

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY A TELEKOMUNIKACÍ**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Návrh a konstrukce analogového ekvalizéru**

**ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Pavel SMETANA**  
Osobní číslo: **E13N0159P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Telekomunikační a multimediální systémy**  
Název tématu: **Návrh a konstrukce analogového ekvalizéru**  
Zadávající katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

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

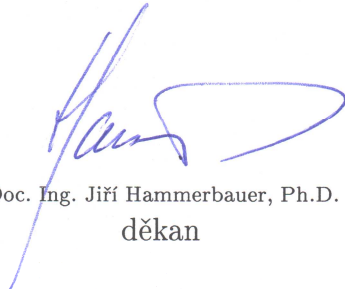
1. Prostudujte možnosti řešení ekvalizérů.
2. Navrhněte a realizujte analogový ekvalizér.
3. Ekvalizér realizujte a změřte jeho parametry.

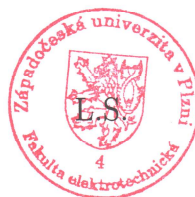
Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího  
Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran  
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická  
Seznam odborné literatury:


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

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Oldřich Tureček, Ph.D.**  
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2014**  
Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2015**

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



  
Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

## **Abstrakt**

Tato práce je zaměřena na popis problematiky týkající se analogových ekvalizérů. Dále se práce zabývá návrhem možného zapojení. Tento návrh je ověřen v simulačním programu PSpice a poté následuje jeho konstrukce. Parametry hotového ekvalizéru jsou změřeny a porovnány se simulačním programem.

## **Klíčová slova**

ekvalizér, korektor, pásmová propust, filtr, oktáva, zkreslení, Audio precision 2700



## **Abstrakt**

This thesis is focused on a description of issues in analog equalizers. The first part of the thesis offers overview of the analog equalizers theory. The second part of the thesis deals with a circuit design. The circuit design is verified by PSpice simulator and then a construction of the outlined circuit follows. The parameters of the created equalizer are measured and compared with the simulation.

## **Key words**

equalizer, corrector, bandpass, filter, octave, distortion, Audio precision 2700

## Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 6.5.2015

Jméno příjmení

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>VII</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>VIII</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>1 EKVALIZÉR</b> .....	<b>2</b>
<b>2 DRUHY FILTRŮ:</b> .....	<b>3</b>
<b>3 ROZDĚLENÍ EKVELIZÉRŮ</b> .....	<b>4</b>
<b>4 POPIS OKTÁVOVÝCH PÁSEM:</b> .....	<b>6</b>
<b>5 TYP REGULACE A JEJÍ VLV NA TVAR MODULOVÝCH CHARAKTERISTIK</b> .....	<b>9</b>
5.1 VLV REGULAČNÍHO ČLENU: .....	9
5.2 VOLBA ŠÍŘKY KORIGOVANÉHO PÁSMÁ .....	10
5.3 VOLBA HODNOTY Q .....	10
5.4 ZAPOJENÍ PÁSMOVÝCH KOREKTORŮ: .....	11
5.5 KONSTANTNÍ A NEKONSTANTNÍ Q .....	14
<b>6 NÁVRH EKVALIZÉRU:</b> .....	<b>15</b>
6.1 PÁSMOVÁ PROPUST: .....	17
6.2 SIMULACE OBVODU S KONSTANTNÍM A NEKONSTANTNÍM Q .....	20
6.3 OŽIVENÍ ZAPOJENÍ: .....	23
6.4 VÝBĚR SOUČÁSTEK PÁSMOVÝCH PROPUSTÍ .....	26
<b>7 POPIS MĚŘENÍ A VÝSLEDKŮ</b> .....	<b>30</b>
<b>8 ZÁVĚR:</b> .....	<b>34</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>35</b>
<b>PŘÍLOHY:</b> .....	<b>1</b>

## Seznam symbolů a zkratek

A.....	Přenos
dB.....	Decibel
B3.....	Pásmo s poklesem o 3 dB
DPS .....	Deska plošného spoje
DP .....	Dolní propust
f .....	Frekvence
nf .....	Nízkofrekvenční
vf .....	Vysokofrekvenční
G.....	Zisk
HP .....	Horní propust
Hz.....	Jednotka frekvence
IO .....	Integrovaný obvod
OZ.....	Operační zesilovač
PP.....	Pásmová propust
PZ.....	Pásmová zádrž
Q.....	Činitel jakosti
R.....	Značka rezistoru
L.....	Značka cívky
C.....	Značka kondenzátoru
V.....	Volt – jednotka elektrického napětí
W.....	Watt – jednotka výkonu
$\varphi$ .....	Fázový posun
$\Omega$ .....	Ohm – jednotka elektrického odporu

## Úvod

Tato práce je zaměřena na popis problematiky týkající se ekvalizérů. Toto téma jsem si zvolil, abych rozšířil reprodukční řetěz o další článek – ekvalizér. Navazuji tak na mou předchozí práci, ve které jsem konstruoval výkonový zesilovač.

Cílem této práce je prostudovat možnosti řešení analogových ekvalizérů, z této teorie vybrat možné řešení, provést jeho návrh, simulaci a nakonec zkonstruovat zařízení s vhodnými parametry pro použití v domácích podmínkách.

Požadavky na zařízení stanovují určité limity na počet pásem, rozsah korekcí a způsob ovládání. Ekvalizér by měl být analogový a sestaven z kvalitních a dostupných součástek. Výběr součástek byl realizován s maximální snahou přiblížit se nasimulovaným předpokladům. Výsledkem bude zařízení, které bude mít ověřené parametry.

# 1 EKVALIZÉR

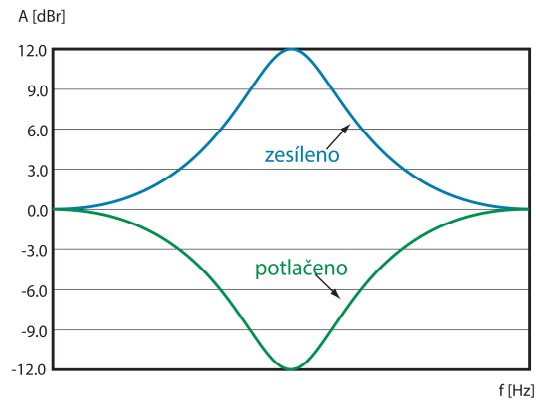
Ekvalizér (z anglického equalization) je elektronické zařízení, sloužící k úpravě (korekci) frekvenční charakteristiky ve slyšitelném pásmu 20 Hz až 20 kHz. Korekce se provádí pomocí nastavitelných prvků, které zvyšují nebo snižují (potlačení) amplitudu určité frekvenční šířky pásma přenosové charakteristiky. Tyto korekce jsou vhodné pro subjektivní zlepšení podmínek při poslechu hudby. Lze s ním měnit barvu zvuku nebo odstranit nežádoucí zabarvení, rezonanci, zpětnou vazbu nebo rušení [10].

Maximální míry korekcí se pohybují v rozsahu  $\pm 12$  dB nebo  $\pm 15$  dB. V ideálním případě by byl tento prvek v přenosovém řetězci úplně zbytečný. Nic nenahradí kvalitní záznamové/reprodukční prostředí a kvalitní zvukovou techniku. Ve skutečnosti se mohou objevit nedostatky které je potřeba kompenzovat.

Problémy vzniklé s neideálním poslechovým prostorem a nevhodným rozložením reproduktorů se ekvalizerem kompenzují obtížně. Sice by bylo možné s pomocí měření provést korekce zvukových prostor pomocí ekvalizéru, avšak tyto korekce by platily pouze pro dané místo a se vzdálením posluchače mimo tuto oblast by docházelo ke ztrátě účinnosti těchto korekcí. Jediný případ, kdy by teoreticky mohl ekvalizér kompenzovat parametry zvukových prostor je tehdy, když by místnost ve všech bodech vykazovala stejnou chybu.

Proto je stále nejvýraznějším prvkem, který může zhoršit přehrávaný zvuk, je místnost, ve které je hudba přehrávána. Tato místnost často neslouží pouze pro poslech hudby. Nebývá většinou nijak akusticky upravována a proto může některé kmitočty tlumit, jiné zase zdůrazňovat více než ostatní. Reproduktoři nemusí být vždy ideálně symetricky umístěny (často jsou umístěny tak, aby nepřekážely) a okolní předměty ne vždy vykazují z hlediska akustiky symetricky shodné parametry.

Pro tyto nedokonalosti poslechové místnosti je ekvalizér pouze nouzové řešení, frekvenční charakteristika místnosti by se měla upravovat především stavebními pracemi a v dnešní době jsou poměrně dostupné akustické prvky, s kterými lze snadno mnoho problémů elegantně bez velkých stavebních úprav odstranit. Nevzhlednost lze řešit tím, že jsou k dostání s nejrůznějším designem.



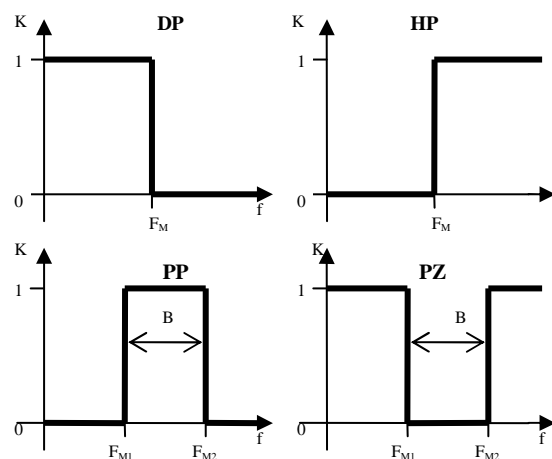
Obr. 1 – znázornění funkce ekvalizéru [1]

## 2 Druhy filtrů:

Pro úpravu amplitudy přenášeného pásma se upravuje pomocí filtrů. Mezi selektivní filtry patří:

- **Dolní propust (DP)**, propouští složky signálu s frekvencí nižší než je mezní kmitočet  $F_M$  a tlumí kmitočty vyšší než  $F_M$
- **Horní propust (HP)**, propouští složky signálu s frekvencí vyšší než je mezní kmitočet  $F_M$  a tlumí kmitočty nižší než  $F_M$
- **Pásmová propust (PP)**, propouští složky signálu mezi mezním dolním kmitočtem  $F_{M1}$  a horním kmitočtem  $F_{M2}$ .
- **Pásmová zádrž (PZ)**, nepropouští složky signálu mezi mezním dolním kmitočtem  $F_{M1}$  a horním kmitočtem  $F_{M2}$ .

Na obrázku č. 2 jsou vyobrazeny ideální charakteristiky jednotlivých filtrů. Přenos v propustném pásmu je konstantní (např.  $K_U=1$ ) a v nepropustném pásmu je roven nule. Přechod mezi propustnou a nepropustnou částí je dokonale strmý.



Obr. 2 – ideální modulové charakteristiky základních filtrů [2]

Pro jednoduché korekce stačí pasivní zapojení RC členů. Toto zapojení se označuje jako korektor 1. řádu a lze s ním měnit „hloubky a výšky“. Tyto RC členy také slouží k vymezení pracovní oblasti, aby ekvalizér nezpracovával složky pod a nad akustickým pásmem – tj. složky pod 20 Hz a nad 20 kHz. Pro složitější korekce přenosové charakteristiky je nutné použít obvod RLC a jeho obdoby označovány jako obvody 2. řádu nebo pásmové korektory [2]. Ty dokážou určité frekvenční pásmo zesílit nebo potlačit.

### 3 Rozdělení ekvalizérů

#### Analogové / digitální

Nejzákladnější rozdělení ekvalizérů je na analogové a digitální. V ideálním případě mají shodnou funkci. Rozdíl by měl být pouze ve způsobu zpracování signálu uvnitř ekvalizéru. V dnešní době převažují digitální ekvalizéry nad analogovými kvůli zdokonalujícímu se digitálnímu zpracování, lepším parametrům i ceně. I přesto je zde určitá poptávka po zařízení postavená čistě analogově. To je částečně způsobeno znovuzrozením gramofonových desek a snaha udržet celý poslechový řetězec v analogové formě.

#### Aktivní / pasivní

**Tónová clona** není plnohodnotný ekvalizér, protože neumožňuje signál zesílit. Skládá se z pasivních obvodů a korekce se provádí pouze zeslabením. Využívá se především tam, kde není možné použít napájecí napětí a tam, kde nejsou kladeny vysoké nároky na kvalitu korekcí. Nejčastěji se vyskytuje v monofonním provedení a bývá například zabudován jako součást hudebních nástrojů.

**Tónové korekce** obsahují aktivní obvody a lze s nimi zesilovat. Mohou se podle potřeby vyskytovat jako monofonní nebo stereofonní. Tento druh nabízí mnoho obvodových zapojení, které se liší podle konkrétních potřeb.



## Grafický / parametrický

**Parametrický** ekvalizér umožňuje libovolně nastavit centrální kmitočet, šířku korigovaného frekvenčního pásma a zeslabení či zesílení. Tímto typem lze odstranit rezonanci mezi reproduktorem a mikrofonem („vazbení“) nebo brum, protože je možné přesně nastavit problematický kmitočet a zvolit potřebnou šířku pásma pro odstranění problému.

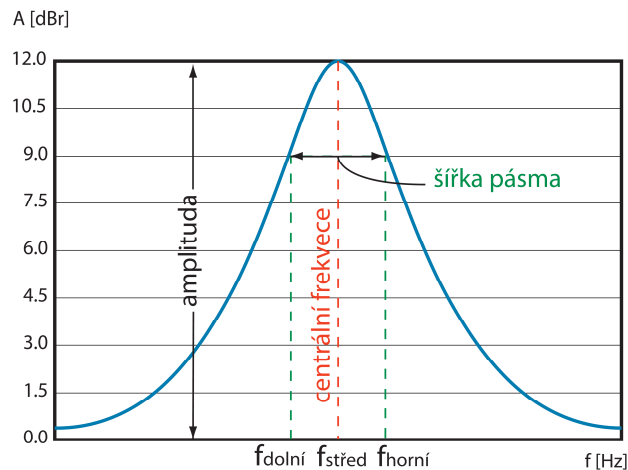
Nevýhodou bývá nízký počet pásem a nižší přehlednost aktuálního nastavení. Lze se také setkat s pseudoparametrickým ekvalizérem, kde je na pevně nastaven činitel jakosti a tak je i konstantní šířka pásma.

**Grafický** ekvalizér má název odvozen z přibližné podoby amplitudové frekvenční charakteristiky a nastavení jezdců tahových potenciometrů na předním panelu. Konstrukce grafického ekvalizéru vychází principiálně z parametrického, pouze se v návrhu zvolí daný počet pásem, pevně nastaví jejich centrální kmitočty, šířky pásem a uživatel je nemůže měnit. Upravovat lze pouze zesílení či zeslabení jednotlivých pásem. Jeho hlavní výhodou je okamžitý přehled nad aktuálním nastavením.

### Počet pásem ekvalizéru:

Volba počtu pásem vychází z reálných potřeb na vlastnosti přenosu celého elektroakustického řetězce. Tento počet udává na kolik korigovatelných pásem bude rozdělena slyšitelná oblast. Z toho vychází, jak jemně bude možné doladit frekvenční amplitudovou charakteristiku. Bývá pravidlem, že jednotlivá pásma jsou rovnoměrně rozložena přes celou slyšitelnou oblast. Nejjednodušší způsob, se kterým se lze setkat, jsou dvoupásmové a třípásmové korekce. Ty se nejčastěji označují jako hloubky (basy) a výšky, v případě tří pásmových korekcí jsou doplněny o středy. Pracovní oblast se pro zvukovou techniku dělí na oktávy a oktávová pásma. Poté lze ekvalizéry označit jako 1-oktávový, 2/3-oktávový a 1/3-oktávový. Oktáva znamená, že další vyšší frekvence je vzdálena o dvojnásobek a nižší o polovinu. Jako referenční frekvence se uvažuje 1 kHz. U ekvalizérů rozdělených podle oktáv je přesně definována šířka pásma.

Často se také přímo uvádí počet pásem, na kterých lze provádět korekce. Poté se označují jako tří, pěti, deseti, patnácti nebo třiceti pásmový ekvalizér. Zde už nemusí být šířka jednotlivých pásem přesně definována.



Obr. 3 – popis jednoho přenášeného pásma [1]

## 4 Popis oktávových pásem:

### Oktávové pásmo (1-okt)

Oblast 20 Hz až 20 kHz lze rozdělit na 10 oktávových pásem. Oktáva znamená vzdálenost dvou sousedních centrálních kmitočtů o dvojnásobek. Jako referenční frekvence se uvažuje 1 kHz.

$$f_{n+1}^{ctr} = f_n^{ctr} \cdot 2 = 1000 \cdot 2 = 2000 \text{ Hz} \quad (4.1)$$

$$f_{n-1}^{ctr} = f_n^{ctr} / 2 = 1000 / 2 = 500 \text{ Hz} \quad (4.2)$$

Ze vztahů 4.1 a 4.2 vyplývá, že v oktávovém pásmu je každý další vyšší centrální kmitočet vzdálen od předešlého o dvojnásobek a každý další nižší centrální kmitočet je vzdálen o polovinu.

$$f_n^{horní} = f_n^{ctr} \cdot 2^{1/2} = 1000 \cdot 2^{1/2} = 1414 \text{ Hz} \quad (4.3)$$

$$f_n^{dolní} = f_n^{ctr} / 2^{1/2} = 1000 / 2^{1/2} = 707 \text{ Hz} \quad (4.4)$$

Vztahy 4.3 a 4.4 uvádí výpočet pro horní a dolní kmitočet oktávového pásma pro 1 KHz

### Půl oktávové pásmo (1/2-okt)

Oblast 20 Hz až 20 kHz lze rozdělit na 20 půl-oktávových pásem. Oktáva je rozdělena na 2 půl-oktávy. To znamená, že máme dvakrát jemnější možnost nastavení frekvenční amp. charakteristiky oproti oktávovému pásmu.

$$f_{n+1}^{ctr} = f_n^{ctr} \cdot 2^{1/2} = 1000 \cdot 2^{1/2} = 1414 \text{ Hz} \quad (4.5)$$

$$f_{n-1}^{ctr} = f_n^{ctr} / 2^{1/2} = 1000 / 2^{1/2} = 707 \text{ Hz} \quad (4.6)$$

Ze vztahů 4.5 a 4.6 vyplývá, že v půloktávovém pásmu je každý další vyšší centrální kmitočet vzdálen od předešlého vynásobením koeficientem  $2^{1/2}$  a každý další nižší centrální kmitočet je vzdálen vydělením koeficientem  $2^{1/2}$ .

$$f_n^{\text{horní}} = f_n^{\text{horní}} \cdot 2^{1/4} = 1000 \cdot 2^{1/4} = 1189 \text{ Hz} \quad (4.7)$$

$$f_n^{\text{dolní}} = f_n^{\text{dolní}} / 2^{1/4} = 1000 / 2^{1/4} = 840 \text{ Hz} \quad (4.8)$$

Vztahy 4.7 a 4.8 uvádí výpočet pro horní a dolní kmitočet půl oktávového pásma pásma pro 1 Khz.

### Jedno-třetinové oktávové pásmo (1/3-okt)

Oblast 20 Hz až 20 kHz lze rozdělit na 30 jedno-třetino-oktávových pásem. Každá oktáva je tak rozdělena na třetiny. To nabízí ze všech tří variant nejjemnější možnost nastavení frekvenční amp. charakteristiky. Další dělení by nebylo přínosem, pouze by navyšovalo konstrukční náročnost.

$$f_{n+1}^{\text{ctr}} = f_n^{\text{ctr}} \cdot 2^{1/3} = 1000 \cdot 2^{1/3} = 1259 \text{ Hz} \quad (4.9)$$

$$f_{n-1}^{\text{ctr}} = f_n^{\text{ctr}} / 2^{1/3} = 1000 / 2^{1/3} = 793 \text{ Hz} \quad (4.10)$$

Ze vztahů 4.9 a 4.10 vyplývá, že v půl oktávovém pásmu je každý další vyšší centrální kmitočet vzdálen od předešlého vynásobením koeficientem  $2^{1/3}$  a každý další nižší centrální kmitočet je vzdálen vydělením koeficientem  $2^{1/3}$ .

$$f_n^{\text{horní}} = f_n^{\text{horní}} \cdot 2^{1/6} = 1000 \cdot 2^{1/6} = 1122 \text{ Hz} \quad (4.11)$$

$$f_n^{\text{dolní}} = f_n^{\text{dolní}} / 2^{1/6} = 1000 / 2^{1/6} = 890 \text{ Hz} \quad (4.12)$$

Vztahy 4.11 a 4.12 uvádí výpočet pro horní a dolní kmitočet jedno-třetino-oktávového pásma pro 1 khz.

oktávové pásmo			
pásmo	f dolní	f střed	f horní
3	88,388	125	176,777
4	176,777	250	353,553
5	353,553	500	707,107
6	707,107	<b>1000</b>	1414,214
7	1414,214	2000	2828,427
8	2828,427	4000	5656,854
9	5656,854	8000	11313,708
10	11313,708	16000	22627,417

jedno-třetinové-oktávové pásmo			
pásmo	f dolní	f střed	f horní
15	445,449	500,000	561,231
16	561,231	629,961	707,107
17	707,107	793,701	890,899
18	890,899	<b>1000,000</b>	1122,462
19	1122,462	1259,921	1414,214
20	1414,214	1587,401	1781,797
21	1781,797	2000,000	2244,924
22	2244,924	2519,842	2828,427

Tabulka 1 – část výpočtů dolních, středových a horních kmitočtů pro 1-okt a 1/3-okt pásmo. Celá tabulka je obsažena v příloze.

Z dělení pracovní oblasti na oktávy, popřípadě část oktáv, dostáváme 10 pásem pro dělení na celé oktávy, 20 při dělení na půl-oktávy a 30 při dělení na třetiny-oktávy. Často se lze setkat s 11, 21 a 31 pásmovými ekvalizéry. Toto navýšení o jedno pásmo zahrnuje všechny teoreticky slyšitelné krajní frekvence a jedná se o konkrétní konstrukční provedení.

Opakem je snižování počtu pásem, která jsou pro praxi důležitá a proto se často objevuje „pouze“ 28 pásmový jedno-třetino oktávový ekvalizér.

Vypočítané hodnoty centrálních kmitočtů se normalizují. Výsledkem je řada kmitočtů:

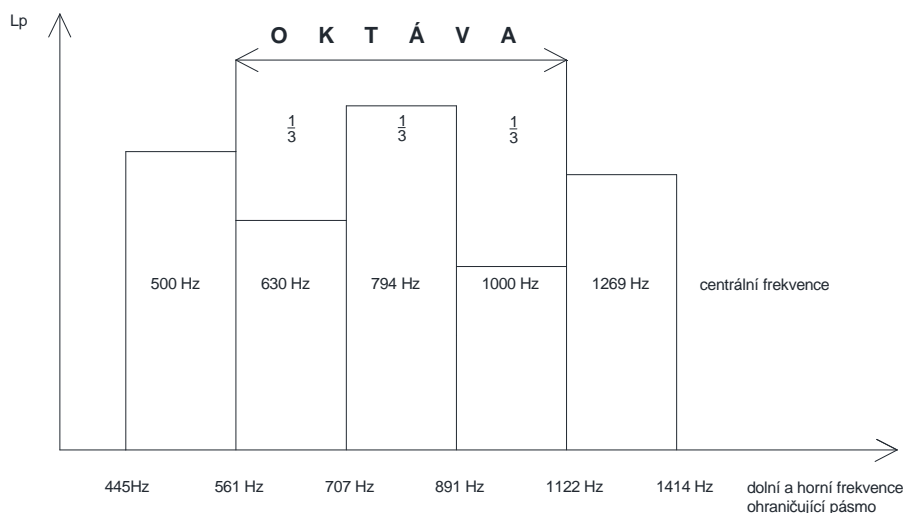
frekvence oktávového pásma [Hz]								
31	63	125	500	1k	2k	4k	8k	16k

frekvence 1/2 oktávového pásma [Hz]																			
31	44	63	87	125	175	250	350	500	700	1k	1,4k	2k	2,8k	4k	5,6k	8k	11k	16k	2k

frekvence 1/3 oktávového pásma [Hz]															
31	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k

1,2k	1,6k	2k	2,5k	3,2k	4k	5k	6,3k	8k	10k	12k	16k
------	------	----	------	------	----	----	------	----	-----	-----	-----

Tabulka 2 – přiřazení centrálních kmitočtů do normalizované řady



Obr. 5 – příklad ideálního rozdělení oktávového pásma na třetiny

## 5 Typ regulace a její vliv na tvar modulových charakteristik

Výsledná modulová charakteristika ekvalizéru se skládá z charakteristiky pásmového korektoru a způsobu jeho realizace.

Proto je důležité sledovat tyto vlivy a jejich kombinace [2]:

- Vliv regulačního členu
- Impedanční vliv sousedních regulačních pásem
- Vliv paralelního nebo sériového uspořádání pásmových korektorů

### 5.1 Vliv regulačního členu:

Vliv odporu potenciometru lze rozdělit do tří skupin:

- Bez vzájemného vlivu zatěžovacích impedancí a regulačního potenciometru. Tento obvod lze nazvat *impedančně nezávislý s konstantní hodnotou  $Q$  funkčního obvodu*. Jeho zapojení je na obr. č. 8. Se snižující se korekcí se výsledná šířka přenášeného pásma rozšiřuje. Aby platila nezávislost na hodnotě potenciometru, musí mít pásmová propust vysokou hodnotu odporu [2].
- *Impedančně závislý s poklesem  $Q$* . (zapojení z obr. 6a) Toto zapojení využívá pro korekci sériové rezonanční obvodu RLC. Regulační (korekční) potenciometr je v sérii s rezonančním obvodem a svým odporem přímo ovlivňuje činitel jakosti. Z tohoto důvodu by bylo vhodné použít potenciometr s nízkou hodnotou odporu, ale při navyšování počtu pásem ekvalizéru dochází ke snižování vstupní impedance sumačního OZ a zhoršují se tak jeho vlastnosti [2].
- *Impedančně závislý se zachováním šířky pásma*. (zapojení z obr. 8) Změnou polohy potenciometru z krajní regulace se snižuje maximální přenos. V zapojení je obsažen limitující odpor se kterým se sčítá odpor potenciometru. To způsobuje zachování šířky pásma či jakoby ekvivalentní zvýšení činitele jakosti. Tento vliv závisí na velikosti odporu potenciometru. S jeho zvyšující se hodnotou se zvyšuje nelinearita regulace a zhoršují šumové vlastnosti [2].

## 5.2 Volba šířky korigovaného pásma

- velikosti činitele jakosti  $Q$  a ovlivňování sousedních pásem

Velký vliv na vlastnosti ekvalizéru má způsob uspořádání pásmových korektorů a dělí se na **paralelní** a **sériové**.

**Paralelní** funkce pásmových korektorů se používá častěji[2] Výsledná přenosová funkce je dána lineárním součtem jednotlivých přenosů (nejedná se o součet v dB) Typické zapojení je zobrazeno na *obr. č. 8*.

**Sériové** (kaskádní) řazení vzniká násobením přenosů dílčích korektorů (v dB je to přímý součet) Těto topologie se využívá u korektorů se sériovými rezonančními obvody, protože dokáže odstranit impedanční vliv sousedních korigovaných pásem. Není nezbytné, aby byla použita kaskáda o tolika stupních, kolik je počet korekčních pásem, nýbrž stačí dva nebo tři sumační obvody a jednotlivé korektory zařadit tak, aby sousední pásma byla v jiném sumačním obvodu. U kaskádního zapojení korektorů je možné dosáhnout maxima přenosu mimo oba základní kmitočty. Pro tuto realizaci musí mít obvody užší pásmo (vyšší  $Q$ ), než u paralelního zapojení. Při vyšším  $Q$  nastávají problémy z hlediska realizace, projevuje se více parazitních vlivů a navýšení šumu v sumačním obvodu [2]. Jeho zapojení lze vidět na *obr. č. 6a*.

## 5.3 Volba hodnoty $Q$

Obecný výpočet činitele jakosti je dán vztahem 5.3.1 a značí se  $Q$ . Jeho výpočet je definován jako poměr centrálního (středového) kmitočtu ku šířce pásma  $B$ . Nastává rozhodnutí, jakou hodnotu činitele jakosti zvolit. Nelze prohlásit jednu hodnotu jako univerzální. Vždy se bude jednat o kompromis mezi dostatečnou selektivitou a velikostí ovlivňování sousedních pásem a mírou zvlnění při korekci dvou a více korektorů vedle sebe pro vytvoření širší korigované oblasti. Ne vždy je potřeba volit maximální míru korekce a už vůbec ne pro dvě sousední pásma, protože to většinou nepřináší zlepšení[4]. Proto bývá výsledné zvlnění menší.

