádem na mezním kmitočtu v protifázi, tzn. jejich fázový rozdíl byl $\Delta\varphi = 180^\circ \cdot (2k + 1)$; $k \in N_0$. [6] To v ose nulového rozdílu skupinových zpoždění reproduktorů způsobí propad v modulové kmitočtové charakteristice na mezním kmitočtu. Tento způsob však funguje pouze s výhybkou sudého řádu, při stejné aproximaci a mezním kmitočtu horní a dolní propusti.

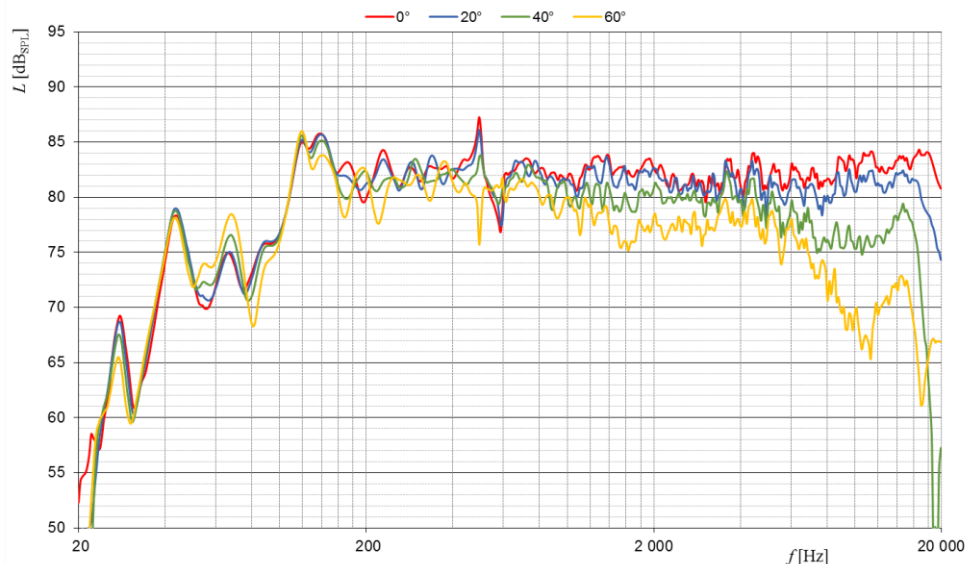


Obrázek 6-1 Test nulového rozdílu skupinových zpoždění mezi výškovým a středobasovým reproduktorem při použití aproximace Linkwitz-Riley 2. řádu s mezním kmitočtem 2,4 kHz, nízké nastavby a vzdálenosti předních hran košů reproduktorů $d = 42$ mm (výškový reproduktor je zasunut vzad)

Na obrázku 6-1 je změřená modulová kmitočtová charakteristika variabilní reproduktorové soustavy při použití výhybky s aproximacemi Linkwitz-Riley 2. řádu. Při použití výhybky tohoto řádu je na mezním kmitočtu rozdíl fází výškového a středobasového reproduktoru $\Delta\varphi = 180^\circ$. Není-li jeden z reproduktorů přepólován, vzniká na ose nulového rozdílu skupinových zpoždění reproduktorů 25 dB propad v modulové kmitočtové charakteristice na mezním kmitočtu.

6.5 Modulová kmitočtově-směrová charakteristika variabilní dvoupásmové reproduktorové soustavy s vhodně nastavenou aktivní parametrickou výhybkou

Na základě měření uvedených v kapitole 5 bylo zvoleno vhodné nastavení aktivní parametrické výhybky pro dosažení vyrovnané a proporcionálně směrové modulové kmitočtově-směrové charakteristiky vyrobené reproduktorové soustavy. Výhybka byla odladěna pro konfiguraci s nižší nastavbou při vzdálenosti os reproduktorů ve vertikální ose 179 mm. Nižší nastavba totiž vykazuje vyrovnanější průběhy modulových kmitočtově-směrových charakteristik při různých zasunutích než nastavba vyšší. Bylo nastaveno takové zasunutí modulu, které zajišťuje nulový fázový rozdíl reproduktorů na geometrické ose soustavy. Díky tomu je dosaženo vyrovnaného průběhu modulové kmitočtové charakteristiky soustavy v okolí mezního kmitočtu. Toto zasunutí odpovídá vzdálenosti předních hran košů $d = 42$ mm a bylo určeno metodou popsanou v kapitole 6.4.



Obrázek 6-2 Modulová kmitočtově-směrová charakteristika variabilní reproduktorové soustavy při použití aktivní parametrické výhybky

Variabilní dvoupásmová reproduktorová soustava s vhodně nastavenou aktivní parametrickou výhybkou byla podrobena měření horizontální modulové-kmitočtově směrové charakteristiky, viz obrázek 6-2. V průběhu je vidět nízká směrovost do 600 Hz. Nad tímto kmitočtem začne být soustava směrová, avšak proporcionálně. Akustický tlak na daném kmitočtu klesá úměrně s úhlem odklonění místa poslechu od geometrické osy reproduktorové soustavy v horizontální rovině. Tento jev lze pozorovat i u ozvučnice tvaru kapky popisované v kapitole 3.3. Díky této proporcionalitě není narušen zvukový obraz v prostoru. Mezi 500 Hz a 600 Hz vzniká strmý zákmit, jehož konkrétní příčina nebyla nalezena. Je však způsoben danou ozvučnicí. Jinak je průběh v 0° poměrně vyrovnaný bez výrazných špiček a propadů. Preciznějšího odladění celého systému by mohlo být dosaženo za použití rezonátorů a antirezonátorů pro lokální vyrovnaní.

ZÁVĚR

V rámci práce byla navržena a vyrobena variabilní dvoupásmová reproduktorová soustava s možností změny vzájemné topologie středobasového a výškového reproduktoru. Tento vyrobený přípravek je parametrický. V horizontální rovině je možné měnit polohu výškového reproduktoru vůči středobasovému vysunutím modulu, ve kterém je výškový reproduktor uložen. Ve vertikální rovině lze nastavit dvě vzdálenosti os reproduktorů výměnou celé horní nástavby ozvučnice. Výrobek splňuje kritéria dle zadání a je plně funkční. Popis jeho návrhu a konstrukce je v kapitole 4.

Výrobek byl podroben měření kmitočtově-směrových charakteristik. Ty dokázaly, že vnější tvar vyrobené variabilní dvoupásmové reproduktorové soustavy zajišťuje její proporcionální směrovost a přispívá k minimalizaci závislosti akustického tlaku na kmitočtu reprodukováného signálu. Lze tedy konstatovat, že předpoklady z teoretického úvodu této práce jsou správné.

V rámci práce byly také vytvořeny dvě laboratorní úlohy. První z nich se zabývá vlivem vnějšího tvaru ozvučnice na vlastnosti reproduktoru v ní uloženého. V úloze jsou změřeny modulové kmitočtově-směrové charakteristiky různých tvarů ozvučnic při použití stejného reproduktoru. Je tak demonstrován rozdílný vliv interferencí primárního a sekundárního vlnění na modulovou kmitočtově-směrovou charakteristiku při změně vnějšího tvaru ozvučnice. Druhá laboratorní úloha se zabývá vhodným nastavením aktivní parametrické výhybky pro variabilní dvoupásmovou reproduktorovou soustavu. Je zde demonstrován vliv správného nastavení baffle step korekce a kompenzace rozdílné citlivosti středobasového a výškového reproduktoru na modulovou kmitočtovou charakteristiku. Je zde také představen způsob, kterým lze najít takovou vzájemnou topologii reproduktorů, při které v geometrické ose soustavy nevzniká fázový rozdíl mezi výškovým a středobasovým reproduktorem a způsob elektronické kompenzace rozdílu skupinových zpoždění reproduktorů.

LITERATURA

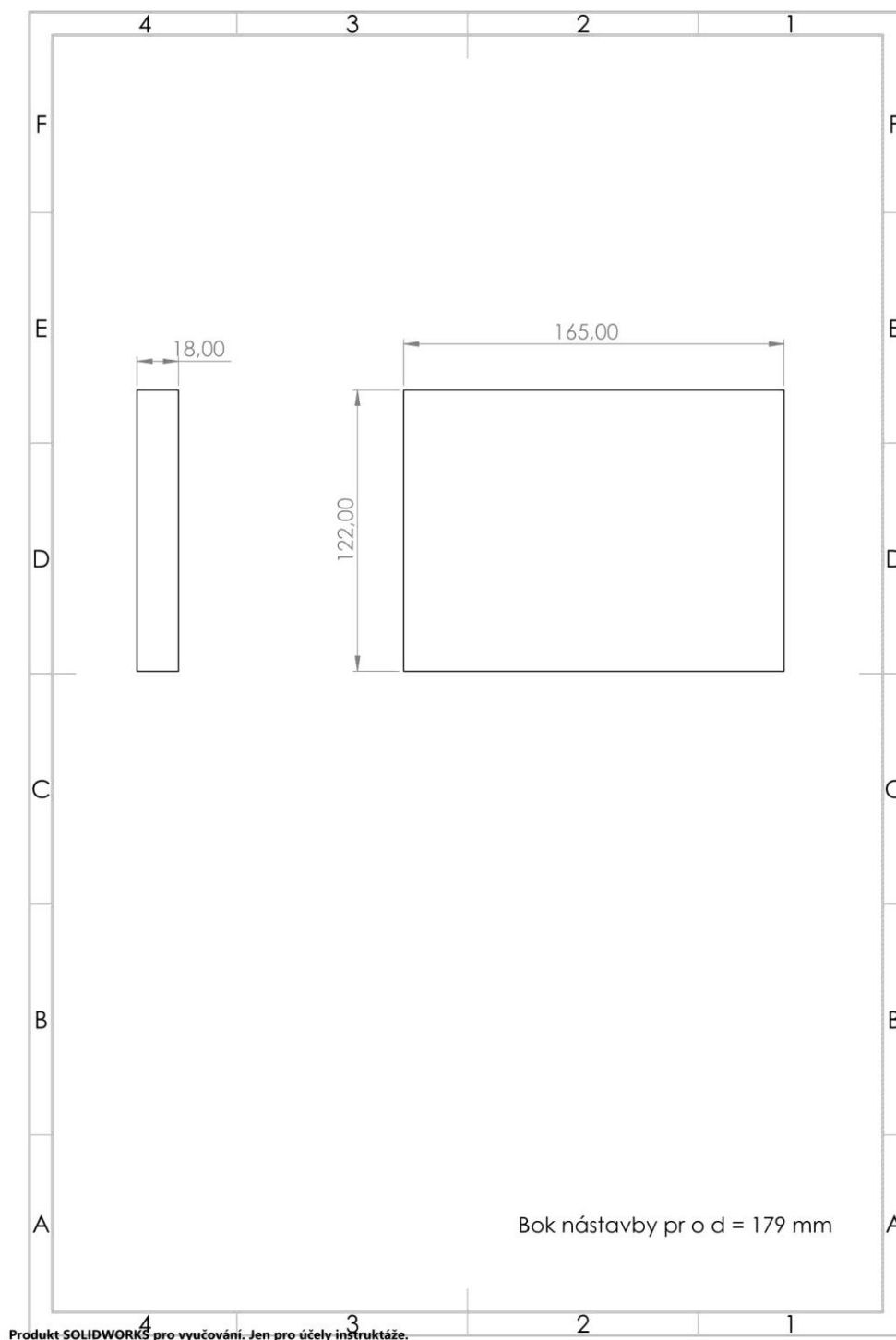
- [1] OLSON, Harry F. *Direct Radiator Loudspeaker Enclosures* [online]. 1951 [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: http://www.dwdrums.com/images/moonmic/olson_direct-radiator-loudspeaker-enclosures.pdf
- [2] TOMAN, Kamil. *Reproduktory a reprosoustavy II*. [Česko: s.n.], c2010. ISBN 978-80-254-9510-0.
- [3] BORWICK, John. *Loud speaker and headphone handbook*. 3rd ed. Boston: Focal Press, 2001. ISBN 0240515781.
- [4] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jerl WALKER. *Fundamental of Physics*. 11. New York, London, and Sydney: John Wiley, 2018. ISBN 9781118230718.
- [5] *Linkwitz-Riley Crossovers: A Primer* [online]. Cumberland, USA: RaneNote, 2005 [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: <https://www.rane.com/note160.html>
- [6] CALDWELL, John. *Analog, Active Crossover Circuit for Two-Way Loudspeakers*. Dallas, Texas: Texas Instruments, 2013, , 1-38.
- [7] COLLOMS, Martin a Paul DARLINGTON. *High performance loudspeakers*. 7th edition. Hoboken, NJ: John Wiley, 2018. ISBN 9781118413531.
- [8] VISATON FR 10 - 8 Ohm. In: *LoudspeakerDatabase* [online]. USA, 2019 [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: <http://www.loudspeakerdatabase.com/VISATON/FR10#8%CE%A9>
- [9] NIELSEN, Tore A. *Loudspeaker crossover networks* [online]. Denmark, 2005 [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: <http://www.torean.dk/artikel/Crossover.pdf>. Technical University of Denmark.
- [10] EARGLE, John. *Loudspeaker handbook*. 2nd ed. Boston: Kluwer Academic Publishers, c2003. ISBN 978-1402075841.
- [11] *Active Crossover Networks for Noncoincident Drivers* [online]. Santa Rosa, California: Hewlett-Packard Company, 1976 [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=2649>
- [12] PEŠEK, Marko. *Modulární systém pro měření charakteristik dvoupásmových reproduktorových soustav*. Brno, 2019. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [13] SCHIMMEL, Jiří. *Elektroakustika: Laboratorní úloha č. 9 Měření charakteristik reproduktorových soustav*. Vysoké učení technické v Brně, 2018.

