

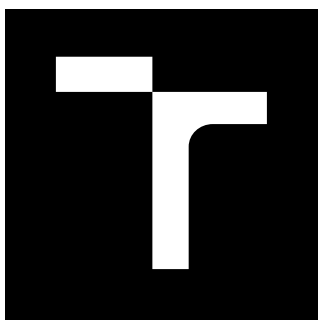
VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2020

Bc. Ján Vydarený



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

PASIVNÍ KMITOČTOVÉ VÝHYBKY PRO DVOUPÁSMOVÉ REPRODUKTOROVÉ SOUSTAVY

PASSIVE FREQUENCY CROSSOVER FOR TWO-WAY LOUDSPEAKER SYSTEMS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ján Vydarený

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Miroslav Balík, Ph.D.

BRNO 2020



Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Audio inženýrství**

Ústav telekomunikací

Student: Bc. Ján Vydarený

ID: 186239

Ročník: 2

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Pasivní kmitočtové výhybky pro dvoupásmové reproduktorové soustavy

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Nastudujte teorii pasivních kmitočtových výhybek a způsoby dosahování vyrovnané kmitočtové charakteristiky reproduktorové soustavy. Soustředte se na vhodné aproximace a řády použitých kmitočtových filtrů. Součástí následně konstruovaných výhybek budou také obvyklé kompenzační obvody. Pro dodané a konkrétně osazené reproduktorové ozvučnice připravte postupy jednotlivých měření, která budou výchozími daty pro správný návrh pasivních kmitočtových výhybek, následně také postupy měření pro ověření jejich vlastností. Výstupem práce budou dvě pevně zapojené pasivní kmitočtové výhybky. Třetí výhybka bude zkonstruována jako samostatné zařízení s modifikovatelnými parametry ve formě laboratorního přípravku. Výstupem práce budou také dvě laboratorní úlohy využívající navržené a vyrobené výhybky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] BORWICK, J. Loudspeaker and Headphone Handbook - Third Edition. Focal Press, 2001. ISBN 0-240-515-8-1
- [2] TOMAN, K. Reprodukory a reprosoustavy II. [Česko: s.n.], 2010. ISBN 978-80-254-9510-0.

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 18.8.2020

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

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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

Táto práca sa zaoberá návrhom pasívnych reproduktorových výhybiek pre dvojpásmové reproduktorové sústavy. Cieľom sú dva rozdielne návrhy frekvenčných výhybiek, ktoré majú dosiahnuť vyrovnanú frekvenčnú modulovú charakteristiku. Ďalším cieľom tejto práce je vytvorenie postupu návrhu frekvenčnej výhybky. Tento postup bude použitý ako návod laboratórnej práce. Ďalším cieľom je vytvorenie postupov návrhov meraní potrebných pre návrh a následné overenie vlastností frekvenčných výhybiek, tieto postupy budú rovnako súčasťou laboratórnych úloh. Posledným cieľom tejto práce je návrh frekvenčnej výhybky s meniteľnými parametrami. Práca taktiež porovná postupy návrhov a zhodnotí dosiahnuté výsledky vyrobených frekvenčných výhybiek.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

frekvenčná výhybka, pasívna dvojpásmová frekvenčná výhybka, LspCAD, reproduktor, reproduktorová skriňa

ABSTRACT

This thesis is focused on designing passive frequency crossovers for two-way speaker systems. The goal of this thesis are two different designs of frequency crossovers, which should reach the flat amplitude frequency characteristic. Another goal is determining a procedure, used for designing the frequency crossover. This procedure will be used as a guide to laboratory tasks. Another goal is creating a procedures for measurements, which will be used for development and comparison of parameters. These procedures will also be part of practical laboratory tasks. Final part of the thesis is design of frequency crossover with variable parameters. This thesis also compares different designs and evaluates the parameters of frequency crossovers that were produced.

KEYWORDS

audio crossover, passive two-way crossover, LspCAD, loudspeaker, loudspeaker box

VYDARENÝ, Ján. *Pasivní kmitočtové výhybky pro dvojpásmové reproduktorové soustavy*. Brno, Rok, 72 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedúci práce: Ing. Miroslav Miroslav, Ph.D.

VYHLÁSENIE

Vyhlasujem, že svoju diplomovú prácu na tému „Pasivní kmitočtové výhybky pro dvou-pásmové reproduktorové soustavy“ som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho diplomovej práce, s využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej diplomovej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto diplomovej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona Českej republiky č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka Českej republiky č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

POĎAKOVANIE

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

Obsah

| | |
|--|-----------|
| Úvod | 10 |
| 1 Frekvenčná výhybka pre reproduktorovú sústavu | 11 |
| 1.1 Význam reproduktorovej výhybky | 11 |
| 1.2 Dôvod použitia frekvenčnej výhybky v reproduktorovej sústave . . . | 11 |
| 1.3 Typy frekvenčných filtrov a aproximácií | 12 |
| 1.3.1 Thiele-Small parametre reproduktora | 15 |
| 1.3.2 Náhradná elektrická schéma reproduktora | 18 |
| 1.4 Možné postupy návrhu reproduktorovej výhybky | 19 |
| 1.4.1 Analytický postup | 19 |
| 1.4.2 Empirický postup | 20 |
| 2 Kompenzačné obvody pre reproduktorové sústavy | 21 |
| 2.1 Kompenzácie impedančnej charakteristiky | 21 |
| 2.1.1 Kompenzácie pre hlbokotónový reproduktor | 21 |
| 2.1.2 Kompenzácia pre vysokotónový reproduktor | 22 |
| 2.2 Kompenzácie v frekvenčnej charakteristike | 23 |
| 2.2.1 Kompenzácia akustického skratu na nízkych frekvenciách . . . | 23 |
| 2.2.2 Kompenzácia rezonancií na ojedinelých frekvenciách | 24 |
| 2.2.3 Kompenzácia útlmov na ojedinelých frekvenciách | 25 |
| 2.2.4 Kompenzácia strmostí | 26 |
| 2.2.5 Vyrovnanie citlivosti | 27 |
| 3 Frekvenčné charakteristiky | 29 |
| 3.1 Frekvenčná charakteristika reproduktora | 29 |
| 3.2 Frekvenčná charakteristika výhybky a kompenzačných obvodov . . . | 29 |
| 3.3 Frekvenčná charakteristika reproduktorovej sústavy | 30 |
| 4 Postup návrhu frekvenčnej výhybky a kompenzačných obvodov | 31 |
| 4.1 Analytický postup návrhu | 31 |
| 4.1.1 Kompenzácia impedančnej charakteristiky hlbokotónového re- produktora | 31 |
| 4.1.2 Kompenzácia akustického skratu na nízkych frekvenciách . . . | 32 |
| 4.1.3 Kompenzácia rezonancie hlbokotónového reproduktora | 32 |
| 4.1.4 Dolná priepusť | 34 |
| 4.1.5 Kompenzácia impedančnej charakteristiky vysokotónového re- produktora | 35 |
| 4.1.6 Kompenzácia útlmu vysokotónového reproduktora | 36 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4.1.7 | Kompenzácia nárastu hladiny akustického tlaku vysoko-tónového reproduktoru | 37 |
| 4.1.8 | Vyrovnanie citlivosti | 38 |
| 4.1.9 | Horná priepusť | 40 |
| 4.1.10 | Výsledná simulácia a schéma zapojenia | 41 |
| 4.2 | Empirický postup návrhu | 42 |
| 4.2.1 | Hlbokotónového reproduktoru | 42 |
| 4.2.2 | Vysokotónového reproduktoru | 42 |
| 4.2.3 | Výsledná simulácia a schéma zapojenia | 43 |
| 4.3 | Impedančná a prúdová analýza | 44 |
| 4.3.1 | Analýza impedančných charakteristík | 44 |
| 4.3.2 | Prúdová analýza | 44 |
| 4.4 | Konštrukcia a meranie parametrov frekvenčných výhybiek | 45 |
| 4.4.1 | Konštrukcia | 45 |
| 4.4.2 | Meranie frekvenčných modulových charakteristík | 46 |
| 4.4.3 | Meranie prenosových a fázových charakteristík | 48 |
| 4.4.4 | Meranie smerových a frekvenčne smerových charakteristík | 49 |
| 5 | Porovnanie návrhov | 53 |
| 6 | Návrh univerzálneho plošného spoja | 55 |
| 7 | Laboratórne úlohy | 56 |
| | Záver | 57 |
| | Literatúra | 58 |
| | Zoznam symbolov, veličín a skratiek | 59 |
| | Zoznam príloh | 61 |
| A | Namerané údaje | 62 |
| B | Univerzálny plošný spoj | 65 |
| C | Dosky plošných spojov | 66 |
| D | Výsedky simulácií | 68 |
| E | Výrobky | 71 |

Zoznam obrázkov

| | | |
|------|--|----|
| 1.1 | Schematické zapojenie výhybiek | 12 |
| 1.2 | Schematické zapojenie Linkwitz-Riley druhý rád | 13 |
| 1.3 | Schematické zapojenie Butterwoth tretí rád | 14 |
| 1.4 | Schematické zapojenie Linkwitz-Riley štvrtý rád | 15 |
| 1.5 | Modulová impedančná charakteristika pre výpočet TS parametrov . . | 16 |
| 1.6 | Náhradná elektrická schéma reproduktora so zlúčenými prvkami . . . | 19 |
| 1.7 | Porovnanie prenosov frekvenčnej výhybky s použitím a bez použitia kompenzácií impedančnej charakteristiky | 19 |
| 2.1 | Porovnanie komenzácií impedančnej charakteristiky | 21 |
| 2.2 | Schematické zapojenie kompenzácie impedančnej charakteristiky pre hlbokotónový reproduktor | 22 |
| 2.3 | Schematické zapojenie kompenzácie impedančnej charakteristiky pre vysokotónový reproduktor | 23 |
| 2.4 | Príklad kompenzácií frekvenčnej charakteristiky | 24 |
| 2.5 | Schéma zapojenia kompenzácie akustického skratu na nízkych frek- venciách | 24 |
| 2.6 | Schéma zapojenia kompenzácie rezonancie na ojedinelých frekvenciách | 25 |
| 2.7 | Schéma zapojenia kompenzácie útlmov na ojedinelých frekvenciách . | 26 |
| 2.8 | Schéma zapojenia sériového shelf filtra | 27 |
| 2.9 | Schéma zapojenia vyrovnania citlivosti odporovým deličom | 27 |
| 4.1 | Porovnanie výsledkov simulácie SPL kompenzácie akustického skratu | 33 |
| 4.2 | Porovnanie výsledkov simulácie SPL kompenzácie rezonancie | 34 |
| 4.3 | Porovnanie výsledkov simulácie SPL hlbokotónového reproduktora s dolnou priepustou | 35 |
| 4.4 | Porovnanie simulácie impedancie vysokotónového reproduktora . . . | 37 |
| 4.5 | Porovnanie simulácií hladín akustického tlaku VT reproduktora s kompenzáciami | 39 |
| 4.6 | Porovnanie simulácií hladín akustického tlaku VT reproduktora s vý- hybkou | 40 |
| 4.7 | Výsledná schéma zapojenia analytického návrhu výhybky | 41 |
| 4.8 | Výsledná simulácia SPL analytického návrhu | 42 |
| 4.9 | Výsledná schéma zapojenia empirického návrhu výhybky | 43 |
| 4.10 | Výsledná simulácia SPL empirického návrhu | 44 |
| 4.11 | Simulácia priebehu impedančných charakteristík návrhov výhybiek . . | 45 |
| 4.12 | Tabuľka zvolených výkonových rezistorov | 46 |
| 4.13 | Porovnanie simulovaných a nameraných honôt SPL analytickej výhybky | 47 |

| | | |
|------|---|----|
| 4.14 | Porovnanie simulovaných a nameraných hodnôt SPL empirickej výhybky | 48 |
| 4.15 | Porovnanie simulovaných a zmeraných fázových charakteristík analytickej výhybky | 49 |
| 4.16 | Porovnanie simulovaných a zmeraných fázových charakteristík empirickej výhybky | 50 |
| 4.17 | Znázorenie označenia merania uhlov v smerových a frekvenčne smerových charakteristikách | 50 |
| 4.18 | Smerová charakteristika analytickej výhybky s reproduktorovou sústavou | 51 |
| 4.19 | Smerová charakteristika empirickej výhybky s reproduktorovou sústavou | 51 |
| 4.20 | Frekvenčná smerová charakteristika analytickej výhybky s reproduktorovou sústavou | 52 |
| 4.21 | Frekvenčná smerová charakteristika empirickej výhybky s reproduktorovou sústavou | 52 |
| 5.1 | Porovnanie SPL vyrobenej analytickej a empirickej výhybky | 53 |
| 5.2 | Porovnanie prenosov vyrobenej analytickej a empirickej výhybky | 54 |
| A.1 | Frekvenčná charakteristika vysokotónového reproduktora | 62 |
| A.2 | Impedančná charakteristika vysokotónového reproduktora | 62 |
| A.3 | Impedančná charakteristika hlbokotónového reproduktora | 63 |
| A.4 | Frekvenčná charakteristika hlbokotónového reproduktora | 63 |
| A.5 | Porovnanie simulácie a zmeraných hodnôt prenosov analytickej výhybky | 64 |
| A.6 | Porovnanie simulácie a zmeraných hodnôt prenosov empirickej výhybky | 64 |
| B.1 | Návrh vrchnej dosky univerzálneho plošného spoja | 65 |
| C.1 | Doska plošných spojov analytického návrhu | 66 |
| C.2 | Doska plošných spojov empirického návrhu | 67 |
| D.1 | Porovnanie vykompenzovanej impedančnej charakteristiky hlbokotónového reproduktora | 68 |
| D.2 | Simulácia priebehu impeančnej charakteristiky vysokotónového reproduktora bez vyrovnania citlivosti a výhybky | 69 |
| D.3 | Simulácia priebehu impeančnej charakteristiky vysokotónového reproduktora s kompenzáciami | 69 |
| D.4 | Simulácia priebehu napätí na jednotlivých rezistoroch analytickej výhybky | 70 |
| D.5 | Simulácia priebehu napätí na jednotlivých rezistoroch empirickej výhybky | 70 |
| E.1 | Osadená DPS Empirického návrhu | 71 |
| E.2 | Osadená DPS analytického návrhu | 72 |

Úvod

Prvým cieľom tejto diplomovej práce je návrh pasívnych frekvenčných výhybiek pre dvojpásmovú reproduktorovú sústavu. Cieľom sú dva rôzne postupy návrhu, za pomoci ktorých, sa dosiahne čo najmenšieho zvlnenia frekvenčnej modulovej charakteristiky reproduktorovej sústavy. Prvý typ postupu je založený na výpočtoch a nehľadí na počet súčiastok. Kroky postupu sú jasne definované a matematicky podložené. Druhý typ postupu nie je založený na jasne danom postupe. Cieľom tohoto postupu je minimalizácia počtu súčiastok aj za cenu mierne väčšieho zvlnenia frekvenčnej modulovej charakteristiky. Na základe poznatkov získaných z týchto postupov sa navrhne univerzálna frekvenčná výhybka s možnosťou menenia parametrov. Pre vyrobené frekvenčné výhybky sa pripraví postupy merania, potrebné pre návrh ale aj pre overenie vlastností frekvenčných výhybiek. Tieto výrobky aj postupy budú použité ako základ pre laboratórne úlohy do kurzu Reprodukčné sústavy. V poslednej časti práce, sa porovnajú dosiahnuté výsledky vyrobených finálnych frekvenčných výhybiek, pomocou rôznych postupov návrhov.

V teoretickej časti je popísaný význam reproduktorovej výhybky, jej základné parametre, rozdelenie a potrebné typy filtrov. Ďalej sú popísané TS parametre, princípy a použitie kompenzácií a ich vzorce, pre impedančnú aj frekvenčnú oblasť návrhu.

1 Frekvenčná výhybka pre reproduktorovú sústavu

1.1 Význam reproduktorovej výhybky

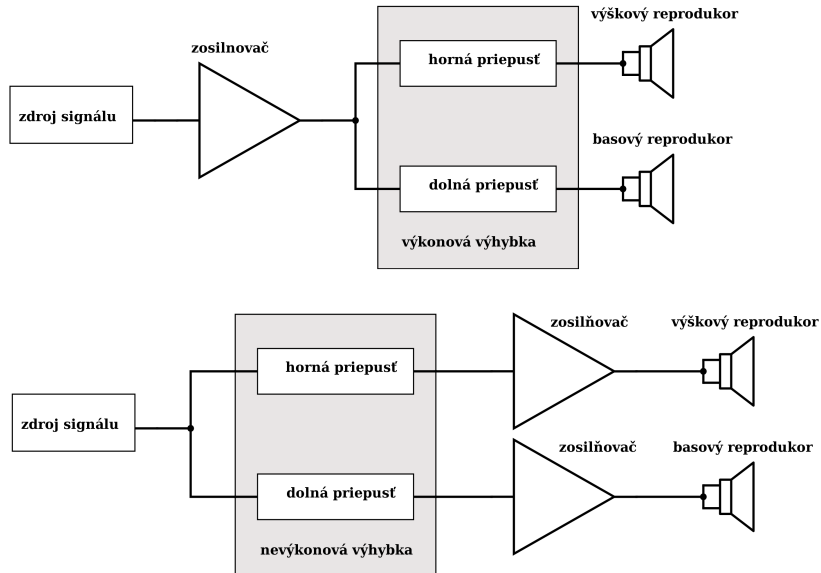
Pre reprodukciu hudobného signálu (20 - 20 kHz) je nevyhnuté použitie viacerých elektro-mechanických meničov. Použitím jedného meniča, nie je možné dosiahnuť vyžiarenie celého spektra bez skreslenia, straty účinnosti a neposlednej rade zmeny smerovosti. Tu prichádza potreba použitia reproduktorovej výhybky, ktorá zabezpečuje frekvenčné rozdelenie signálu na subpásma. Pre dvojpásmovú reproduktorovú sústavu je potreba rozdelenia signálu na dve pásma a to pre hlbokotónový a vysokotónový reproduktor. Frekvenčná výhybka teda slúži na odstránenie nežiaducich frekvenčných pásiem pre daný reproduktor. Filter typu dolná priepust je určený pre pripojenie k basovému reproduktoru, opačným typom je filter typu horná priepust, ku ktorému pripájame vysokotónový reproduktor. Filter typu pásmová priepust je určený pre viacpásmovú reprodukciu, teda ak je v reproduktorovej sústave použitých viac reproduktorov ako dva. Deliaci frekvencia je hodnota, ktorá určuje pásmo, kde začína filter potlačovať nežiaduce frekvenčné pásmo. Podstatnou funkciou výhybky je aj funkcia ochrany a to najmä vysokotónového reproduktora, ktorý by mohol byť zničený, ak by naň prichádzal nízkofrekvenčný signál a bol by nadmerne výkonovo preťažovaný pásmom, ktoré nie je schopný vyžiarit. Ak by sme sa pozreli na výhybku a reproduktorovú sústavu z elektrického hľadiska je pre nás vstupnou veličinou elektrické napätie a výstupnou akustický tlak v referenčnom bode. Výhybka je teda podstatným článkom reprodukcie hudobného signálu, jej správnym nastavením je možné dosiahnuť optimálne správanie sa reťazca. [2]

1.2 Dôvod použitia frekvenčnej výhybky v reproduktorovej sústave

Základným rozdelením výhybiek, je možné klasifikovať výhybky na pasívne a aktívne (výkonové a nevýkonové), teda podľa zaradenia a konštrukcie. V tejto práci sa budem zaoberať výhybkami pasívnymi, ktoré zaraďujeme do výkonovej časti až za zosilňovač signálu. Takto rozdelený signál vyžiarovaný dvoma alebo viacerými reproduktormi sa sčítava v akustickej oblasti, treba preto počítať s opätovným sčítaním a dbať, na to aby bol signál po zlúčení použiteľný. Výhybka by teda mala bezchybne reprodukovať signál na akustickej strane. Je nutné správne rozdeliť signál na pásma tak, aby sa naspäť vhodne zlúčil. Na rozdelenie signálu v pasívnej výhybke sa po-

užívajú kondenzátory a cievky (tlmivky), ktoré svojou funkciou zabezpečujú vyššie spomínané funkcie.[2]

Aktívna výhybka potrebuje pre svoj správny chod elektrické napájanie, je realizovaná pomocou nízkošumových operačných zosilňovačov.



Obr. 1.1: Schematické zapojenie výhybiek [4]

1.3 Typy frekvenčných filtrov a aproximácií

Pri voľbe typu filtra je dôležitý rád filtra, ktorý definuje priebeh fáze a modulu frekvenčnej charakteristiky. Rád filtra definuje ako strmo klesá modul prenosu vo frekvenčnej charakteristike. Podľa počtu súčiastok v obvode je možné určiť rád filtra, čím väčší počet kondenzátorov a cievok sa v obvode nachádza, tým je rád filtra väčší.

Ďalším parametrom je aproximácia, ktorá definuje priebeh moduluvej a frekvenčnej charakteristiky. Aproximácie používané vo výhybkách sú: Butterwoth, Linkwitz-Riley, Bessel. Každý filter spĺňa inú podmienku pre reprodukciu signálu u Linkwitz-Riley to je podmienka konštantnej amplitúdy, Butterwoth zasa podmienku konštantného príkonu.

Pre frekvenčnú výhybku druhého rádu je vhodná aproximácia Linkwitz-Riley hodnoty súčiastok môžeme určiť podľa nasledujúcich rovníc[2]:

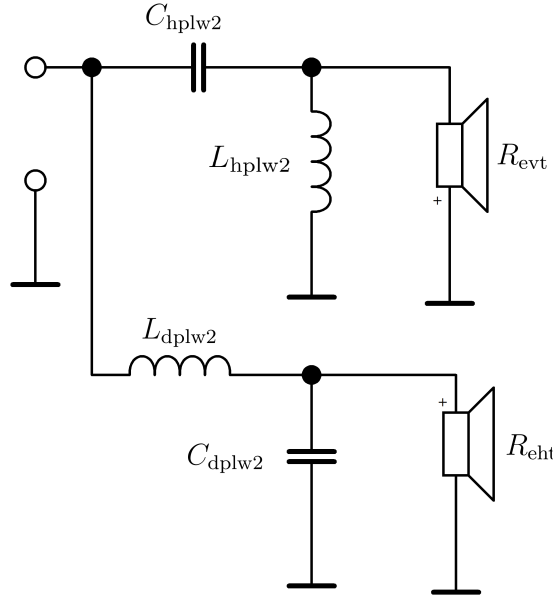
$$C_{dplw2} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot f_d \cdot R_{fd}} \quad (1.1)$$

$$C_{hplw2} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot f_d \cdot R_{fd}} \quad (1.2)$$

$$L_{\text{dplw}2} = \frac{R_{\text{fd}}}{\pi \cdot f_{\text{d}}} \quad (1.3)$$

$$L_{\text{hplw}2} = \frac{R_{\text{fd}}}{\pi \cdot f_{\text{d}}} \quad (1.4)$$

kde f_{d} je deliaca frekvencia filtru, R_{fd} je hodnota impedancie reproduktoru na deliacej frekvencii [1]



Obr. 1.2: Schematické zapojenie Linkwitz-Riley druhý rád

Linkwitz-Riley druhého rádu je definovaný poklesom -6 dB na deliacej frekvencii a jeho výsledná strmosť je 12 dB na oktávu.

Pre tretí rád je najvhodnejšia aproximácia Butterwoth hodnoty súčiastok môžeme určiť podľa nasledujúcich rovníc[1]:

$$C_{1\text{hpbw}3} = \frac{1}{3 \cdot \pi \cdot f_{\text{d}} \cdot R_{\text{fd}}} \quad (1.5)$$

$$C_{2\text{hpbw}3} = \frac{1}{\pi \cdot f_{\text{d}} \cdot R_{\text{fd}}}, \quad (1.6)$$

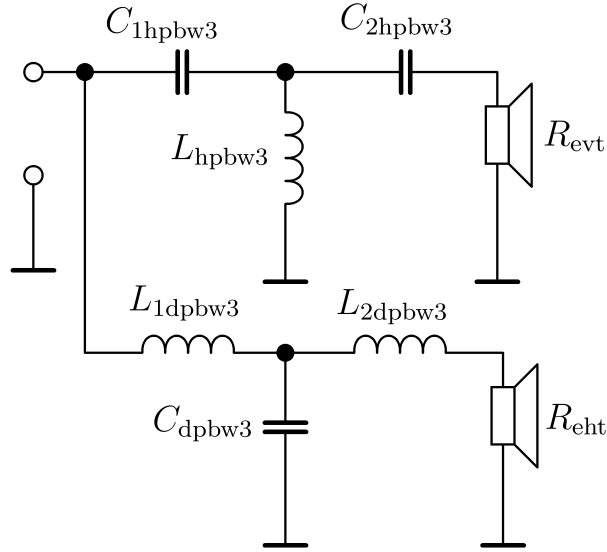
$$C_{\text{dplw}3} = \frac{2}{3 \cdot \pi \cdot f_{\text{d}} \cdot R_{\text{fd}}} \quad (1.7)$$

$$L_{\text{hpbw}3} = \frac{3 \cdot R_{\text{fd}}}{8 \cdot \pi \cdot f_{\text{d}}} \quad (1.8)$$

$$L_{1\text{dpbw}3} = \frac{3 \cdot R_{\text{fd}}}{4 \cdot \pi \cdot f_d} \quad (1.9)$$

$$L_{2\text{dpbw}3} = \frac{R_{\text{fd}}}{4 \cdot \pi \cdot f_d} \quad (1.10)$$

kde f_d je deliaca frekvencia filtra, R_{fd} je hodnota impedancie reproduktoru na deliacej frekvencii.[1] Fliter je daný poklesom modulu o -3 dB na deliacej frekvencii a strmostou 18 dB na oktávu.



