

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTROTECHNIKY A  
TELEKOMUNIKACÍ**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Konstrukce aktivní výhybky pro poslechový monitor**

*Originál (kopie) zadání BP/DP*

## **Abstrakt**

V této práci se budu zabývat návrhem a následnou realizací dvoupásmové reproduktorové výhybky. Výhybka bude obsahovat symetrický vstup, aktivní filtr typu horní propust na 60Hz s uspořádáním součástek Sallen - Key, aktivní výhybku Linkwitz – Riley s uspořádáním součástek State – variable a asymetrické výstupy pro obě pásma. Každý výstup je ještě doplněn o 3 třetinooktávové filtry, které slouží pro případné vyrovnání charakteristiky reproduktoru.

## **Klíčová slova**

Dvoupásmová reproduktorová výhybka, pasivní a aktivní filtr, Linkwitz – Riley, State – variable, Sallen Key, třetinooktávový filtr.

## **Abstract**

Construction of active crossover for listening monitor, it is the name of this bachelor's thesis. The thesis is about design and implementation two way speaker crossover. The crossover will contain balanced input and output, active high pass filter Linkwitz-Riley 2nd-order at 60Hz with Sallen – Key topology, active crossover Linkwitz-Riley 4th-order with state-variable topology. Each output is complemented by 3 third octave filters, that are used for compensation of speaker characteristic.

## **Key words**

third octave filter, active crossover, active high pass filter, balanced input and output, Linkwitz-Riley, listening monitor, Sallen – Key, state-variable, two way speaker crossover,

## Prohlášení

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

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

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

V Praze dne 7/6/2012

Jméno příjmení

.....

## Seznam symbolů a zkratek

$A_u$ .....	Napěťový přenos
ARC .....	RC filtr s aktivním prvkem (tranzistor, operační zesilovač)
B .....	Šířka pásma
dek. ....	Dekáda
DP .....	Filtr typu dolní propust
$f_0/\omega_0$ .....	Mezní kmitočet / mezní úhlový kmitočet
$H(j\omega)$ .....	Přenosová funkce horní propusti
HP .....	Filtr typu horní propust
$L(j\omega)$ .....	Přenosová funkce dolní propusti
NDP .....	Normovaná dolní propust
PP .....	Filtr typu pásmová propust
PZ .....	Filtr typu pásmová zadrž
okt. ....	Oktáva
OZ .....	Operační zesilovač
Q .....	Činitel jakosti

## OBSAH

1. ÚVOD.....	8
2. ELEKTRICKÉ FILTRY.....	9
2.1 TYPY FILTRŮ - ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI, CHARAKTERISTIKY.....	10
2.2 NÁVRH FILTRU .....	12
2.3 ZÁKLADNÍ TYPY APROXIMACÍ.....	13
3. AKTIVNÍ FILTRY.....	16
3.1 STATE VARIABLE.....	17
3.2 SALLEN – KEY.....	18
4. NÁVRH AKTIVNÍ VÝHYBKY.....	19
4.1 BLOKOVÉ SCHÉMA.....	20
4.2 OBVOD THAT 1240 .....	20
4.3 FILTR HORNÍ PROPUST 60Hz.....	21
4.4 VÝHYBKA TYPU STATE – VARIABLE.....	23
4.5 KMITOČTOVÁ KOREKCE REPRODUKTORŮ.....	25
4.6 OBVOD THAT 1646.....	26
4.7 VSTUPNÍ A VÝSTUPNÍ KONEKTORY, PŘEPÍNAČE.....	27
4.8 ZDROJ.....	28
5. KONSTRUKCE VÝHYBKY.....	30
6. NAMĚŘENÉ HODNOTY .....	31
7. ZÁVĚR.....	32
8. POUŽITÁ LITERATURA.....	33
9. PŘÍLOHY.....	36

## 1. Úvod

Cílem této bakalářské práce je návrh a výroba dvoupásmové aktivní výhybky pro poslechový monitor, který bude sloužit pro laboratorní účely a k reprodukci hudby.

Aktivní poslechový monitor bude mít výkon až 1000W a měl by pokrývat co nejširší slyšitelné kmitočtové pásmo. Zároveň musí být co nejmenší, aby se dal snadno přenášet. Protože neexistuje jeden reproduktor, který by pokryl celé slyšitelné kmitočtové pásmo, bude osazen dvoupásmovým koaxiálním reproduktorem. Ten se skládá ze středobasového reproduktoru, na jehož středu je připevněn reproduktor výškový. Oddělení kmitočtových pásem vstupního signálu pro jednotlivé reproduktory se provede pomocí výhybky. Výhybka bude sloužit zároveň i jako ochrana výškového reproduktoru. Pokud by byli do výškového reproduktoru přivedeny i nízké kmitočty, došlo by k jeho destrukci.

Výhybku lze vyrobit aktivní nebo pasivní. Já jsem zvolil výhybku aktivní. Výhodou proti pasivním výhybkám je, že nedochází k ovlivňování výhybky připojenými reproduktory. Aktivní výhybku je možné vyrobit daleko menší a lehčí. Tato výhybka je umístěna ještě před zesilovačem a nepracuje tedy s vysokým výkonem jako výhybka pasivní, která je mezi zesilovačem a reproduktory. Nevýhodou aktivní výhybky je nutnost použít pro každý reproduktor jeden zesilovač.



## 2. Elektrické filtry

Elektrické kmitočtové filtry jsou obvody, které ovlivňují kmitočtové spektrum signálu. Filtry ze vstupu na výstup propouští (propustné pásmo), nebo naopak utlumí (nepropustné pásmo), část kmitočtového spektra vstupního signálu. Tuto funkci filtru popisuje jeho přenosová kmitočtová charakteristika. Fázová charakteristika popisuje závislost změny fáze na kmitočtu, neboli zpoždění jednotlivých kmitočtů při průchodu filtrem.

Různé druhy filtrů se používají ve všech oblastech elektrotechniky, nejvýznamnější úlohu plní ovšem v audiotechnice, měřící technice radiotechnice a telekomunikacích. Nás bude zajímat právě audiotechnika a použití filtrů ve výhybce. Ta rozděluje kmitočtové spektrum vstupního signálu podle kmitočtu na pásma pro jednotlivé reproduktory reprobedny.

Filtry dělíme podle funkce (přenosové charakteristiky) na dolní propust DP, horní propust HP, pásmovou propust PP a pásmovou zadrž PZ. Další dělení filtrů je podle toho, jestli obsahují pouze diskrétní součástky R, L, C (pak se jedná o filtr pasivní) a nebo obsahují i aktivní prvky jako tranzistory nebo operační zesilovače. Pak jde tedy o aktivní ARC filtry. Další dělení je ještě podle způsobu zpracování signálu na analogové a digitální.

Nejdůležitějšími parametry analogových filtrů jsou mezní kmitočet  $f_0$  (nebo mezní úhlový kmitočet  $\omega_0$ ), řád filtru a strmost filtru. Mezní kmitočet dělí propustnou část frekvenčního pásma filtru od části nepropustné. Pro mezní kmitočet ve většině případů platí, že při něm poklesne úroveň výstupního signálu proti vstupnímu o 3dB. Napětíový přenos  $A_u$  se tedy bude rovnat:

$$A_{u0} = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{U_2}{U_1} \right) = -3 \text{ dB} \quad (1)$$

kde  $U_2$  je výstupní napětí a  $U_1$  je napětí vstupní.

Od ideálního filtru bychom očekávali, že při mezním kmitočtu vzroste skokově útlum filtru z 0dB na nekonečno. U reálného filtru bude růst útlum v nepropustné části se strmostí, kterou udává řád filtru. Čím vyšší bude řád filtru, tím vyšší sice bude útlum v nepropustném pásmu, ale tím složitější bude zapojení filtru.

## 2.1 Typy filtrů - základní vlastnosti, charakteristiky

Jak jsem již zmínil, filtry lze rozdělit podle přenosové charakteristiky. Nyní si ukážeme základní zapojení filtrů typu DP, HP 1. řádu, které mají mezní kmitočet  $f_0 = 1\text{kHz}$  a strmost  $6\text{dB/okt}$  ( $-20\text{dB/dek}$ ). U filtrů PP a PZ je rezonanční kmitočet  $f_0$  určen pomocí horního  $f_H$  a dolního kmitočtu  $f_D$ , při kterých dojde k poklesu o 3 dB.

$$f_0 = \sqrt{f_D \cdot f_H} \quad (2)$$

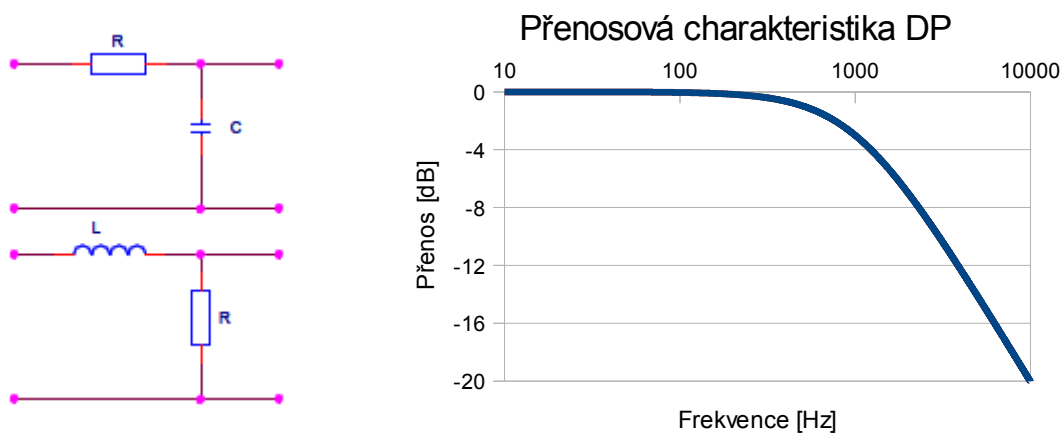
Důležitým parametrem těchto filtrů jsou také šířka pásma  $B$  (3) a činitel jakosti  $Q$  (4).

$$B = f_H - f_D \quad (3)$$

$$Q = \frac{f_0}{B} \quad (4)$$

### Dolní propust

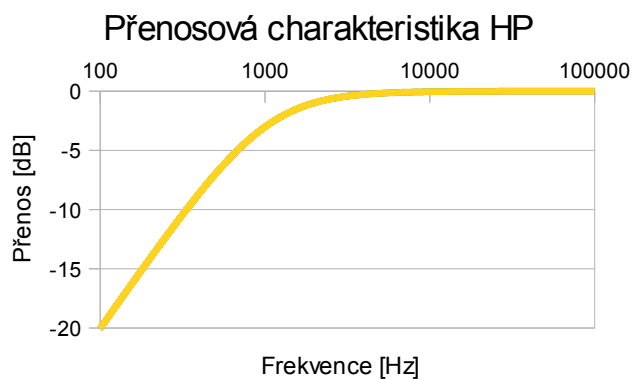
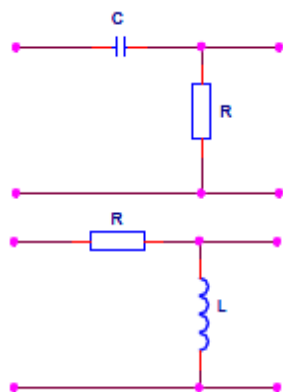
Filtr typu dolní propust propouští pouze kmitočty nižší než  $f_0 = 1\text{kHz}$ .



