

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Návrh reproduktorové soustavy

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin ČECH**
Osobní číslo: **E09B0254P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a telekomunikace**
Název tématu: **Návrh reproduktorové soustavy**
Zadávající katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

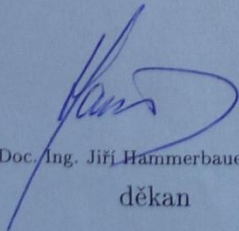
Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Vyberte vhodné elektroakustické měniče pro reproduktorovou soustavu se zadanými parametry.
2. Navrhněte vhodnou ozvučnici.
3. Zařízení realizujte a změřte jeho parametry.

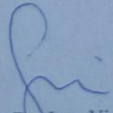
Rozsah grafických prací: dle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: dle doporučení vedoucího
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

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

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Hrubý**
Katedra technologií a měření
Konzultant bakalářské práce: **Ing. Jan Hrubý**
Katedra technologií a měření
Datum zadání bakalářské práce: **6. června 2011**
Termín odevzdání bakalářské práce: **3. června 2012**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na návrh reproduktorové soustavy s využitím na domácí poslech hudby. Součástí této práce je zároveň návrh a simulace reproduktorové soustavy a výhybky.

Klíčová slova

Reproduktor, dvoupásmová reposoustava, vysokotónový reproduktor, hlubokotónový reproduktor, tlumení, dělicí kmitočet, strmost.

Abstract

This thesis focuses on the design of loudspeaker systems for the home listening of music. This work is also the design and simulation of loudspeaker and crossover.

Keywords

Loudspeaker, two-way speaker, crossover, tweeter, woofer, soften, divide frequency, steepness.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 4.6.2012

Martin Čech

.....

Obsah

OBSAH	6
ÚVOD	7
SEZNAM SYMBOLŮ	8
1 ELEKTROAKUSTICKÉ MĚNIČE	9
1.1 DĚLENÍ REPRODUKTORŮ	9
1.2 PARAMETRY REPRODUKTORŮ	10
1.3 NÁHRADNÍ SCHÉMA REPRODUKTORU	12
1.4 POUŽITÉ REPRODUKTORY V REPROSOUSTAVĚ	13
2 OZVUČNICE REPRODUKTORU	14
2.1 UZAVŘENÁ A BASSREFLEXOVÁ OZVUČNICE	15
2.2 NÁVRH A SIMULACE OZVUČNICE	17
2.3 KONSTRUKCE OZVUČNIC	18
2.4 SAMOTNÁ KONSTRUKCE OZVUČNICE	22
3 VÝHYBKA	23
3.1 FUNKCE ELEKTRONICKÉ VÝHYBKY V REPROSOUSTAVĚ	23
3.2 STANOVENÍ DÉLÍČÍHO KMITOČTU REPROSOUSTAVY	25
3.3 STANOVENÍ STRMOSTI A TYPU FILTRŮ	26
3.4 KOMPENZAČNÍ OBVODY	28
3.4.1 <i>Kompence indukčnosti</i>	28
3.4.2 <i>Kompence citlivosti</i>	29
4 NÁVRH A REALIZACE VÝHYBKY	30
4.1 HODNOTY SOUČÁSTEK VYPOČTENÉ DLE TEORETICKÝCH VZORCŮ	31
4.2 SIMULACE A REALIZACE VÝHYBKY	33
4.2.1 <i>Simulace výhybky</i>	33
4.2.2 <i>Realizace výhybky</i>	35
4.3 NÁVRH SCHÉMATU, DPS A JEJÍ REALIZACE	36
4.3.1 <i>Seznam součástek výhybky</i>	39
5 MĚŘENÍ REPROSOUSTAVY	39
ZÁVĚR	42
POUŽITÁ LITERATURA	43
SEZNAM PŘÍLOH	44
PŘÍLOHY	I

Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na návrh a odměření parametrů reproduktorové ozvučnice pro domácí poslech hudby. Mým cílem bude vytvořit ozvučnici, která bude splňovat požadavky zadání práce a zároveň bude naplňovat mé osobní představy o přednesu hudby, jež upřednostňuji. V daném případě jde o subjektivní vjem, u kterého vždy záleží na jednotlivci, co se mu líbí. Z mnou vybraných reproduktorů, jejich parametrů a následných simulací, jsem se rozhodl pro návrh bassreflexové ozvučnice. Při hledání optimálních vlastností výhybky pro dané reproduktory budu využívat simulace a následného jejího odladění s využitím náhradního schéma reproduktoru.

Text bude rozdělen do pěti částí. Nejprve se zabývám teoriemi reproduktorů a jejich výběrem, poté se zaměřuji na teorie návrhu ozvučnic a následně samotný návrh ozvučnice včetně její konstrukce. Dále se zabývám reproduktorovými výhybkami, jejich funkcí a kompenzačními obvody. V následující části popisuji vlastní návrh výhybky, její následnou simulaci a realizaci. Poslední část zaměřuji na sestavení reposoustavy.

Seznam symbolů

B [T]	.....	magnetická indukce
P [W]	.....	výkon
Z [Ω]	.....	impedance
Bl [-]	.....	gyrační konstanta
$R_s = R_e$ [Ω]	.....	stejnoseměrný odpor kmitací cívky
$L_s = L_e$ [H]	.....	indukčnost kmitací cívky
C_m	.....	ekvivalent hmotnosti kmitacího systému
R_m	.....	ekvivalent mechanického tlumení kmitacího systému
L_m	.....	ekvivalent tuhosti membrány
L [H]	.....	indukčnost
C [F]	.....	kapacita
f_R [Hz]	.....	rezonanční kmitočet
m_O [kg]	.....	hmotnost vzduchu v bassreflexovém nátrubku
c_v	.....	poddajnost ozvučnice
O [m ³]	.....	objem
c_r	.....	poddajnost kmitacího systému
V_{as} [L]	.....	ekvivalentní objem reproduktoru
Q_{ts}	.....	činitel jakosti reproduktoru
Q_{tc}	.....	činitel jakosti uzavřené ozvučnice
f_D [Hz]	.....	dělicí kmitočet výhybky
A [dB]	.....	zesílení / zeslabení signálu

Zkratky

DTD	dřevotřísková deska
MDF	středně zhuštěná dřevovláknitá deska
DPS	deska plošných spojů

1 Elektroakustické měniče

Principem reproduktoru je přeměna elektrické energie na mechanickou energii ve formě zvuku a tepla, nebo kdy se o tomto mluví jako o vysílači, jinak řečeno reproduktoru, nebo naopak kdy mluvíme o přijímači čili mikrofonu. K přeměně těchto energií dochází prostřednictvím mechanických prvků. Proto se nazývají elektroakustické měniče. Účinnost této přeměny je velice malá, jelikož většina energie se přemění na teplo a zvuk je jen vedlejší produkt této přeměny. K přeměně energií se využívají principy elektrostatické, elektromagnetické, elektrodynamické, piezoelektrické, plazmové, pneumatické a další způsoby.

Nejvíce používaným principem je elektrodynamický měnič. Hlavními částmi tohoto měniče jsou permanentní magnet, cívka a pólové nástavce. Princip funkce měniče spočívá v pohybu cívky ve válcové štěrbině mezi magnetem a pólovými nástavci. Pohyb způsobuje proud procházející cívkou a vytvářející další magnetické pole, které se přičítá či odčítá od magnetického pole vytvářeného permanentním magnetem. Tím vzniká proměnná síla, která působí na cívku a uvádí ji do pohybu. Pro tuto sílu platí vzorec [1],

$$F = Bil \tag{1.1}$$

kde F je síla působící na cívku, B magnetická indukce, i proud procházející cívkou a l délka vlastního vodiče cívky.

1.1 Dělení reproduktorů

Hlavní dělení reproduktorů je dle vyzařování na přímovyřazující a nepřímovyřazující. Membrána přímovyřazujícího reproduktoru je v přímém kontaktu s okolním prostředím a její vlastnosti ovlivňují jakost akustického pole. Účinnost těchto reproduktorů je velice malá. U nepřímovyřazujícího reproduktoru je membrána spojena s prostředím zvukovodu, proto je někdy označována jako tlakový reproduktor, který výrazně ovlivňuje účinnost a frekvenční charakteristiku reproduktoru. Tyto druhy reproduktorů dosahují vyšších vyzářených výkonů než přímovyřazující. Zvukovod ovlivňuje také tvar směrového diagramu, proto může mít vlastní měnič díky zvukovodu menší membránu i při nižších frekvencích.

Dále se reproduktory dělí dle frekvenčního rozsahu na širokopásmové, hlubokotónové, středotónové a vysokotónové. Dělení vychází z konstrukčních důvodů reproduktoru. Aby měnič zahrál nízké frekvence, je potřeba dostatečně tuhé membrány spolu s její dostatečnou plochou. Tudíž je potřebná i hmotnost kmitací části reproduktoru. U vysokotónového reproduktoru potřebujeme právě opačné vlastnosti. Výhodnější je použití více měničů pro každé dílčí pásmo zvlášť pro pokrytí potřebného frekvenčního pásma. Podle počtu měničů poté reposoustavy nazýváme dvou- tří- a více pásmové.

Reproduktory se dále dělí dle způsobu jejich využití i mnoha jiných způsobů, ale tímto se moje práce nezabývá.

Reproduktory vybíráme dle potřebného způsobu použití a následně ze skupiny reproduktorů volíme ten nejvhodnější dle potřebných parametrů viz níže.

1.2 Parametry reproduktorů

Parametry reproduktorů můžeme rozdělit na všeobecné (základní), mechanické a tzv. Thiele-Smallovy parametry (T-S). Nejdříve se zaměříme na všeobecné parametry reproduktorů.

Základními a prvotními požadovanými parametry reproduktorů jsou charakteristická citlivost a příkon reproduktoru. Charakteristická citlivost reproduktoru vyjadřuje energetickou účinnost produkce zvuku reproduktorem. Vyjadřuje, jaký akustický tlak při zdánlivém příkonu 1 VA vytvoří reproduktor ve vzdálenosti 1m od samotného měniče. Mohou se používat i jiné vzdálenosti, ale to již musí být specifikováno v datasheetu (dokumentaci) k danému reproduktoru. Pojem zdánlivý příkon se zde udává z důvodu, že reproduktor není obyčejná odporová zátěž, ale kombinace RLC součástek. Dle [2], k vytvoření tlaku 110 dB, odpovídá citlivosti 90 dB je potřeba příkon 100 W, přičemž se po většinu doby stejně využije okolo jednoho procenta výkonu, zbytek je použit při výkonových špičkách. Pokud má reposoustava nižší citlivost a my potřebujeme shora uvedených 110 dB, musíme dodat větší příkon.

Pro jmenovitý příkon reposoustavy, pokud se tedy jedná o doporučení dle IEC 268, je situace poněkud zjednodušená. Stanovuje se pro speciální signál generovaný testovacím programem, pro který je měřen. Tento signál má z dlouhodobého hlediska podobný charakter jako hudební signál. Příkon se stanoví ze vzorce (1.2), kde U je efektivní hodnota napětí dlouhodobě průměrovaného a Z je samotná jmenovitá impedance reposoustavy.

$$P = \frac{U^2}{Z} \quad (1.2)$$

Poté jmenovitý příkon znamená, co reprosoustava vydrží za dodávaný výkon po dobu sta hodin, aniž by změnila své vlastnosti. Příkon reproduktoru je při konstantním napájení kmitočtově závislý. Pokud bychom přesáhli po delší dobu maximální příkon, mohlo by dojít k mechanickému poškození kmitací soustavy. Nejslabším článkem bývá pevnost spojení kmitací cívky s membránou, připojení přívodů k cívce a únava na uchycení membrány ke kostře reproduktoru. K určení maximálního příkonu je výrobcem prováděn tzv. test životnosti reproduktoru, který se provádí určitým definovaným signálem. Dalším neméně důležitým parametrem je jmenovitá impedance.

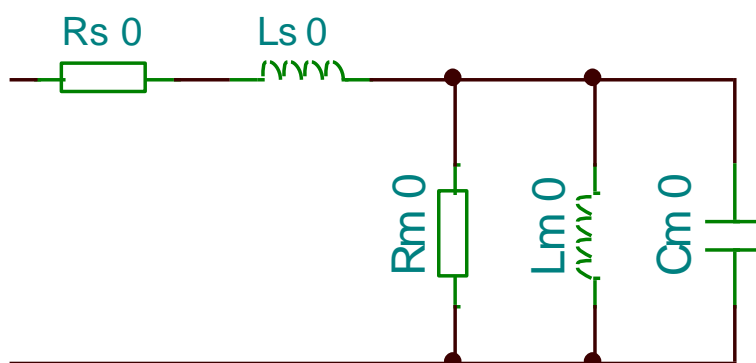
Jelikož je reproduktor napájen střídavým proudem, mění se impedance jeho cívky s frekvencí. U přímovyzářujících reproduktorů je v místech vlastní rezonance výrazné maximum. Toto maximum určuje použitelnost reproduktoru na nižších frekvencích. Místo, kde se nachází minimum této křivky, které je jen o málo větší než činný odpor reproduktoru, nazýváme jmenovitá impedance. Nabývá většinou hodnoty 2, 4, 8 a dále ohmů. Tato veličina je velice úzce spjata s maximálním příkonem, kdy při nejmenší hodnotě impedance a konstantnímu napětí, je příkon do reproduktoru co největší své hodnoty. Impedance od své jmenovité hodnoty postupně narůstá směrem k vyšším kmitočtům, což je dáno hlavně indukčností cívky, kdy toto kompenzujeme pomocí sériového obvodu RC připojeného k reproduktoru paralelně, kde hodnota rezistoru se volí dle impedance cívky. Tyto tři parametry jsou ze základních parametrů nejdůležitější pro výběr vhodného reproduktoru.

Za mechanické parametry považujeme rozměr samotného reproduktoru, jeho hmotnost a při instalaci do automobilu také jeho montážní hloubku, kde jsme limitováni prostorem například ve dveřích.

Dalšími parametry jsou T-S parametry, které již využijeme při vlastním návrhu reprosoustavy. T-S parametry potřebujeme například pro výpočet potřebného objemu reproboxu nebo pro určení náhradního schématu pro simulaci námi navržené výhybky. Mezi tyto parametry patří například elektrický činitel jakosti, mechanický činitel jakosti, ekvivalentní objem reproduktoru, rezonanční kmitočet reproduktoru atd.

1.3 Náhradní schéma reproduktoru

Náhradní schéma reproduktoru potřebujeme pro simulaci výhybky, jelikož reproduktor není jen čistě ohmická zátěž, ale má i vlastní kapacitu či indukčnost. Nejjednodušší schéma je vidět na obr 1, vychází z tzv. elektroakustické analogie. V tomto schématu jednotlivé prvky znamenají: R_s je stejnosměrný odpor kmitací cívky, L_s indukčnost kmitací cívky, R_m je ekvivalent mechanického tlumení (odporu) kmitacího systému, L_m (m_m) je ekvivalent k tuhosti membrány a C_m značí ekvivalent hmotnosti kmitacího systému.



Obr 1 Náhradní schéma reproduktoru

Pro použití v simulaci musíme hodnoty R_m , C_m a L_m vhodně propočítat s tzv. gyačnickou konstantou (Bl), v dokumentaci od reproduktoru je označovaná jak „ForceFactor“. Níže uvádím matematický aparát pro výpočet těchto součástí do náhradního schématu.

$$R = \frac{Bl^2}{R_m} \quad (1.3)$$

$$L = C_m Bl^2 \quad (1.4)$$

$$C = \frac{m_m}{Bl^2} \quad (1.5)$$

Tento dvojpól se chová jako paralelní rezonanční obvod se sériovým přídavným odporem. Velikost impedance tohoto dvojpólu je dána velikostí rezistoru R_s . Kmitočet f_R , pro který nastává rezonance je dán dle [1] vzorcem (1.6), kde L_m a C_m záleží zcela na mechanické konstrukci reproduktoru.

$$f_R = \frac{1}{2 * \pi * \sqrt{Lm * Cm}} \quad (1.6)$$

Pro vysokotónový reproduktor se počítá jen R_s , L_s a C , kde mechanický odpor a hmotnost kmitacího systému lze zanedbat díky velikosti kmitacího systému.

Všechny potřebné hodnoty jsou pro výpočet jednotlivých prvků v náhradním schématu uváděny výrobcem v dokumentaci pro daný reproduktor. Náhradní schéma nepočítá se snižující indukčností s rostoucím kmitočtem a dalších součástí pro zpřesnění chování reproduktoru. Z tohoto vyplývá, že pro přesný popis reproduktoru by musel být použit velice složitý matematický aparát, a proto se využívá pomoci simulačních programů k následnému doladění reproduktoru.

1.4 Použité reproduktory v reprosoustavě

Po konzultaci s vedoucím bakalářské práce jsem se přiklonil k výběru měničů od norské firmy SEAS a jejich řady Prestiže, i když mají kvalitnější řadu Excel, ale k mým potřebám je řada Prestige vyhovující i cenově příznivější. V případě vysokotónového reproduktoru padla má volba na reproduktor 27TBCD/GB-DXT na obr 2. Tento měnič jsem zvolil také s ohledem na technologii DXT (diffraction expansion technology), která slibuje širší směrový „laloč“ vysokotónového měniče. Detailnější informace k technologii jsou v příloze č. 3. Veškeré parametry reproduktoru jsou v příloze č. 2. K reproduktoru jsem hledal vhodný hlubokotónový měnič. Po zvážení mých potřeb, kdy jsem věděl, že nepotřebuji, aby hrál nejnižší frekvence z důvodu budoucí stavby samotného basového měniče pro ozvučení pokoje a pro poslech tiché a středně hlasité hudby s přihlédnutím na jeho frekvenční charakteristiku, jsem se rozhodl pro měnič s názvem ER18RNX na obr 3. Jeho parametry jsou v příloze č. 1. Jelikož firma SEAS má v České republice jediného dodavatele, který si nechává za tyto reproduktory velice připlácet, byl jsem nucen udělat objednávku u německého dodavatele, ale za více přijatelnější cenu než nabízel český dodavatel.



Obr 2 výškový reproduktor značky SEAS 27TBCD/GB-DXT



Obr 3 basový reproduktor značky SEAS ER18RNX

2 Ozvučnice reproduktoru

Přímovyřazující reproduktory samy hrají a vyzářují zvuk hlavně u nižších kmitočtů přední i zadní stranou, ale s opačnou fází, která se odečte a reproduktor není schopen poskytnout potřebný výkon a klesá tím akustický výkon reproduktoru. Tomuto jevu se říká akustický zkrat, který figuruje hlavně na nižších frekvencích. Přímovyřazující reproduktory se dávají do vhodných tzv. ozvučnic, které tomuto jevu mají předcházet. Basový, jak se jinak říká hlubokotónovému reproduktoru, musí proto vždy pracovat ve vhodné ozvučnici, jak pevností, tak velikostí. Ideální ozvučnicí by byla nekonečně velká plochá deska, kam by se doprostřed usadil basový reproduktor a tím by se předešlo akustickému zkratu i na nejnižších frekvencích. Toto řešení je však nereálné, proto se do ozvučnic umisťují měniče nejčastěji dvojího typu, a to uzavřené a bassreflexové ozvučnice.