Obr. 1.3: Schematické zapojenie Butterwoth tretí rád

Pri použití štvrtého rádu filtra je opäť vhodné použiť aproximáciu Linkwitz-Riley 1.4, toto zapojenie sa používa najmä pre vysokotónové reproduktory. Strmost takto zapojeného filtra je -24 decibelov na oktávu. Parametre súčiastok v obvode môžeme určiť podľa[1]:

$$C_{1\text{hplw}4} = \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{16 \cdot \pi \cdot f_d \cdot R_{\text{fd}}} \quad (1.11)$$

$$C_{2\text{hplw}4} = \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{8 \cdot \pi \cdot f_d \cdot R_{\text{fd}}} \quad (1.12)$$

$$C_{1\text{dplw}4} = \frac{9 \cdot \sqrt{2}}{8 \cdot \pi \cdot f_d \cdot R_{\text{fd}}} \quad (1.13)$$

$$C_{2\text{dplw}4} = \frac{\sqrt{2}}{16 \cdot \pi \cdot f_d \cdot R_{\text{fd}}} \quad (1.14)$$

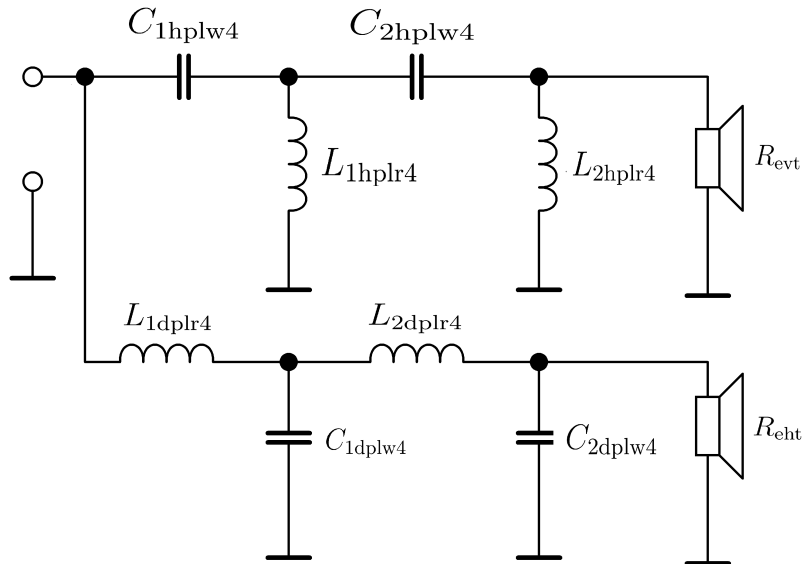
$$L_{1\text{hplr}4} = \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot R_{\text{fd}}}{9 \cdot \pi \cdot f_{\text{d}}} \quad (1.15)$$

$$L_{2\text{hplr}4} = \frac{\sqrt{2} \cdot R_{\text{fd}}}{\pi \cdot f_{\text{d}}} \quad (1.16)$$

$$L_{1\text{dplr}4} = \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot R_{\text{fd}}}{3 \cdot \pi \cdot f_{\text{d}}} \quad (1.17)$$

$$L_{2\text{dplr}4} = \frac{\sqrt{2} \cdot R_{\text{fd}}}{3 \cdot \pi \cdot f_{\text{d}}}, \quad (1.18)$$

kde f_{d} je deliaca frekvencia filtra, R_{fd} je hodnota impedancie reproduktoru na deliacej frekvencii.



Obr. 1.4: Schematické zapojenie Linkwitz-Riley štvrtý rád

1.3.1 Thiele-Small parametre reproduktoru

Thiele-Small parametre sú súbor elektro-mechanických parametrov, ktoré popisujú vlastnosti elektro-mechanického meniča najmä v oblasti rezonančnej frekvencie. Tieto parametre sú najviac využívané pri simulovaní správania sa elektro-mechanických meničov v reproduktorových skriniach.[2]

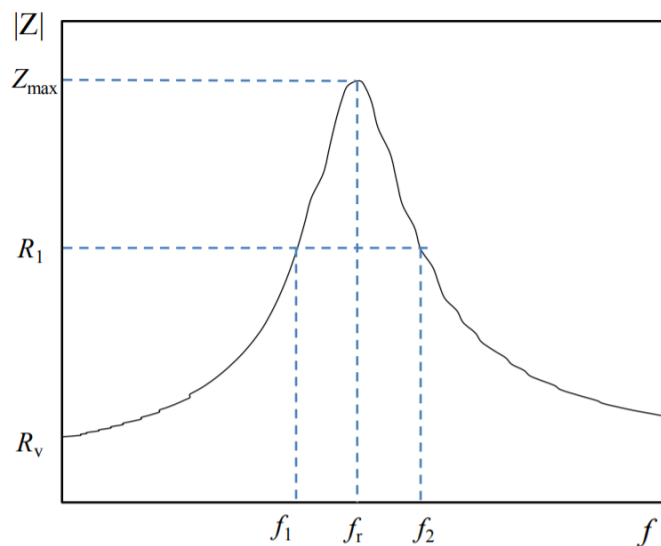
1. **Jednosmerný odpor cievky R_e** je to hodnota rezistivity v jednosmernej oblasti, základnou jednotkou je $[\Omega]$. Jeho hodnotu môžeme získať jednoduchým meraním na svorkách reproduktoru napr. multimetrom.

2. **Rezonančná frekvencia** f_s nám udáva frekvenciu v [Hz], na ktorej elektro-mechanický menič nadobúda najvyššiu hodnotu rezistivity. Pri tejto frekvencii, je hodnota prúdu pretekajúceho cez cievku meniča najmenšia, teda hodnota vnútornej energie kmitavého systému je najmenšia.[4]
3. **Indukčnosť cievky** L_e hodnota indukčnosti cievky elektro-mechanického je meniča definovaná vzťahom: Vypočítame ju podľa vzorca [2]:

$$L_v = \frac{\sqrt{Z_0^2 - R_e^2}}{2 \cdot \pi \cdot f_s}, \quad (1.19)$$

základnou jednotkou je *Henry*, Z_0 hodnota impedancie na frekvencii blízkej 1 kHz.

4. **Mechanický činiteľ akosti** Q_{ms} je bezrozmerný parameter udávajúci mechanické straty v pohyblivých častiach mechanického obvodu. Vyjadruje straty spôsobené tlmením membrány. Hodnoty Q_{ms} sa pohybujú od 0,4 až 25. Pre jeho výpočet potrebujeme zistiť hodnoty frekvencií f_1 a f_2 , na ktorých impedančná charakteristika dosiahne hodnotu rezistivity R_1 . Hodnotu R_1 je možné určiť podľa vzorca $R_1 = R_e \sqrt{R_0} [\Omega]$, kde hodnota $R_0 = \frac{Z_{max}}{R_v} [\Omega]$. [2]



Obr. 1.5: Modulová impedančná charakteristika pre výpočet TS parametrov[3]

$$Q_{ms} = f_s \cdot \frac{\sqrt{R_0}}{f_2 - f_1} \quad (1.20)$$

5. **Elektrický činiteľ akosti** Q_{es} bezrozmerný parameter udávajúci elektrické straty pri pohybe cievky v magnetickom poli. Pri pohybe cievky vzniká elektrický prúd pôsobiaci proti pohybu cievky, výsledkom je odčítanie týchto prúdov

a vznik tlmenia. Jeho hodnotu je možné získať dosadením hodnôt mechanického činiteľa akosti a hodnoty R_0 . [2]

$$Q_{es} = \frac{Q_{ms}}{R_0 - 1} \quad (1.21)$$

6. **Celkový činiteľ akosti** Q_{ts} bezrozmerný parameter zoskupujúci elektrický a mechanický činiteľ akosti definovaný [2]:

$$Q_{ts} = \frac{Q_{ms} \cdot Q_{es}}{Q_{ms} + Q_{es}} \quad (1.22)$$

$$m_{ms} = \frac{1}{c_{ms} \cdot 4 \cdot \pi^2 \cdot f_s^2} \quad (1.23)$$

7. **Ekvivalentný objem** V_{as} v litoch [1] udávajúci veľkosť objemu vzduchu rovnakú ako má zavesenie membrány. Narastajúcou hodnotou ekvivalentného objemu narastá aj objem potrebnej reproduktorovej skrine. [3]

$$V_{as} = V_b \cdot \left(\left(\frac{f'_s}{f_s} \right)^2 - 1 \right) \quad (1.24)$$

8. **Mechanická poddajnosť** c_{ms} [$\mu\text{m}\cdot\text{N}$] udáva poddajnosť závesu membrány, čím je jeho hodnota vyššia, tým je záves tuhší a tým menší objem je potrebný pre funkciu elektro-mechanického meniča. Zmenšovaním hodnoty tohto parametru klesá aj rezonančná frekvencia a klesajú aj akostné parametre. [4]

$$c_{ms} = \frac{V_{as}}{1,4 \cdot 10^5 \cdot S_d^2} \quad (1.25)$$

9. **Gyračná konštanta** Bl [$\text{N}\cdot\text{A}^{-1}$] udáva hodnotu veľkosti magnetickej indukcie cievky v pracovnej medzere elektro-mechanického meniča. [2]

$$Bl = \sqrt{2 \cdot \pi \cdot f_s \frac{m_{ms} \cdot R_0}{Q_{es}}} \quad (1.26)$$

10. **Mechanický odpor kmitavého systému** R_{ms} [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} / \text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$] udávajúci straty pri kmitaní zavesenia a štruktúre použitého materiálu. [2]

$$R_{ms} = 2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot \frac{m_{ms}}{Q_{ms}} \quad (1.27)$$

11. **Plocha membrány** S_d [cm^2] – veľkosť plochy membrány do ktorej spadá aj určitá časť závesu v závislosti na druhu meniča. Hodnotu je možné určiť meraním alebo vypočítať podľa vzorca [3]:

$$S_d = \pi \cdot r_d^2 \quad (1.28)$$

12. **Maximálna lineárna výchylka** X_{\max} [mm] – hodnota maximálnej výchylky elektro-mechanického meniča, pri väčšej výchylke ako X_{\max} začína menič skreslovať avšak nedochádza k jeho trvalému poškodeniu. K poškodeniu dochádza pri strete cievky s magnetickým dnom kmitavého systému alebo pri netrafení sa do medzery. [4]
13. **Účinnosť** η_0 [%] udáva pomer celkového vyžiareného akustického výkonu voči štandardnému elektrickému príkonu dodaného zosilňovačom. [2, 3]

$$\eta_0 = 9,78 \cdot 10^{-7} \cdot V_{as} \cdot \frac{f_r^3}{Q_{es}} \quad (1.29)$$

Tento vzorec platí za predpokladu izotropného vyžarovania a len pre dostatočne nízke frekvencie. Na vyšších frekvenciách začína elektro-mechanický menič smerovať v akustickej osi, ale mimo ňu je výsledok vyžarovania mierne skreslený.

14. **Charakteristická citlivosť** L_s udáva priemernú hodnotu akustického tlaku vyžiareného meničom vo vzdialenosti 1m a príkonu 1W, rovnaký problém nastáva na vyšších frekvenciách ako pri účinnosti.

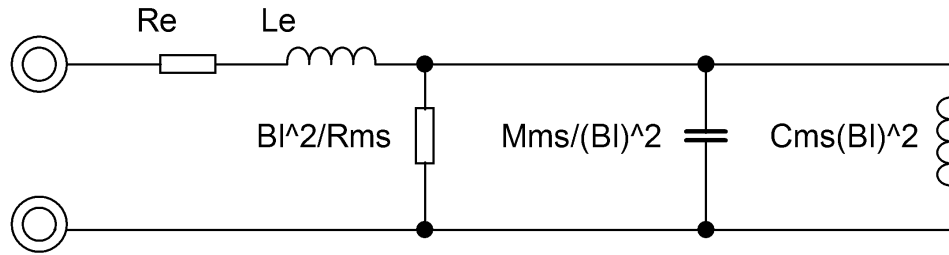
$$L_s = 112,2 + 10 \cdot \log \eta_0 \quad (1.30)$$

15. **Akustická poddajnosť systému** c_a [m^5/N] je odvodená z prepočtu ekvivalentného objemu pomocou parametrov prostredia do ktorého vyžaruje je možné ho vypočítať s pomocou nasledujúcich hodnôt $c_0 = 340$ m/s – rýchlosť šírenia vzduchu pri izbovej teplote, a hustota vzduchu $\rho = 1,21$ kg/ m^3 rovnako pri izbovej teplote. [2]

$$c_a = \frac{V_{as}}{c_0^2 \cdot \rho} \quad (1.31)$$

1.3.2 Náhradná elektrická schéma reproduktoru

Pre odvodenie náhradnej elektrickej schémy je potreba znalosti elektro mechanickej analógie. Elektro mechanickej analógia je nástroj prevodu sústavy mechanických parametrov elektro-mechanického meniča na elektrickú schému. Je preto treba definovať parametre elektrického obvodu. Z minulej kapitoly už poznáme Thiele-Small parametre a preto môžeme kapacite C priradiť poddajnosť M_{ms} , indukčnosti L hmotnosť membrány m_m , rezistancii R môžeme potom priradiť mechanický odpor kmitavého systému R_{ms} . Obvodové veličiny sú sila \mathbf{F} , ktorá je ekvivalentom napätia \mathbf{U} a rýchlosť \mathbf{v} elektrického prúdu. [3] Tento obvod slúži na rôzne výpočtové analýzy, čo je veľmi praktická vec. Výpočtové metódy pre elektronické súčiastky vieme ľahko aplikovať na mechanickú vec. Taktiež táto schéma môže slúžiť pre simulačný program ako náhrada reproduktoru bez importovanej impedančnej charakteristiky.

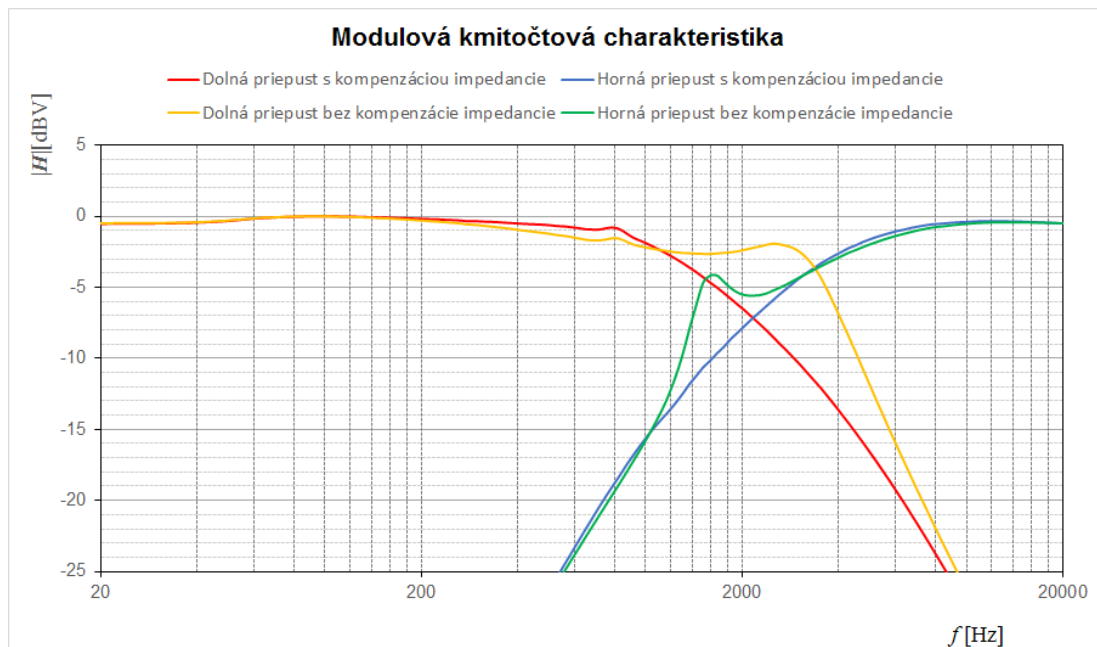


Obr. 1.6: Náhradná elektrická schéma reproduktoru so zlúčenými prvkami

1.4 Možné postupy návrhu reproduktorovej výhybky

1.4.1 Analytický postup

Analytický návrh je založený na princípe matematických výpočtov. Prvým krokom pri analytickom spôsobe návrhu je vykompenzovanie impedančných charakterstík. Správnou komezáciou impedancií dosiahneme rovnakú hodnotu impedancie, alebo len minimálne zmeny v impedančnej charatkeristike jednotlivých reproduktorov, v pásme funkčnosti frekvenčných filtrov dolná a horná priepust. V prípade nevykompenzovania impedančných charakterstík a použitia filtrov podľa aproximácií nedosiahneme požadovaných priebehov prenosov jednotlivých vetví frekvenčných výhybiek.



Obr. 1.7: Porovnanie prenosov frekvenčnej výhybky s použitím a bez použitia kompenzácií impedančnej charakteristiky

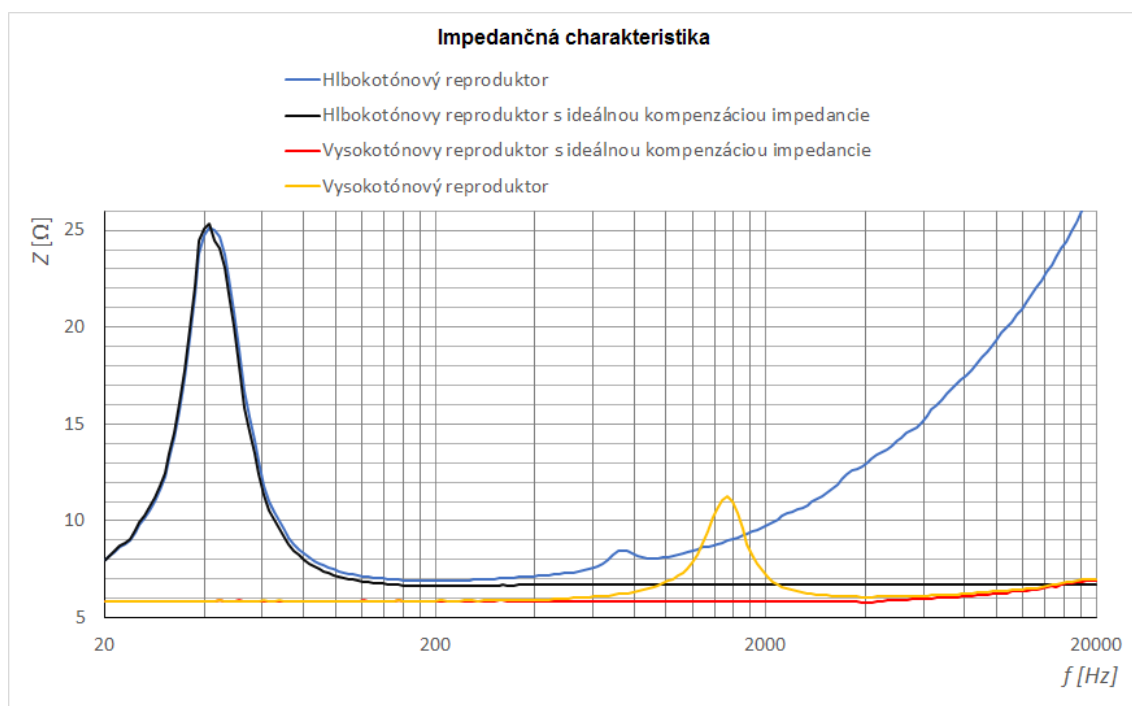
1.4.2 Empirický postup

Pri empirickom postupe návrhu na rozdiel od analytického, používame výpočty minimálne. Využívame simulačný program, kde experimentálnym menením hodnôt súčiastok a vytváraním schém, pomocou RLC obvodov a nadobudnutých teoretických vedomostí z pasívnych filtrov, sledujeme priebeh frekvenčnej a impedančnej charakteristiky. V simulačnom programe a postupným vytváraním schémy pomocou vyššie uvedených obvodov sa usilujeme dosiahnuť vyrovnanú frekvenčnú modulovú charakteristiku. Výhodou tohoto návrhu je zmenšenie počtu súčiastok, návrh ale potrebuje určité skúsenosti a znalosti správania sa filtrov, pre dosiahnutie vyrovnanej frekvenčnej modulovej charakteristiky reproduktorovej sústavy.

2 Kompenzačné obvody pre reproduktorové sústavy

2.1 Kompenzácie impedančnej charakteristiky

Tieto kompenzácie sú nutné pre analytický návrh reproduktorovej výhybky, pretože nárast impedancie znehodnocuje funkčnosť navrhnutej reproduktorovej výhybky. Na obrázku 1.7 je zobrazený význam kompenzácií impedančnej charakteristiky pre



Obr. 2.1: Porovnanie komenzácií impedančnej charakteristiky

správnou funkčnosť frekvenčnej výhybky. Pri nepoužití kompenzácií sa ich deliaca frekvencia posunie z teoretických 2000 Hz na frekvenciu vyššiu ako 3000 Hz. Rovnako nesedí ani predokladaná strmosť filtrov a impedancia spôsobuje zvlnenie.

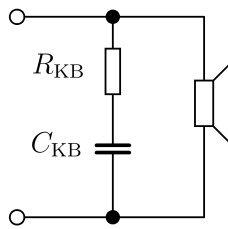
2.1.1 Kompenzácie pre hlbokotónový reproduktor

Pre kompenzáciu indukčnosti kmitavej cievky sa používa RC člen pripojený paralelne k reproduktoru jeho hodnoty môžeme vypočítať pomocou nasledujúcich rovníc[2]:

$$R_{kb} = R_e \quad C_{kb} = \frac{L_e}{R_e^2} \quad (2.1)$$

$$R_{kb} = (1,25 - 1,5) \cdot R_e, \text{ prípadne} \quad R_{kb} = R_e \cdot \frac{R_e}{2} \quad C_{kb} = \frac{L_e}{R_{kb}^2} \quad (2.2)$$

Konštantu 1,25 - 1,5 pri určovaní hodnoty R_{kb} je potrebné voliť individuálne s prihliadaním na výsledok simulácie impedančnej charakteristiky. Najsprávnejšia hodnota v kombinácii s vypočítaným kondenzátorom najviac vyrovná impedančnú charakteristiku reproduktora a to najmä v oblasti deliacej frekvencie. Výsledok takejto kompenzácie je možné pozorovať na obrázku 2.1, kde modrý priebeh znázorňuje priebeh impedancie hlbokotónového reproduktora bez kompenzácie a čierny po kompenzácii. Táto kompenzácia je vhodná aj pre vysokotónový reproduktor avšak pred ním je zaradené vyrovnanie citlivosti, ktoré nám indukčný charakter mierne potlačí.



Obr. 2.2: Schematické zapojenie kompenzácie impedančnej charakteristiky pre hlbokotónový reproduktor

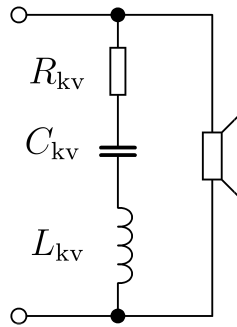
2.1.2 Kompenzácia pre vysokotónový reproduktor

Kompenzácia pre vysokotónový reproduktor je zameraná hlavne na kompenzáciu rezonancie, pretože ak sa rezonancia nachádza v blízkosti deliacej frekvencie spôsobuje to zvlnenie prenosovej funkcie, ako je možné vidieť na grafickom znázornení 1.7. Pre výpočet tejto korekcie potrebujeme poznať Thiele-Small parametre, ktoré sú teoreticky vysvetlené vyššie.[2]

$$C_{kv} = \frac{0,1592}{R_e \cdot Q_{es} \cdot f_s} \quad (2.3)$$

$$L_{kv} = \frac{0,1592 \cdot Q_{es} \cdot R_e}{f_s} \quad (2.4)$$

$$R_{kv} = R_e + \frac{Q_{es} \cdot R_e}{Q_{ms}} \quad (2.5)$$



Obr. 2.3: Schematické zapojenie kompenzácie impedančnej charakteristiky pre vysokotónový reproduktor

2.2 Kompenzácie v frekvenčnej charakteristike

Pre dosiahnutie vyrovnanej frekvenčnej charakteristiky nám samostatná výhybka nestačí, potrebujeme kompenzácie frekvenčnej charakteristiky. Obrázok 2.4 znázorňuje príklad potrebných kompenzácií frekvenčnej charakteristiky. Číslo jedna ukazuje na nárast hladiny akustického tlaku vplyvom akustického skratu reproduktorevej skrine na nízkych frekvenciách. Číslo dva ukazuje na rezonanciu, číslo tri ukazuje oblasť útlmu vo frekvenčnej modulovej charakteristike reproduktora. Číslo štyri reprezentuje nárast hladiny akustického tlaku smerom k vyšším frekvenciám, ktorý môžeme kompenzovať shelving filtrom.