Obr. 2.1.1 Schéma zapojení DP 1. řádu a přenosová charakteristika DP

## Horní propust

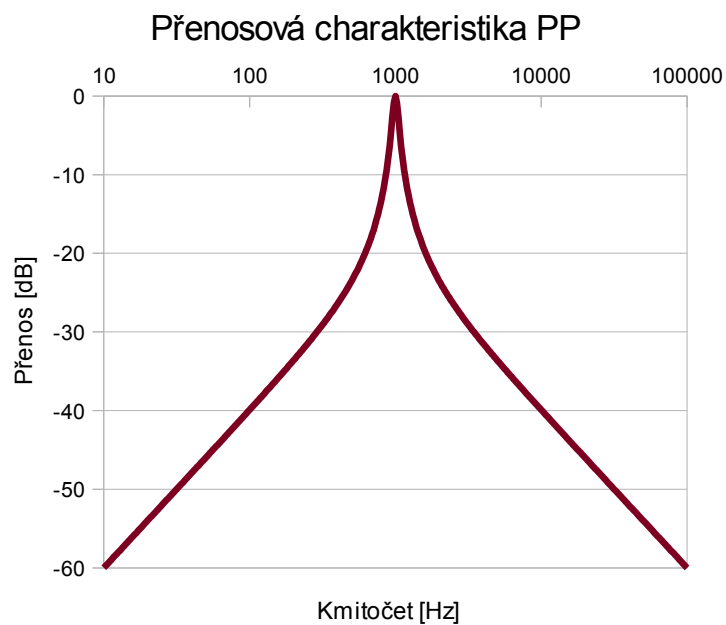
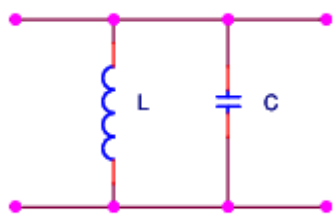
Filtr typu horní propust propouští pouze kmitočty vyšší než  $f_0 = 1\text{kHz}$ .



Obr. 2.1.2 Schéma zapojení HP 1. řádu a přenosová charakteristika HP

## Pásmová propust

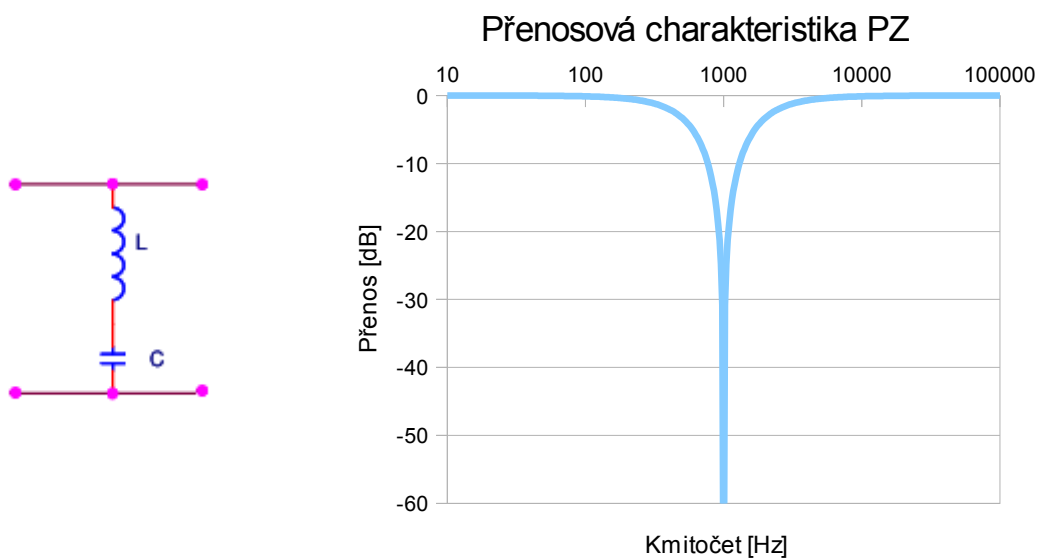
Filtr typu pásmová propust propouští pouze kmitočty v okolí  $f_0 = 1\text{kHz}$ .



Obr. 2.1.3 Schéma zapojení a přenosová charakteristika PP

## Pásmová zadrž

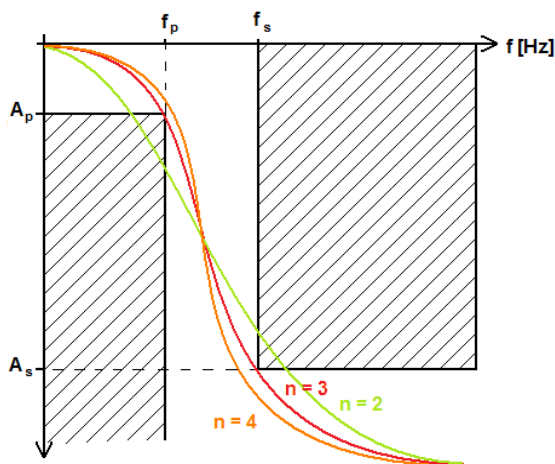
Filtr typu pásmová zadrž propouští všechny kmitočty kromě těch v okolí  $f_0 = 1\text{kHz}$ .



Obr. 2.1.4 Schéma zapojení a přenosová charakteristika PZ

## 2.2 Návrh filtru

Nejjednodušším způsobem jak navrhnout filtr je návrh podle katalogu, při kterém postupujeme podle několika základních kroků. Nejprve musíme stanovit základní požadavky, které musí filtr splňovat. Tyto požadavky nám určuje toleranční schéma, které je pro filtr typu DP zobrazeno na Obr. 2.2.1 včetně naznačeného řádu filtru.



Obr. 2.2.1 Toleranční schéma pro DP

Následuje transformace tolerančního schématu na normovanou dolní propust NDP. Nyní zvolíme požadovanou aproximaci a vypočteme řád filtru. Z tabulky koeficientů pro danou aproximaci zjistíme její koeficienty a dosazením do rovnice ( 5 ), kde „n“ je řád filtru, získáme přenosovou funkci H(p). Z pólů přenosové funkce vypočteme zpětnou transformaci na určený typ filtru odnormované hodnoty součástek. Postup návrhu filtru je přesně popsán v např. v uvedené literatuře. [2]

$$H(p) = \frac{A_p}{(1 + a_i \cdot s + b_i \cdot s^2)^i} \quad \text{kde } i = \frac{n}{2} \text{ pro } n \text{ sudé}; \quad i = \frac{n+1}{2} \text{ pro } n \text{ liché} \quad (5)$$

Pro návrh filtru lze také použít některý ze specializovaných programů, např. program FilterPro od společnosti Texas Instrument, který je zdarma a slouží k návrhu aktivních filtrů s různými aproximacemi. Program podle tolerančního schématu sám spočítá hodnoty součástek pro zvolenou aproximaci, nakreslí schéma zapojení, přenosovou, fázovou charakteristiku a skupinové zpoždění.

### 2.3 Základní typy aproximací

Protože idealizovaných pravoúhlých přenosových charakteristik filtrů nelze ve skutečnosti dosáhnout, je nutné je nahradit charakteristikami aproximovanými. Při aproximaci se vychází ze zadaného tolerančního pásma. Jednotlivé aproximace se liší svými průběhy jak v propustném tak nepropustném pásmu. Aproximací existuje celá řada, mezi nejběžnější patří Butterworth, Chebyshev, Inverzní Chebyshev, Cauer a Linkwitz – Riley.

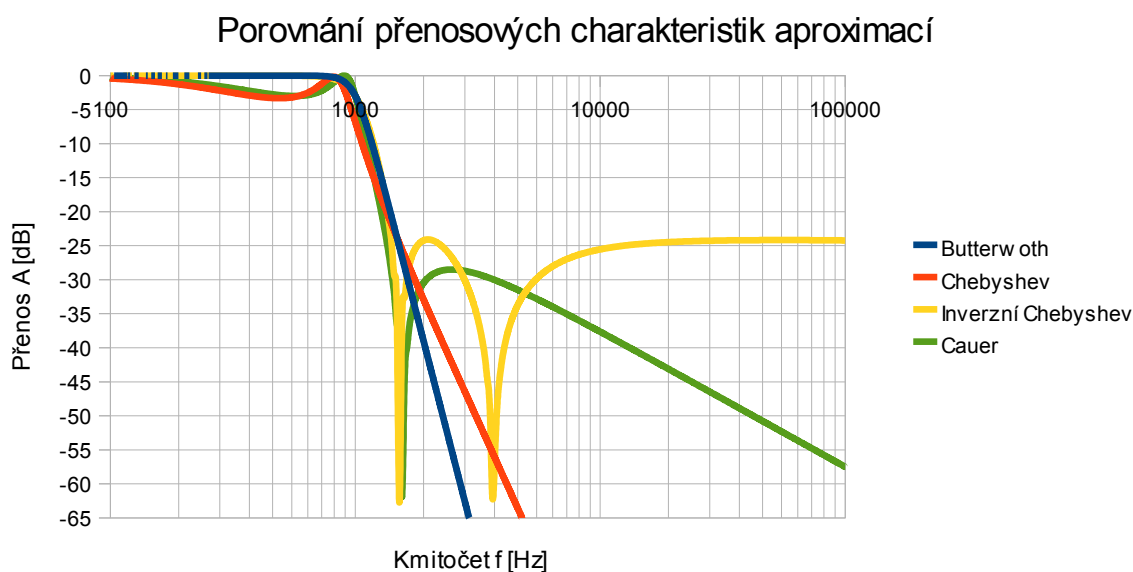
Butterworthova aproximace má plochý průběh v propustném pásmu a hladký průběh v pásmu nepropustném. Ovšem abychom dosáhli požadovaných parametrů, musí být vyššího řádu než aproximace ostatní. Kvůli svému průběhu v propustném pásmu bývá nejpoužívanější. Přenosová funkce dolní  $L(j\omega)$  a horní propusti  $H(j\omega)$  1. řádu Butterworthovy aproximace je:

$$L(j\omega) = \frac{1}{1 + \frac{j\omega}{\omega_0}}; \quad H(j\omega) = \frac{\frac{j\omega}{\omega_0}}{1 + \frac{j\omega}{\omega_0}} \quad (6)$$

Chebysheva aproximace má zvlněný průběh v propustném pásmu a hladký průběh v nepropustném pásmu.

Inverzní Chebysheva aproximace má plochý průběh v propustném pásmu a zvlněný v pásmu nepropustném. Proti Butterworthově aproximaci mívá nižší řád, ale také nižší útlum v nepropustném pásmu

Cauerova aproximace má zvlněný průběh v propustném i nepropustném pásmu. Její řád je ovšem nejnižší.