Velikost činitele jakosti je možné vypočítat podle potřebné šířky pásma a pro 1/3 oktávový ekvalizér je dosazeno v rovnici 5.3.2. Výsledek 4,3185 se často zaokrouhluje na hodnotu 4, ale pro kvalitní návaznost pásem a menší ovlivňování je dobré dodržet přesnou

hodnotu. Také je vhodné navrhovat pásmové propusti podle vypočtených kmitočtů a nepoužívat tak aproximaci.

Z výpočtu je zřejmé, že pro ekvalizéry s nižším počtem pásem (širší šířkou pásmových korektorů) bude hodnota Q klesat.

$$Q = \frac{f^{ctr}}{f^{horní} - f^{dolní}} = \frac{f^{ctr}}{B} \quad (5.3.1)$$

$$Q_{1/3okt} = \frac{1000}{1122,462 - 890,899} = \frac{1000}{231,563} = 4,3185 \quad (5.3.2)$$

$$Q_{1okt} = \frac{1000}{1189,207 - 707,107} = \frac{1000}{707,107} = 2,074 \quad (5.3.3)$$

#### 5.4 Zapojení pásmových korektorů:

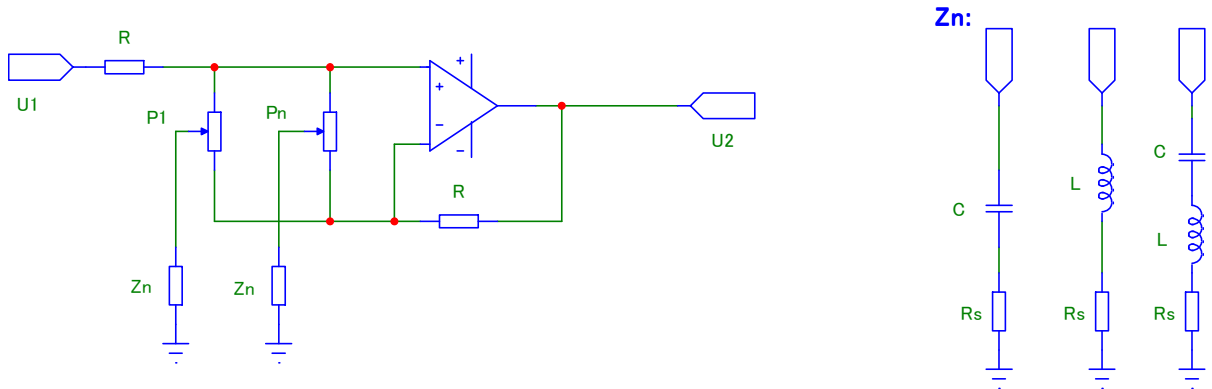
Zapojení pásmových korektorů lze rozdělit do tří skupin [2]:

- Korektor se sériovými rez. obvody s neinvertujícím zesilovačem.
- Korektor s jedním invertujícím operačním zesilovačem.
- Korektor se dvěma invertujícími operačními zesilovači – impedančně závislý se zachováním šířky pásma.

Korektor se **sériovými rez. obvody** s neinvertujícím zesilovačem. Jeho zapojení je na obr. 6a V horní poloze regulačního potenciometru se chová jako pasivní dělič R-Z s oddělovacím zesilovačem. Minimální přenos při rezonanci je dán poměrem děliče  $R_s/(R+R_s)$ , kde  $R_s$  je sériový odpor impedance Z. Při spodní poloze potenciometru vzniká zesilovač s kmitočtově závislým přenosem a v rezonanci je přenos  $(R_s+R)/R_s$  – vzniká tak převrácená hodnota přenosu oproti horní poloze potenciometru. Získáváme tak stejnou hodnotu v dB, avšak s opačným znaménkem. Nevýhodou tohoto zapojení je, že hodnota ztrátového odporu  $R_s$  u všech rezonančních obvodů musí být shodná, a tím jsou hodnoty L a C vůči sobě impedančně vázané. Z tohoto důvodu je obtížné vybírat hodnoty přímo z jmenovitých řad a je potřeba výslednou hodnotu skládat. Další nevýhodou zapojení je vzájemné ovlivňování impedancí Z a to i při střední poloze potenciometru. Tento problém lze vyřešit rozdělením sousedních pásem mezi dva nebo tři zesilovače (kaskádní řazení). Vlivem této úpravy dochází k výraznějšímu vzájemnému ovlivňování přenosu, které lze částečně zmírnit zvýšením Q.

Na obrázku 6b jsou také znázorněny impedance  $Z_n$  pro korekci vysokých, nízkých a pásmových korekcí. Výpočet hodnot součástí vychází z rezonančního kmitočtu a velikosti činitele jakosti.

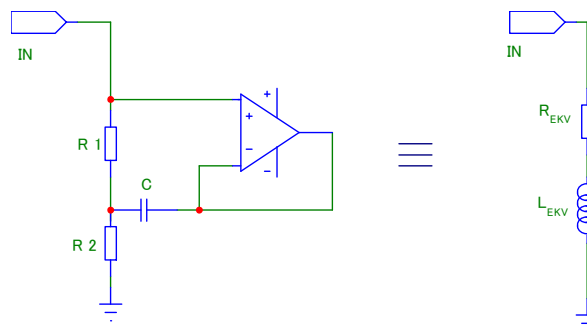
Cívky se většinou nahrazují syntetickými induktory. Ty se využívají především pro menší konstrukční náročnost, snadnou reprodukovatelnost a sériovost. Nahrazují tak problémy související s klasickými cívkami, jako jsou jejich rozměry a hmotnost především pro nízké kmitočty. Mezi výhody tohoto zapojení patří dobré šumové vlastnosti.



Obr. 6a - korektor se sériovými rez. obvody [2]

Obr. 6b - zapojení impedancí Zn [2]

Syntetický induktor je elektronické zapojení – dvojpól, které obsahuje jeden nebo více aktivních prvků. Tento dvojpól vykazuje na svých svorkách induktivní reaktanci a nahrazuje parametry indukčnosti získané z cívek. Nevýhodou tohoto zapojení je poměrně vysoká hodnota sériového (ekvivalentního) odporu. To znemožňuje dosažení vysoké hodnoty Q, přesto lze syntetickou indukčnost využít v nf technice ke konstrukci filtrů [7].



$$R_{EKV} = R_1 + R_2 \tag{5.4.1}$$

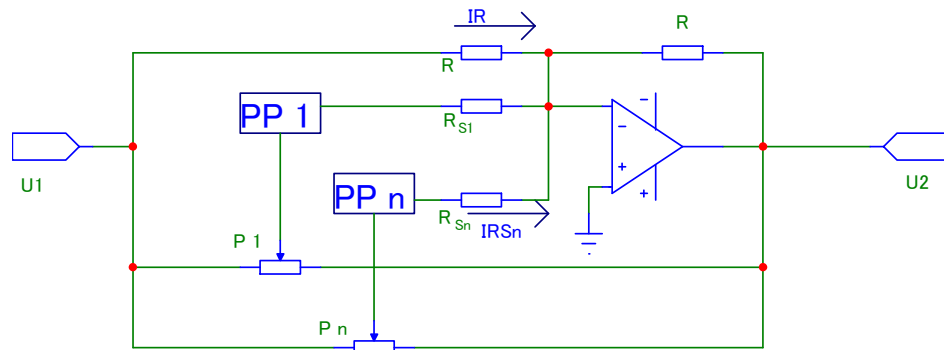
$$L_{EKV} = R_1 R_2 \cdot C \tag{5.4.2}$$

$$Q_L = \frac{2\pi f C R_1 R_2}{R_1 + R_2} \tag{5.4.3}$$

Obr. 7 - Prescottova syntetická indukčnost a tomu odpovídající sériová RL kombinace [2]

Korektor s **jedním invertujícím operačním zesilovačem** (obr. 8) používá sumaci proudů na invertujícím vstupu OZ [2]. K frekvenčně nezávislému proudu IR se podle polohy potenciometru přičítá nebo odčítá kmitočtově závislý proud IRSn z pásmové propusti. Nevýhodou tohoto zapojení je sumace šumu jednotlivých pásmových propustí a to i v případě, že je korekce nulová. Tento šum narůstá s přibývajícím počtem pásem.

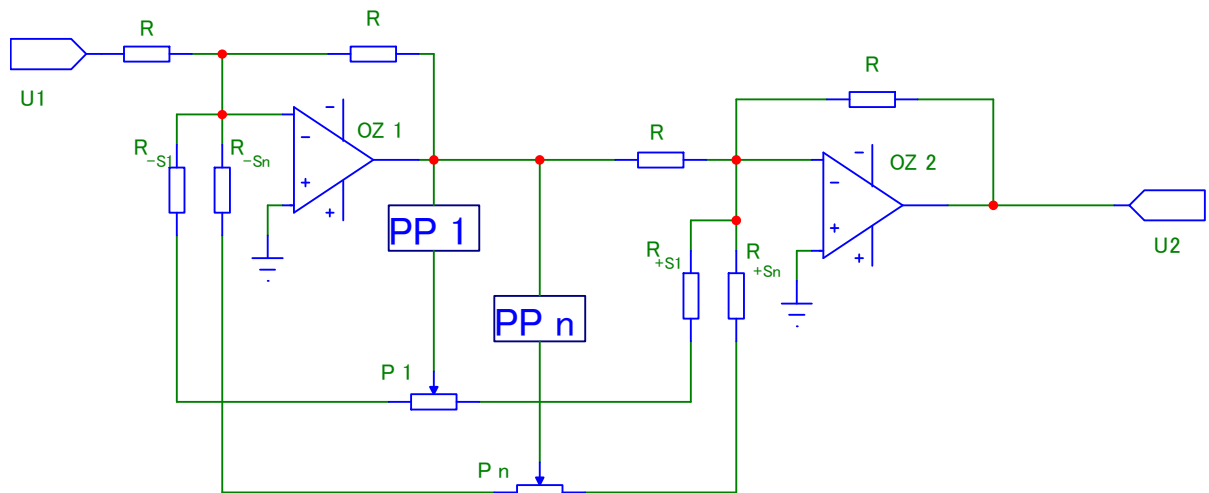




Obr. 8 - korektor s jedním invertujícím operačním zesilovačem [2]

Tuto nevýhodu se sčítáním šumů při nulové korekci lze odstranit úpravou zapojením se **dvěma invertujícími operačními zesilovači** – impedančně závislý se zachováním šířky pásma. Ve střední poloze potenciometru vstupuje šum z PP do obou OZ a kompenzuje se.

Na obr. 9 je zapojení, kde jsou odpory  $R_s$  u vstupů OZ rozděleny. V tomto případě nelze použít uzemnění středu potenciometru. Jako kompromis lze rozdělit funkci odporů  $R_s$ , jak na výstupu PP, tak i do vstupů OZ. Při tomto druhu zapojení nastává problém s realizací neinvertující PP pomocí jednoho OZ. Tento problém lze vyřešit pomocí zařazení společného invertujícího zesilovače před vstupy PP.



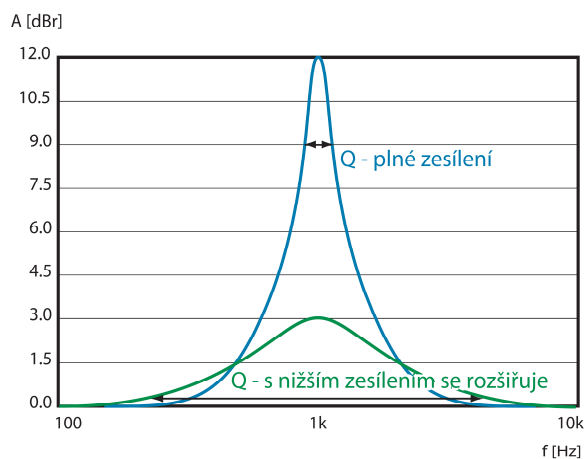
Obr. 9 - korektor se dvěma invertujícími operačními zesilovači [2]

## 5.5 Konstantní a nekonstantní Q

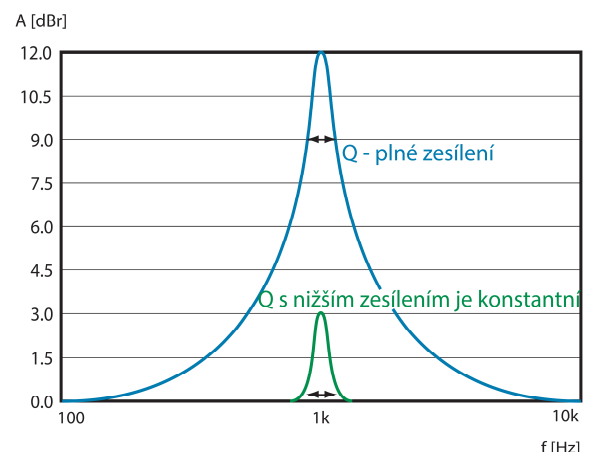
Vliv činitele jakosti  $Q$  lze stručně shrnout jako parametr změny šířky pásma v závislosti na měnícím se přenosu. S tím je spojené vzájemné ovlivňování sousedních pásem. Podle toho se ekvalizéry rozdělují na s konstantním a nekonstantním  $Q$ .

Mezi nevýhody zapojení s nekonstantním  $Q$  patří změna šířky přenášeného pásma při měnící se velikosti zesílení a zeslabení. U vysokého zesílení je pásmo užší a činitel jakosti vysoký. Při snižování zisku dochází ke snižování  $Q$  a k rozšiřování šířky pásma. Tím dochází k ovlivňování vedlejších pásem. U více-pásmových grafických ekvalizérů pak nastavení tahových potenciometrů a aktuální stav přenosové funkce ekvalizéru neshodují. Tudíž pak čelní panel dává mylnou představu o tvaru frekvenční charakteristiky do té míry, že není možné se spolehnout ani na její přibližnou podobu.

Proto také nekonstantní  $Q$  bývá příčinou degradace 1/3 oktávových ekvalizérů. Tyto nedostatky odstraňuje zapojení s konstantním činitelem jakosti  $Q$ . Při plném nebo nižším zesílení je korigovaná šířka pásma stále stejná. Rozdíly mezi ekvalizérem s konstantním a nekonstantním  $Q$  popisují obrázky 10a a 10b.



Obr. 10a – ekvalizér s nekonst.  $Q$  [1]



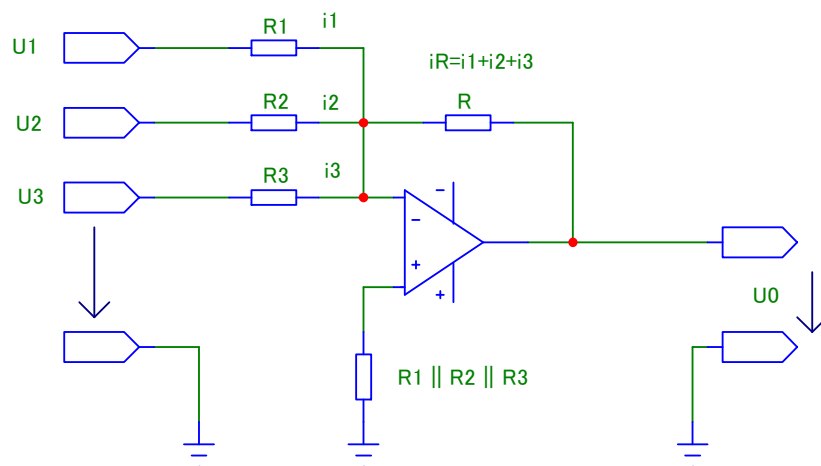
Obr. 10b – ekvalizér s konstantním  $Q$  [1]

Ekvalizér, který pevně zachovává konstantní  $Q$ , má stejnou velikost zvlnění při kombinaci více pásem v závislosti na měnící se úrovni zesílení nebo zeslabení. Tato vlastnost je v praxi nežádoucí. Proto ekvalizéry s konstantním  $Q$  mají pouze menší změnu šířky pásma pásmových propustí oproti ekvalizérům s nekonstantním  $Q$ . Tím je dosažen kompromis mezi velikostí zvlnění a zachováním tvaru požadované charakteristiky.

## 6 Návrh ekvalizéru:

Pro konstrukci byl zvolen grafický ekvalizér s konstantním  $Q$ . U tohoto typu lze jednoduše provádět požadované korekce pomocí tahových potenciometrů naladěných na pevně nastavené centrální kmitočty. Pro maximální variabilitu je použit 1/3 oktávový ekvalizér. Celkem obsahuje 28 pásem. První korektor je naladěný na kmitočet 31 Hz, poslední na 16 kHz.

Byla vybrána topologie se dvěma invertujícími operačními zesilovači. Jedna z výhod tohoto zapojení je, že při kombinaci více pásem filtrů dochází k součtu přenosů a výsledná charakteristika nedosahuje výrazných amplitudových změn (v porovnání s kaskádním spojením pásmových propustí). Operační zesilovače OZ1 a OZ2 pracují jako sumátory, kde míru zesílení (na daném kmitočtu podle pásmové propusti) ovlivňuje poloha potenciometru.



Obr. 11 - součtový (sumační) zesilovač se třemi vstupy [6]

Počet vstupů lze libovolně měnit. Je však nutno brát ohled na velikosti šumů. Invertující vstup se chová jako virtuální zem a platí:

$$i_1 = \frac{u_1}{R_1}; \quad i_2 = \frac{u_2}{R_2}; \quad i_3 = \frac{u_3}{R_3} \quad (6.1)$$

Pro ideální OZ platí:

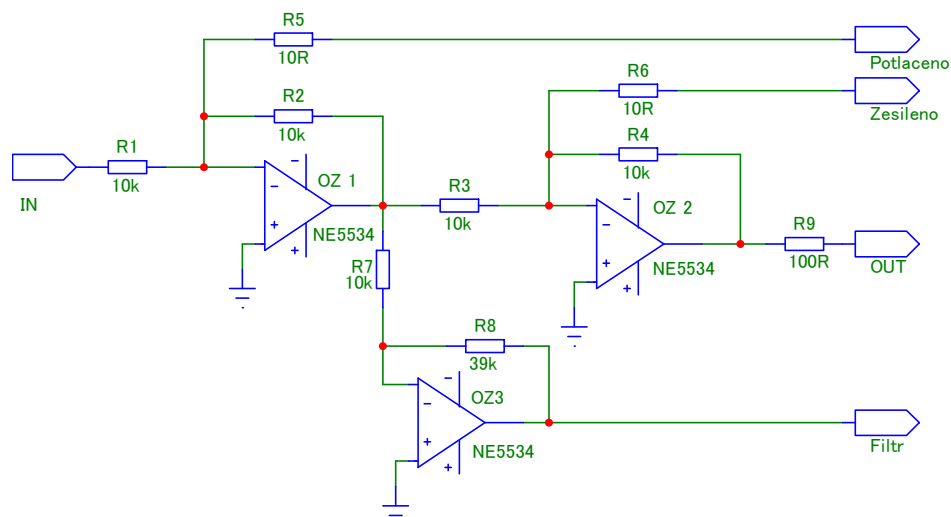
$$i_R = i_1 + i_2 + i_3 \quad (6.2)$$

Všechny proudy protékají přes rezistor ve zpětné vazbě  $R$ . Následně lze určit:

$$U_0 = -i_R \cdot R = -\left( U_1 \cdot \frac{R}{R_1} + U_2 \cdot \frac{R}{R_2} + U_3 \cdot \frac{R}{R_3} \right) \quad (6.3)$$

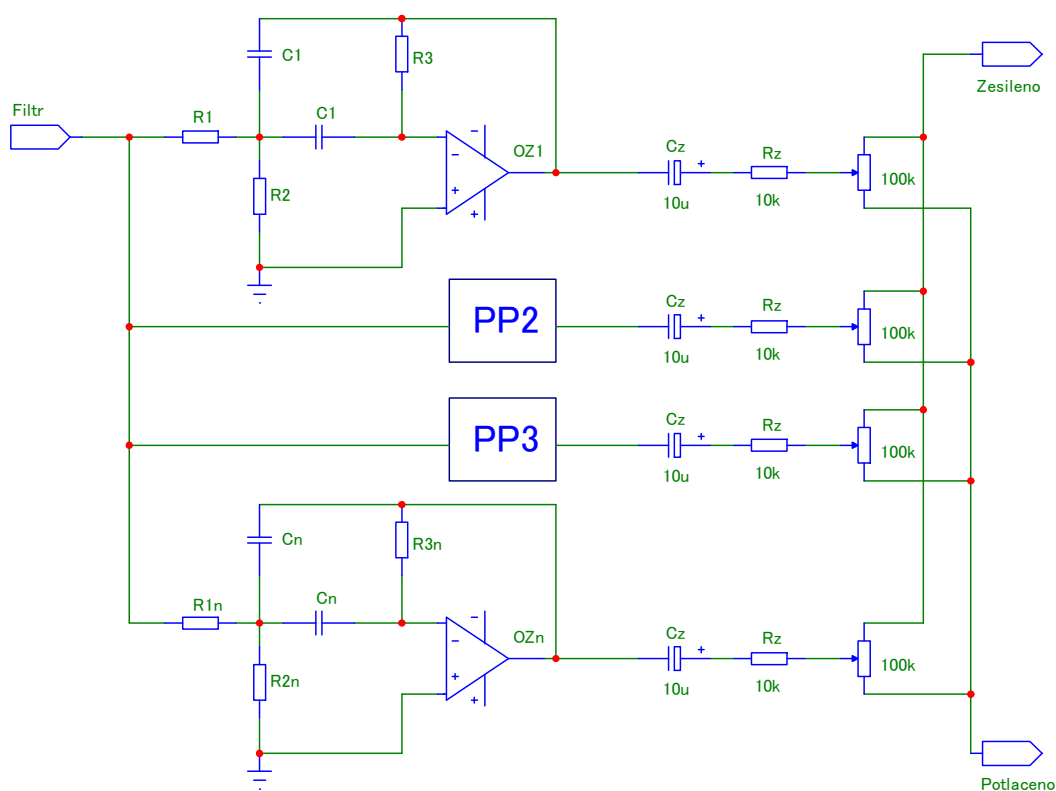
Pro stejné hodnoty rezistorů  $R_1 = R_2 = R_3 = R$

$$-U_0 = U_1 + U_2 + U_3 \quad (6.4)$$



Obr. 12 - schéma zapojení se dvěma invertujícími operačními zesilovači [3]

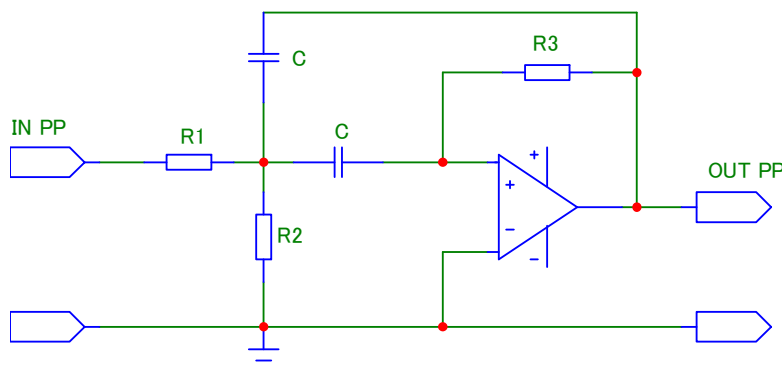
Operační zesilovače jsou použity bipolární nízkošumové NE5534. Zisky OZ1 a OZ2 byly nastaveny jednotkové. Rezistory z výstupu filtrů (vstupů do OZ1 a OZ2) jsou sloučeny do jednoho. Jeho hodnota je 10 Ohmů. Před vstupy filtrů je zařazen třetí OZ3. Tento operační zesilovač umožňuje realizaci pásmové propusti pomocí jednoho neinvertujícího OZ, a také s ním lze upravovat velikost přenosu banky pásmových propustí.



Obr. 13 - schéma zapojení banky filtrů (pásmových propustí) [3]

## 6.1 Pásmová propust:

Pro filtr byla zvolena struktura Huelsman [4]. Toto zapojení využívá vícenásobné zpětné vazby (anglicky *Multiple Feedback Bandpass Filter*). Kondenzátory v obvodu mají stejnou hodnotu, a proto může být použita libovolná kapacita [9]. Zapojení lze najít i pod názvem Bridgman – Brennan [8]



Obr. 14 – zapojení pásmového filtru 2. řádu [9]

Výpočet hodnot součástek se provede podle následujících vzorců [4]. Poté je dosazeno a proveden názorný výpočet pro kmitočet 1 kHz. Jak bylo uvedeno ve vztahu (2.2), je pro 1/3 oktávové pásmo vhodné použít činitel jakosti s hodnotou 4,3185. Kapacita kondenzátoru byla zvolena 33 nF. Zisk G byl zvolen jednotkový.

$$R1 = \frac{Q}{G \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} = \frac{4,3185}{1 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 1000 \cdot 33 \cdot 10^{-9}} = 20,827 \text{ k}\Omega \quad (6.5)$$

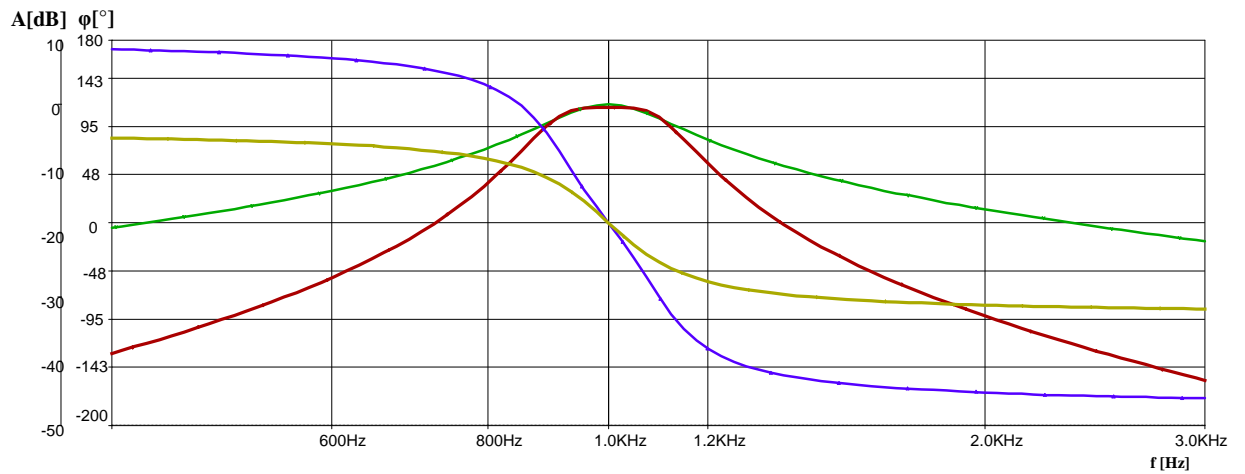
$$R2 = \frac{Q}{(2 \cdot Q^2 - G) \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} = \frac{4,3185}{(2 \cdot 4,3185^2 - 1) \cdot 2 \cdot \pi \cdot 1000 \cdot 33 \cdot 10^{-9}} = 573,78 \text{ }\Omega \quad (6.6)$$

$$R3 = \frac{Q}{\pi \cdot f \cdot C} = \frac{4,3185}{\pi \cdot 1000 \cdot 33 \cdot 10^{-9}} = 41,655 \text{ k}\Omega \quad (6.7)$$

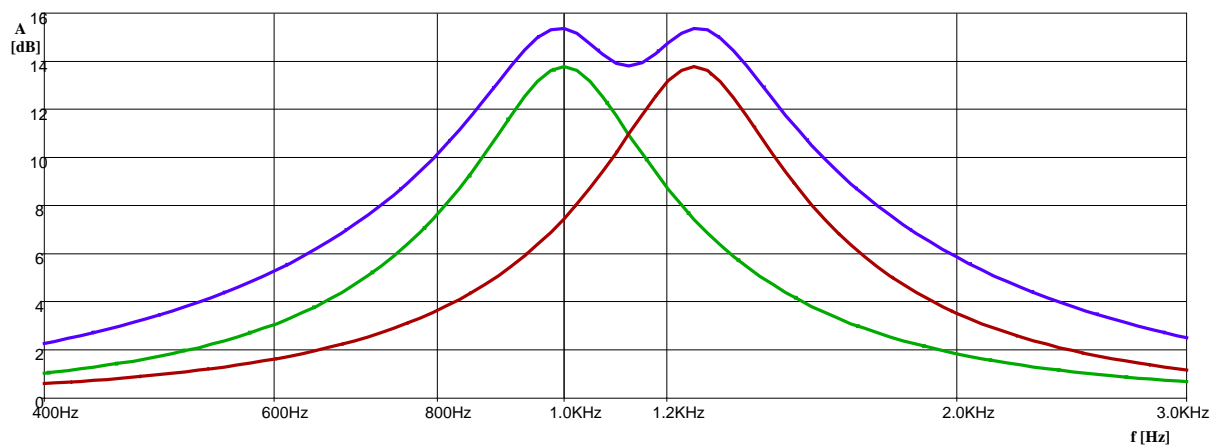
$$G = \frac{R3}{2 \cdot R1} = \frac{41655}{2 \cdot 20827} = 1 \quad (6.8)$$

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C} \cdot \sqrt{\frac{R1 + R2}{R1 \cdot R2 \cdot R3}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 33 \cdot 10^{-9}} \cdot \sqrt{\frac{20827 + 573,78}{20827 \cdot 573,78 \cdot 41655}} = 1 \text{ kHz} \quad (6.9)$$

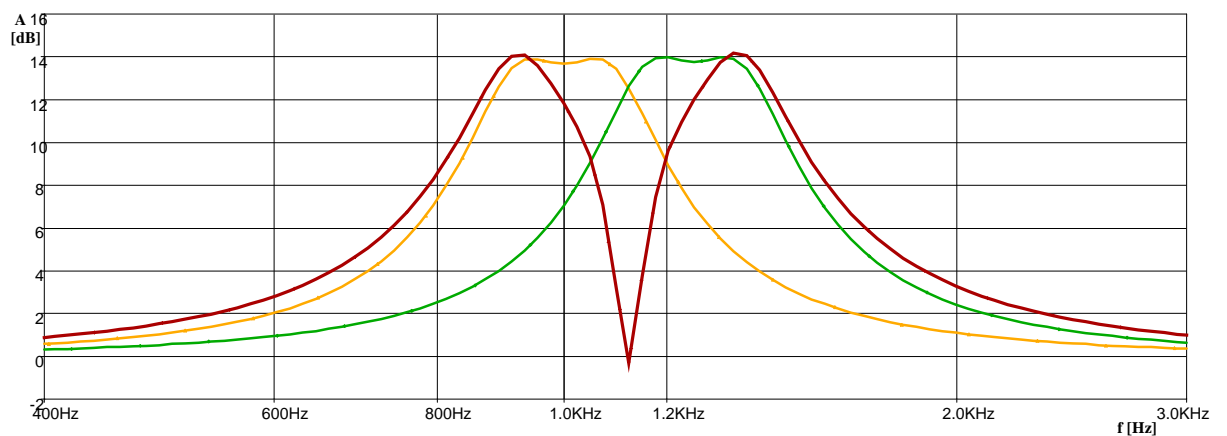
Jedná se o filtr 2. řádu. Mohl by se použít i filtr 4. řádu, který by se více přiblížil ideálnímu hranatému průběhu pásmové propusti. To by se také na první pohled mohlo jevit jako výhodnější s ohledem na kombinační vlastnosti sousedních pásem. Avšak nastává zde problém s fázovými charakteristikami. Zatímco filtr 2. řádu se v šířce pásma B3 (pokles o 3 dB) pohybuje v rozmezí 45° až -45°, fáze filtru 4. řádu se pohybuje pro dolní mezní kmitočet 90° a pro horní mezní -90°. To způsobí po kombinaci 2 sousedních pásem výrazný pokles amplitudy, jak je zobrazeno na obr. 17.