2.2.1 Kompenzácia akustického skratu na nízkych frekvenciách

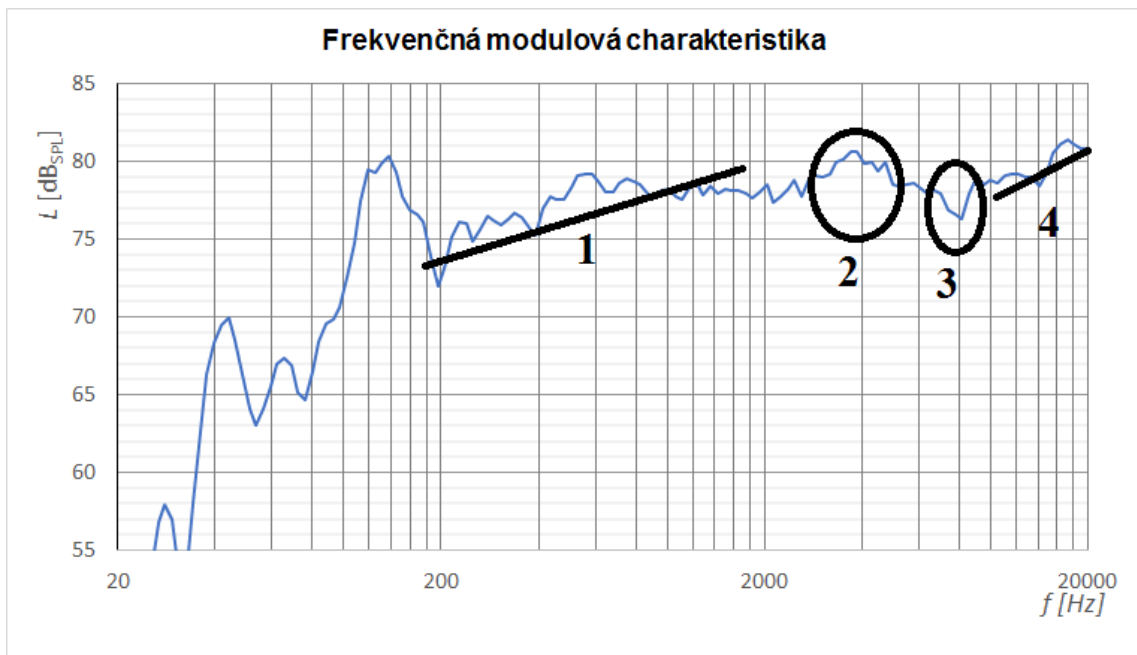
Pri vyžarovaní nízkych frekvencií prichádza k vyžarovaniu singálov za niektorú zo stien reproduktorevej skrine, z toho vyplýva že sústava vyžaruje všesmerovo. Tento jav spôsobí zosilnenie nízkych frekvencií sčítaním vyžiarených signálov.

Kompenzáciu, ktorú tiež nazývame baffle-step, môžeme vytvoriť paralelnou kombináciou rezistora a cievky. Takto vytvorená kompenzácia sa zapája ešte pred samostatnú výhybku. Indukčnosť cievky udáva frekvenčné pásmo a rezistor veľkosť útlmu. Hodnoty súčiastok môžeme určiť podľa:

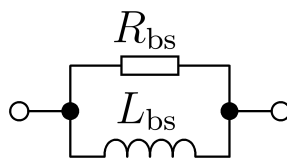
$$R_{bs} = R_e \cdot \left(10^{\frac{A_u}{20}} - 1\right) \quad (2.6)$$

$$L_{bs} = \frac{R_{bs}}{2 \cdot \pi \cdot f_{bs}} \quad (2.7)$$

kde f_{bs} je frekvencia odčítaná z priebehu frekvenčnej modulovej charakteristiky reproduktora umiestneného v reproduktorevej skrini na polovici požadovaného útlmu, A_u je záporná hodnota útlmu v dB, ktorú určíme odčítaním z priebehu frekvenčnej modulovej charakteristiky.



Obr. 2.4: Príklad kompenzácií frekvenčnej charakteristiky



Obr. 2.5: Schéma zapojenia kompenzácie akustického skratu na nízkych frekvenciách

2.2.2 Kompenzácia rezonancií na ojedinelých frekvenciách

Elektro-mechanický menič nemá ideálny (vyrovnaný) priebeh frekvenčnej charakteristiky a na niektorých frekvenciách rezonuje, teda vyžarovanie je oveľa väčšie ako v zbytku frekvenčného pásma. Tento nárast môže byť až o niekoľko decibelov. Pre korekciu týchto rezonancií používame seriový RLC obvod pripojený zväčša paralelne k reproduktoru za frekvenčnú vyhýbku. Obvod je typu „peak filter mínus“ a pri správnom návrhu dokáže ulmiť rezonancie a vyrovnať frekvenčnú charakteristiku. Filter má prenos 0 dB v celom frekvenčnom pásme, len v pásme so strednou frekvenciou a zvolenou šírkou pásmá má záporný prenos. Hodnoty súčiastok obvodu môžeme určiť pomocou nasledujúcich rovníc:

$$a_r = 10^{\frac{A_r}{20}}, \quad b_r = 10^{\frac{0.5 \cdot A_r}{20}}, \quad Q_{of-} = \frac{f_c}{b_f \cdot f_b}, \quad (2.8)$$

kde a_{of-} je požadovaný útlm filtra v lineárnom merítku, b_{of-} je polovica požadovaného útlmu filtra v lineárnom merítku, A_{of-} je záporná hodnota požadovaného

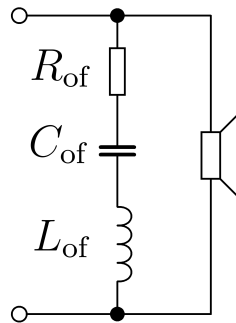
útlmu fitltru v decibeloch, f_c je hodnota frekvencie, na ktorú je naladený stred fitltru, f_b je šírka pásma, Q_b je vypočítaná kvalita fitltru z hodnôt odčítaných z frekvenčnej modulovej charakteristiky alebo prepočítame z hodnôt impedancií.

$$R_{of-} = R_z \frac{a_f}{1 - a_f}, \quad (2.9)$$

$$L_{of-} = \frac{R_{of-} \cdot Q_{of-}}{2 \cdot \pi \cdot f_c}, \quad (2.10)$$

$$C_{of-} = \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot f_c^2 \cdot L_{of-}}, \quad (2.11)$$

kde R_z je hodnota odporu na frekvencii f_c .



Obr. 2.6: Schéma zapojenia kompenzácie rezonancie na ojedinelých frekvenciách

2.2.3 Kompenzácia útlmov na ojedinelých frekvenciách

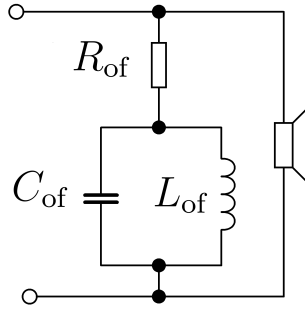
Kompenzáciu útlmov na ojedinelých frekvenciách realizujeme pomocou fitltru typu peak fitler plus. Filter je tvorený paralelnou kombináciou cievky a kondenzátora, ku ktorým je do série pripojený rezistor. Takto zapojenú kompenzáciu pripájame paralelne k elektro-mechanickému meniču. Parametre obvodu je možné spočítať pomocou rovníc 2.8 potom následne hodnoty súčastok:

$$R_{of+} = R_z \frac{a_f}{1 - a_f}, \quad (2.12)$$

$$L_{of+} = \frac{R_{of+}}{2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot Q_{of} \cdot a_f}, \quad (2.13)$$

$$C_{of+} = \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot f_c^2 \cdot L_{of+}}, \quad (2.14)$$

kde R_z je hodnota odporu na frekvencii f_c .



Obr. 2.7: Schéma zapojenia kompenzácie útlmov na ojedinelých frekvenciách

2.2.4 Kompenzácia strmostí

Niektoré reproduktory majú tendenciu zvyšovať alebo znižovať vyžiarený akustický výkon s rastúcou frekvenciou. Pre kompenzáciu používame filter typu high/low-selv, ktorý zapojíme do série alebo paralelne k elektro-mechanickému meniču, prípadne za frekvenčnú výhybku. Seriové low shelving filtre teda „LSF“ sú realizované ako paralelný obvod kombinácie rezistora a kondenzátora a high selv filter je realizovaný ako paralelná kombinácia rezistora a cievky. Paralelný obvod pre LSF je sériovou kombináciou odporu a cievky a paralelný HSF je kombináciou odporu a kondenzátora. Parametrický návrh shelving filtru pre sériovú topológiu:

$$a_f = 10^{\frac{A_f}{20}}, \quad (2.15)$$

$$R_{sf} = R_Z \frac{1 - a_f}{a_f}, \quad (2.16)$$

$$C_{sf} = \sqrt{\frac{R_{sf} + R_Z}{4 \cdot \pi^2 \cdot f_i^2 \cdot R_{sf}^2 \cdot R_Z}}, \quad (2.17)$$

$$L_{sf} = \sqrt{\frac{R_{sf}^2 + R_Z}{4 \cdot \pi^2 \cdot f_i^2 \cdot (R_{sf} + R_Z)}}, \quad (2.18)$$

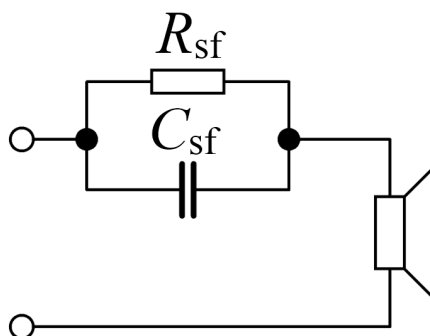
pre paralelnú topológiu:

$$R_{sfp} = R_Z \frac{a_f}{1 - a_f}, \quad (2.19)$$

$$C_{sf} = \sqrt{\frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot f_i^2 \cdot R_{sfp} \cdot (R_{sfp} + R_Z)}}, \quad (2.20)$$

$$L_{sf} = \sqrt{\frac{R_{sfp} \cdot (R_{sfp} + R_Z)}{4 \cdot \pi^2 \cdot f_i^2}}, \quad (2.21)$$

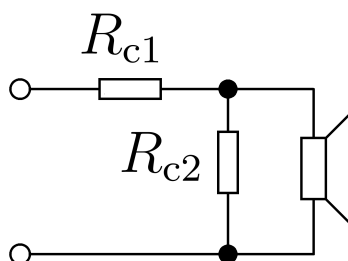
kde A_f je požadovaný útlm, R_Z je hodnota odporu na frekvencii f_i , frekvencia f_i je frekvencia na polovici požadovaného útlmu A_f .



Obr. 2.8: Schéma zapojenia sériového shelf filtra

2.2.5 Vyrovnanie citlivosti

Vyrovnanie citlivosti reproduktoru potrebujeme najmä pre vysokotónový reproduktor, rozdiel môže spôsobiť že vysokotónový reproduktor hrá aj o 10 dB silnejšie ako stredotónový alebo hlbokotónový. Znížením citlivosti reproduktoru docielime rovnaký akustický výkon všetkých reproduktorov v reproduktorovej sústave. Jednou z možností vyrovnania citlivosti elektro-mechanického meniča je použiť odporový delič zaradený za výhybku. Jeho schému pripojenia je možné pozorovať na obrázku 2.9, okrem vyrovnania citlivosti má odporový delič aj ochrannú funkciu.[2]



Obr. 2.9: Schéma zapojenia vyrovnania citlivosti odporovým deličom

$$R_{c1} = R_e - \frac{1}{\frac{1}{R_{c1}} + \frac{1}{R_e}} \quad (2.22)$$

$$R_{c2} = 10^{\frac{A_c}{20}} \cdot \frac{R_e}{1 - 10^{\frac{A_c}{20}}}, \quad (2.23)$$

kde R_e je jednosmerný odpor reproduktoru ktorému chceme znížiť citlivosť a A_{vc} je požadovaný útlm v dB (záporná hodnota). [2]

Vyrovnanie citlivosti vieme realizovať aj pomocou jedného rezistora zaradeného pred vstup alebo výstup výhybky, výhodou je ušetrenie počtu súčiastok. Hodnoty

súčiastok vieme potom odvodiť z jednoduchého odporového deliča:

$$a_{vc} = 10^{\frac{A_{vc}}{20}} \quad (2.24)$$

$$R_{vc} = \frac{a_{vc} \cdot R_{ef}}{1 - a_{vc}}, \quad (2.25)$$

kde a_{vc} je požadovaný útlm v lineárnej miere, A_{vc} je požadovaná hodnota útlmu v decibeloch, túto hodnotu odítavame z priebehu frekvenčných charakteristík, R_{ef} je hodnota odporu po vykompenzovaní a započítaní všetkých kompenzácií v impedančnej aj frekvenčnej charakteristike, v mieste, kde nemajú účinnosť kompenzácie.

3 Frekvenčné charakteristiky

Pre návrh pasívnej frekvenčnej výhybky a všetkých kompenzačných obvodov je od začiatku nutná znalosť závislostí impedancií na frekvencii tak frekvenčnej charakteristiky všetkých reproduktorov v reproduktorovej ozvučnici. Meranie týchto frekvenčných charakteristík musí byť vždy uskutočnené s reproduktormi umiestnenými v reproduktorovej skrini. Návrh frekvenčnej výhybky neprebíha pre reproduktory samostatne, ale pre reproduktory umiestnené v konkrétnej reproduktorovej skrini s jej geometrickými, mechanickými a tlmiacimi vlastnosťami. Bez reproduktorovej skrine nemá zmysel pre návrh frekvenčnej výhybky tieto merania realizovať.

3.1 Frekvenčná charakteristika reproduktoru

Frekvenčnú charakteristiku reproduktoru meriame pomocou meracieho mikrofónu v akustickej osi, buď v akustickej osi reproduktoru, alebo v akustickej osi reproduktorovej sústavy. Pre reproduktorovú sústavu je táto charakteristika súborom charakteristík, ktorých počet je daný počtom osadených reproduktorov. Meranie prebieha obvykle vo vzdialenosti 1 m od referenčného bodu reproduktoru, alebo reproduktorovej sústavy. Meria sa postupne každý reproduktor zvlášť. Výber akustickej osi je daný účelom merania, pre návrh frekvenčných výhybiek a kompenzačných obvodov sa používa akustická os reproduktorovej sústavy. Tieto charakteristiky sú potom východzími charakteristikami pre návrh frekvenčných výhybiek a kompenzačných obvodov.

3.2 Frekvenčná charakteristika výhybky a kompenzačných obvodov

Meranie charakteristík frekvenčnej výhybky a kompenzačných obvodov nie je realizované pomocou mikrofónu. Táto frekvenčná charakteristika je súborom charakteristík, ktorých počet je daný počtom frekvenčných pásiem reproduktorovej sústavy. Súbor frekvenčných charakteristík je potom tvorený frekvenčnými charakteristikami každého výstupu určeného pre kontrétny reproduktor pokrývajúci určité frekvenčné pásmo. Meranie je možné realizovať pomocou umelej záťaže, alebo s reproduktormi v reproduktorovej skrini, pričom výsledok merania je zásadným spôsobom ovplyvnený typom záťaže. Overenie vlastností frekvenčnej výhybky a kompenzačných obvodov má zmysel merať na umelej záťaži, typycky reálnej záťaži, ktorej hodnota je blízka jednosmernému odporu vinutia cievky reproduktoru. Výhybku samostatnú a kompenzačné odvody sa musia navrhovať vzhľadom na reálne impedancie reproduktorov

v reproduktorovej skrini. Výhodou merania na umelej záťaži je, že nie je potreba reproduktorovej sústavy a v priebehu merania nie je generovaný zvuk. Najjednoduchším spôsobom merania pre rýchle porovnanie výsledkov je meranie pri zatažení výhybky reproduktormi v reproduktorovej skrini, výsledky môžu byť porovnané ihneď bez nutnosti zmien záťaže v simulácii.

3.3 Frekvenčná charakteristika reproduktorovej sústavy

Frekvenčnú charakteristiku reproduktorovej sústavy meriame pomocou meracieho mikrofónu umiestneného v akustickej osi reproduktorovej sústavy. Akustická os reproduktorovej sústavy môže byť definovaná rôznym spôsobom najčastejšie je určená geometrickým stredom medzi jednotlivými reproduktormi v reproduktorovej skrini. Meranie prebieha vždy vo vzdialenosti 1 m od referenčného bodu reproduktorovej sústavy. Výnimočným prípadom je meranie súboru frekvenčných charakteristík meraných v daných uhloch odchýlených od akustickej osi. Zásadný vplyv na výsledky merania týchto charakteristík na nízkych frekvenciách majú predovšetkým rozmery bezodrazovej komory. Pre dosiahnutie presných výsledkov na nízkych frekvenciách je nutnosť realizovať meranie vo voľnom poli (voľný priestor s rozmermi niekoľkých desiatok metrov, bez prekážok a v dostatočnej výške).

4 Postup návrhu frekvenčnej výhybky a kompenzačných obvodov

Prvým krokom pre návrh frekvenčnej výhybky je potreba zmerania frekvenčných a impedančných charakteristík samostatných reproduktorov v reproduktorovej skrini. Tieto údaje je následne potrebné upraviť do vhodného formátu pre simulačný program, keďže každý merací systém má svoj export údajov iný. Na základe týchto údajov vieme simulovať priebehy akustického tlaku vytváraného reproduktorovou sústavou spolu s frekvenčnou výhybkou. Rovnako vieme v simulačnom programe po nainportovaní zmeraných charakteristík sledovať priebeh impedančnej charakteristiky, aby nám hodnota impedancie nadmerne neklesla a nezaťažovala po vyrobení výhybky zosilňovač, prípadne ho mohla poškodiť viď kapitola 4.3.1. Impedančné charakteristiky boli merané za pomoci meracieho softvéru NTiAudio vo frekvenčnom rozsahu 20 až 20 kHz a rozsahom merania 200 bodov.

4.1 Analytický postup návrhu

4.1.1 Kompenzácia impedančnej charakteristiky hlbokotónového reproduktora

Pre dosiahnutie požadovaného priebehu prenosu frekvenčnej výhybky je potrebné mať približne rovnakú hodnotu odporu v celom frekvenčnom rozsahu, inak prichádza k zmene strmosti filtra prípadne k posunu deliacej frekvencie. Hodnotu kompenzácie pre hlbokotónový reproduktor je možné určiť z hodnoty jeho jednosmerného odporu, ktorý dostaneme zmeraním multimetrom. Jeho hodnota je 6,80 Ohm. Hodnota indukčnosti vinutia je určená z priebehu impedančnej charakteristiky v uzavretej reproduktorovej skrini $L_e = 9,5 \cdot 10^{-4}$ H. Pomocou vzorcov uvedených v podkapitole 2.1.2, môžeme určiť hodnoty súčiastok:

$$R_{kb} = 1,25 \cdot 6,8 = 8,5 \text{ Ohm} \quad (4.1)$$

$$C_{kb} = \frac{9,54 \cdot 10^{-4}}{8,2^2} = 14,18 \mu\text{F} \quad (4.2)$$

Hodnota odporu rezistoru R_{kb} z dostupnej rady výkonových rezistorov bola zvolená z rady E12 8,2 Ohm a kondenzátor s kapacitou 15 μF . Výsledok kompenzácie zobrazuje graf v prílohe D.1, hodnota impedancie po vykompenzovaní fluktuuje okolo hodnoty 6 Ohm, z tejto impedančnej charakteristiky budeme odčítavať hodnoty na jednotlivých frekvenciách pre kompenzácie a samostatnú výhybku.

4.1.2 Kompenzácia akustického skratu na nízkych frekvenciách

Na určenie hodnôt súčiastok kompenzácie akustického skratu je potrebné poznať hodnotu jednosmerného odporu cievky vinutia hlbokotónového reproduktora, ktorá je 6,8 Ohm a priebeh frekvenčnej modulovej charakteristiky hlbokotónového reproduktora. Potrebný útlm určíme zo zmeraného priebehu frekvenčnej modulovej charakteristiky hlbokotónového reproduktora v reproduktorovej skrini. Po odčítaní z priebehu frekvenčnej modulovej charakteristiky sa určil útlm 7 dB, hodnota f_{bs} je odčítaná stredne pomyselnaj priamky útlmu teda na hodnote 3,5 dB a je rovná hodnote 580 Hz, potom môžeme podľa vzorcov z kapitoly 2.2.1 určiť hodnoty kompenzácie nasledovne:

$$R_{bs} = 6,8 \cdot \left(10^{\frac{7}{20}} - 1\right) = 8,42 \text{ Ohm} \quad (4.3)$$

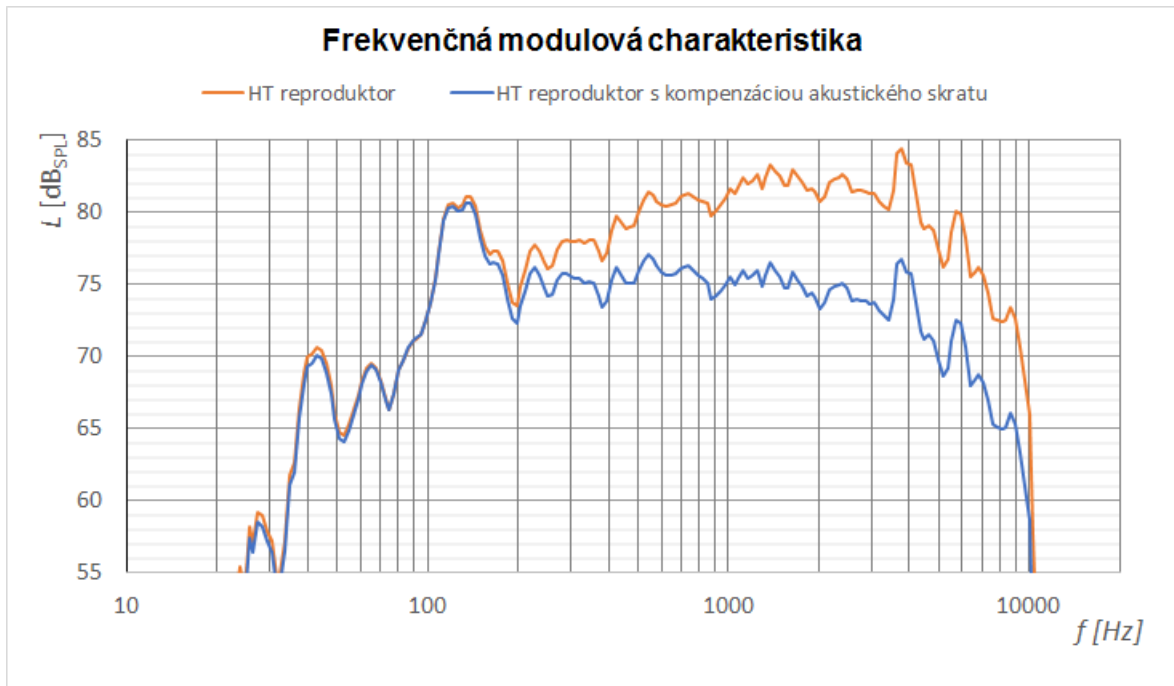
$$L_{bs} = \frac{8,42}{2 \cdot \pi \cdot 580} = 2,3 \text{ mH} \quad (4.4)$$

Vzhľadom na požiadavku dosiahnutia vyrovnanej frekvenčnej charakteristiky reproduktorovej sústavy ako celku a zvolenú deliacu frekvenciu je potrebný návrh podľa odčítania hodnôt návrhu z frekvenčnej charakteristiky. Vo výslednom návrhu sú pre túto kompenzáciu z dostupnej rady súčiastok použité súčiastky $R_{bs}=8,2 \text{ Ohm}$ a induktancia $L_{bs}=2,2 \text{ mH}$. Grafické zobrazenie na obrázku 4.1 porovnáva priebeh nevykompenzovaného reproduktora (oranžový priebeh) umiestneného v reproduktorovej skrini, modrý priebeh nám reprezentuje priebeh modulovej frekvenčnej charakteristiky po vykompenzovaní. Výsledok kompenzácie akustického skratu zrovná priebeh modulovej frekvenčnej charakteristiky hlbokotónového reproduktora na hodnotu 75 dB po frekvenciu okolo 3,5 kHz, voči pôvodnému, kde priebeh nie je vyrovnaný a narastá smerom k vyšším frekvenciám.