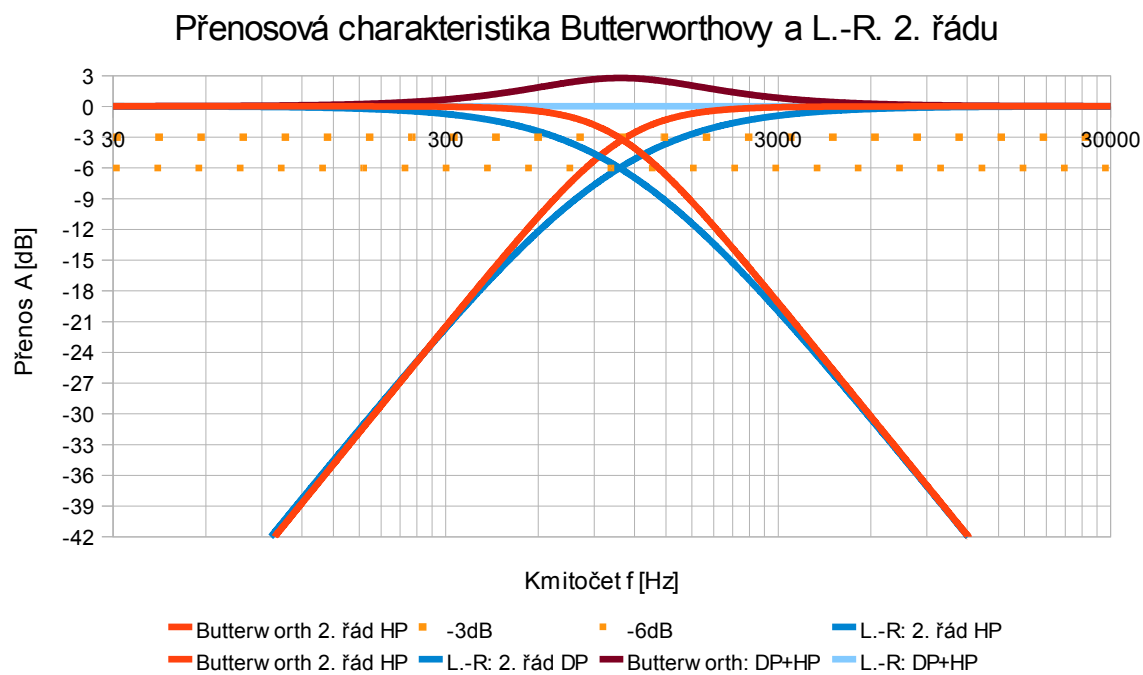


Obr. 2.3.1 Porovnání přenosových charakteristik různých aproximací

Aproximace Linkwitz – Riley je speciální typ aproximace, jejíž přenosová funkce druhého řádu má tvar ( 7 ). Vznikne umocněním přenosové funkce Butterworthovy aproximace ( 6 ) na druhou. Tato aproximace se hodí nejvíce k návrhu aktivní výhybky, protože platí ( 8 ), má při součtu přenosu DP a HP naprosto rovnou výslednou přenosovou charakteristiku. U přenosové charakteristiky Butterworthovy aproximace vznikne v okolí mezního kmitočtu  $f_0$  vrcholek o 3dB.

$$L(j\omega) = \frac{1}{1 + \frac{2 \cdot j\omega}{\omega_0} + \left(\frac{j\omega}{\omega_0}\right)^2} ; H(j\omega) = \frac{\left(\frac{j\omega}{\omega_0}\right)^2}{1 + \frac{2 \cdot j\omega}{\omega_0} + \left(\frac{j\omega}{\omega_0}\right)^2} \quad (7)$$

$$|L(j\omega) + H(j\omega)| = 1 \quad (8)$$



*Obr. 2.3.2 Porovnání aproximací Linkwitz-Riley a Butterworthovy*

### 3. Aktivní filtry

Pasivní filtry se v dnešní době používají ve vysokofrekvenční technice až ke stovkám MHz, kde mají velmi dobré vlastnosti. Pro nižší kmitočty od jednotek Hz do desítek kHz se používají spíše filtry aktivní. Ty umožňují návrh bez použití cívek, které mají v těchto nízkých kmitočtech nevyhovující parametry. Aktivní filtry nejčastěji využívají operační zesilovač s RC sítí. Počet kondenzátorů určuje řád filtru viz. Tab. 3.1, který určuje i strmost filtru. Jednotlivé aproximace se liší pouze hodnotami použitých součástek.

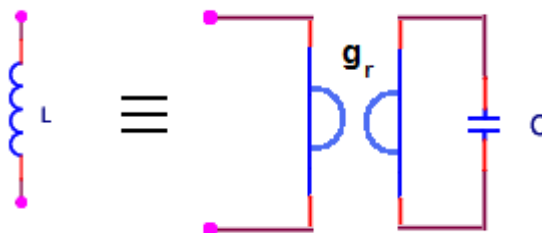
Řád filtru	Strmost [dB/dek]	Strmost [dB/okt]
1	20	6
2	40	12
4	80	24

Tab. 3.1 Řád filtru

Další variantou ARC filtru je obvod se syntetickou indukčností. Jedná se např. o sériový rezonanční LC obvod, kde indukčnost  $L$  je nahrazena kondenzátorem s vhodně zapojeným operačním zesilovačem. Zapojení se obecně říká impedanční konvertor, v případě nahrazení indukčnosti kondenzátorem se jedná o gyrátor. Výsledná impedance, kde  $r_g$  je gyrační konstanta, vychází z:

$$Z_L = j\omega L = j\omega C \cdot r_g^2 \quad (9)$$

Pomocí těchto zapojení lze dosáhnout i velmi vysokých hodnot indukčností, kterých by se u skutečných cívek dosahovalo velmi těžko. Podmínkou je, že indukčnost musí být na jedné straně uzemněna.



Obr. 3.1 Realizace induktoru pomocí gyrátoru

Aktivní RC filtry je možné zapojit mnoha způsoby. Mezi základní zapojení patří Sallen-Key a univerzální zapojení state – variable.



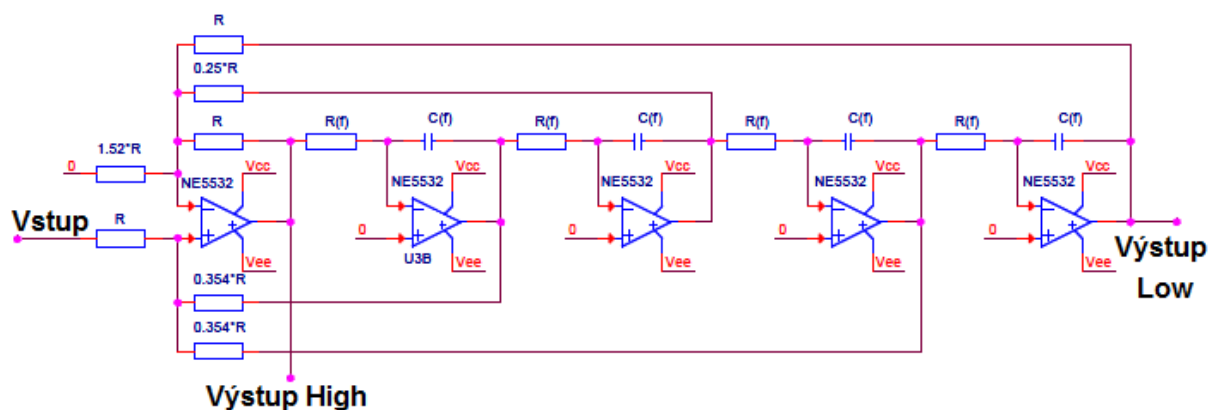
### 3.1 State variable

Filtr typu state – variable je velmi univerzální zapojení. Pomocí jednoho tohoto zapojení se zároveň realizují filtry typu DP, HP a PP. Skládá se z několika integrátorů a jednoho sumátoru. Vyšší počet operačních zesilovačů v zapojení nám sníží vzájemné závislosti součástek filtru a tím sníží citlivost na jejich změny. Výhodou tohoto zapojení je, že má výstupy horní a dolní propusti ve fázi.

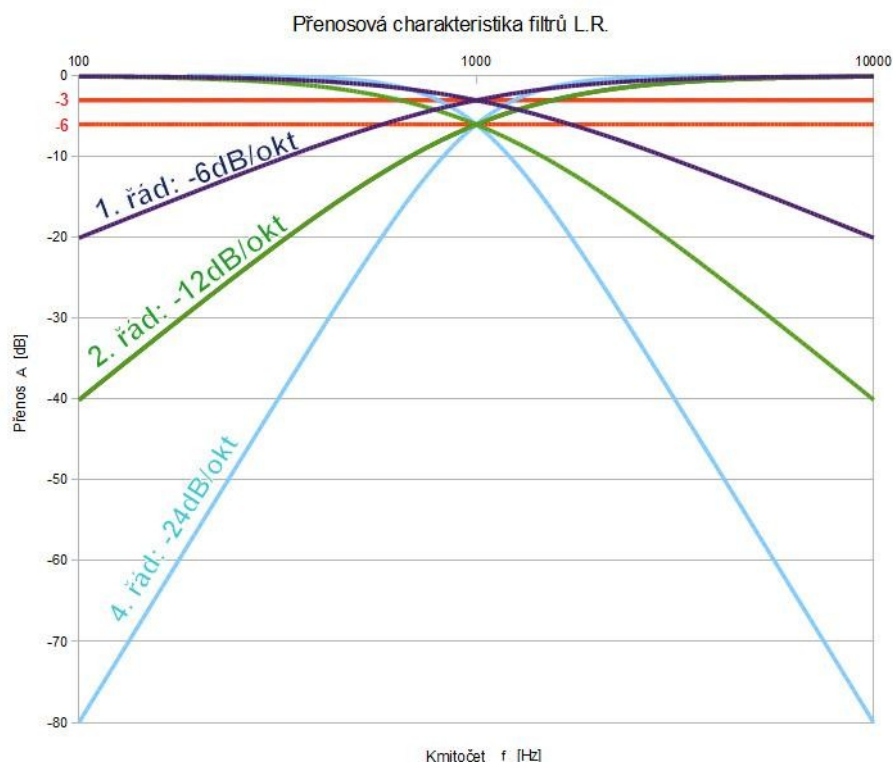
Na Obr. 3.1.1 jsem uvedl schéma zapojení filtru state – variable 4. řádu. Hodnoty součástek  $R(f)$  a  $C(f)$  určují mezní kmitočet filtru podle vzorce ( 10 ). Obrovskou výhodou tohoto filtru je, že změnu mezního kmitočtu lze provést pouze změnou čtyř rezistorů  $R(f)$  a čtyř kondenzátorů  $C(f)$  a nijak se tím nezasáhne do struktury filtru, nezmění se amplituda ani činitel jakosti  $Q$ .

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_{(f)} \cdot C_{(f)}} \quad (10)$$

Hodnoty rezistorů  $R$  a  $číslo \cdot R$  tvoří odporovou síť filtru s aproximací Linkwitz – Riley.



Obr. 3.1.1 Schéma zapojení filtru typu state – variable 4. řádu s aproximací L. - R.