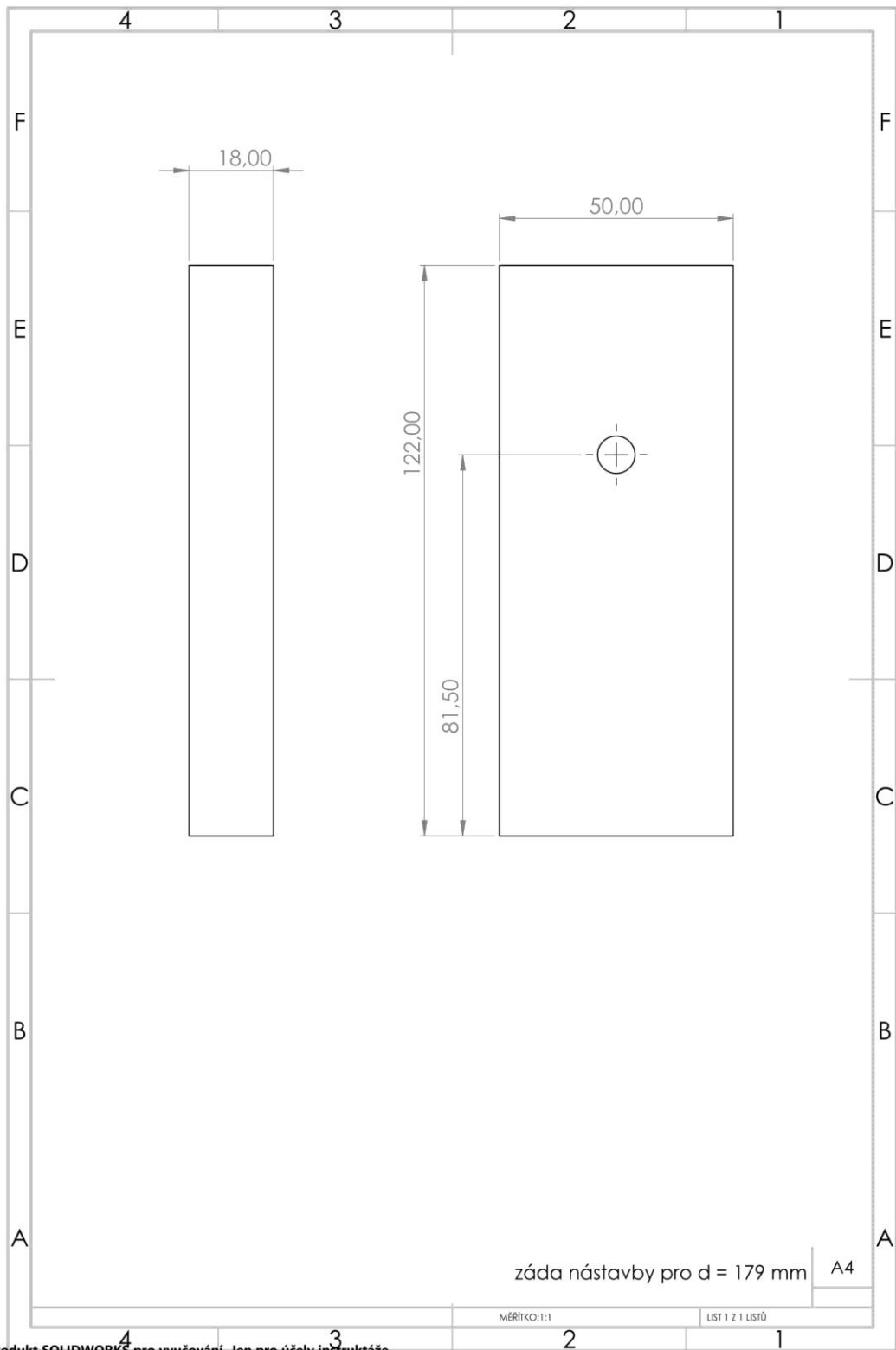
SEZNAM PŘÍLOH

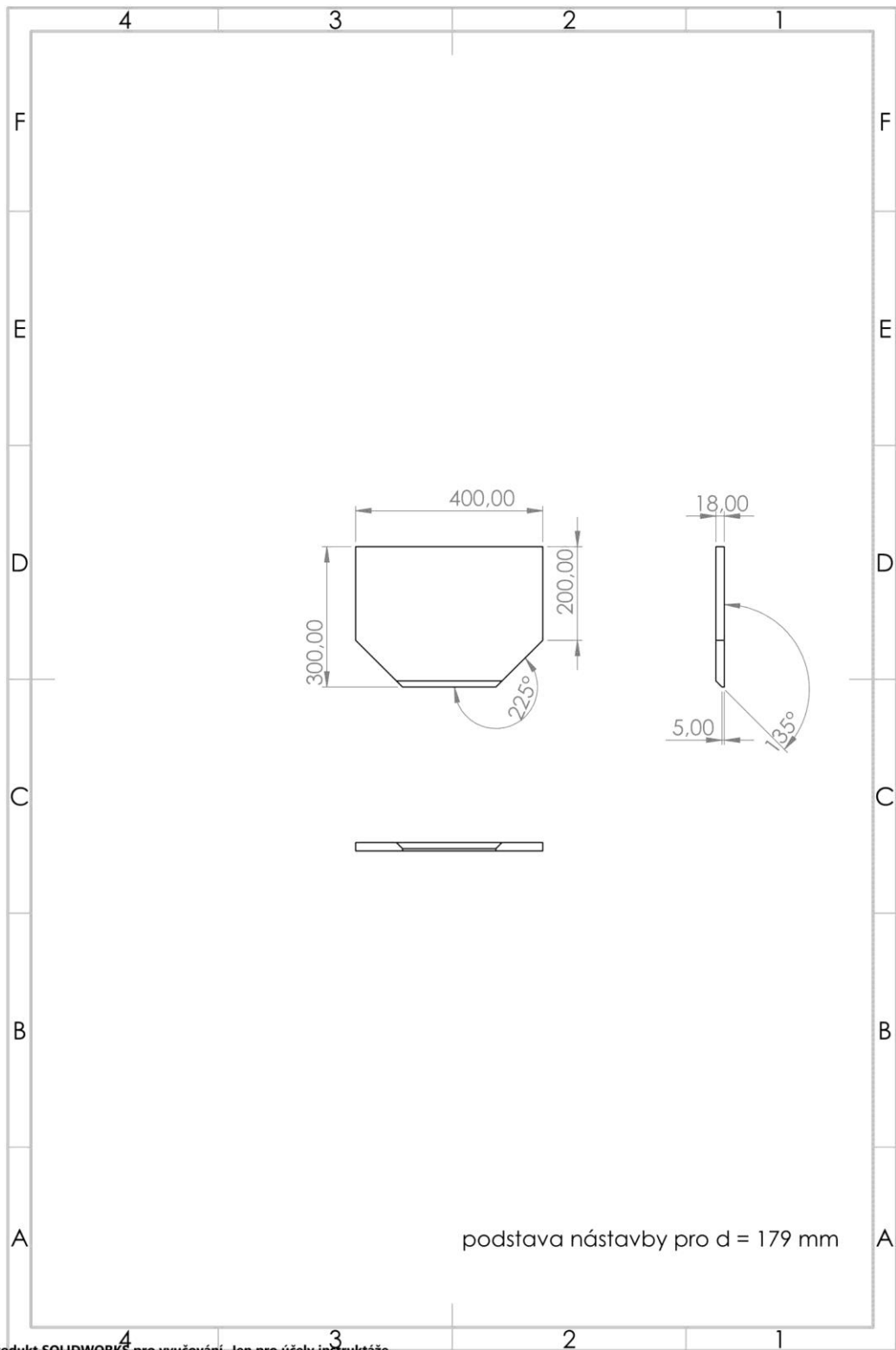
Příloha č. 1 výkresy dílů nastavby pro vzdálenost reproduktorů ve vertikále $d = 179$ mm.....	58
Příloha č. 2 výkresy dílů nastavby pro vzdálenost reproduktorů ve vertikále $d = 236$ mm.....	64
Příloha č. 3 Vertikální modulové kmitočtově-směrové charakteristiky středobasového reproduktoru ve variabilní dvoupásmové reproduktorové soustavě.....	71
Příloha č. 4 Vertikální modulové kmitočtově-směrové charakteristiky výškového reproduktoru ve variabilní dvoupásmové reproduktorové soustavě při použití nižší nastavby a vzdálenosti předních hran košů reproduktorů $d = 0$ mm	73
Příloha č. 5 Vertikální modulové kmitočtově-směrové charakteristiky výškového reproduktoru ve variabilní dvoupásmové reproduktorové soustavě při použití nižší nastavby a vzdálenosti předních hran košů reproduktorů $d = 25$ mm	75
Příloha č. 6 Vertikální modulové kmitočtově-směrové charakteristiky výškového reproduktoru ve variabilní dvoupásmové reproduktorové soustavě při použití nižší nastavby a vzdálenosti předních hran košů reproduktorů $d = 55$ mm	77
Příloha č. 7 Vertikální modulové kmitočtově-směrové charakteristiky výškového reproduktoru ve variabilní dvoupásmové reproduktorové soustavě při použití vyšší nastavby a vzdálenosti předních hran košů reproduktorů $d = 0$ mm	79
Příloha č. 8 Vertikální modulové kmitočtově-směrové charakteristiky výškového reproduktoru ve variabilní dvoupásmové reproduktorové soustavě při použití vyšší nastavby a vzdálenosti předních hran košů reproduktorů $d = 25$ mm	81
Příloha č. 9 Vertikální modulové kmitočtově-směrové charakteristiky výškového reproduktoru ve variabilní dvoupásmové reproduktorové soustavě při použití vyšší nastavby a vzdálenosti předních hran košů reproduktorů $d = 55$ mm	83
Příloha č. 10 Horizontální modulová kmitočtově-směrová charakteristika výškového reproduktoru ve variabilní dvoupásmové reproduktorové soustavě při použití vyšší nastavby a vzdálenosti předních hran košů reproduktorů $d = 0$ mm	85
Příloha č. 11 Horizontální modulová kmitočtově-směrová charakteristika výškového reproduktoru ve variabilní dvoupásmové reproduktorové soustavě při použití vyšší nastavby a vzdálenosti předních hran košů reproduktorů $d = 25$ mm	85
Příloha č. 12 Horizontální modulová kmitočtově-směrová charakteristika výškového reproduktoru ve variabilní dvoupásmové reproduktorové soustavě při použití vyšší nastavby a vzdálenosti předních hran košů reproduktorů $d = 55$ mm	86

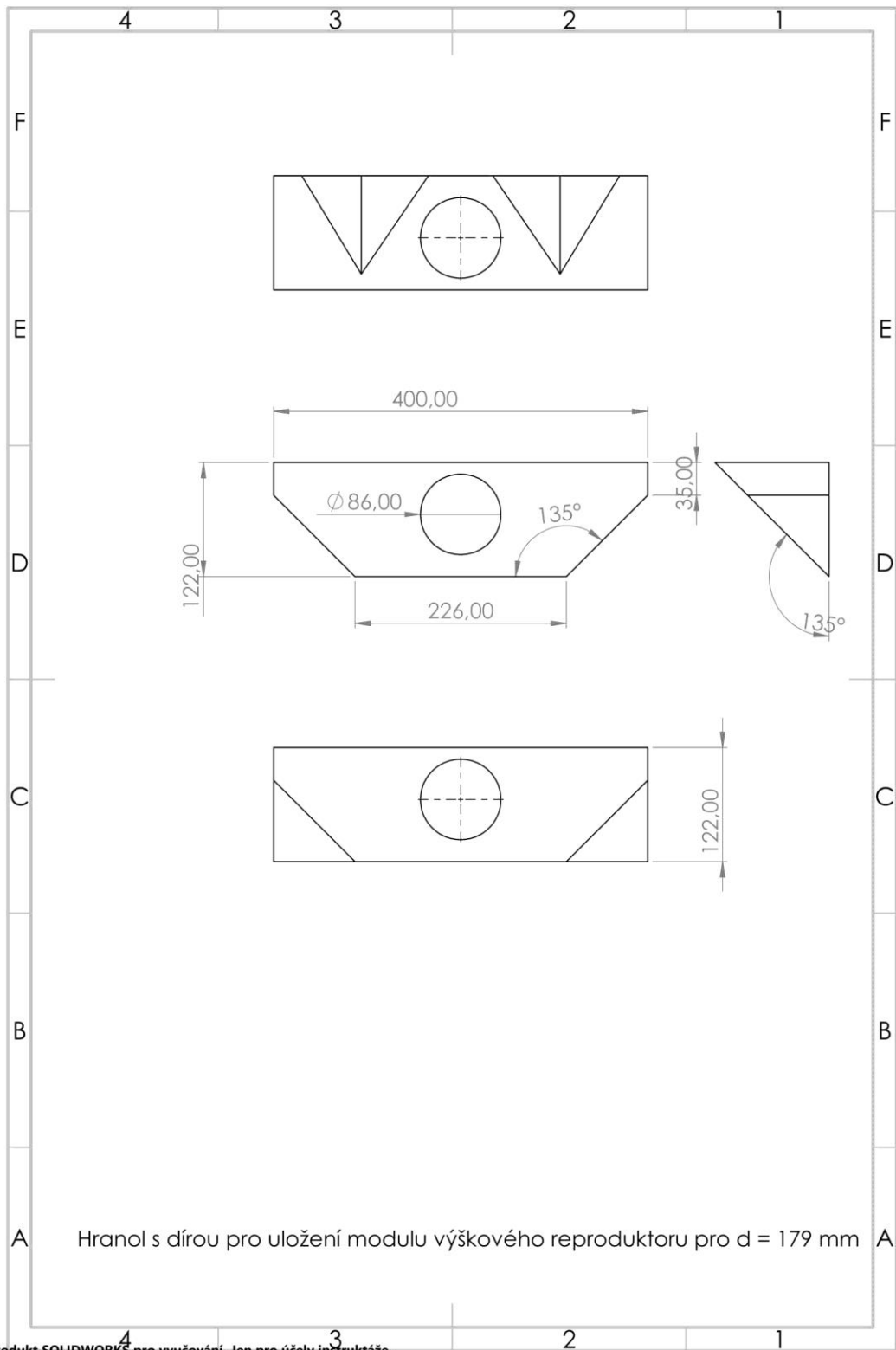
Laboratorní úlohy jsou přiloženy zvlášť.

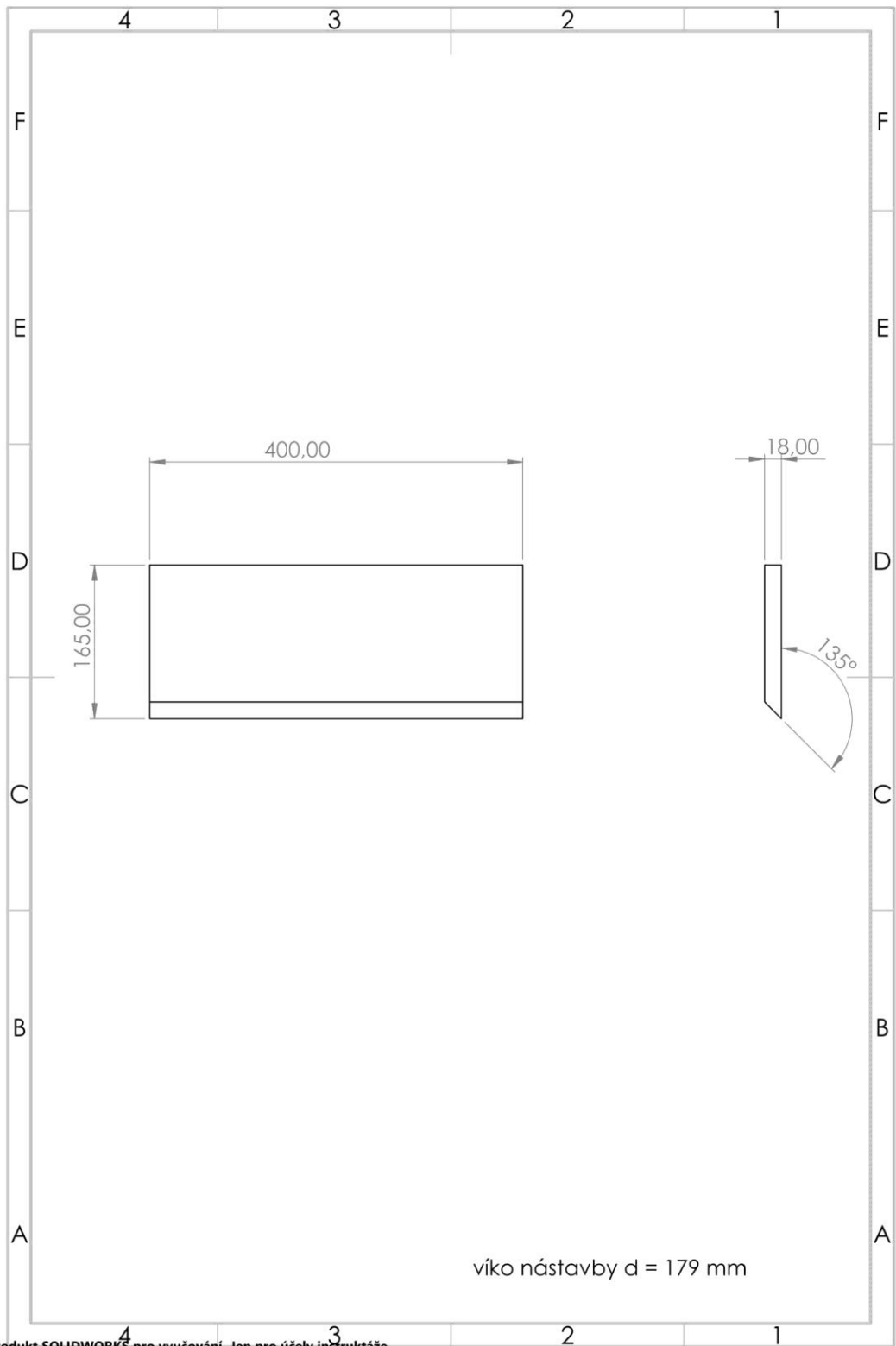
Příloha č. 1 výkresy dílů nástavby pro vzdálenost reproduktorů ve vertikále $d = 179$ mm