Obr. 15 – znázornění frek. amp. a fázových charakteristik filtrů 2. a 4. řádu  
 zelená – amp. ch. 2. řádu ; žlutá – fázová ch. 2. řádu  
 červená – amp. ch. 4. řádu ; modrá – fázová ch. 4. řádu

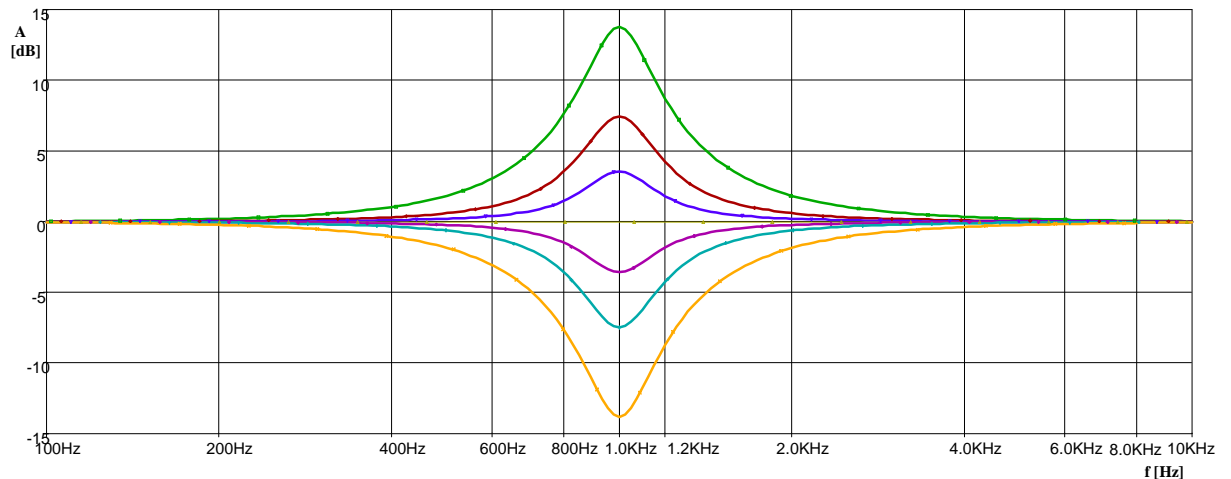


Obr. 16 - kombinace 2 sousedních pásem pro filtry 2. řádu



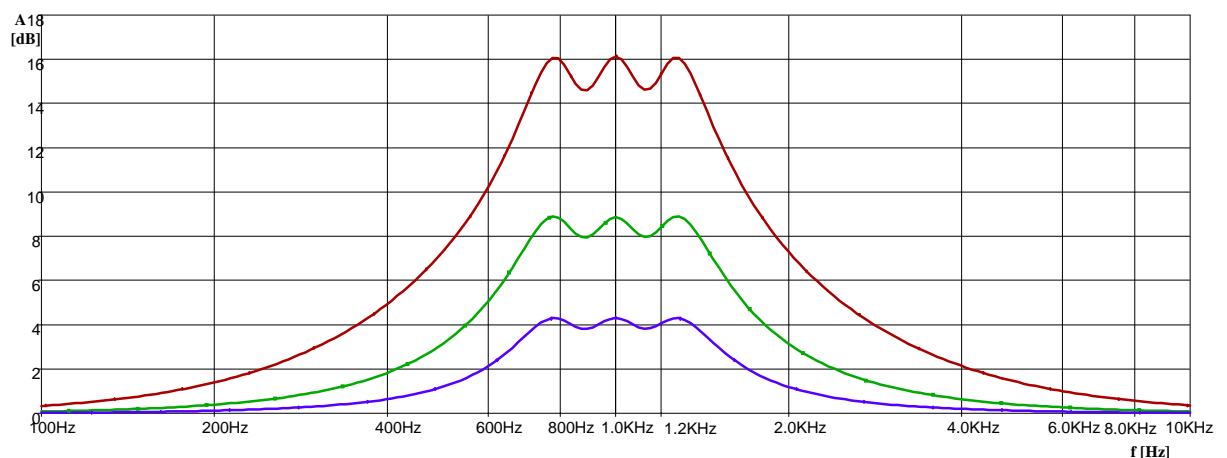
Obr. 17 - kombinace 2 sousedních pásem pro filtry 4. řádu

Další obrázek (*obr. 18*) znázorňuje chování pásmové propusti pro různé nastavení intenzity korekce. Jednotlivé křivky ukazují míru jak pro 25 %, 50 % a 100 % zesílení tak i stejnou hodnotu potlačení. Také je zobrazena křivka pro polohu potenciometru ve středové poloze. Ta podle očekávání nemá na přenos žádný vliv.



*Obr. 18 - různá intenzita korekcí pro jedno pásmo*

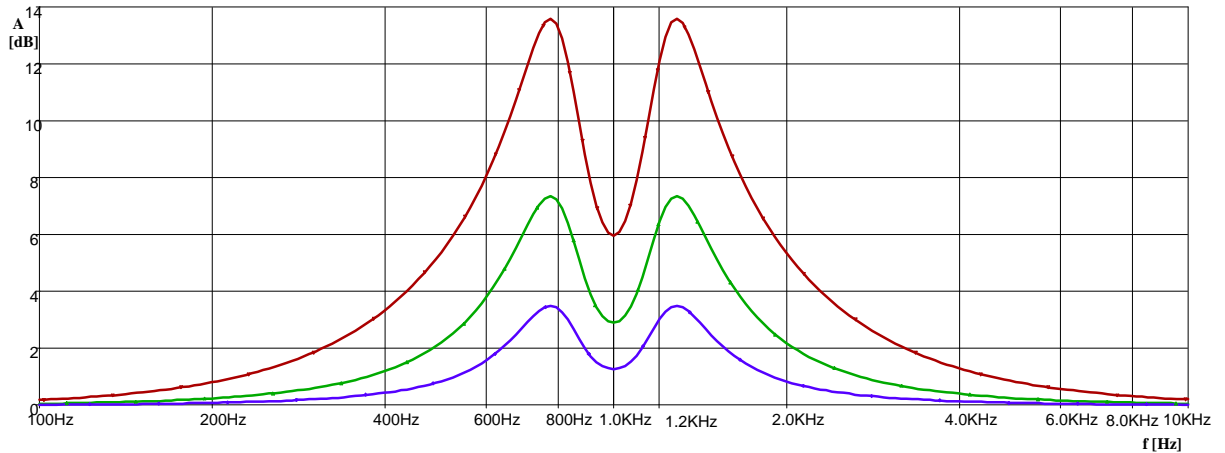
Velmi sledovaným parametrem ekvalizérů je velikost zvlnění při korekci více sousedních pásem. Optimální rovné charakteristiky se dosahuje velmi obtížně. Na obrázku č. 19 jsou vidět charakteristiky pro tři různé úrovně zesílení třech sousedních pásem. Z průběhů lze odečíst, že se vzrůstající intenzitou roste také velikost zvlnění. Pro 25% zesílení je přibližně 0,5 dB, Pro 50% zesílení je 1 dB a pro 100% zesílení je až 1,5 dB. Toto zvlnění by se mohlo jevit jako vysoké, ale při běžném provozu ekvalizéru se málokdy nastavuje více sousedních potenciometrů do maximální úrovně korekce. Proto lze toto zvlnění brát jako přijatelné.



*Obr. 19 - tři sousední pásma nastavené na různou úroveň intenzity korekcí.*

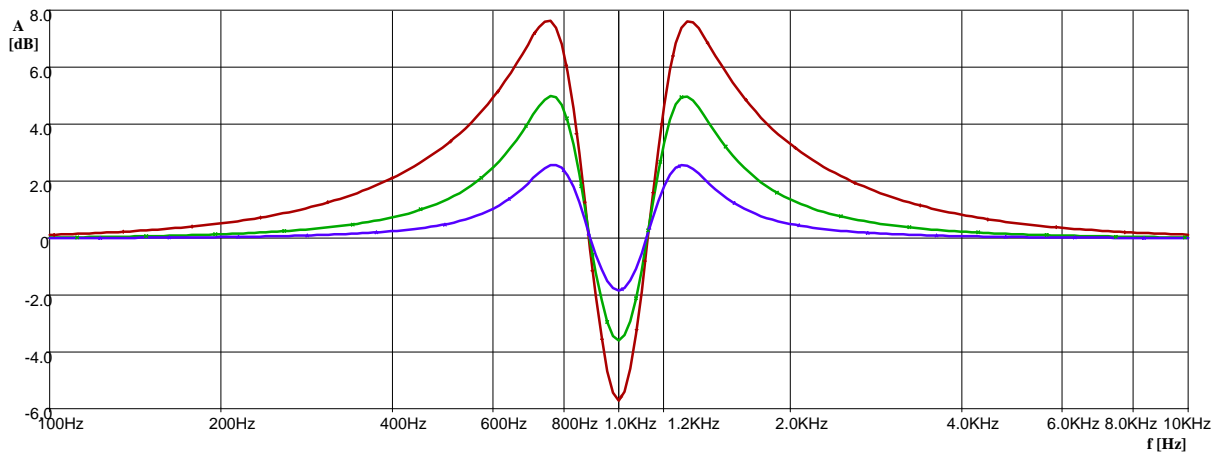
## 6.2 Simulace obvodu s konstantním a nekonstantním Q

Jak bylo popsáno v předešlých kapitolách, očekáváme od grafického ekvalizéru podobnost nastavení polohy potenciometrů s tvarem frekvenční charakteristiky. Tato vlastnost je zobrazena na následujících dvou obrázcích, kde jsou potenciometry nastaveny do různých poloh.



Obr. 20 - polohy třech sousedních potenciometrů pro různé intenzity korekce

Červená	+15 dB	0 dB	+15 dB
Zelená	+7,5 dB	0 dB	+7,5 dB
Modrá	+3,5 dB	0 dB	+3,5 dB



Obr. 21 - polohy třech sousedních potenciometrů pro různé intenzity korekce

Červená	+15 dB	-15 dB	+15 dB
Zelená	+7,5 dB	-7,5 dB	+7,5 dB
Modrá	+3,5 dB	-3,5 dB	+3,5 dB

Z grafů simulací je zřejmé, že dochází k ovlivňování sousedních pásem, ale i přes tento nedostatek ekvalizér věrně kopíruje polohu potenciometrů. Toho bylo dosaženo volbou zapojení, které se snaží zachovávat stejnou šířku pásma, tedy konstantní Q. Pro názornost byly provedeny simulace pro jedno pásmo se dvěma různými intenzitami a zapojeními. Na



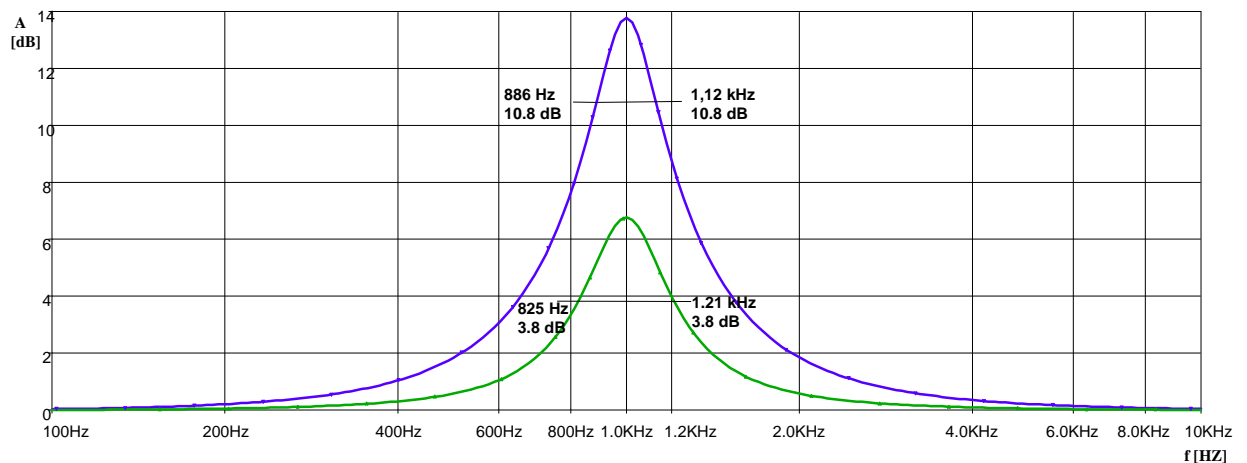
obrázku č. 23 je zobrazeno popsané zapojení se dvěma invertujícími OZ a PP typu Huelsman. Na druhém je použito zapojení se sériovými rezonančními obvody (obr. 6a)

Po odečtení hodnot z grafů (obr. 23 a obr. 24) a dosazení do vzorce pro výpočet činitele jakosti dostáváme hodnoty  $Q(\text{obr.23}) = 4,14$  se sníží na 2,56 a pro  $Q(\text{obr.24}) = 4,18$  poklesne na 1,44.

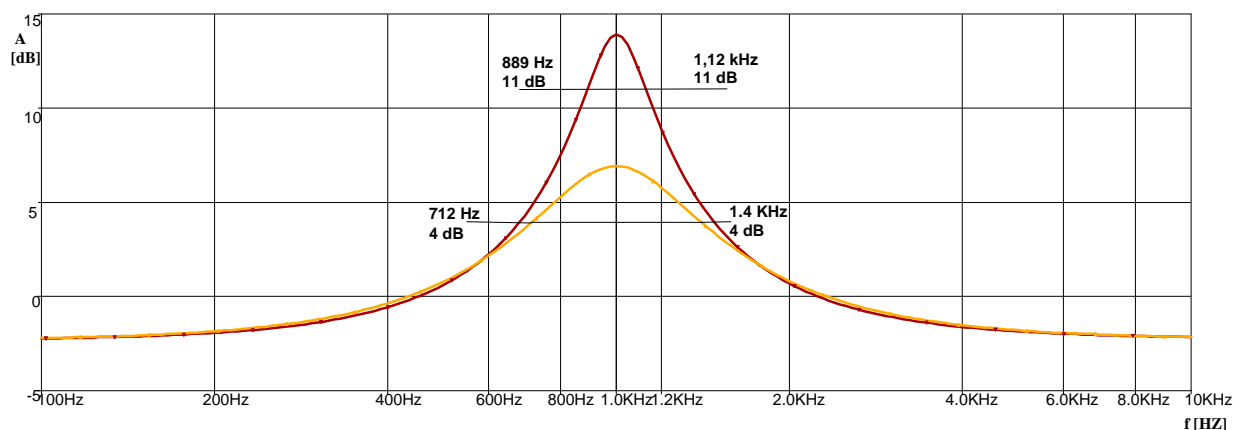
Toto výrazné zhoršení činitele jakosti u obvodu se sériovými rezonančními obvody je způsobeno ovlivňováním sousedních pásem natolik, že po kombinaci neodpovídá poloha potenciometrů frekvenční charakteristice.

$$Q_{100\%}^{(23)} = \frac{1000}{1127,8 - 886,4} = 4,14 \qquad Q_{100\%}^{(24)} = \frac{1000}{1127,8 - 888,9} = 4,18 \quad (6.10)$$

$$Q_{50\%}^{(23)} = \frac{1000}{1214,6 - 825,4} = 2,56 \qquad Q_{50\%}^{(24)} = \frac{10,00}{1405,3 - 711,6} = 1,44 \quad (6.11)$$



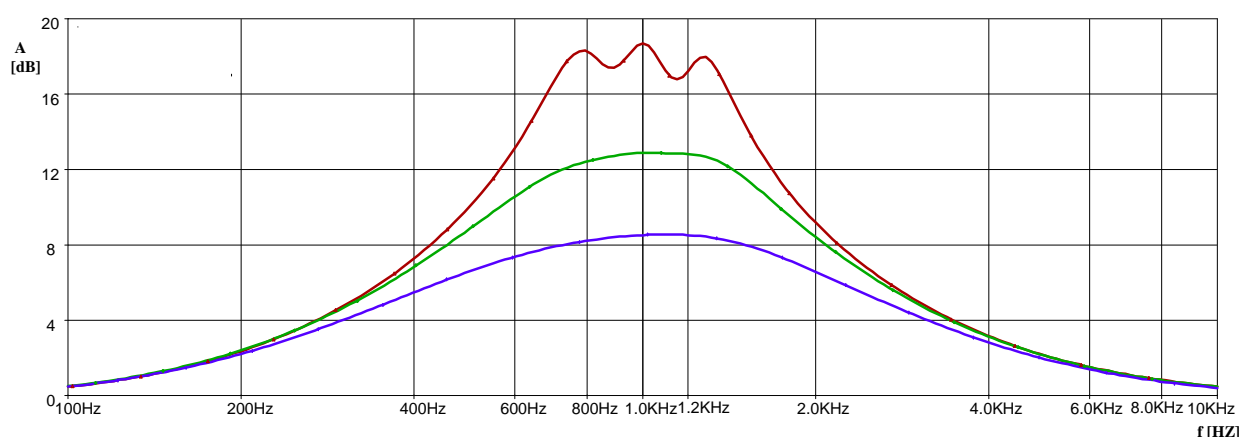
Obr 23– rozdílná intenzita zesílení pro obvod se dvěma invertujícími zesilovači



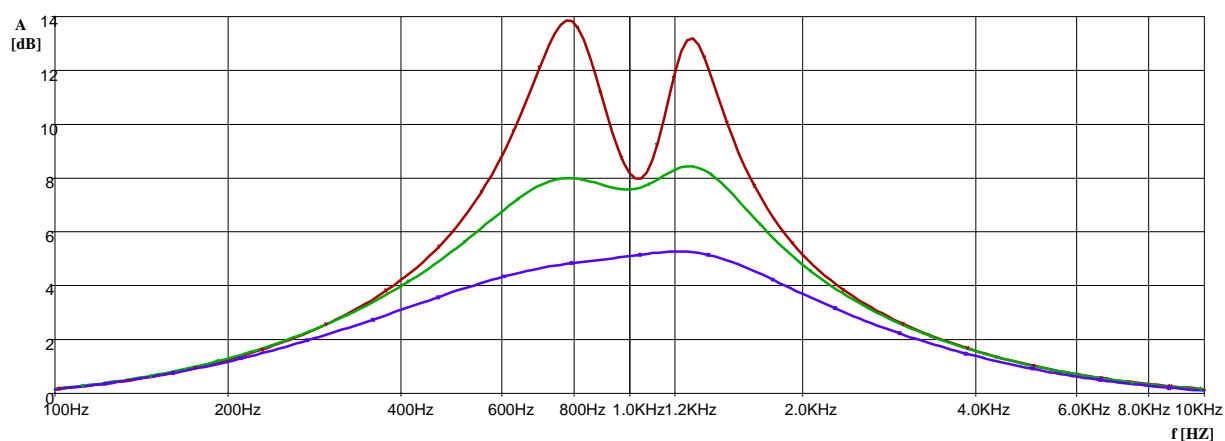
Obr 24 – rozdílná intenzita zesílení pro zapojení se sériovými rezonančními obvody

Další charakteristiky se zabývají nedostatky zapojení obvodů s nekonstantním  $Q$ . Na obr. 25 jsou křivky sousedních pásem nastavených na rozdílnou úroveň intenzity. Při porovnání s obrázkem č. 19 je vidět, že výrazné zvlnění je pouze pro maximální úroveň korekcí. To se může na první pohled jevit jako výhoda, avšak při důkladnějším porovnání je vidět, že úroveň přenosu je výrazně vyšší při stejné míře nastavení potenciometrů.

Tento jev, jak byl popsáno výše, je způsoben kaskádním spojením korektorů, kde výsledná funkce je dána součinem přenosů (rovno součtu v dB), zatímco v předešlém případě paralelního řazení je výsledná funkce dána součtem přenosů a neodpovídá součtu v dB [2].

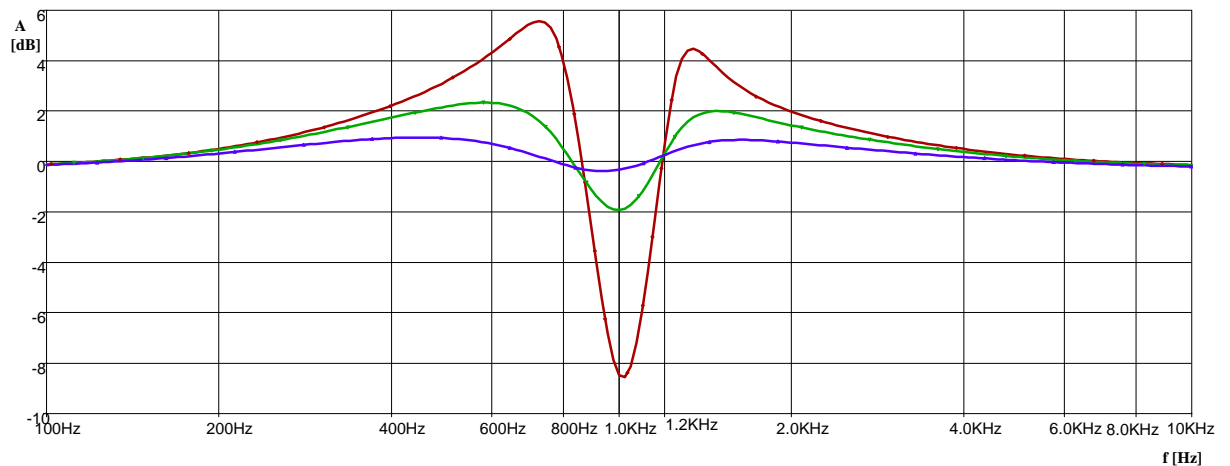


Obr 25. tři sousední pásma nastavené na různou úroveň intenzity korekcí pro obvod s nekonstantním  $Q$



Obr. 26 - polohy třech sousedních potenciometrů pro různé intenzity korekce obvodu s nekonstantním  $Q$

Červená	+15 dB	0 dB	+15 dB
Zelená	+7,5 dB	0 dB	+7,5 dB
Modrá	+3,5 dB	0 dB	+3,5 dB

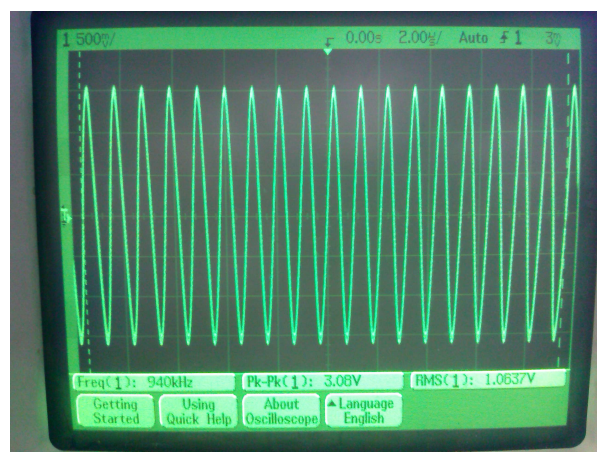


Obr. 27 - polohy třech sousedních potenciometrů pro různé intenzity korekce obvodu s nekostnatým  $Q$

Červená	+15 dB	-15 dB	+15 dB
Zelená	+7,5 dB	-7,5 dB	+7,5 dB
Modrá	+3,5 dB	-3,5 dB	+3,5 dB

### 6.3 Oživení zapojení:

Po provedení simulací v simulačním programu PSpice byl proveden návrh desky plošného spoje v Eagle. Velikost desky je 387 x 72 mm. Po osazení a oživení nastal problém s kmitáním, pokud byly všechny potenciometry ve středové poloze. Provoz zařízení byl možný pouze se dvěma potenciometry nastavenými na maximální zesílení. Zařízení mělo dále sklony k zákmitům při dotyku rukou. Foto osciloskopické obrazovky ukazuje kmitání na 940 kHz s velikostí amplitudy 1 V.



Obr. 28 - kmitání při středové poloze všech potenciometrů

Pro odstranění těchto problémů bylo nutné kmitočtově kompenzovat zapojení. Zařízení obsahovalo pouze blokuující kondenzátory napájení o kapacitě 100 nF. Konstrukční podmínky, především rozložení potenciometrů nejsou ideální podle návrhových pravidel plošných spojů. Spojení všech potenciometrů a jejich zavedení do zpětné vazby operačních

zesilovačů pro zesílení a potlačení obsahuje dlouhé spoje. To umožňuje průchod rušivých signálů. Kmitočtová kompenzace spočívává v omezení kmitočtové oblasti pouze na oblast ve které zařízení pracuje. Kmitočtová kompenzace se skládá ze dvou částí:

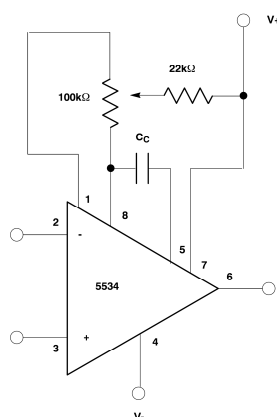
- z kmitočtového omezení na vstupních svorkách,
- z kmitočtové kompenzace operačních zesilovačů.

Některé operační zesilovače mají možnost externí kmitočtové kompenzace. Příkladem je použitý obvod NE5534, který umožňuje kompenzaci mezi vývody 5 a 8. U obvodů, které tuto možnost nemají, je lze kmitočtově kompenzovat přidáním kondenzátoru do hlavní zpětné vazby. Velikost kapacity se pro zvukové aplikace pohybuje v desítkách pikofaradů.