4.1.3 Kompenzácia rezonancie hlbokotónového reproduktora

Pre dosiahnutie vyrovnanej frekvenčnej charakteristiky je potrebné utlmiť rezonanciu hlbokotónového reproduktora so strednou frekvenciou 3800 Hz, pretože vo výsledku by táto rezonancia reproduktora spôsobovala nárast v danom frekvenčnom pásme. Tento nárast, budeme kompenzovať peak filtrom so strednou frekvenciou $f_c = 3800 \text{ Hz}$, odčítaná šírka pásma z priebehu frekvenčnej modulovej charakteristiky 4.1 hlbokotónového reproduktora $f_b = 700 \text{ Hz}$ a požadovaný útlm $A_{of-} = -6,5 \text{ dB}$. Hodnotu odporu R_z odčítame z impedančnej charakteristiky D.1 na hodnote f_c a dostaneme hodnotu 5,8 Ohm potom môžeme pomocou rovníc z kapitoly 2.2.2 určiť hodnoty filtru nasledovne:

$$a_r = 10^{\frac{-6,5}{20}} = 0,47, \quad b_r = 10^{\frac{0,5 \cdot -6,5}{20}} = 0,69, \quad Q_{of-} = \frac{3800}{0,69 \cdot 700} = 7,89, \quad (4.5)$$



Obr. 4.1: Porovnanie výsledkov simulácie hladín akustického tlaku hlbokotónového reproduktora a hlbokotónového reproduktora spoločne s kompenzáciou akustického skratu.

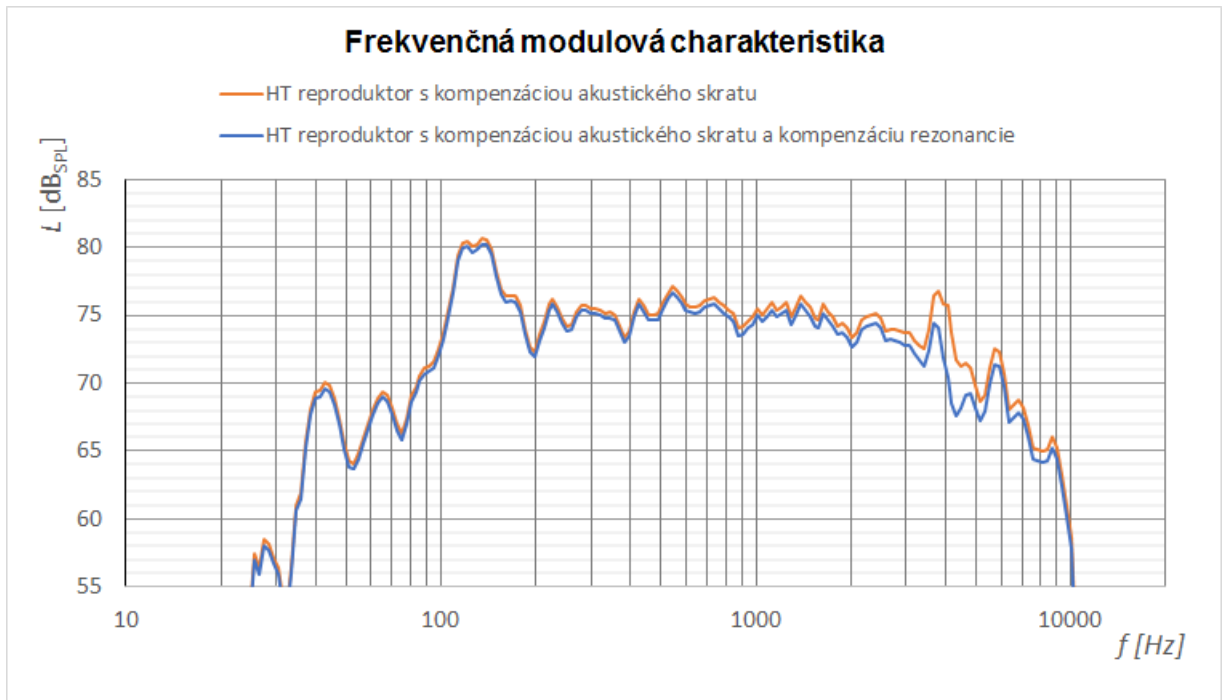
$$R_{of-} = 6,1 \cdot \frac{0,5}{1 - 0,5} = 6,12 \text{ Ohm}, \quad (4.6)$$

$$L_{of-} = \frac{5,21 \cdot 7,89}{2 \cdot \pi \cdot 3800} = 1,72 \text{ mH}, \quad (4.7)$$

$$C_{of-} = \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot 3800^2 \cdot 1,72 \cdot 10^{-3}} = 1,02 \mu\text{F}, \quad (4.8)$$

Z hodnoty rezistoru $R_{of-} = 5,21 \text{ Ohm}$ je potrebné odpočítať jednosmernú hodnotu odporu vinutia cievky ($0,4 \text{ Ohm}$), ktorá je v sérii s týmto rezistorom a v dostupnej rade E12 vyberieme rezistor $4,7 \text{ Ohm}$. Hodnota cievky pre túto kompenzáciu z dostupnej rady pre reproduktorové sústavy je $1,5 \text{ mH}$, teda volíme menšiu hodnotu vzhľadom na dosiahnutie vyrovanej frekvenčnej modulovej charakteristiky reproduktorovej sústavy a kapacitátor $1 \mu\text{F}$.

Z priebehu frekvenčnej modulovej charakteristiky 4.2 pozorujeme, že nie úplne kompenzujeme rezonanciu na zvolenej frekvencii 3800 Hz a to preto, lebo nemáme presnú hodnotu cievky. Táto skutočnosť ale nemá zásadný vplyv na dosiahnutie vyrovanej frekvenčnej modulovej charakteristiky celej reproduktorovej sústavy.



Obr. 4.2: Porovnanie výsledkov simulácie hladín akustického tlaku hlbokotónového reproduktora spoločne s kompenzáciou akustického skratu a hlbokotónového reproduktora s kompenzáciou akustického skratu, kompenzáciou rezonancie.

4.1.4 Dolná priepusť

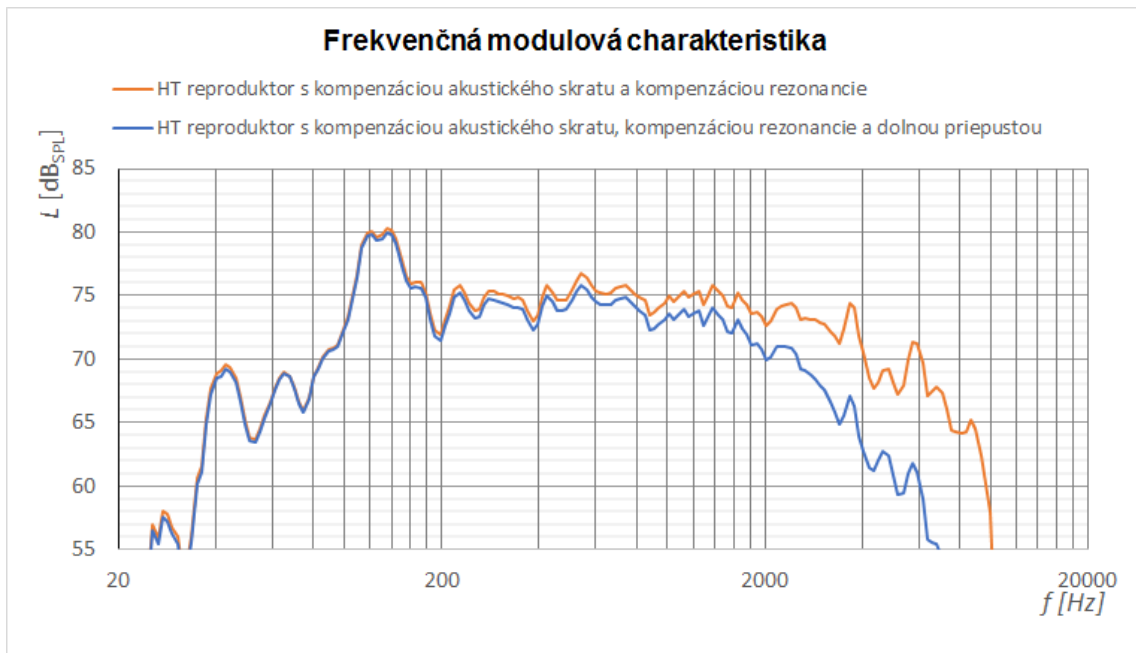
Dôležitým parametrom pre návrh samostatnej frekvenčnej výhybky, je deliaca frekvencia, ktorej vlnová dĺžka musí byť menšia, ako vzdialenosť reproduktorov od seba. V ideálnom prípade, by mala byť táto vzdialenosť čo najmenšia a to $1/4$ vlnovej dĺžky zvolenej deliacej frekvencie, čo býva vzhľadom na rozmery reproduktorov ne realizovateľné a používa sa vzdialenosť $5/4 \lambda$ jeden násobok ideálnej hodnoty vlnovej dĺžky.[3] Reprodukčtová skriňa, pre ktorú navrhujeme frekvenčnú výhybku má reproduktory umiestnené vo vzdialenosti $5/4 \lambda$ tým je daná optimálna hodnota deliacej frekvencie 2,7 kHz. Ďalším parametrom návrhu frekvenčnej výhybky je strmnosť a jej aproximácia pre túto prácu je zvolený druhý rád s aproximáciou Linkwitz-Riley, hodnota impedancie na deliacej frekvencii je rovná 5,8 Ohm, potom môžeme podľa rovníc z teórie 1.3 určiť hodnoty súčiastok:

$$C_{dp} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot 2200 \cdot 5,8} = 6,24 \mu\text{F}, \quad (4.9)$$

$$L_{dp} = \frac{5,8}{\pi \cdot 2200} = 0,839 \text{ mH}, \quad (4.10)$$

Vzhľadom na priebeh frekvenčnej modulovej charakteristiky hlbokotónového reproduktora do rovníc, pre výpočet súčiastok výhybky, zadávame hodnotu menšiu ako

je zvolená medzná frekvencia tak, aby sme dosiahli požadovaný útlm -6 dB na zvolenej deliacej frekvencii. Z dostupnej rady súčiastok pre reproduktorové výhybky bol zvolený kondenzátor s kapacitou $6,8\mu\text{F}$, a cievka s hodnotou indukčnosti $0,82\text{ mH}$.



Obr. 4.3: Porovnanie výsledkov simulácie hladín akustického tlaku hlbokotónového reproduktora s kompenzáciou akustického skratu, kompenzáciou rezonancie a hlbokotónového reproduktora s kompenzáciou akustického skratu, kompenzáciou rezonancie a dolnou priepustou.

Z grafického zobrazenia 4.3 priebehu hlbokotónového reproduktora spoločne s vyššie navrhnutými kompenzáciami a výhybkou je možné odčítať predpokladaný pokles -6 dB na zvolenej deliacej frekvencii.

4.1.5 Kompenzácia impedančnej charakteristiky vysokotónového reproduktora

Pre výpočet súčiastok kompenzácie vysokotónového reproduktora je potrebné určiť hodnoty Thiele-Small parametrov z priebehu zmeranej impedančnej charakteristiky. Z týchto hodnôt je možné správne navrhnuť antirezonančný obvod voči rezonancii vysokotónového reproduktora, ktorý by mohol spôsobovať rezonanciu v celkovej frekvenčnej modulovej charakteristike reproduktorovej sústavy, prípadne zmeniť predpokladaný priebeh prenosu frekvenčnej výhybky. Podľa rovníc z teoretického úvodu 1.3.1 a hodnoty $Z_{\text{max}} = 12,81\text{ Ohm}$ odčítanej zo zmeranej impedančnej cha-

rakteristiky A.2 a hodnoty $f_r=1508$ Hz určíme hodnoty kompenzácie nasledovne:

$$R_0 = \frac{12,81}{6} = 2,135 \quad (4.11)$$

$$R_1 = 6 \cdot \sqrt{2,135} = 8,77 \text{ Ohm} \quad (4.12)$$

Impedancie R_1 dosahuje impedančná charakteristika na $f_1 = 1165$ Hz $f_2 = 1890$ Hz z týchto hodnôt môžeme určiť rezonančnú frekvenciu :

$$f_s = \sqrt{1165 \cdot 1890} = 1484 \text{ Hz} \quad (4.13)$$

$$Q_{ms} = 1508 \cdot \frac{\sqrt{2,135}}{1890 - 1165} = 3,04 \quad (4.14)$$

$$Q_{es} = \frac{3,04}{2,135 - 1} = 2,67 \quad (4.15)$$

$$C_{kv} = \frac{0,1592}{6 \cdot 2,67 \cdot 1508} = 6,59 \mu\text{F} \quad (4.16)$$

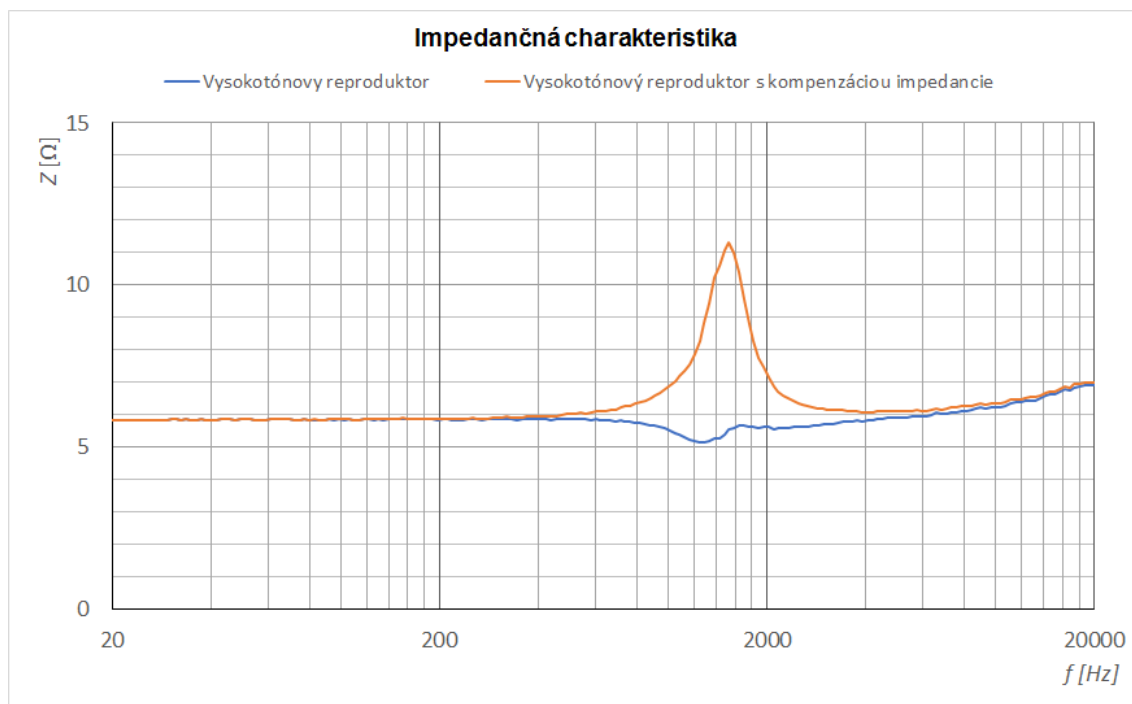
$$L_{kv} = \frac{0,1592 \cdot 2,67 \cdot 6}{1508} = 1,69 \text{ mH} \quad (4.17)$$

$$R_{kv} = 6 + \frac{2,67 \cdot 6}{3,04} = 11,3 \text{ Ohm} \quad (4.18)$$

Z dostupnej rady súčiastok pre reproduktorové výhybky bol zvolený kapacitátor s kapacitou $6,8 \mu\text{F}$, cievka s indukčnosťou $1,8 \text{ mH}$ a rezistor s hodnotou odporu 10 Ohm . Porovnanie vykompenzovanej a nevykompenzovanej impedančnej charakteristiky vysokotónového reproduktora je možné pozorovať na grafe 4.4, v oblasti kompenzácie 1508 Hz , impedancia fluktuuje medzi hodnotami 5 až 6 Ohm oproti pôvodnej špičkovej hodnote takmer 13 Ohm na rezonančnej frekvencii.

4.1.6 Kompenzácia útlmu vysokotónového reproduktora

Dosiahnutie vyrovnanej frekvenčnej charakteristiky reproduktorovej sústavy ovplyvňuje reproduktorová skriňa, ktorá má vplyv aj na priebeh samotnej frekvenčnej modulej charakteristiky vysokotónového reproduktora umiestneného v nej. Peak filter plus je vhodný pre kompenzovanie útlmu, ktorý má strednú frekvenciu odčítanú z frekvenčnej modulej charakteristiky A.1 rovnú hodnote 8000 Hz , šírku pásma



Obr. 4.4: Porovnanie simulácie impedancie vysokotónového reproduktora a vysokotónového reproduktora s použitím kompenzácie impedancie

550 Hz a hodnota odporu na tejto frekvencii je 6,1 Ohm. potom môžeme podľa rovníc z kapitôl 2.2.2 a 2.2.3 určiť hodnoty:

$$a_r = 10^{\frac{-6}{20}} = 0,50, \quad b_r = 10^{\frac{0,5 \cdot -6}{20}} = 0,707, \quad Q_{of-} = \frac{8000}{0,707 \cdot 550} = 20,55, \quad (4.19)$$

$$R_{of-} = 6,1 \cdot \frac{0,5}{1 - 0,5} = 6,12 \text{ Ohm}, \quad (4.20)$$

$$L_{of-} = \frac{6,12}{2 \cdot \pi \cdot 8000 \cdot 20,55 \cdot 0,5} = 11,84 \mu\text{H}, \quad (4.21)$$

$$C_{of-} = \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot 8000^2 \cdot 11,84 \cdot 10^{-6}} = 33,42 \mu\text{F}, \quad (4.22)$$

Z dostupnej rady súčiastok bol zvolený rezistor 5,6 Ohm, kondenzátor 33 μF , cievku bude potrebné namotať vlastnú o hodnote 12 μH .

4.1.7 Kompenzácia nárastu hladiny akustického tlaku vysokotónového reproduktora

Pre kompenzáciu nárastu hladiny akustického tlaku vysokotónového reproduktora smerom k vyšším frekvenciám používame obvykle hi-shelv filter. Použitím tohoto

druhu filtru, by sme nedokázali dosiahnuť vyrovnanú frekvenčnú charakteristiku, preto používame peak filter mínus, ktorý je pripojený paralelne k reproduktoru a správa sa ako zatlmený hi-shelv filter. Dosiahnutie správnej funkcie peak filtru ako zatlmeného shelv filtru je podmienené správnym návrhom, preto treba voliť strednú frekvenciu omnoho vyššiu ako pásmo, ktoré chceme kompenzovať. V našom prípade je stredná frekvencia pre peak filter mínus 28 kHz. Ďalšími potrebnými parametrami pre návrh je útlm, ktorý po odčítaní z frekvenčnej charakteristiky a vychádza -12 dB, šírka pásma 22 Khz a v neposlednom rade hodnota impedancie na strednej frekvencii 3,1 Ohm. Získaním týchto parametrov odčítaním z imedančnej a frekvenčnej modulovej charakteristiky môžeme navrhnúť, filter pomocou rovníc z teoretického úvodu 2.2.2 nasledovne:

$$a_r = 10^{\frac{-12}{20}} = 0,25, \quad b_r = 10^{\frac{0,5 \cdot -12}{20}} = 0,50, \quad Q_{of-} = \frac{22000}{0,50 \cdot 22000} = 2,54, \quad (4.23)$$

$$R_{of-} = 3,1 \cdot \frac{0,25}{1 - 0,25} = 1,03 \text{ Ohm}, \quad (4.24)$$

$$L_{of-} = \frac{1,03 \cdot 2,54}{2 \cdot \pi \cdot 28000} = 15,01 \mu\text{H}, \quad (4.25)$$

$$C_{of-} = \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot 28000^2 \cdot 15,01 \cdot 10^{-6}} = 2,15 \mu\text{F}, \quad (4.26)$$

Funkciu tohoto filtra je možné overiť v simulačnom programe napríklad odčítaním z imedančnej charakteristiky a následným prepočítaním do decibelovej škály, toto ale nemá veľkú výpovednú hodnotu, keďže simulačný program LSPCad nemá možnosť prúdového režimu simulácie hladiny akustického tlaku. Priebeh simulácie hladiny akustického tlaku paralelne pripojených kompenzácií je možné sledovať až po zaradení súčiastky do série s reproduktorom. Výsledok tejto kompenzácie preto porovnáme, nižšie po návrhu súčiastky, ktorá bude zaradená do série pred samostatný reproduktor a paralelne pripojené kompenzácie.

4.1.8 Vyrovnanie citlivosti

Vyrovnanie citlivosti je realizované pomocou jedného rezistora zapojeného za frekvenčnú výhybku z celkového potrebného útlmu je potrebné odčítať útlm peak filtru plus, a rovnako samostatná frekvenčná výhybka spôsobí útlm. Potom útlm na rezistore pre vyrovnanie citlivosti musí byť -4 dB. Pre návrh je potrebné odčítať hodnotu impedancie vysokotónového reproduktoru spoločne s kompenzáciami z imedančnej charkatkeritiky D.2 2,7 Ohm. Pomocou rovníc, kde a_{vc} je útlm v lineárnej miere, A_{vc}

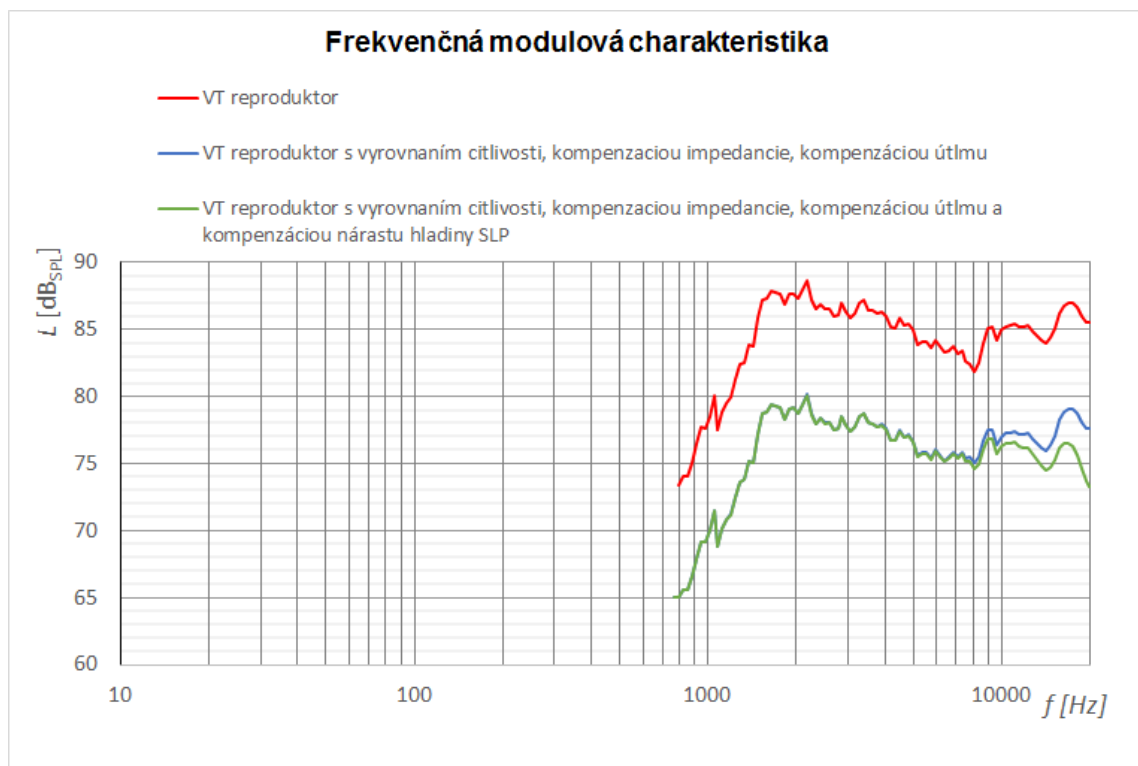
útlm zadávaný v decibeloch (záporná hodnota), R_{ef} je hodnota impedancie vysokotónového reproduktora spoločne s paralelnými kompenzáciami.

$$a_{vc} = 10^{\frac{A_{vc}}{20}} = 10^{\frac{-4}{20}} = 0,63 \quad (4.27)$$

$$R_{vc} = \frac{a_{vc} \cdot R_{ef}}{1 - a_{vc}} = \frac{0,64 \cdot 2,8}{1 - 0,63} = 4,77 \text{ Ohm} \quad (4.28)$$

Z dostupnej rady rezistorov bol zvolený rezistor 4,7 Ohm.

Grafické zobrazenie priebehov frekvenčnej modulovej charakteristiky 4.5, kde červený priebeh reprezentuje hodnoty hladiny akustického tlaku samostatného vysokotónového reproduktora umiestneného v reproduktorovej skrini, modrý po pridaní peak filtru plus a rezistoru vyrovnania citlivosti, zelený je výsledný priebeh so všetkými paralelnými kompenzáciami a vyrovnaním citlivosti. Vysokotónový reproduktor bol meraný od frekvencie 800 Hz, aby nebol poškodený vysokou výchylkou membrány spôsobenou nízkymi frekvenciami.



Obr. 4.5: Porovnanie výsledkov simulácie hladín akustického tlaku samostatného vysokotónového reproduktora a vysokotónového reproduktora s vyrovnaním citlivosti, kompenzáciou rezonancie, kompenzáciou útlmu a vysokotónového reproduktora s vyrovnaním citlivosti, kompenzáciou rezonancie, kompenzáciou útlmu, kompenzáciou nárastu hladiny akustického tlaku smerom k vyšším frekvenciám.