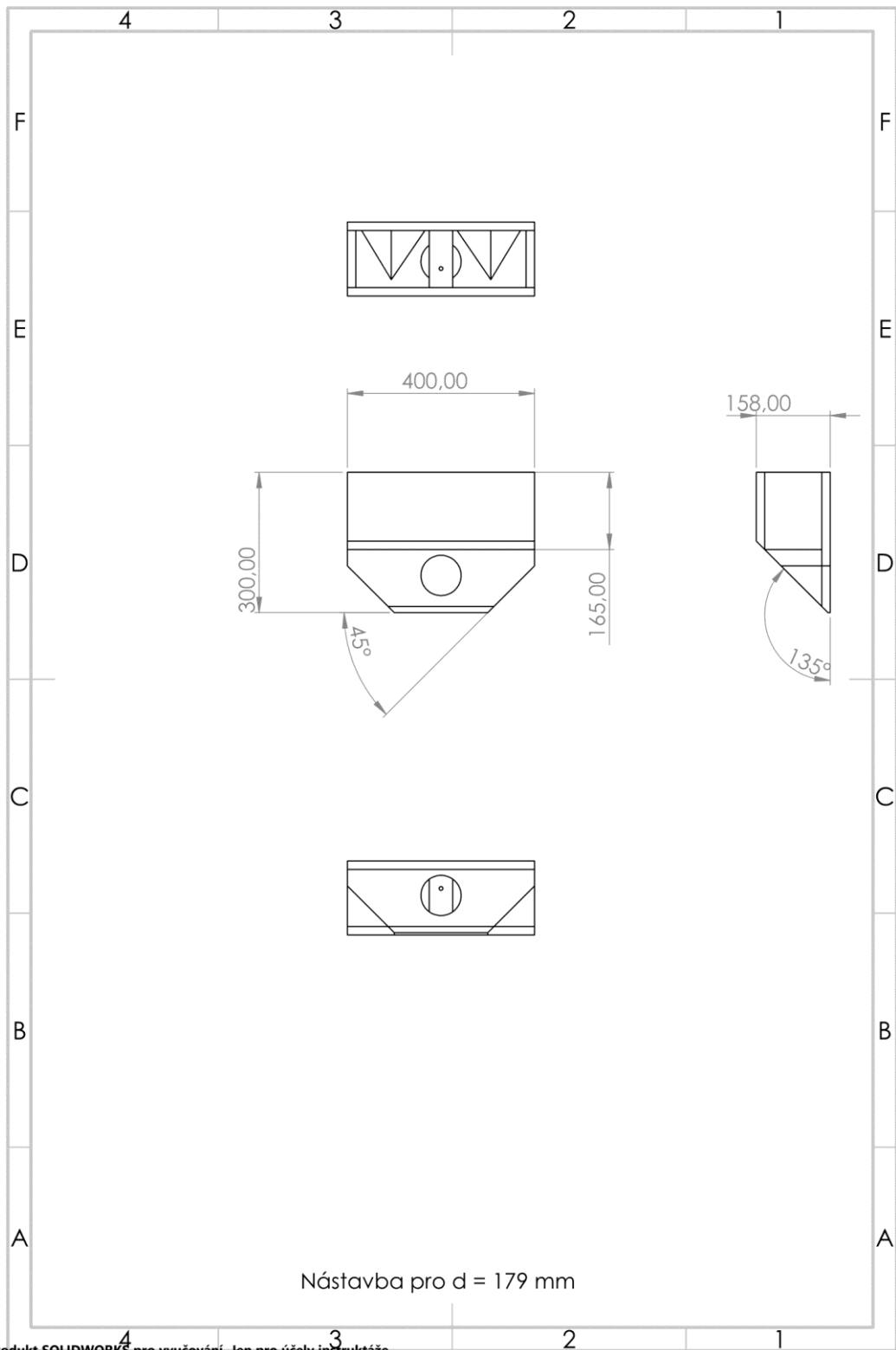




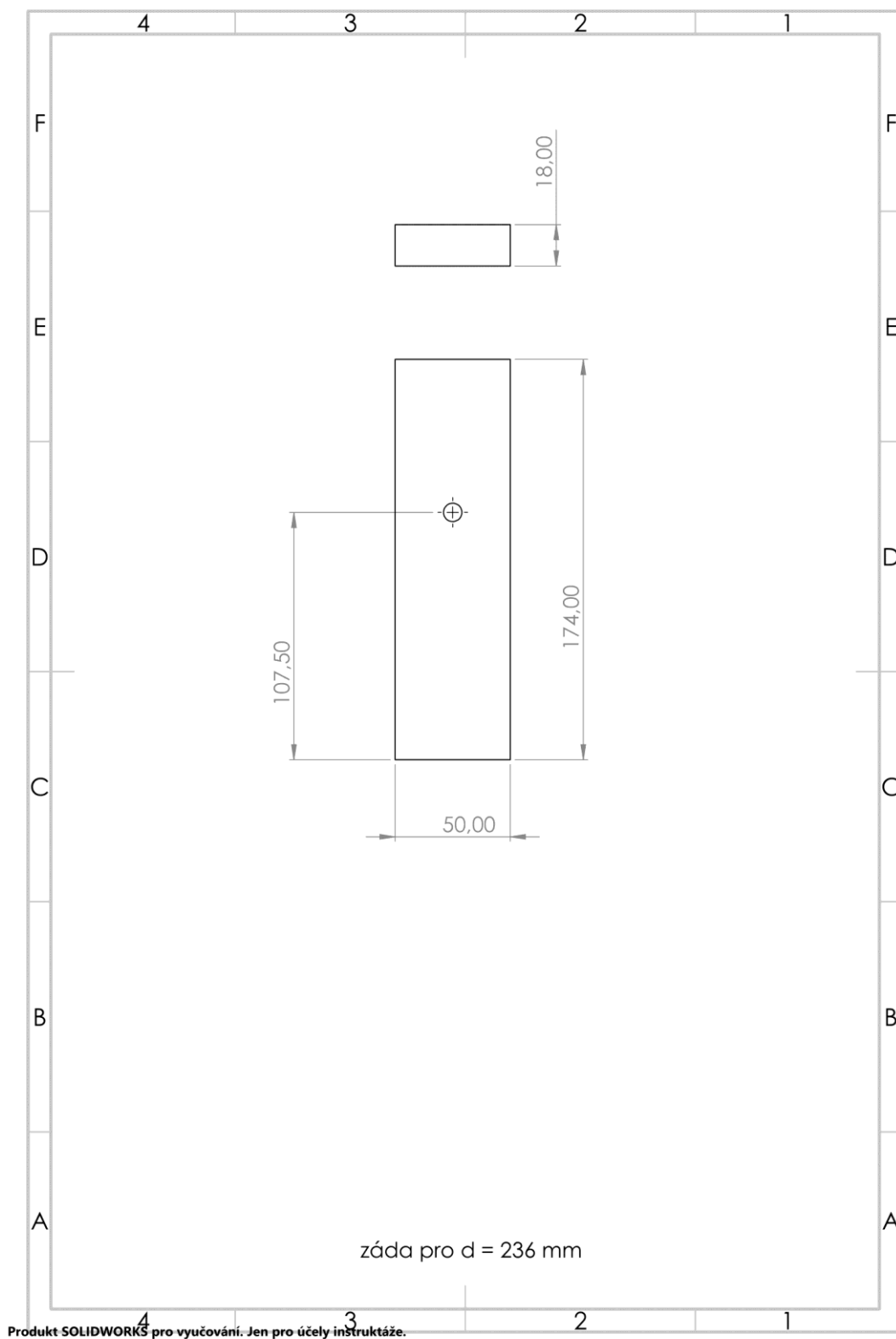


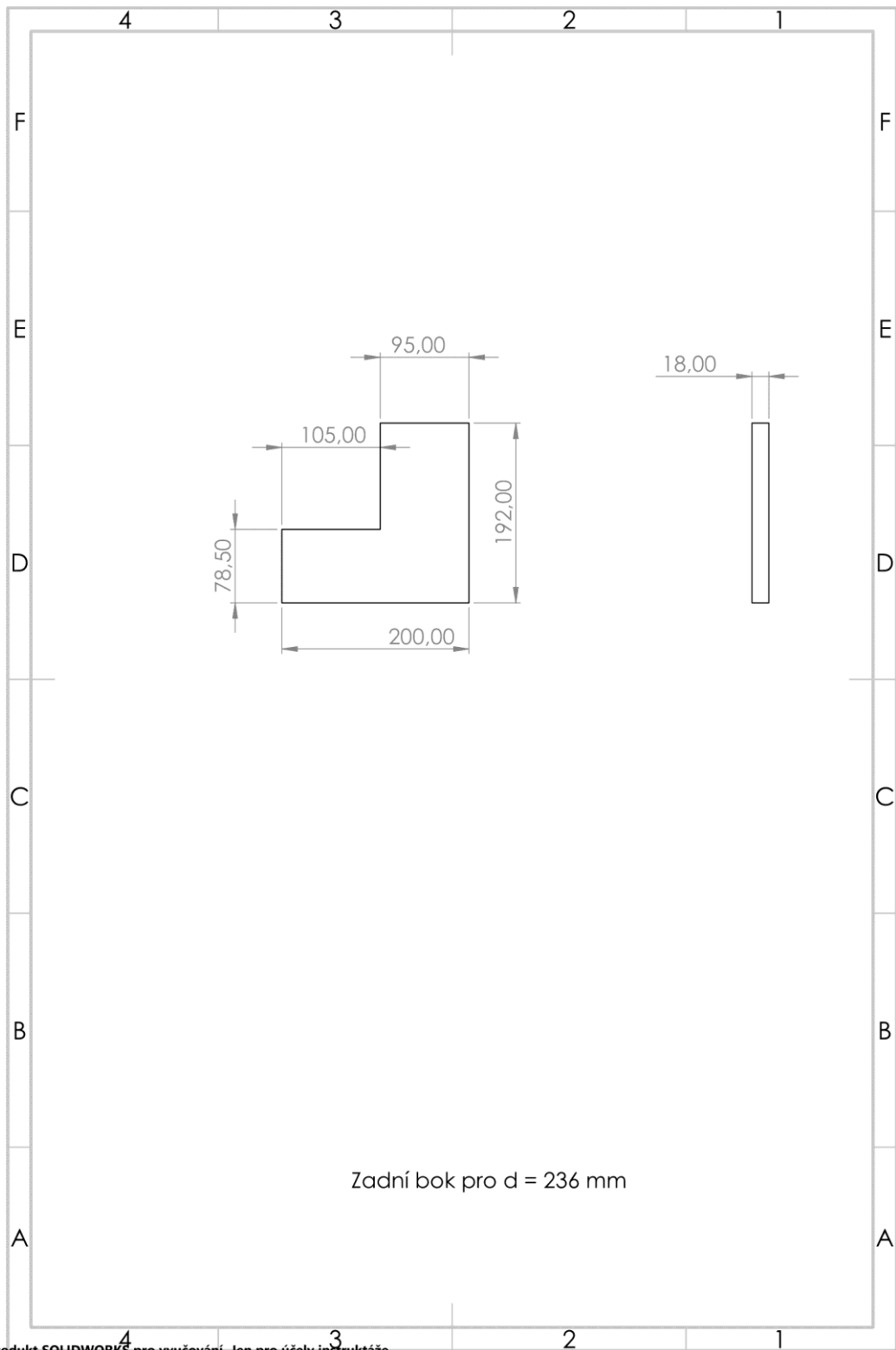


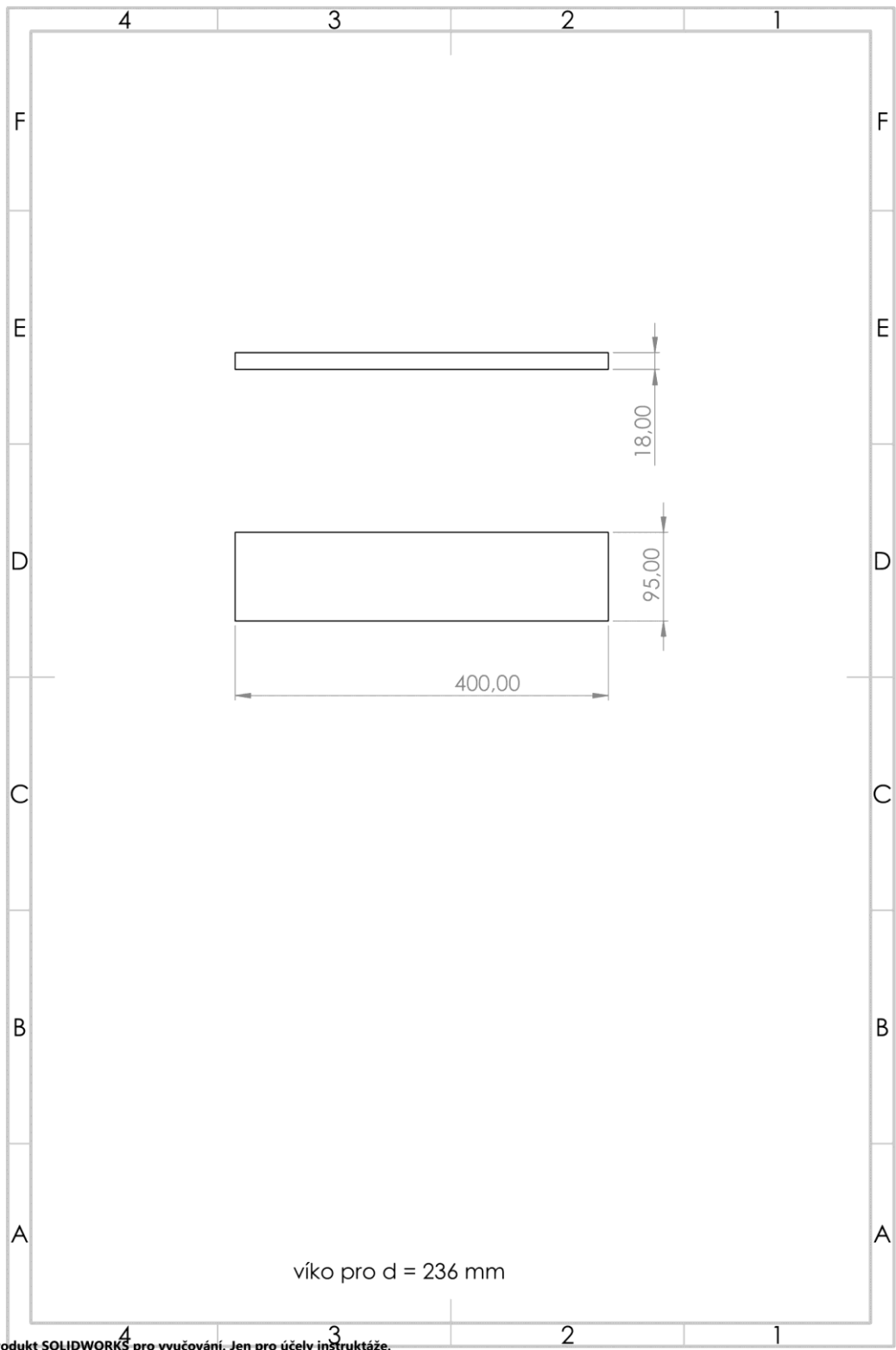
Produkt SOLIDWORKS pro vyučování. Jen pro účely instruktáže.