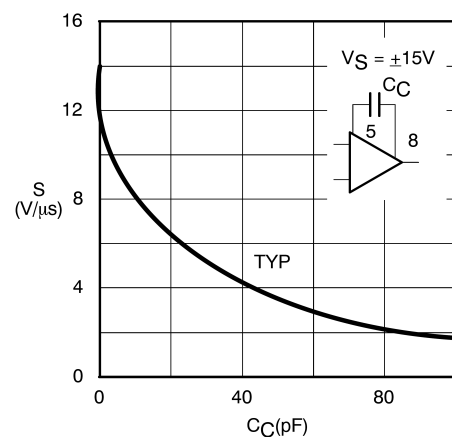
V tomto případě bylo podle datového listu výrobce OZ zapojen keramický kondenzátor o hodnotě 47 pF co nejlépe kompenzačním vstupům u OZ 1 až OZ 4. Problém s kmitáním při poloze všech potenciometrů ve střední poloze byl vyřešen, ale když se nastavila poloha všech potenciometrů na polohu maximálního potlačení, obvod měl opět sklon k nestabilitám.

Proto byly zařazeny kondenzátory 47 pF do hlavní zpětné vazby u OZ 2 a OZ 3, kde kvůli propojení tahových potenciometrů obsahuje zpětná vazba dlouhé vodiče.

Tato kompenzace odstranila problémy s nestabilitami, ale snížení frekvenční šířky pásma operačních zesilovačů měla za důsledek snížení rychlosti přeběhu. To se projevilo se zvýšením harmonického zkreslení u vyšších kmitočtů. Závislost rychlosti přeběhu na velikosti kapacity je znázorněno na obrázku č. 30.

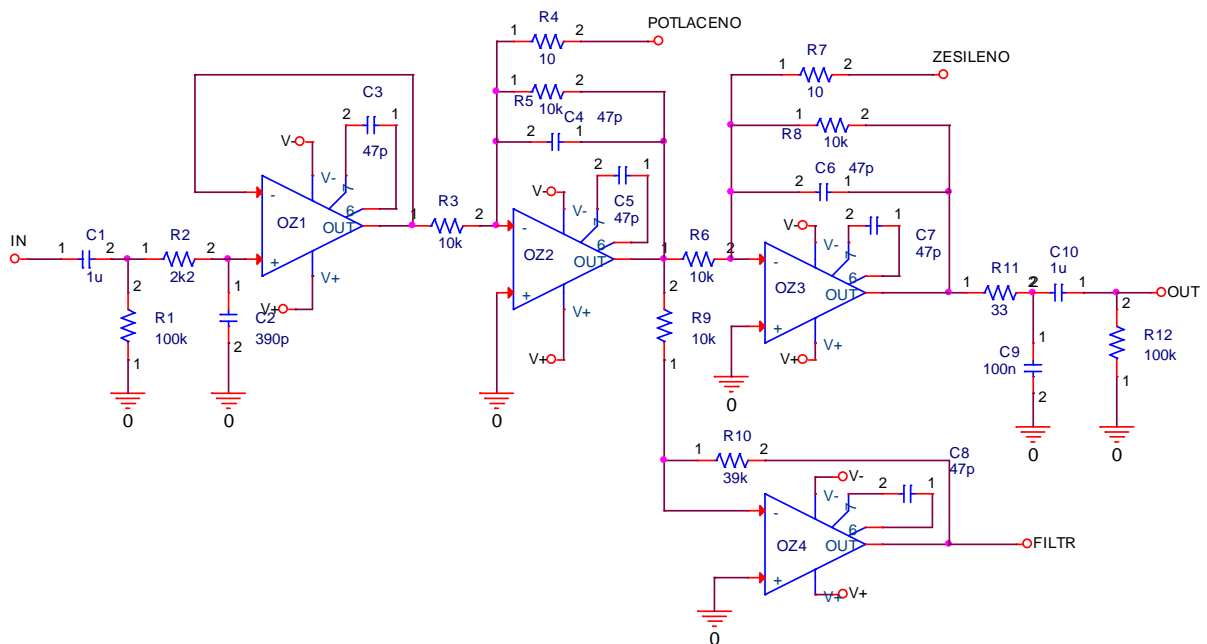


Obr. 29 - schéma zapojení kmitočtové kompenzace a napětové nesymetrie [5]



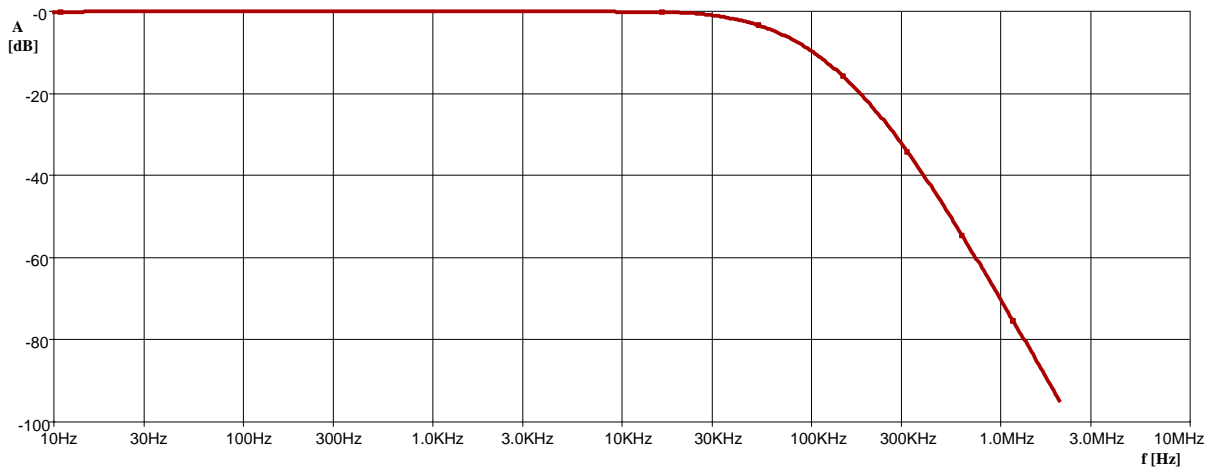
Obr. 30 - závislost rychlosti přeběhu na velikosti kapacity [5]

Dále bylo pro vyšší stabilitu potřeba zařadit na vstup ekvalizéru vhodný vysokofrekvenční filtr skládající se z rezistoru R2 o hodnotě 2,2 k $\Omega$  a kondenzátoru C2 o hodnotě 390 pF. Na výstup ekvalizéru byl také zařazen vf filtr složený z R11 s hodnotou 33  $\Omega$  a C9 o kapacitě 100 nF. Ten omezuje kmitočty nad akustickým pásmem, které by mohly nepříznivě ovlivnit následující stupeň.

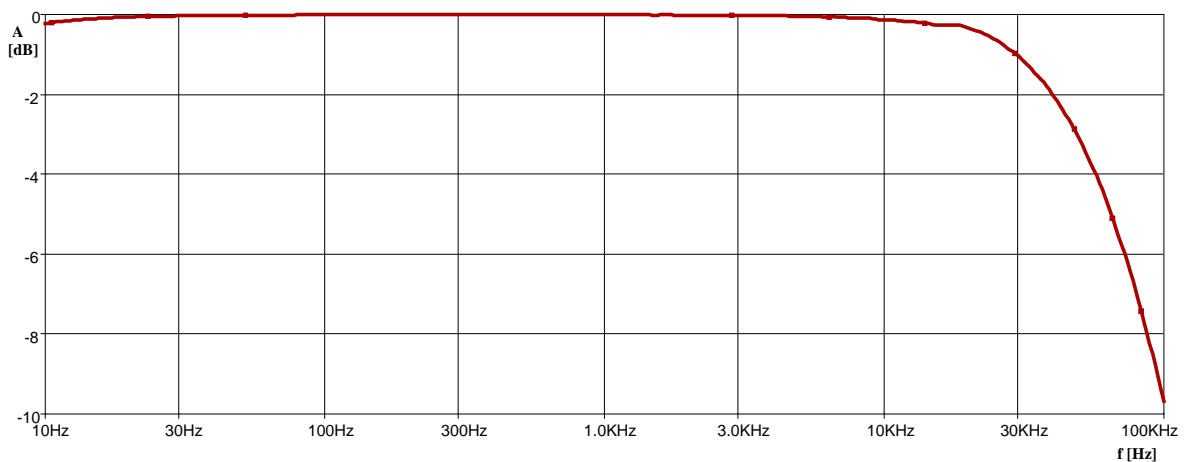


Obr. 31 - Schéma zapojení obvodu s kmitočtovou kompenzací a vf filtry bez pásmových filtrů

Vliv kompenzace na přenášené pásmo je zobrazen v grafech ze simulací, kde jeden zobrazuje frekvenční charakteristiku do 2 MHz a druhý obsahuje detail pásma do 100 kHz. Z toho je vidět, že pokles začíná již v pracovní oblasti a dosahuje přibližně poklesu 0,5 dB na kmitočtu 20 kHz. Tento pokles je způsoben výstupním filtrem ze součástek R11 a C9. Ten má zlomový kmitočet 48 kHz při poklesu 3 dB. Zde by bylo vhodné lépe zvolit hodnoty součástek tak, aby při střední poloze potenciometrů byla frekvenční charakteristika v pásmu 20 Hz až 20 kHz vyrovnaná a také je nutné brát ohled na vznik možných nestabilit.



Obr. 32 - Frekvenční amplitudová charakteristika s kmitočtovou kompenzací do 2 MHz



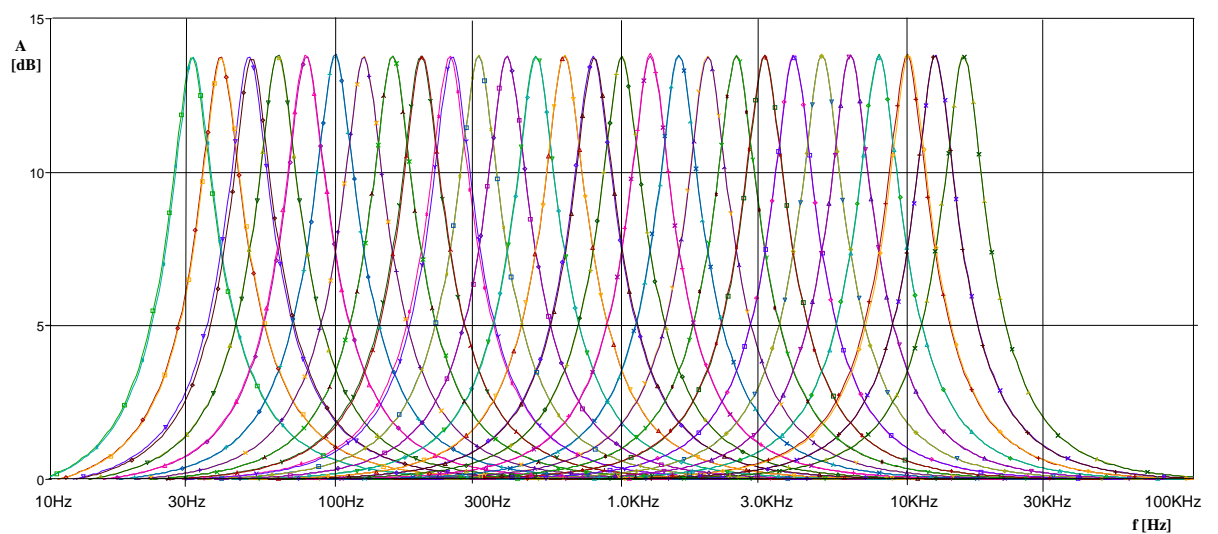
Obr. 33 - Detail frek. amp. char. s kmitočtovou kompenzací do 100 kHz

## 6.4 Výběr součástek pásmových propustí

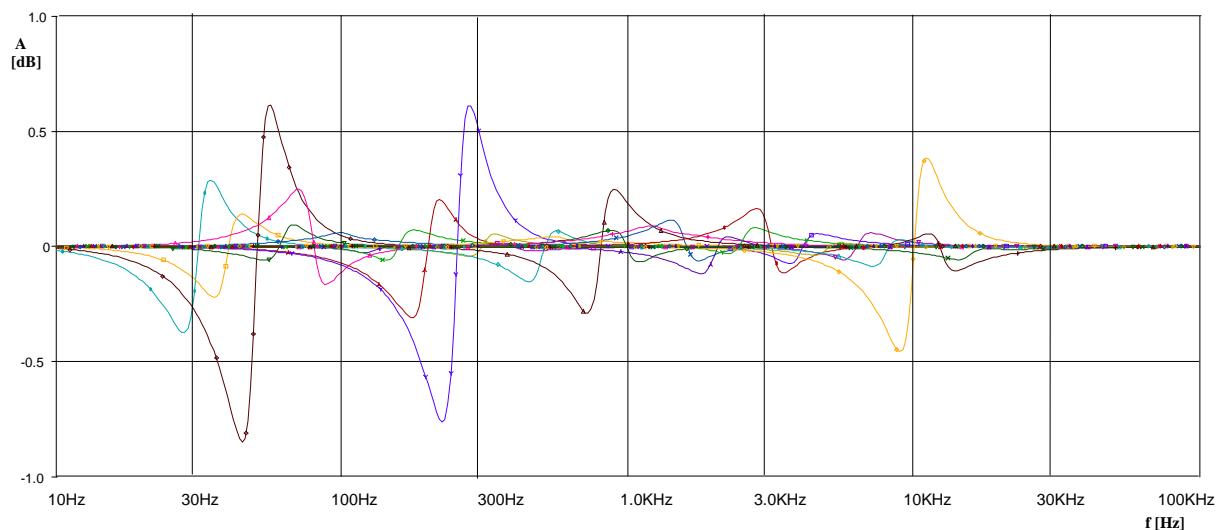
Aby byla dosažena co nejvyšší přesnost, tak hodnota kondenzátorů byla pro výpočet pevně zvolena a výsledná kapacita je vhodně složená z kondenzátorů vyrobených v normalizovaných řadách v 2,5% a 5% toleranci. Zjednodušení by přinesla volba pouze několika rozdílných hodnot kapacity kondenzátorů (nevolit různou kapacitu pro každý filtr). Takto by se vybralo několik hodnot kondenzátorů s nízkou tolerancí a více shodných součástek by snížilo cenu kvůli množstevním slevám. Hodnota rezistorů se dopočítala a paralelně složila z dostupných hodnot tak, aby rozdíl vypočtené hodnoty a skutečné hodnoty nebyl ve výsledné funkci vyšší než 1 dB.

Graf ze simulace ukazuje frek. amp. charakteristiky filtrů s ideálními a dopočtenými hodnotami. Rozdíl není příliš viditelný, protože všechny filtry s ideálními a dopočtenými hodnotami se překrývají. Proto v následujícím grafu je proveden rozdíl těchto charakteristik a vyjadřuje tak chybu mezi ideálním a skutečným průběhem. Z tohoto grafu lze vidět, že největší chyba přes 0,5 dB se objevuje pro kmitočty 50 Hz, 250 Hz a další výrazný rozdíl je pro kmitočty 10 kHz, kde velikost chyby dosahuje přibližně 0,4 dB.

Tyto simulace byly provedeny pro každou pásmovou propust samostatně, jakoby ekvalizér obsahoval pouze jeden korektor. Tím byl odstraněn impedanční vliv tahových potenciometrů.



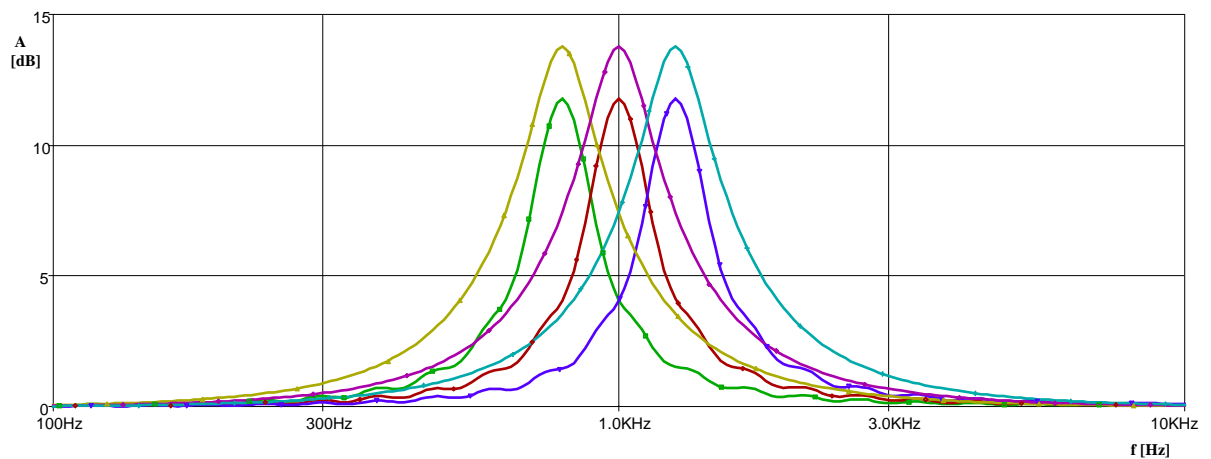
Obr. 34 - Fr. ampl. char jednotlivých pásem ze spočítaných a složených hodnot.



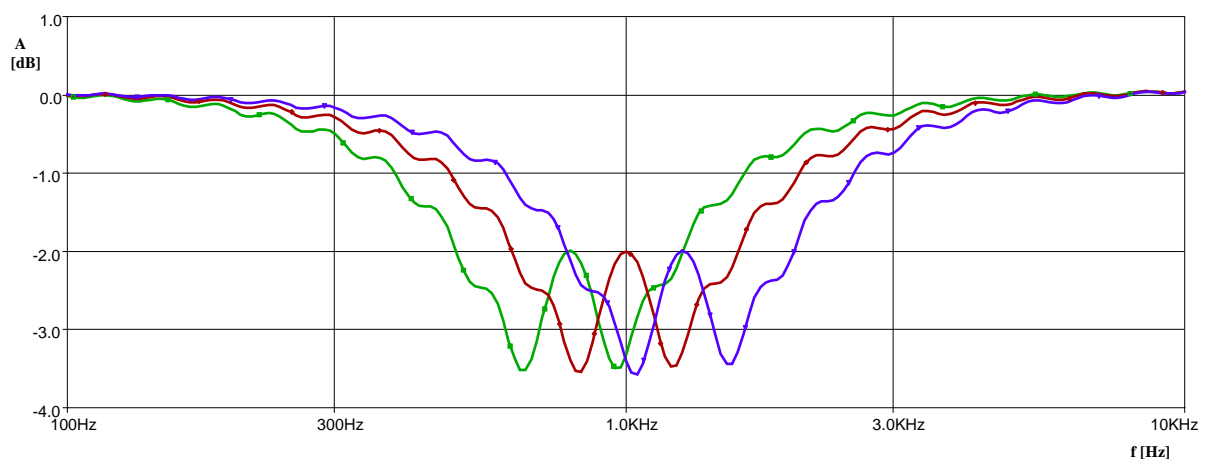
Obr. 35 - Rozdílová funkce mezi spočtenými a složenými hodnotami

Ve skutečném obvodu mají potenciometry vliv na tvar filtrů. Následující simulace ukazují rozdíl v charakteristikách, pokud je do sumačního obvodu zařazen pouze jeden pásmový filtr nebo 28 pásmových filtrů. U obvodu s 28 pásmy byl nastaven potenciometr 1 kHz na maximální zesílení, ostatní byly ve středové poloze.

Zde se projevuje ovlivnění jednoho pásmového filtru sousedními a vliv potenciometrů. Je vidět výrazný pokles amplitudy, který vytváří nejvyšší chybu a mírné zvlnění spodní části charakteristiky. Změnu amplitudy přenosu filtrů je možné jednoduše kompenzovat změnou zisku operačního zesilovače OZ4. Tato změna byla provedena v simulaci pro graf č. 38, kde hodnota zisku obou obvodů je přibližně stejná a velikost chyby pak dosahuje 2 dB.

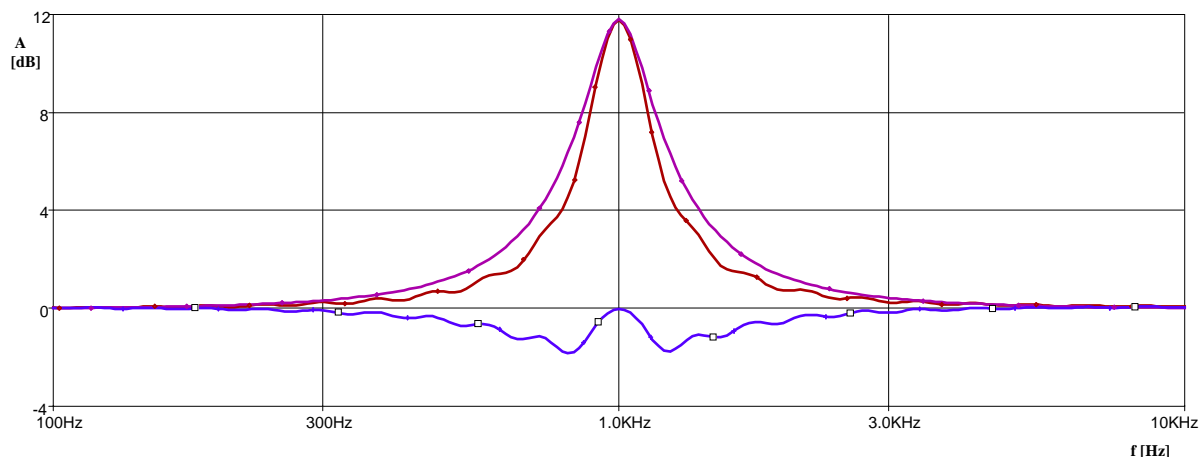


Obr. 36 - Fr. amp. char. Ideálních obvodů a obvodu s 28 pásmy



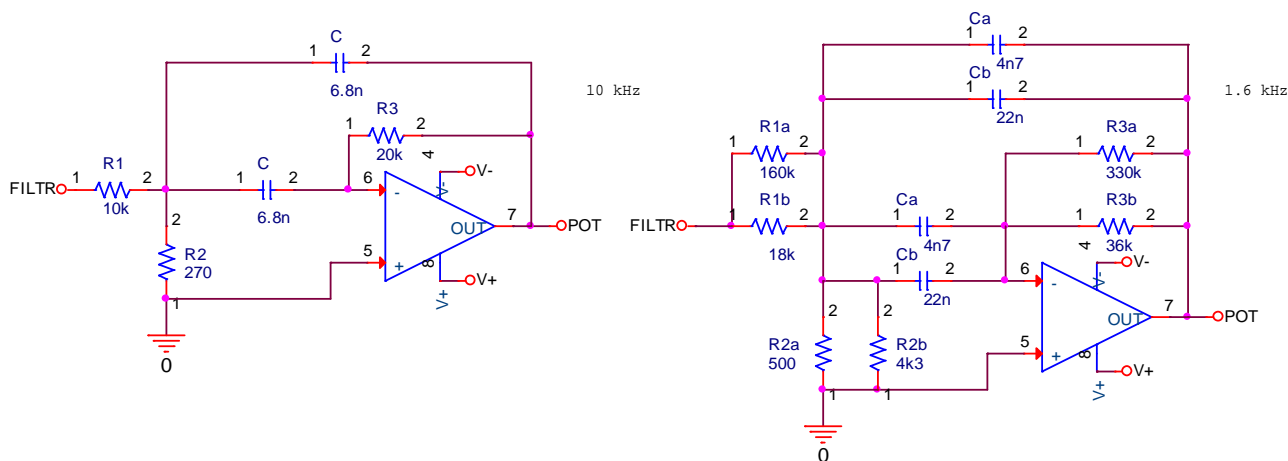
Obr. 37 - Rozdílová funkce samostatného obvodu a obvodu obsahující 28 pásem





Obr. 38 - Graf ze simulace, kde byly obvody nastaveny na stejný přenos.  
 Fialová – frek. amp. ch. jednoho filtru v sumační části.  
 Červená frek. amp. ch. obvodu s 28 pásmy, jedno pásmo max zeřízeno  
 Modrá – rozdílová funkce

Skládání součástek filtrů je znázorněno dvěma zapojeními. U prvního nebylo potřeba hodnoty nijak skládat (pro 10 kHz), protože bylo možné vybrat z výrobní řady hodnot. Druhý případ ukazuje nejméně příznivou variantu (pro pásmo 1,6 kHz), kde bylo potřeba každou spočítanou hodnotu složit ze dvou součástek. Vypočítané hodnoty a osazené součástky jsou zobrazeny v tabulce v příloze.



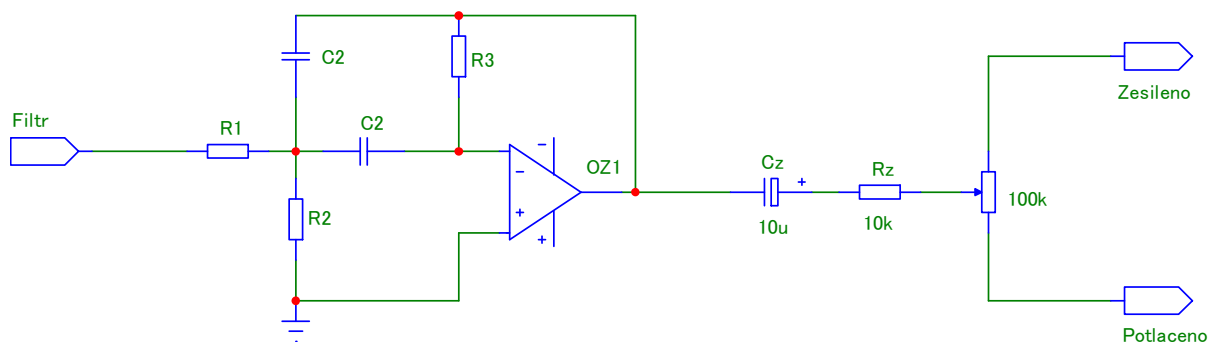
Obr. 39 - Schéma zapojení filtru, u kterého nebylo zapotřebí hodnotu skládat a filtru kde všechny vypočtené hodnoty jsou složeny.

## 7 Popis měření a výsledků

Po zprovoznění zařízení bylo provedeno měření na audioanalyzátoru *Audio precision 2700*. Zdroj signálu byl použit nesymetrický s vnitřním odporem  $20\ \Omega$ . Efektivní hodnota napětí byla  $0,5\ \text{V}$ .

Výstupem jsou grafy, ve kterých je zobrazena frekvenční amplitudová charakteristika jednotlivých filtrů. Tento graf č. 3 byl změřen tak, že byl nastaven vždy jeden potenciometr na maximální zesílení a ostatní ponechány ve středové poloze. V charakteristikách jsou patrné vysoké rozdíly amplitud přenosu. Tyto rozdíly jsou způsobeny elektrolytickými kondenzátory o hodnotě  $10\ \mu\text{F}$  zařazenými na výstupy filtrů. Jejich reálná rozdílná kapacita má vliv na velikost výsledné impedance složené z kondenzátoru  $C_z$  a rezistoru  $R_z$ , kde jeho hodnota  $10\ \text{k}\Omega$  byla zvolena tak, aby byl v sumačním obvodu dosažen jednotkový přenos.

Zvlnění lze snížit náhradou elektrolytického kondenzátoru  $C_z$  svitkovým s nízkou tolerancí. Velikost kapacity lze použít  $4,7\ \mu\text{F}$ , kde by ovlivnění nejnižšího pásma  $31,5\ \text{Hz}$  bylo zanedbatelné.



Obr. 40 - Zapojení jedné pásmové propusti s potenciometrem

Vliv na rozdílnost zisků má neideální nastavení středové polohy potenciometrů. Namísto tahových potenciometrů se středovou aretací byly použity potenciometry bez aretace. V grafu č. 1 je zobrazena frek. ampl. charakteristika, ve které jsou všechny potenciometry nastaveny do stejné polohy. Poté byla u všech stejně měněna míra korekce. Je vidět, že průběh bez nastavených korekcí není ideálně rovný, ale projevuje se mírné zvlnění. Toto zvlnění je způsobeno tím, že všechny potenciometry nebyly zarovnány ideálně do roviny. Tento vliv lze odstranit použitím potenciometrů s aretací střední polohy nebo delší dráhou, například  $60\ \text{mm}$  (oproti použitým potenciometrům s délkou dráhy  $40\ \text{mm}$ ), kde by mírná odchylka v nastavení neměla tak výrazný vliv.