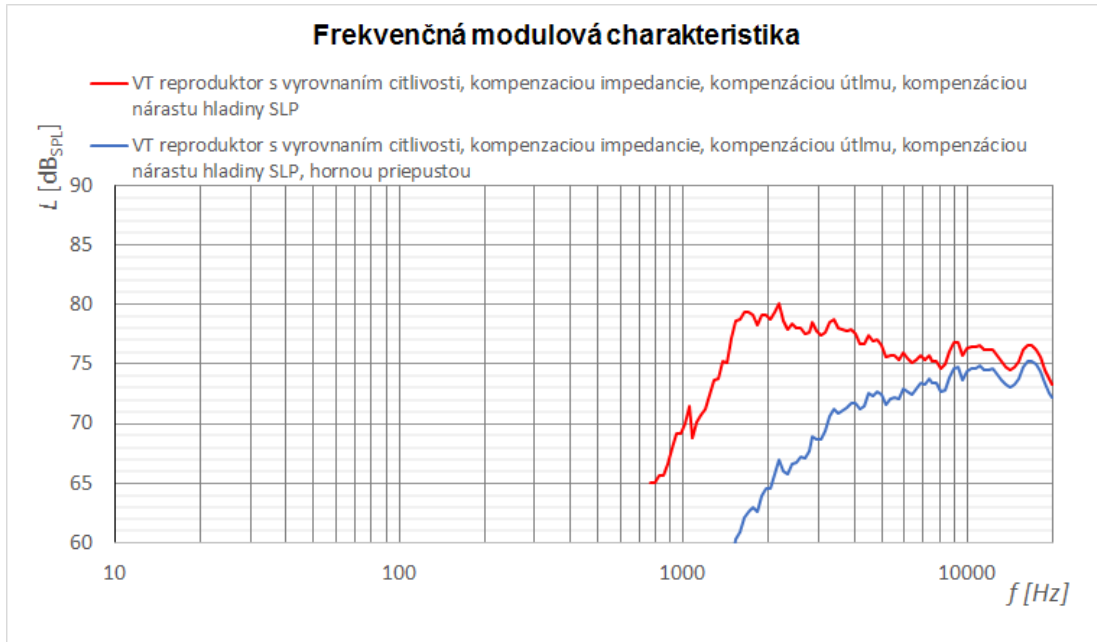
4.1.9 Horná priepusť

Jedným z parametrov návrhu hornej priepuste je deliaca frekvencia, ktorá bola zvolená na hodnotu 2700 Hz s aproximáciou Linkwitz-Riley druhého rádu. Z návrhu dolnej priepuste už vieme, že pri návrhu a zadávaní hodnôt do rovníc pre výpočet súčiastok priepuste, je potrebné brať ohľad na frekvenčnú charakteristiku samostatného reproduktora umiestneného v reproduktorovej skrini. Pre dosiahnutie prenosu -6 dB na deliacej frekvencii vzhľadom na priebeh frekvenčnej modulovej charakteristiky vysokotónového reproduktora v ozvučnici, je potreba do rovníc pre návrh hornej priepuste zadávať hodnotu deliacej frekvencie 4000 Hz. Hodnotu impedancie na deliacej frekvencii určenej pre výpočet filtra odčítame z priebehu impedančnej charakteristiky D.3 rovnú 7,5 Ohm. Potom môžeme podľa rovníc z kapitoly 1.3 určiť hodnoty súčiastok:

$$C_{dp} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot 4000 \cdot 7,5} = 2,65 \mu\text{F}, \quad (4.29)$$

$$L_{dp} = \frac{7,5}{\pi \cdot 4000} = 0,597 \text{ mH}, \quad (4.30)$$

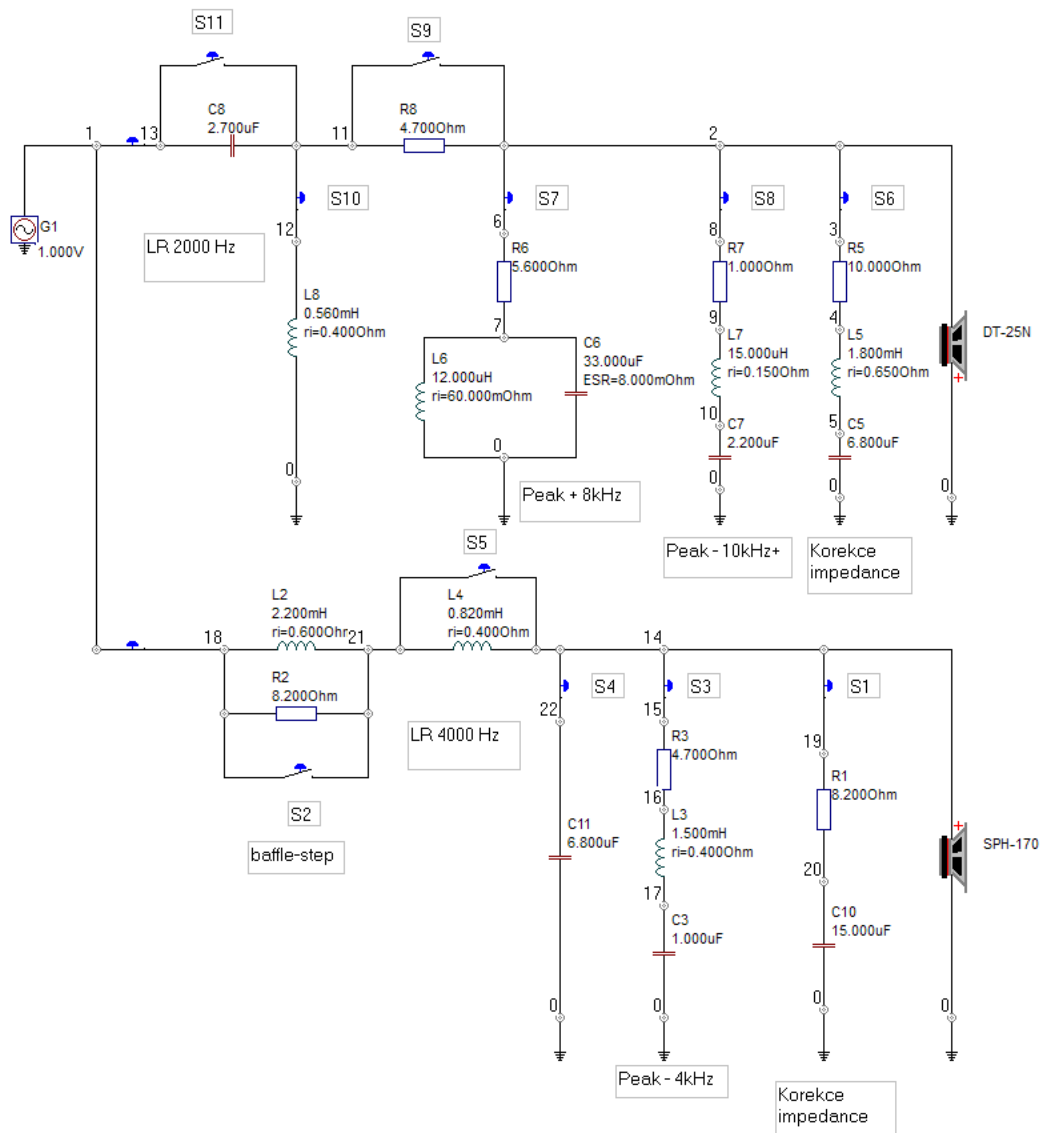
Z dostupnej rady súčiastok pre reproduktorové výhybky bol zvolený kapacitátor 2,7 μF a cievka s indučnosťou 0,56 mH.



Obr. 4.6: Porovnanie simulácie hladiny akustického tlaku vysokotónového reproduktora so všetkými kompenzáciami a vysokotónového reproduktora so všetkými kompenzáciami, hornou priepustou.

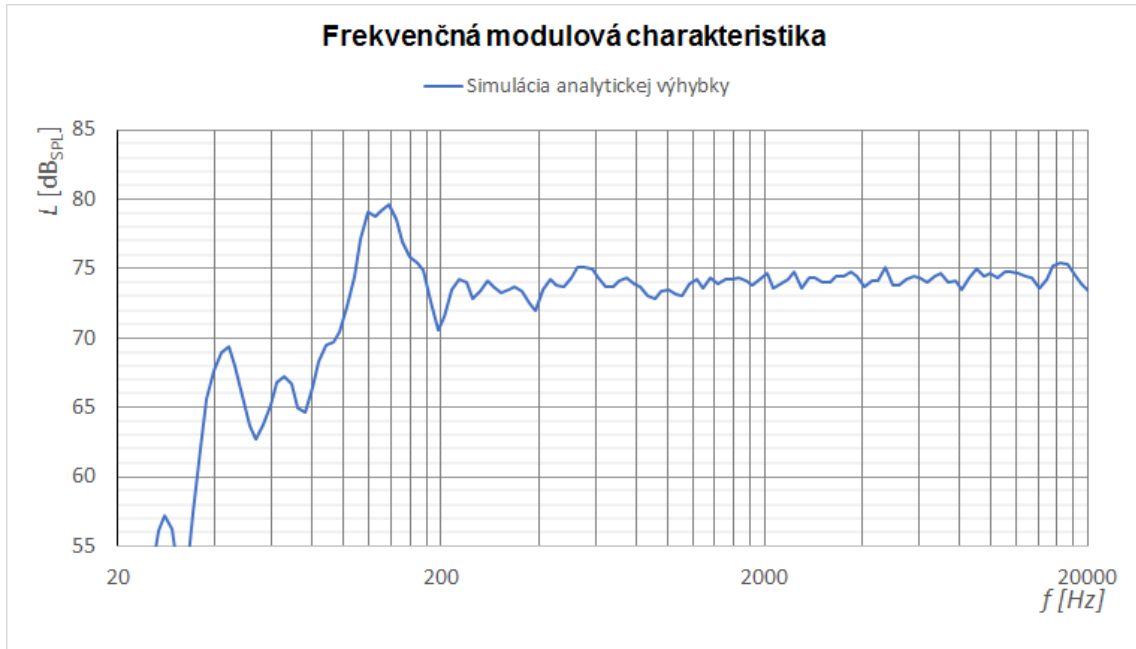
4.1.10 Výsledná simulácia a schéma zapojenia

Výsledná schéma zapojenia je prispôbená aj pre laboratórne úlohy, ktoré sú súčasťou výstupu tejto práce. Spínače rovnako slúžia pre postupný návrh a optimalizáciu návrhu, každá kompenzácia obsahuje spínač pre jej deaktiváciu. Na dosiahnutie porovnateľných výsledkov reálne vyrobených a simulovaných frekvenčných výhybiiek je potrebné zadávať aj hodnoty jednosmerných odporov vinutí cievok. Pre správnu simuláciu je potrebné pri peak filtri plus zadať aj hodnotu sériového odporu kondenzátoru C8. Parametre simulácie je potrebné voľiť vzhľadom na počet meracích bodov v našom prípade je to 200 bodov v pracovnom rozsahu 20 až 20 kHz.



Obr. 4.7: Výsledná schéma zapojenia analytického návrhu výhybky

Priebeh výsledku simulácie frekvenčnej modulovej charakteristiky 4.8, nám vypovedá, že simuláciami a postupnými výpočtami sa nám podarilo dosiahnuť vyrovnanú frekvenčnú modulovú charakteristiku. Rozsah zvlnenia simulácie od frekvencie 200 Hz je maximálne 2 decibely.



Obr. 4.8: Výsledná simulácia SPL analytického návrhu

4.2 Empirický postup návrhu

4.2.1 Hlbokotónového reproduktora

Týmto postupom návrhu chceme ušetriť čo najväčší počet súčiastok, preto pri návrhu nevyužijeme kompenzáciu baffle-step ani kompenzáciu impedancie. Pre hlbokotónový reproduktor použijeme výhybku 2. rádu, ktorú zatlmíme rezistorom R9 vid schéma 4.9, empirickým menením hodnôt súčiastok L9, C9 a R9 dosiahneme pokles -6 dB na požadovanej deliacej frekvencii, pre nás 2700 Hz. Nevykompenzovaním impedančnej charakteristiky hlbokotónového reproduktora s kombináciou zatlmenej frekvenčnej výhybky mierne kompenzujeme nárast hladiny akustického tlaku spôsobenú akustickým skratom reproduktorovej skrine.

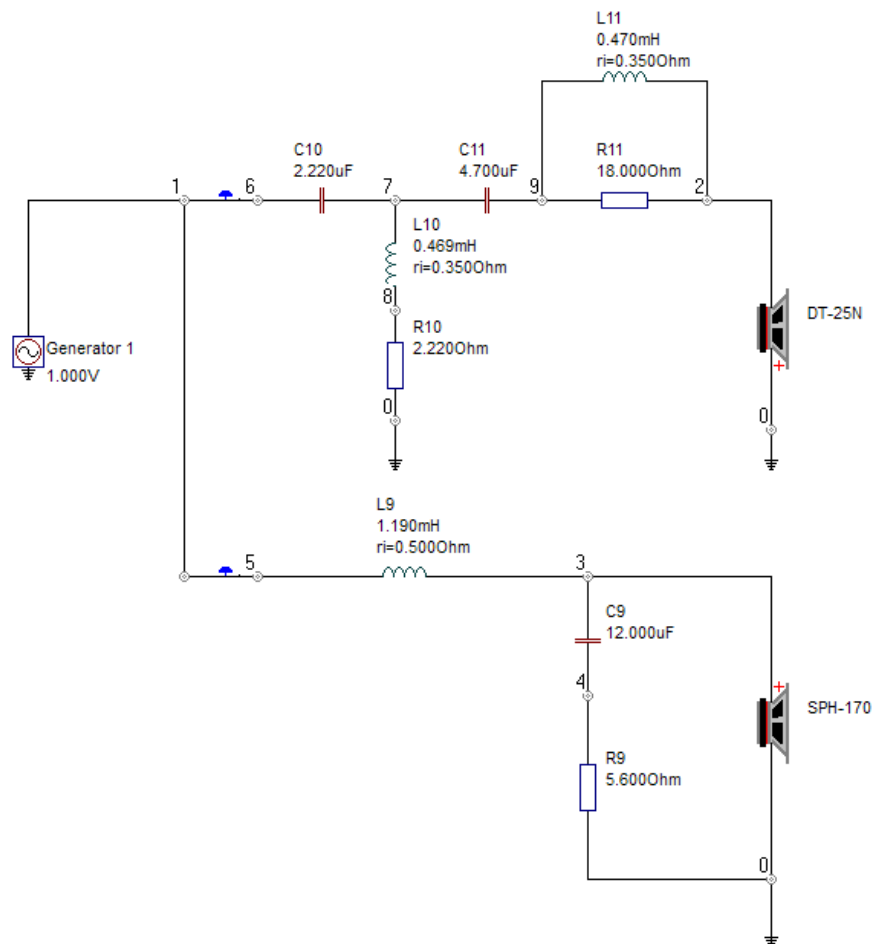
4.2.2 Vysokotónového reproduktora

Rovnako ako pri návrhu pre hlbokotónový reproduktor, pri empirickom návrhu pre vysokotónový reproduktor nepoužijeme kompenzáciu impedancie. Vzhľadom na prie-

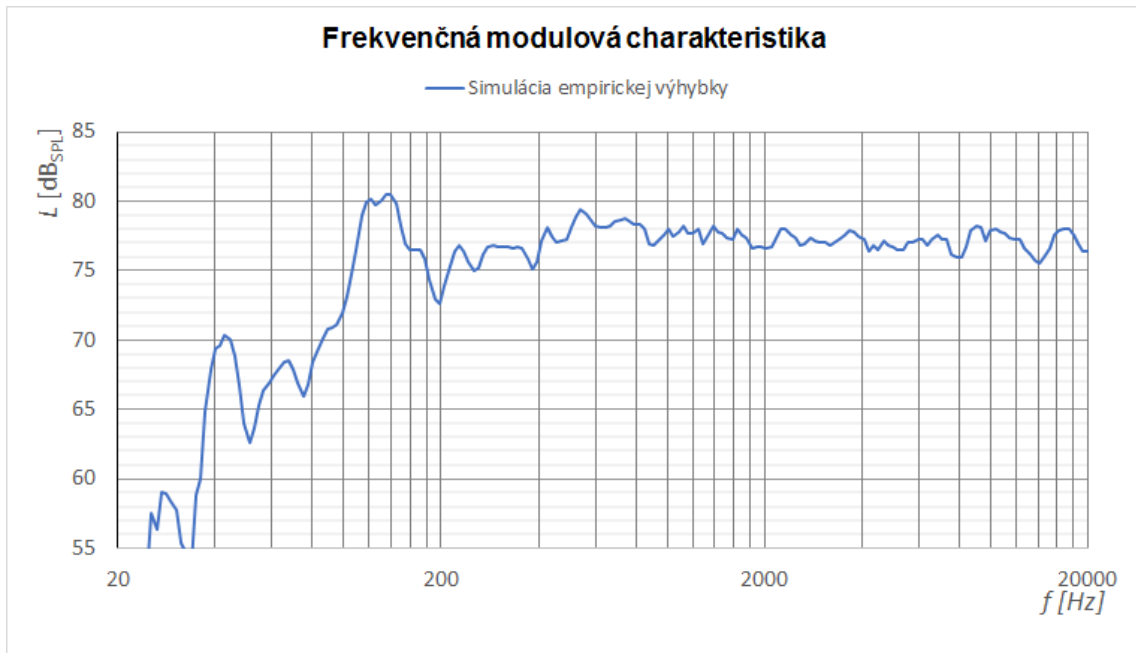
beh frekvenčnej modulovej charakteristiky vysokotónového reproduktora kompenzujeme nárast hladiny akustického tlaku voľbou vyššieho rádu filtra typu horná priepusť, ktorý zatlmíme rezistorom R10. Vhodným empirickým menením súčiastok frekvenčnej výhybky dosiahneme pokles na deliacej frekvencii. Vyrovnanie citlivosti je realizované pomocou filtra typu hi-shelv súčiastkami L11, R11 v kombinácii s vhodne zvolenými súčiastkami samostatnej frekvenčnej výhybky pre vysokotónový reproduktor.

4.2.3 Výsledná simulácia a schéma zapojenia

Tento návrh vzhľadom na použitie rôznych rádov frekvenčných výhybiek a voľbu deliacej frekvencie musí zahrňovať aj skupinové oneskorenie reproduktorov, ktoré je rovné hodnote 44 mikro sekúnd.



Obr. 4.9: Výsledná schéma zapojenia empirického návrhu výhybky



Obr. 4.10: Výsledná simulácia SPL empirického návrhu

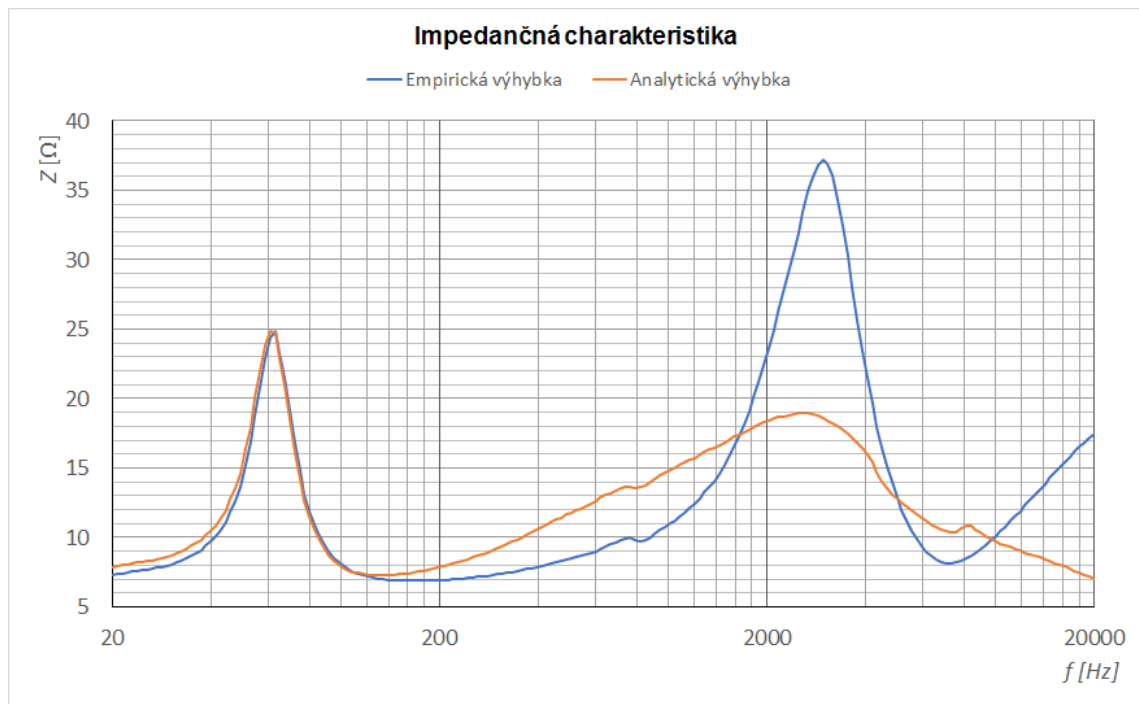
4.3 Impedančná a prúdová analýza

4.3.1 Analýza impedančných charakteristík

Po návrhu výhybky a dosiahnutí požadovaných výsledkov priebehu frekvenčnej modulovej charakteristiky reproduktorovej sústavy, je potrebná analýza priebehu impedančnej charakteristiky. Impedancia by nemala prudko klesnúť pod úroveň jednosmernej hodnoty impedancie, ak by tento jav nastal, mohlo by prísť k nadmernému preťaženiu výkonového zosilňovača a prípadne k jeho poškodeniu. Návrh pomocou oboch postupov analytickým aj empirickým tieto parametre spĺňa, ako možno pozorovať na simulácii 4.11, impedancia neklesá pod kritickú úroveň, ktorá by nadmerne zatažovala výkonový zosilňovač.

4.3.2 Prúdová analýza

Prúdová analýza je potrebná pre určenie výkonov jednotlivých rezistorov v návrhu frekvenčnej výhybky. Rezistory v oboch návrhoch sú dimenzované pre výkon 10 W na reproduktoroch. Analýza prebiehala pomocou simulačného programu LSPCad (program neumožňuje pridať prúdový zdroj ani možnosť simulácie veľkosti prúdov na jednotlivých rezistoroch), simulovaním priebehov napätia na jednotlivých rezistoroch. Následne výpočtom podľa rovnice pre výkon odvodené z Ohmovho zákona $P = \frac{U_{R_x}^2}{R_x}$, kde R_x je hodnota odporu, pre ktorý výkon počítame v návrhu zo schémy



Obr. 4.11: Simulácia priebehu impedančných charakteristík návrhov výhybiek

zapojenia 4.7 a 4.9. Maximálne hodnoty napätí boli odčítané zo simulácií priebehov napätí D.4 a D.5. Rezistory boli zvolené tak, aby bola dostatočná rezerva, minimálna hodnota je 5 W aj keď výkon bol omnoho menší, pokiaľ bol výkon na rezistore vypočítaný väčší ako 4 W. Bol zvolený rezistor s výkonom 10 W. Týmto krokom chceme predísť zahrievaniu obvodových prvkov a dostatočne predimenzovať výhybku aj pre vyššie výkony.