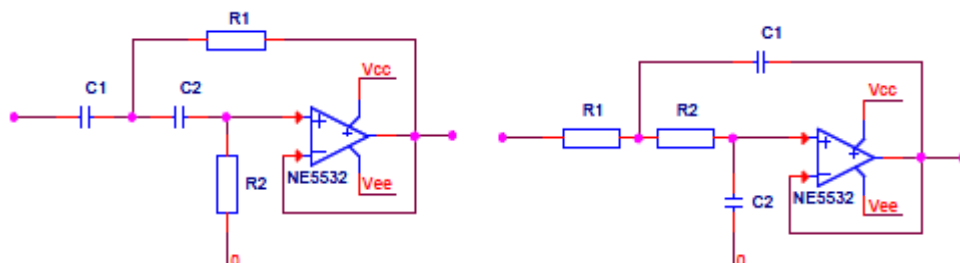


Obr. 3.1.2 Přenosové charakteristiky filtrů typu state – variable 1. 2. a 4. řádu

### 3.2 Sallen – Key

Zapojení aktivního filtru Sallen – Key obsahuje pouze jeden operační zesilovač a RC síť. Ve většině případů se používá filtr 2. řádu, jehož RC síť obsahuje 2 rezistory a 2 kondenzátory. Vyšší řády filtru se realizují kaskádním zapojením filtrů 2. řádu. Sallen – Key je univerzální zapojení, pomocí něhož lze realizovat všechny výše uvedené typy aproximací pouze změnou RC sítě. Dělicí kmitočet  $f_0$  pro druhý řád filtru se spočítá jako:

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} ; f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} \text{ pro } R = R_1 = R_2 \text{ a } C = C_1 = C_2 \quad (11)$$



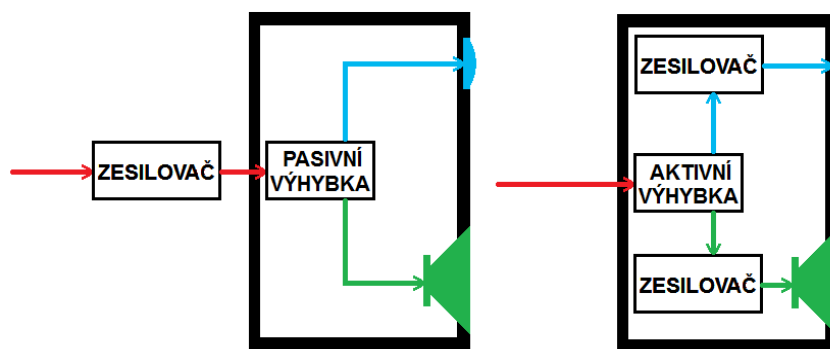
Obr. 3.2.1 Schéma zapojení Sallen-key 2. řádu pro HP a DP

## 4. Návrh aktivní výhybky

Aktivní výhybky používané v audiotechnice jsou speciálním zapojením ARC filtrů. Protože neexistuje reproduktor, které by svým pásmem pokryl celé slyšitelné spektrum 20Hz až 20kHz, používáme reproduktorové soustavy se dvěma a více reproduktory. Úkolem výhybky je rozdělit vstupní signál do několika pásem pro jednotlivé reproduktory. Výhybka může být buď pasivní nebo aktivní.

Pasivní výhybka je umístěna mezi zesilovačem a reproduktorem přímo v reprobedně. Je nutné ji navrhovat pro velká napětí a výkony. Parametry pasivní výhybky jsou ovlivněny použitým reproduktorem, protože reproduktor je v tomto případě zapojen jako její zátěž.

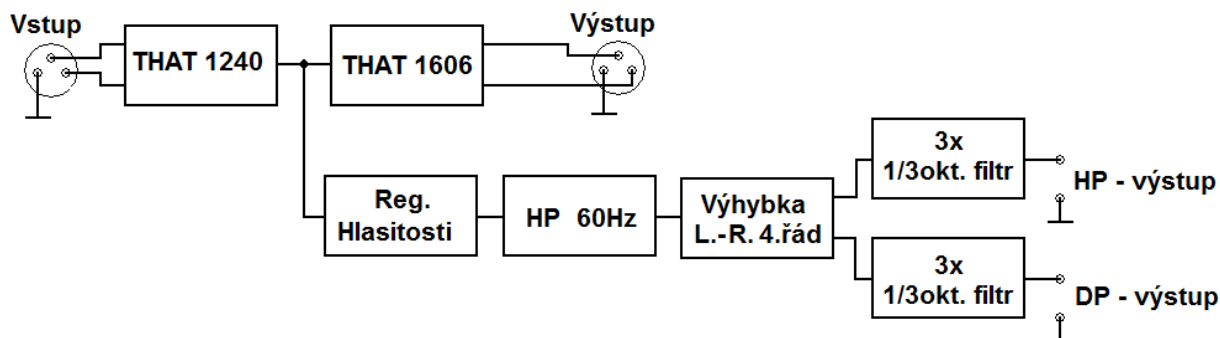
U aktivní výhybky všechny tyto negativní věci odpadají. Je umístěna mezi zdrojem audiosignálu a zesilovači. Není tedy namáhána velkými výkony ani ovlivňována vlastním reproduktorem. Je ovšem nutné použít pro každý reproduktor vlastní zesilovač.



Obr. 4.1 Zapojení pasivní a aktivní reproduktorové výhybky

Základními požadavky mnou realizovaného zapojení aktivní výhybky jsou symetrický vstup, regulace hlasitosti, předřazená horní propust na 60Hz, aktivní dvoupásmová výhybka L. - R. se strmostí 24dB/okt. (80dB/dek), pro každé pásmo 3x 1/3oktávový filtr pro korekci charakteristik reproduktoru a nesymetrický výstup. Dále symetrický výstup, jehož signál bude propojený se vstupem a bude sloužit pro propojení s dalšími zařízeními. Jelikož bude výsledný plošný spoj umístěný uvnitř reprobedny, jsou nutné i malé rozměry.

#### 4.1 Blokové schéma

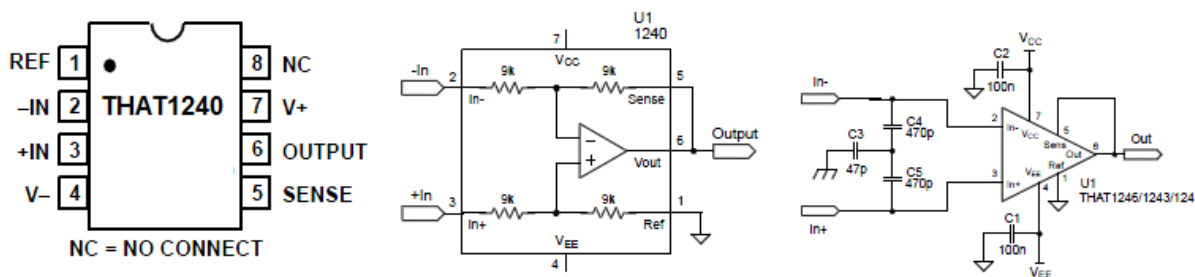


Obr. 4.1.1 Blokové schéma zapojení

#### 4.2 Obvod THAT 1240

Integrovaný obvod THAT 1240 je diferenciální operační zesilovač přímo určený pro použití jako symetrický linkový přijímač v audiotechnice. Obvod tedy převede vstupní symetrický signál na nesymetrický pro další zpracování. Tento obvod má nastaven zisk na 0dB, takže amplituda výstupního napětí je stejná jako amplituda napětí vstupního. Jeho funkce, zapojení a rozložení vývodů přesně odpovídá běžně používanému obvodu SSM 2141. Obvod THAT 1240 má ovšem nižší zkreslení. V tabulce jsem Tab. 4.2.1 jsem uvedl několik základních parametrů těchto obvodů a na Obr. 4.2.1 je vidět rozložení vývodů, vnitřní zapojení a doporučené zapojení obvodu s ochranou proti rušení. .

Obvod se vyrábí ještě ve verzích THAT 1243 a THAT 1246. Obvody se liší hodnotami vnitřních odporů, které určují zesílení integrovaného obvodu. Obvod THAT 1243 má podle použitého zapojení zisk -3dB nebo +3dB, obvod THAT 1246 má zisk -6dB nebo +6dB.



Obr. 4.2.1 Obvod THAT 1240 – pouzdro, vnitřní zapojení, typické zapojení obvodu

Parametr	symbol	SSM2141	THAT 1240	Jednotky
Supply voltage	Vcc-Vss	Max. $\pm 18$	$\pm 3$ až $\pm 18$	V
Fast Slew Rate	SR	9,5	12	V/ $\mu$ s
Wide bandwidth	WB	3	8,6	Mhz
Low distortion	THD	0,001	0,0006	%
Supply current	Icc	2,5	2	mA

Tab. 4.2.1 Porovnání základních parametrů obvodů SSM2141 a THAT1240

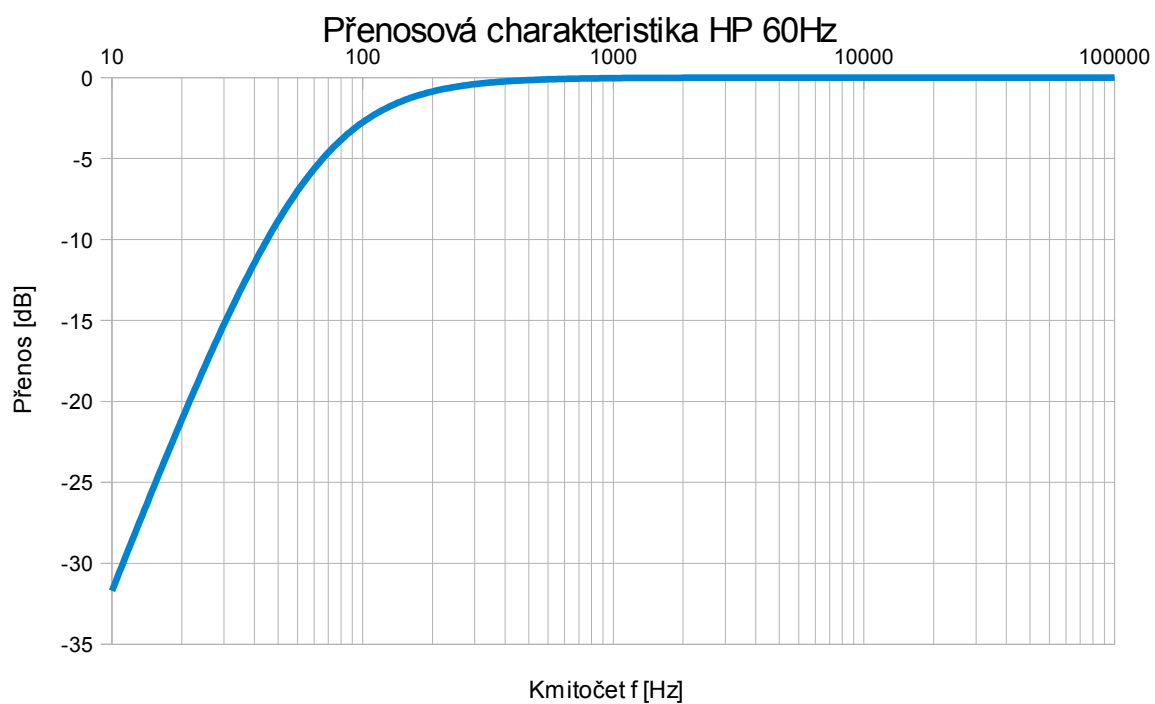
### 4.3 Filtr horní propust 60Hz

Filtr horní propust na 60Hz slouží pro odfiltrování nepotřebných dolních kmitočtů. Použil jsem filtr s aproximací typu L.-R. 2. řádu v zapojení Sallen – Key s jedním operačním zesilovačem. Filtr má strmost 12dB/okt. (40dB/dek). Pro mezní kmitočet filtru  $f_0=60$ Hz jsem zvolil kondenzátor  $C=100$ nF a dopočetl k němu rezistor:

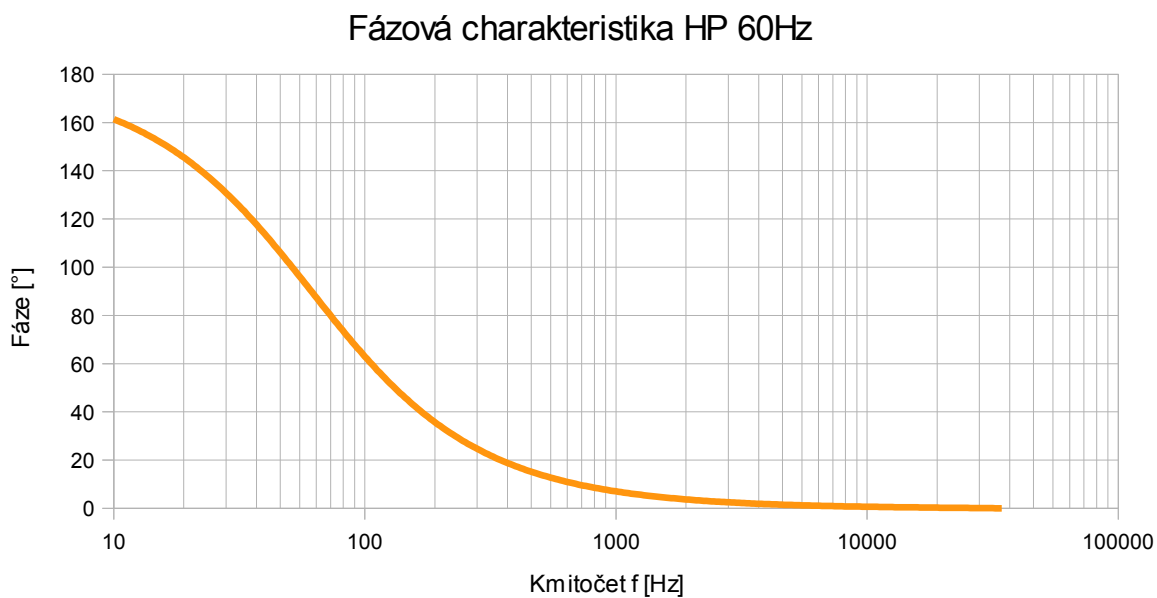
$$R = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 26k \cdot 100n} = 26,5 \text{ k}\Omega \quad (12)$$

Pro hodnotu rezistoru z řady  $R=26$ k $\Omega$  vychází dělicí kmitočet

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 26k \cdot 100n} = 61\text{Hz} \quad (13)$$



Obr. 4.3.1 Odsimulovaná přenosová charakteristika horní propusti 60Hz



Obr. 4.3.2 Odsimulovaná fázová charakteristika horní propusti 60Hz

#### 4.4 Výhybka typu state – variable

Hlavní náplní celé práce je právě návrh aktivní výhybky s aproximací Linkwitz-Riley 4. řádu a s dělicím kmitočtem 2500Hz. Zvolil jsem zapojení typu state – variable, protože obsahuje rovnou oba DP i HP a je lehce přeladitelná.

Hodnoty rezistorů v odporové síti zapojení, při volbě  $R=10k\ \Omega$  jsou uvedeny v následující tabulce Tab. 4.4.1. Použité hodnoty se liší max. o 1,7%.

Rezistor	Hledaná hodnota [k $\Omega$ ]	Použitá hodnota [k $\Omega$ ]	Rozdíl [%]
0,25 x R	2500	2500	100
0,354 x R	3540	3600	101,69
1,52 x R	15200	15000	98,68

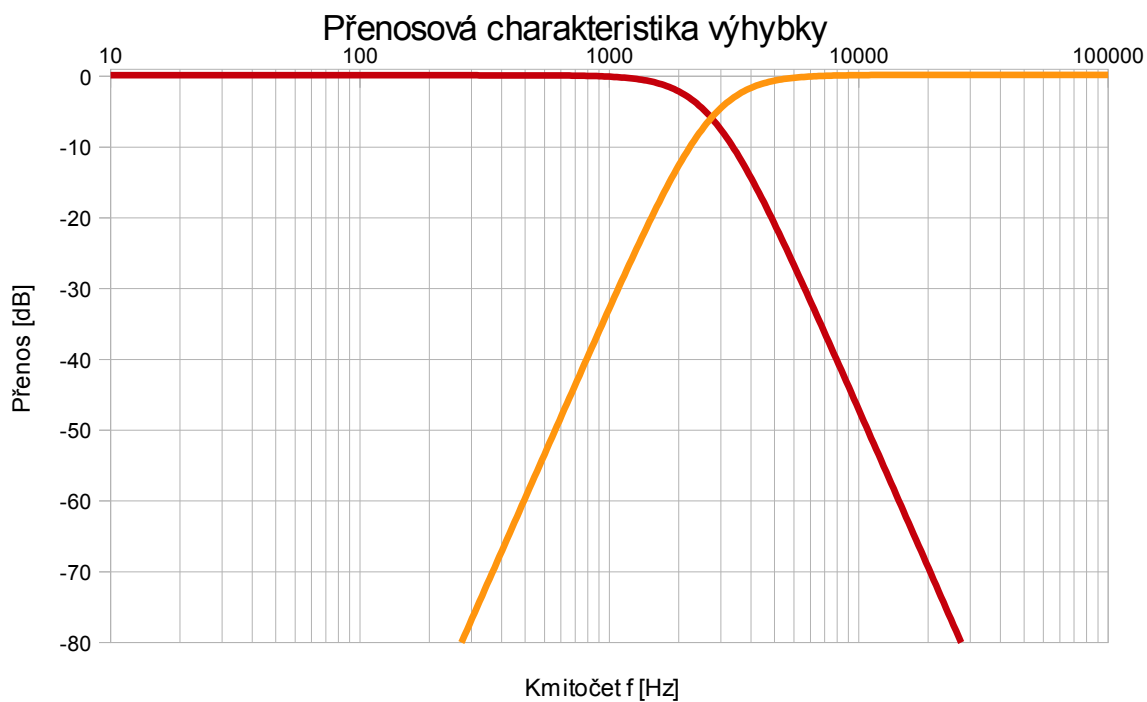
Tab. 4.4.1 Vypočtené hodnoty odporů pro state - variable

Hodnotu kondenzátoru jsem zvolil 10nF a k němu jsem dopočetl podle vzorce ( 14 ) hodnotu rezistoru  $R_{vypocet}=6,36k\ \Omega$  . Použil jsem nejbližší hodnotu z řady  $R=6,2k\ \Omega$  .

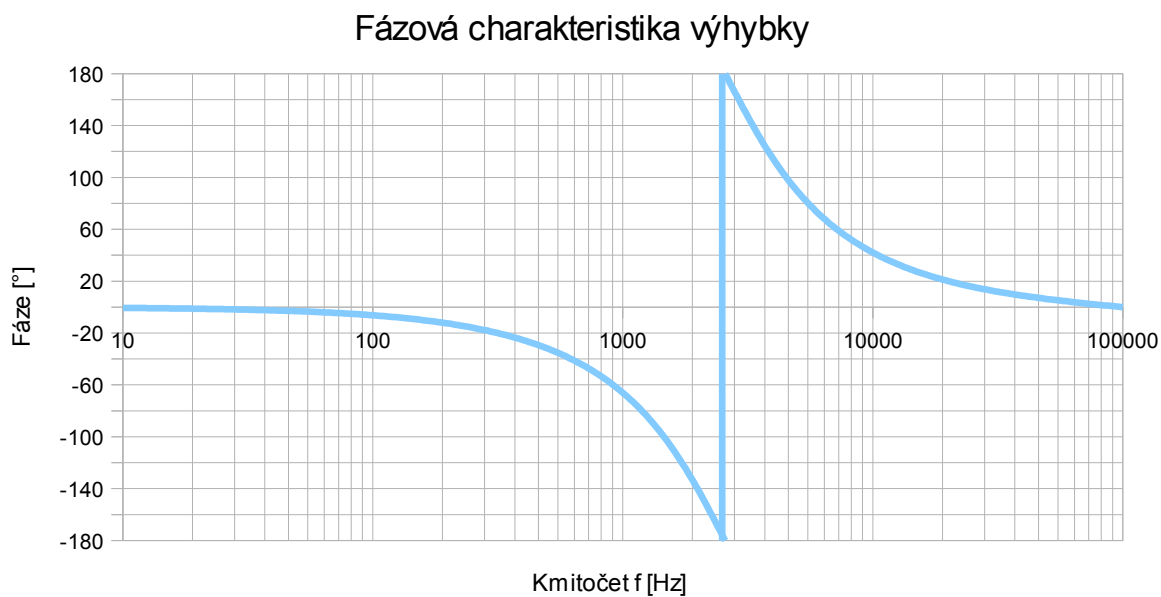
$$R_{vypocet} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 2500 \cdot 10n} = 6,36k\ \Omega \quad (14)$$

Dělicí kmitočet se po přepočtu změnil na:

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 6,2k \cdot 10n} = 2567Hz \quad (15)$$



Obr. 4.4.1 Odsimulovaná přenosová charakteristika výhybky

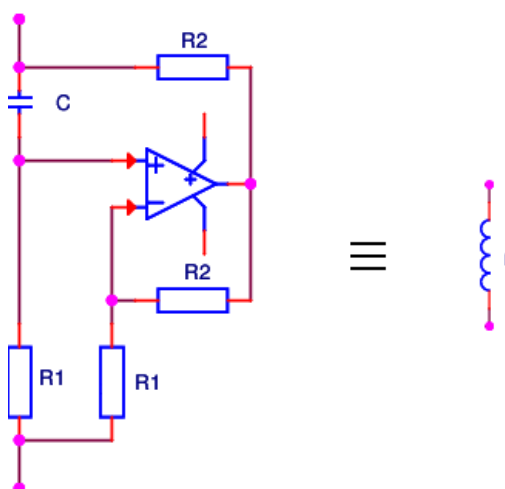


Obr. 4.4.2 Odsimulovaná fázová charakteristika výhybky



#### 4.5 Kmitočtová korekce reproduktorů

Pro korekci kmitočtové charakteristiky reproduktoru je výhybka doplněna o 3 1/3oktávové filtry pro každé pásmo. Zapojení, které jsem použil, pochází od pana Ing. Karla Hájka CSc. [1] Použité zapojení ekvalizéru má rozsah zdvihu jednotlivých pásmových filtrů  $\pm 15\text{dB}$ . Jedná se o zapojení sériového rezonančního L, C obvodu, ovšem se syntetickým induktorem. Indukčnost je nahrazena kondenzátorem a operačním zesilovačem a několika rezistory.