Pro maximální a minimální míru korekce jsou vidět amplitudové propady na kmitočtech 80 Hz a 5,5 kHz. To je způsobeno opět rozdílným přenosem filtrů. Pro nižší míru korekce (v grafu  $\pm 4$  dB) je vidět snížení zvlnění vlivem kombinace filtrů.

Další graf č. 4 zobrazuje jedno pásmo na kmitočtu 1 kHz nastavený na různé úrovně přenosu. Ostatní byly nastaveny na středovou polohu. Je vidět, že míra zesílení i zeslabení je stejná. V detailu pouze pro zesílení (graf č. 4, 7, 8) jsou zobrazeny kurzory a lze vidět zachovávání přibližné šířky pásma. Při změně hodnoty zesílení z maximálních 11,3 dB na 8,2 dB se změnila šířka pásma z 212 Hz na 242 Hz. Výraznější rozšíření nastává pro nízké úrovně korekcí. Pro úroveň korekce 2,6 dB ležely krajní 1/3 oktávové kmitočty 890 Hz a 1,122 kHz při poklesu amplitudy o 1,3 dB.

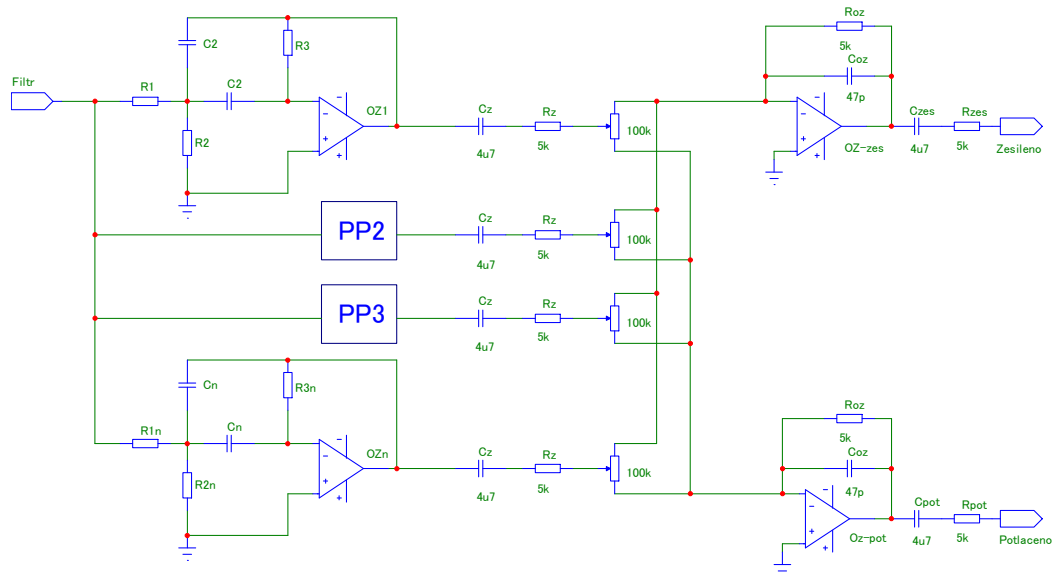
Změna činitele jakosti je názorně vidět ze třech grafů provedených pro tři sousední pásma na kmitočtech 800 Hz, 1 kHz a 1,2 kHz. V grafu č. 11 jsou potenciometry nastaveny na maximální míru korekce. Zvlnění přes 1 dB je způsobeno rozdílnými zisky.

V druhém případě (grafu č. 13) jsou krajní potenciometry nastaveny na maximální míru korekce a středový nastaven do středové polohy. Teoreticky by měl být přenos na kmitočtu 1 kHz roven 0 dB, ale toho nelze s analogovými filtry dosáhnout. Lze stále vidět podobnost s nastavením poloh potenciometrů. Taktéž je to v třetím případě (grafu č. 15), kde byl prostřední potenciometr nastaven do dolní polohy – tedy pro maximální potlačení. Vzájemné ovlivňování korektorů způsobí snížení maximálních přenosů, ale požadavek na zesílení 800 Hz pásma, potlačení 1 kHz a zesílení 1,2 kHz zůstává zachován,

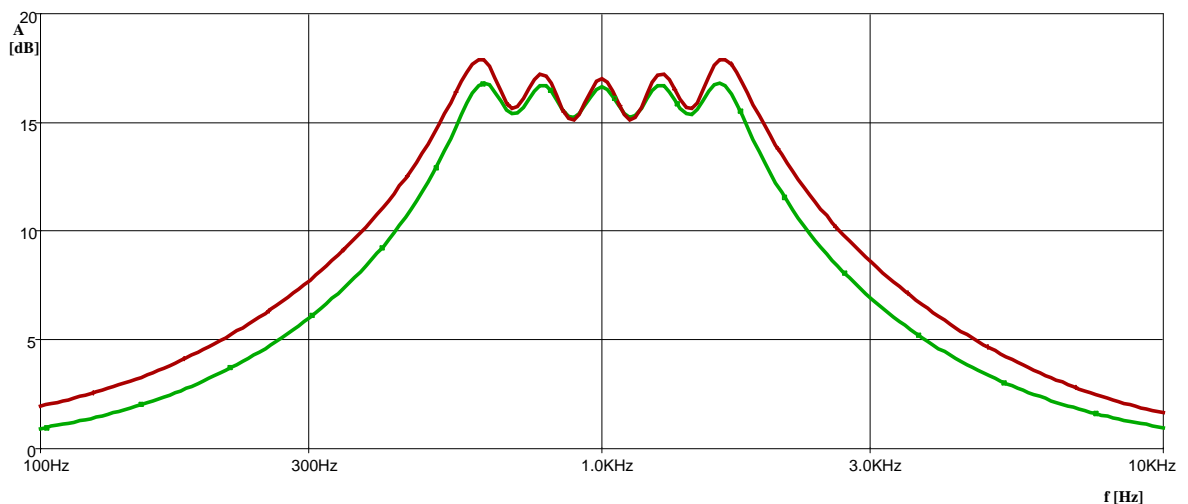
V dalším grafu č. 17 byla provedená spektrální analýza výstupních produktů ekvalizéru, kdy na vstup nebyl přiváděn žádný signál. Efektivní hodnota šumu byla změřena v pásmu do 500 kHz - 26  $\mu$ V a v pásmu do 20 kHz - 12  $\mu$ V. Kromě složky síťového brumu se na kmitočtech v oblasti 70 kHz objevují spektrální čáry. Nejvýraznější z nich dosahuje úrovně -102 dB, což odpovídá 8  $\mu$ V. Tyto složky mohou být způsobeny kmitáním ekvalizéru a mohly mít vliv na jeho nestabilitu před provedením kompenzace.

Toto kmitání lze odstranit úpravou topologie zapojení tak, aby výstupy z potenciometrů „zesíleno“ a „potlačeno“ byly prvně zpracovávány operačním zesilovačem, u kterého by se kmitočtová kompenzace neprojevovala tak výrazně na frekvenční am. charakteristice jako u sumační části a odstraňovala by především rušení vzniklé v pásmových propustech. Tato úvaha je znázorněna na obrázku č. 41. Problémy se změnou úrovně pásmových propustí, po provedení modifikace, lze odstranit změnou zisku OZ zařazeného před vstupy pásmových propustí.

Nevýhodou této úpravy je navýšení impedančního ovlivňování potenciometrů a navýšení zvlnění při kombinaci více pásem, jak je vidět v simulaci na obr. č. 42.



Obr. 41 - Návrh úpravy zapojení k potlačení rušení



Obr. 42 - Amp. frek. ch. simulace 5 pásem původního obvodu a upraveného  
Zelená charakteristika – původní zapojení  
Červená charakteristika – po úpravě

Z měření závislosti harmonického zkreslení na úrovni vychází limity pro velikost vstupního signálu. Měření bylo provedeno s šířkou pásma 10 Hz až 500 kHz. Nejméně příznivý případ nastává tehdy, jsou-li všechny potenciometry nastavené do polohy maximálního zesílení. Poté dochází k saturaci operačních zesilovačů již při vstupním napětí 1,3 V. Když jsou potenciometry nastavené do středové polohy, k omezení dochází až při 4,3 V. Optimální vstupní úroveň napětí lze zvolit hodnotu 0,775 V, tedy 0 dBu. Pak je k dispozici rezerva o velikosti až 15 dB v závislosti na poloze potenciometrů.

Pro hodnotu vstupního napětí 0,775 V vychází útlum celkového činitele harmonického zkreslení 85 dB, pro polohu všech potenciometrů nastavených na maximální zesílení a 89 dB pro středovou polohu. V procentuálním vyjádření je činitel harmonického zkreslení 0,0056% a 0,0035%.

V závislosti zkreslení na kmitočtu se výrazně projevuje vliv kmitočtové kompenzace. Ta snížila rychlost přeběhu operačních zesilovačů. S rostoucím kmitočtem nestíhá obvod věrně sledovat signál, a proto roste činitel harmonického zkreslení (klesá útlum celk. činitele harm. zkreslení).

## 8 Závěr:

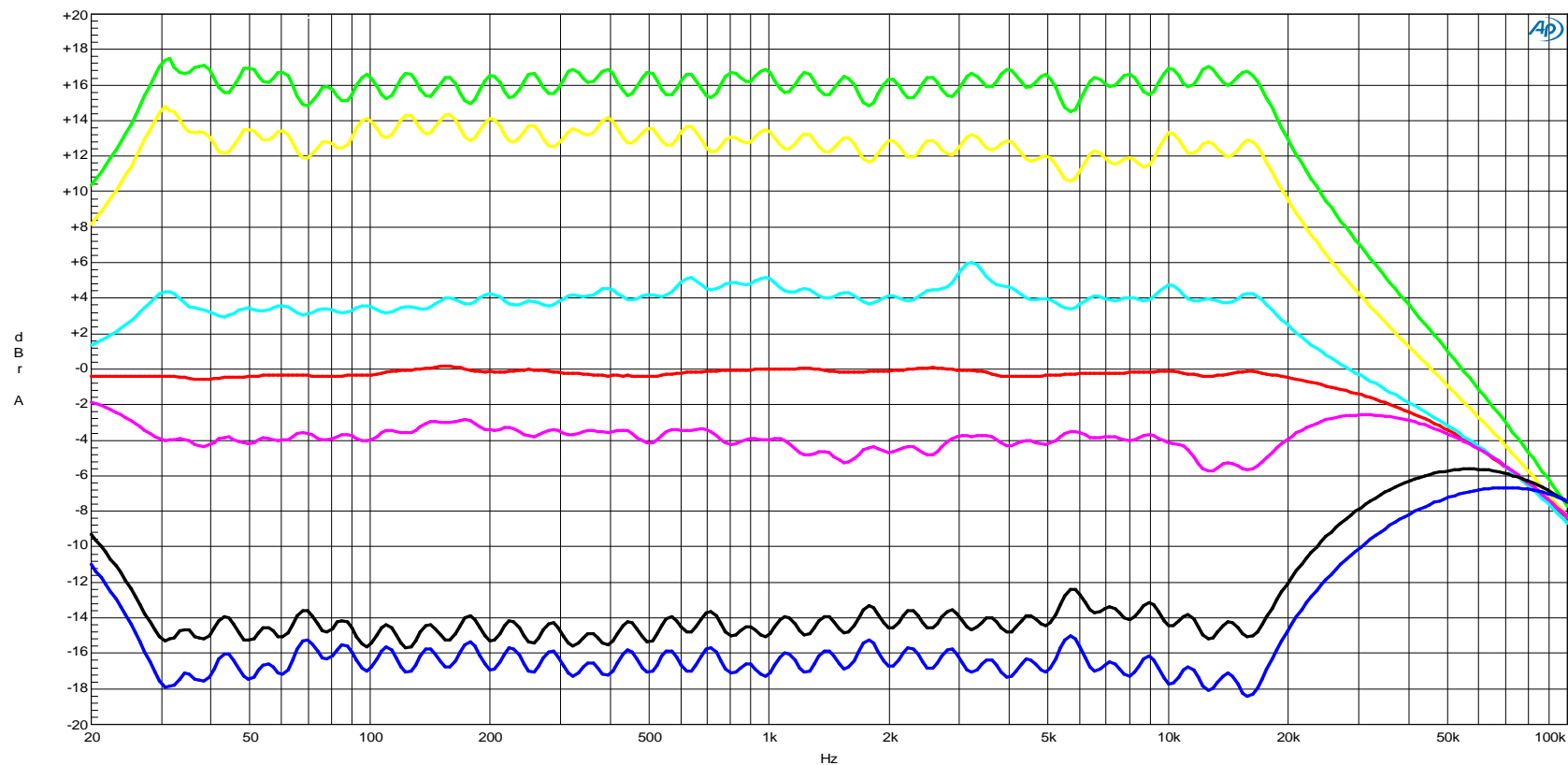
Ekvalizér byl po problémech s nestabilitou zprovozněn o odměřen. Při porovnání ze simulacemi je vidět téměř shodná podoba a daná topologie odpovídá předpokladům na zachování šířky pásma a kombinační vlastnosti jednotlivých pásem. Vzniklé rozdíly oproti simulacím jsou dány tolerancemi součástek, které nejsou pro zapojení natolik kritické, jako parazitní vlivy elektrolytických kondenzátorů. Ty lze ze zapojení odstranit. Další omezení způsobují tahové potenciometry. Jejich nemožnost středové aretace měla vliv na tvar naměřených charakteristik. Nejen z tohoto důvodu by mělo být zapojení rozšířeno o přepínač, který umožní přemostění ekvalizéru (BYPASS).

Tímto zapojením se nepodařilo dosáhnout shodných parametrů jako u špičkových výrobců zvukové techniky, ale poskytuje s porovnáním s ostatními druhy zapojení (především obvodů s nekonstantním  $Q$ ) schopnost kopírovat tvar frekvenční amplitudové charakteristiky s nastavením polohy potenciometrů. Po úpravách zapojení, změně součástkové základny a doplnění o kvalitnější vstupní a výstupní obvody lze jeho funkci zlepšit. Volba 1/3 oktávového pásma má výhody ve své univerzálnosti, ale při snížení počtu pásem by zařízení splňovalo potřeby na rozsah korekcí, zjednodušila by se konstrukce a zlepšily by se parametry. Především by se snížila úroveň šumu, nebylo by nutné natolik kompenzovat OZ a tím by kleslo harmonické zkreslení.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] RANE CORPORATION. *RaneNotes 101 & 117 combined: Constant-Q Graphic Equalizers* [online]. 1982 a 1987. 11/05 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.rane.com/note101.html>
- [2] HÁJEK, Karel. *Kmitočtové filtry*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002, 535 s. ISBN 80-730-0023-7.
- [3] ELLIOTT, Rod. ELLIOTT SOUND PRODUCTS. *Expandable Graphic Equaliser: Project 75* [online]. 2001, 2014 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://sound.westhost.com/project75.htm>
- [4] A. BOHN, DENNIS. Constant-Q Graphic Equalizers. 1986, s. 16. Dostupné z: <http://www.rane.com/pdf/constanq.pdf>.
- [5] *Datový list: NE5534, SA5534, SE5534, NE5534A, SA5534A, SE5534A*. Dostupné z: <http://onsemi.com>
- [6] PUNČOCHÁŘ, Josef. *Operační zesilovače v elektronice*. Praha: BEN, 1996, 479 s. SBN 80-901984-3-0.
- [7] BELZA, Jaroslav. 2004. *Operační zesilovače pro obyčejné smrtelníky*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 247 s. ISBN 80-730-0060-1
- [8] GAJDOŠÍK, Libor. 2013. *Návrh analogových filtrů*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 239 s. ISBN 978-80-7300-468-2.
- [9] SELF, Douglas. 2010. *Small signal audio design*. Oxford: Focal Press. ISBN 978-0-240-52177-0.
- [10] TUREČEK, Oldřich. 2008/12. *Tipy, triky, nastavení - Ekvalizéry (1): sekce: pro muzikanty* [online]. [cit. 2015-05-06]. Dostupné z: <http://www.muzikus.cz/pro-muzikanty-serialy/Tipy-triky-nastaveni-Ekvalizery-1~06~srpen~2009/>

### Přílohy:

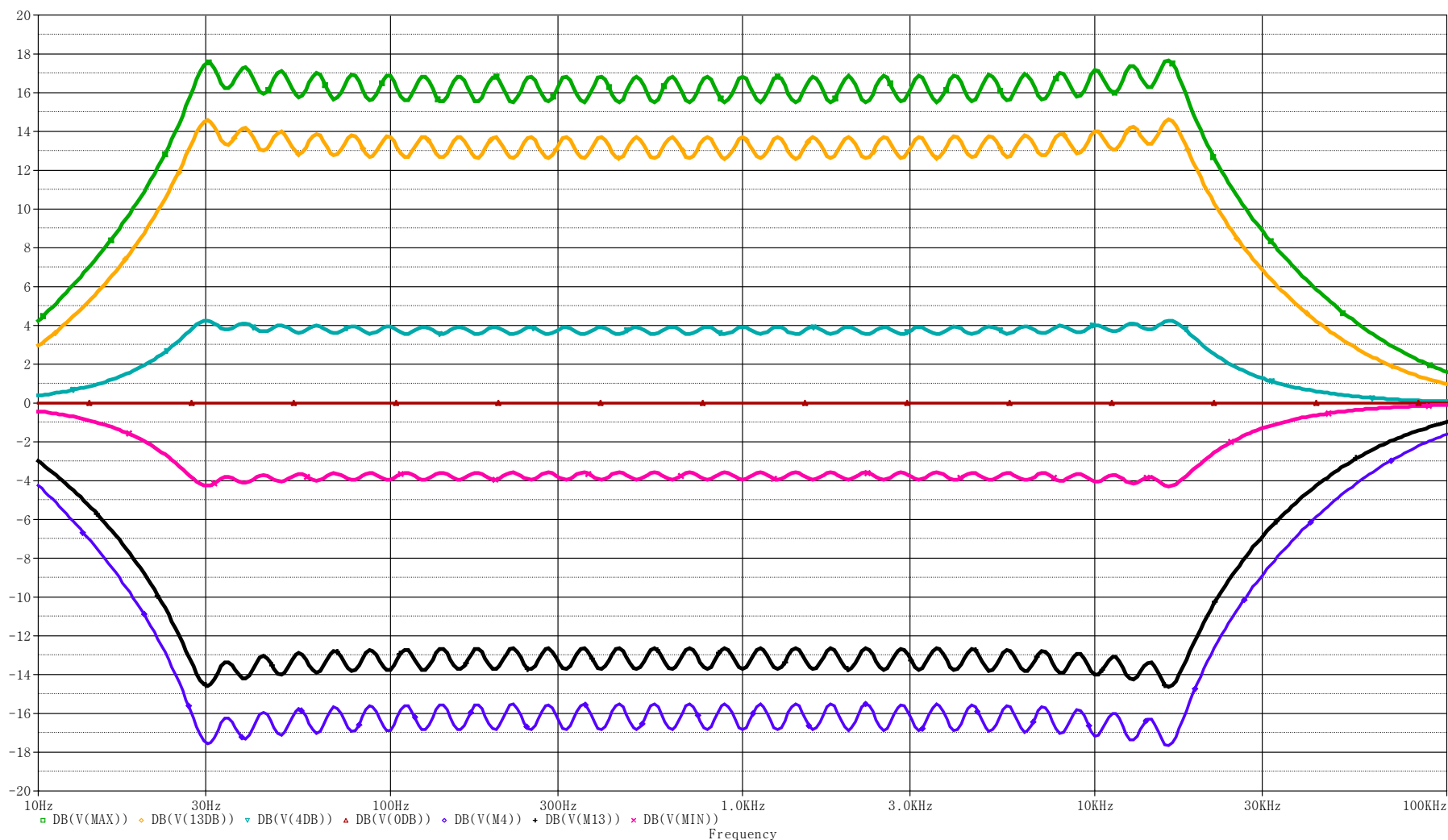


Sweep	Trace	Color	Line Style	Thick	Data	Axis	Comment
1	1	Red	Solid	3	Anlr.Level A	Left	stredni poloha
2	1	Green	Solid	3	Anlr.Level A	Left	100% zesileno
3	1	Yellow	Solid	3	Anlr.Level A	Left	75% zesileno
4	1	Cyan	Solid	3	Anlr.Level A	Left	25% zesileno
5	1	Magenta	Solid	3	Anlr.Level A	Left	25% potlaceno
6	1	Black	Solid	3	Anlr.Level A	Left	75% potlaceno
7	1	Blue	Solid	3	Anlr.Level A	Left	100% potlaceno

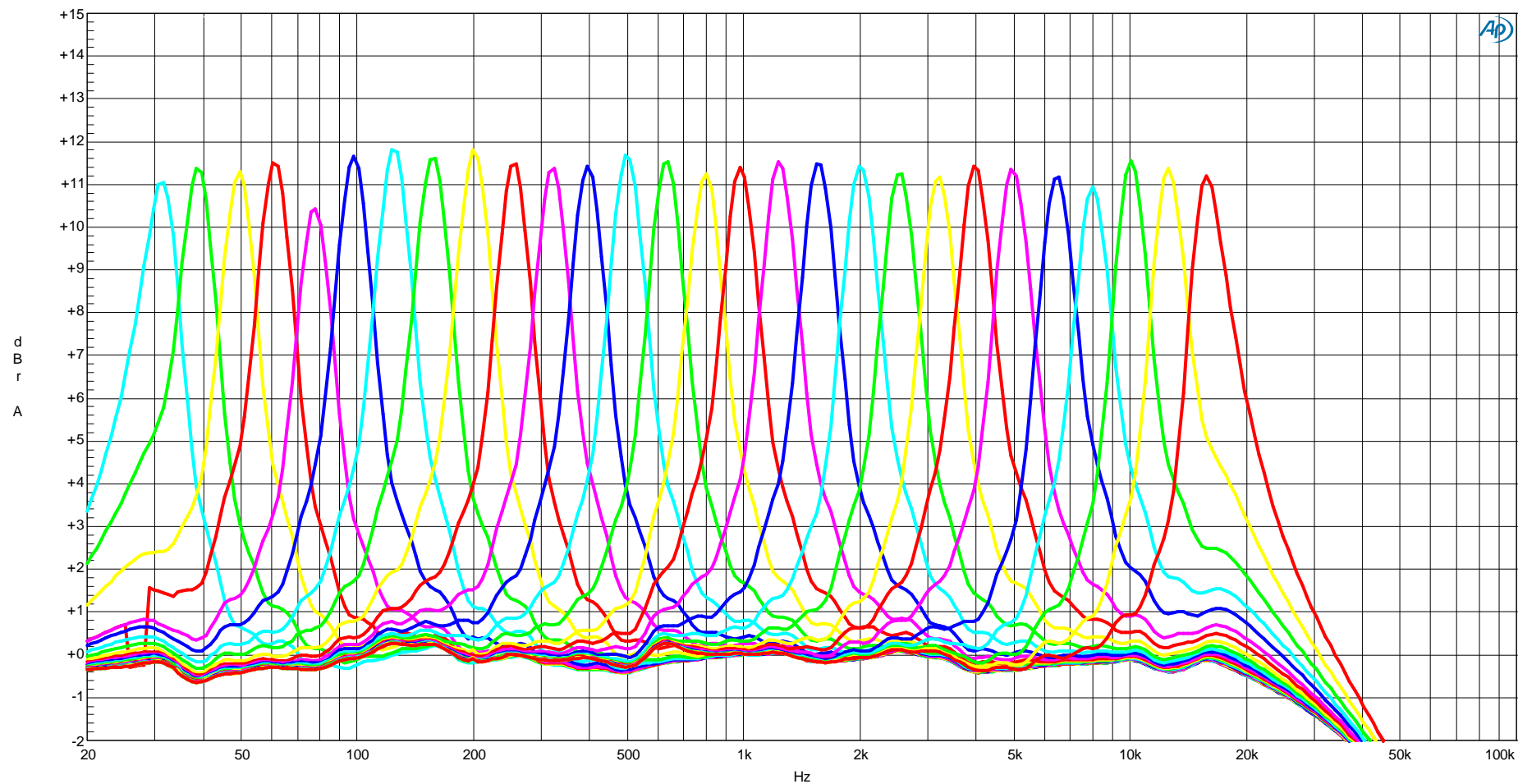
fr\_char - kopie.at27

Graf 1 - Všechny potenciometry nastaveny na maximální míru zesílení/potlačení, ±13 db a ±4 db





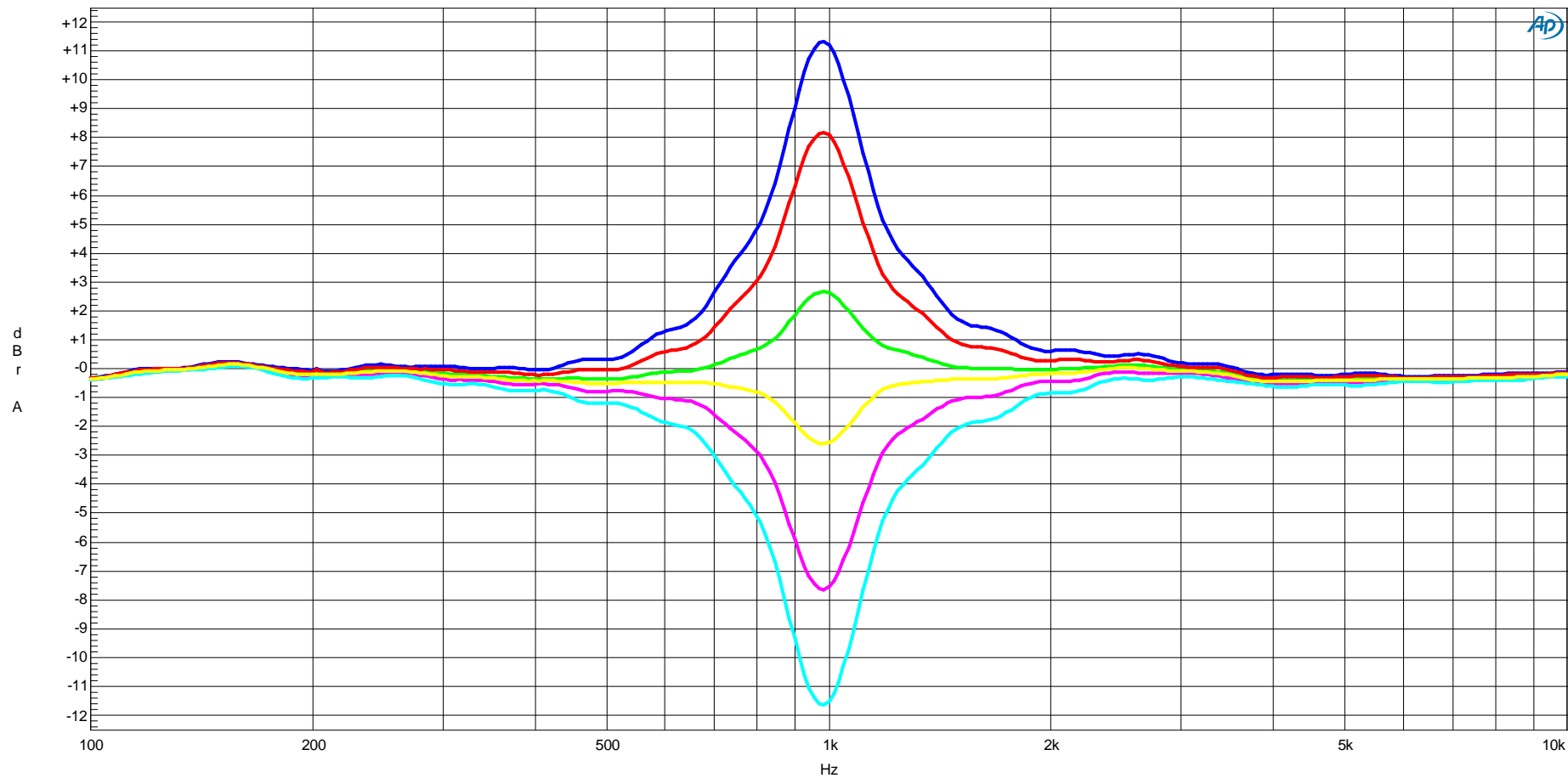
Graf 2 - Simulace: Všechny potenciometry nastaveny na maximální míru zesílení/potlačení,  $\pm 13$  db a  $\pm 4$  db