4.4 Konštrukcia a meranie parametrov frekvenčných výhybiek

4.4.1 Konštrukcia

Pasívne reproduktorové výhybky sa vyznačujú značným výkonom, teda súčiastkami tečú nemalé prúdy, preto je potrebné na to brať ohľad a vhodne voliť súčiastky, pretože pri zvýšenom zaťažení rastie teplota súčiastok a menia sa ich vlastnosti. Tento návrh počíta s maximálnym výkonom 10 W pri prenose frekvenčnej výhybky 0 dB. Výber výkonových rezistorov je popísaný vyššie v kapitole prúdová analýza 4.3.2. Minimálna hodnota prierezu vodiča vinutia cievky je 0,8 mm pre menšie prúdy a pre vetvy s väčším prúdovým zaťažením je použitý drôt s prierezom 1,2 mm. Kapacitátory použité v tomto návrhu sú s polyesterovým dielektrikom typu MKT vhodné pre

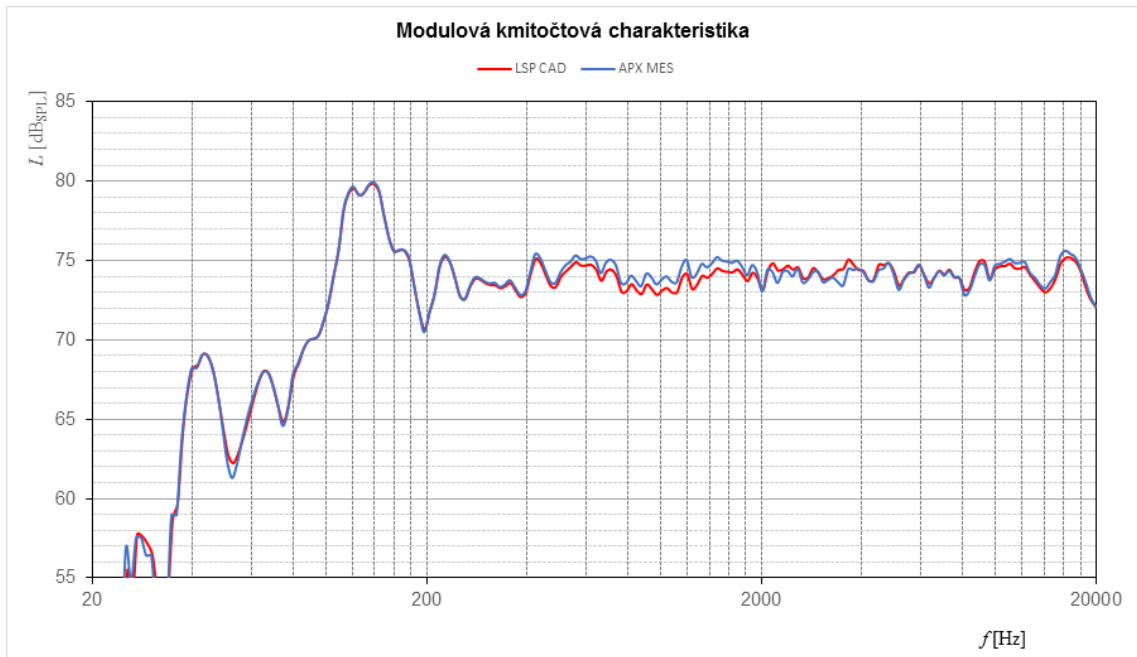
| | Rrezistor | Maximálne napätie [V] | Hodnota odporu [R] | Výkon [W] | Zvolený Výkon z rady [W] |
|--------------------|-------------------|-----------------------|--------------------|-----------|--------------------------|
| Analytická výhybka | R1 | 1,90 | 8,20 | 0,44 | 5 |
| | R2 | 0,67 | 4,70 | 0,10 | 5 |
| | R3 | 3,60 | 8,20 | 1,58 | 5 |
| | R5 | 0,34 | 10,00 | 0,01 | 5 |
| | R6 | 2,03 | 5,60 | 0,74 | 5 |
| | R7 | 0,72 | 1,00 | 0,52 | 5 |
| | R8 | 4,77 | 4,70 | 4,84 | 10 |
| | Empirická výhybka | R9 | 2,00 | 5,60 | 0,71 |
| R10 | | 1,03 | 2,20 | 0,48 | 5 |
| R11 | | 6,45 | 18,00 | 2,31 | 5 |

Obr. 4.12: Tabuľka zvolených výkonových rezistorov

reproduktorové výhybky, keďže časom nestrácajú svoje vlastnosti kapacitancie, ako klasické elektrolytické kapacitátory, ktoré majú aj vyšší sériový odpor. Najväčším problémom analytického návrhu bola konštrukcia filtra typu peak filter plus, ktorý je extrémne náchylný na sériový odpor. Preto aj cievka s minimálnym pretekajúcim prúdom je vinutá drôtom s priemerom drôtu 1,5 mm. Kostrička tejto cievky bola navrhnutá a následne vytlačená na 3D tlačiarňi a ručne namotaná, zmeraná hodnota jej jednosmerného odporu vinutia je 28 mOhm. Meraniami bolo ale zistené, že pri tomto druhu filtra je potrebné do simulácie zadávať hodnotu odporu na frekvencii, pre ktorý je táto kompenzácia navrhnutá. Rovnaký problém spôsoboval sériový odpor kapacitátorov, tento problém bol vyriešený tak, že sme použili 4 kondenzátory spojené paralelne a tým sme znížili sériový odpor na 1/4 pôvodnej hodnoty a dosiahli požadovanú kapacitu. Dosky plošných spojov sú navrhnuté metódou delených spojov ich návrhy sú vyobrazené v prílohe C. Pri každej cievke sú dve diery na pripevnenie cievok pomocou sťahovacích pásov. Vstupy aj výstupy dosiek sú realizované pomocou 4,8 mm faston konektorov. Všetky prípojné miesta zemniaceho vodiča sú zvedené do jedného miesta pre zamedzenie vzniku zemniacich slučiek.

4.4.2 Meranie frekvenčných modulových charakteristík

Meranie prebiehalo na meracom systéme APx500 s použitím impedančného meriča, teda zosilnovača, ktorý má zosilnenie 0dB. Hodnota napätia na výstupe je rovná hodnote napätia zadanej v ovládacom programe hardvéru APx. Pre meranie frekvenčnej modulovej charakteristiky bola použitá metóda merania acustic response rozmietaným signálom s desiatimi opakovaniami. Zmerané dáta boli následne vyhladené na 1/24 oktávy. Pre porovnateľnosť výsledkov meraných a simulovaných

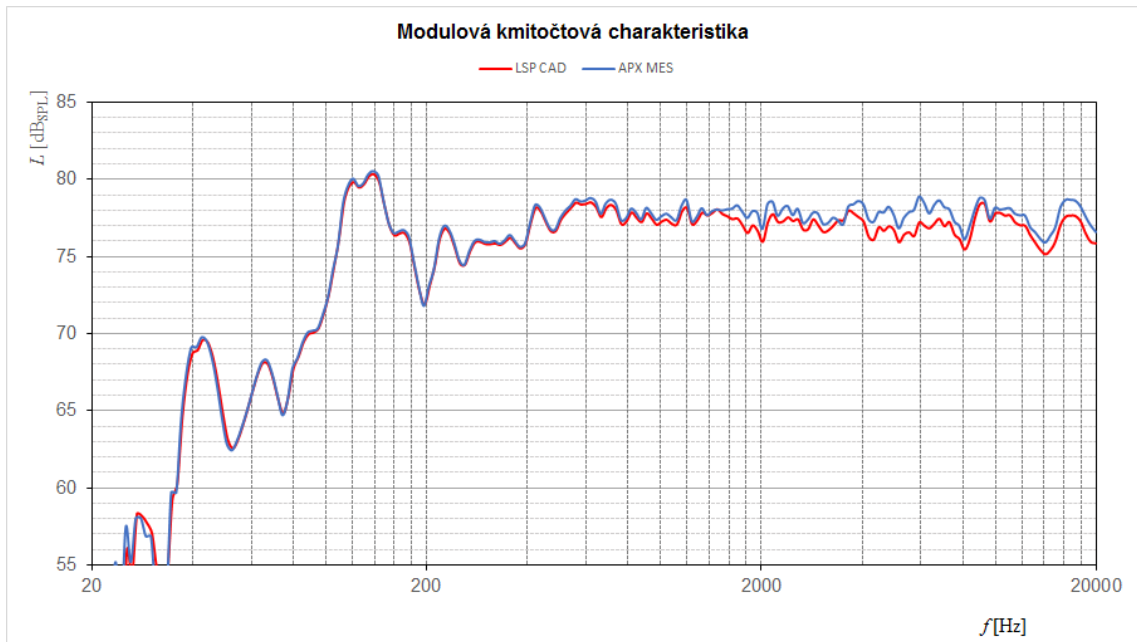


Obr. 4.13: Porovnanie simulovaných a nameraných honôt SPL analytickej výhybky

hodnôt je potreba exportu vyhladených dát s počtom bodov 200.

Porovnanie simulovaných a nameraných dát analytickej výhybky dosahuje rozdiel menší ako 1 dB, tieto priebehy je možné pozorovať na obrázku 4.13. Tento rozdiel spôsobený mierne vyšším prenosom napätia viď A.5, ktorý je pravdepodobne spôsobený nedokonalosťou simulácie reálnych súčiastok hlavne jednosmerného odporu v kombinácii s možnosťou posunutia osi reproduktorovej sústavy vplyvom deliacej frekvencie.

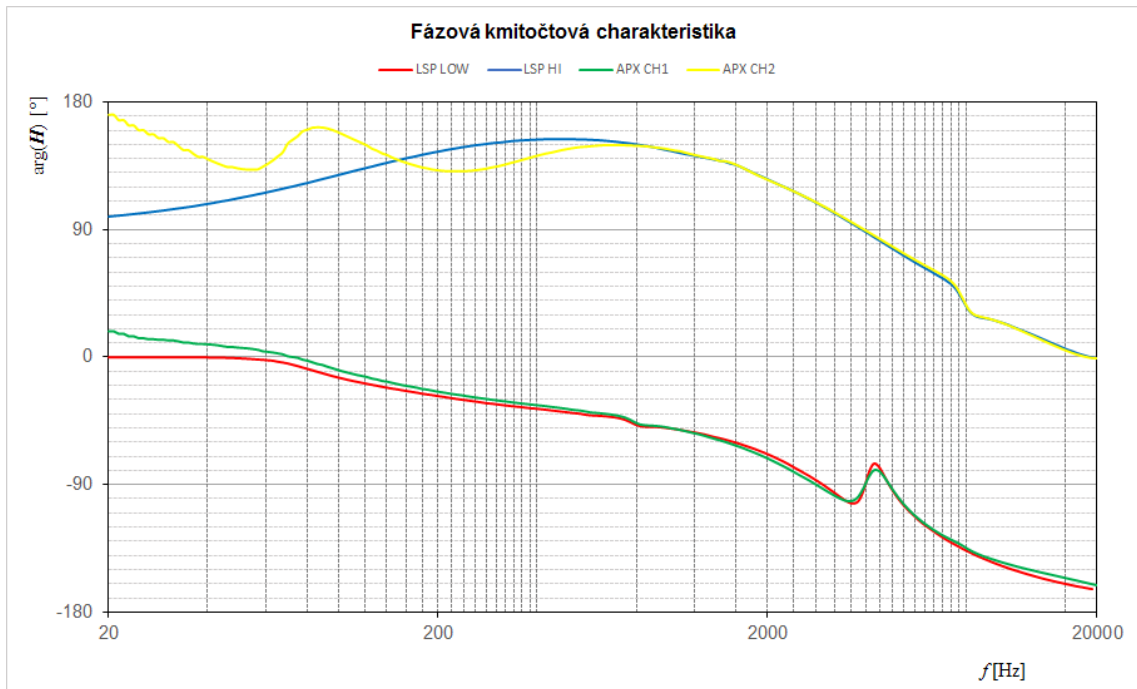
Porovnanie simulovaných dát so započítaním skupinového oneskorenia a nameraných dát empirickej výhybky vykazuje väčšie rozdiely v porovnaní s analytickou výhybkou maximálne však 2 dB. Rozdiel je pravdepodobne spôsobený použitím rôznych rádov filtrov výhybiek a deliacej frekvencie, ktorá je blízko vzdialenosti reproduktorov $5/4$ lambda, pretože porovnanie prenosov napätí A.6 jednotlivých kanálov vyhybiek vykazuje minimálne rozdiely. Rozdiel môže spôsobovať posun akustickej osi v závislosti na voľbe deliacej frekvencie.



Obr. 4.14: Porovnanie simulovaných a nameraných hodnôt SPL empirickej výhybky

4.4.3 Meranie prenosových a fázových charakteristík

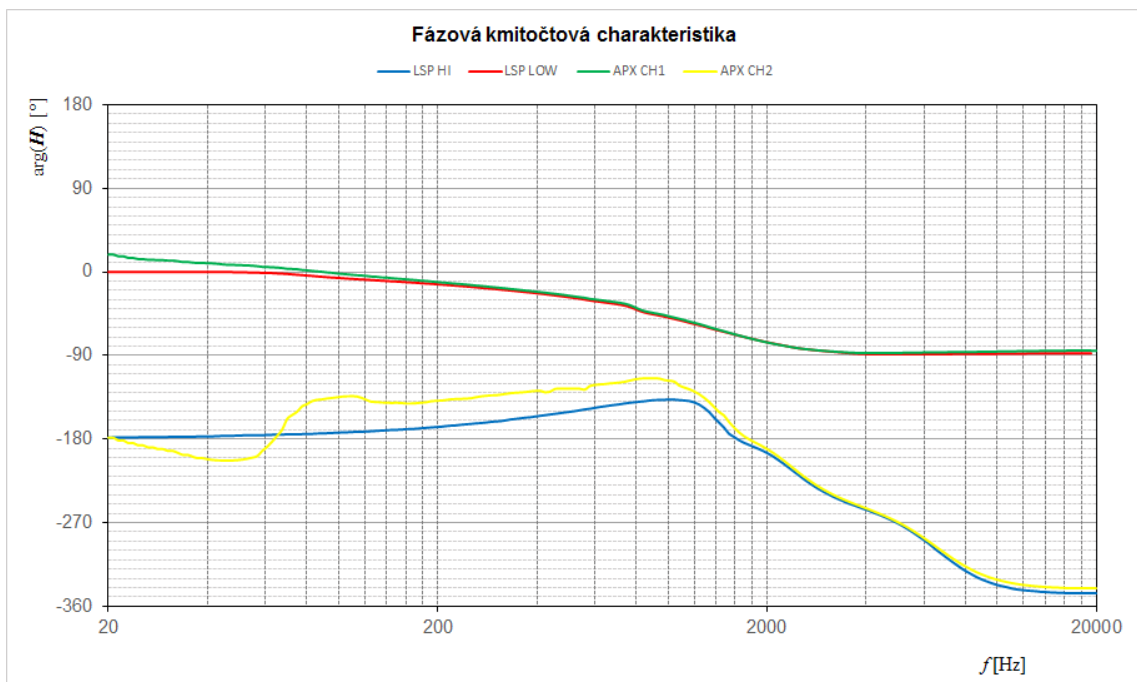
Meranie prenosových charakteristík prebiehalo rovnako za pomoci meracieho systému APx500 spoločne s impedančným meničom. Prenos bol meraný pomocou merania typu "frequency response", ktorý umožňuje meranie prenosu v dB, rovnako pre jednotnosť sú dáta exportované s počtom bodov 200. Meranie fázových charakteristík prebehlo pomocou merania typu „acoustic response“ a rovnakým exportom s počtom bodov 200. Výhybky boli zaťažované reproduktormi z reproduktorovej sústavy, prenosové charakteristiky sú k dispozícii v prílohách A.5 a A.6. Zmerané fázové charakteristiky 4.15 a 4.16 dolných priepustí sa zhodujú v celom frekvenčnom pásme. Fázové charakteristiky horných priepustí sa zhodujú v ich funkčnom pásme, oblasť pod 400 Hz, kde sa začínajú mierne nezhodovať, môže byť spôsobené chybou merania nakoľko je v tejto oblasti už značný útlm vzhľadom na medznú frekvenciu.



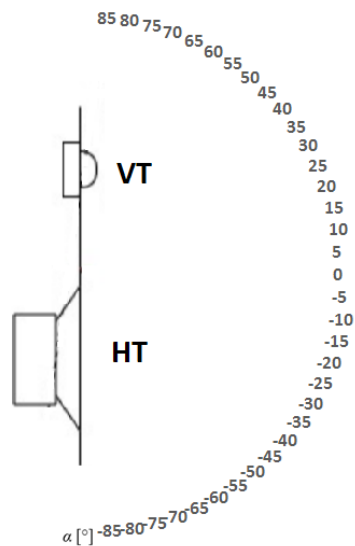
Obr. 4.15: Porovnanie simulovaných a zmeraných fázových charakteristík analytickej výhybky

4.4.4 Meranie smerových a frekvenčne smerových charakteristík

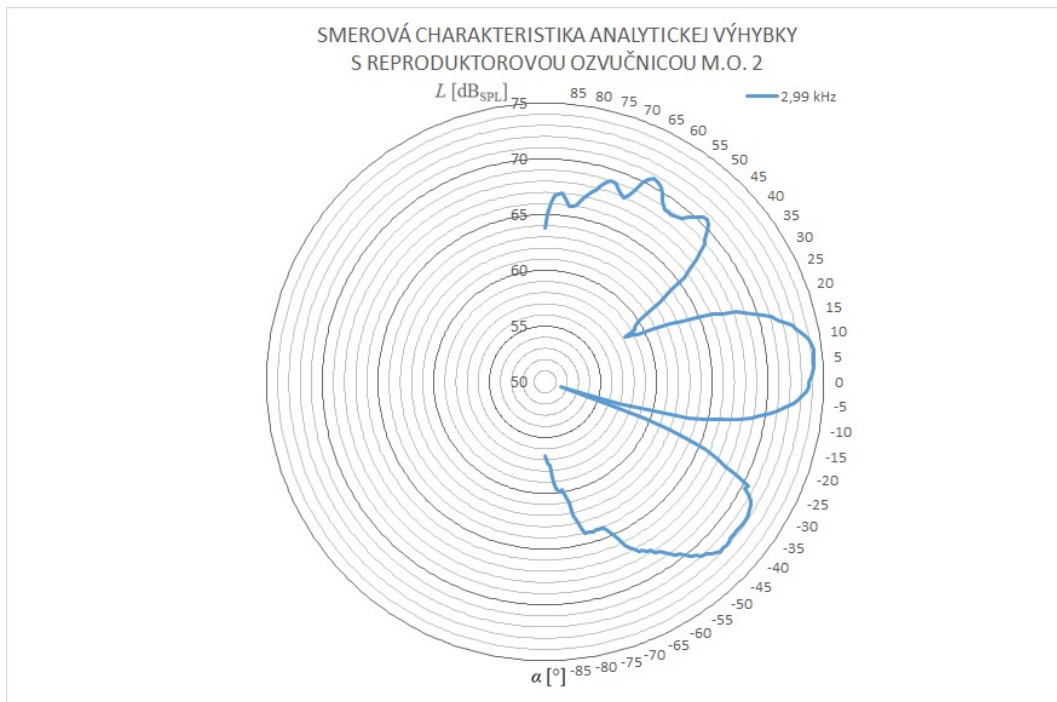
Merania smerových a frekvenčne smerových charakteristík boli uskutočnené pomocou meracieho softvéru Pulse. V prvom kroku boli zmerané frekvenčné charakteristiky s prepólovaným reproduktorom. Tým sme zistili frekvenciu najväčšieho útlmu v osi reproduktorovej sústavy. Toto meranie nám poskytlo frekvenciu, pre ktorú sme následne merali smerovú charakteristiku reproduktorovej sústavy spoločne s frekvenčnou výhybkou. Hodnota frekvencie pre reproduktorovú sústavu spoločne s analytickou výhybkou bola stanovená na 2,99 kHz a hodnota frekvencie empirickej výhybky spoločne s reproduktorovou sústavou na 2,63 kHz. Na základe výsledkov týchto meraní bol následne zvolený rozsah a krok merania frekvenčných smerových charakteristík. Rozsah merania 90 stupňov, krok merania 15 stupňov, kladný uhol smeruje bližšie k vysokotónovému reproduktoru reproduktorovej sústavy viď obrázok 4.17. Zo smerových charakteristík 4.19 a 4.20 je možné rozoznať rád použitého filtra, na základe polohy väčšieho útlmu. Tretí rád (empirický návrh) má najväčší útlm smerom k väčším uhlom na hodnote 25 stupňov teda bližšie smerom k vysokotónovému reproduktoru.



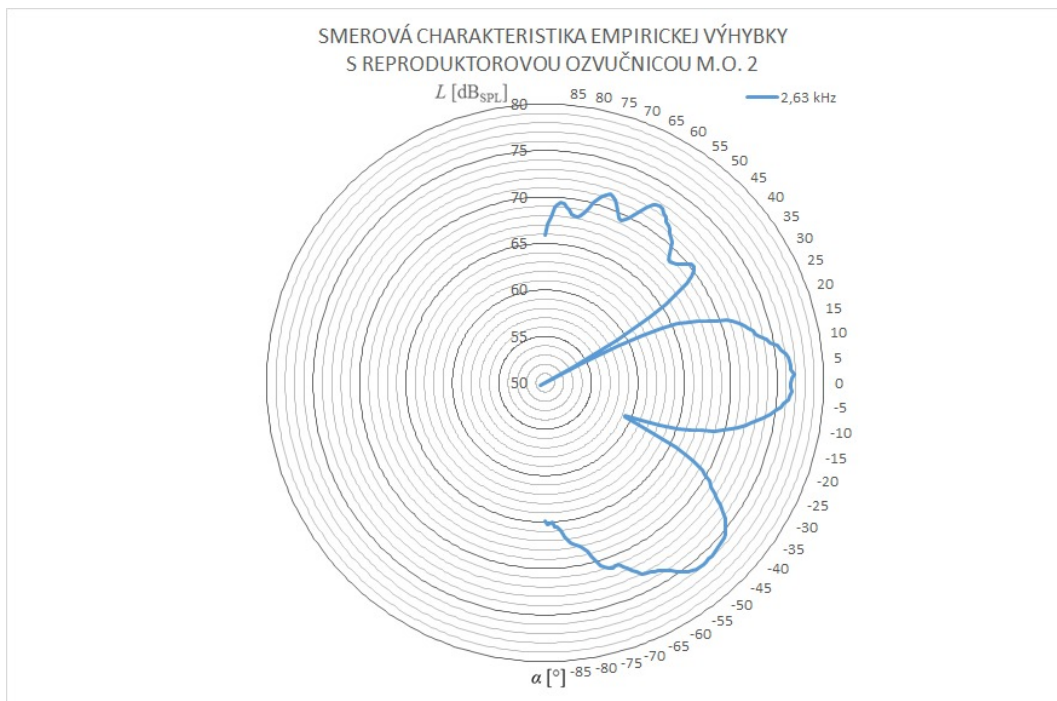
Obr. 4.16: Porovnanie simulovaných a zmeraných fázových charakteristík empirickej výhybky



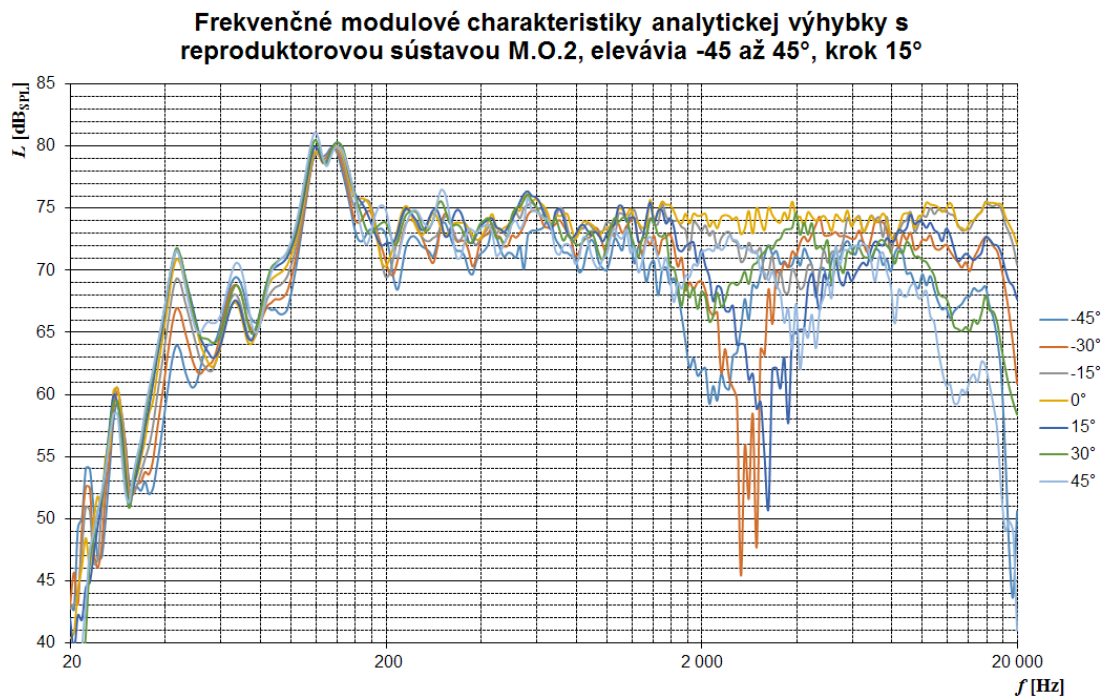
Obr. 4.17: Znázornenie označenia merania uhlov v smerových a frekvenčne smerových charakteristikách



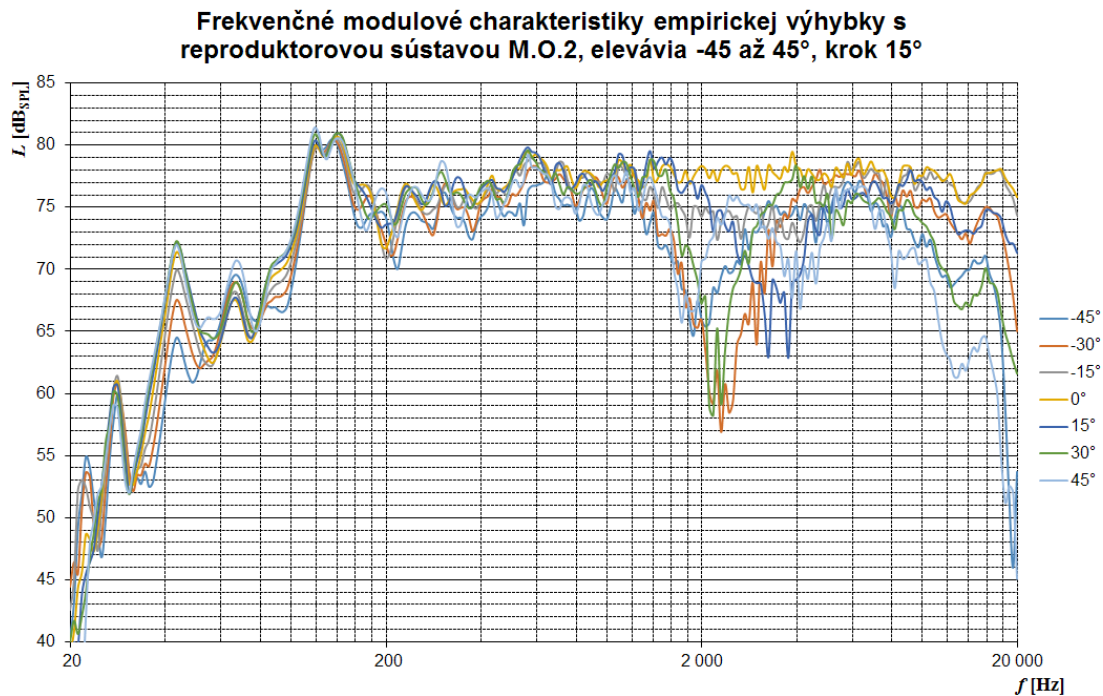
Obr. 4.18: Smerová charakteristika analytickej výhybky s reproduktorovou sústavou