Obr. 4.5.1 Zapojení syntetického induktoru

Výpočet indukčnosti je podle vzorce (16) kde  $k$  je převodní konstanta.

$$L = k \cdot C \quad (16)$$

Rezonanční kmitočet sériového rezonančního obvodu se spočítá:

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{L \cdot C}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{kC \cdot C}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C \sqrt{k}} \quad (17)$$

V zapojení došlo k mírným změnám. Protože se jedná o korekci pásem dvou konkrétních reproduktorů, byli potenciometry nahrazeny rezistory s pevnými hodnotami. Jelikož je jednodušší složit přesnou hodnotu z několika rezistorů než z několika kondenzátorů, nahradil jsem původní hodnoty kondenzátorů v pásmových filtrech z hodnotami 1nF, 10nF a 100nF a k nim dopočítal podle vzorce (19) potřebné rezistory.

$$\sqrt{k} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \rightarrow k = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot f \cdot C)^2} \quad (18)$$

$$\text{pro } k = R_1 \cdot R_2 \rightarrow R_1 = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot f \cdot C)^2 \cdot R_2} \quad (19)$$

Přepočítané hodnoty rezistorů pro dané kmitočty jsou uvedeny v Tab. 4.5.1 a jsou barevně rozlišeny podle použitého kondenzátoru.

$$\begin{array}{l} C = 1 \text{ nF} \\ C = 10 \text{ nF} \\ C = 100 \text{ nF} \end{array} \quad R_2 = 150 \text{ k}\Omega$$

f [Hz]	63	80	100	125	160	200	250
R <sub>1</sub> [Ω]	4255	2639	1689	1081	660	42217	27019
f [Hz]	315	400	500	630	800	1	1,25
R <sub>1</sub> [Ω]	17019	10554	6755	4255	2639	1689	1081
f [kHz]	1,6	2	2,5	3,15	4	5	6,3
R <sub>1</sub> [Ω]	660	42217	27019	17019	10554	6755	4255
f [kHz]	8	10	12,5	16	20		
R <sub>1</sub> [Ω]	2639	1689	1081	660	422		

Tab. 4.5.1 Vypočítané hodnoty rezistorů ke kondenzátorům

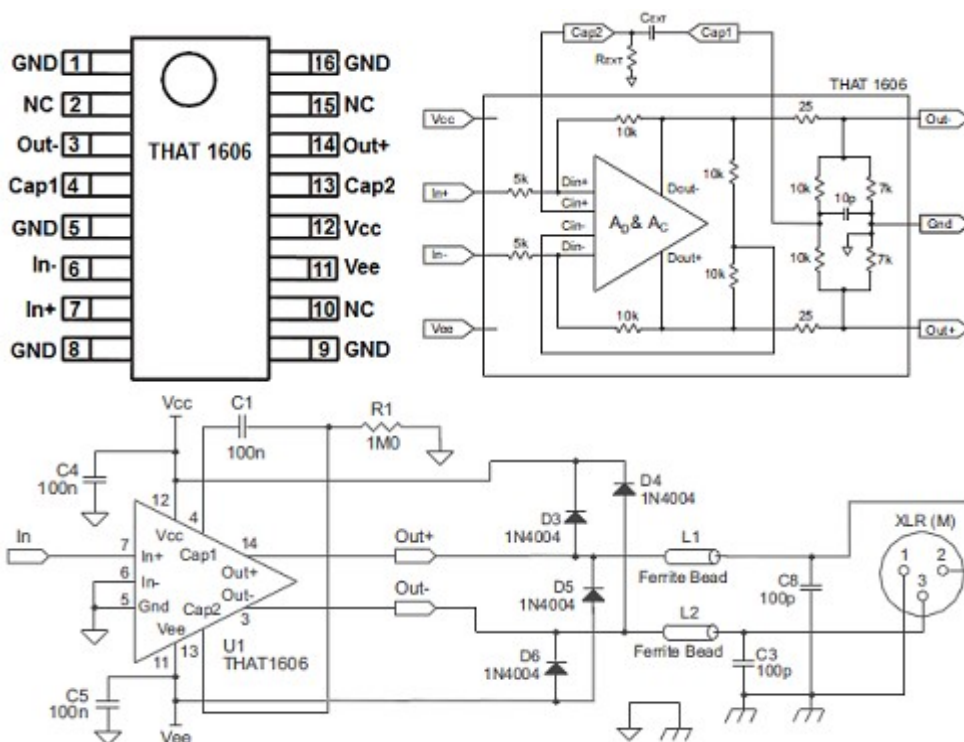
#### 4.6 Obvod THAT 1646

Integrovaný obvod THAT 1606 má symetrický vstup i výstup a jedná se o symetrický linkový vysílač určený přímo pro audiotechniku. Ze stejné řady existuje ještě obvod THAT 1646, který má nesymetrický vstup. Zapojení a rozložení vývodů u obvodu THAT 1646 přesně odpovídá běžně používanému obvodu SSM 2141. Obvod THAT má opět nižší zkreslení.

Na obrázku Obr. 4.6.1 je rozložení vývodů obvodu THAT 1606, jeho vnitřní zapojení a doporučené schéma zapojení pro obvod s nesymetrickým vstupem a ochranou proti rušení. Pomocí diod je D3 až D6 je provedena ochrana proti chybnému propojení s vstupem pro mikrofon. Na mikrofon je ze zesilovače stejným konektorem přivedeno napájení 48V, které by mohlo tento obvod poškodit.

Parametr	symbol	SSM2142	THAT 1606	Jednotky
Supply voltage	Vcc-Vss	Max. $\pm 18$	$\pm 4$ až $\pm 18$	V
Fast Slew Rate	SR	15	15	V/ $\mu$ s
Wide bandwidth	WB	---	10	Mhz
Low distortion 20Hz – 5kHz	THD	0,006	0,0007	%
Low distortion 5kHz – 20kHz	THD	0,006	0,002	%
Supply current	Icc	5,5	4,9	mA
Signal to noise	SNR	-93,4	-101	dBu
Output (in 600 $\Omega$ )		10	18	Vrms

Tab. 4.6.1 Porovnání základních parametrů obvodů SSM2142 a THAT1606



Obr. 4.6.1 Obvod THAT 1606 - pouzdro, vnitřní zapojení, typické zapojení obvodu

#### 4.7 Vstupní a výstupní konektory, přepínače

Protože bude celé zařízení umístěné uvnitř reprobedny spolu s transformátorem, zesilovači a reproduktory, tak není potřeba vkládat pro napájení a audio výstupy z výhybky speciální konektory, ale dojde pouze k přiletování kabelů.

Pro přivedení symetrického audiosignálu do zařízení jsem použil tři pinový combo XLR konektor NCJ6FA-H od firmy NEUTRIK. Jedná se o kombinovaný XLR konektor, do kterého jde zapojit i konektor jack (TRS) 6,35mm (¼ palce). Pro výstup symetrického audiosignálu jsem použil tři pinový XLR konektor NC3MAAH, též od firmy NEUTRIK.

Vyvedeny jsou též 3 přepínače které slouží k vypnutí horní propusti a obou korekčních filtrů. Přepínače jsem zvolil SPUN191400 od firmy ALPS, jedná se o dvoupolohový, nezkratující tlačítkový přepínač.



Obr. 4.7.1 Vstupní a výstupní konektor firmy NEUTRIK, přepínač ALPS

#### 4.8 Zdroj

Pro napájení operačních zesilovačů a všech dalších použitých obvodů je nutné mít symetrické napájení  $\pm 15V$ . Pro stabilizaci výstupního napětí jsem tedy použil lineární stabilizátory 7815 pro kladné napětí a 7915 pro záporné, oba v pouzdře TO-220. Oba jsem kvůli jejich ochraně přemostil diodou v závěrném směru. Dioda zamezí tomu, aby se na výstupu stabilizátoru objevilo větší napětí než na vstupu, např. při výpadku napájení.

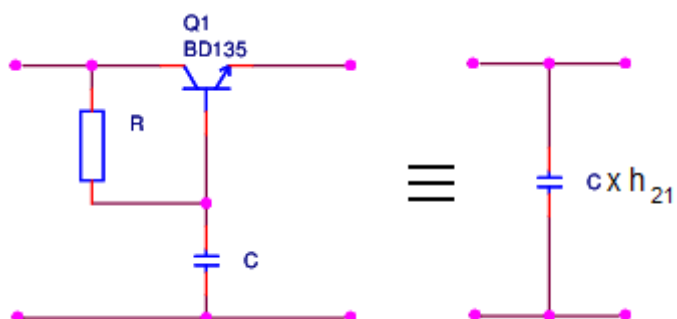
Celé zapojení je napájeno ze symetrického transformátoru o napětí 2x15V až 2x24V. Střídavé napětí je usměrněno pomocí integrovaného diodového můstku. Následují elektrolytické kondenzátory o kapacitě 1mF, které mají za úkol vyhladit usměrněné střídavé napětí. Minimální kapacita kondenzátoru se spočítá ze vzorce (výpočet uveden pro 15V výstup z transformátoru):

$$C_{min} = \frac{I_m}{n \cdot f \cdot (U_{ef} \cdot \sqrt{2} - U_d - U_{stab} - 3)} = \frac{150 mA}{2 \cdot 50 \cdot (15 \cdot \sqrt{2} - 1,4 - 15 - 3)} = 0,83 mF \quad (20)$$

kde  $n$  je počet cest usměrňovače,  $U_{ef}$  je efektivní hodnota střídavého napětí,  $U_d$  je napětí na usměrňovacích diodách a  $U_{stab}$  je výstupní napětí stabilizátoru.

Za výstupy obou stabilizátorů jsem zařadil násobičku kapacity pro ještě další vyhlazení napájecího napětí. Násobička se skládá z tranzistoru s vysokým proudovým zesilovacím činitelem  $h_{21}$  a RC článku. Zapojení funguje tak, že zvlnění filtrovaného napětí

přivírá nebo otvírá tranzistor a celé zapojení se chová jako by zde byl zapojen kondenzátor o kapacitě  $h_{21} \cdot C$ .



Obr. 4.8.1 Násobička kapacity

## 5. Konstrukce výhybky

Po nastudování potřebných informací jsem navrhl a nakreslil schéma zapojení a vypočetl jsem hodnoty všech použitých rezistorů a kondenzátorů. Kompletní schéma zapojení je přiloženo v příloze D až F.

Pomocí programu PSpice jsem odsimuloval funkčnost jednotlivých bloků zapojení. Protože simulace proběhly v pořádku, rozhodl jsem se ještě funkčnost zapojení ověřit se skutečnými součástkami na nepájivém poli. Po oživení zapojení jsem pomocí spektrálního analyzátoru proměřil výhybku, horní propust a korektor kmitočtového pásma reproduktoru. Výsledky měření jsou přiloženy v příloze A až C.

Dále následoval návrh celého plošného spoje. Ten jsem provedl v programu Altium Designer. Protože je schéma poměrně velké, zvolil jsem dvouvrstvý plošný spoj, aby bylo možné propojit všechny součástky bez drátových propojek. Kvůli minimalizaci velikosti jsem použil SMD rezistory o velikosti 0805 a SMD tantalové blokovací kondenzátory o stejné velikosti. Dále jsem použil jako filtrační kondenzátory ve zdroji dva elektrolytické C29 a C37 s radiálními vývody s roztečí 5mm a průměrem 10mm a dva další tantalové v pouzdru SMD-C. Všechny ostatní použité kondenzátory pro nastavení filtrů a pro stejnosměrné oddělení jsou svitkové s roztečí radiálních vývodů 5mm. Jako usměrňovací můstek jsem použil B560C1000 v pouzdře DIL a jako operační zesilovače jsem použil obvod NE5532 v pouzdře DIL8, který obsahuje 2 OZ.

Na přední panel jsem umístil všechny tři přepínače, XLR vstupní a výstupní konektor a potenciometr pro regulaci hlasitosti. Napájecí konektor k transformátoru jsem umístil na pravou stranu ke stabilizátorům a usměrňovacím diodám. Výstupy na propojení k zesilovačům jsem umístil na levou stranu. Do každého rohu plošného spoje jsem umístil otvor o průměru 3mm na přimontování. Na závěr jsem u obou stran plošného spoje provedl rozlité mědi se zemním potenciálem. Výsledný plošný spoj má rozměry 140 x 71,8mm.

Zapojení obsahuje celkem 12 integrovaných obvodů, 2 tranzistory, 7 diod, 66 rezistorů a 60 kondenzátorů.