Sweep	Trace	Color	Line Style	Thick	Data	Axis	Comment
1	1	Cyan	Solid	3	Anlr.Level A	Left	
2	1	Green	Solid	3	Anlr.Level A	Left	
3	1	Yellow	Solid	3	Anlr.Level A	Left	

fr\_char\_jedn\_filtry\_vetsi.at27

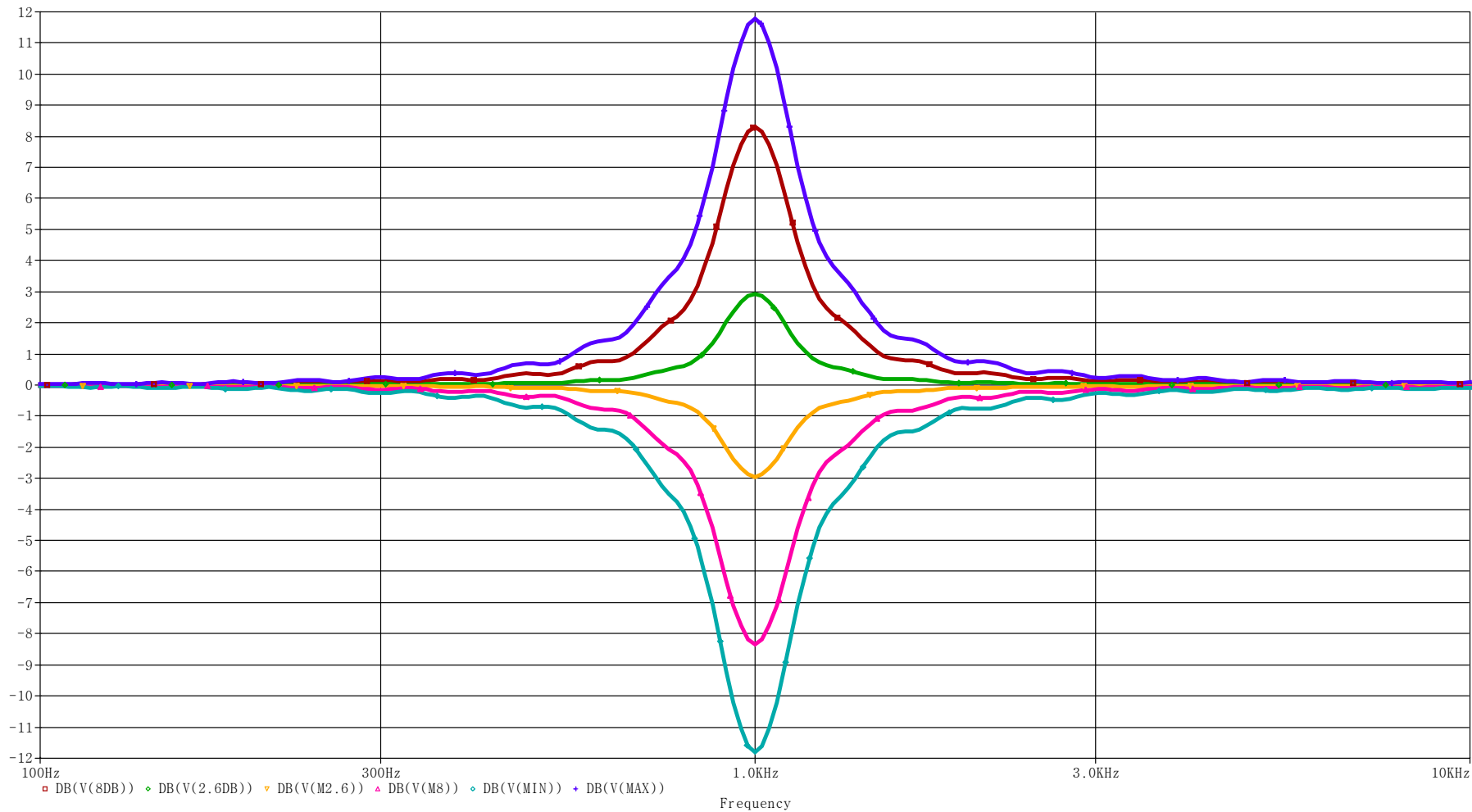
Graf 3 - Frekvenční amplitudová charakteristika jednotlivých pásmových propustí



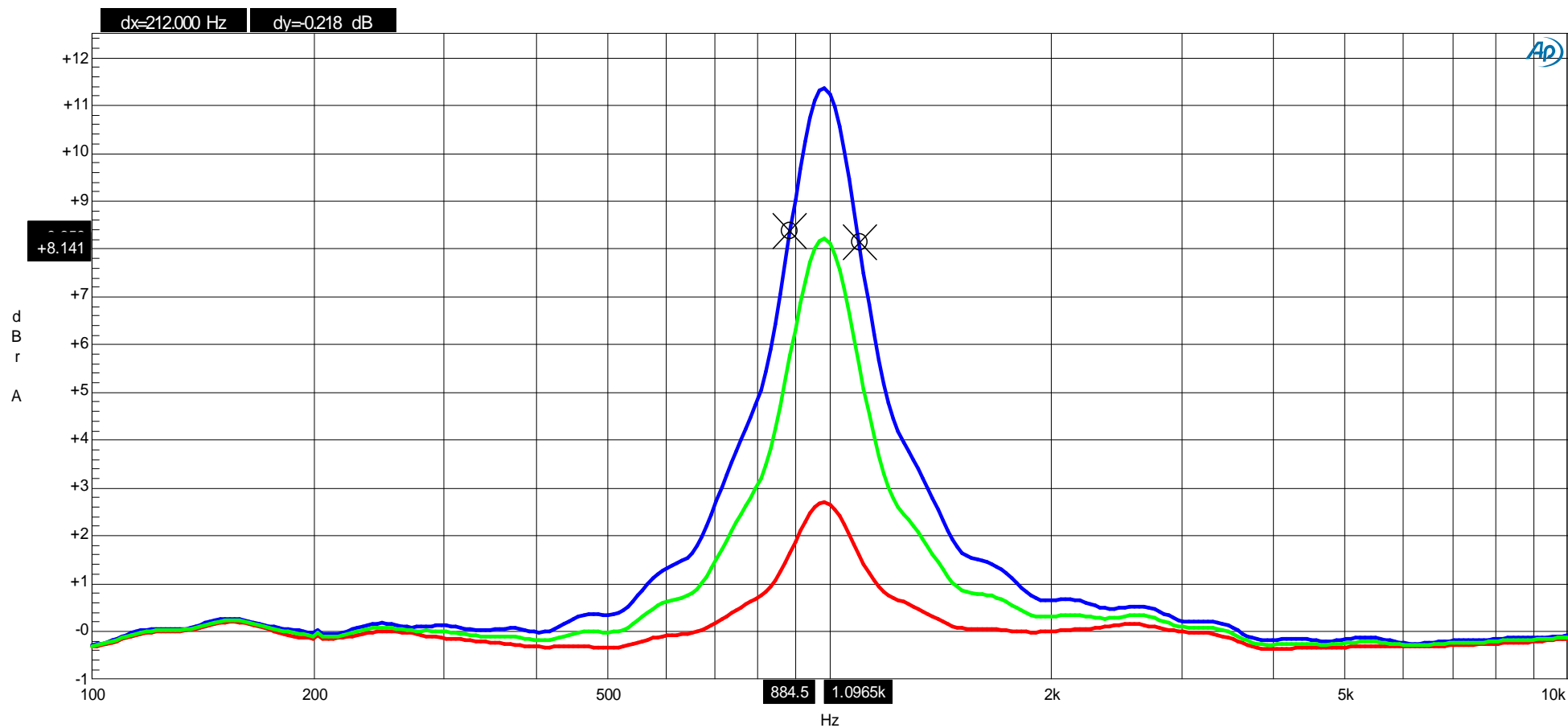
Sweep	Trace	Color	Line Style	Thick	Data	Axis	Comment
1	1	Blue	Solid	3	Anlr.Level A	Left	
3	1	Green	Solid	3	Anlr.Level A	Left	
4	1	Red	Solid	3	Anlr.Level A	Left	

fr\_char\_1kHz\_velky.at27

Graf 4 - Pásmová propust 1 kHz a různé intenzity korekcí



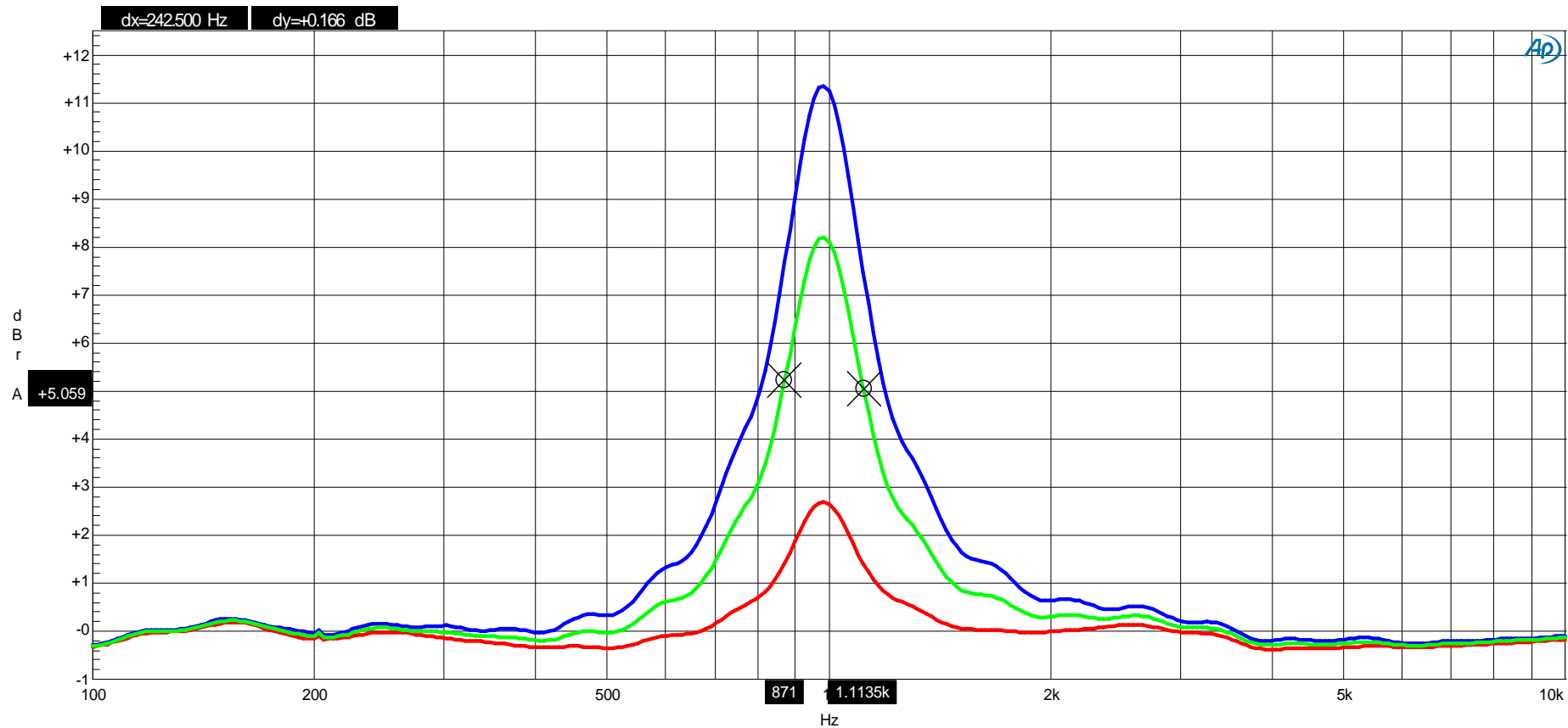
Graf 5 - Simulace: Pásmová propust 1 kHz a různé intenzity korekcí



Sweep	Trace	Color	Line Style	Thick	Data	Axis	Comment	Cursor1	Cursor2
1	1	Blue	Solid	3	Anlr.Level A	Left	max 11,3 dB	*+8.358 dBr	*+8.141 dBr
3	1	Red	Solid	3	Anlr.Level A	Left	max 2,7 dB	+1.635 dBr A	+1.597 dBr A
4	1	Green	Solid	3	Anlr.Level A	Left	max 8,2 dB	+5.776 dBr A	+5.597 dBr A

fr\_char\_1kHz-s\_kurzory\_1.at27

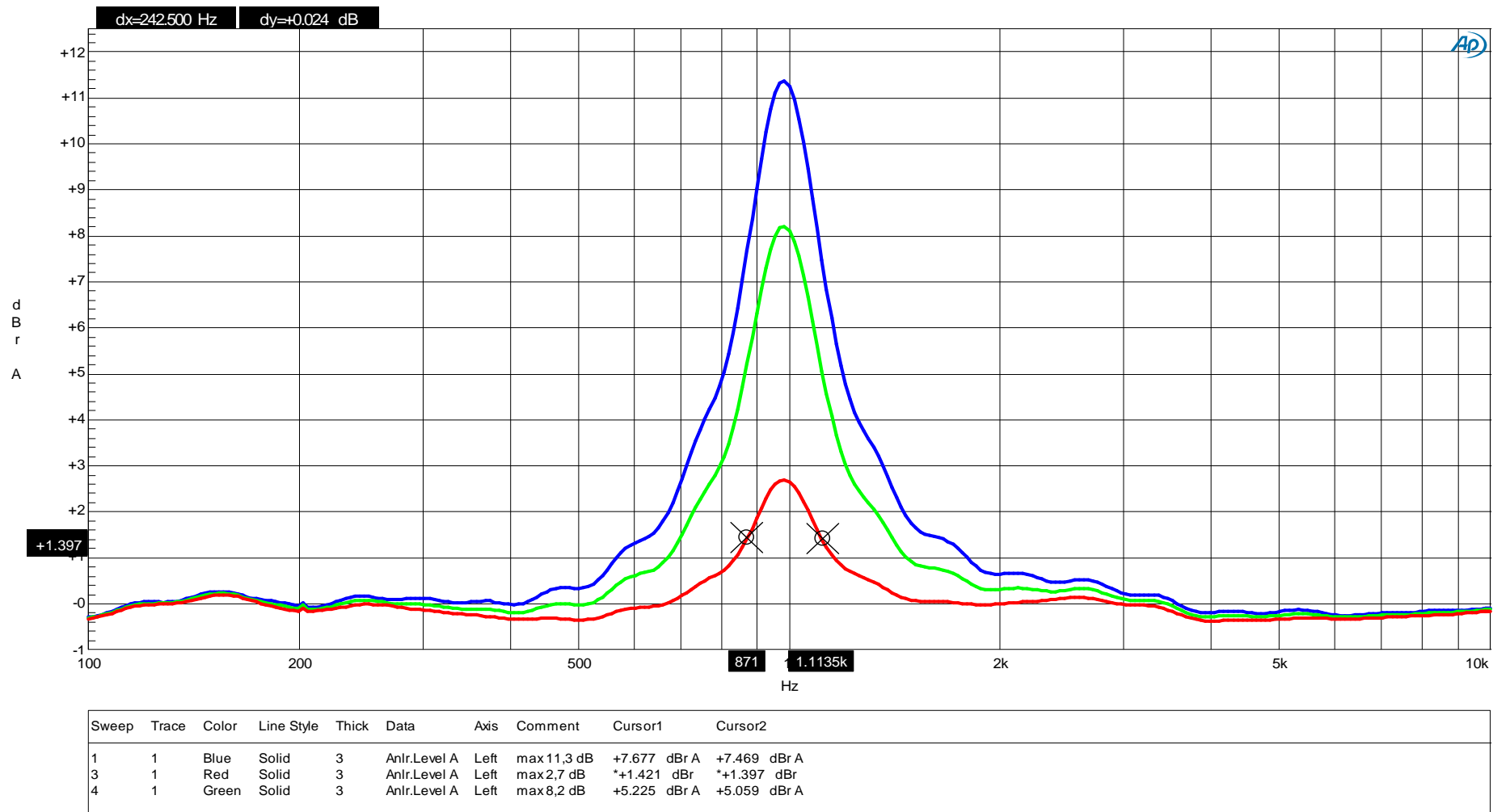
Graf 6 - Fr. amp. ch. pásmové propusti 1 kHz a vyznačené 3 dB pásmo pro maximální míru korekce



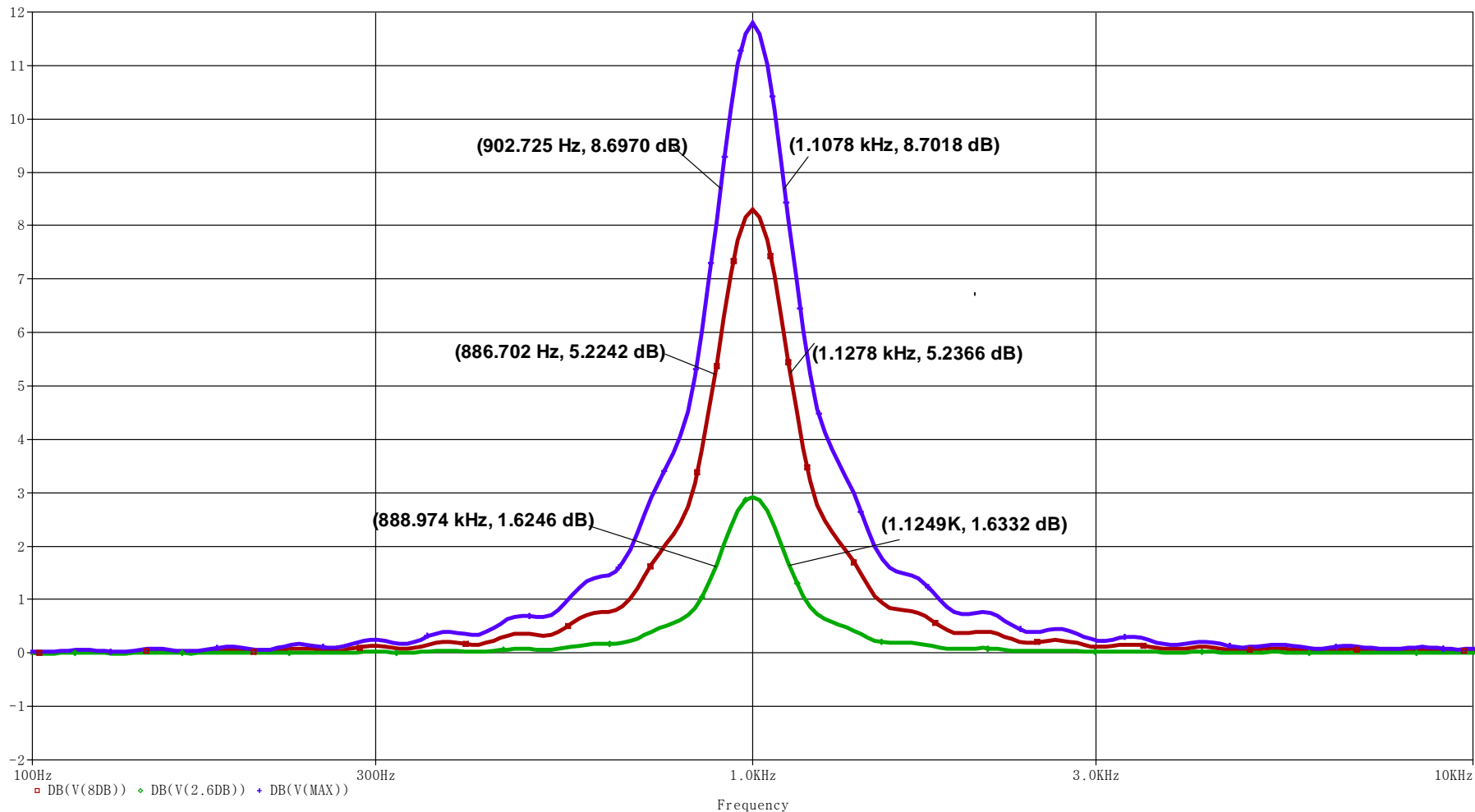
Sweep	Trace	Color	Line Style	Thick	Data	Axis	Comment	Cursor1	Cursor2
1	1	Blue	Solid	3	Anlr.Level A	Left	max 11,3 dB	+7.677 dBr A	+7.469 dBr A
3	1	Red	Solid	3	Anlr.Level A	Left	max 2,7 dB	+1.421 dBr A	+1.397 dBr A
4	1	Green	Solid	3	Anlr.Level A	Left	max 8,2 dB	+5.225 dBr A	*+5.059 dBr

fr\_char\_1kHz - s\_kurzory\_2.at27

Graf 7 - Fr. amp. ch. pásmové propusti 1 kHz a vyznačené 3 dB pásmo pro míru korekce 8 dB

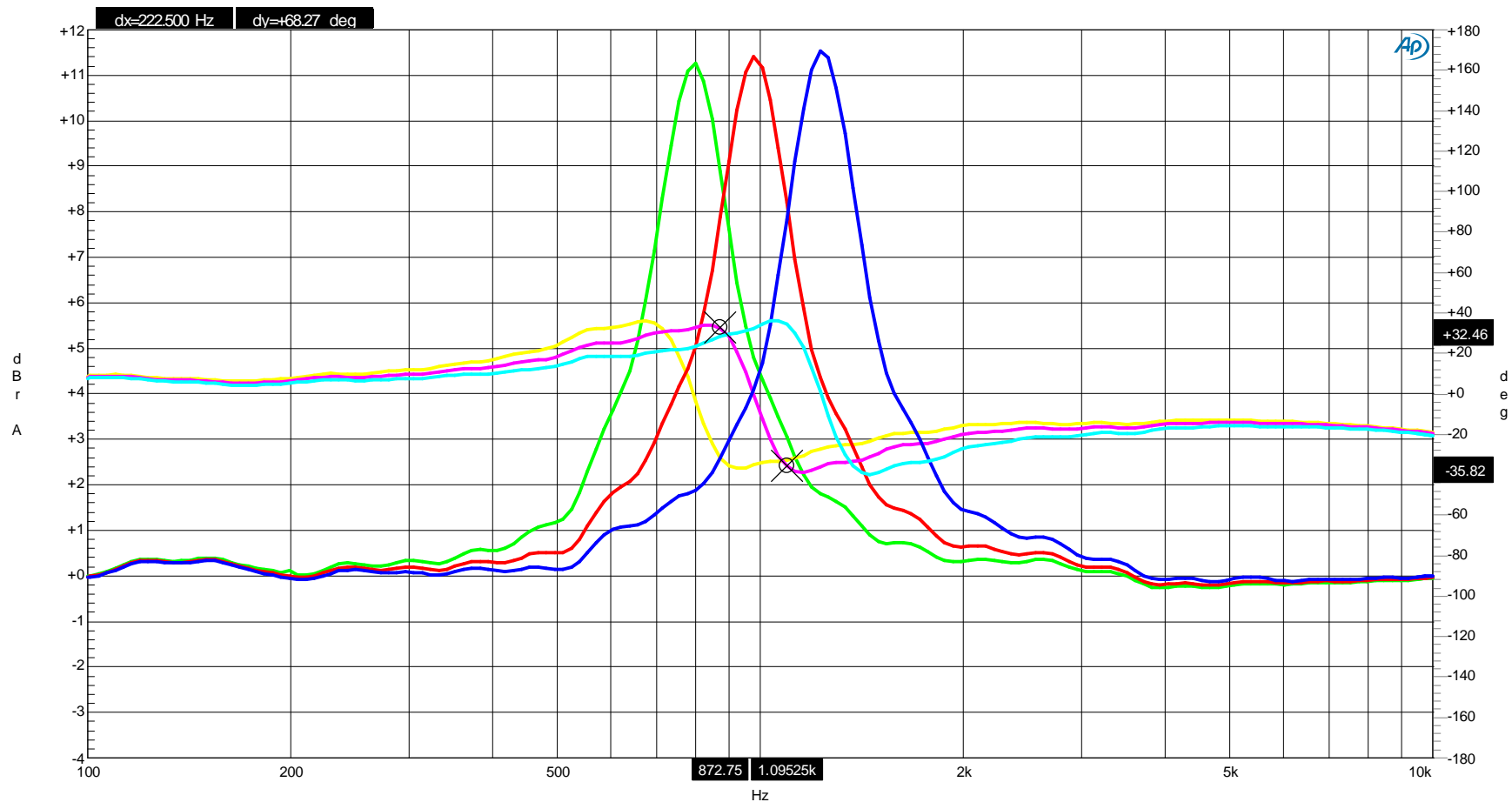


Graf 8 - Fr. amp. ch. pásmové propusti 1 kHz a vyznačené pásmo pro pokles o 1,5 dB



Graf 9 - Simulace pro jedno pásmo s různými úrovněmi – Značky vymezují 3 dB pásmo, pouze zelená pokles o 1,3 dB