2.1 Uzavřená a bassreflexová ozvučnice

Pokud použijeme uzavřenou ozvučnici musí být dostatečně tuhá a dostatečně utěsněná, aby veškerá energie vytvořená zadní stranou reproduktorové membrány zůstala uvnitř ozvučnice a přeměnila se na teplo. Z toho vyplývá požadavek na dostatečně tuhoun ozvučnici. Nejvhodnějším materiálem by byl například beton či kámen, ale zde je problém hlavně s hmotností, proto se nejčastěji používají různé druhy dřeva a jejich kompozity, které se dále vyztužují nebo dělají dostatečně silné. Aby ozvučnice byla ideálně neprodyšně uzavřená, záleží také na technologii zpracování daného materiálu. Uzavřená ozvučnice dokonale zabraňuje akustickému zkratu, ale její nevýhodou je posunutí rezonanční frekvence k vyšším frekvencím. Tato frekvence se posouvá tím výše, čím je rozměr bedny menší, ale s tím stoupá další riziko. Čím je menší bedna, tím je menší objem vzduchu, který působí na reproduktor jako akustická pružina.

Dalším druhem ozvučnice je tzv. bassreflexová ozvučnice, která zlepšuje velikost vyzářeného akustického tlaku, jelikož uzavřená ozvučnice pohlcuje kompletně celou energii vyzářenou zadní stranou membrány. Bassreflexová ozvučnice je řešená obdobně jako uzavřená, ale je v ní vyvrtán jeden či více otvorů pro tzv. bassreflexový nátrubek, díky němuž se využije vyzářený výkon zadní stranou membrány, ale jen v oblasti rezonance bedny. Nad touto oblastí rezonanční frekvence se chová bassreflexová ozvučnice stejně jako uzavřená ozvučnice. Bassreflexový nátrubek a vlastní basový měnič vytvoří jeden laděný rezonanční obvod, ale přesný výpočet je velice složitý.

O volbě mezi bassreflexovou či uzavřenou ozvučnicí rozhoduje několik parametrů. Po volbě reproduktoru a následné volbě ozvučnice se rozhodujeme podle činitele jakosti kmitacího systému reproduktoru v datasheetu označovaném jako Q_{ts} . Kdy dle [1], pokud je jakost menší než 0,5, je vhodnou volbou bassreflexová ozvučnice. Pokud je větší než 1 na kmitočtové charakteristice, vznikají rušivá maxima v oblasti rezonance. Volí se nejen kvůli Q_{ts} , ale bassreflexové ozvučnice jsou v zásadě menší při stejné rezonanční frekvenci než uzavřené. Pokud tedy Q_{ts} je menší jak 0,5, což je u moderních reproduktorů pravidlem, je použita bassreflexová ozvučnice. Pokud je rezonanční kmitočet reproduktoru f_{R} roven rezonančnímu kmitočtu akustického rezonátoru f_B , dochází v oblasti rezonance k velkému poklesu akustického výkonu, tudíž se bassreflexová ozvučnice ladí nad rezonanční frekvenci reproduktoru. Resonanční kmitočet této ozvučnice je dán podle [3] vztahem,

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{m_0 c_v}} \quad (2.1)$$

kde m_0 je hmota vzduchu v otvoru a c_v poddajnost objemu ozvučnice.

Objem uzavřené ozvučnice dle [2] můžeme vypočítat dle vzorce (2.2) a taky poté ozvučnici vyplnit přibližně 30 % tlumením při zachování rezonančního kmitočtu. Tlumení ovšem představuje velký akustický odpor, tudíž v takovéto ozvučnici dochází k nadkritickému tlumení rezonance. Naopak, ale výplň potlačuje vznik stojatých vln pro kmitočty, jež mají vlnovou délku menší než rozměr ozvučnice,

$$O = c_r \frac{1}{\left(\frac{f_0}{f_{res}}\right)^2 - 1} c_0^2 \rho S^2 \quad (2.2)$$

kde O je objem ozvučnice, c_r poddajnost kmitacího systému, f_0 mezní kmitočet ozvučnice, f_{res} rezonanční kmitočet reproduktoru, c_0 rychlost zvuku, ρ hustota prostředí a S plocha membrány. Pro bassreflexovou ozvučnici platí vzorec (2.3), kde se vyskytuje dle [3] konstanta Y , která se volí dle poměru c_v (poddajnost systému) a c_r (poddajnost kmitacího systému) přibližně 1 až 3.

$$O = \frac{c}{Y} c_0^2 \rho S^2 \quad (2.3)$$

Pro objem ozvučnice je možno použít zjednodušený vztah (2.4) dle [4], ve kterém je V_{as} ekvivalentním objemem reproduktoru, Q_{ts} činitelem jakosti reproduktoru a Q_{tc} činitelem jakosti uzavřené soustavy. Pomocí tohoto parametru definujeme převýšení na dolním kmitočtu frekvenční charakteristiky. U uzavřené ozvučnice průběh klesá se strmostí 12 dB/oktávu a u bassreflexové ozvučnice dokonce 18 dB/oktávu. S použitím předem daných aproximací lze navrhnout, jaké má být převýšení na dolním kmitočtu. Používané aproximace vidíme v tabulce 1.

$$V = \frac{V_{as}}{\left(\frac{Q_{tc}}{Q_{ts}}\right)^2 - 1} \quad (2.4)$$

Q_{tc}	Název aproximace pro filtry 2. řádu	Převýšení na nízkých frekvencích [dB]
0,500	Linkwitz-Riley	0
0,570	Bessel	0
0,707	Butterworth	0
1,000	Čebyšev –zvlnění 1 dB	1,250
1,129	Čebyšev –zvlnění 2 dB	2,000
1,800		5,450

Tab 1 Aproximace pro výpočet ozvučnice

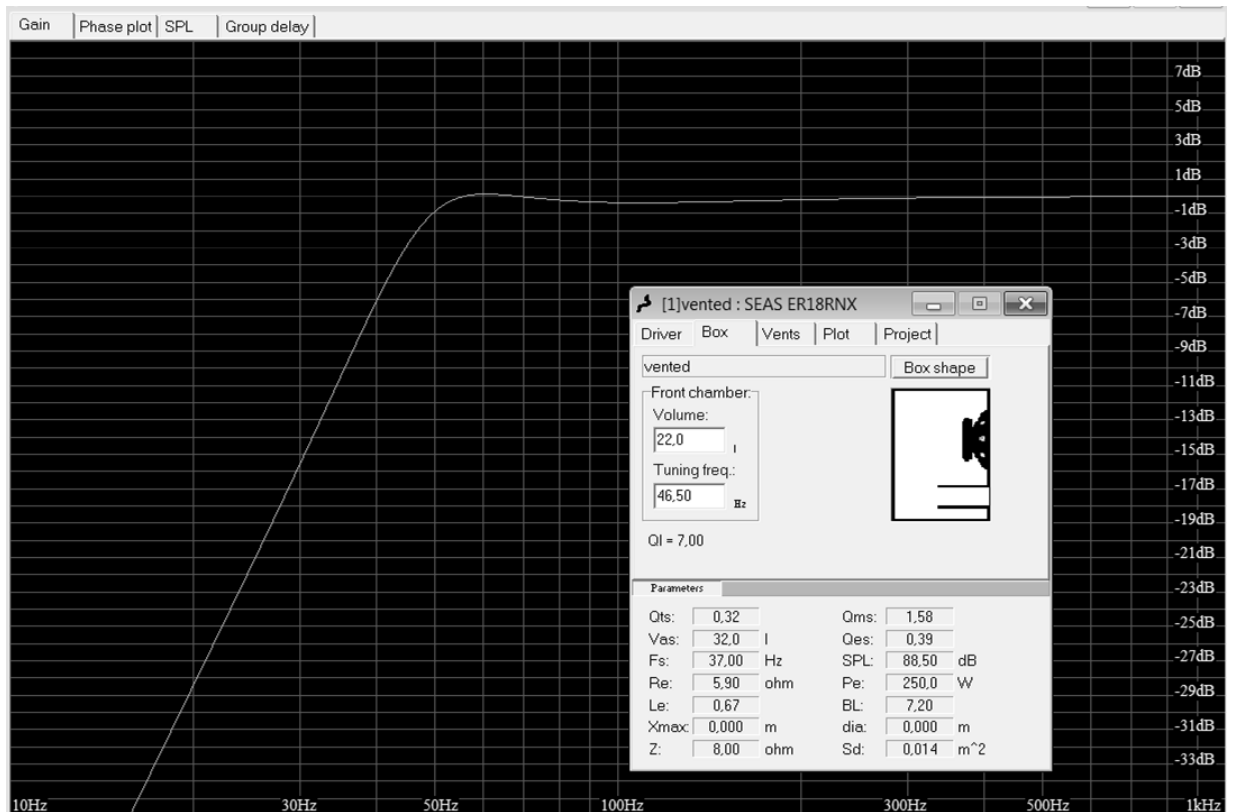
2.2 Návrh a simulace ozvučnice

Při návrhu ozvučnice se obvykle vychází z potřebného objemu pro hlubokotónový reproduktor. Jelikož jsem se rozhodl pro dvou-pásmovou reprosoustavu, potřebný objem pro vysokotónový reproduktor se dá zanedbat při jeho malých rozměrech, neboť nemá příliš vliv na vyzařování dovnitř ozvučnice. Vzhledem k tomu, že se pro uzavřenou ozvučnici podle [2] hodí nejvíce reproduktor s Q_{ts} větším jak 0,5 a mnou zvolený reproduktor má $Q_{ts} = 0,32$, zvolil jsem ozvučnici s bassreflexovými nátrubkem. Pro návrh objemu ozvučnice jsem využil vzorec (2.4).

$$V = \frac{32}{\left(\frac{0,50}{0,32}\right)^2 - 1} = 22,2l \quad (2.5)$$

Q_{tc} jsem zvolil 0,5, jelikož budu používat výhybku druhého řádu typu Linkwitz-Rileyho.

Ke zjištění potřebných údajů k bassreflexovým nátrubkům jsem použil freewarový program dánské firmy LinearTeam s názvem WinISD 0.44. Po zadání potřebných hodnot a parametrů reproduktoru a následného laborování s různými rezonančními frekvencemi nátrubku a daného objemu bedny, mně vyšlo nejlépe následující řešení bedny. Při objemu reproboxu 22 l použít dva bassreflexové nátrubky průměru 5,5 cm a délky 25,4 cm viz. obr 4. Těmto rozměrům odpovídá pokles 3 dB/dekádu na frekvenci 46,5 Hz.



Obr 4 Simulace průběhu frekvenční charakteristiky v programu WinISD

Ze simulace bylo dále zjištěno, že při zvyšování objemu se dosáhne menší zvlnění na frekvenční charakteristice. Dále při zvyšování aktivní plochy bassreflexového nátrubku klesala potřebná délka nátrubku, jak je vidět ze vzorce (2.6), kde je jasná závislost plochy a délky bassreflexového nátrubku. Při návrhu ozvučnice se nejdříve brala plocha nátrubku dle [1] 1/4 plochy basové membrány, poté se plocha nátrubku dle simulace zmenšovala až na výslednou hodnotu, která mi vyhovovala, jak z konstrukčního hlediska, tak estetického.

$$l = \frac{S_1 * 3,01 * 10^5 - 096\sqrt{S_1 O}}{O f_r^2}$$

(2.6)

2.3 Konstrukce ozvučnic

Při konstrukci reproduktorových ozvučnic je nejvhodnějším materiálem takový materiál, který je co nejtuzší a nejtěžší a má velké vlastní vnitřní tlumení. Mezi tyto materiály patří například beton, či železo, u kterých je však největší problém váha, proto se v dnešní době dělají především konstrukce ze dřeva a různých dřevoláknitých materiálů. Ozvučnice se také vyrábějí z plastových kompozitů (což je levné, ale nekvalitní řešení) a laminátových

plátů, ať ze sklolaminátu či dražším řešením je použití kevlaru. Aby ozvučnice plnila správně svoji funkci, musí být dostatečně tuhá a mít dostatečnou tloušťku stěn. Při nedostatečné tuhosti či tloušťce stěn může docházet díky vnitřním zvukovým vlnám k rezonování stěn a tím k zeslabení energie, kterou reproduktor vyzáří a zejména může docházet k poklesu účinnosti reproduktoru hlavně na nízkých frekvencích.

Nejběžnějším materiálem ke stavbě ozvučnice je dřevo a jeho různé odnože. Prvním možným materiálem je tzv. MDF deska (Medium density fibre) neboli středně hustá deska z fibru. Tento materiál má dobré vnitřní tlumení i je dostatečně těžký, velice snadno se opracovává, jelikož má velmi jemné piliny, z kterých je lisován. Deska je proto vhodná pro domácí výrobu HiFi, kdy při konečné úpravě vzhledu stačí potáhnout nějakým druhem plsti či natřít barvou nebo nastříkat. Tím dosáhneme uspokojivého vzhledu. Pouze proti klasickému dřevu nemá tento materiál žádnou strukturu. Levnějším řešením než MDF deska je deska z DTD materiálu neboli dřevotřísková deska, která již nemá tak dobré vnitřní tlumení a hůře se zpracovává oproti MDF. Dalším materiálem můžeme být například březová překližka, která se více používá pro stavbu profesionálních beden nebo surová dřeva, například z dubu či jasanu. Tato dřeva jsou dostatečně pevná, ale jsou těžší než MDF či DTD. Plastové kompozity se používají ve velké míře u levnějších reprosoustav či reprobeden malých rozměrů, u kterých nemusí být až tak velká tuhost.

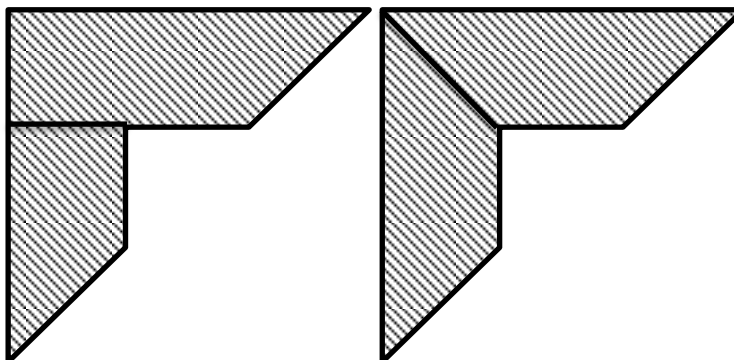
Pokud máme vybraný materiál, musíme se rozhodnout pro správnou tloušťku desek, doporučení dle [4] vidíme, viz tabulka číslo 2. V zásadě podle [1] stačí na boční stěny o něco tenčí materiál a na přední a zadní stěnu širší. Hlavní zvukové vlny se poté odrážejí o přední a zadní desku. Poměry délek jednotlivých stran ozvučnice nejsou kritické z hlediska kvality přenosu hudebního signálu, tudíž je můžeme zcela přizpůsobit vlastnímu vkusu a našim možnostem s umístěním reproduktorové soustavy. Při výběru materiálu a jeho tloušťky hraje velmi významnou roli i jeho konečná cena a dostupnost materiálu.

Vnitřní objem ozvučnice [l]	Tloušťka desky ozvučnice [mm]
menší než 5	do 12
5 - 20	15 – 18
větší než 20	větší než 18

Tab 2 Doporučené minimální tloušťky stěn v závislosti na objemu ozvučnice

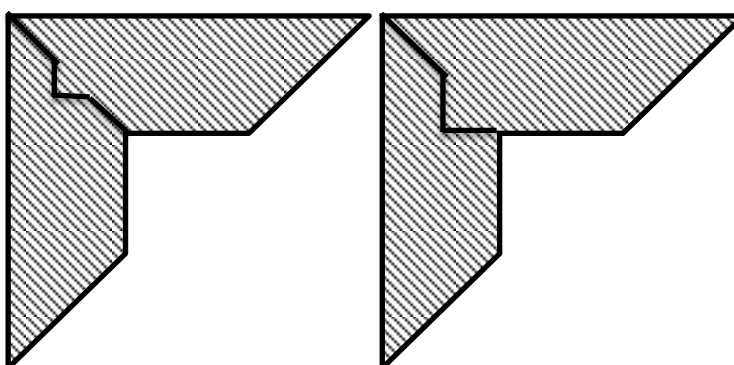
Po výběru vhodného materiálu se rozhodujeme, jakým způsobem jednotlivé desky pospojujeme. Je mnoho způsobů od méně náročných a méně pevných (na pokos) po

technologicky velice náročné, ale dostatečně pevné, například na pokos se zámek.



Obr 5 spojení na tupo

Obr 6 spojení na pokos



Obr 7 spojení na pokos se zámek

Obr 8 spojení polodrážkou

Na obr 5 je vidět nejjednodušší spojení, a to na tupo, které může mít buď tzv. přiznanou spáru nebo být přesáhováno, aby spára nebyla vidět. Tento způsob je nejjednodušší, ale také nejméně vzhledný. Poněkud vzhlednější, hlavně u MDF desky, vypadá spojení na pokos na obr 6 či jeho pevnější varianta na pokos se zámek obr 7. Tato spojení již potřebují přesnější výrobu hlavně u spojení se zámek, který je technologicky velice obtížný na výrobu. Určitým kompromisem je spojení s polodrážkou, které se dá následně například zkosit a odýhovat.