## 6. Naměřené hodnoty

Celé zapojení jsem proměřil na spektrálním analyzátoru v akustické laboratoři Katedry technologií a měření. Jelikož jsem proměřil pouze zapojení na nepájivém poli, můžou se skutečné hodnoty výsledného plošného spoje mírně lišit. Zapojení jsem proměřil v rozmezí od 10Hz do 26kHz, takže jsem tím pokryl větší než poslechové pásmo.

V tabulce naměřených hodnot Tab. 6.1 jsem uvedl požadované, vypočtené a naměřené hodnoty dělicích kmitočtů jednotlivých filtrů. Celé výsledné změřené přenosové charakteristiky jsou uvedeny v příloze.

	HP	Výhybka DP	Výhybka HP
$f_{0P}$ požadovaná [Hz]	60	2500	2500
$f_{0V}$ vypočtená [Hz]	61	2567	2567
$f_{0Z}$ změřená [Hz]	70	2640	2640
Rozdíl $f_{0Z}$ a $f_{0P}$ [%]	14,29	5,3	5,3
Rozdíl $f_{0Z}$ a $f_{0V}$ [%]	12,86	2,77	2,77

Tab. 6.1 Porovnání naměřených hodnot

## 7. Závěr

Podle požadavků byla realizována aktivní výhybka s aproximací Linkwitz – Riley s rozložením součástek typu state – variable s dělicím kmitočtem 2500Hz. Výsledné zapojení obsahuje též horní propust s dělicím kmitočtem na 60Hz, filtry pro korekci kmitočtového pásma reproduktoru, vstupní a výstupní obvody a napájecí zdroj.

Naměřená hodnota mezního kmitočtu horní propusti vyšla 70Hz. Od vypočítané se liší o 13% a od zadané téměř o 15%. Strmost filtru vyšla požadovaných 12dB/okt (40dB/dek). Naměřený mezní kmitočet výhybky vyšel jak u horní, tak u dolní propusti 2640Hz. To je více o 2,8% od vypočtené a o 5,3% od zadané hodnoty. Strmost filtru vyšla požadovaných 24dB/okt (80dB/dek). Rozdíl mezního kmitočtu, zejména u horní propusti, se zdá být proti zadané hodnotě poměrně veliký. Musí se ovšem vzít v úvahu přesnosti hodnot součástek, především kondenzátorů, u kterých výrobci udávají přesnosti až  $\pm 20\%$ .

Dále byla změřena charakteristiku korekčního filtru pro reproduktor na kmitočtu 125Hz. Změřený kmitočet, na kterém filtr pracoval, se přesně shodoval s nastavenou hodnotou.

Naměřené průběhy na spektrálním analyzátoru tedy odpovídají výpočtům, simulacím i teoretickým předpokladům.

Jelikož bude plošný spoj umístěný spolu se zesilovači přímo v reprobedně, bylo nutné ho udělat co nejmenší. Proto je použito co nejvíce součástek SMD. Jelikož celou přední stranu plošného spoje zabírají vyvedené konektory, přepínače a potenciometr, přijde mi výsledná velikost 140 x 71,8 mm ideální.

Odběr proudu celého zapojení je 140mA a spotřeba je tedy 4,2W. Cena celého zapojení vychází při kusové výrobě na 1400Kč. Nejlevnější výhybky se prodávají od 2500Kč výše.



## 8. Použitá literatura

- [1] HÁJEK, Karel. *Třetinooktávový ekvalizér. Amatérské radio: časopis pro elektroniky a amatéry*. Praha: AMARO spol. s r. o, 1989, roč. 1989, č. 7. (s. 90-93) ISSN 0322-9572.
- [2] MARTINEK, Pravoslav, Jiří HOSPODKA a Petr BOREŠ. *Elektrické filtry*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003, 314 s. ISBN 80-010-2765-1.
- [3] PINKER, Jiří a Václav KOUCKÝ. *Analogové elektronické systémy*. 4. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2010, 2 sv. (142 s., s. 143-307, 6, 15 s.). ISBN 978-80-7043-917-3.
- [4] SÝKORA, Bohumil. Moderní koncepce reproduktorových výhybek: 1. část. *Rozhlasová a televizní technika*. 1989, roč. 1989, č. 3, s. 4.
- [5] SÝKORA, Bohumil. Moderní koncepce reproduktorových výhybek: 2. část. *Rozhlasová a televizní technika*. 1989, roč. 1989, č. 4, s. 7.
- [6] SÝKORA, Bohumil. Reproduktoru a reproduktorové soustavy trochu jinak. *Konstrukční elektronika a radio*. Praha: Amaro, s.r.o, 1993, roč. 1993, č. 5, s. 34. ISSN 1211-3557.
- [7] SÝKORA, Bohumil. Vícecestná výhybka s konstantním příkonem a konstantní amplitudou. *Rozhlasová a televizní technika*. 1989, roč. 1985, č. 4, s. 5.
- [8] TURNOVSKÝ, Daniel. *Návrh a realizace hlubokotónových reproduktorových soustav pro ozvučovací PA systém*. Plzeň, 2008. Diplomová práce. Západočeská univerzita. Fakulta elektrotechnická. Katedra technologií a měření. Vedoucí práce Tureček, Oldřich.

### Elektronické zdroje:

- [9] Crossovers. In: [Http://www.linkwitzlab.com](http://www.linkwitzlab.com) [online]. říjen 2009 [cit. 2012-06-04]. Dostupné z: <http://www.linkwitzlab.com/crossovers.htm>
- [10] BOHN, Dennis. "A Fourth Order State Variable Filter for Linkwitz-Riley Active Crossover Designs," presented at the 74th Convention of the Audio Engineering Society, New York, Oct. 9-12, 1983, preprint no. 2011. z <http://www.rane.com/pdf/linriley.pdf>
- [11] Linkwitz-Riley Crossovers: A Primer. In: [Www.rane.com](http://www.rane.com) [online]. říjen 2005 [cit. 2012-06-04]. Dostupné z: <http://www.rane.com/note160.html>
- [12] SLÁNSKÝ, Michal. Kvalitní symetrický napájecí zdroj s možností volby napětí. In: [Www.hw.cz](http://www.hw.cz) [online]. září 2006. [cit. 2012-06-04]. Dostupné z: <http://www.hw.cz/teorie-a-praxe/konstrukce/kvalitni-symetricky-napajeci-zdroj-s-moznosti-volby-napeti.html>
- [13] TOŠOVSKÝ, Petr. Úvod do Altium Designeru: I - V. In: [Www.hw.cz](http://www.hw.cz) [online]. březen 2010 - květen 2011. [cit. 2012-06-04]. Dostupné z: <http://www.hw.cz/navrh-obvodu/software/uvod-do-altium-designeru-i.html>
- [14] XLR connector. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-06-04]. Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/XLR\\_connector](http://en.wikipedia.org/wiki/XLR_connector)

## Seznam ilustrací

OBR. 2.1.1 SCHÉMA ZAPOJENÍ DP 1. ŘÁDU A PŘENOSOVÁ CHARAKTERISTIKA DP.....	10
OBR. 2.1.2 SCHÉMA ZAPOJENÍ HP 1. ŘÁDU A PŘENOSOVÁ CHARAKTERISTIKA HP.....	11
OBR. 2.1.3 SCHÉMA ZAPOJENÍ A PŘENOSOVÁ CHARAKTERISTIKA PP.....	11
OBR. 2.1.4 SCHÉMA ZAPOJENÍ A PŘENOSOVÁ CHARAKTERISTIKA PZ.....	12
OBR. 2.2.1 TOLERANČNÍ SCHÉMA PRO DP.....	12
OBR. 2.3.1 POROVNÁNÍ PŘENOSOVÝCH CHARAKTERISTIK RŮZNÝCH APROXIMACÍ.....	14
OBR. 2.3.2 POROVNÁNÍ APROXIMACÍ LINKWITZ-RILEY A BUTTERWORTHOVY.....	15
OBR. 3.1 REALIZACE INDUKTORU POMOCÍ GYRÁTORU.....	16
OBR. 3.1.1 SCHÉMA ZAPOJENÍ FILTRU TYPU STATE – VARIABLE 4. ŘÁDU S APROXIMACÍ L - R.....	17
OBR. 3.1.2 PŘENOSOVÉ CHARAKTERISTIKY FILTRŮ TYPU STATE – VARIABLE 1. 2. A 4. ŘÁDU.....	18
OBR. 3.2.1 SCHÉMA ZAPOJENÍ SALLEN -KEY 2. ŘÁDU PRO HP A DP.....	18
OBR. 4.1 ZAPOJENÍ PASIVNÍ A AKTIVNÍ REPRODUKTOROVÉ VÝHYBKY.....	19
OBR. 4.1.1 BLOKOVÉ SCHÉMA ZAPOJENÍ.....	20
OBR. 4.2.1 OBVOD THAT 1240 – POUZDRO, VNITŘNÍ ZAPOJENÍ, TYPICKÉ ZAPOJENÍ OBVODU .....	21
OBR. 4.3.1 ODSIMULOVANÁ PŘENOSOVÁ CHARAKTERISTIKA HORNÍ PROPUSTI 60HZ.....	22
OBR. 4.3.2 ODSIMULOVANÁ FÁZOVÁ CHARAKTERISTIKA HORNÍ PROPUSTI 60HZ.....	22
OBR. 4.4.1 ODSIMULOVANÁ PŘENOSOVÁ CHARAKTERISTIKA VÝHYBKY .....	24
OBR. 4.4.2 ODSIMULOVANÁ FÁZOVÁ CHARAKTERISTIKA VÝHYBKY .....	24
OBR. 4.5.1 ZAPOJENÍ SYNTETICKÉHO INDUKTORU .....	25
OBR. 4.6.1 OBVOD THAT 1606 - POUZDRO, VNITŘNÍ ZAPOJENÍ, TYPICKÉ ZAPOJENÍ OBVODU.....	27
OBR. 4.7.1 VSTUPNÍ A VÝSTUPNÍ KONEKTOR FIRMY NEUTRIK, PŘEPÍNAČ ALPS .....	28
OBR. 4.8.1 NÁSOBIČKA KAPACITY.....	29

## Seznam tabulek

Tab. 3.1 Řád filtru .....	16
Tab. 4.2.1 Porovnání základních parametrů obvodů SSM2141 a THAT1240 .....	21
Tab. 4.4.1 Vypočtené hodnoty odporů pro state – variable .....	23
Tab. 4.5.1 Vypočítané hodnoty rezistorů ke kondenzátorům .....	26
Tab. 4.6.1 Porovnání základních parametrů obvodů SSM2142 a THAT1606.....	27
Tab. 6.1 Porovnání naměřených hodnot .....	31