Obr. 4.19: Smerová charakteristika empirickej výhybky s reproduktorovou sústavou



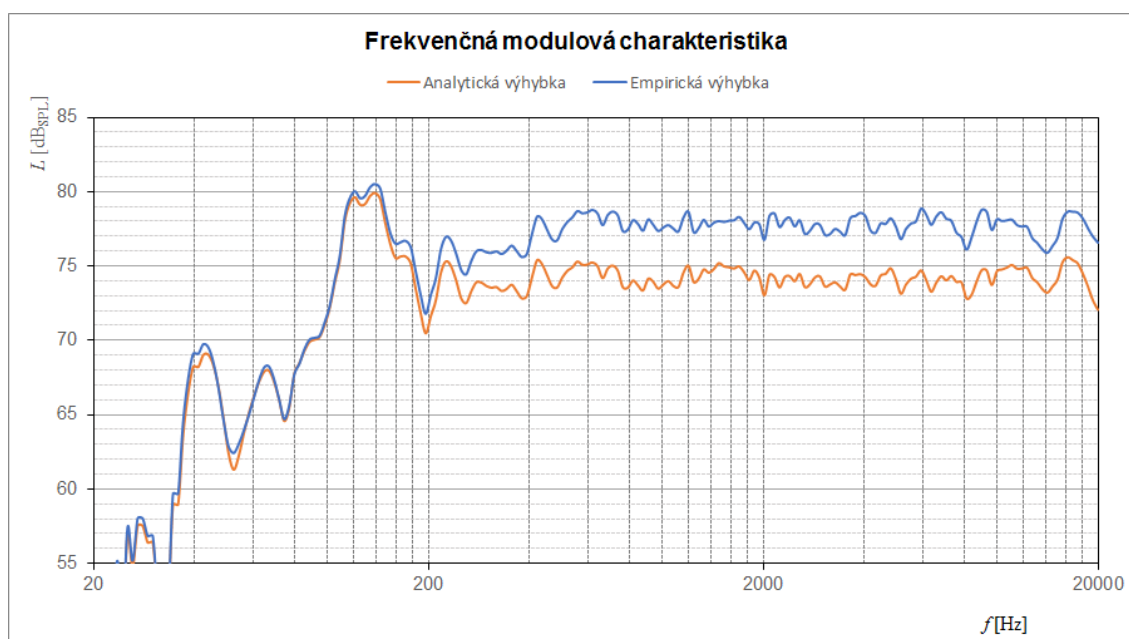
Obr. 4.20: Frekvenčná smerová charakteristika analytickej výhybky s reproduktorovou sústavou



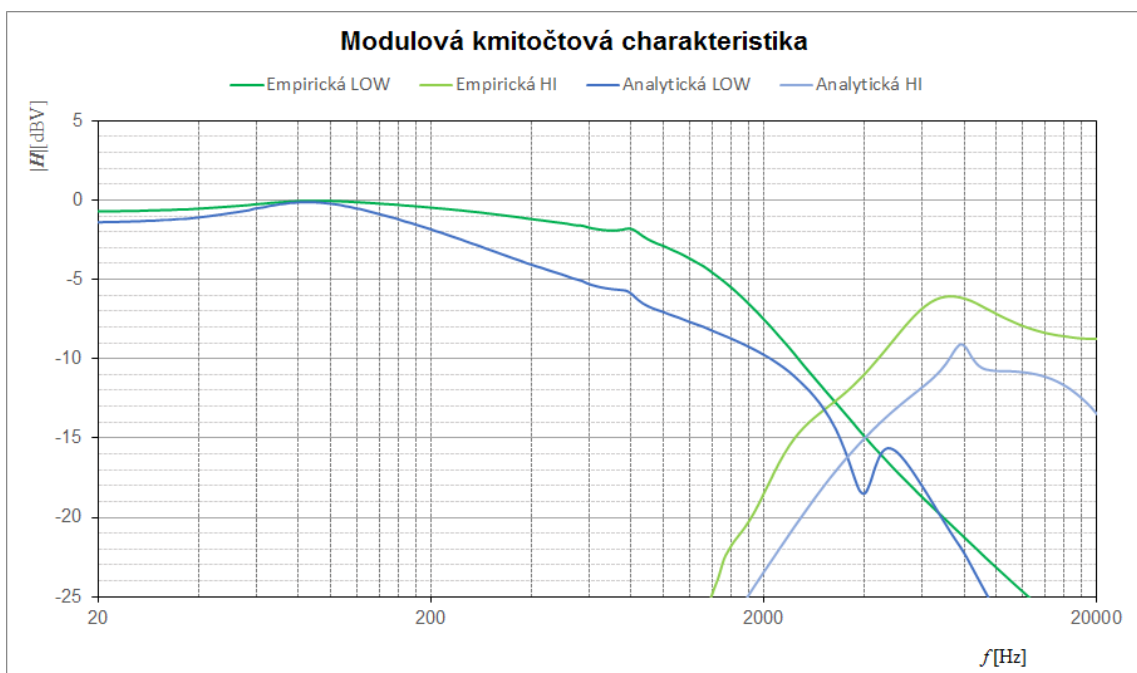
Obr. 4.21: Frekvenčná smerová charakteristika empirickej výhybky s reproduktorovou sústavou

5 Porovnanie návrhov

Cielom tejto práce bolo dosiahnuť čo najmenej zvlnenú frekvenčnú modulovú charakteristiku reproduktorovej sústavy pomocou dvoch rôznych postupov návrhov. Porovnanie návrhov je možné sledovať na obrázku 5.1. Analytický návrh dosahuje maximálneho zvlnenia 2,5 dB od frekvencie 200 Hz, pod touto hodnotou začína mať vplyv bezodrazová komora a výsledky nemôžeme považovať za relevantné. Analytický návrh sa vyznačuje zníženou citlivosťou reproduktorovej sústavy 75 dB pri budení 1,25 V vo vzdialenosti 1 m. Tento výsledok je doisiahnutý pomerne veľkým počtom súčiasok a to dvadsaťjeden. Empirický návrh pozostáva z deviatich súčiasok, jeho citlivosť spoločne s reproduktorovou sústavou je o 2 dB vyššia v porovnaní s analytickým návrhom. Empirický návrh dosahuje minimálneho zvlnenia od frekvencie 400 Hz, keďže nepoužívame kompenzáciu akustického skratu. Oblasť pod 400 Hz má útlm 3 decibeli voči zbytku vyrovnanej frekvenčnej modulovej charakteristiky, ktorá dosahuje citlivosť 77 decibelov pri budení 1,25 V vo vzdialenosti 1 meter. Obrázok 5.2 zobrazuje porovnanie prenosov napätí jednotlivých vetiev frekvenčných výhybiek.



Obr. 5.1: Porovnanie SPL vyrobenej analytickej a empirickej výhybky



Obr. 5.2: Porovnanie prenosov vyrobenej analytickej a empirickej výhybky

6 Návrh univerzálneho plošného spoja

Základom návrhu univerzálneho plošného spoja sú 2mm GOLD konektory rozmiestnené na ploche 260x372.5mm. Na vstupe je navrhnutý dvojpinový speaker konektor, ku ktorému sú paralelne pripojené GOLD kontakty s priemerom 4mm pre univerzálnosť pripojenia. Doska je rozdelená na dve časti a to pre vysokotónový reproduktor (tweeter) a hlbokotónový reproduktor (woofer). Tieto časti sa potom ďalej delia na sekcie, ktoré sú ohraničené prerušovanou čiarou.

Časť pre vysokotónový reproduktor obsahuje hneď za vstupným konektorom konektory pre pripojenie rezistora na vyrovnanie citlivosti, ktorý je zaradený ešte pred výhybkou samostatnú, v prípade nepoužitia takéhoto vyrovnania citlivosti sa pinz skratujú. Signál ďalej pokračuje cez dva filtre typu horná priepusť, teda môžeme vytvoriť výhybku až štvrtého rádu, oba tieto filtre podporujú možnosť pripojenia tlmiaceho rezistoru. Za výhybkou nasleduje druhá možnosť vyrovnania citlivosti a to pomocou dvoch rezistorov, odporovým deličom. Do signálovej cesty za odporový delič sú navrhnuté tri konektory, do ktorých je možné do série pripojiť kombináciu RLC súčiastok a tak vytvoriť filter typu high/low shelv, pre kompenzáciu strmosti reproduktora, tým končí sériová signálová cesta a ostatné piny kompenzácií sú pripojené paralelne k výstupu. Prvá kompenzácia je typu pásmová zádrž. Je možné pripojiť súčiastky RLC filtra pre kompenzovanie rezonancií na ojedinelých frekvenciách. Ďalšie pripojné miesto je určené pre kompenzáciu útlmov na ojedinelých frekvenciách. Posledná kompenzácia je kompenzácia impedancie cievky reproduktora, ktorá je rovnako tvorená filtrom typu pásmová zádrž (peak filter mínus). Na konci dosky sa nachádza 4mm GOLD konektor pre pripojenie meracieho prístroja a paralelne 4-pinový speaker konektor pre pripojenie reproduktorovej sústavy.

Časť pre hlbokotónový reproduktor obsahuje za vstupným konektorom filter zapojený do série pred vstup výhybky. Týmto sériovým obvodom je možné realizovať kompenzáciu akustického skratu na nízkych frekvenciách (baffle-step). Za touto kompenzáciou nasledujú pripojné miesta pre súčiastky samostatnej výhybky, ktorú opäť môžeme vyskladať až do štvrtého rádu. Rovnako ako pri vysokotónovej vetve obsahuje sériovú kompenzáciu za ktorou je výstup pre hlbokotónový reproduktor (woofer) a paralelné kompenzácie typu pásmová priepusť a zádrž. Kompenzácia impedancie je posledným paralelne pripojeným filtrom k výstupu hlbokotónového reproduktora. Pre kompenzáciu impedancie hlbokotónového reproduktora je postačujúci RC článok teda postačujú 4 konektory pre pripojenie. Výstup pre hlbokotónový reproduktor je rovnako privedený na 4mm GOLD konektor a štvor-pinový speaker konektor pre pripojenie sa k reproduktorovej sústave.

Návrh vrchnej krycej dosky je k dispozícii v prílohe B.1

7 Laboratórne úlohy

Praktickým výstupom tejto práce sú aj dve laboratórne úlohy využívajúce postupy návrhov a výrobky tejto diplomovej práce. Prvá laboratórna úloha je zameraná na postup návrhu pasívnych kompenzácií ako v impedančnej, tak aj frekvenčnej oblasti. Žiaci sa zoznámia s postupom návrhu frekvenčných filtrov, ktorými je možné dosiahnuť minimálneho zvlnenia frekvenčnej charakteristiky za použitia vykompenzovanej impedančnej charakteristiky a filtrov druhého rádu podľa aproximácie Linkwitz-Riley. Správnosť postupu návrhu si budú prakticky overovať v simulačnom programe a budú môcť sledovať simulované priebehy frekvenčnej modulovej charakteristiky, prípadne impedančné a prenosové charakteristiky. Zoznámia sa postupom importu zmeraných dát frekvenčných a impedančných charakteristík, ktoré sa naučia merať a vytvárať v iných laboratórnych úlohách. Výstupom laboratórnej práce bude návrh pasívnej frekvenčnej výhybky s minimálne zvlnenou frekvenčnou modulovou charakteristikou. Druhá laboratórna úloha je zameraná na zoznámenie sa s postupmi meraní potrebných pre návrh a optimalizáciu frekvenčných výhybiek pre reproduktorové sústavy. Následne sa zoznámia s postupmi meraní pre overenie vlastností vyrobených návrhov frekvenčných výhybiek. Postupne žiaci zmerajú frekvenčné modulové charakteristiky samostatných reproduktorov v reproduktorovej skrini, frekvenčné výhybky spoločne s reproduktorovou sústavou a každý reproduktor zvlášť s frekvenčnou výhybkou a reproduktorovou skriňou. Následne žiaci zmenia topológiu merania. Frekvenčné výhybky budú stále zaťažované reproduktormi v reproduktorovej skrini. Merať sa bude hodnota napätia na jednotlivých vetvách frekvenčných výhybiek. Týmto meraním sa získajú prenosové charakteristiky jednotlivých vetví frekvenčných výhybiek. Druhá časť laboratórnej úlohy je zameraná na spracovanie nameraných dát, žiaci pomocou predpripravených makier vytvoria dáta pre simulačný program a následné overenie vlastností návrhov frekvenčných výhybiek. Pripravené dáta importujú do simulačného programu a vyexportujú potrebné dáta pre overenie návrhov frekvenčných výhybiek. Výstupom je predpripravený protokol v programe Excel, ktorý za pomoci makier importuje namerané a exportované dáta a vytvorí grafy pre porovnanie a overenie simulovaných a meraných dát návrhov frekvenčných výhybiek.

Súbory a texty laboratórnych úloh sú priložené v elektronickej prílohe, ktorá je súčasťou tejto práce.

Záver

Cielom tejto práce bol návrh a realizácia pasívnych frekvenčných reproduktorových výhybiek, ktoré dosiahnu spoločne s reproduktormi umiestnenými v reproduktorovej skrini minimálneho zvlnenia výslednej frekvenčnej modulovej charakteristiky. Pre dosiahnutie tejto požiadavky, bolo v prvom rade potrebné zmerať impedančné a frekvenčné charakteristiky reproduktorov umiestnených v reproduktorovej skrini. Tieto údaje boli upravené do vhodného formátu a importované do simulačného programu. Na základe týchto dát boli vytvorené dva návrhy frekvenčných výhybiek. Jeden založený hlavne na výpočtoch, teda analytickým spôsobom a druhý empirickým spôsobom. Návrhy boli niekoľko krát upravované vzhľadom na požiadavku zmeny deliacej frekvencie a zistenie väčších rozdielov simulovaných a zmeraných dát. Výsledné vyrobené výhybky dosahujú požadované parametre výsledkov minimálneho zvlnenia výslednej frekvenčnej charakteristiky. Pre výsledný analytický návrh bola pripravená laboratórna úloha s postupom návrhu. Absolvovaním tejto úlohy sa žiaci naučia navrhnúť kompenzácie frekvenčnej charakteristiky a výhybky pre zadanú reproduktorovú sústavu s čo najmenším zvlnením. Pri návrhu si osvoja práce s importom dát do programu LspCAD. Druhá laboratórna úloha bola vytvorená pre osvojenie si meraní potrebných pre návrh frekvenčnej výhybky a overenia vlastností vyrobených výhybiek. Druhá časť úlohy je zameraná na spracovanie dát a porovnanie výsledkov simulácií s nameranými hodnotami vyrobených návrhov frekvenčných výhybiek. K výrobe tretej výhybky, s možnosťou menenia parametrov sa z časových dôvodov nepodarilo pristúpiť. Výsledné vyrobené frekvenčné výhybky, navrhnuté rôznymi spôsobmi, boli porovnané medzi sebou.

Literatúra

- [1] BORWICK, John. *Loud speaker and headphone handbook*. 3rd ed. Boston: Focal Press, 2001. ISBN 978-0240515786. [cit. 6. 12. 2019].
- [2] TOMAN, Kamil. *Reproduktory a reprosoustavy II*. [Česko: s.n.], c2010. ISBN 978-80-254-9510-0. [cit. 3. 12. 2019]
- [3] SCHIMMEL, J. *Elektroakustika – skripta*, první vydání. VUT v Brně FEKT UTKO, 2016. 200 stran. ISBN 978-80-214-4716-5. [cit. 1. 12. 2019].
- [4] VYDARENÝ, Ján. *Laboratorní úlohy pro návrh reproduktorové soustavy* [online]. Brno, 2018 [cit. 13. 12. 2019]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/110136>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Jiří Schimmel.

Zoznam symbolov, veličín a skratiek

| | |
|--------------|--|
| C_{dplw2} | Kondenzátor dolnej priepuste druhého rádu aproximácie Linkwitz-Riley |
| C_{hplw2} | Kondenzátor hornej priepuste druhého rádu aproximácie Linkwitz-Riley |
| l_{dplw2} | Indukčnosť dolnej priepuste druhého rádu aproximácie Linkwitz-Riley |
| L_{hplw2} | Indukčnosť hornej priepuste druhého rádu aproximácie Linkwitz-Riley |
| C_{dpbw3} | Kondenzátor dolnej priepuste tretieho rádu aproximácie Butterwot |
| C_{2hpbw3} | Kondenzátor hornej priepuste tretieho rádu aproximácie Butterwot |
| C_{dpbw3} | Kondenzátor dolnej priepuste tretieho rádu aproximácie Butterwot |
| L_{dpbw3} | Indukčnosť dolnej priepuste tretieho rádu aproximácie Butterwot |
| L_{hbw3} | Indukčnosť hornej priepuste tretieho rádu aproximácie Butterwot |
| L_{2dpbw2} | Indukčnosť dolnej priepuste tretieho rádu aproximácie Butterwot |
| C_{1hprl4} | Kondenzátor hornej štvrtéh rádu aproximácie Linkwitz-Riley |
| C_{2hprl4} | Kondenzátor hornej priepuste štvrtéh rádu aproximácie Linkwitz-Riley |
| C_{1dprl4} | Kondenzátor dolnej priepuste štvrtéh rádu aproximácie Linkwitz-Riley |
| C_{2dprl4} | Kondenzátor dolnej priepuste štvrtéh rádu aproximácie Linkwitz-Riley |
| L_{1hprl4} | Indukčnosť hornej priepuste štvrtéh rádu aproximácie Linkwitz-Riley |
| L_{2hprl4} | Indukčnosť hornej priepuste štvrtéh rádu aproximácie Linkwitz-Riley |
| L_{1dprl4} | Indukčnosť dolnej priepuste štvrtéh rádu aproximácie Linkwitz-Riley |
| L_{2dprl4} | Indukčnosť dolnej priepuste štvrtéh rádu aproximácie Linkwitz-Riley |
| R_e | jednosmerný odpor cievky |
| f_s | rezonančná frekvencia |
| L_e | indukčnosť cievky |
| Q_{es} | elektrický činiteľ akosti |
| Q_{ts} | celkový činiteľ akosti |
| Q_{ms} | mechanický činiteľ akosti |
| S_d | plocha membrány |
| m_{md} | hmotnosť kmitavého systému vrátane stĺpca vzdzchu |
| V_{as} | ekvivalentný objem |
| c_{ms} | mechanická poddajnosť |
| Bl | gyračná konštanta |
| R_{ms} | mechanický odpor kmitavého systému |

| | |
|------------|--|
| X_{\max} | maximálna lineárna výchylka |
| η_0 | účinnosť reproduktoru |
| c_a | akustická poddajnosť systému |
| R_{kb} | rezistor kompenzácie impedancie hlbokotónového reproduktoru |
| C_{kb} | kondenzátor kompenzácie impedancie hlbokotónového reproduktoru |
| R_{kv} | rezistor kompenzácie impedancie vysokotónového reproduktoru |
| C_{kv} | kondenzátor kompenzácie impedancie vysokotónového reproduktoru |
| L_{kv} | kondenzátor kompenzácie impedancie vysokotónového reproduktoru |
| f_{bs} | frekvencia kompenzácie akustického skratu na polovici zadaného útlmu |
| R_{bs} | rezistor kompenzácie akustického skratu na nízkych frekvenciách |
| l_{bs} | indučnosť kompenzácie akustického skratu na nízkych frekvenciách |
| C_{of} | kondenzátor kompenzácie priepustí na ojedinelých frekvenciách |
| L_{of} | indučnosť kompenzácie priepustí na ojedinelých frekvenciách |
| R_{of} | rezistor kompenzácie priepustí na ojedinelých frekvenciách |
| VT | vysokotónový reproduktor |
| HT | hlbokotónový reproduktor |

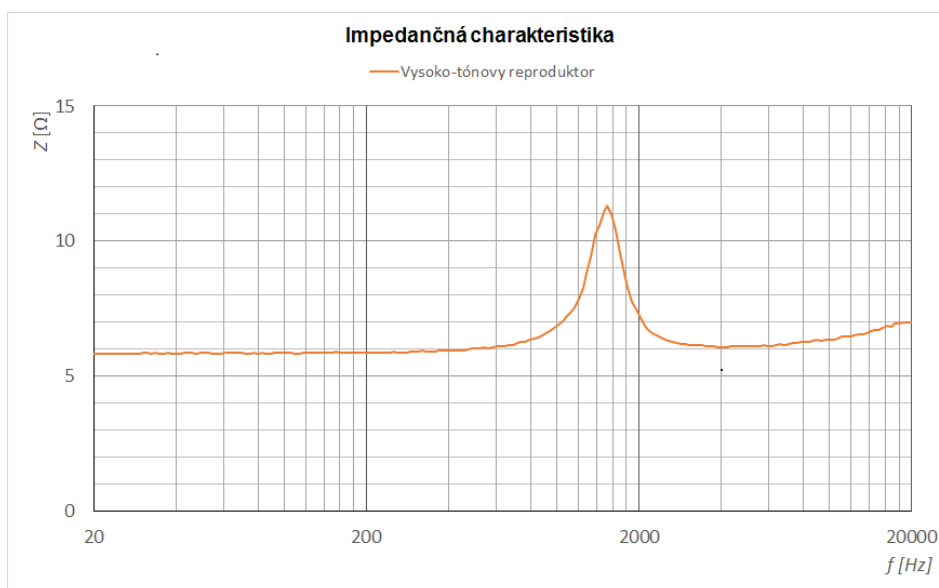
Zoznam príloh

| | | |
|---|-------------------------|----|
| A | Namerané údaje | 62 |
| B | Univerzálny plošný spoj | 65 |
| C | Dosky plošných spojov | 66 |
| D | Výsedky simulácií | 68 |
| E | Výrobky | 71 |