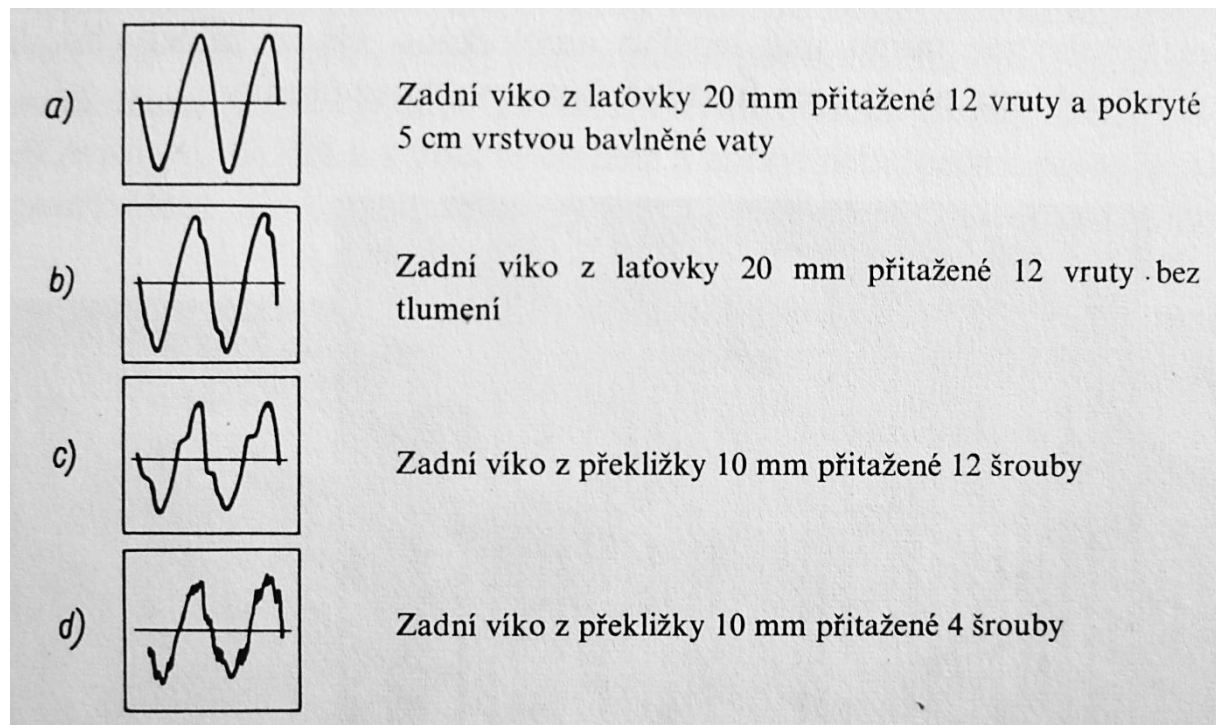
Po vybrání vhodného způsobu spojení, stačí již pouze určit umístění akustických měničů. Pravidlem bývá umisťovat měniče na svislou osu reproboxu. U dvou-pásmové reprosoustavy je optimální rozteč středů měničů či maximální dle [2] vzorce číslo (2.7),

$$d = \frac{425}{f_D} \quad (2.7)$$

kde d je vzdálenost středů a f_D je dělicí frekvence výhybky a vzorec odpovídá 5/4 vlnové délky na dělicím kmitočtu. Pro tří-pásmovou reprosoustavu platí pravidlo, že by vzdálenost mezi středotónovým a basovým měničem měla být co nejmenší. Pro vzdálenost

mezi vysokotónovým a basovým měničem platí stejný vzorec (2.7). Optimální vzdálenost pro mimo osové umístění není určena konkrétním vzorcem, ale záleží na dlouhodobém experimentování. Vysokotónové a středotónové měniče by měly být zapuštěny do roviny s přední deskou ozvučnice, u hlubokotónového měniče na tom již tolik nezáleží vzhledem k velikosti vlnové délky na určité frekvenci. V případě bassreflexové ozvučnice není umístění bassreflexových nátrubků až tak kritické, ale doporučuje se umístění co nejbližší k reproduktoru, a to z důvodu maximálního využití vzájemné vazby mezi reproduktorem a bassreflexovým nátrubkem. Pokud má reprosoustava dostatečně vysoké nožičky, doporučuje se občas umístění nátrubku směrem do země. U bassreflexové ozvučnice také nejsou kritické rozměry jednotlivých stěn, ale nedoporučuje se, aby tato ozvučnice měla nějaký rozměr extrémně malý.

Poté co máme promyšlené umístění a druh spojování reprosoustavy, zbývá ji již jen složit. Při spojování stěn, pokud používáme obyčejné spojení na pokos či na tupo, je vhodné ještě proložit kolíky, které se zapustí do stěn. Do děr se kápne vhodné lepidlo, stěny, které na sebe navazují, je vhodné také potřít lepidlem. Zadní stranu ozvučnice je nejvhodnější přišroubovat vhodnými vruty v dostatečném množství, aby ozvučnice nerezonovala, viz obr 9 převzatý z [1], kde na grafu je vidět vliv množství vrutů na zkreslení sinusového signálu.



Obr 9 Převzato z [1]: Zkreslení sinusového signálu 75 Hz, přenášeného reproduktorem, které vzniká nedostatečnou pevností zadního víka reproduktorové skříně

Zadní stěnu sestrojíme pomocí vrutů z důvodu možnosti odejmout tuto desku. Nikdy ke spojování desek nepoužíváme hřebíky. Při konstrukci ozvučnice je vhodné ji dostatečně

vyztužit například hranolkem do rohů či spojit protější stěny hranolkem dostatečné tloušťky. Po sestrojení ozvučnice je ještě doporučováno utěsnit všechny kouty a rohy silikonovým tmelem z důvodu co nejlepšího utěsnění netěsností, aby na nízkých frekvencích, kdy je uvnitř skříně velký tlak k profouknutí, nedocházelo ke zkreslení výsledného signálu.

Dalším neméně důležitým faktorem při stavbě ozvučnice je její následné zatlumení vhodným materiálem. Tlumení vnitřních stěn ozvučnice omezuje vznik stojatých vln. Při vzniku tlaku na zadní stěně membrány vyzářená zvuková vlna naráží na zadní stěnu ozvučnice, od které se odráží zpět na membránu, a to způsobuje zkreslení. Při vhodném zatlumení se část vlny pohltí tlumením a odražená vlna má menší energii. Odražené vlny způsobí vně ozvučnice interferenci na kmitočtech o vlnové délce srovnatelné s rozměry ozvučnice. Interference se projevují na frekvenční charakteristice jako výkyvy vyzářeného výkonu

Na tlumení těchto vln se nejčastěji používá vhodné tlumící rouno s dostatečnou pohltivostí. Také se dá použít krejčovská vata či čedičová a skelná vata. Dvě poslední vaty se již dnes nepoužívají, jelikož se s nimi obtížně pracuje a jsou i zdraví škodlivé v případě vdechnutí miniaturních částíček. U objemu skříně nad 100 l se také používá tlumení tzv. kmitacími panely, které se již montují při sestavování ozvučnice. U panelů bylo odzkoušenou znatelné zkvalitnění přednesu nízkých frekvencí.

Vrstvu tlumícího materiálu musíme vždy volit přiměřenou. Množství tlumení záleží na velikosti basového reproduktoru. Tlumí se hlavně zadní a boční stěny ozvučnice nebo se jen vloží část tlumícího materiálu volně do ozvučnice, například mezi jednotlivé výztuhy, jako v mém případě.

2.4 Samotná konstrukce ozvučnice

Pro konstrukci ozvučnice jsem zvolil materiál MDF o tloušťce stěn materiálu 18 mm. Rozměry bedny jsem určil podle výpočtu a následné simulace objemu ozvučnice viz výše, které vycházely na 22 l. Jelikož jsem věděl, že do ozvučnice budu umisťovat dva bassreflexové nátrubky o velikosti $\varnothing 5,5$ cm a délce 24,5 cm, které jsem chtěl umístit do přední části bedny, podmínil jsem tomu i vnitřní rozměry bedny, které vycházejí následovně (š x v x h) 220 x 340 x 295 mm vnější rozměry ozvučnice vycházejí 256 x 376 x 331 mm viz technický náčrt na obr 9, podle kterého se ozvučnice vyrobila. Na přední stranu ozvučnici jsem na svislou osu rozmístil výškový a basový reproduktor ve vzdálenosti

dle vzorce (2.6). Bassreflexové nátrubky jsem umístil mezi reproduktory na přední straně, která byla ještě zkosena pod úhlem 45° . Na zadní stěnu byl do dolní části umístěn terminál pro připojení reprosoustavy k zesilovači. Na boční, vrchní a spodní strany jsem použil spoj na tupo a provázal ho dostatečným množstvím dřevěných kolíků, které byly i namočený v lepidle pro pevnější spoj. K tomuto seskupení byla pomocí dřevěných kolíků připevněna také přední strana, a to na tupo, na které byly potřebné otvory pro reproduktor a nátrubky vyfrézovány a zatmeleny pro výsledný zapuštěný a hladký efekt. Zadní stěna byla k ozvučnici přidělena pomocí čtyř vodících kolíků a velkým množstvím vrutů do dřeva. Po zkompletování celé ozvučnice jsem vyplnil ještě spáry silikonovým tmelem, který se používá na parkety. Po odměření bedny, kterému se budu věnovat níže, jsem se rozhodl bednu ještě vyztužit, a to jak boční strany, tak přední a zadní strany dvěma hranoly. Na spodní část ozvučnice byly namontovány čtyři gumové nožičky pro lepší stabilizaci a nepřenášení vibrací na podklad, na kterém bude ozvučnice stát. Po celkovém odměření natru ozvučnici černou strukturovanou barvou. Stejným způsobem vyrobím i druhou bednu pro stereo poslech.

V příloze č. 9 je konstrukční schéma ozvučnice, z kterého jsem vycházel při stavbě ozvučnice.

Po sestavení ozvučnice jsem začal pracovat na simulaci výhybky a její praktické stavbě.

3 Výhybka

V této kapitole se zaměřím na problematiku reproduktorových výhybek, které jsou nedílnou součástí každého návrhu reproduktorové soustavy. Poté přiblížím jejich princip návrhu a následné simulace. Popíši také možné druhy kompenzací pro reproduktor a samotný návrh vlastní výhybky pro mou reprosoustavu.

K simulování výhybek jsem využil program TINA od německé firmy Design Soft.

3.1 Funkce elektronické výhybky v reprosoustavě

Výhybka pro reprosoustavu je speciální případ dělicího filtru, který se v dnešní době používá v telekomunikační technice, i když s rozvojem digitální techniky trochu poklesl jejich význam. Používá se zejména v telefonii, kde můžeme po jednom drátě poslat více

hovorových signálů, které se poskládají za sebe a dělicí filtr je poté rozloží zpět na jednotlivá pásma, která je vrátí na původní místa.

Ve své práci se zabývám speciálně reproduktorovými výhybkami. Jelikož neexistuje reproduktor, který by dokázal dostatečně kvalitně obsáhnout celou šíři spektra v oblasti slyšitelných kmitočtů a dodat dostačující výkon a minimální zkreslení, využíváme reproduktory, které vyzařují jen určitou část spektra, které je dané právě tímto druhem výhybky. Rozděluje elektrickou energii výkonového zesilovače (obsahujícího celé spektrum zvuků) do reproduktorů tak, aby se do nich dostala jen část akustického pásma. Reproduktor musí mít pro toto pásmo optimální parametry a vyzáří ho s dostatečným výkonem a minimálním zkreslením jak lineárním, tak nelineárním. Výhybky jsou tvořeny zpravidla správnou konfigurací součástek, jako jsou kondenzátor, tlumivka a rezistor. Součástky vytvářejí kombinace pro propouštění či zadržování určitého pásma nebo jeho kompenzaci. Tlumivky ze svého principu nepropouští pásmo vysokých kmitočtů a propouští pásmo nízkých kmitočtů. Kondenzátory mají přesně opačnou funkci. Pomocí uvedených součástek jsme schopni vytvořit téměř jakoukoliv výhybku.

Reproduktorové výhybky můžeme rozdělovat podle toho, zda a jaké pásmo propouštějí na horní propust, dolní propust, pásmovou propust či pásmovou zádrž. Název určuje, kde se jaké zapojení používá. První dvě se používají například u dvou-pásmové reposoustavy a přidáme-li k nim i pásmovou propust či pásmovou zádrž, můžeme vše využít pro tři a více pásmovou reposoustavu. Samotná dolní propust se používá pro tzv. subwoofer nebo-li basový měnič, který vyzařuje jen nízké kmitočty. Dále se reproduktorové výhybky dělí podle umístění výhybky, a to zda je před výkonovým stupněm či až za ním. Výhybka umístěná před výkonovým stupněm je označována jako aktivní výhybka, která je nevýkonová, tudíž stačí menší součástky. Zpravidla se používají větší strmosti dělicích kmitočtů, ale pro každý reproduktor musí být samotný výkonový stupeň, který zesiluje jen výhybkou ořezané akustické pásmo. Výhybku umístěnou za výkonový stupeň nazýváme pasivní výhybkou, jež musí být dostatečně výkonově dimenzovaná pro výkonový stupeň. Výhybky se zpravidla umísťují do reproduktorových soustav. Jsou nejčastěji využívány pro domácí účely, jelikož pro celou reposoustavu stačí jeden výkonový stupeň. V případě stereo poslechu musí být výhybky dvě, pro každý reproduktor jedna.

Výhybka tvoří i funkci ochranou v případě výškového reproduktoru, kdy by mohlo docházet k výkonovému přetížení. Neboť, jak je dáno funkcí jednotlivých reproduktorů, by výškový reproduktor neměl dostatečnou výchylku pro vyzáření výkonu a mohl by být zničen. Pro dvou-pásmové zapojení reposoustavy používáme kmitočtový filtr typu horní

propust, kdy od určité dělicí frekvence f_D propouští akustické pásmo vyšších kmitočtů a dolní propust dělá přesně opačnou funkci. Zde můžeme vidět, že výhybka je důležitou částí při konstrukci reposoustavy, ale také velice obtížným prvkem pro návrh, jelikož reproduktory nejsou čistě ohmická zátěž, ale mají vlastní kapacitu a indukčnost, které jsou frekvenčně závislé. Správným naladěním výhybky ovlivníme kvalitní hudební přednes reposoustavy. Výhybka může i potlačit určité slabiny daného reproduktoru pomocí určitých kompenzačních obvodů.

Při návrhu výhybky musíme zohlednit vstupní impedanci reproduktoru a potom samotnou výhybku, aby splňovala bezpečnou zátěž pro výkonový stupeň. Při konstrukci musíme počítat také se zatížitelností výhybky, která by měla být minimálně rovna efektivní hodnotě příkonu basového reproduktoru, jenž má největší příkon a skrze výhybku do něj teče největší proud z celé reposoustavy.

Jako první při návrhu výhybky stanovujeme její dělicí frekvenci a následně, jaký bude mít útlum na téže frekvenci nebo-li strmost výhybky.

3.2 Stanovení dělicího kmitočtu reposoustavy

Pro správné určení dělicí frekvence reproduktorů musíme vycházet z vlastností reproduktoru, a to zejména z mezní frekvence a ze znalostí jeho frekvenční charakteristiky. Tyto parametry určují elektroakustické vlastnosti reproduktoru, ale i jeho elektrické parametry. Dělicí frekvence u dvou-pásmové reposoustavy by měla být vyšší než mezní frekvence výškového reproduktoru. Frekvence je obvykle v rozmezí frekvencí od 1500 Hz do 3000 Hz. Pro zlepšení charakteristiky výsledné reposoustavy se občas využívá toho, že dělicí frekvence u výškového a basového reproduktoru nemusí mít stejnou hodnotu. U tří-pásmové reposoustavy se nesmí zapomínat na to, že největší energetické maximum v hudbě je mezi frekvencemi 500 a 1500 Hz, proto volíme mezní frekvenci pod 1500 Hz mezi hlubokotónovým a středotónovým reproduktorem. Z tohoto důvodu by měl být středotónový reproduktor dimenzován na stejný příkon jako hlubokotónový. To stejné platí i pro dvou-pásmovou reposoustavu pokud zvolíme příliš nízkou dělicí frekvenci, při které může docházet ke zkreslení v pásmu středních kmitočtů a také k přetížení vysokotónového reproduktoru a jeho případném zničení.

Dělicí kmitočet je tedy definován spíše z akustického hlediska, avšak za výsledný kmitočet se dá považovat geometrický průměr mezních kmitočtů jednotlivých typů filtrů viz[1].

3.3 Stanovení strmosti a typu filtrů

Důležitou vlastností výhybky je její strmost s jakou utlumuje od dělicí frekvence následující akustické pásmo. U reprosoustav se používá pro strmost jednotka dB na oktávu [dB/okt], což znamená, o kolik je signál utlumen na dělicí kmitočtu o oktávu. Nejčastěji se u pasivních výhybek používá filtr I. a II. řádu (strmost 6 dB/okt a 12 dB/okt). U aktivních výhybek se může vzhledem k velikosti součástek používat III. a IV. nebo vyšší řád (strmost 18 respektivě 24 dB/okt). Za ideální výhybku se dá považovat taková, u které při sečtení přerozděleného signálu dostaneme opět původní signál, který byl přiveden na vstup výhybky. Matematické vyjádření pro tuto skutečnost je dle [4]:

$$L(j\omega) + H(j\omega) = 1 \quad (3.1)$$

Slovně vyjádřeno tak, že komplexní součet přenosu obou signálů filtrů dává ve výsledku jedničku. To znamená, že výhybka na žádné frekvenci nezeslabuje ani nezesiluje. Tento vzorec platí jen pro strmost 6 dB/okt. Pokud použijeme výhybku s vyšší strmostí útlumu, snížíme velikost přenášeného akustického pásma oběma reproduktory. Tohoto stavu chceme docílit, ale na druhou stranu se tím zhoršuje průběh fáze signálu obou filtrů.

Dalším kritériem návrhu výhybky je druh použité aproximace. Mezi nejpoužívanější patří filtr typu Linkwitz-Riley (L-R) nebo filtr Butterworthova typu (B). L-R aproximace, vzorec (3.2), má konstantní součtovou amplitudovou charakteristiku, pro tento typ je velikost činitele jakosti $Q = 0,5$ nebo-li $\frac{1}{2}$. Aproximace B ($Q = 0,71$ nebo-li $1/\sqrt{2}$) má konstantní součet druhých mocnin amplitud na obou výstupech filtru, to znamená, že je konstantní příkon, jak je vidět na vzorci číslo (3.3).

$$|L(j\omega) + H(j\omega)| = k \quad (3.2)$$

$$|L(j\omega)|^2 + |H(j\omega)|^2 = k \quad (3.3)$$

Dle [2] je nutné podotknout, že pokud máme dostatečně malou vzdálenost a splnili jsme podmínku s konstantní amplitudou, automaticky jsme splnili i podmínku konstantního

výkonu. Potom nemusíme hledat kompromisy mezi vyrovnáním osově a výkonové charakteristiky.

Pro výhybku druhého řádu můžeme uvést ještě vzorce pro výpočet velikosti součástek filtru (kapacity a indukčnosti) pro aproximaci typu L-R (3.4) a typu B (3.5). Pokud nechceme pro obě větve filtru použít stejnou aproximaci nebo dělicí kmitočet, můžeme vhodně zkombinovat vzorce[2],

$$L = \frac{R}{\pi f_D} C = \frac{1}{\pi f_D R} \quad (3.4)$$

$$L = \frac{R}{\pi f_D \sqrt{2}} C = \frac{\sqrt{2}}{\pi f_D R} \quad (3.5)$$

kde R znamená impedance reproduktoru a f_D je dělicí kmitočet filtru. Tyto vzorce platí v případě, že by reproduktory měly čistě ohmickou zátěž, pro reálné reproduktory je nutné velikosti součástek zkorigovat buď simulací s náležitým náhradním schématem či reálným měřením a zkoušením velikostí součástek.

Pro úplnost zde uvádím v tab 3 schéma pro dolní a horní propust a strmost 6 respektive 12dB/okt.

	6 dB/okt	12 dB/okt
dolní propust DP		
horní propust HP		

Tab 3 schéma horní a dolní propusti pro strmost 6 a 12 dB/okt

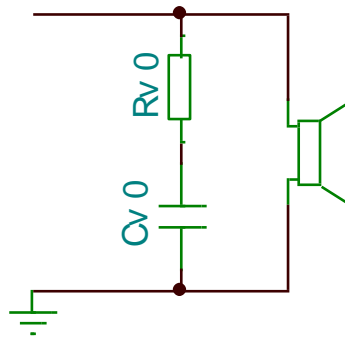
Jelikož žádný reproduktor není ideální a často se kombinují reproduktory o různých velikostech citlivostí či impedancí, musíme na výhybku ještě navázat různé kompenzační obvody.