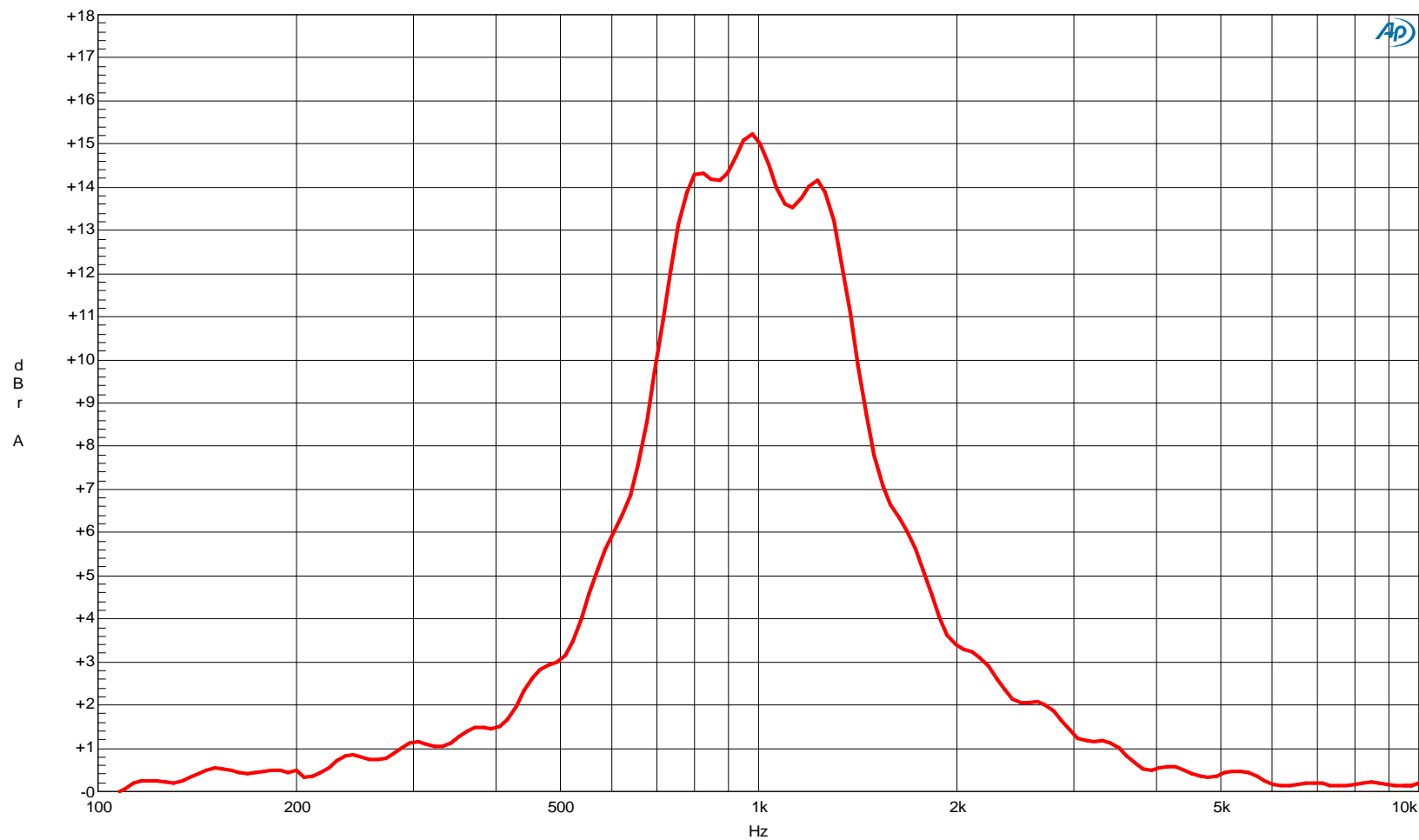




Sweep	Trace	Color	Line Style	Thick	Data	Axis	Comment	Cursor1	Cursor2
15	1	Green	Solid	3	Anlr.Level A	Left	fr. amp. ch. 800+8.877 dBr A	+3.059 dBr A	+3.059 dBr A
15	2	Yellow	Solid	3	Anlr.Phase	Right	faz. char. 800 H-31.48 deg	-32.86 deg	-32.86 deg
16	1	Red	Solid	3	Anlr.Level A	Left	fr. amp. ch. 1 k+7.876 dBr A	+8.199 dBr A	+8.199 dBr A
16	2	Magenta	Solid	3	Anlr.Phase	Right	faz. char. 1 kHz +32.46 deg	+32.46 deg	*-35.82 deg
17	1	Blue	Solid	3	Anlr.Level A	Left	fr. amp. ch. 1,2 k+2.603 dBr A	+7.835 dBr A	+7.835 dBr A
17	2	Cyan	Solid	3	Anlr.Phase	Right	faz. char. 1,2 kH+28.38 deg	+28.38 deg	+34.37 deg

fr\_char\_jedn\_filtry\_800\_15\_1,2k\_s\_fazi.at27

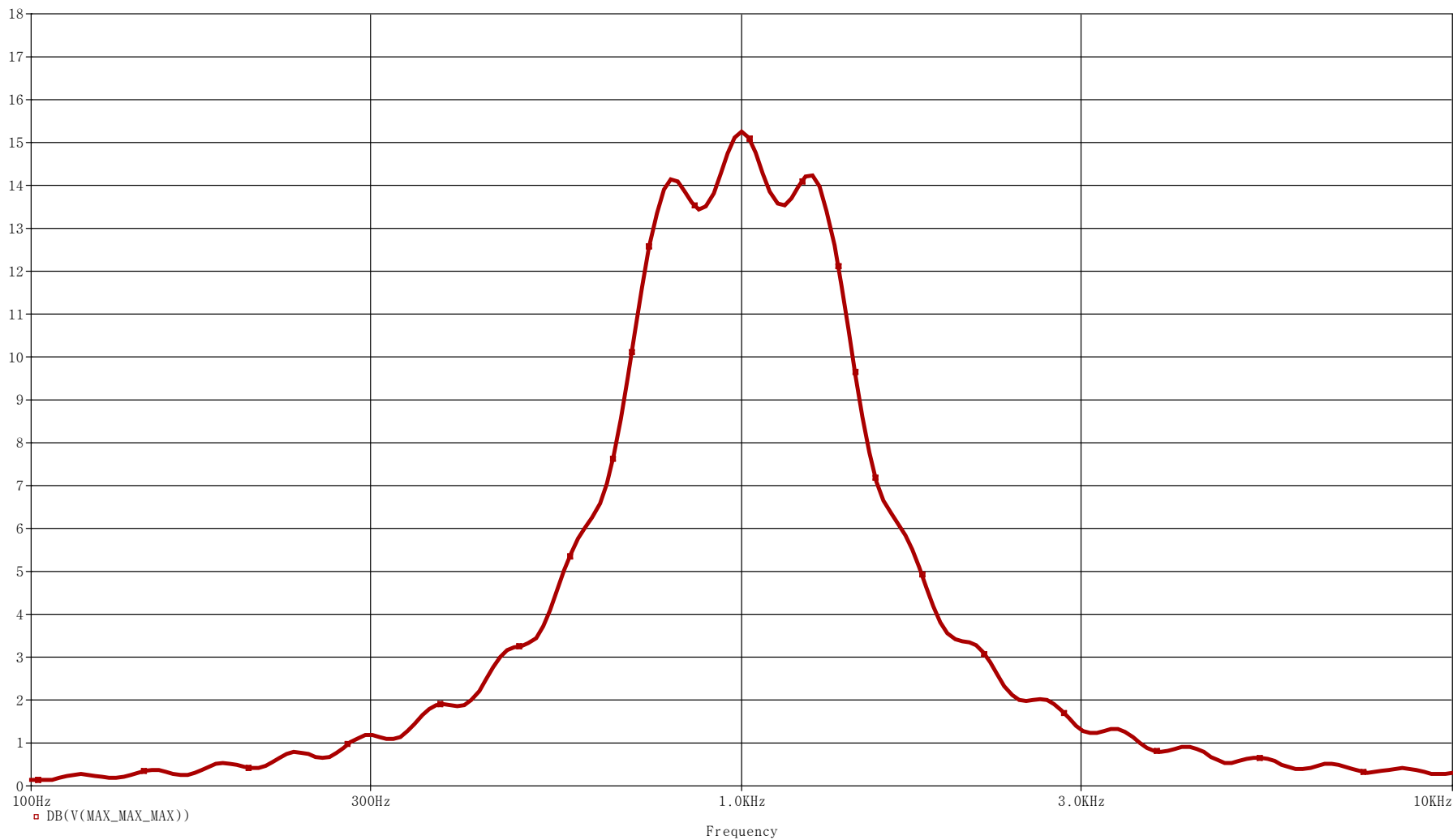
Graf 10 - Tři sousední potenciometry 800 Hz, 1 kHz, 1,2 kHz a jejich fázové charakteristiky



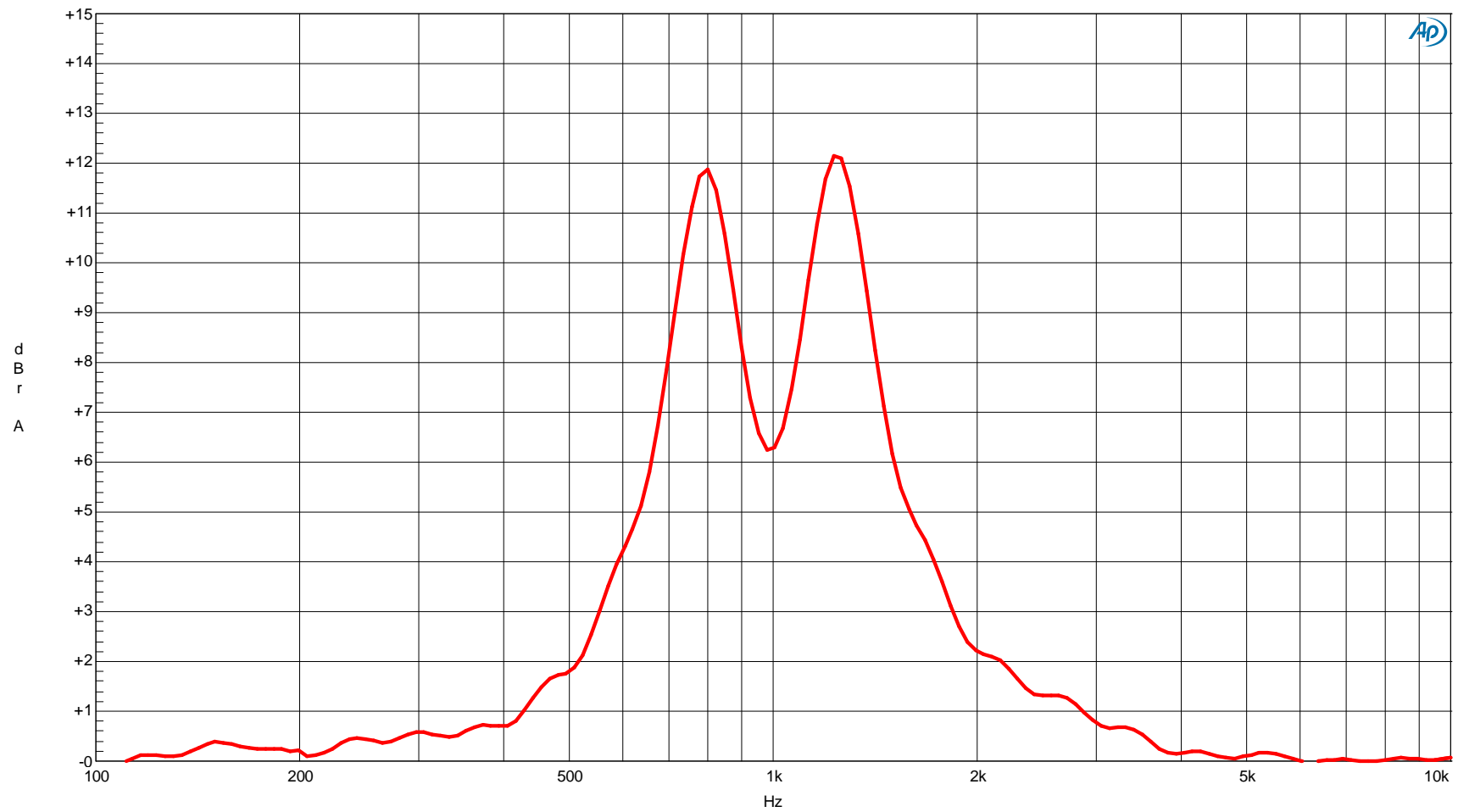
Sweep	Trace	Color	Line Style	Thick	Data	Axis	Comment
1	1	Red	Solid	3	Anlr.Level A	Left	vsechny pot na max

fr\_char\_100\_100\_100\_1kHz.a27

Graf 11 - Tři sousední potenciometry 800 Hz, 1 kHz a 1,2 kHz nastaveny na maximální zesílení



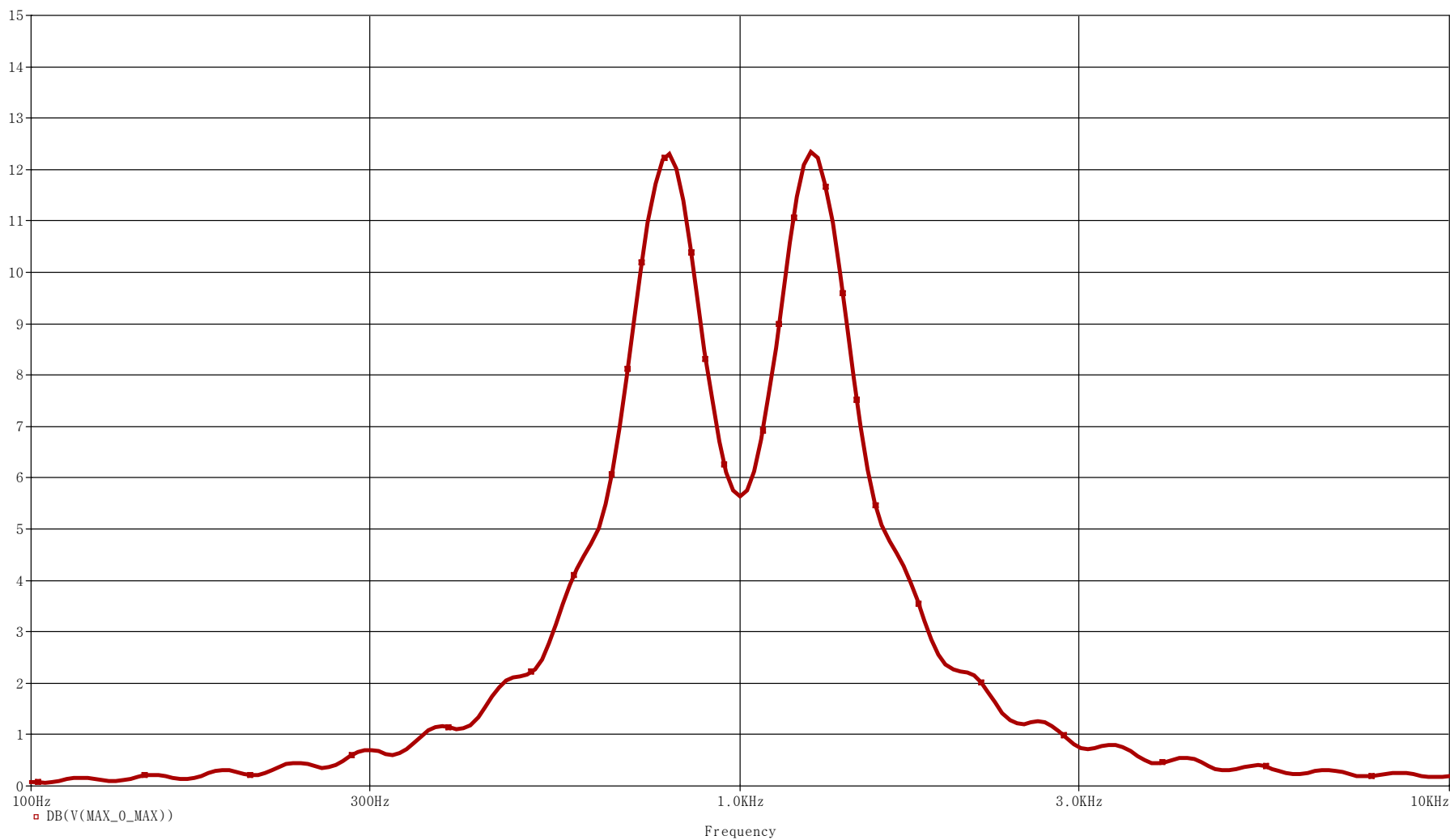
Graf 12 - Simulace: Tři sousední potenciometry 800 Hz, 1 kHz a 1,2 kHz nastaveny na maximální zesílení



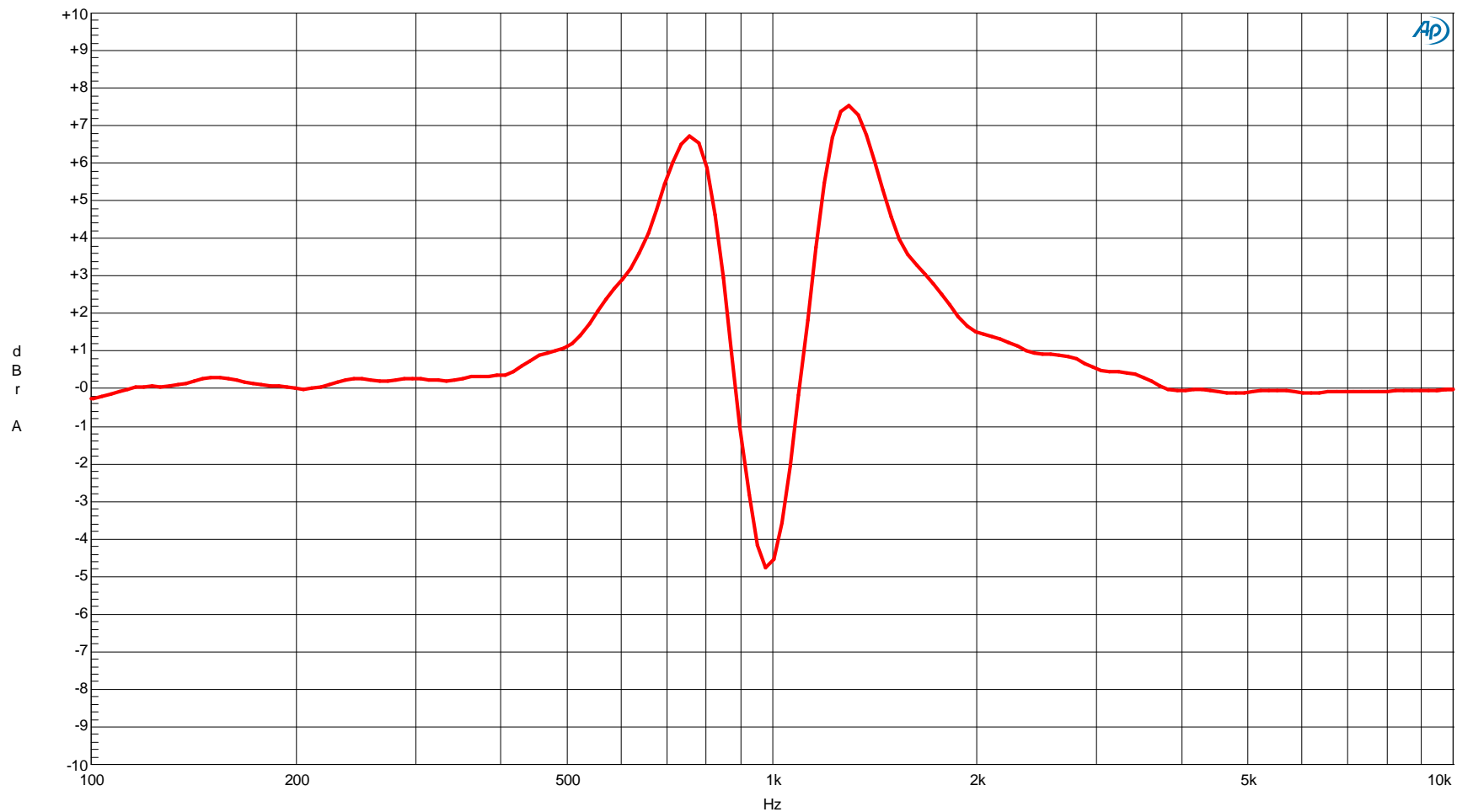
Sweep	Trace	Color	Line Style	Thick	Data	Axis	Comment
1	1	Red	Solid	3	Anlr.Level A	Left	max 50% max

fr\_char\_100\_50\_100\_1kHzat27

Graf 13 - Tři sousední potenciometry 800 Hz - max. zesílení, 1 kHz – střed a 1,2 kHz maximální zesílení



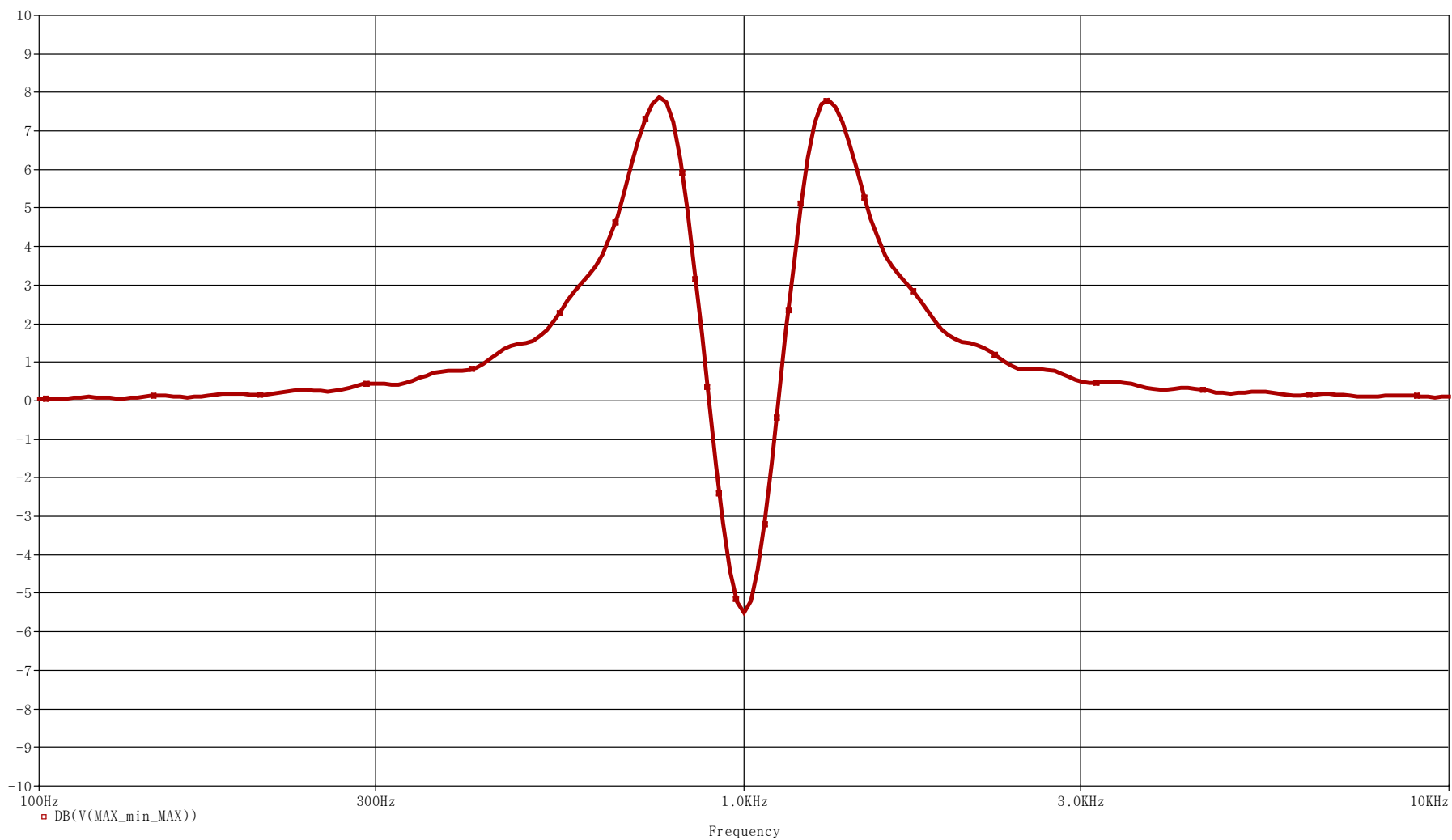
Graf 14 - Simulace: Tři sousední potenciometry 800 Hz - max. zesílení, 1 kHz – střed a 1,2 kHz maximální zesílení



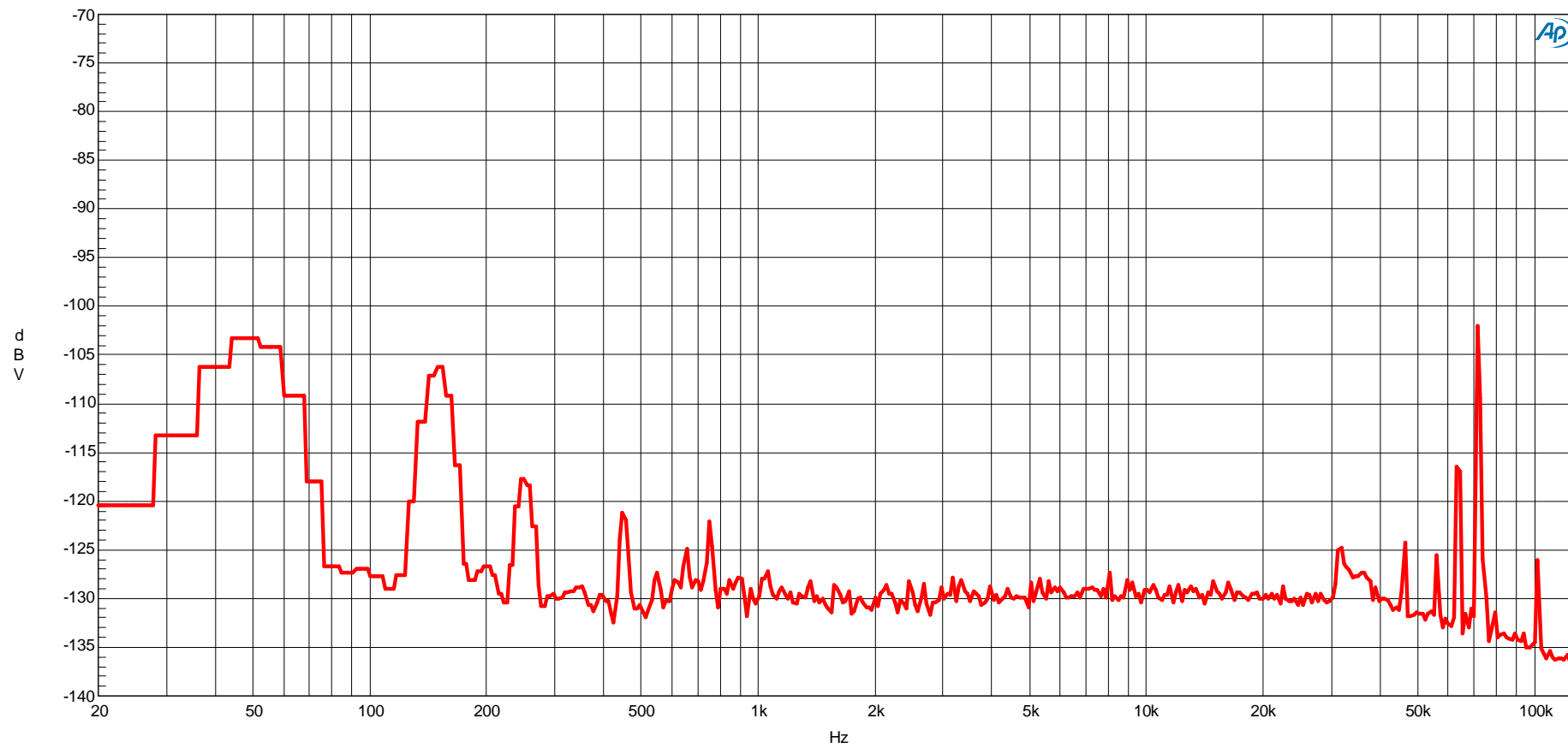
Sweep	Trace	Color	Line Style	Thick	Data	Axis	Comment
1	1	Red	Solid	3	Anlr.Level A	Left	

fr\_char\_100\_0\_100\_1kHz.at27

Graf 15 - Tři sousední potenciometry 800 Hz - max. zesílení, 1 kHz – max potlačení a 1,2 kHz maximální zesílení



Graf 16 - Simulace: Tři sousední potenciometry 800 Hz - max. zesílení, 1 kHz – max potlačení a 1,2 kHz maximální zesílení