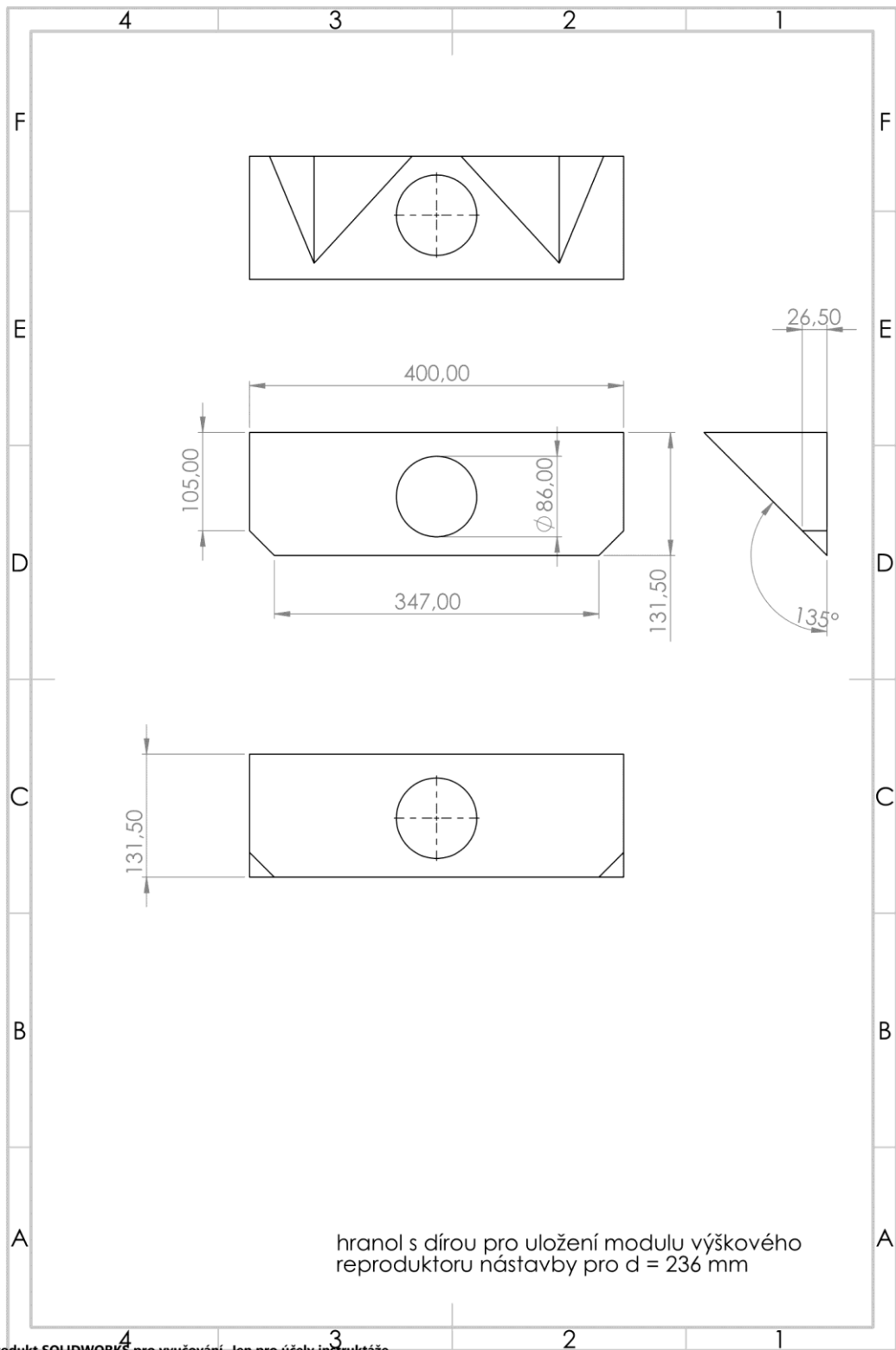
Příloha č. 2 výkresy dílů nástavby pro vzdálenost reproduktorů ve vertikále $d = 236$ mm

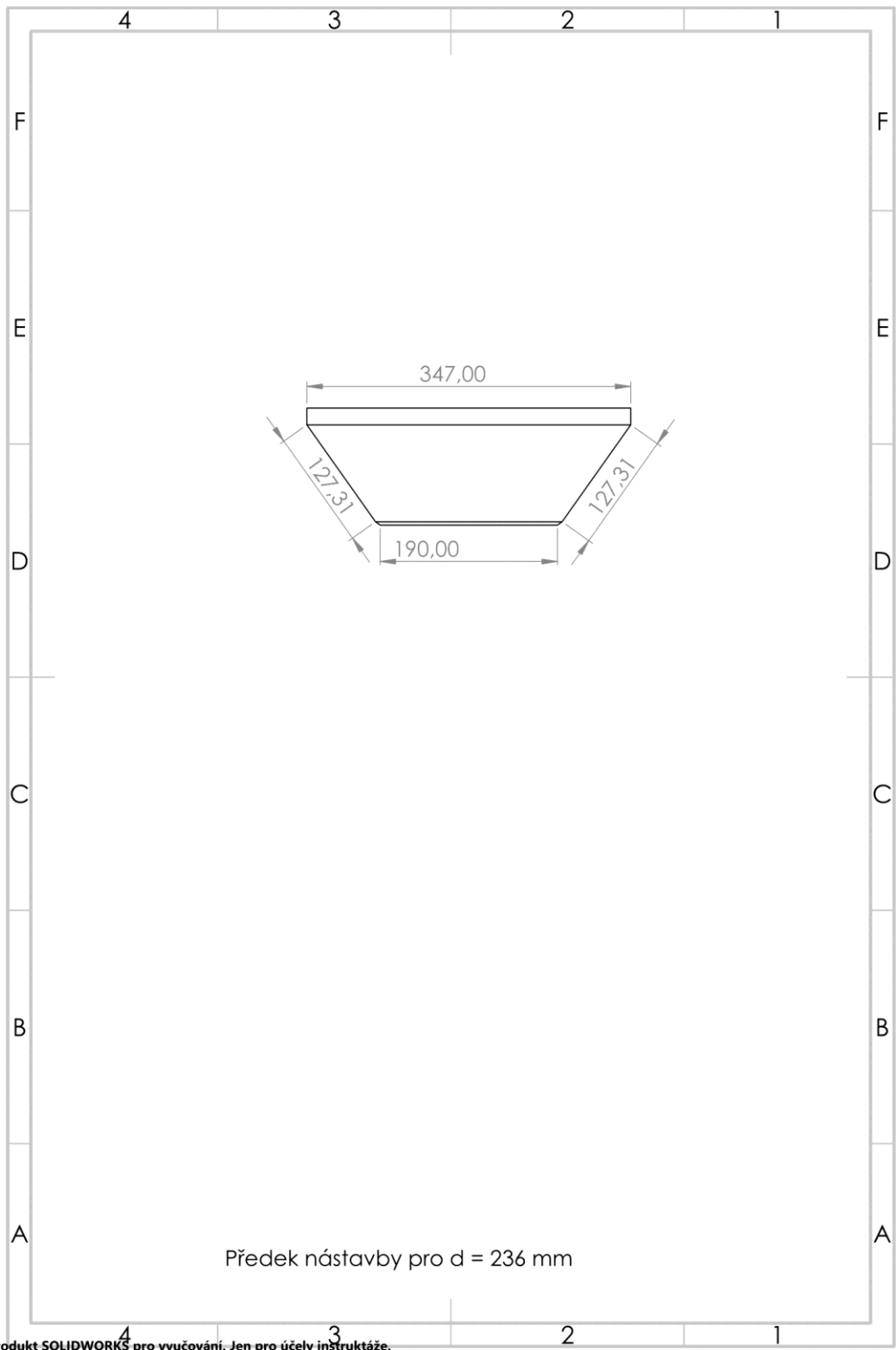


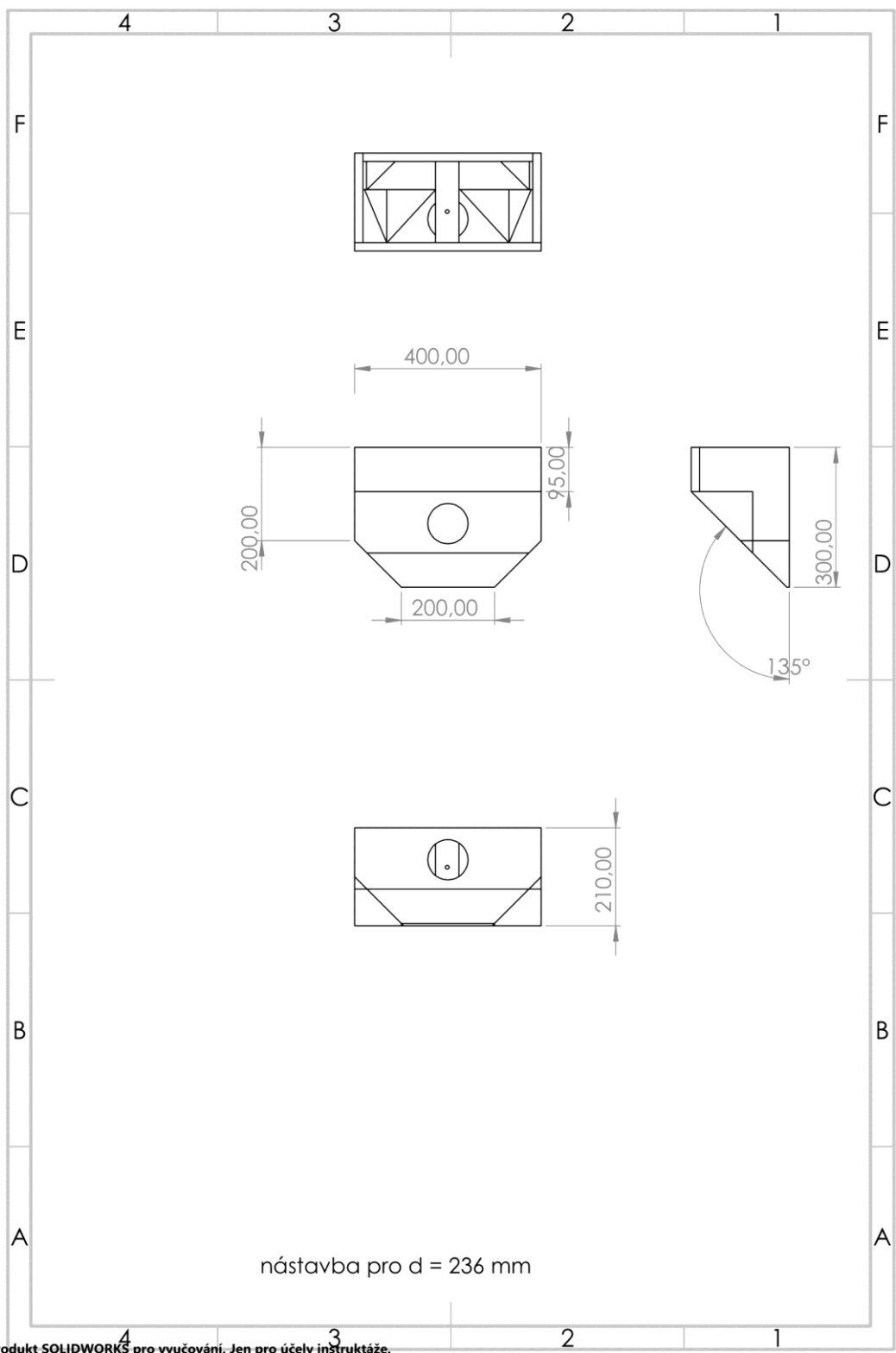


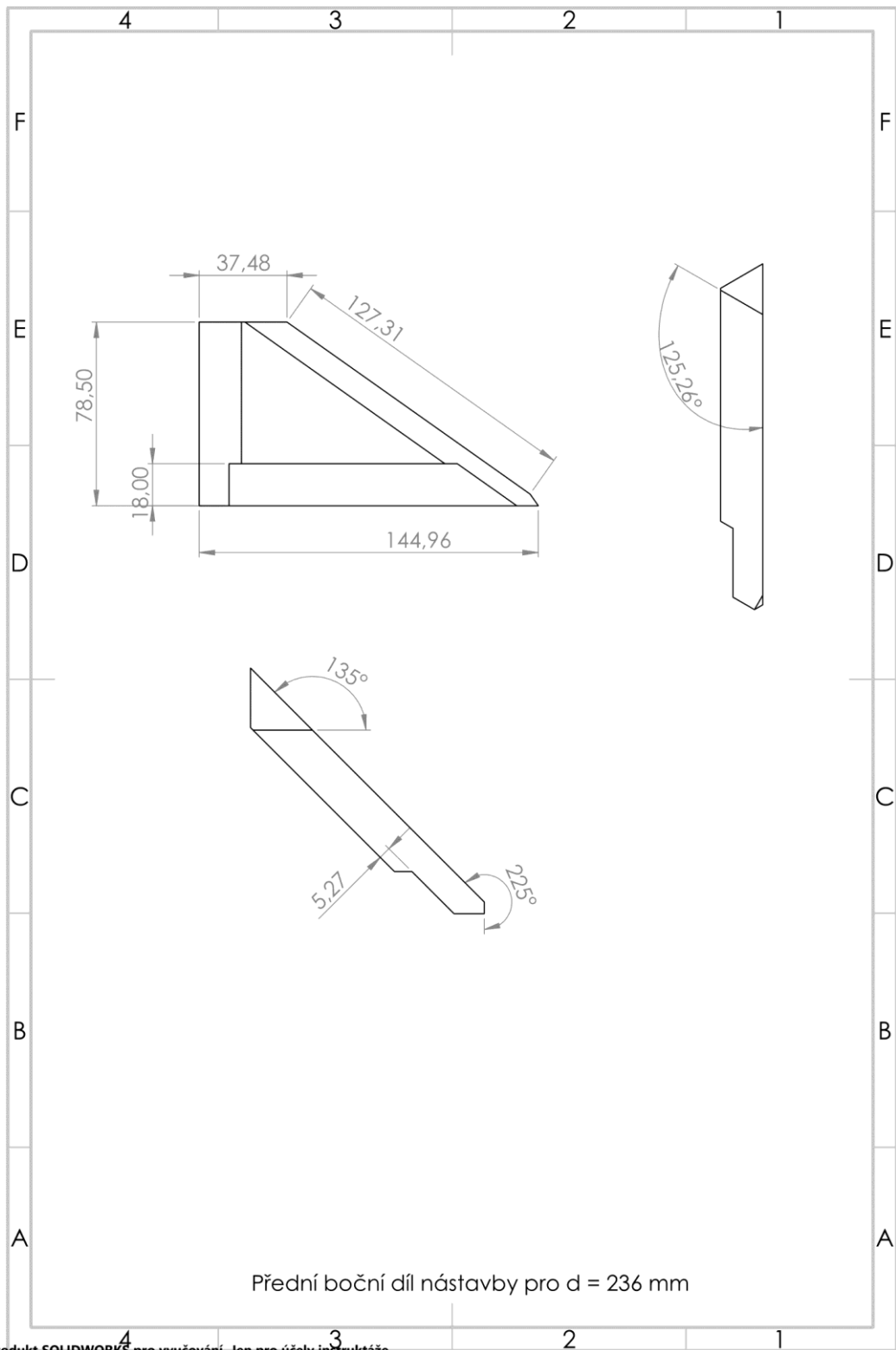


Produkt SOLIDWORKS pro vyučování. Jen pro účely instruktáže.