3.4 Kompenzační obvody

Jak již zde bylo uvedeno, impedance reproduktoru je kmitočtově závislá hlavně z důvodu indukčnosti kmitací cívky. Dále se velice často používá kompenzace (vyrovnání) citlivosti většinou u vysokotónového reproduktoru, který má citlivost zpravidla vyšší. Je možné kompenzovat i různé poklesy či špičky na frekvenční charakteristice reproduktoru vhodnými zapojeními rezistoru, kondenzátoru a indukčnosti. Nyní si uvedeme něco charakteristického ke kompenzaci indukčnosti a vyrovnání citlivosti.

3.4.1 Kompenzace indukčnosti

Cílem kompenzace indukčnosti kmitací cívky je minimalizovat imaginární část impedance. Toho můžeme docílit vhodnou volbou velikostí sériové kombinace rezistoru a kondenzátoru připojené paralelně k reproduktoru viz obr 10.



Obr 10 schéma kompenzace indukčnosti

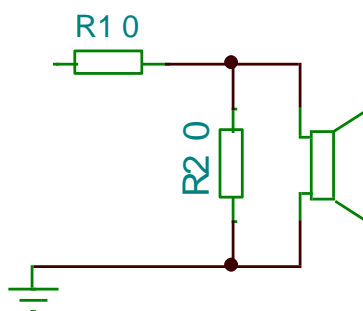
Kompenzace indukčnosti se dá použít i u vysokotónových reproduktorů, ale tuto funkci zde i částečně plní obvod na snížení citlivosti. Kompenzační člen dle [2] vypočteme pomocí vzorců (3.6) a (3.7), kde R_v a C_v jsou hodnoty kompenzačního členu,

$$R_v = R_E C_v = \frac{L_E}{R_E^2} \quad (3.6), (3.7)$$

kde R_E je stejnosměrný odpor cívky a L_E indukčnost kmitací cívky daná výrobcem. U vysokotónového reproduktoru se projevuje velké zvětšení impedance hlavně v oblasti rezonančního kmitočtu, proto je vhodné dělicí kmitočty posunout co nejdále od této frekvence. Jak bylo výše uvedeno, částečně tuto funkci plní i kompenzace citlivosti.

3.4.2 Kompenzace citlivosti

Při výběru reproduktorů do reprosoustavy budeme muset většinou volit mezi reproduktory s různými velikostmi charakteristické citlivosti. Z tohoto důvodu budeme muset citlivost kompenzovat tak, aby jeden reproduktor nehrál hlasitěji než ostatní, neboť tím by je mohl přehlušit. Vysokotónové reproduktory mají většinou větší citlivost než hlubokotónové reproduktory. Vhodnou kombinací rezistorů (jako dělič) je potřebné snížit jejich citlivost, aby při poslechu hudby nebylo tolik slyšet výšky a mohla být podána vyrovnaná amplitudová charakteristika reproduktoru. Schéma obvodu vidíme na obr 11.



Obr 11 schéma pro vyrovnání citlivosti reproduktoru

Pro výpočet hodnot dle [4] se dají použít vzorce pro R_2 (3.8) a pro R_1 (3.9), kde R_E je stejnosměrný odpor rezistoru a A je potřebné zesílení (či zeslabení) citlivosti reproduktoru.

$$R_2 = 10^{\frac{A}{20}} * \frac{R_E}{1 - 10^{\frac{A}{20}}} R_1 = R_E - \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_E}} \quad (3.8), (3.9)$$

Poté se výsledné hodnoty zaokrouhlí a vyberou příslušné velikosti rezistorů z dostupné nabídky výrobců. Skutečný výsledný útlum tohoto kompenzačního členu je uveden ve vzorci (3.10). Pro celou tuto kombinaci se může ještě spočítat, jakým celkovým odporem bude zatěžovat výhybku (3.11).

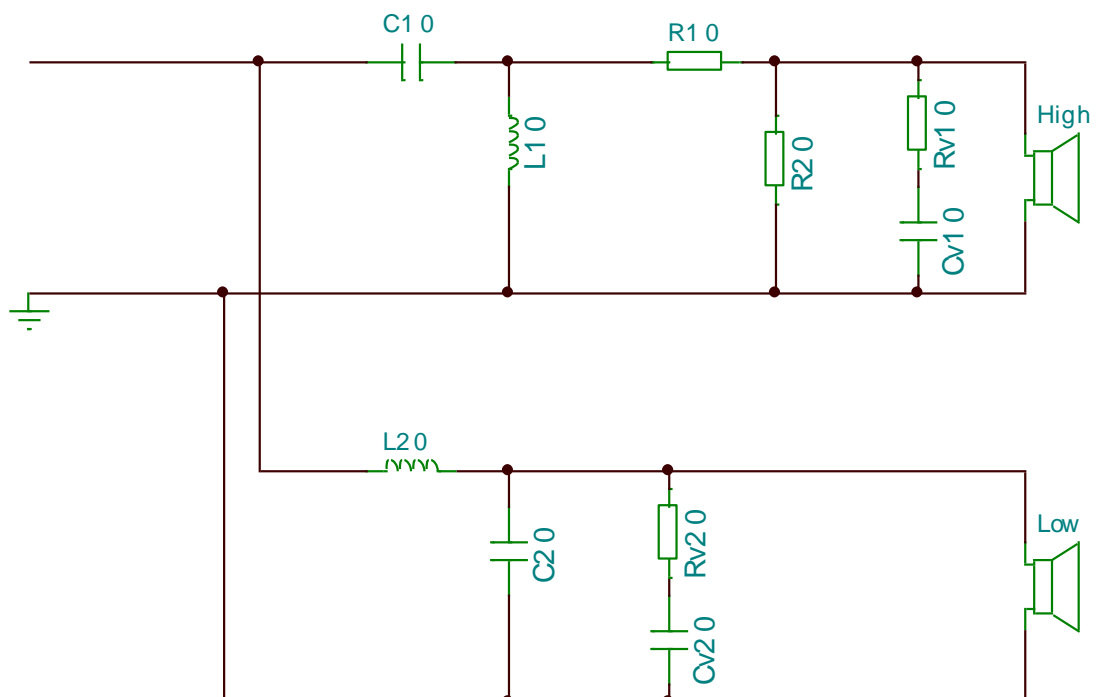
$$A = 20 * \log \frac{\frac{R_2 * R_E}{R_2 + R_E}}{R_1 + \frac{R_2 * R_E}{R_2 + R_E}} \quad (3.10)$$

$$R = R_1 + \frac{R_2 * R_E}{R_2 + R_E} \quad (3.11)$$

Výsledné R platí pouze v případě, kdy nebereme v úvahu kmitočtovou závislost reproduktoru.

4 Návrh a realizace výhybky

V této kapitole se zaměřím na vlastní návrh výhybky, její následnou simulaci a výrobu výhybky. Jelikož moje reprosoustava bude dvou-pásmová, použijeme jen horní a dolní propust a k nim potřebné kompenzační obvody. Ze simulace ozvučnice v kapitole 2.2 jsem se rozhodl pro aproximaci typu Linkwitz-Rileyho a její činitel jekosti $Q = 0,5$. Strmost výhybek jsem zvolil shodnou 12 dB/okt. Na obr 12 je schéma navrhované výhybky pro obě větve i s příslušnými kompenzacemi.



Obr 12 schéma výhybky navržené pro reprosoustavu

Nejprve jsem spočítal velikost jednotlivých součástí výhybky.

4.1 Hodnoty součástí vypočtené dle teoretických vzorců

Vzorce pro výpočet daných hodnot součástí jsem použil z kapitol 3.2, 3.3 a 3.4. Jako dělící kmitočet po konzultaci s vedoucím práce jsem zvolil 2,2 kHz. Všechny potřebné hodnoty se nacházejí v katalogu od výrobce v příloze č. 1 a 2. Nejdříve jsem spočítal velikosti součástí pro samotnou výhybku:

$$L_1 = \frac{6}{\pi * 2200} = 0,868 \text{ mH} \quad (4.1)$$

$$C_1 = \frac{1}{\pi * 2200 * 6} = 24,11 \text{ uF} \quad (4.2)$$

$$L_2 = \frac{8}{\pi * 2200} = 1,157 \text{ mH} \quad (4.3)$$

$$C_2 = \frac{1}{\pi * 2200 * 8} = 18,08 \text{ uF} \quad (4.4)$$

Kompensace indukčnosti vysokotónového reproduktoru

$$R_{v1} = 4,8 \text{ ohm} \quad (4.5)$$

$$C_{v1} = \frac{0,05 * 10^{-3}}{4,8^2} = 10,41 \text{ uF} \quad (4.6)$$

Kompensace citlivosti vysokotónového reproduktoru. Podle katalogových hodnot výrobce bylo potřeba snížit citlivost o 6 dB/okt, tedy $A = -6 \text{ dB}$

$$R_2 = 10^{\frac{-6}{20}} * \frac{4,8}{1 - 10^{\frac{-6}{20}}} = 4,8 \text{ ohm} \quad (4.7)$$

$$R_1 = 4,8 - \frac{1}{\frac{1}{4,8} + \frac{1}{4,8}} = 2,4 \text{ ohm} \quad (4.8)$$

$$A = 20 * \log \frac{\frac{4,8 * 4,8}{4,8 + 4,8}}{2,4 + \frac{4,8 * 4,8}{4,8 + 4,8}} = -6,02 \text{ dB} \quad (4.9)$$

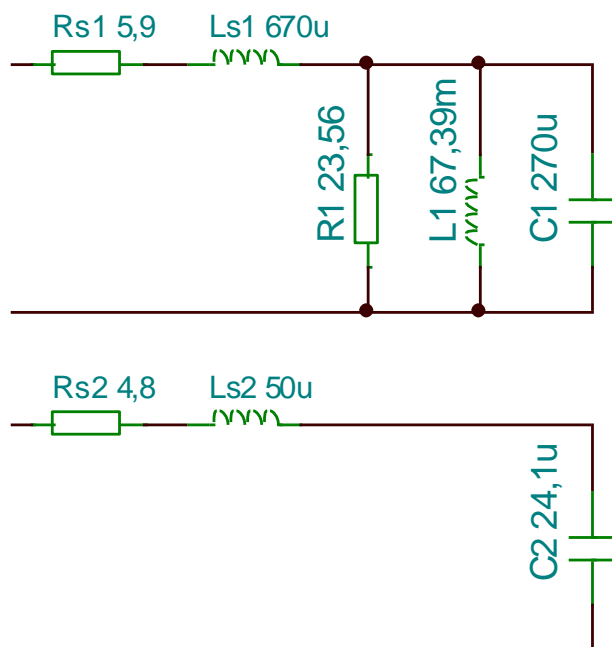
$$R = 2,8 + \frac{4,8 * 4,8}{4,8 + 4,8} = 4,8 \text{ ohm} \quad (4.10)$$

Kompensace indukčnosti hlubokotónového reproduktoru:

$$R_v = 5,9 \text{ ohm} \quad (4.11)$$

$$C_v = \frac{0,67 * 10^{-3}}{5,9^2} = 19,24 \text{ uF} \quad (4.12)$$

Tyto hodnoty součástek jsem použil do simulace, která byla provedena v programu TINA od Design soft. Pro co nejreálnější simulaci výhybky je dále potřebné vypočítat ještě hodnoty součástek pro náhradní schéma reproduktorů, které jsou pro vysokotónový a hlubokotónový reproduktor je znázorněné na obr 13.



Obr 13 Náhradní schéma hlubokotónového (nahore) a vysokotónového (dole) reproduktoru použité v simulaci

Veškeré matematické vzorce byly převzaty z kapitoly 1.3.

Pro hlubokotónový reproduktor:

$$R_{S1} = 5,9 \text{ ohm} \quad (4.13)$$

$$L_{S1} = 0,67 \text{ mH} \quad (4.14)$$

$$R_1 = \frac{Bl^2}{R_m} = \frac{7,2^2}{2,2} = 23,56 \text{ ohm} \quad (4.15)$$

$$L_1 = C_m Bl^2 = 1,3 * 10^{-3} * 7,2^2 = 67,39 \text{ mH} \quad (4.16)$$

$$C_1 = \frac{m_m}{Bl^2} = \frac{0,014}{7,2^2} = 270 \text{ uF} \quad (4.17)$$

Pro vysokotónový reproduktor:

$$R_{S2} = 4,8 \text{ ohm} \quad (4.18)$$

$$L_{S2} = 0,05 \text{ mH} \quad (4.19)$$

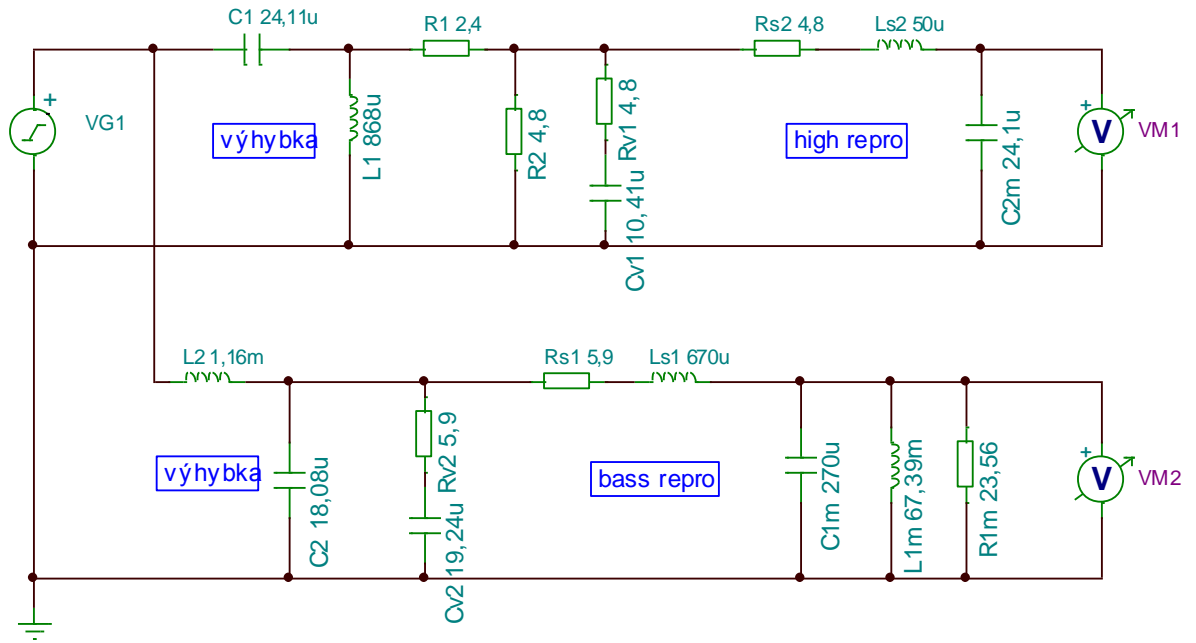
$$C_2 = \frac{m_m}{Bl^2} = \frac{0,33 * 10^{-3}}{3,7^2} = 24,01 \text{ uF} \quad (4.20)$$

4.2 Simulace a realizace výhybky

Pro simulování výhybky jsme vyšel z předchozích informací uvedených v kapitole 4.1. Po odsimulování výhybky jsem začal se samotnou realizací výhybky a jejím potřebným laděním s cílem dosáhnout mnou stanoveného výsledku.

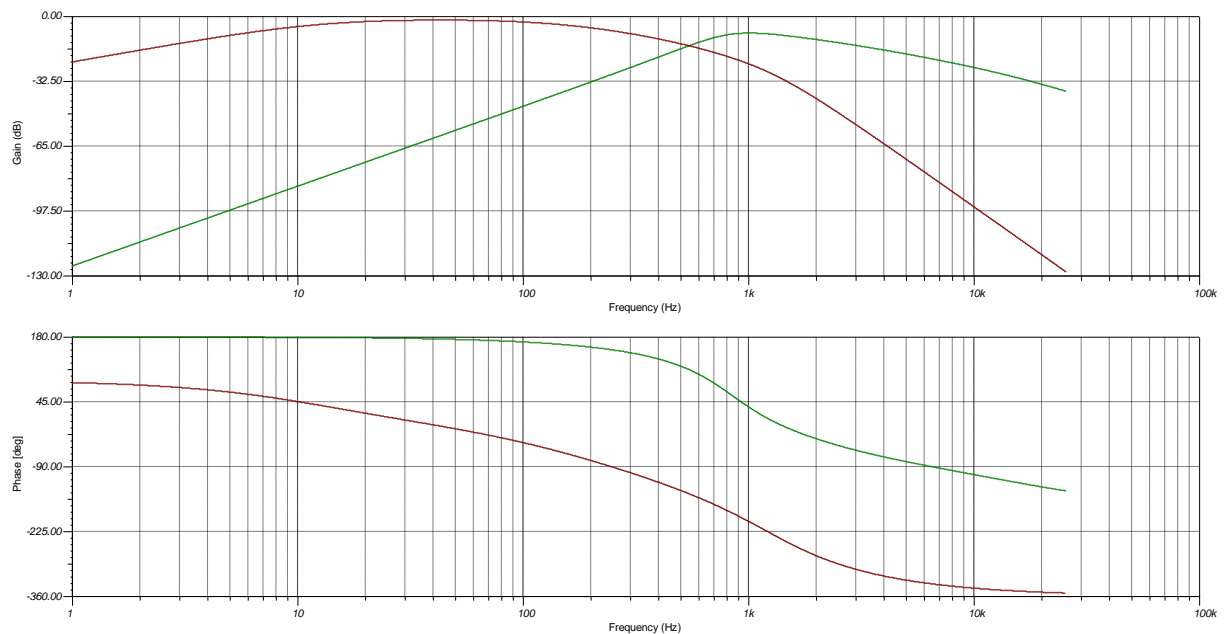
4.2.1 Simulace výhybky

Na obr 14 je vidět výsledné náhradní schéma reprosoustavy i s velikostí vypočítaných součástek pomocí kapitoly 4.1.