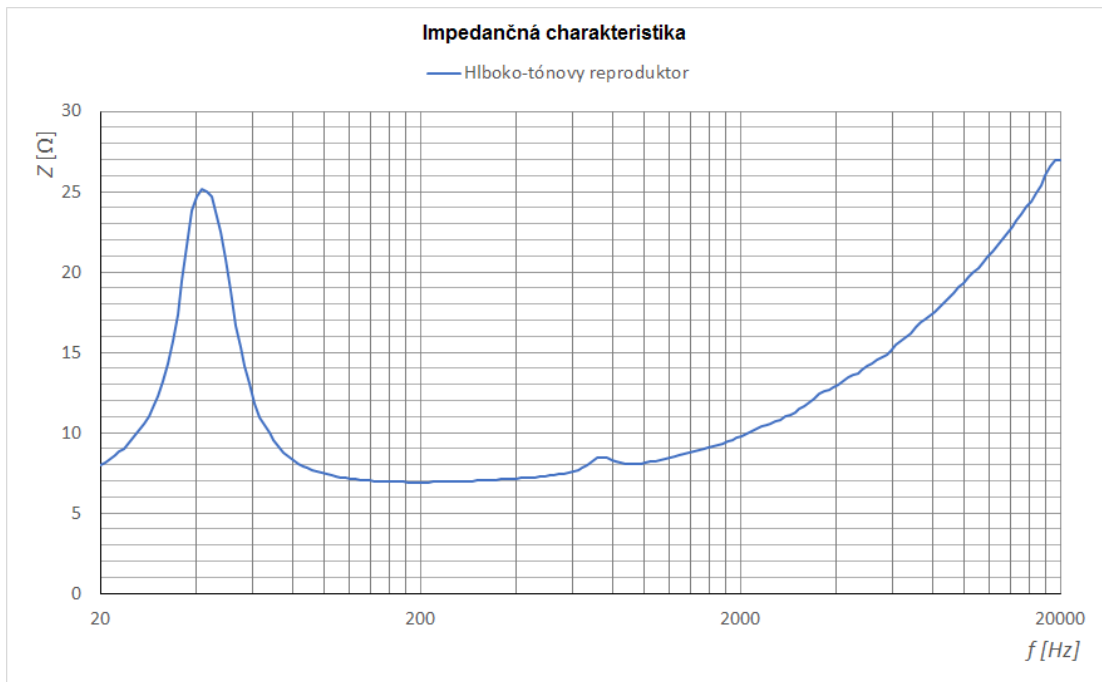
A Namerané údaje



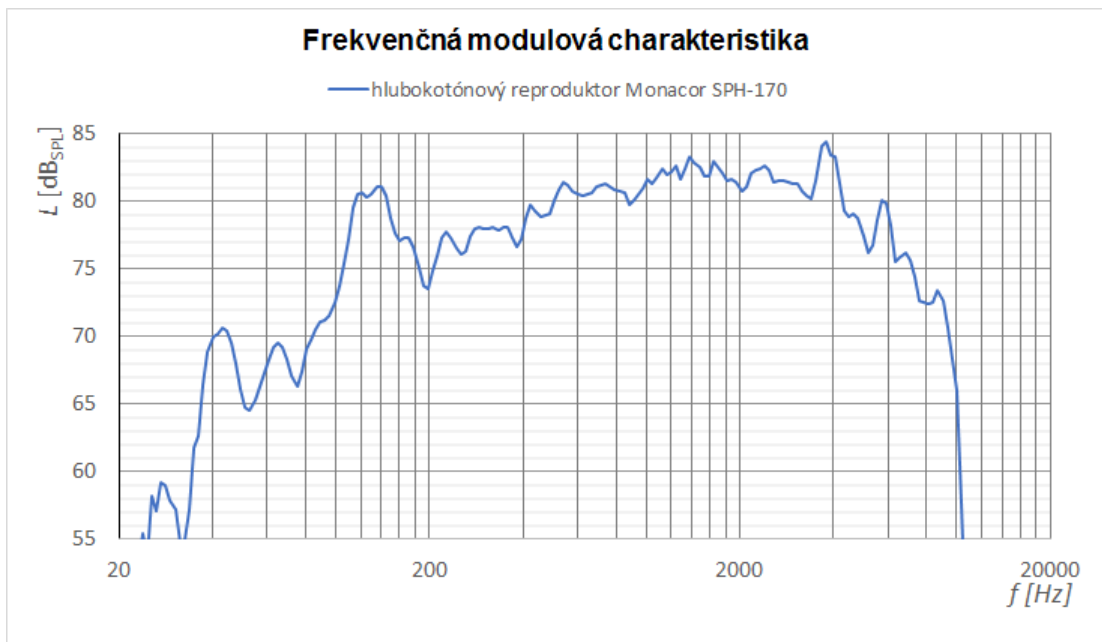
Obr. A.1: Frekvenčná charakteristika vysokotónového reproduktora



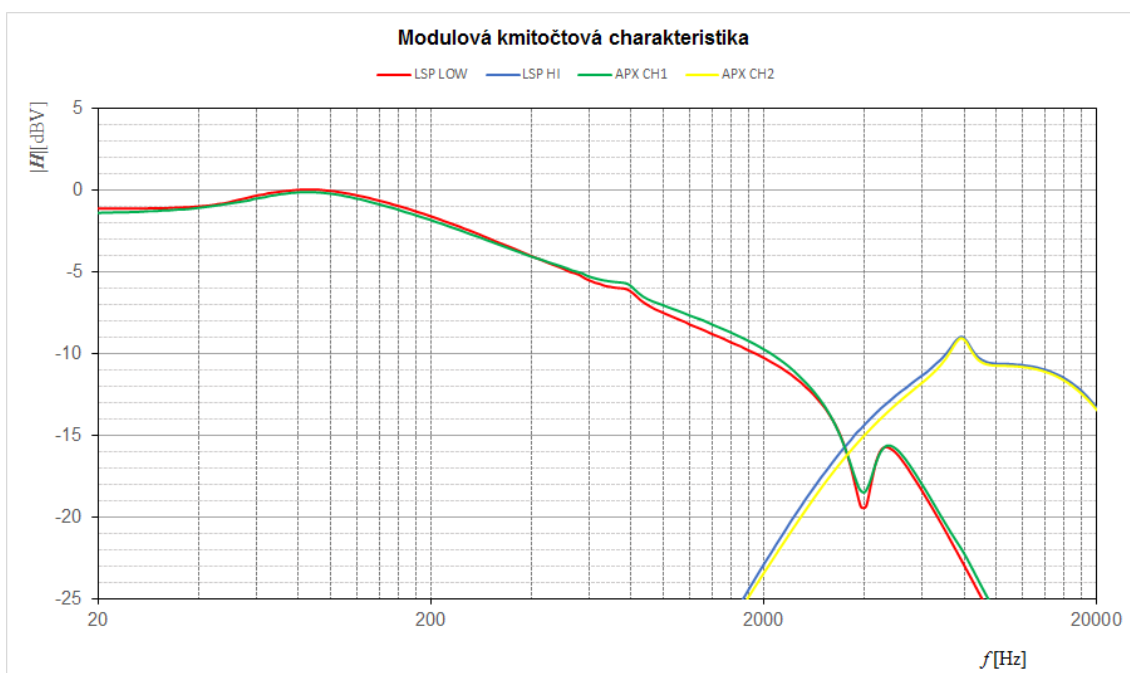
Obr. A.2: Impedančná charakteristika vysokotónového reproduktora



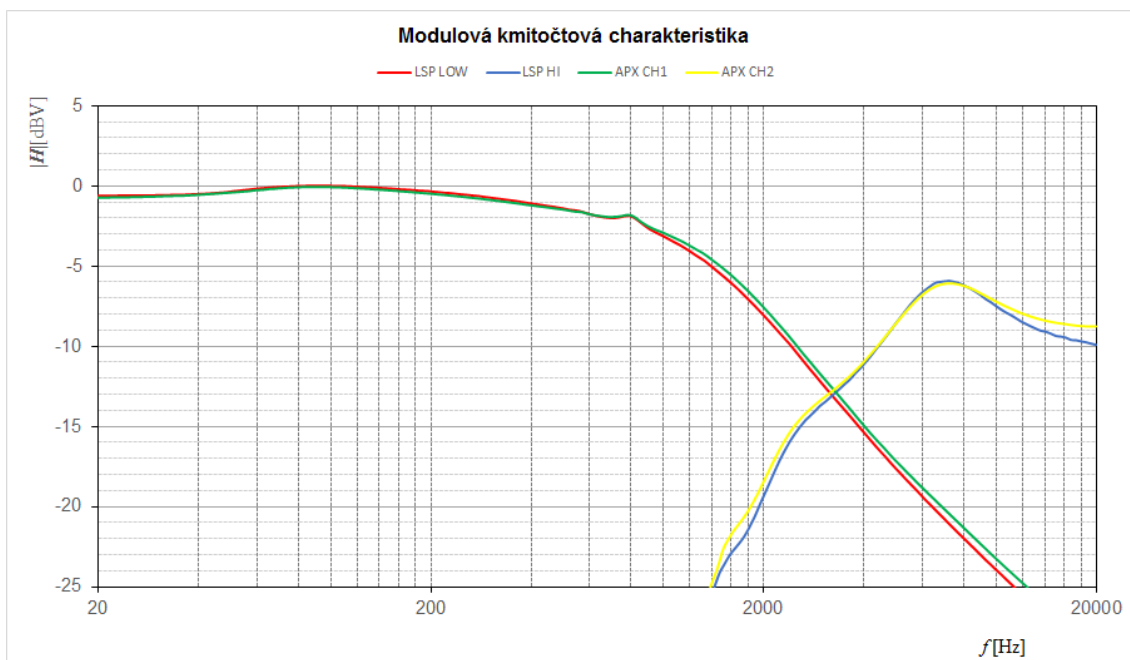
Obr. A.3: Impedanční charakteristika hlubokotónového reproduktoru



Obr. A.4: Frekvenčná charakteristika hlubokotónového reproduktoru

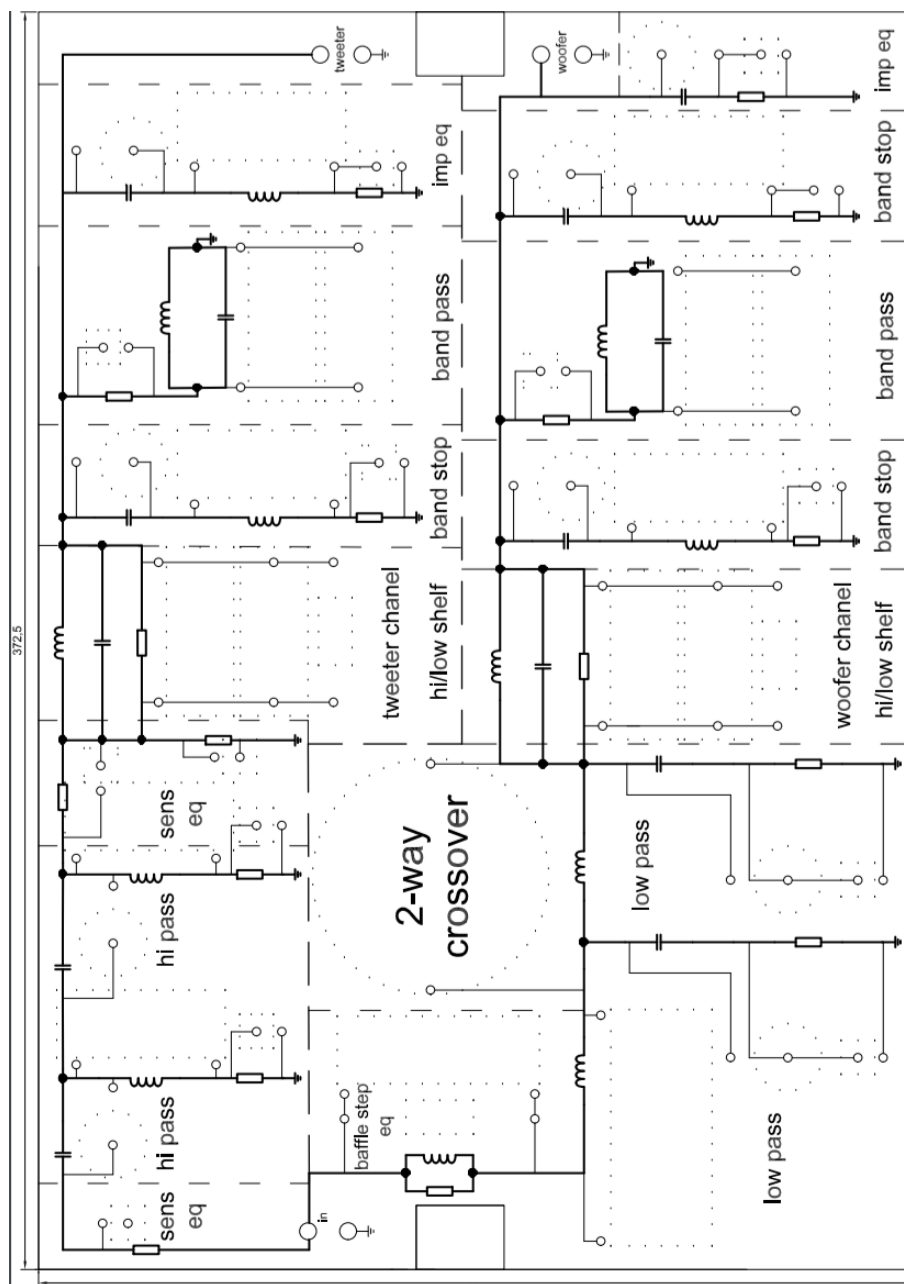


Obr. A.5: Porovnanie simulácie a zmeraných hodnôt prenosov analytickej výhybky



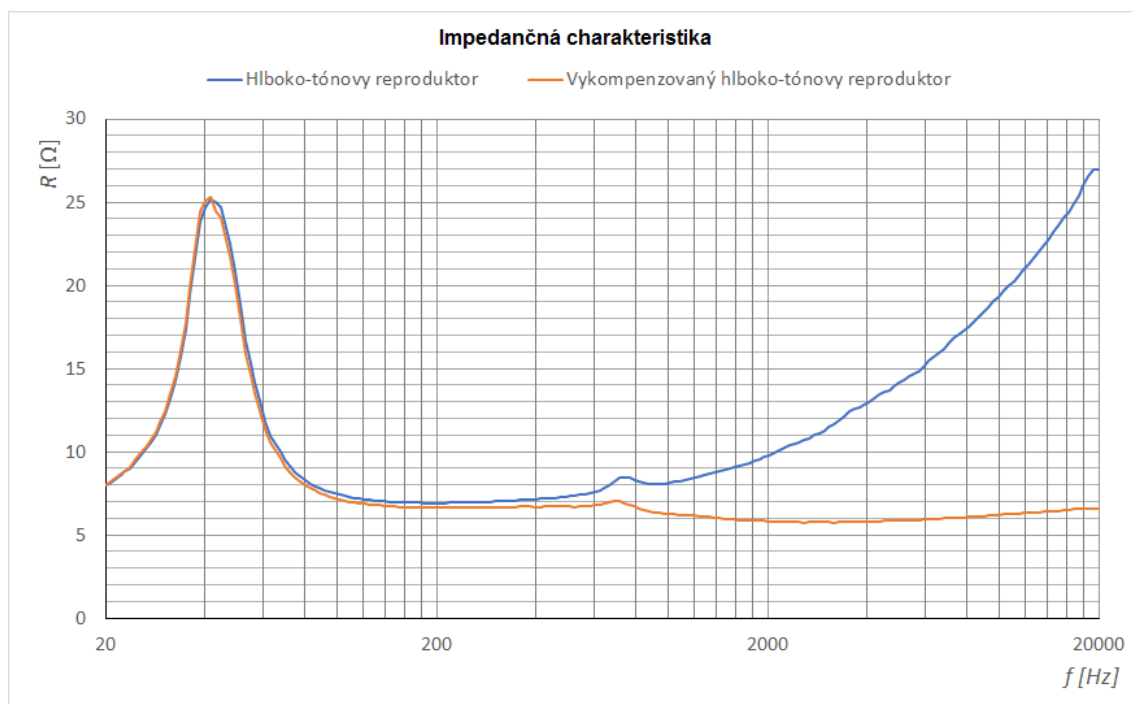
Obr. A.6: Porovnanie simulácie a zmeraných hodnôt prenosov empirickej výhybky

B Univerzálny plošný spoj

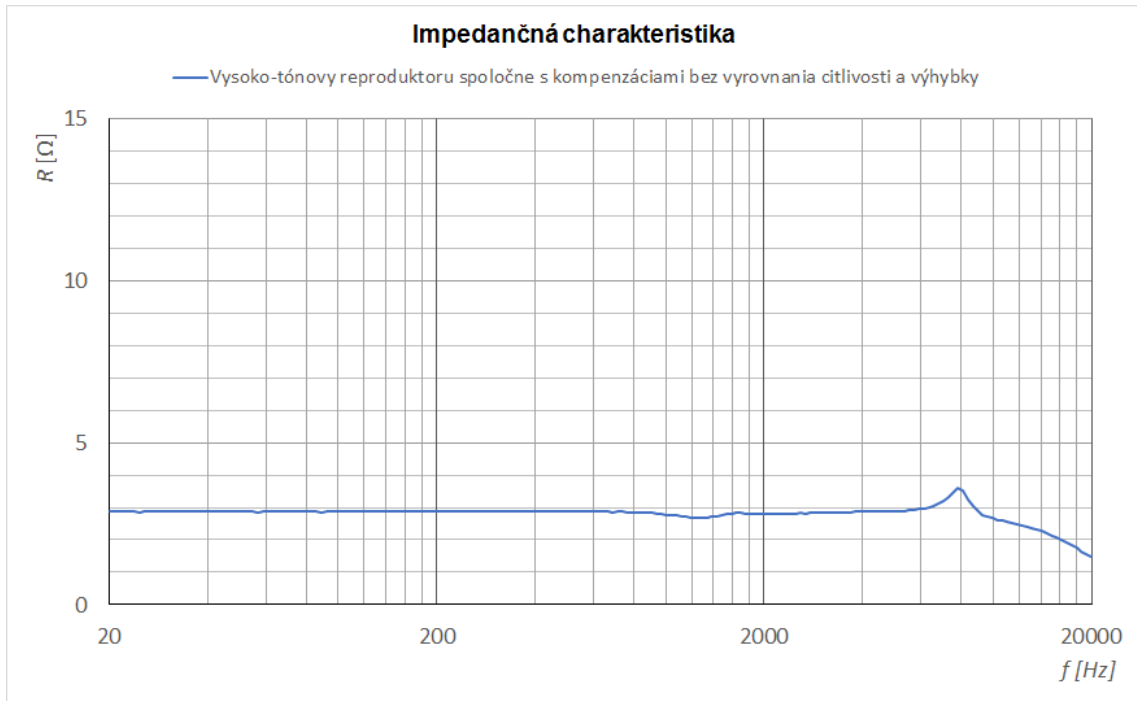


Obr. B.1: Návrh vrchnej dosky univerzálneho plošného spoja

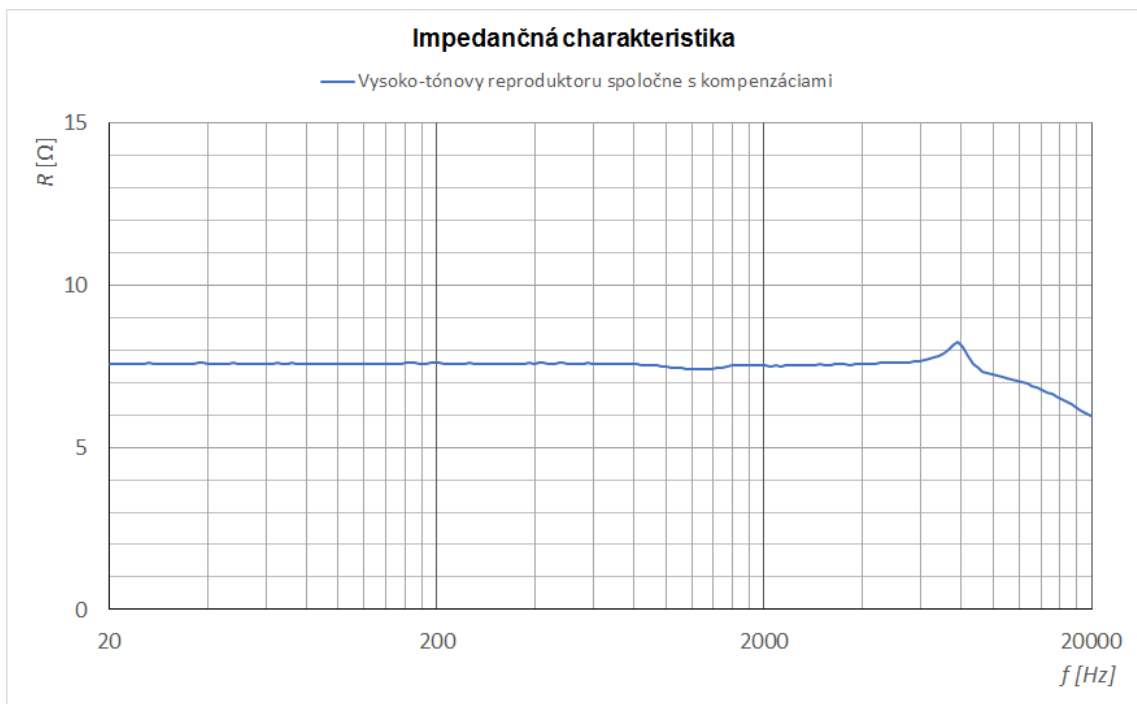
D Výsledky simulácií



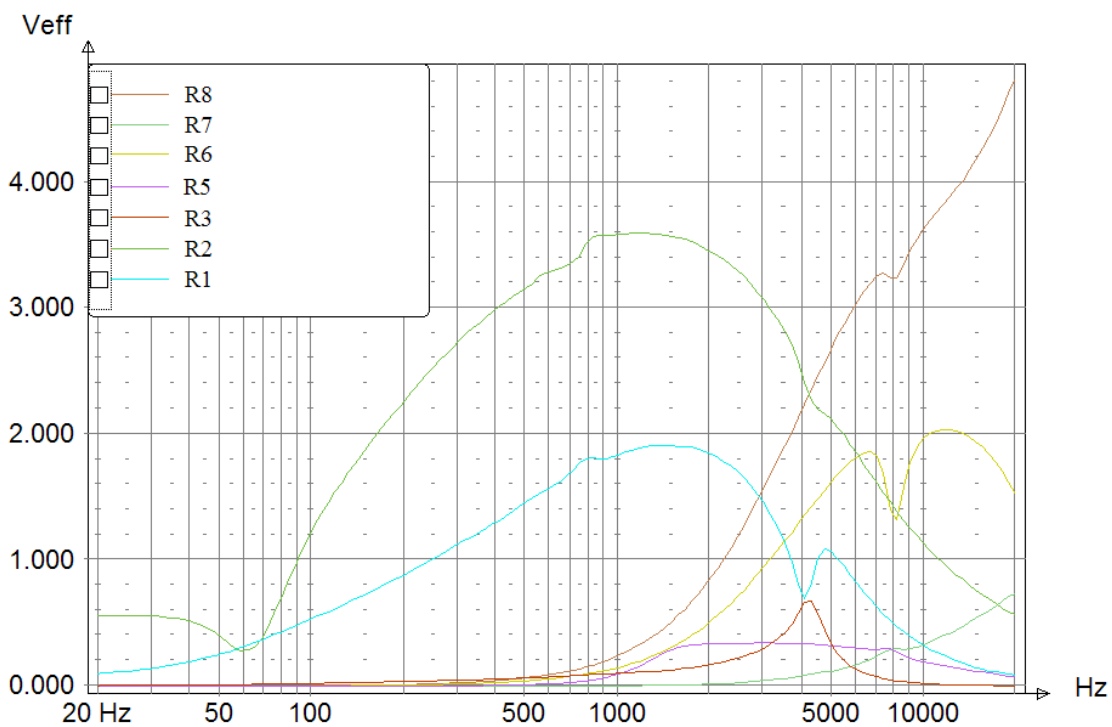
Obr. D.1: Porovnanie vykompenzovanej impedančnej charakteristiky hlbokotónového reproduktora



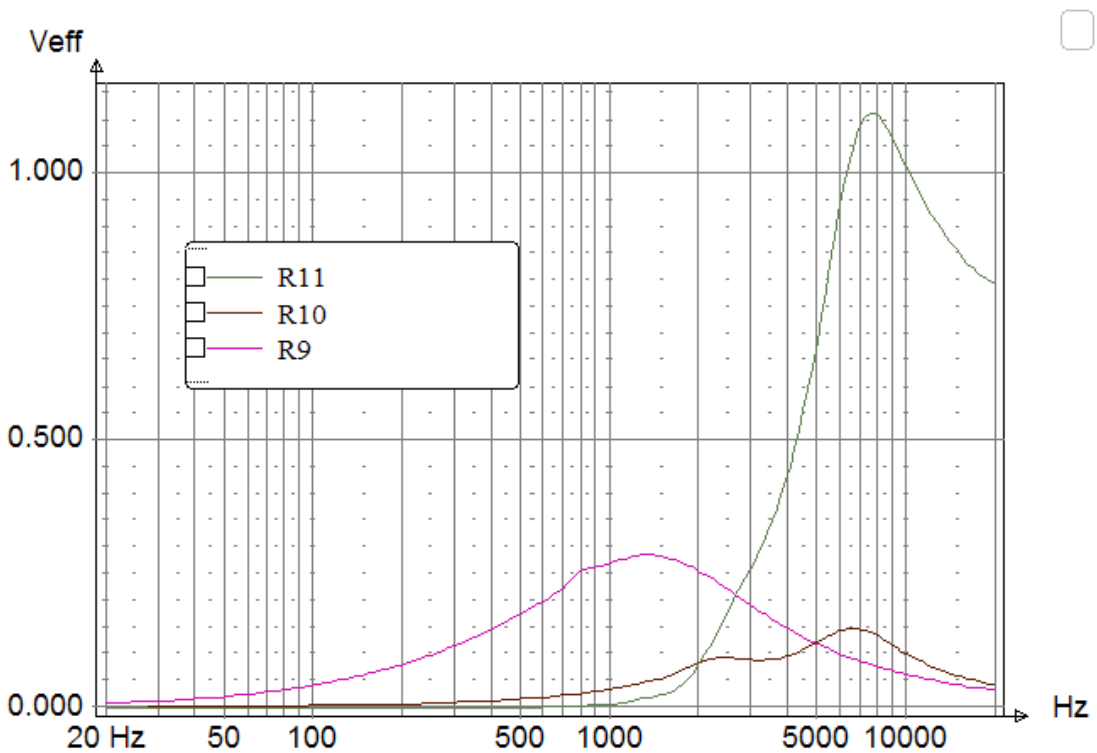
Obr. D.2: Simulácia priebehu impeančnej charakteristiky vysokotónového reproduktora bez vyrovnania citlivosti a výhybky



Obr. D.3: Simulácia priebehu impeančnej charakteristiky vysokotónového reproduktora s kompenzáciami



Obr. D.4: Simulácia priebehu napätí na jednotlivých rezistoroch analytickej výhybky



Obr. D.5: Simulácia priebehu napätí na jednotlivých rezistoroch empirickej výhybky

E Výrobky



Obr. E.1: Osadená DPS Empirického návrhu