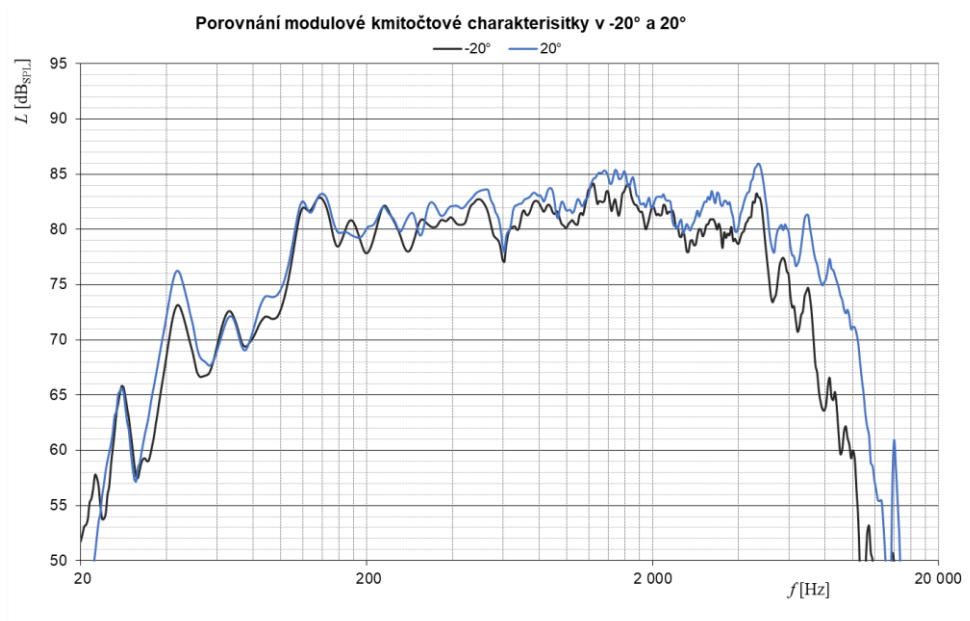
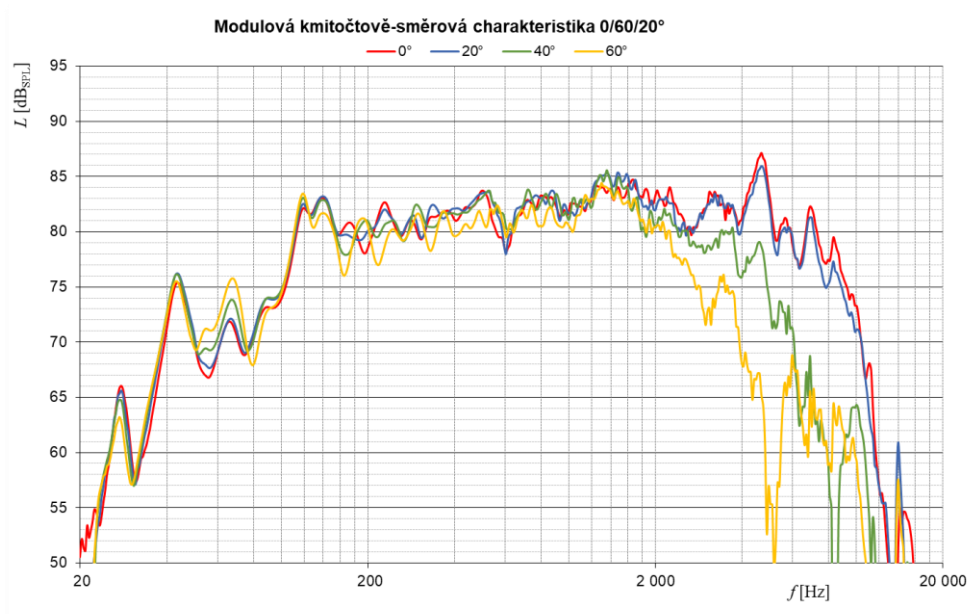


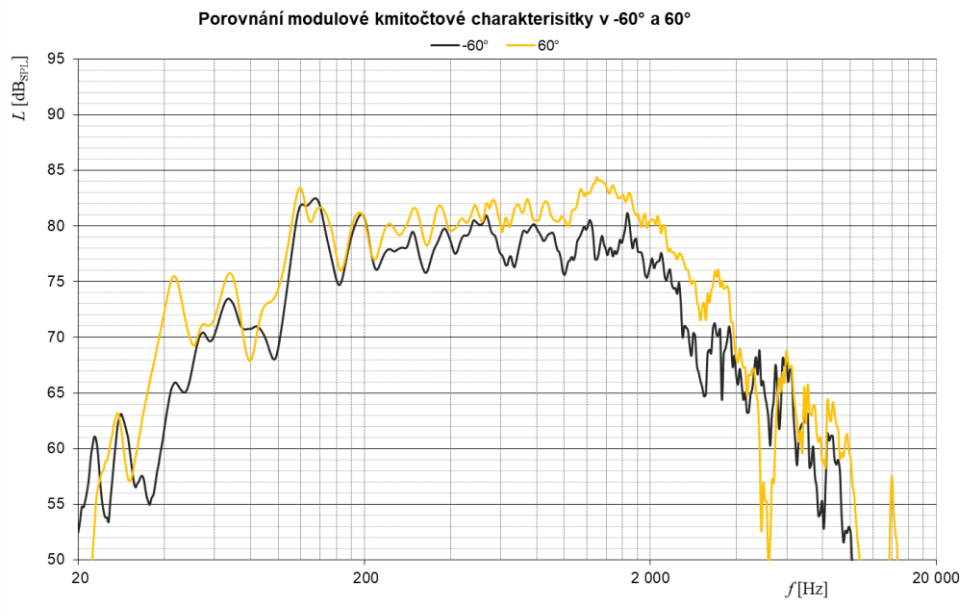
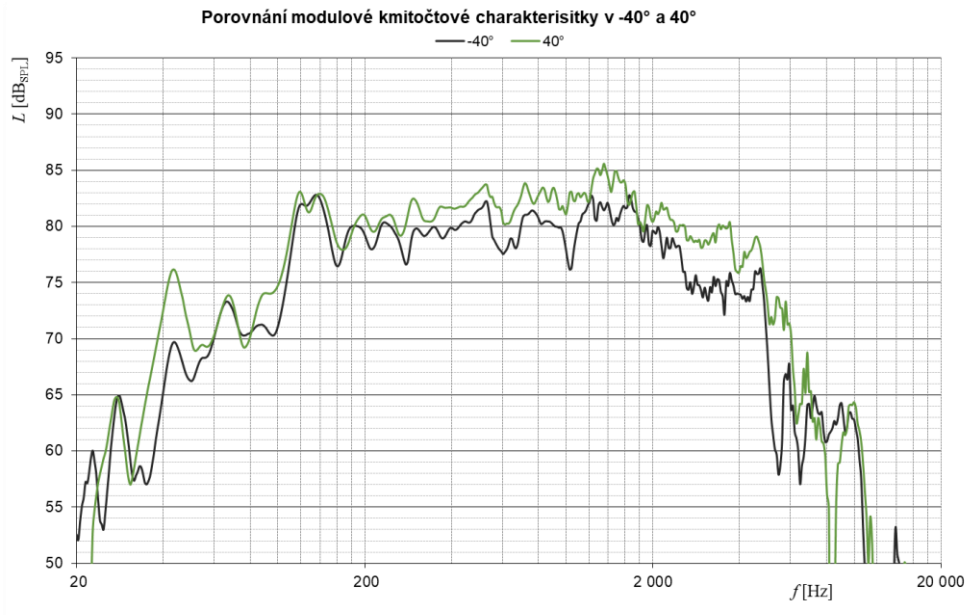




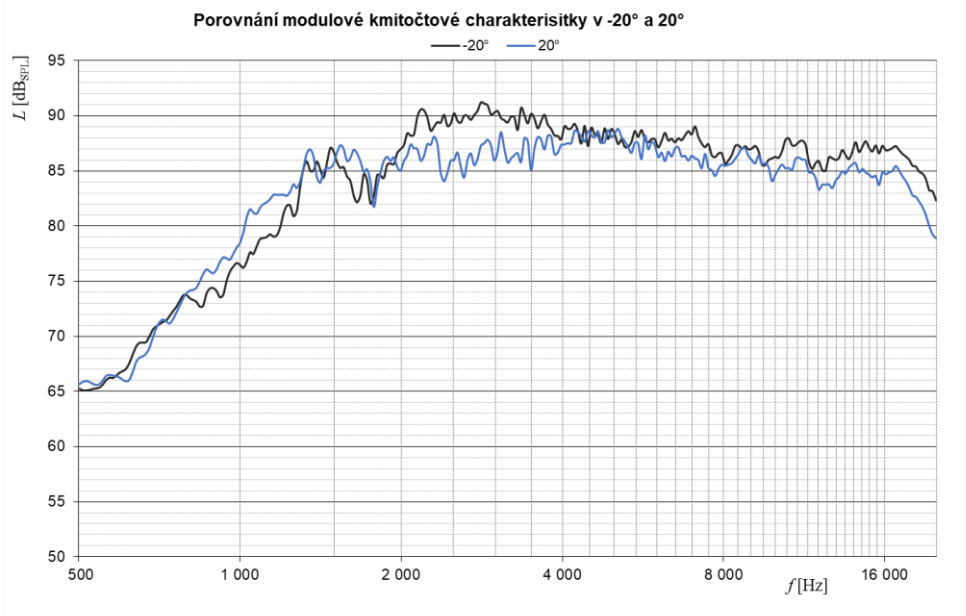
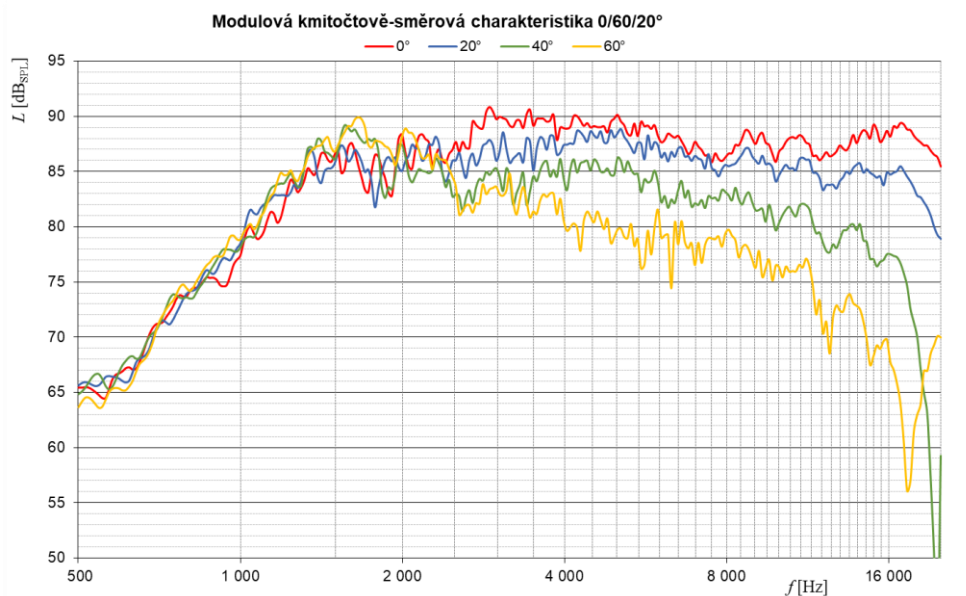