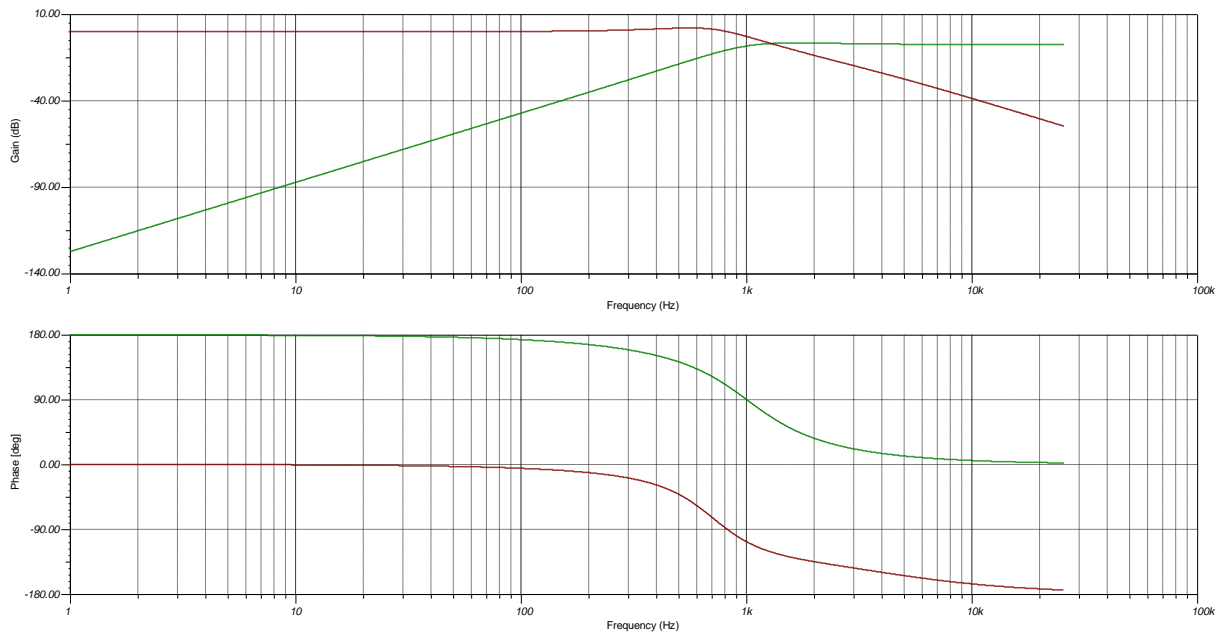
Obr 14 Náhradní schéma použité pro simulaci výhybky

V programu TINA byl odsimulován průběh amplitudové a fázové frekvenční charakteristiky pro hlubokotónovou část (hnědá křivka) a pro vysokotónovou část (zelená křivka). Výsledný průběh simulace je vidět na obr 15.



Obr 15 Simulace amplitudové a fázové frekvenční charakteristiky zatížené reproduktory

Na obr 16 je vidět simulace amplitudové a fázové frekvenční charakteristiky zatížené čistě ohmickou zátěží.



Obr 16 Simulace amplitudové a fázové frekvenční charakteristiky čistě ohmické zátěže

4.2.2 Realizace výhybky

Po odsimulování výhybky jsem na zkušební desce plošného spoje vytvořil výhybku a odměřil její reálné výsledné charakteristiky. Namotal jsem cívky o velikostech 1,28 mH a 1,65 mH a propočítal k nim potřebné kondenzátory. Výsledná odměřená amplitudová charakteristika vyšla dle přílohy č. 4 basová větev (červená křivka) a výšková větev (žlutá křivka). Po složení těchto charakteristik mi nevyhovoval velký překmit ve střední části kmitočtu, který dosahoval místy až 10 dB a poté pokles amplitudy od kmitočtu 3kHz do 20kHz s klesáním o 30 dB. Musel jsem experimentovat s velikostmi součástek a použít jejich reálné hodnoty. Výsledná charakteristika konečných velikostí součástek jsem uvedl v příloze č. 4 zobrazena pro basovou větev (modrá křivka) a pro výškovou větev (oranžová křivka). Úrovně simulovaných a zvolených velikostí součástek se liší z důvodu jiné velikosti vstupního napětí, při kterém byly měřeny, ale pro nástin charakteristik toto není překážkou.

Konečné hodnoty součástek se v některých případech lišily oproti simulovaným hodnotám. Proto v tab 4 porovnávám hodnoty součástek simulovaných a zvolených po spokojenosti s výslednou amplitudovou frekvenční charakteristikou. Zvolené hodnoty součástek byly vzaty i s přihlédnutím na reálné hodnoty součástek, které nám poskytují výrobci.

Označení	Simulovaná hodnota	Zvolená hodnota
C1	24,11 uF	8,3 uF
L1	868 uH	1,28 mH
R1	2,4 Ω	2,2 Ω
R2	4,8 Ω	4,7 Ω
Rv1	4,8 Ω	4,7 Ω
Cv1	10,41 uF	3,3 uF
L2	1,16 mH	1,65 mH
C2	18,08 uF	10 uF
Rv2	5,9 Ω	5,6 Ω
Cv2	19,24 uF	10 uF

Tab 4 Porovnání simulovaných a zvolených hodnot součástek

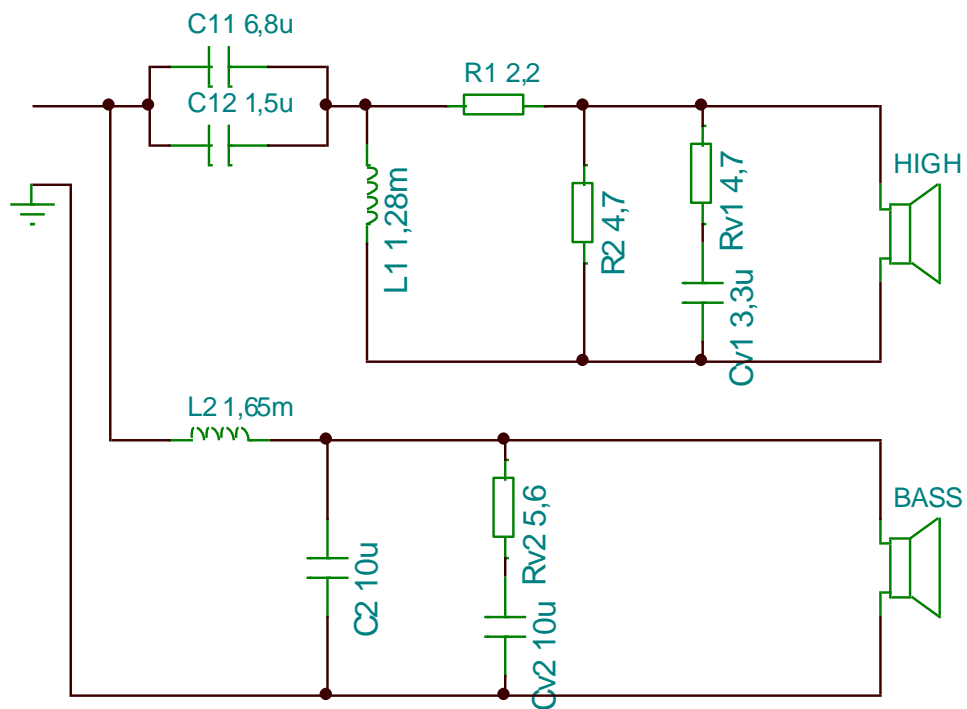
4.3 Návrh schématu, DPS a její realizace

K návrhu desky plošných spojů (DPS) jsem použil klasický návrhový systém, tzn. nakreslil jsem ji v ruce, přičemž jsem se držel předem daných pravidel. Nejprve jsem si pomocí vzorce 4.21 spočítal maximální proud, který poteče výhybkou při plném vybuzení reproduktoru (300W je maximální výkon reproduktoru, který krátkodobě snese). Pomocí zatížitelnosti měděné cesty vysoké 35um jsem dostal minimální šířku spoje, která má být pro proud 6,12A minimálně 2 mm a pro oteplení o 30 °C.

$$I = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{300}{8}} = 6,12 \text{ A}$$

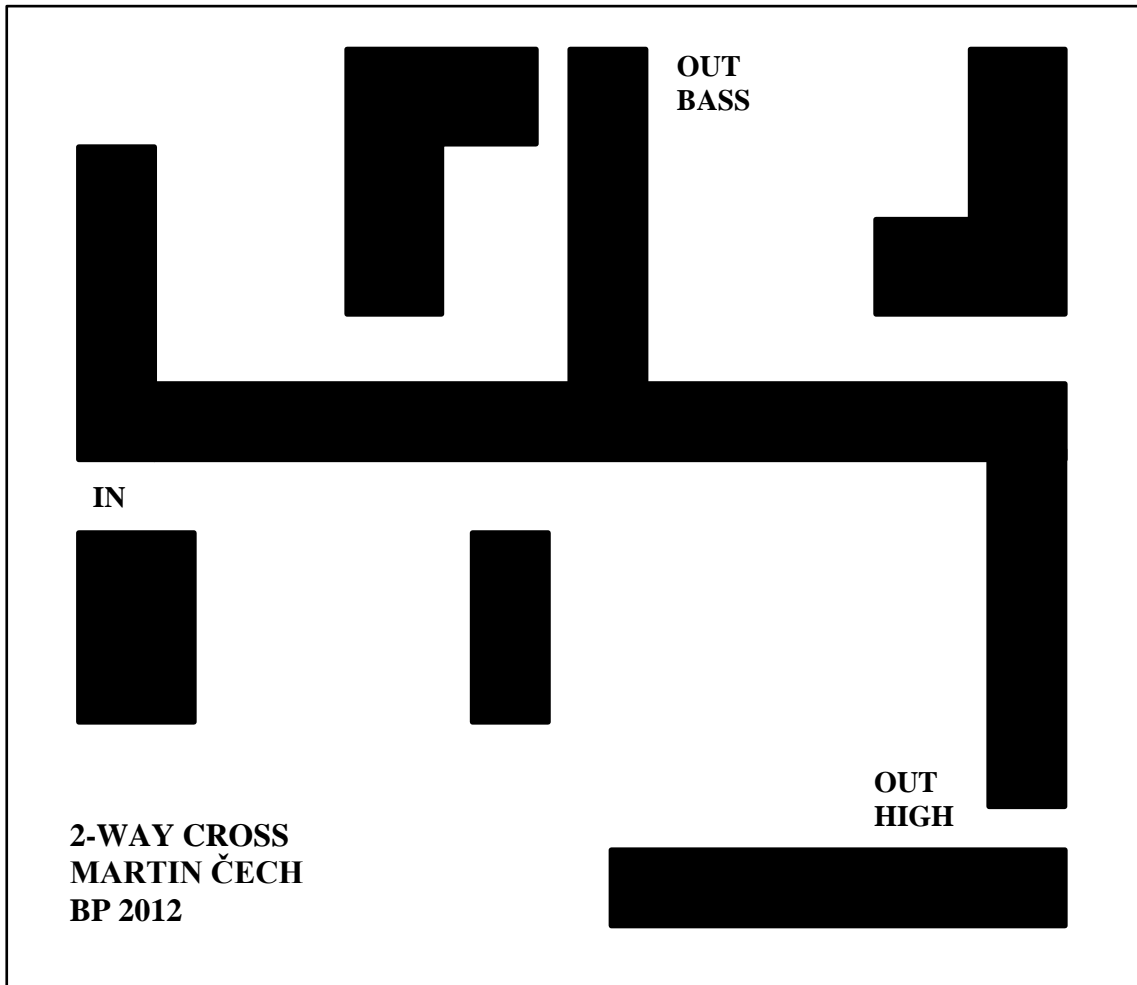
(4.21)

Šířku cesty jsme zvolil 10 mm. Dalším nepsaným pravidlem je, aby zemnicí spoj netvořil okolo žádného prvku stínění, což je požadováno spíše ve vysokofrekvenční technice. Jelikož jsem již věděl, že výhybka bude instalována svisle, instaloval jsem výkonové rezistory vertikálně tak, jak mi to umožňovala velikost desky. Touto instalací vznikl tzv. komínový efekt, při kterém teplo stoupá směrem vzhůru. Na obr 17 je vidět výsledné schéma, pro které jsem kreslil DPS. Na obr 18 je DPS ze strany spojů v měřítku 1:1, kdy výsledné rozměry desky vyšly 130 x 150 mm. Cívky jsou instalovány po okrajích desky z důvodu jejich rozměrů.

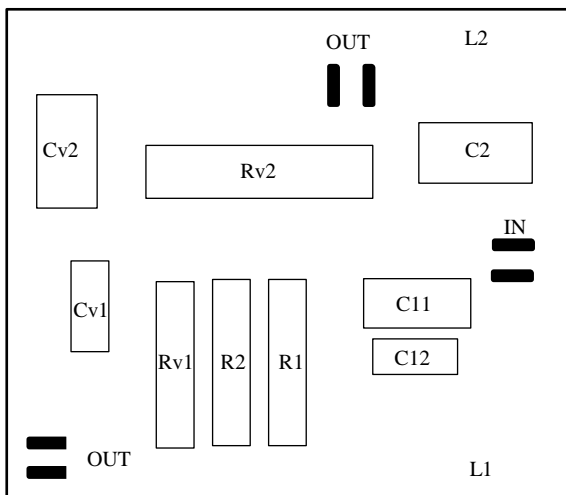


Obr 17 Navržené schéma zapojení DPS

Obr 18 znázorňuje DPS ze strany spojů tak, jak jsem ji namaloval a nechal vyleptat. Je vidět, že na některých místech je spoj širší jak 10 mm, a to z čistě praktických důvodů, neboť jsem pro připojení kabelů od zesilovače a pro připojení reproduktorů použil konektory FAST-ON do DPS. Na obr 19 je vidět DPS ze strany součástek tak, jak budou umístěny. Cívky umístěné po stranách desky nejsou vzhledem k jejich velkým rozměrům zakresleny (nacházejí se v místech jejich popisek).



Obr 18 Deska plošného spoje výhybky - strana spojů. Měřítko 1:1



Obr 19 Deska plošného spoje výhybky - strana součástek. Měřítko 1:2

Cívky jsem si namotal sám. K jejich výrobě jsem použil silikonovou kostru o vnitřním průměru 40 mm, vnějším průměru 85 mm a světlosti kostry 20 mm. Na tuto kostru jsem namotal cívku z eloxovaného drátu o průměru 1 mm. U jedné cívky jsem udělal přibližně 170 závitů s výslednou indukčností 1,28 mH a u druhé cívky jsem udělal přibližně 185

závitů s výslednou indukčností 1,65 mH. Rezistory jsem zvolil od firmy BENNIC, a to keramické drátové vysokovýkonové. Pro výškovou větev jsem použil rezistory o výkonu 5W a pro basovou větev o výkonu 20W. Kondenzátory jsem si vybral u firmy ES Ostrava, a to metalizované polyesterové kondenzátory řady MKT 205 pro jmenovité napětí 100V= a 63V~. Jejich parametry jsou uvedeny v příloze č 10.

4.3.1 Seznam součástek výhybky

V tab 5 uvádím potřebné součástky na výrobu desky plošných spojů. Dále bude nutný ještě port na připojení reproduktoru k zesilovači a potřebné kabely.

Označení	Hodnota	Popis
C11	6,8 uF	Svitkový kondenzátor
C12	1,5 uF	Svitkový kondenzátor
Cv1	3,3 uF	Svitkový kondenzátor
C2	10 uF	Svitkový kondenzátor
Cv2	10 uF	Svitkový kondenzátor
L1	1,28 mH	Vzduchová cívka
L2	1,65 mH	Vzduchová cívka
R1	2,2 Ω 5W	Keramický rezistor
R2	4,7 Ω 5W	Keramický rezistor
Rv1	4,7 Ω 5W	Keramický rezistor
Rv2	5,6 Ω 20W	Keramický rezistor
Fast-on do DPS	6x	

Tab 5 Seznam použitých součástek ve výhybce

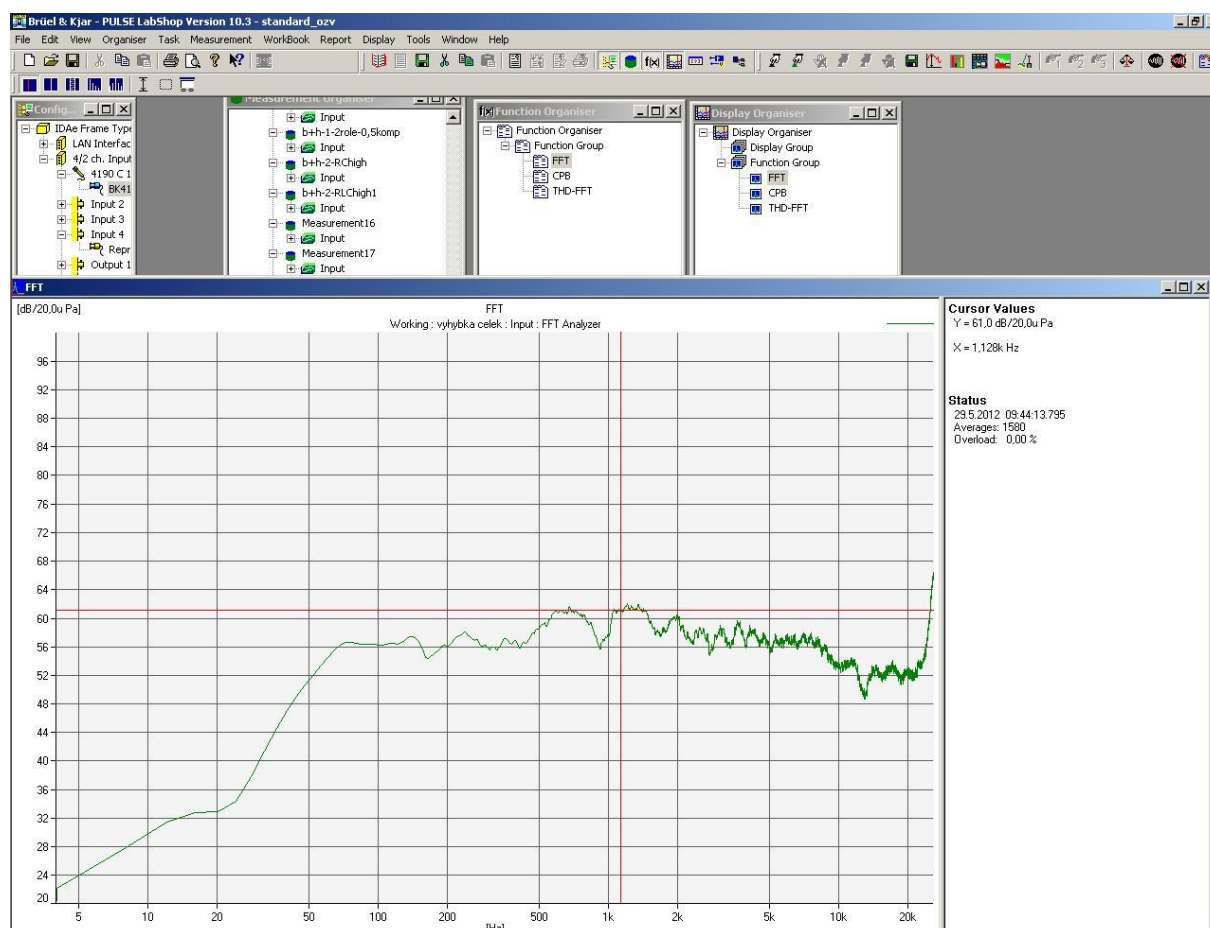
5 Měření reprosoustavy

Po zhotovení reproduktorové soustavy a zapojení výsledné výhybky následovalo měření několika amplitudových frekvenčních charakteristik. Všechna měření probíhala ve školní bezodrazové komoře. V komoře byla teplota 21,7°C a vlhkost vzduchu byla 47%. K měření amplitudových frekvenčních charakteristik jsem použil mikrofon od firmy Bruel & Kjaer. Mikrofon je půl palcový pro volné pole (Free field) type 4190. Použité přístroje jsem uvedl v tab 6. Od firmy Bruel & Kjaer jsem využil také program pro vyhodnocení dat s názvem

PULSE LabShop ver. 10.3 - nástin pracovního prostředí viz obr 20. K analýze jsem vybral rychlou Furierovu transformační analýzu (FFT analys) s 6400 spektrálními čarami. Měřící rozsah byl v rozmezí od 4Hz do 25,6kHz. Úroveň signálu byla v dB stažená k 20uPa. Jako zdroj signálu jsem použil zesilovač firmy YAMAHA. Výsledné napětí puštěné do reprosoustavy bylo 5,9V střídavých.