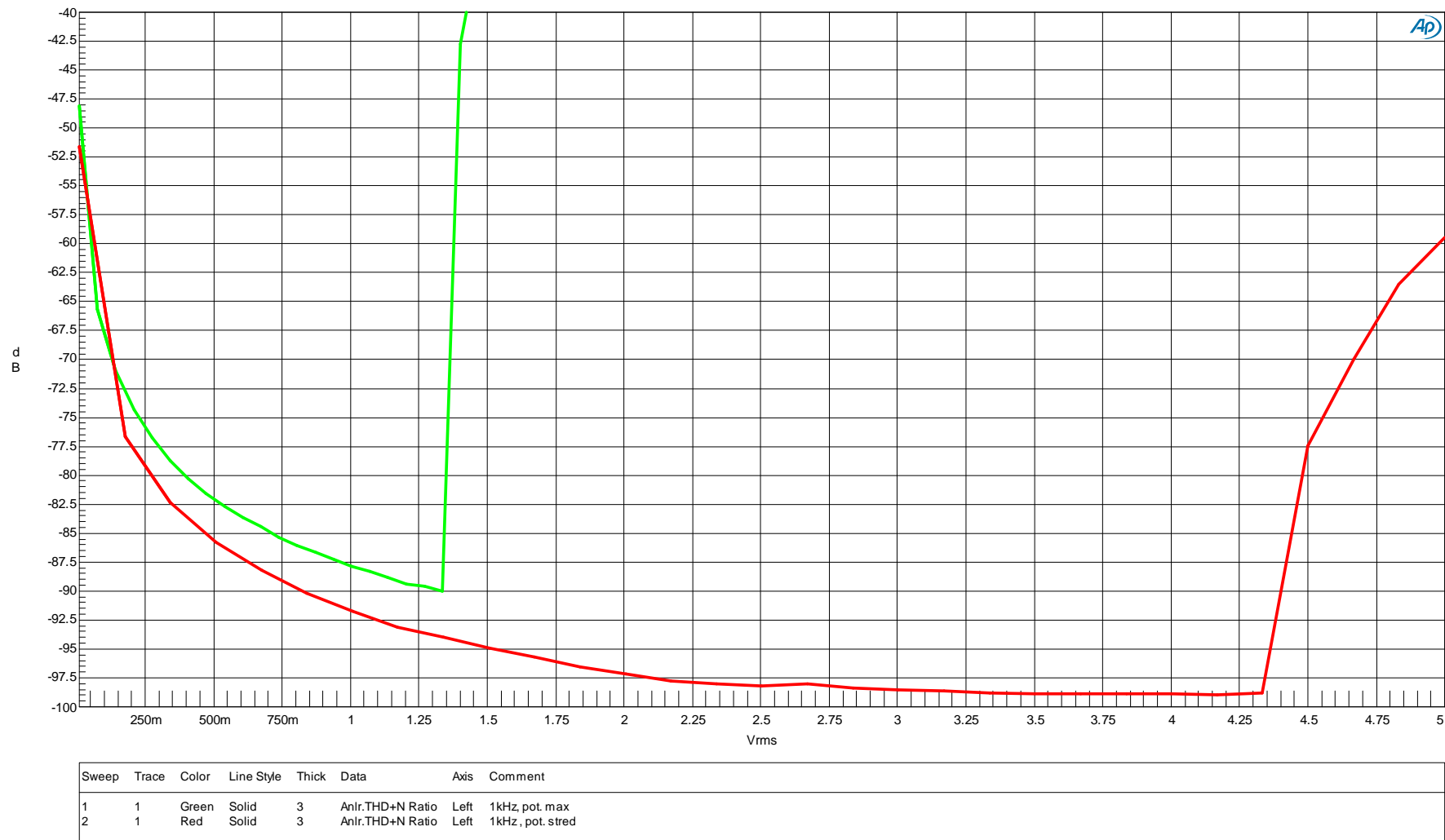


Sweep	Trace	Color	Line Style	Thick	Data	Axis	Comment
1	1	Red	Solid	3	Fft.Ch.1 Ampl	Left	

fft.at27

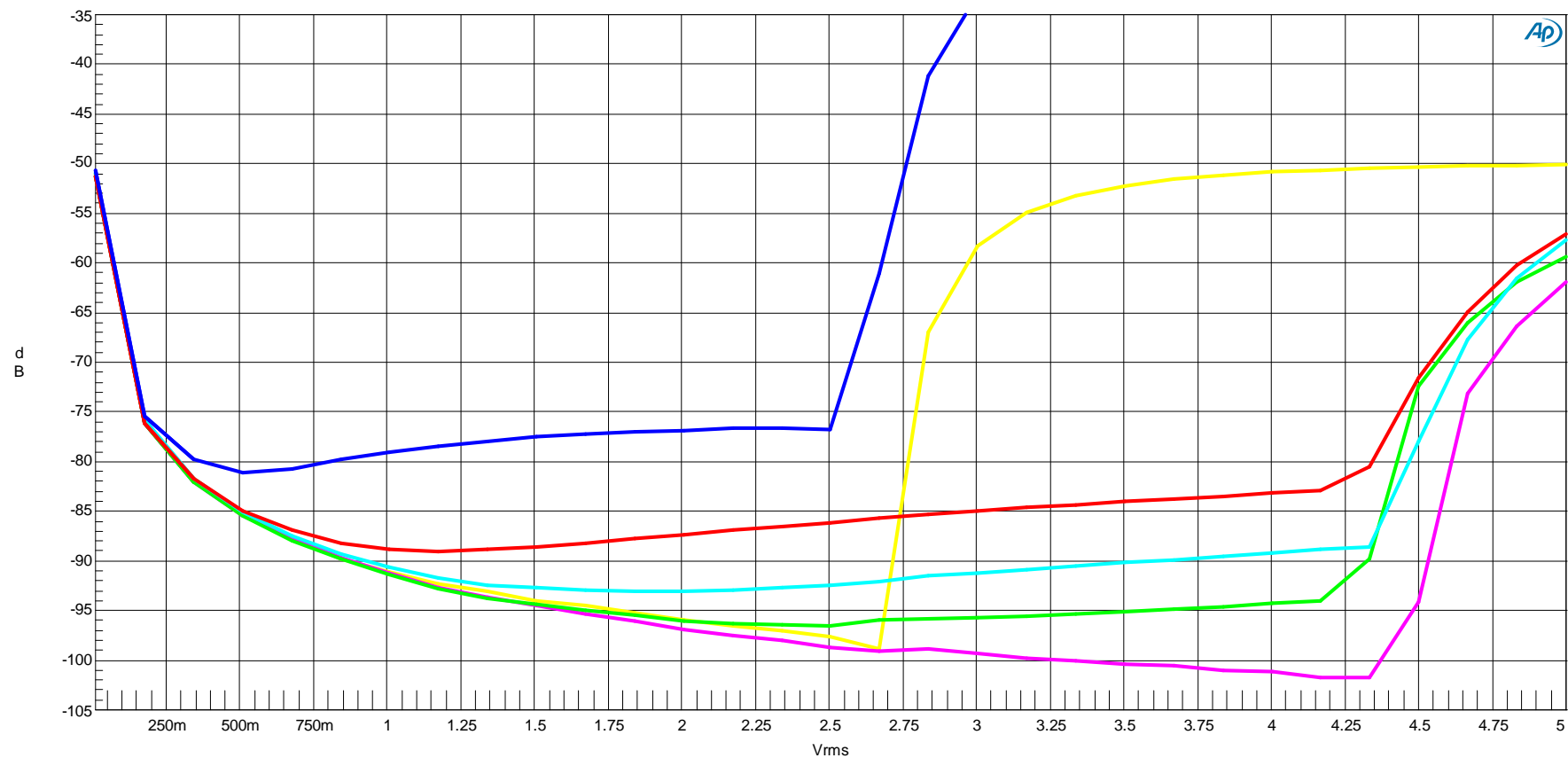
Graf 17 – spektrální analýza





zkresleni.at27

Graf 18 - Závislost útlumu celkového činitele harmonické zkreslení v závislosti na vstupní napětí.  
 Zelená – max. míra korekcí, Červená – středová poloha potenciometrů



Sweep	Trace	Color	Line Style	Thick	Data	Axis	Comment	Source 2
1	2	Yellow	Solid	3	Anlr.THd+N Ratio	Left		: 20.0000 Hz=Gen.Freq
5	2	Magenta	Solid	3	Anlr.THd+N Ratio	Left		: 317.000 Hz=Gen.Freq
8	2	Green	Solid	3	Anlr.THd+N Ratio	Left		: 2.51750 kHz=Gen.Freq
9	2	Cyan	Solid	3	Anlr.THd+N Ratio	Left		: 5.02500 kHz=Gen.Freq
10	2	Red	Solid	3	Anlr.THd+N Ratio	Left		: 10.0225 kHz=Gen.Freq
11	2	Blue	Solid	3	Anlr.THd+N Ratio	Left		: 20.0000 kHz=Gen.Freq

zkresleni\_frekvence.at27

Graf 19 - Závislost útlumu celkového činitele harmonické zkreslení v závislosti na kmitočtu

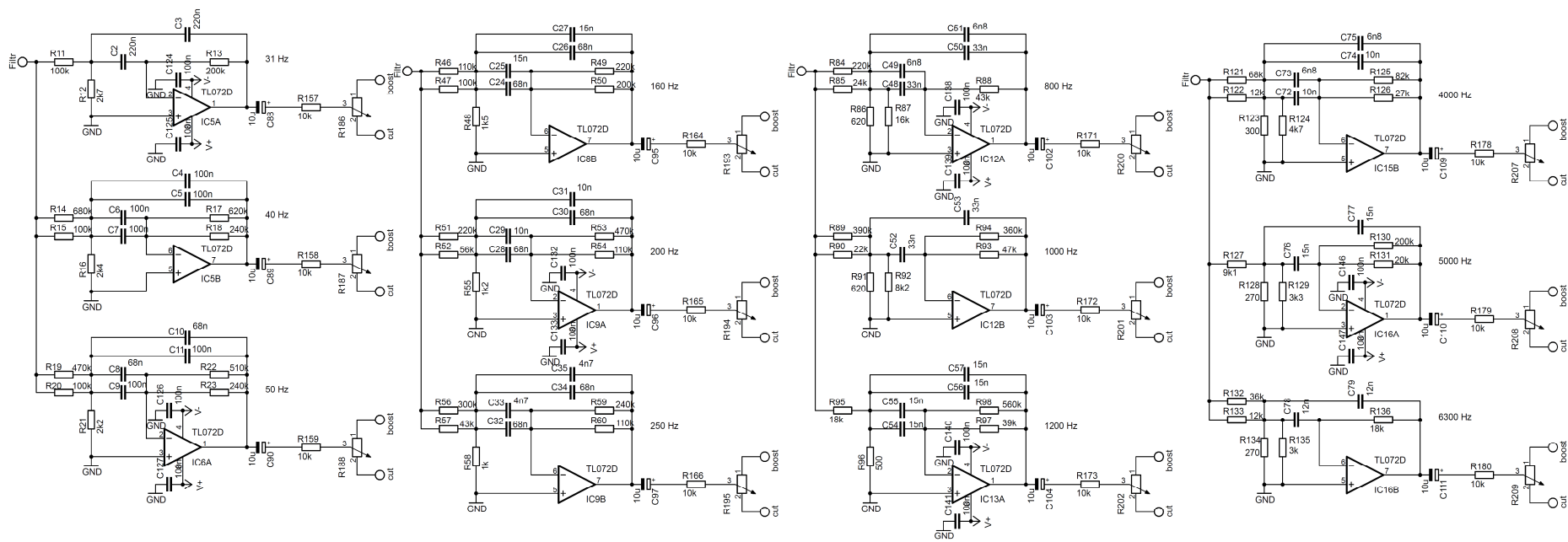
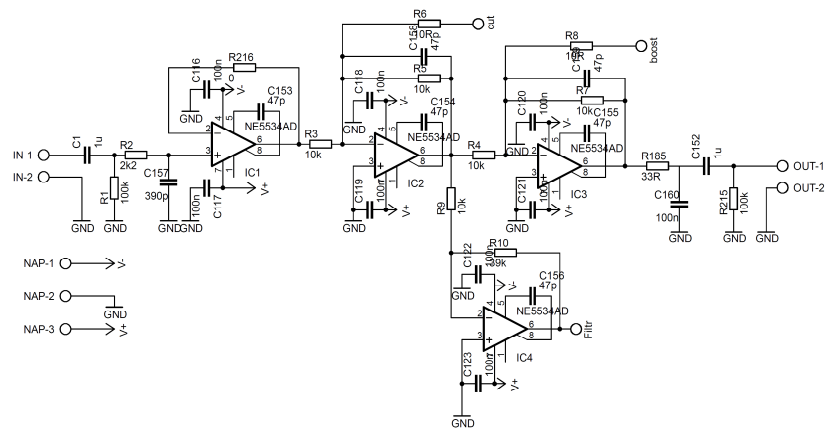


Schéma zapojení ekvalizéru 1/2

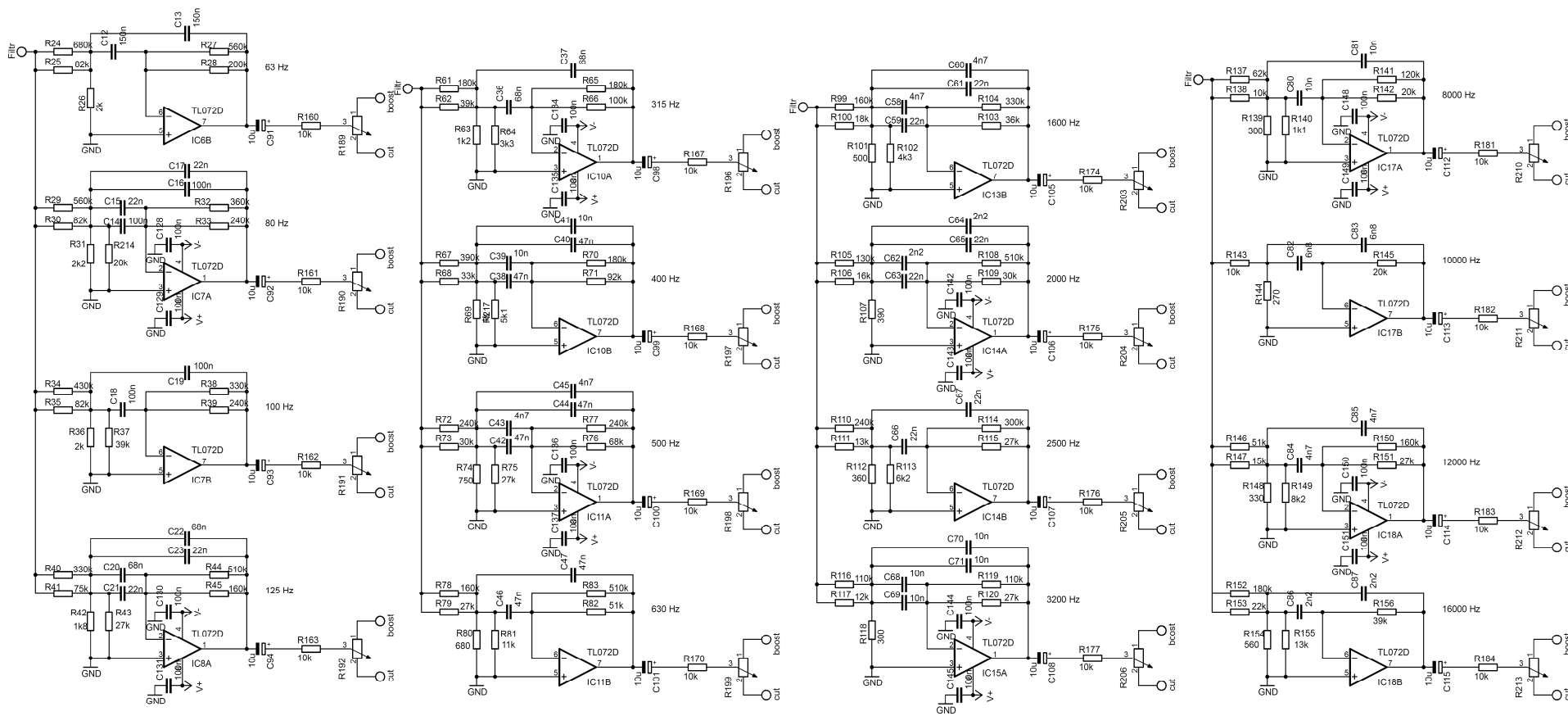
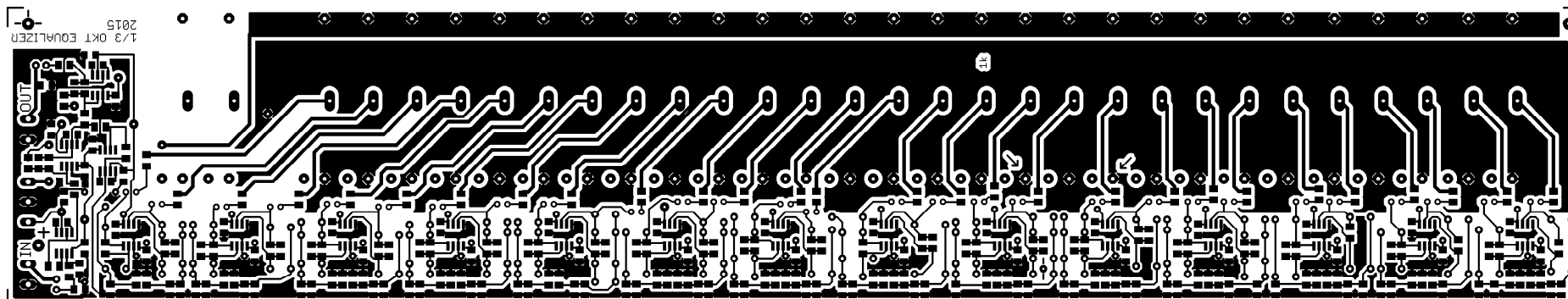
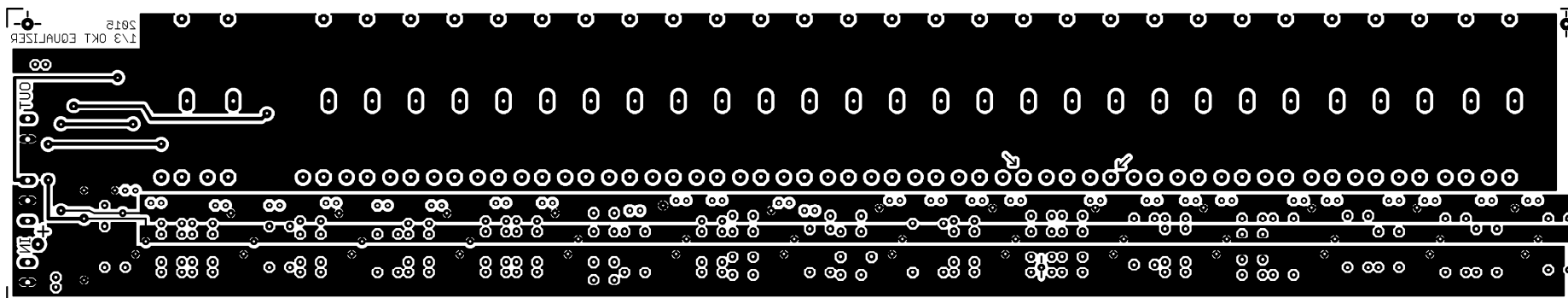


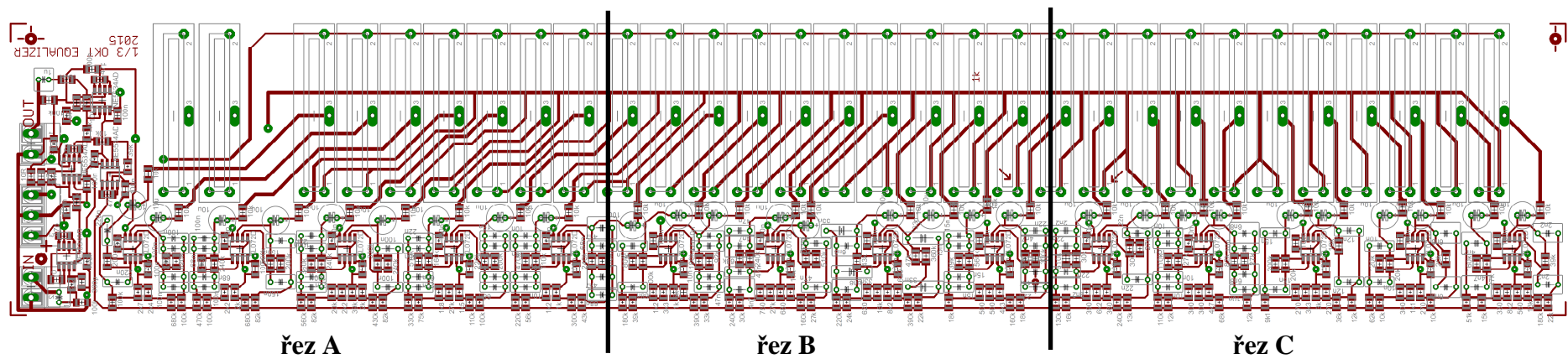
Schéma zapojení ekvalizéru 2/2



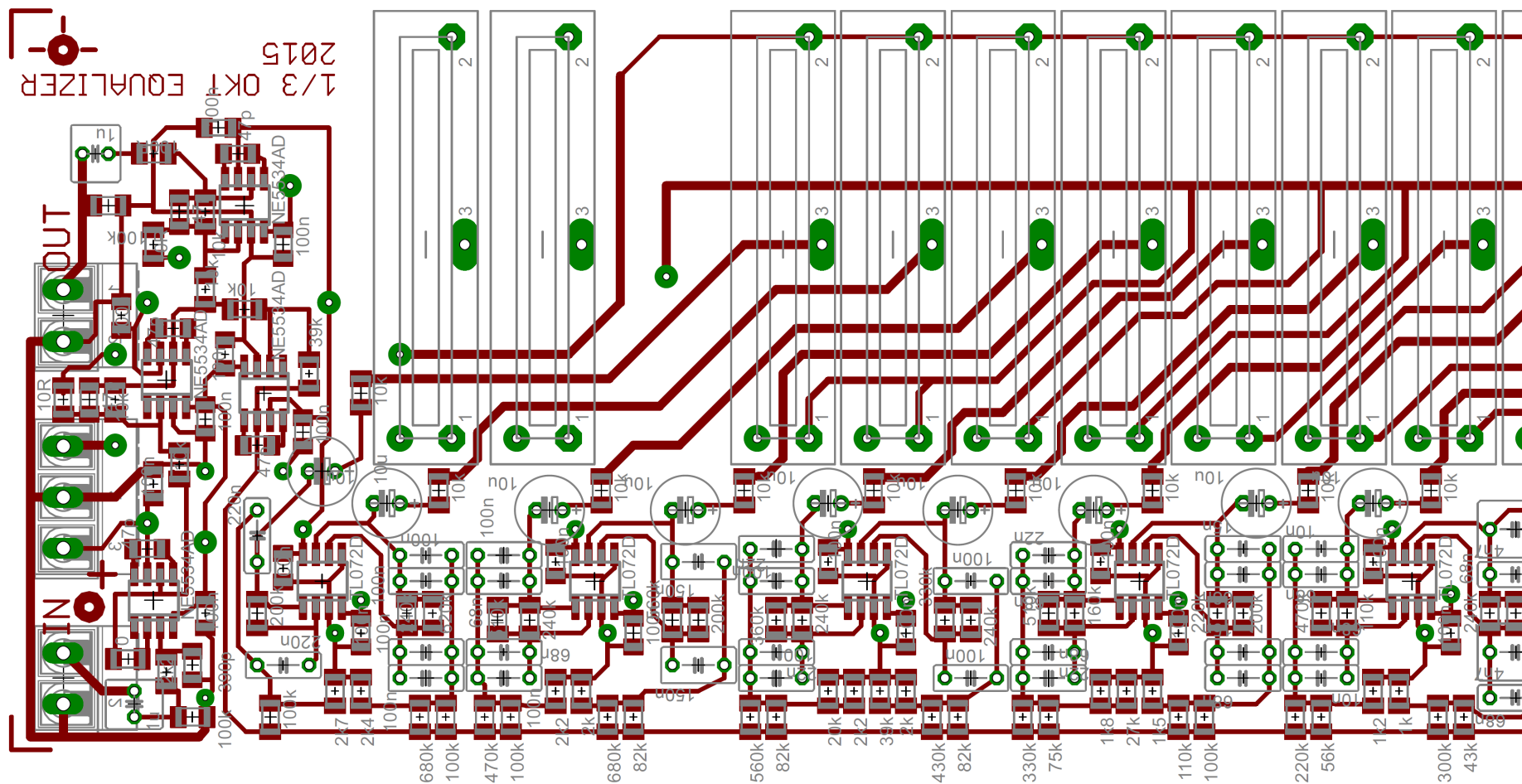
DPS strana TOP



DPS strana BOT



Osazovací plán desky s vyznačenými řezy



Osazovací plán – řez A







kmitočet	Cv [nF]	R1v [kΩ]	R2v [kΩ]	R3v [kΩ]	R1s [kΩ]	R2s [kΩ]	R3s [kΩ]	Ca [nF]	Cb [nF]	R1a[kΩ]	R1b[kΩ]	R2a[kΩ]	R2b[kΩ]	R3a[kΩ]	R3b[kΩ]
31,3	220	99,96	2,754	199,92	100,00	2,70	200,00	220	-	100	-	2,7	-	200	-
39,4	200	87,27	2,404	174,54	87,18	2,40	173,02	100	100	100	680	2,4	-	240	620
49,6	168	82,46	2,272	164,93	82,46	2,20	163,20	100	68	100	470	2,2	-	240	510
62,5	150	73,30	2,019	146,61	73,18	2,00	147,37	150	-	82	680	2	-	200	560
78,7	122	71,54	1,971	143,07	71,53	1,98	144,00	122	-	82	560	2,2	20	240	360
99,2	100	69,26	1,908	138,51	68,87	1,90	138,95	100	-	82	430	2	39	240	330
125,0	90	61,08	1,683	121,17	61,11	1,69	121,79	68	22	75	330	1,8	27	160	510
157,5	83	52,57	1,448	105,15	52,38	1,50	104,76	68	15	100	110	1,5	-	200	220
198,4	78	44,40	1,223	88,81	44,64	1,20	89,14	68	10	56	220	1,2	-	110	470
250,0	72,7	37,81	1,041	75,62	37,61	1,00	75,43	68	4,7	43	300	1	-	110	240
315,0	68	32,09	0,884	64,17	32,05	0,88	64,29	68	-	39	180	1,2	3,3	100	180
396,9	57	30,38	0,837	20,76	30,43	0,84	60,44	47	10	33	390	1	5,1	91	180
500,0	51,7	26,59	0,732	53,17	26,67	0,73	52,99	47	4,7	30	240	0,75	27	68	240
630,0	47	23,21	0,639	46,42	23,10	0,64	46,36	47	-	27	160	0,68	11	51	510
793,7	39,8	21,64	0,599	43,51	21,64	0,60	43,00	33	6,8	24	220	0,62	16	43	-
1000,0	33	20,83	0,573	41,65	20,83	7,24	41,57	33	-	22	390	62	8,2	47	360
1259,9	30	18,18	0,501	36,36	18,00	0,50	36,46	15	15	18	-	0,5	-	39	560
1587,4	26,7	16,21	0,446	32,43	16,18	0,45	32,46	22	4,7	18	160	0,5	4,3	36	330
2000,0	24,2	14,20	0,391	28,40	14,25	0,39	28,33	22	2,2	16	130	0,39	-	30	510
2519,8	22	12,40	0,341	24,79	12,33	0,34	24,77	22	-	13	240	0,36	6,2	27	300
3174,8	20	10,83	0,298	21,65	10,82	0,30	21,68	10	10	12	110	0,3	-	27	110
4000,0	16,8	10,23	0,281	20,45	10,20	0,28	20,31	10	6,8	12	68	0,3	4,7	27	82
5039,7	15	9,09	0,25	18,18	9,10	0,25	18,18	15	-	9,1	-	0,27	3,3	20	200
6349,6	12	9,02	0,248	18,04	9,00	0,24	18,00	12	-	12	36	0,3	1,1	18	-
8000,0	10	8,59	0,236	17,18	8,61	0,25	17,14	10	-	10	62	0,27	3	20	120
10079,4	6,8	10,03	0,276	20,05	10,00	0,27	20,00	6,8	-	10	-	0,27	-	20	-
12699,2	4,7	11,51	0,317	23,03	11,59	0,32	23,10	4,7	-	15	51	0,33	8,2	27	160
16000,0	2,2	19,52	0,537	39,05	19,60	0,54	39,00	2,2	-	22	180	0,56	13	39	-

*Tabulka vypočtených a skutečných hodnot složených ze součástek.  
Rv – vypočítaná (ideální) hodnota, Rs – hodnota (reálná) vzniklá složením z Ra a Rb*

oktávové pásmo			
pásmo	f dolní	f střed	f horní
1	22,1	31,3	44,2
2	44,2	62,5	88,4
3	88,4	125,0	176,8
4	176,8	250,0	353,6
5	353,6	500,0	707,1
6	707,1	<b>1000,0</b>	1414,2
7	1414,2	2000,0	2828,4
8	2828,4	4000,0	5656,9
9	5656,9	8000,0	11313,7
10	11313,7	16000,0	22627,4

půl-oktávové pásmo			
pásmo	f dolní	f střed	f horní
1	18,6	22,1	26,3
2	26,3	31,3	37,2
3	37,2	44,2	52,6
4	52,6	62,5	74,3
5	74,3	88,4	105,1
6	105,1	125,0	148,7
7	148,7	176,8	210,2
8	210,2	250,0	297,3
9	297,3	353,6	420,4
10	420,4	500,0	594,6
11	594,6	707,1	840,9
12	840,9	<b>1000,0</b>	1189,2
13	1189,2	1414,2	1681,8
14	1681,8	2000,0	2378,4
15	2378,4	2828,4	3363,6
16	3363,6	4000,0	4756,8
17	4756,8	5656,9	6727,2
18	6727,2	8000,0	9513,7
19	9513,7	11313,7	13454,3
20	13454,3	16000,0	19027,3

jedno-třetinové-oktávové pásmo			
pásmo	f dolní	f střed	f horní
1	17,5	19,7	22,1
2	22,1	24,8	27,8
3	27,8	31,3	35,1
4	35,1	39,4	44,2
5	44,2	49,6	55,7
6	55,7	62,5	70,2
7	70,2	78,7	88,4
8	88,4	99,2	111,4
9	111,4	125,0	140,3
10	140,3	157,5	176,8
11	176,8	198,4	222,7
12	222,7	250,0	280,6
13	280,6	315,0	353,6
14	353,6	396,9	445,4
15	445,4	500,0	561,2
16	561,2	630,0	707,1
17	707,1	793,7	890,9
18	890,9	<b>1000,0</b>	1122,5
19	1122,5	1259,9	1414,2
20	1414,2	1587,4	1781,8
21	1781,8	2000,0	2244,9
22	2244,9	2519,8	2828,4
23	2828,4	3174,8	3563,6
24	3563,6	4000,0	4489,8
25	4489,8	5039,7	5656,9
26	5656,9	6349,6	7127,2
27	7127,2	8000,0	8979,7
28	8979,7	10079,4	11313,7
29	11313,7	12699,2	14254,4
30	14254,4	16000,0	17959,4

Tabulka středových (centrálních) kmitočtů a kmitočtů ohraničující pásmo

<b>Ekvalizér</b>		
Počet pásem	28 (1/3 okt)	31,5 Hz - 16kHz
Typ	konstantní Q	
Délka dráhy potenciometrů	40 mm	
šířka pásma	20 Hz - 20kHz - 50kHz	+0/-0,5dB/-3dB
Zvlnění fr. ch.	max 2dB	
Odstup sig/šum	82,5 dB	10-500 kHz neváhovaně
	91,6 dB	10-20 kHz neváhovaně
	96,5 dB	Váhovací Filr A
Jmenovitá vstupní úroveň	0,775 V (0 dBu)	
Dynamická rezerva	+ 15 dB	
Efektivní hodnota šumu	26 uV	0 - 500 kHz
	12 uV	0 - 20kHz
Napájecí napětí	+15 V	
Příkon	23 W	

Tabulka parametrů



*Foto zařízení*