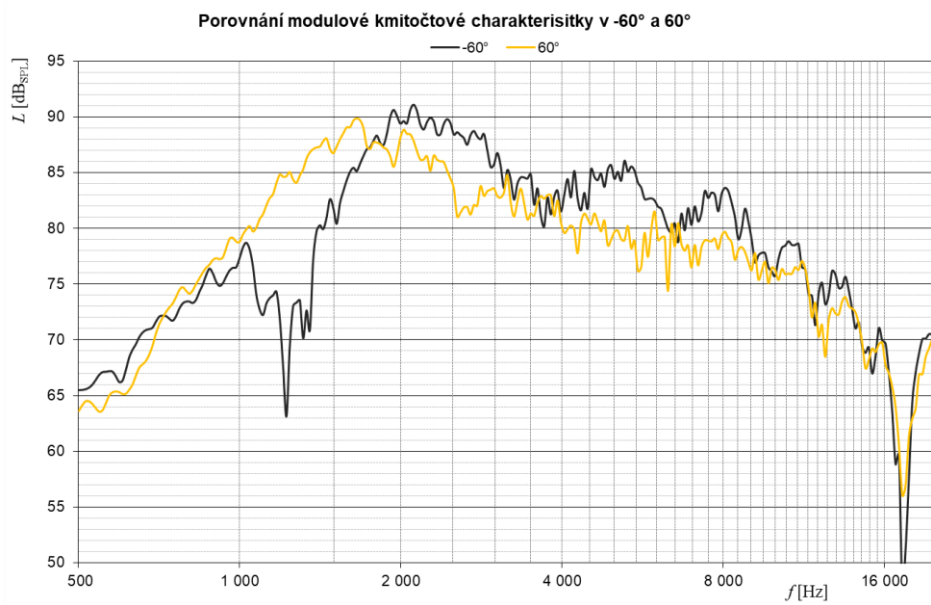
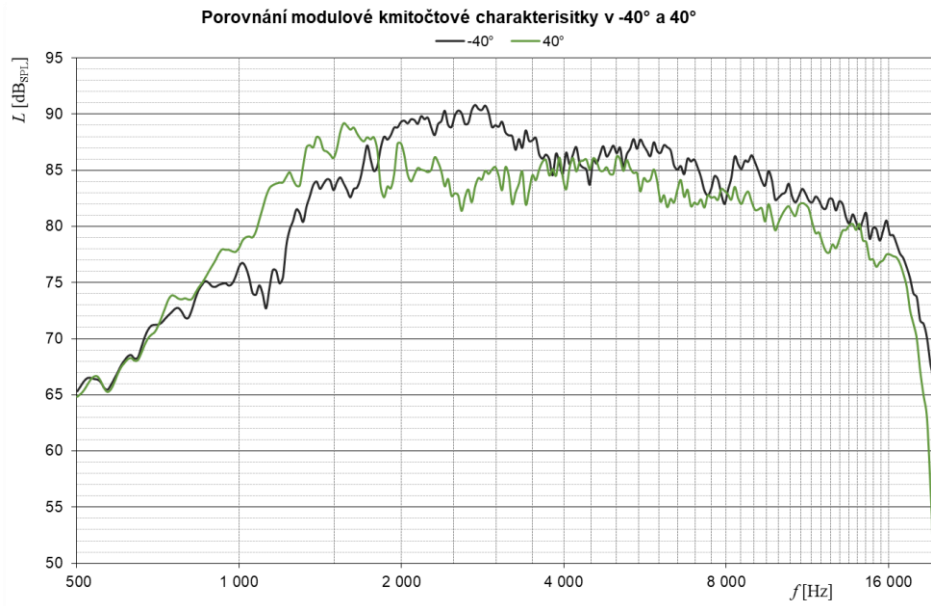
Příloha č. 3 Vertikální modulové kmitočtově-směrové charakteristiky středobasového reproduktoru ve variabilní dvoupásmové reproduktorové soustavě



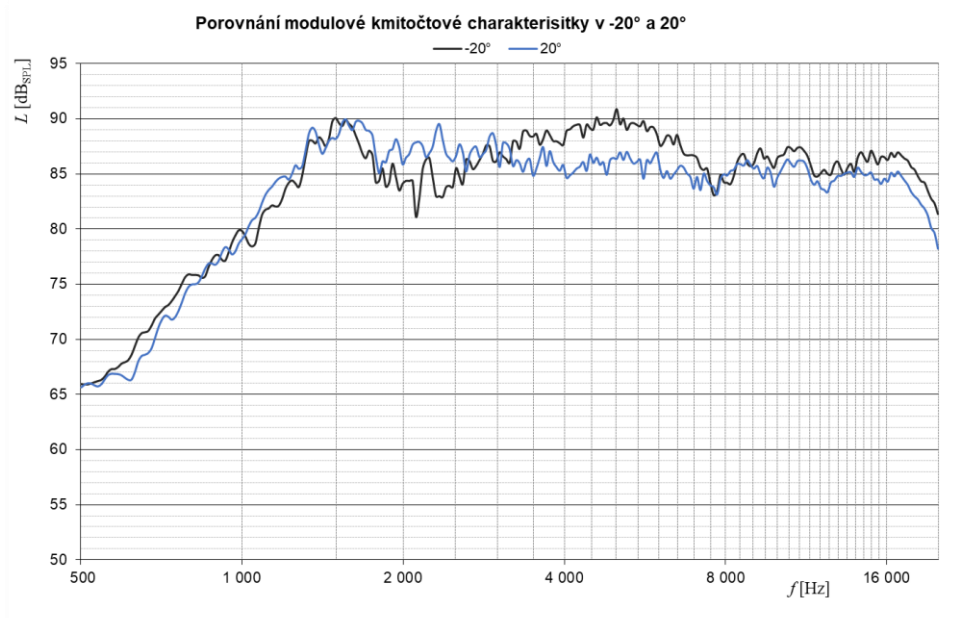
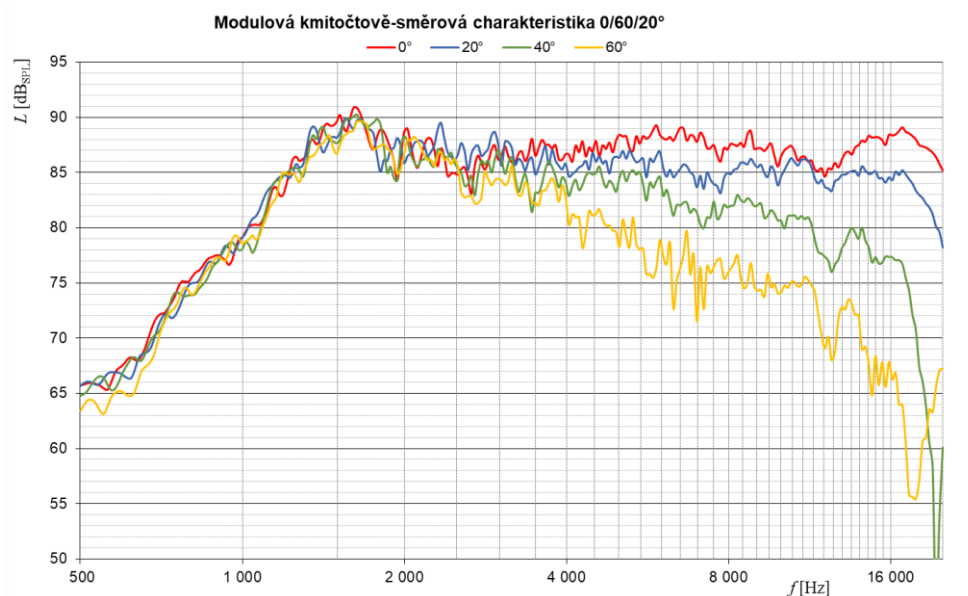


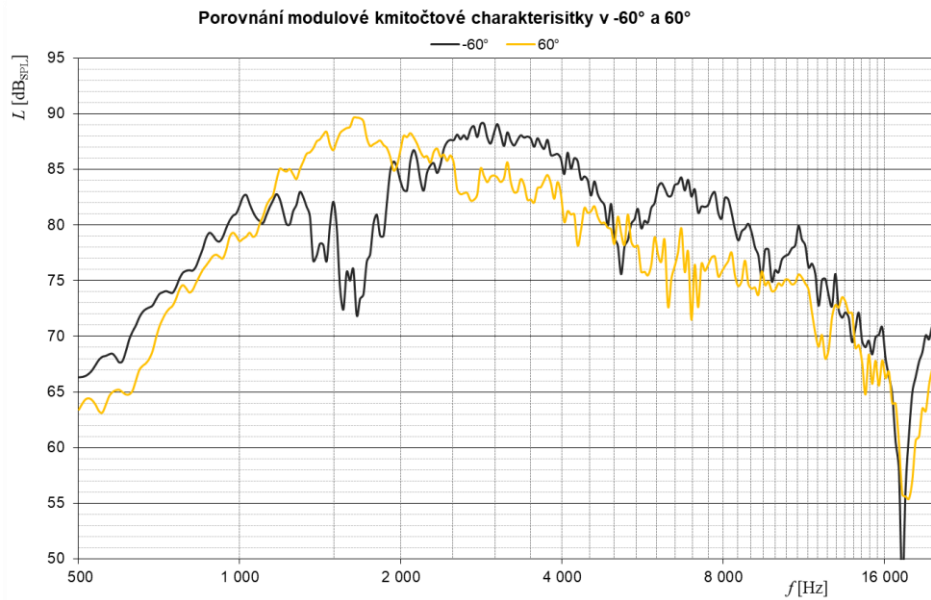
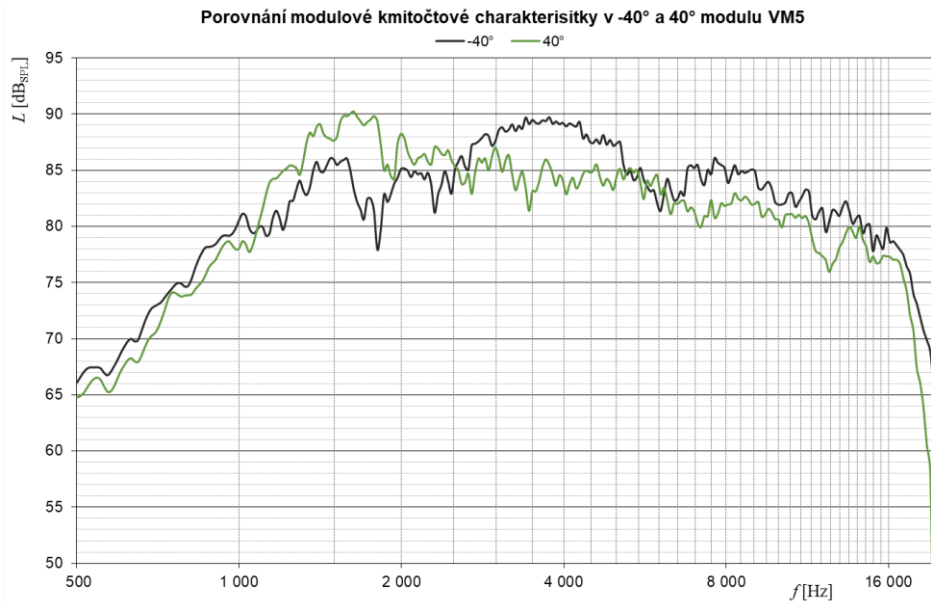
Příloha č. 4 Vertikální modulové kmitočtově-směrové charakteristiky výškového reproduktoru ve variabilní dvoupásmové reproduktorové soustavě při použití nižší nastavby a vzdálenosti předních hran košů reproduktorů $d = 0$ mm



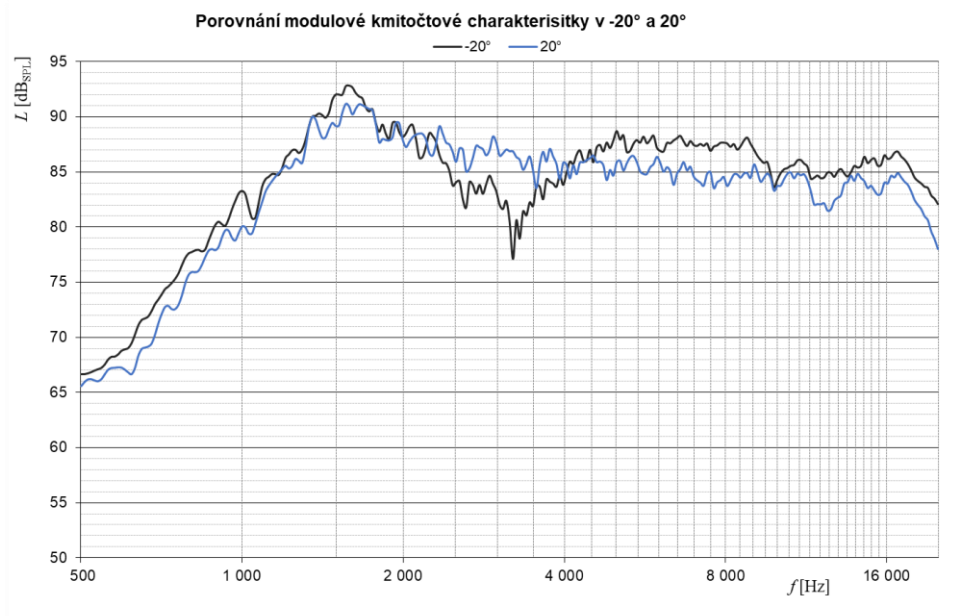
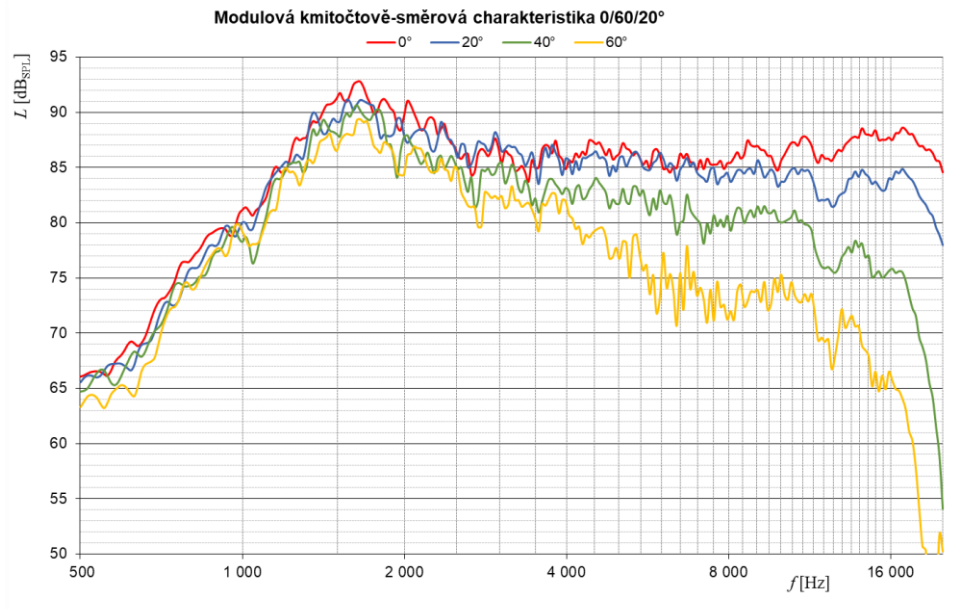