Název	Popis
Agilent 34401A	digitální multimetr
Yamaha poweramplifier CP2000	zdroj signálu
B&K 3560C Analyzátor Pulse	analyzátor
B&K Free field 1/2" type 4190	mikrofon
DELL	počítač pro vyhodnocení

Tab 6 seznam použitých přístrojů



Obr 20 Pracovní prostředí programu PULSE Labshop ver. 10.3

Měřil jsem pouze amplitudovou frekvenční charakteristiku, mikrofon byl umístěn v bezodrazové komoře ve vzdálenosti 1 metr od středové osy výškového reproduktoru viz příloha č. 11.

Nejprve jsem odměřil amplitudovou frekvenční charakteristiku samotných reproduktorů bez výhybky a potom s výhybkou. Výsledné grafy jsou uvedeny v příloze č. 5 pro hlubokotónový reproduktor a v příloze č. 6 pro vysokotónový reproduktor. Následně jsem změřil celkovou součtovou amplitudovou frekvenční charakteristiku, kterou jsem porovnal s jednotlivými větvemi reposoustavy viz příloha č. 7. Frekvenční charakteristika celkové reposoustavy včetně pozadí, které bylo v komoře při měření reposoustavy, je uvedena v příloze č. 8.

Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout reproduktorovou soustavu pro ozvučení domácího pokoje. V první dvou kapitolách práce jsem popsal teorii vztahující se k základnímu návrhu reproduktorové soustavy, principům funkce reproduktorů, a to zejména dvou-pásmových včetně teorie vztahující se k návrhu ozvučnic a jejich konstrukce. V dalších dvou kapitolách jsem popsal funkce kmitočtové výhybky a její předpoklady pro návrh a konstrukci. Při simulacích jsem vycházel hlavně z údajů výrobce, což vedlo k výsledkům, které se velmi lišily od reálných. Tento stav byl způsoben zjednodušeným náhradním schématem a nebyly zohledněny všechny parametry reproduktoru. Podrobně jsem popsal vlastní konstrukci výhybky a její ladění. V závěrečné kapitole jsem se zaměřil na sestavení reproduktorové soustavy, kterou jsem zobrazil v příloze č. 12.

Pro konstrukci reprosoustavy jsem využil nabídky měničů firmy SEAS řady PRESTIGE, a to hlubokotónového reproduktoru s označením ER18RNX a vysokotónového reproduktoru s označením 27TBCD/GB-DXT. Pro tyto reproduktory jsem navrhl bassreflexovou ozvučnici o vnitřním objemu 22 litrů a spolu s ní pasivní výhybku odladěnou pro příslušnou frekvenční charakteristiku viz příloha 7.

Po sestavení ozvučnice a výhybky jsem provedl několik ladění výhybky ke konečnému výsledku, který je vidět v příloze č. 8. Upravil jsem hodnoty součástek oproti nasimulovaným hodnotám a provedl zkrácení délky bassreflexového nátrubku z původních 254 na 165 mm délky. Tím se posunula mezní frekvence na 62Hz, kdy od této frekvence je ozvučnice schopna hrát do 10kHz se zvlněním frekvenční charakteristiky +/- 3dB a od kmitočtu 10kHz je amplituda snížena ještě o 3dB až do 22kHz

Navrženou reprosoustavu jsem realizoval formou funkčního prototypu a následně i odměřil. Při stavbě jsem vycházel z konstrukčních a požadovaných parametrů reprosoustavy. Pro výrobu ozvučnice jsem vybral materiál MDF o tloušťce 18 mm se dvěma rozpěrami a provedl vytlumení dvěma rolemi propustné vaty. Maximální standardizovaný příkon reprosoustavy je 55W, nominální impedance je 8 ohmu a hmotnost reprosoustavy je 11,7 kg. Reprosoustava je schopna zahrát od 62Hz do 20kHz.

Použitá literatura

- [1] Svoboda, J. Štefan, M.: *Reproduktory a reproduktorové soustavy*, Vydavatelství SNTL, Praha 1976.
- [2] Sýkora, B.: Stavíme reproduktorové soustavy I-IX. *Praktická elektronika A Radio*. 10/1997 – 6/1998. Praha: AMARO, 1997-1998.
- [3] Merkaut, J. a kol.: *Příručka elektroakustiky*, SNTL, Praha 1965.
- [4] Toman, K. *Reproduktory a reprosoustavy*, Karviná: Dexon s.r.o., 2001.
- [5] Sýkora, B.: Základní kritéria pro návrh výhybek. *Rozhlasová a televizní technika svazek 29*, Praha duben 1984.
- [6] SEAS [online]. [cit. 2012-30-05]. Webové stránky výrobce reproduktorů SEAS. Dostupné z: <<http://seas.no/>>.
- [7] Audioweb.cz. [online]. [cit. 2012-30-05]. Webové stránky věnované reproduktorům a stavbě reprosoustav. Dostupné z: <<http://audioweb.cz/index.htm/>>.
- [8] Nobilis, J.: *Teorie elektronických obvodů – Analýza jednoduchých elektronických obvodů*, Pardubice 1993

Seznam příloh

P1 – Datasheet hlubokotónového reproduktoru SEAS ER18RNX	i
P2 – Datasheet vysokotónového reproduktoru SEAS 27TBCD/GB-DXT	ii
P3 – Datasheet DXT technologie firmy SEAS	iii
P4 – Porovnání amplitudová frekvenční charakteristika reálného měření simulovaných a zvolených hodnot	v
P5 – Porovnání amplitudové frekvenční charakteristiky hlubokotónového reproduktoru s a bez výhybky	vi
P6 – Porovnání amplitudové frekvenční charakteristiky vysokotónového reproduktoru s a bez výhybky	vii
P7 – Amplitudová frekvenční charakteristika výškového a basového reproduktoru a i jejich součtový signál	viii
P8 – Amplitudová frekvenční charakteristika výsledného signálu s porovnáním se signálem v pozadí	ix
P9 – Konstrukční schéma ozvučnice	x
P10 – Datasheet svitkových kondenzátorů firmy ES Ostrava použité ve výhybce	xi
P11 – Foto z měření reprosoustavy na první je bezdozvuková komora a druhé pracovní středisko přístrojů	xii
P12 – Foto hotové reprosoustavy	xiii

Přílohy

Příloha 1 – Datasheet hlubokotónového reproduktoru SEAS ER18RNX



ER18RNX H1456

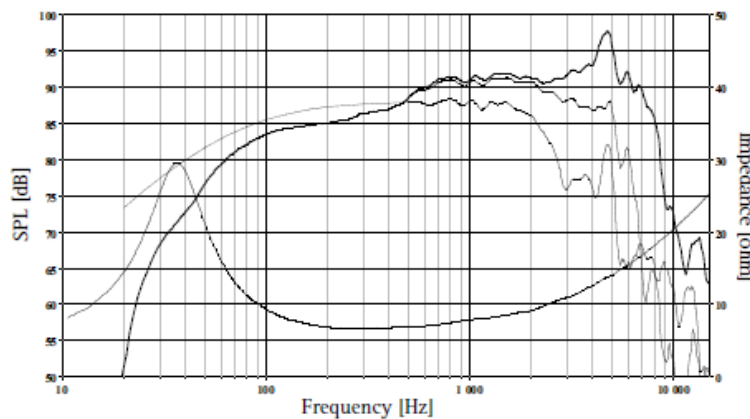
ER18RNX is an 18 cm (6,5") cone driver, developed for use as a long throw high fidelity woofer or woofer/midrange unit.

Edge coated reed/paper pulp cone together with perfectly matched moving parts gives a smooth, extended frequency response.

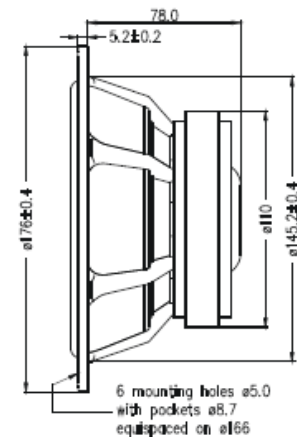
Bumped back plate in the magnet system, together with the very long and light weight copper clad aluminium voice coil, allow extreme coil excursion with low distortion.

Heavy copper ring below the T-shaped pole piece will reduce non linear and modulation distortion.

Extremely stiff and stable injection moulded metal basket keeps the critical components in perfect alignment. Large windows in the basket both above and below the spider reduce sound reflection, air flow noise and cavity resonance to a minimum.



The frequency responses above show measured free field sound pressure in 0, 30, and 60 degrees angle using a 12L closed box. Input 2.83 Vrms, microphone distance 0.5m, normalized to SPL 1m. The dotted line is a calculated response in infinite baffle based on the parameters given for this specific driver. The impedance is measured in free air without baffle using a 2V sine signal.



Nominal Impedance	8 Ohms	Voice Coil Resistance	5.9 Ohms
Recommended Frequency Range	45 - 3000 Hz	Voice Coil Inductance	0.67 mH
Short Term Power Handling *	250 W	Force Factor	7.2 N/A
Long Term Power Handling *	80 W	Free Air Resonance	37 Hz
Characteristic Sensitivity (2,83V, 1m)	88.5 dB	Moving Mass	14.0 g
Voice Coil Diameter	39 mm	Air Load Mass In IEC Baffle	0.92 g
Voice Coil Height	18 mm	Suspension Compliance	1.3 mm/N
Air Gap Height	6 mm	Suspension Mechanical Resistance	2.20 Ns/m
Linear Coil Travel (p-p)	12 mm	Effective Piston Area	136 cm ²
Maximum Coil Travel (p-p)	22 mm	VAS	32 Litres
Magnetic Gap Flux Density	1.0 T	QMS	1.58
Magnet Weight	0.64 kg	QES	0.39
Total Weight	1.91 kg	QTS	0.32

Jul 2007-1

*IEC 268-5

W18-251

SEAS reserves the right to change technical data

RoHS compliant product

www.seas.no

Příloha 2 – Datasheet vysokotónového reproduktoru SEAS 27TBCD/GB-DXT



27TBCD/GB-DXT H1499



27TBCD/GB-DXT is a High Definition aluminium/magnesium alloy dome tweeter with DXT® lens.

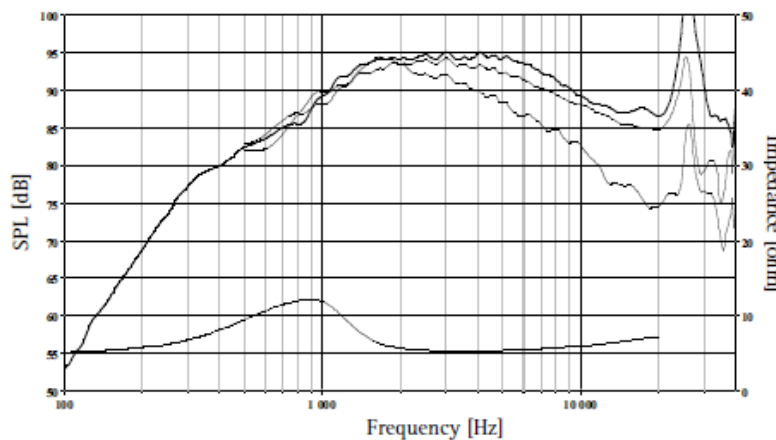
An optimally shaped dome and a wide SONOMEX surround, both manufactured by SEAS, ensure excellent performance and consistency.

The compensation magnet increases the sensitivity and reduces the magnetic strayfield and allows use in close proximity to CRT screens.

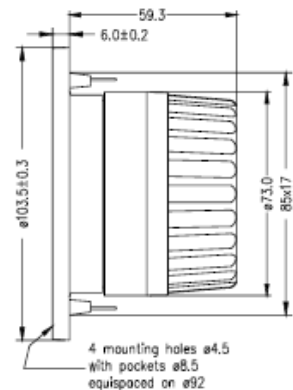
A fine mesh grid protects the diaphragm.

Stiff and stable rear chamber with optimal acoustic damping allows the tweeter to be used with moderately low crossover frequencies.

This revolutionary DXT® tweeter addresses the major issues regarding directivity control in traditional loudspeaker designs. DXT® solves several well-know issues regarding; directivity control, off-axis response, integration with midrange units and baffle diffractions.



The frequency responses above show measured free field sound pressure in 0, 30, and 60 degrees, mounted in a 0.6m by 0.8m baffle. Input 2.83 Vrms, microphone distance 0.5m, normalized to SPL 1m. The impedance is measured without baffle using a 2V sine signal.



Nominal Impedance	6 Ohms	Voice Coil Resistance	4.8 Ohms
Recommended Frequency Range	2000 - 25000 Hz	Voice Coil Inductance	0.05 mH
Short Term Power Handling *	150 W	Force Factor	3.7 N/A
Long Term Power Handling *	55 W	Free Air Resonance	900 Hz
Characteristic Sensitivity (2.83V, 1m)	92.0 dB	Moving Mass	0.33 g
Voice Coil Diameter	26 mm	Effective Piston Area	7.5 cm ²
Voice Coil Height	1.5 mm	Magnetic Gap Flux Density	1.9 T
Air Gap Height	2.0 mm	Magnet Weight	0.35 kg
Linear Coil Travel (p-p)	0.5 mm	Total Weight	0.64 kg

Oct 2007-1

*IEC 268-5, via High Pass Butterworth Filter 2500Hz 12 dB/oct.
SEAS reserves the right to change technical data

T27-951

RoHS compliant product

www.seas.no

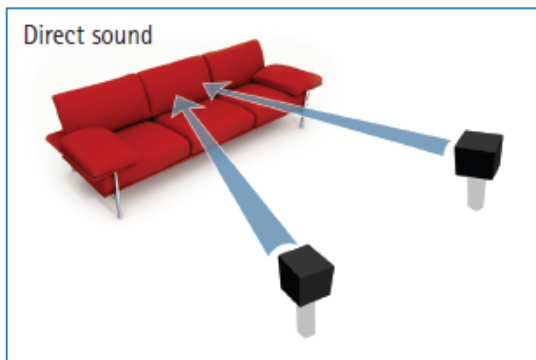
Příloha 3 – Datasheet DXT technologie firmy SEAS



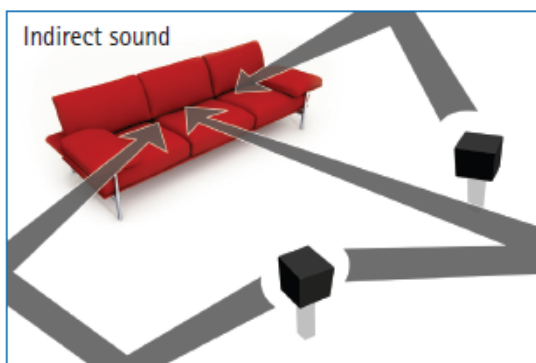
SEAS now introduces the worlds first dome tweeter with controlled wide dispersion – the DXT® tweeter. We give you the ability to design loudspeakers with a perfect power response.

The revolutionary DXT® tweeter addresses the major issues regarding directivity control in traditional loudspeaker designs. DXT® solves several well-known issues regarding; directivity control, off-axis response, integration with mid-range units and baffle diffraction.

Several studies have showed that an even power response is one of the most important factors influencing the way we perceive sound.

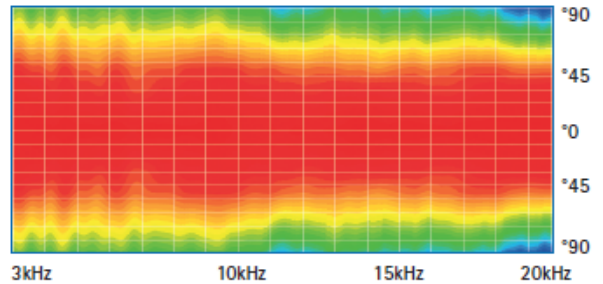


In typical rooms the direct sound counts for around half of the sound reaching our ears. The rest is sound reflected from floors, ceilings, walls and furnishing. The power response is the loudspeakers total radiated output from both direct and indirect sound.

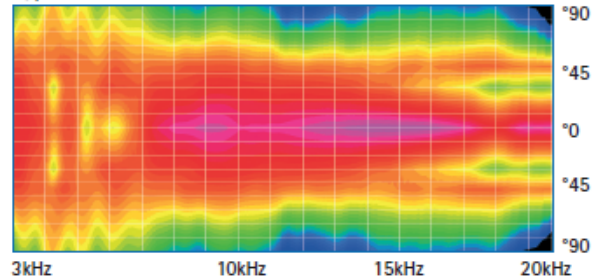


Jan 2007-1

DXT® Tweeter



Typical Tweeter



Home Entertainment

The DXT® addresses several key issues for designers of surround systems. Controlled directivity is necessary to reject early reflections in order to obtain good voice intelligibility. Furthermore the wide dispersion insures that all listeners get the same experience.

Also in traditional stereo applications, loudspeakers benefit from the superior performance of DXT®. DXT® turns the listening-room into one large sweet spot.