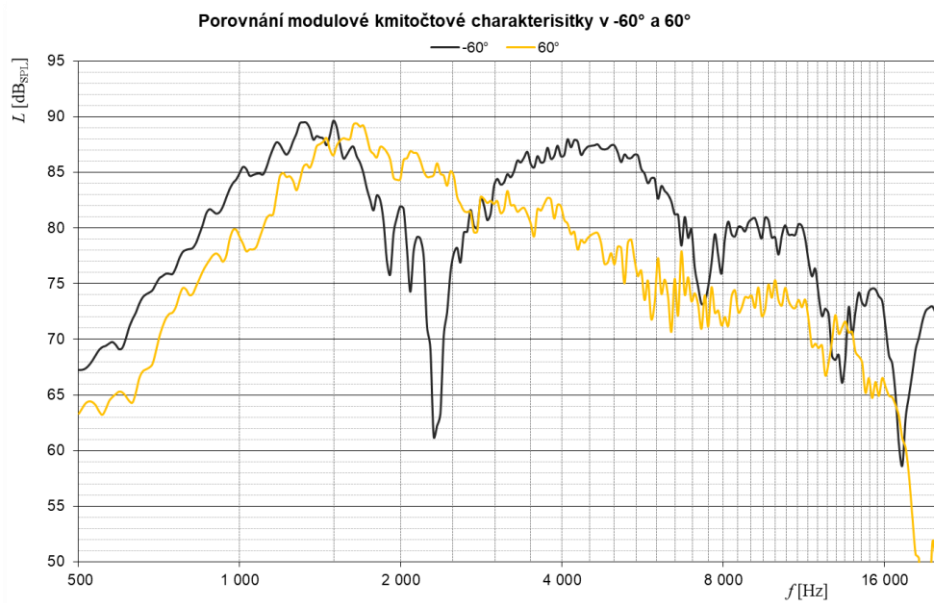
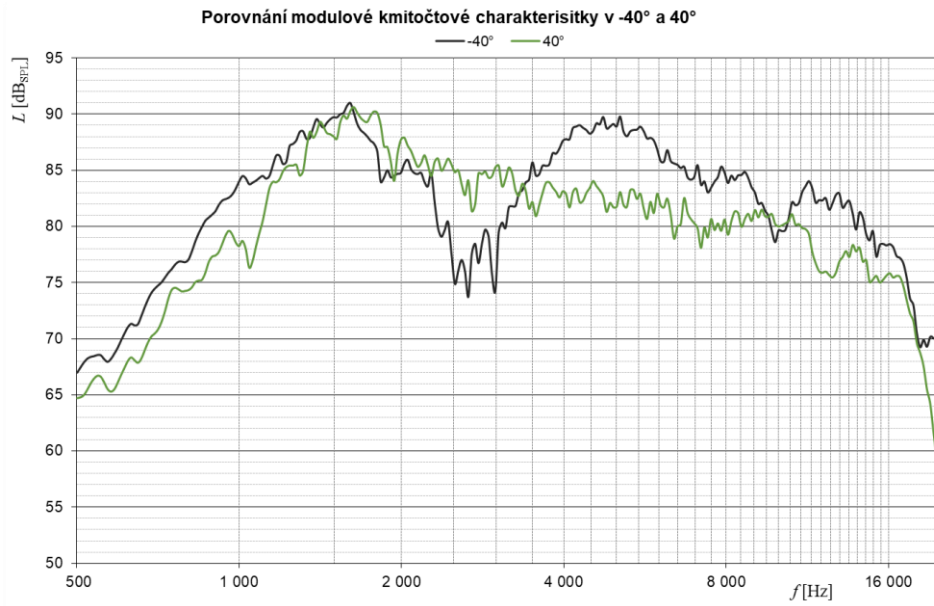
Příloha č. 5 Vertikální modulové kmitočtově-směrové charakteristiky výškového reproduktoru ve variabilní dvoupásmové reproduktorové soustavě při použití nižší nastavby a vzdálenosti předních hran košů reproduktorů
 $d = 25 \text{ mm}$



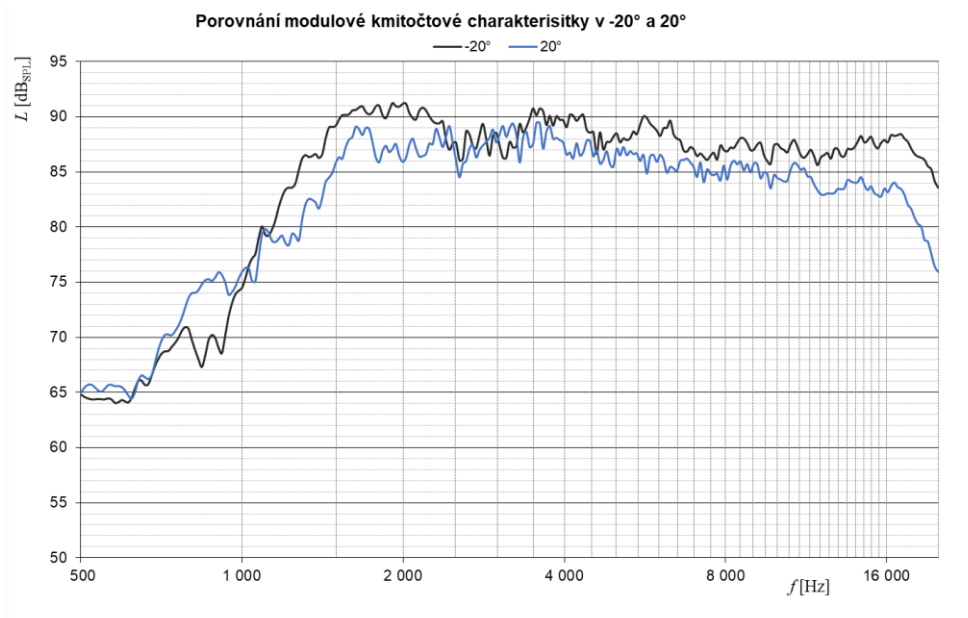
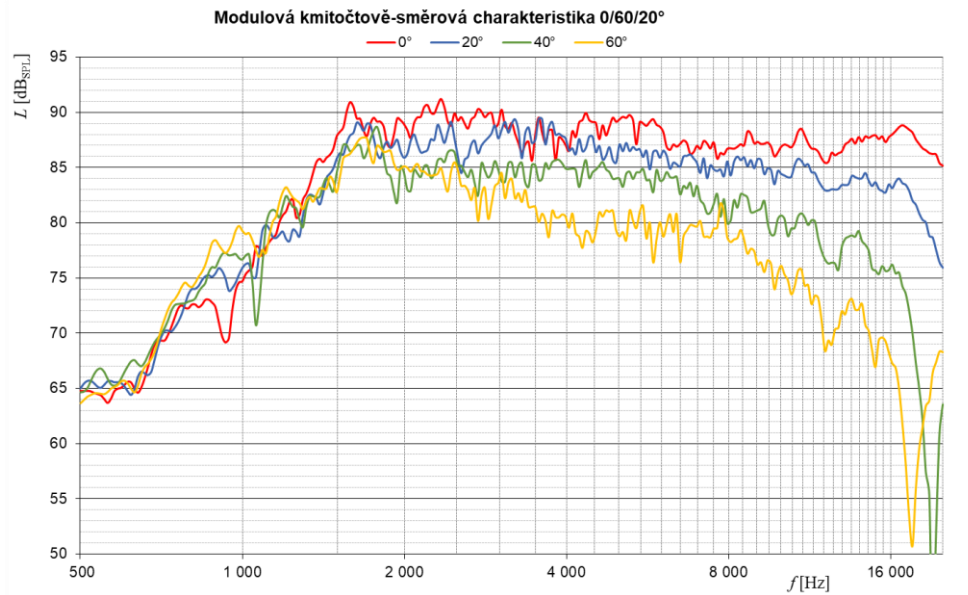


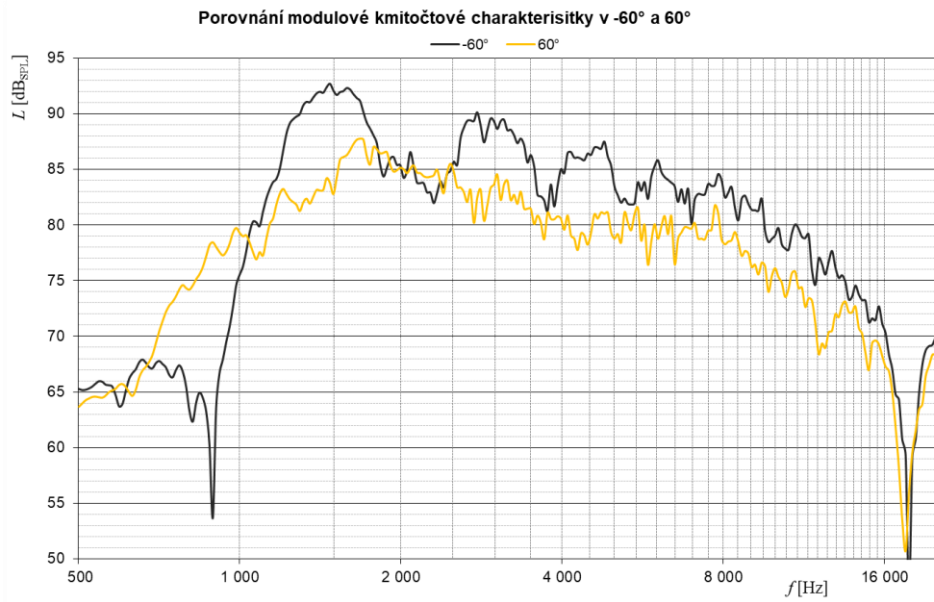
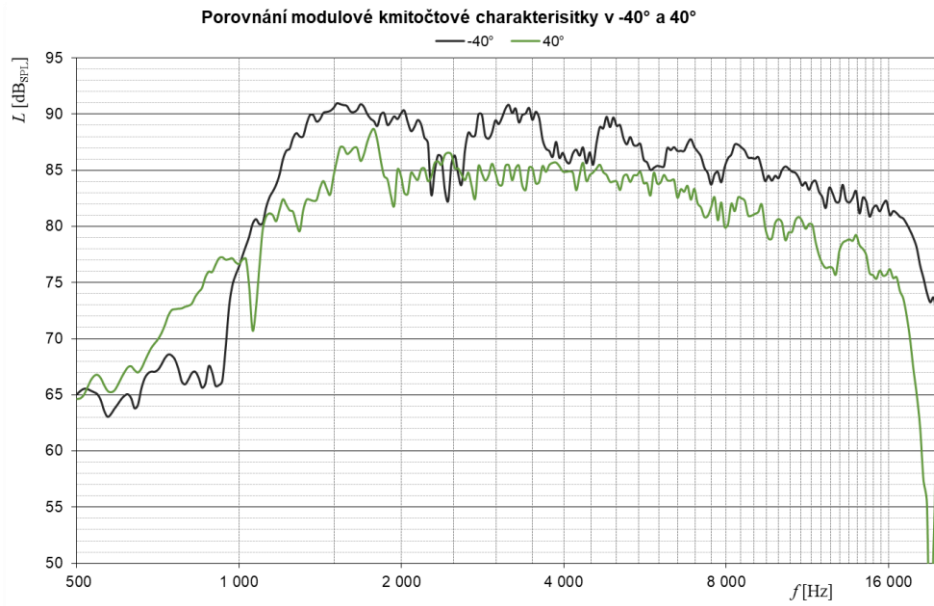
**Příloha č. 6 Vertikální modulové kmitočtově-směrové charakteristiky výškového reproduktoru ve variabilní dvoupásmové reproduktorové soustavě při použití nižší nastavby a vzdálenosti předních hran košů reproduktorů
 $d = 55 \text{ mm}$**



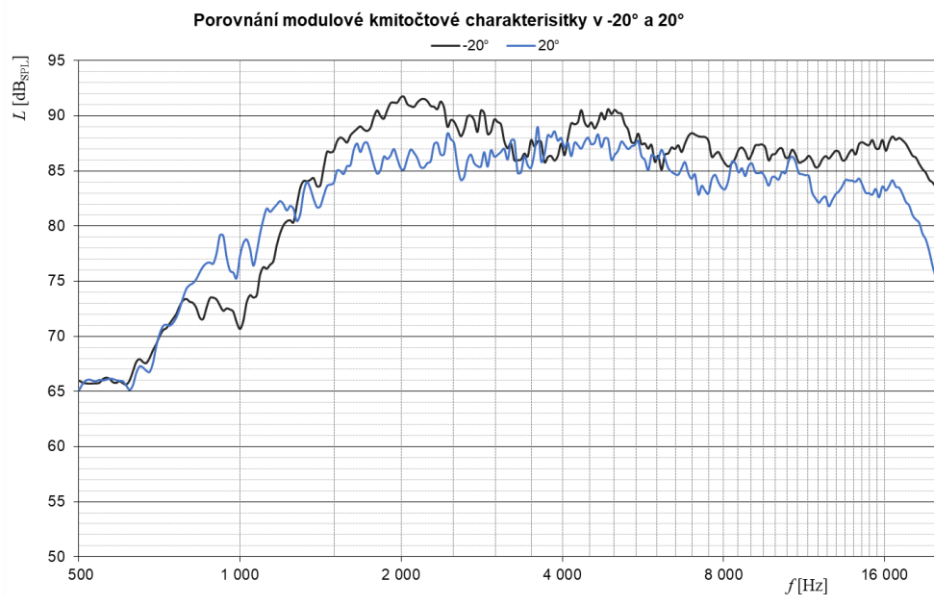
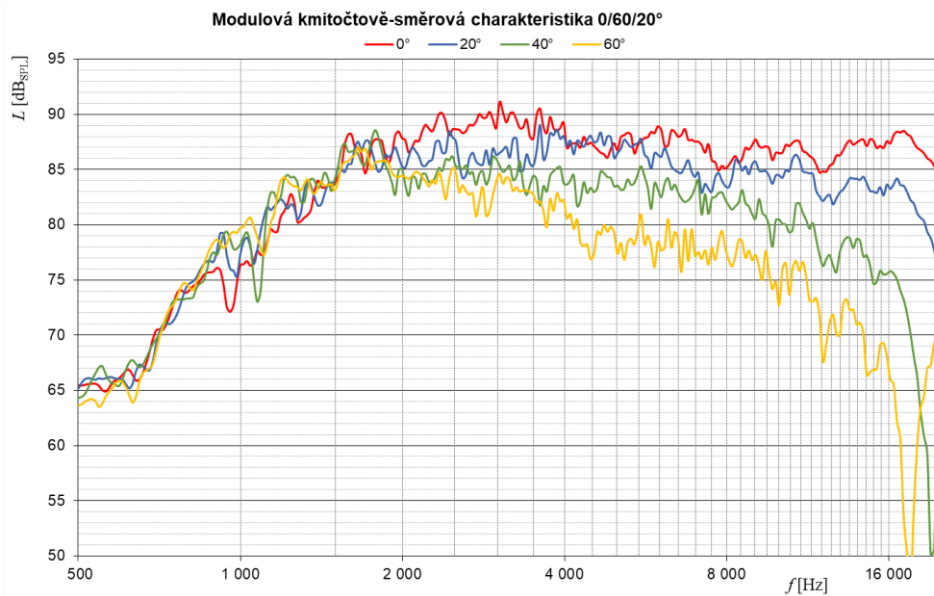


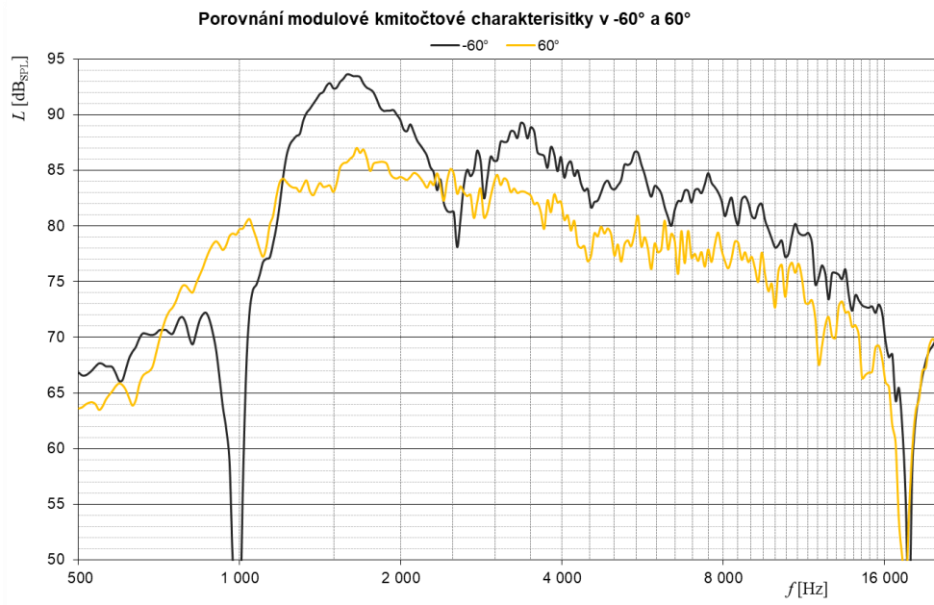
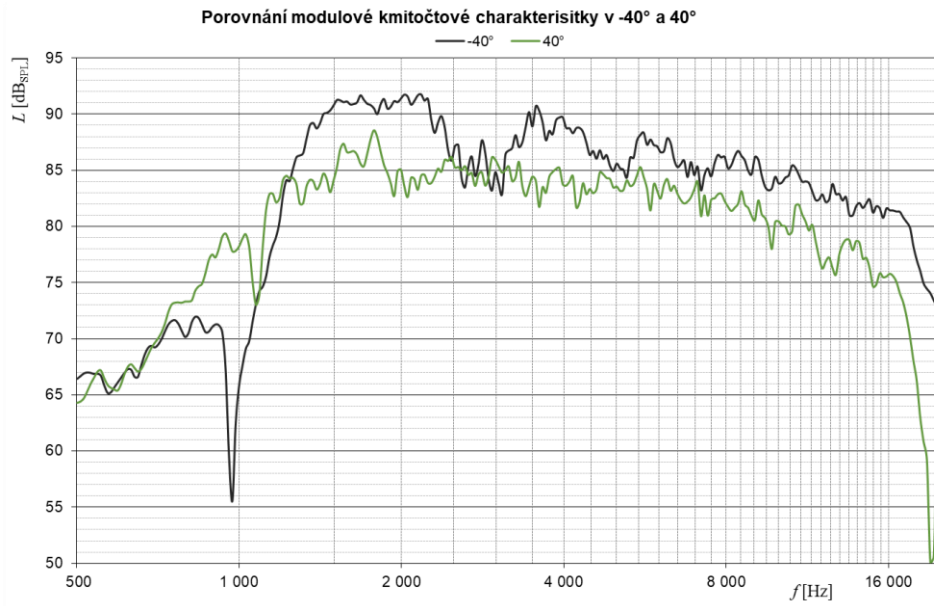
Příloha č. 7 Vertikální modulové kmitočtově-směrové charakteristiky výškového reproduktoru ve variabilní dvoupásmové reproduktorové soustavě při použití vyšší nastavby a vzdálenosti předních hran košů reproduktorů
 $d = 0$ mm



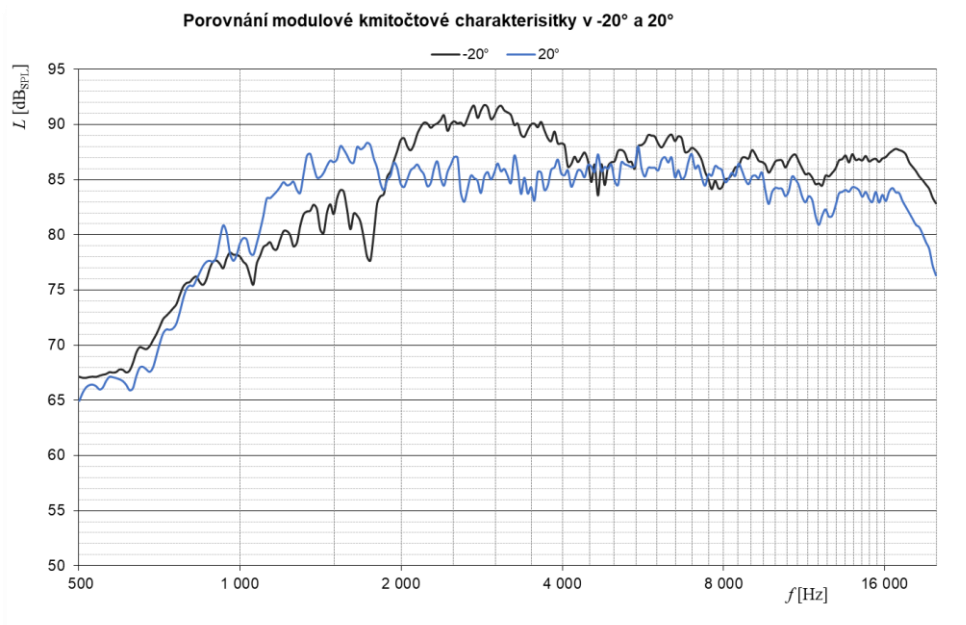
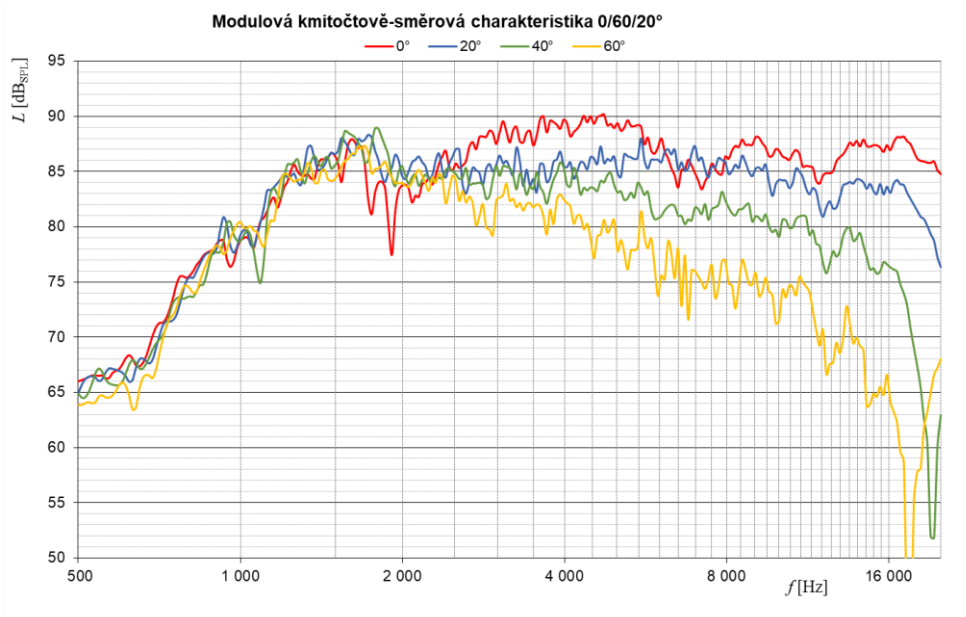


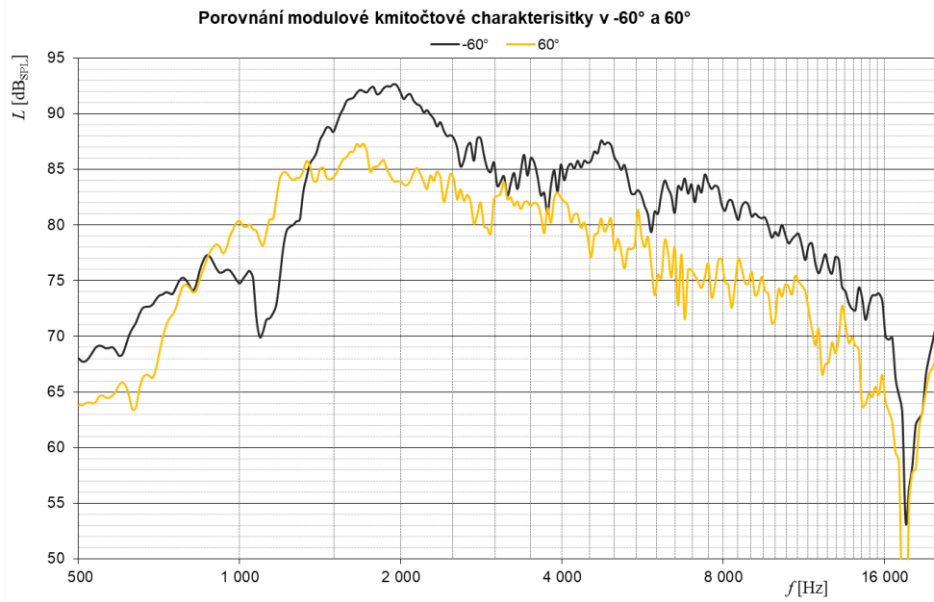
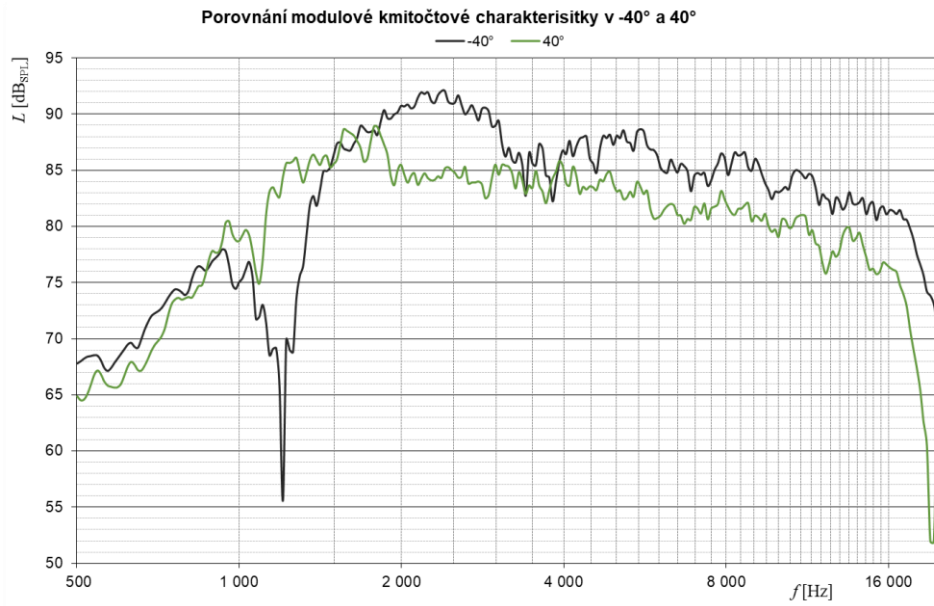
Příloha č. 8 Vertikální modulové kmitočtově-směrové charakteristiky výškového reproduktoru ve variabilní dvoupásmové reproduktorové soustavě při použití vyšší nastavby a vzdálenosti předních hran košů reproduktorů
 $d = 25 \text{ mm}$



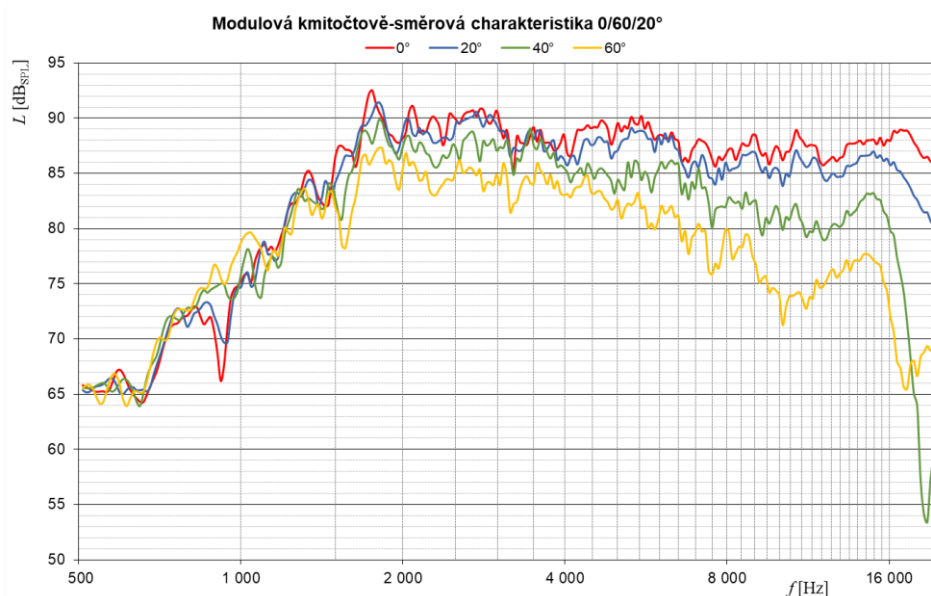


Příloha č. 9 Vertikální modulové kmitočtově-směrové charakteristiky výškového reproduktoru ve variabilní dvoupásmové reproduktorové soustavě při použití vyšší nastavby a vzdálenosti předních hran košů reproduktorů
 $d = 55 \text{ mm}$

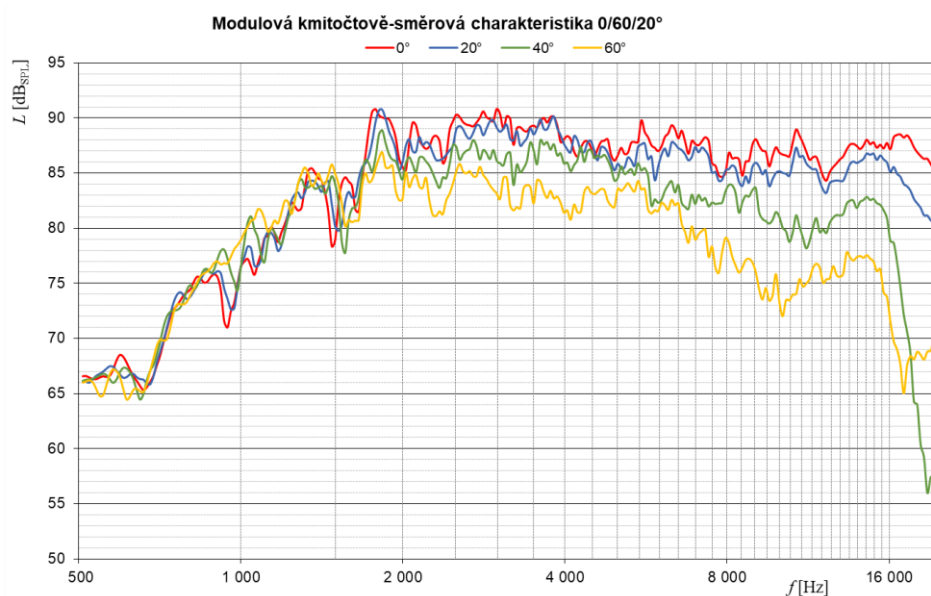




Příloha č. 10 Horizontální modulová kmitočtově-směrová charakteristika výškového reproduktoru ve variabilní dvoupásmové reproduktorové soustavě při použití vyšší nastavby a vzdálenosti předních hran košů reproduktorů $d = 0$ mm



Příloha č. 11 Horizontální modulová kmitočtově-směrová charakteristika výškového reproduktoru ve variabilní dvoupásmové reproduktorové soustavě při použití vyšší nastavby a vzdálenosti předních hran košů reproduktorů $d = 25$ mm



Příloha č. 12 Horizontální modulová kmitočtově-směrová charakteristika výškového reproduktoru ve variabilní dvoupásmové reproduktorové soustavě při použití vyšší nastavby a vzdálenosti předních hran košů reproduktorů $d = 55$ mm