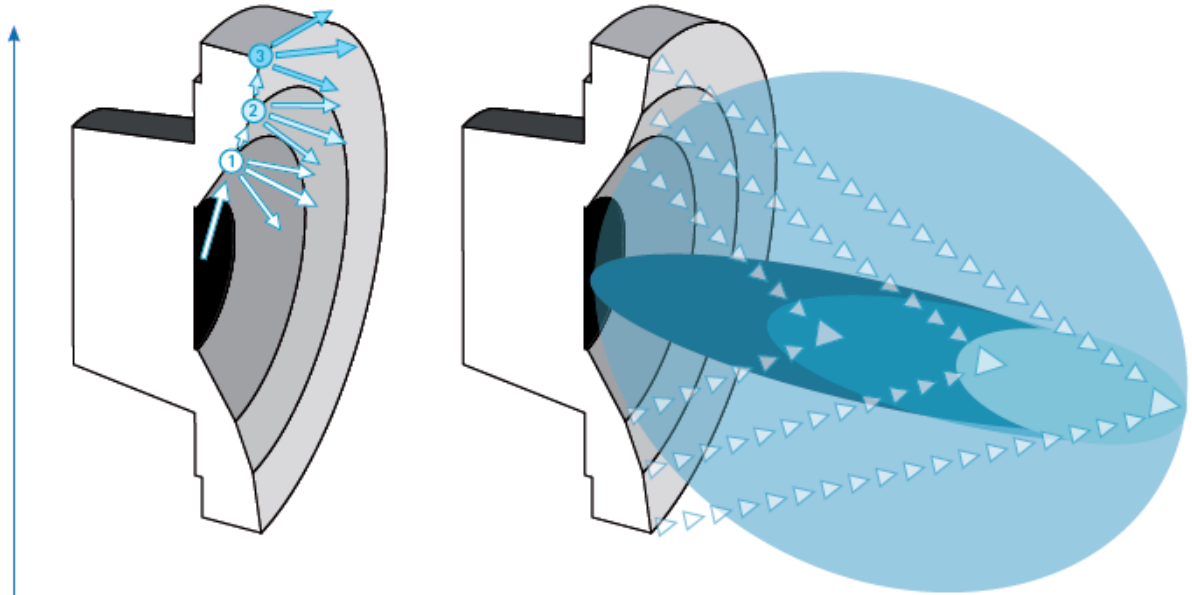
Loudspeakers with DXT® designed for domestic use have a greater freedom of placement due to controlled attenuation of unwanted reflections.

Automotive

A controlled off-axis response is essential for an optimum listening experience. The perfect off-axis behaviour of the DXT® enhanced tweeter makes it an ideal choice for automotive applications.

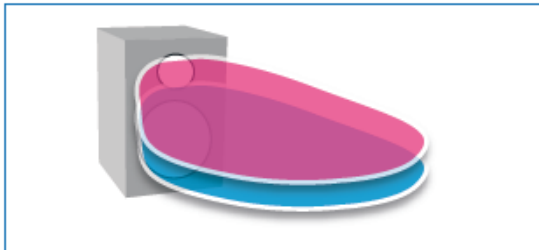
Pro Audio

For pro audio designers directivity is essential for coverage of large areas. DXT® is designed for systems where controlled off-axis response is crucial - like short throw public address loudspeakers and studio monitors.

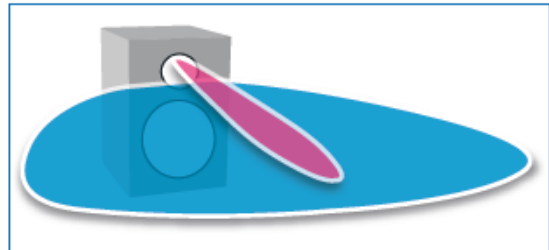


From approximately 7 kHz the diffraction edges begin to work. At the very high frequencies the DXT® uses up to 3rd order diffraction to expand the sound field. At lower frequencies the DXT® tweeter operates as a waveguide to narrow the mid-band dispersion.

DXT Tweeter

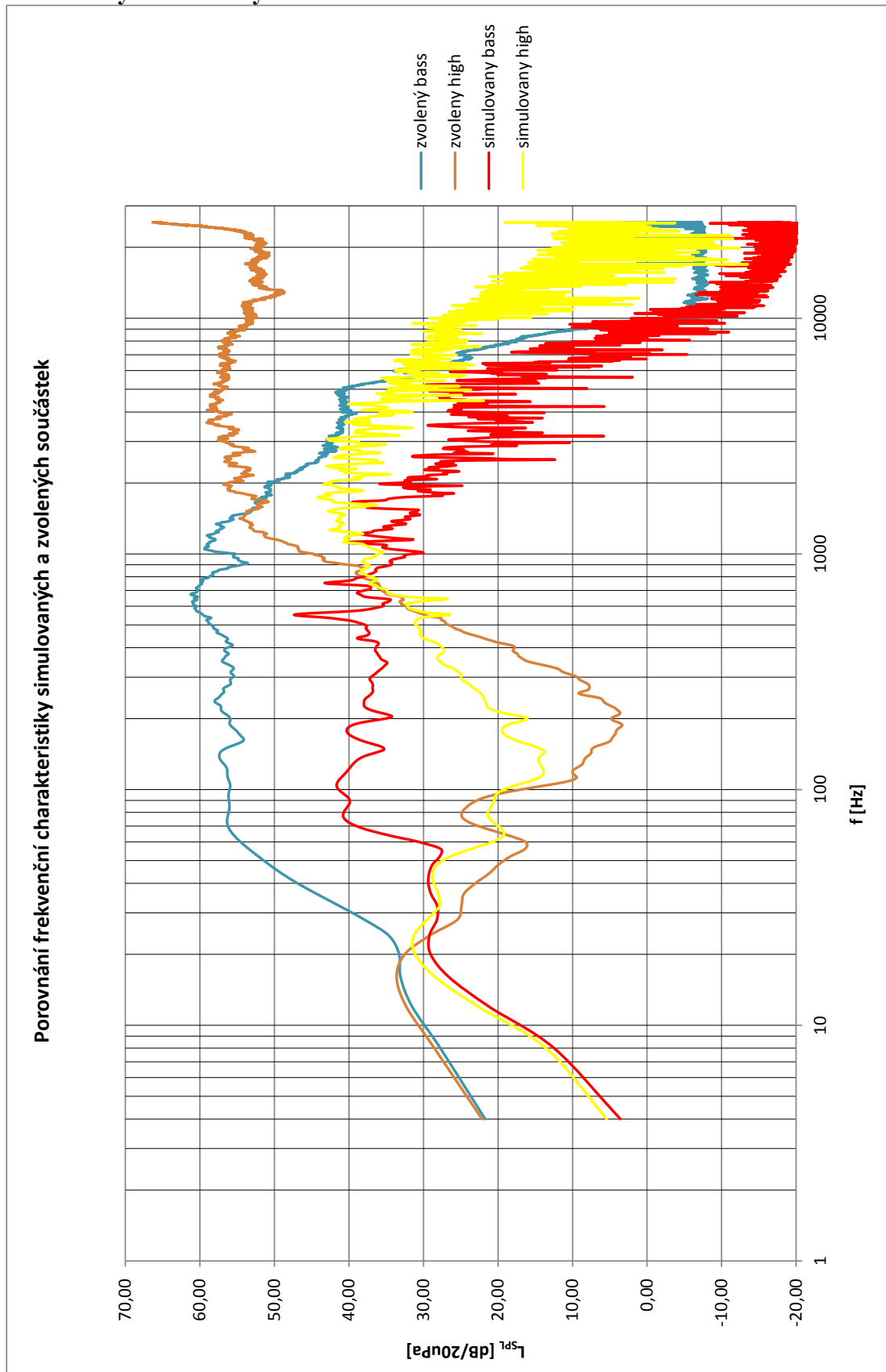


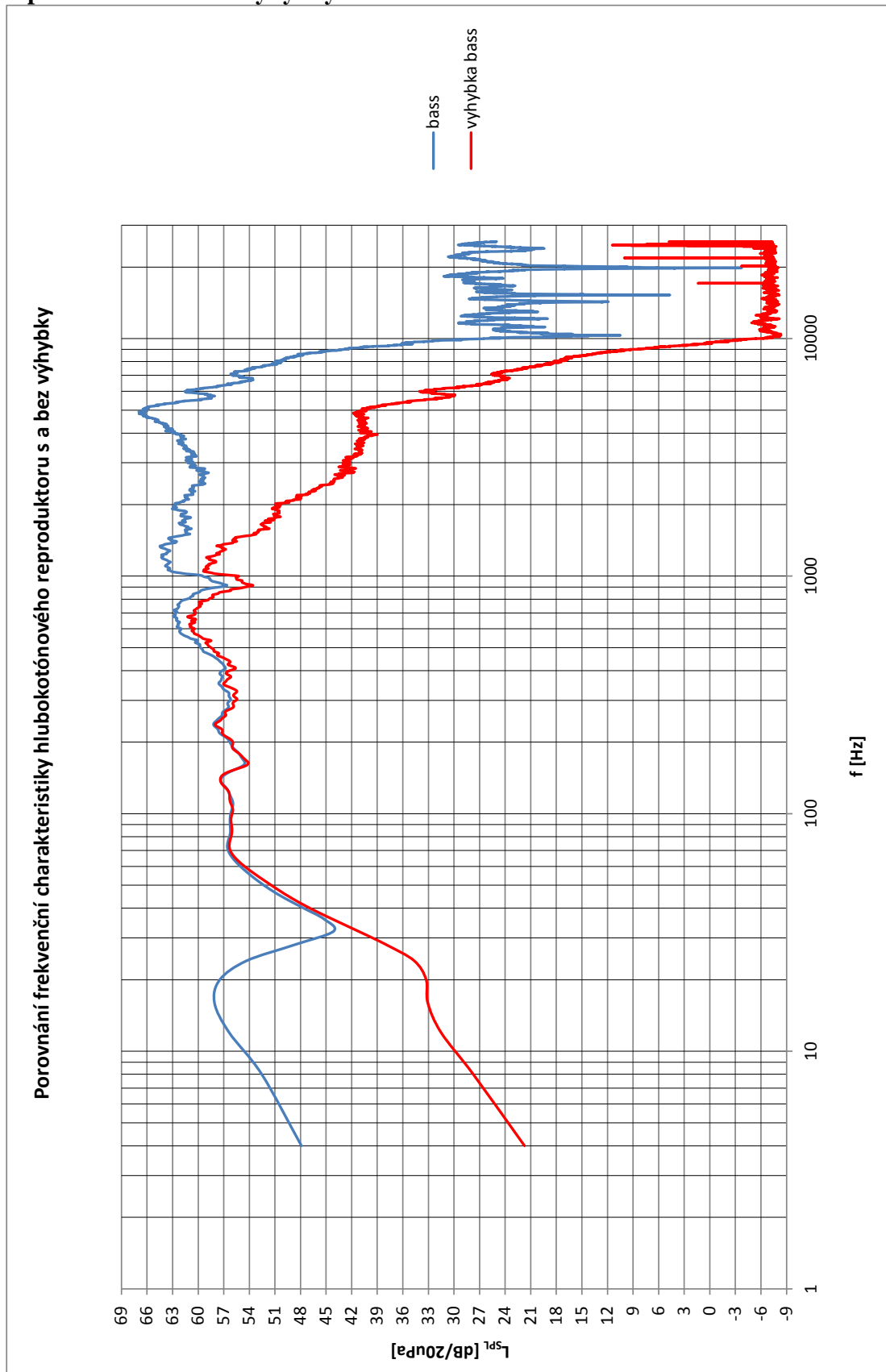
Typical Tweeter

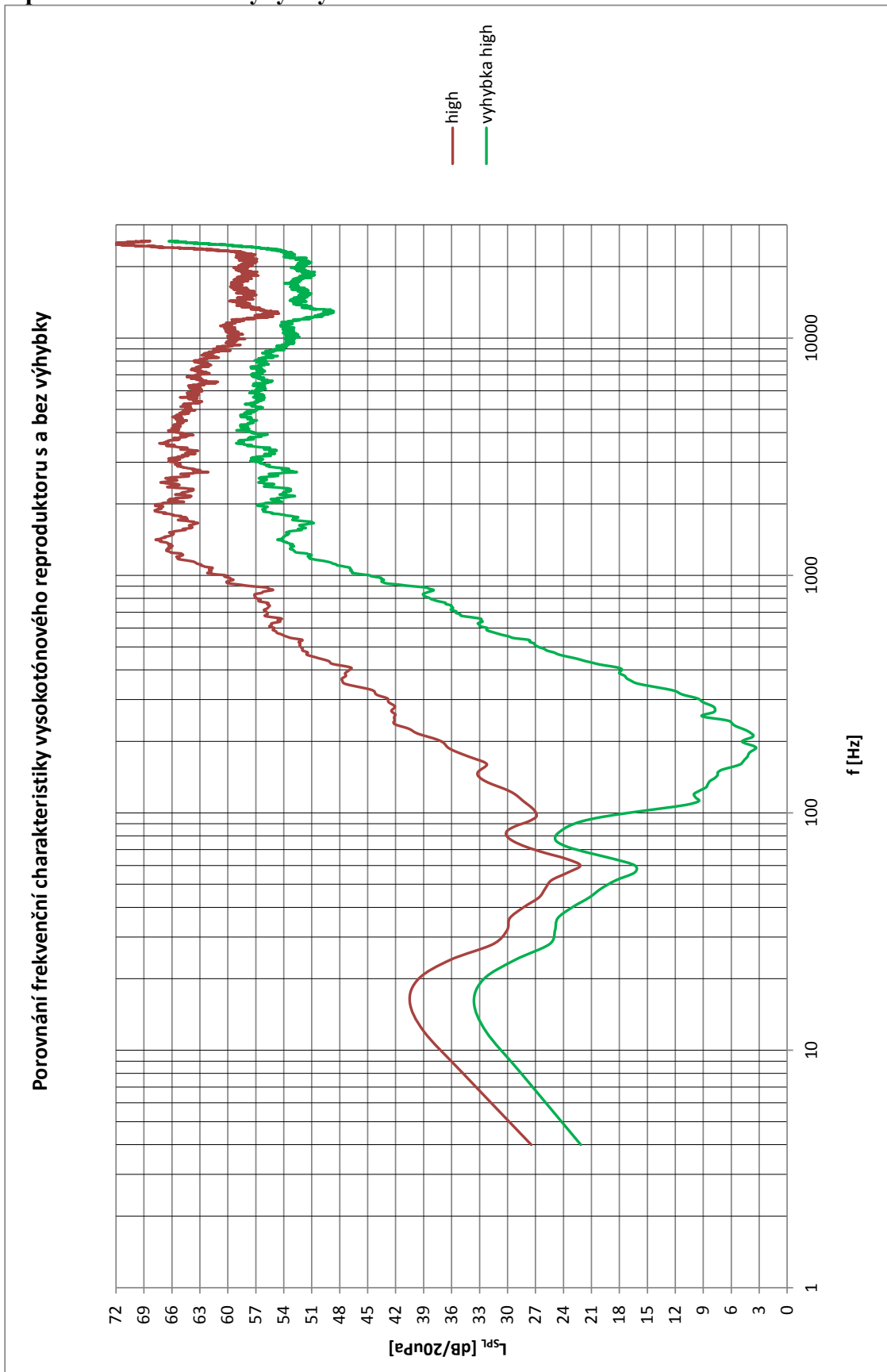


Main office
 SEAS Fabrikker AS
 P.O. Box 600
 Ryggeveien 96
 N-1522 Moss
 Norway
 Tel: + 47 6923 3000
 Fax: + 47 6923 3001
 E-mail: mail@seas.no

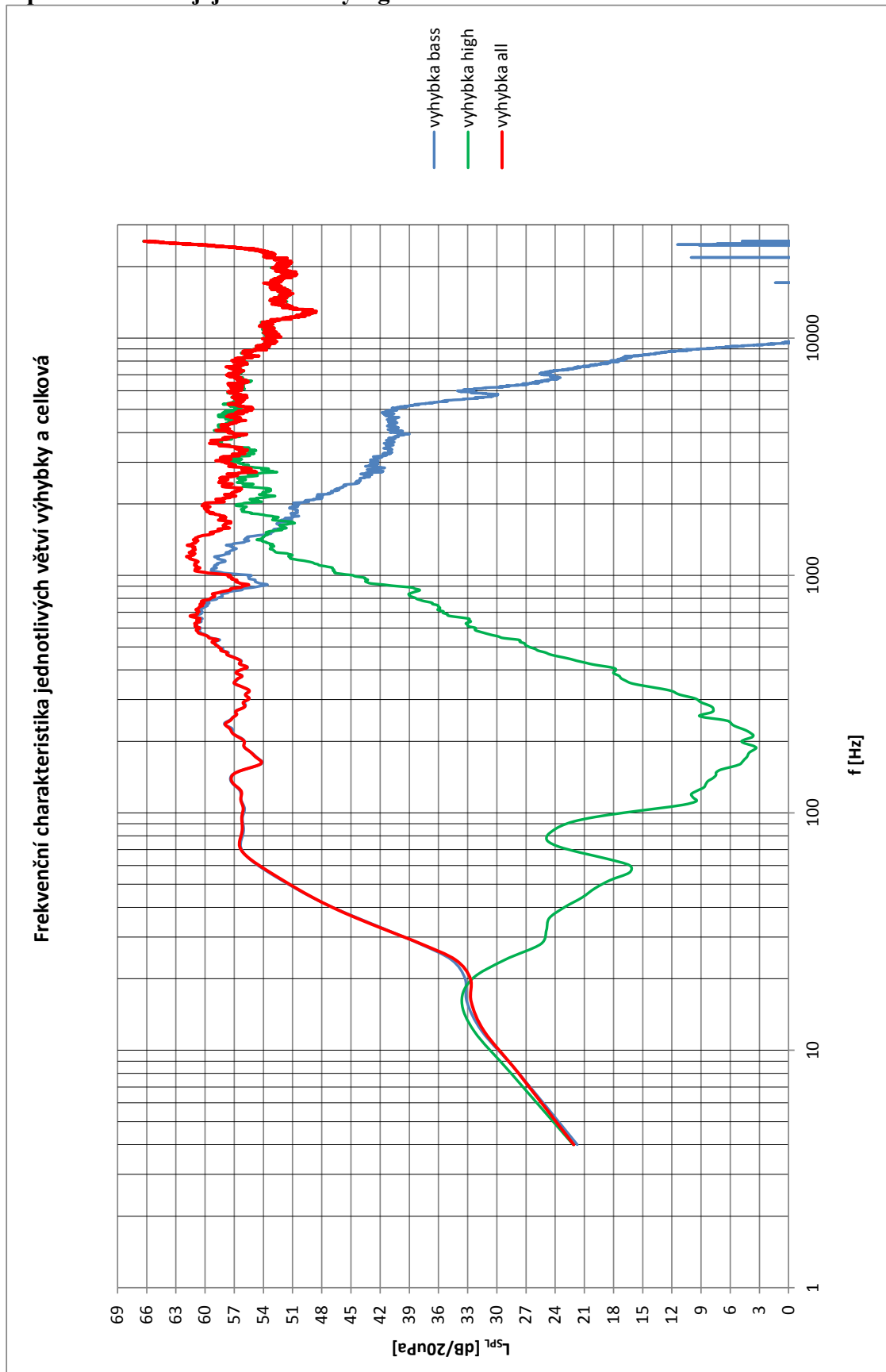
North America
 SEAS USA
 736 N. Western Ave #330
 Lake Forest IL 60045
 USA
 Tel: 847 735 9255
 Fax: 847 735 9256
 E-mail: seasusa@comcast.net

Příloha 4 – Porovnání amplitudová frekvenční charakteristika reálného měření simulovaných a zvolených hodnot

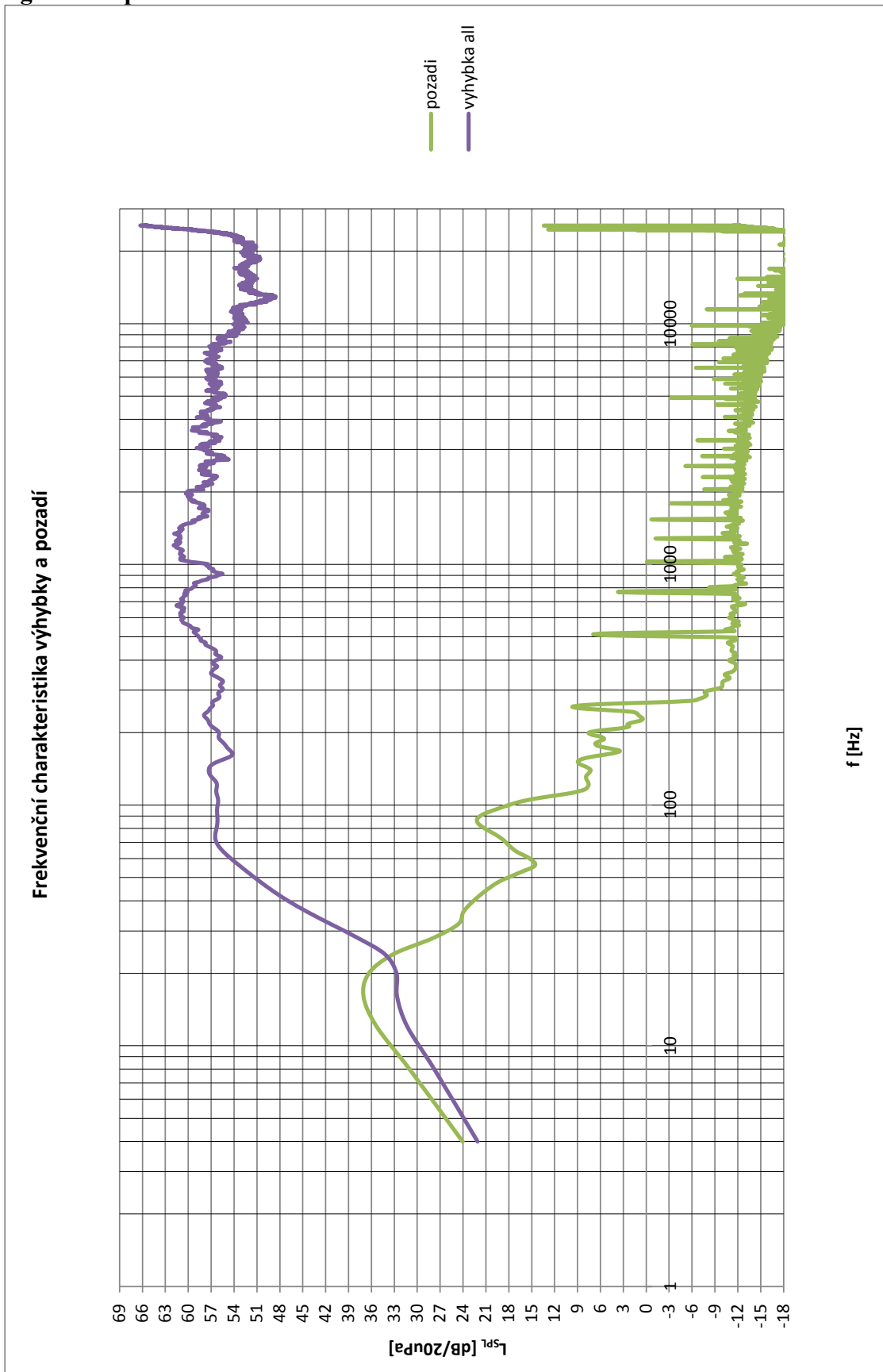
Příloha 5 – Porovnání amplitudové frekvenční charakteristiky hlubokotónového reproduktoru s a bez výhybky

Příloha 6 – Porovnání amplitudové frekvenční charakteristiky vysokotónového reproduktoru s a bez výhybky

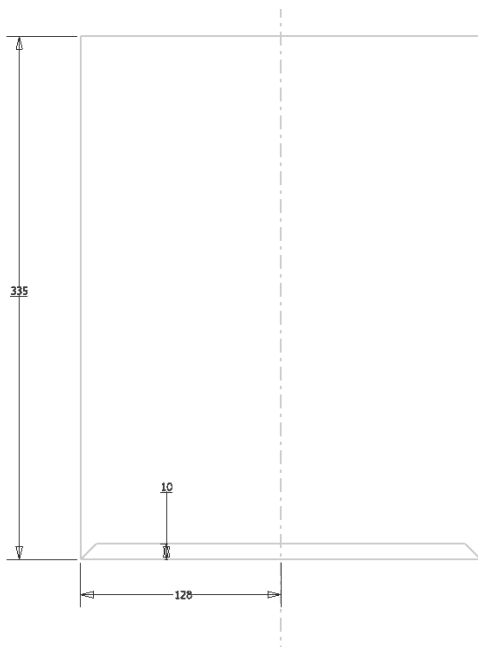
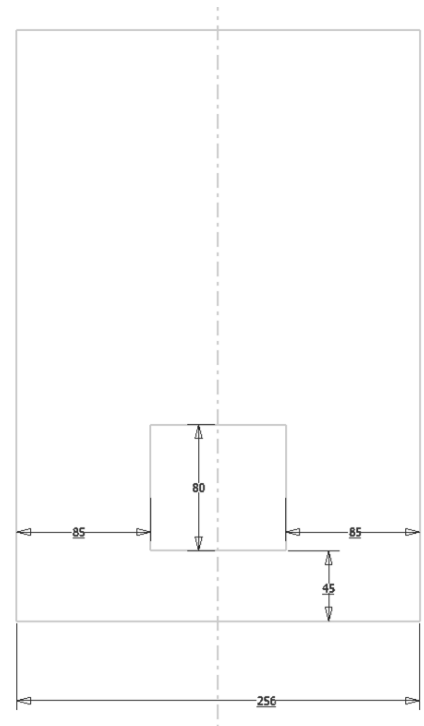
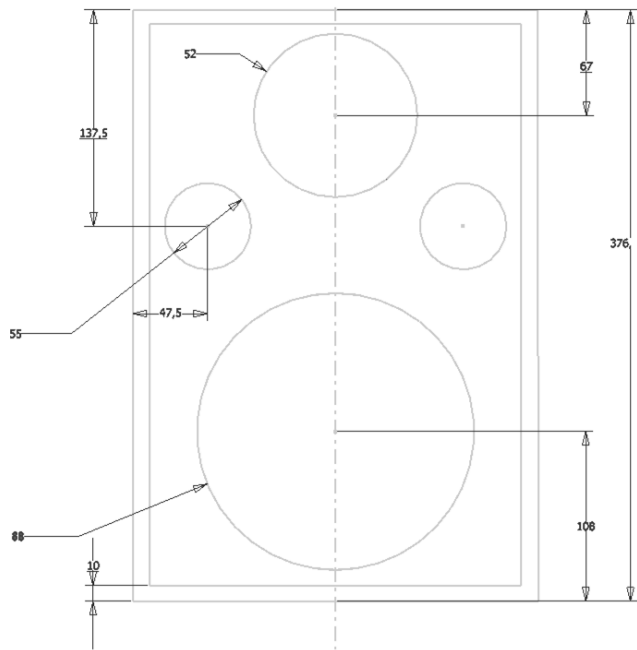
Příloha 7 – Amplitudová frekvenční charakteristika výškového a basového reproduktoru a i jejich součtový signál



Příloha 8 – Amplitudová frekvenční charakteristika výsledného signálu s porovnáním se signálem v pozadí

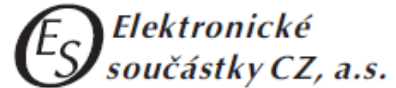


Příloha 9 – Konstrukční schéma ozvučnice



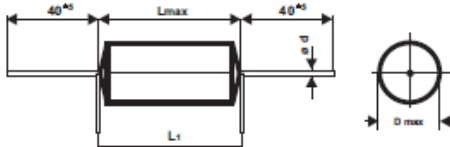
Příloha 10 – Datasheet svitkových kondenzátorů firmy ES Ostrava použité ve výhybce

MKT metalizované polyesterové kondenzátory
MKT Metallized Polyester Film Capacitors



Elektronické součástky CZ, a.s.
 Syllabova 1260/41, 703 00 OSTRAVA - Vítkovice
 Tel.: +420/ 595 781 623, 596 623 385
 Fax: +420/ 595 781 612, 596 623 386
 E - mail: eso@es-ostava.cz
 Web Site: http://www.es-ostava.cz

MKT 204 - 209 axiální



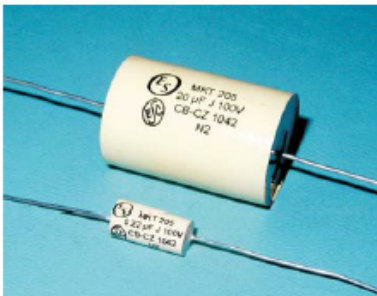
L max (mm)	11	14	19	26	31	36	41	66
d (mm)	0,6	0,6	0,6	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
L ₁ (mm)	15	17,5	22,5	30	35	40	45	60

Maximální impulsní zatížitelnost dU/dt [V/μsec]
Maximum pulse rise time dU/dt [V/μsec]

L max (mm)	11	14	19	26	31	41	60
U _k	dU/dt[V/μs]max.						
63 V	-	-	2,5	1	0,5	-	-
100 V	5,5	5	4	2	1,5	-	1
250 V	11	10	7,5	4	2,5	-	1,5
400 V	16	13,5	10	6,5	4	-	2
630 V	25	20	15	10	6	-	3
1000 V	-	50	30	15	10	8	4

Nejvyšší přípustný ztrátový činitel tanδ při +25 °C
Maxim.dissipation factor tanδ at +25 °C

KHz	C ≤ 0,1 μF	0,1μF < C ≤ 1μF	> 1μF
1	0,008	0,008	0,010
10	0,015	0,015	



Konstrukce kondenzátorů:
 kondenzátory z metalizované polyesterové fólie, bezindukční axiální provedení. Schopnost samoregenerace. Vývody: měděný pocínovaný drát. Povrchová ochrana polyesterovou páskou, čela zalita epoxidovou pryskyřicí. Samozhášivé provedení na přání zákazníka (UL94 V-0)

Odpovídající normy:
 Kmenová norma: ČSN IEC 60384-1
 ČSN EN 130000, ČSN EN 130400
 Dílčí norma: IEC 60384-2
CERTIFIKOVANÝ VÝROBEK
 IECEE - CB - certifikát
 CZ - 1042/1.003814-00, 1.003814-01

ZNAČKA ESČ - symbol bezpečnosti a spolehlivosti výrobku

Jmenovitá kapacita C_n - dle tabulky
 Jiné hodnoty kapacity možné po dohodě
 Jmen. hodnoty kapacity se dodávají v řadě E6 podle IEC 60063 publ. nebo v libovolné hodnotě v rozsahu vyráběných hodnot na přání zákazníka. Jmenovitá kapacita je kapacita při 1 kHz a 20 °C.

Tolerance kapacity:
 ± 20%(M), ± 10%(K), ± 5%(J)
 jiné tolerance na přání

Izolační odpor Ris:
 C ≤ 0,33 μF Ris min. 30 000 MΩ
 C > 0,33 μF tis min 10 000 sec.

Časová konstanta tis:
 tis = Ris × C [sec; MΩ; μF]

Jmen. pracovní napětí U_k [DC/AC 50-60Hz]
 - dle tab.

Klimat. kategorie: 55/100/56 (IEC 60068-1)
 Rozsah pracovních teplot:

- 55 °C + +100 °C
Zkušební napětí:
 U₁ = 1,6 × U_k po dobu 2 sec. při teplotě okolí +25 °C ±5 °C

Construction of capacitors:
 Metallized polyester film capacitors noninductive construction, cylindrical shape, self-healing ability.
 Leads: tinned cooper wire Surface coating by polyester film tape wrapped, epoxy resin sealed. Flame retardand execution available upon request (UL94 V-0)

Referents standards:
 General specifications:
 EN 130000, IEC 60384-1
 Sectional specifications: IEC 60384-2
CERTIFIED COMPONENT
 IECEE-CB - certificate
 CZ - 1042/1.003814-00, 1.003814-01

THE ESČ MARK - a symbol of the product safety and reliability

Rated capacitance C_n - see table
 Other values on request.
 Nom. capacitance values are based on the E6 serie in accordance to IEC 60063 publ. or arbitrary values in capacitance range on request. The rated capacitance is the capacitance at 1 kHz and 20 °C.

Tolerance of capacitance:
 ± 20%(M), ± 10%(K), ± 5%(J)
 or arbitrary tolerances on request

Insulation resistance Ris:
 C ≤ 0,33 μF Ris min. 30 000 MΩ
 C > 0,33 μF tis min 10 000 sec.

Time constant tis:
 tis = Ris × C [sec; MΩ; μF]

Rated voltage U_k [DC/AC 50-60 Hz]
 - see table.

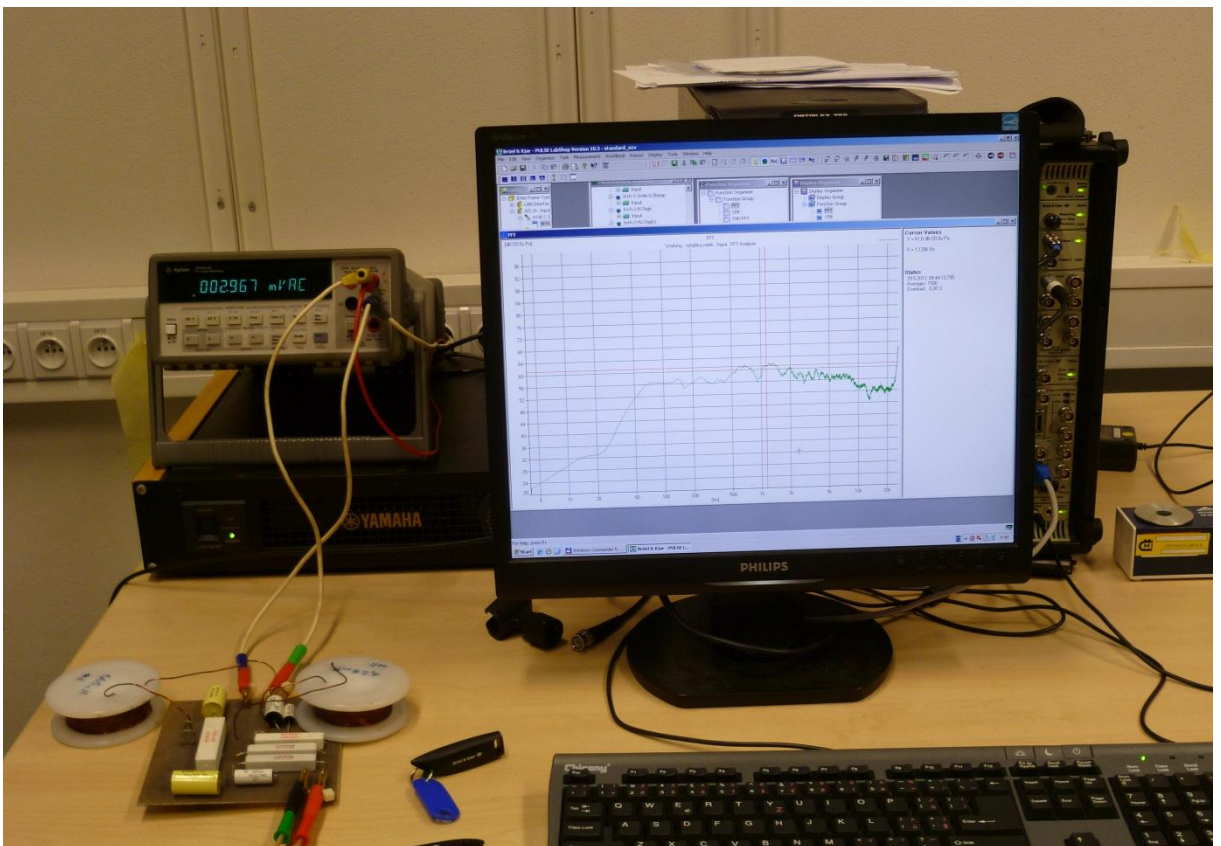
Climatic category: 55/100/56 (IEC 60068-1)
Working Temperature range:

- 55 °C + +100 °C
Test voltage:
 U₁ = 1,6 × U_k for 2 sec. at ambient temperature +25 °C ±5 °C

Typ, Type	MKT 204	MKT 205	MKT 206	MKT 207	MKT 208	MKT 209
Jmenovitá napětí Nominal voltage U _k =DC/AC	63 V= 40 V~	100 V= 63 V~	250 V= 160 V~	400 V= 200 V~	630 V= 220 V~*	1000 V= 250 V~*
Jmenovitá kapacita C _n Nominal capacitance C _n	Maximální rozměry Maximal dimensions ø D x L [mm]					
1000 pF						5 x 14
1500						5 x 14
2200					5 x 11	5,5 x 14
3300					5 x 11	6 x 14
4700					5 x 11	6,5 x 14
6800					6 x 11	7 x 14
0,01 μF					5,5 x 14	8 x 14
0,015				5 x 11	5 x 11	6 x 14
0,022				5 x 11	6 x 11	6,5 x 14
0,033				5 x 11	7,5 x 11	8 x 19
0,047				5 x 11	7,5 x 14	9 x 19
0,068				5 x 11	5,5 x 14	7 x 19
				5 x 11	8 x 14	11 x 26
0,1 μF				5 x 11	7 x 19	9 x 19
0,15				5 x 11	6 x 14	9 x 26
0,22				6 x 11	6,5 x 14	14 x 26
0,33				6 x 14	7,5 x 19	10 x 25
0,47				7 x 14	8,5 x 19	11 x 25
0,68				8 x 14	9,5 x 19	14,5 x 26
1,0 μF				8 x 14	12 x 26	15 x 31
1,5	7,5 x 19	8 x 19	10 x 26	14 x 26	19 x 31	19 x 31
2,2	8 x 19	9 x 19	11,5 x 26	14,5 x 31	22 x 31	17,5 x 41
3,3	9,5 x 19	10,5 x 19	13 x 26	19 x 31	17 x 36	21 x 41
4,7	9,5 x 26	11 x 26	15,5 x 26	22 x 31		
6,8	11 x 26	13 x 26	17,5 x 31			
	14 x 26	15,5 x 26	22 x 31			
10,0 μF						
15,0	15 x 26	16 x 26	14,5 x 60			
22,0	16 x 31	19 x 31	17,5 x 60			
33,0	19 x 31	22 x 31	20,5 x 60			
47,0		23,5 x 60	24,5 x 60			
68,0		27 x 60	31 x 60			

* tento typ kondenzátorů není určen pro práci v obvodech síťového napětí
 Výrobce netuší za škody vzniklé nesprávným použitím.
 * this capacitors are not suitable for across the line applications. The manufacturer is not responsible for any damages, caused by the improper installation and application.

Příloha 11 – Foto z měření reprosoustavy na první je bezdozvuková komora a druhé pracovní středisko přístrojů



Příloha 12 – Foto hotové reprosoustavy