## 9. Přílohy

Příloha A: Změřená přenosová charakteristika výhybky

Příloha B: Změřená přenosová charakteristika horní propusti 60Hz

Příloha C: Změřená přenosová charakteristika pásmového korektoru

Příloha D: Schéma vstupních a výstupních obvodů, výhybka a HP

Příloha E: Schéma zapojení korekčních filtrů

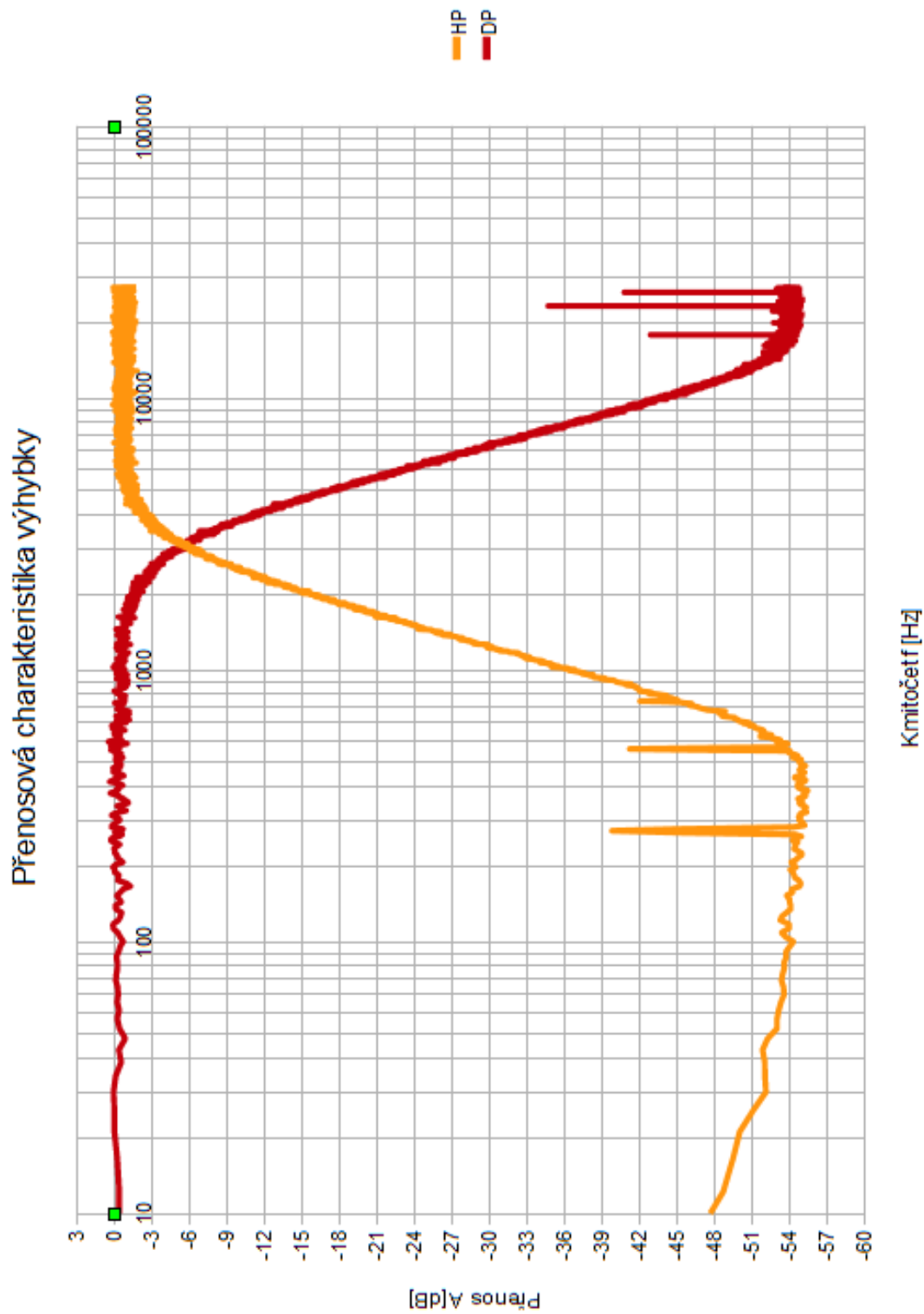
Příloha F: Schéma zdroje

Příloha G: Plošný spoj

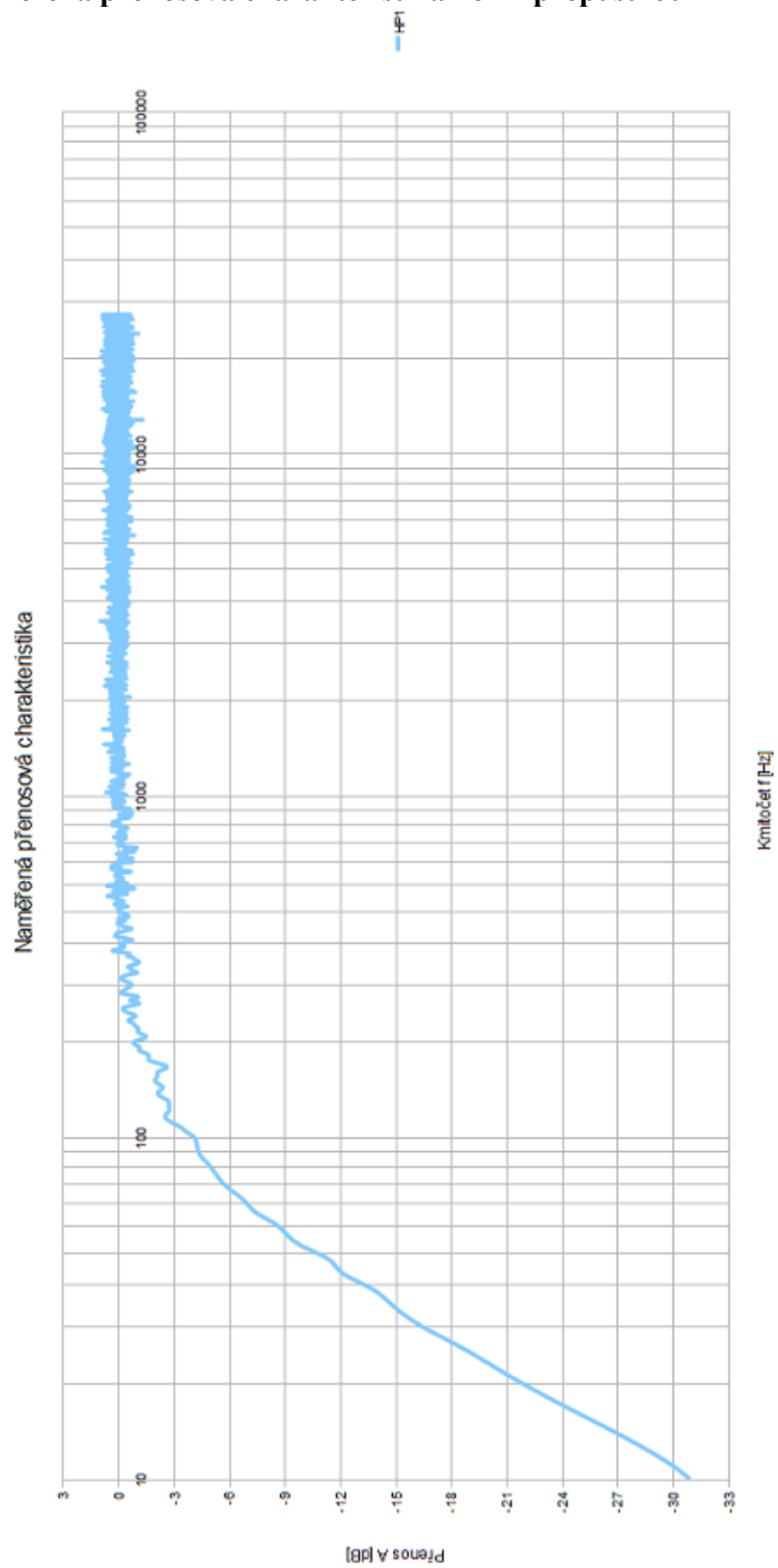
Příloha H: Plošný spoj – osazení

Příloha I: Seznam použitých součástek

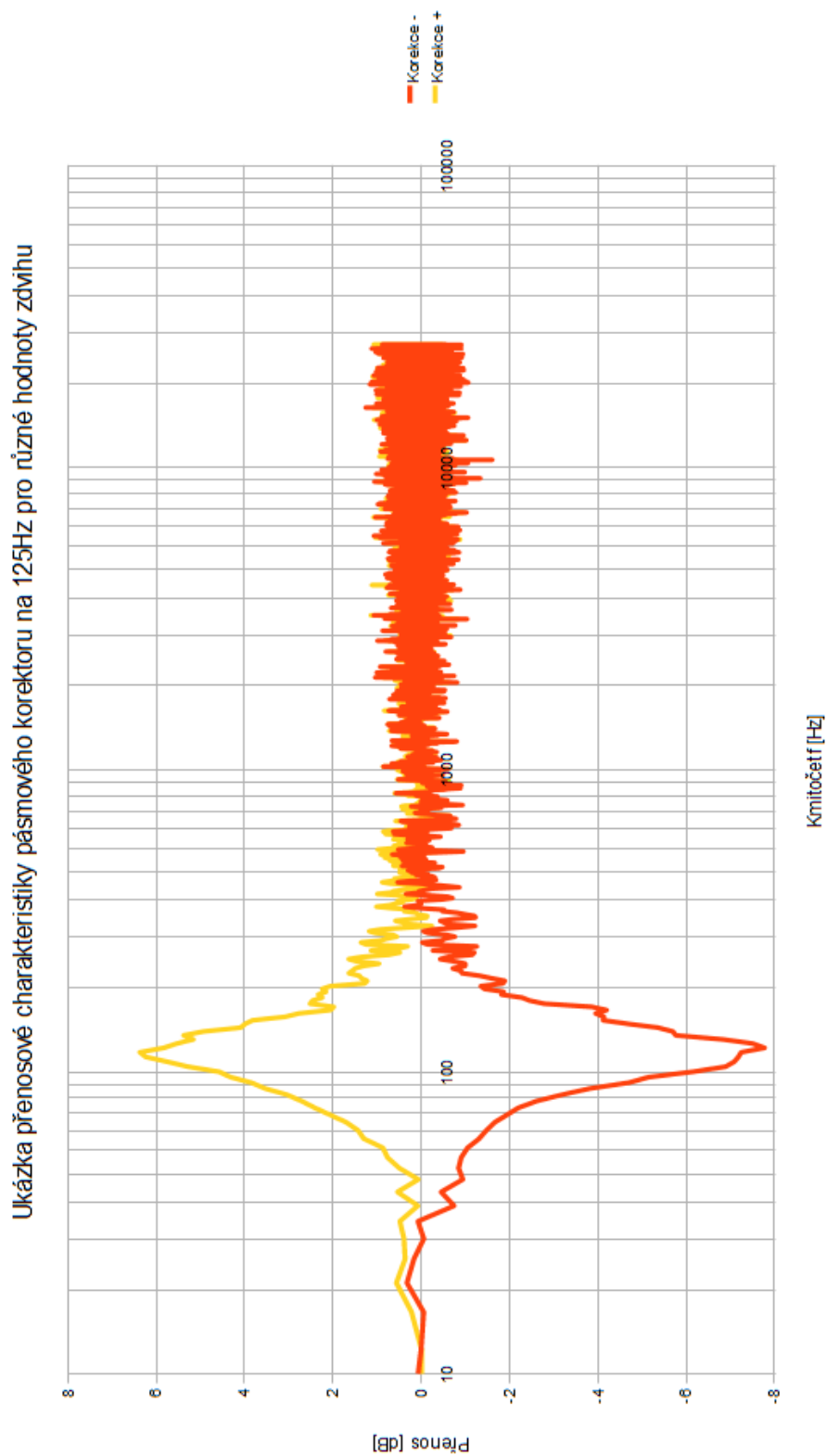
**Příloha A: Změřená přenosová charakteristika výhybky:**



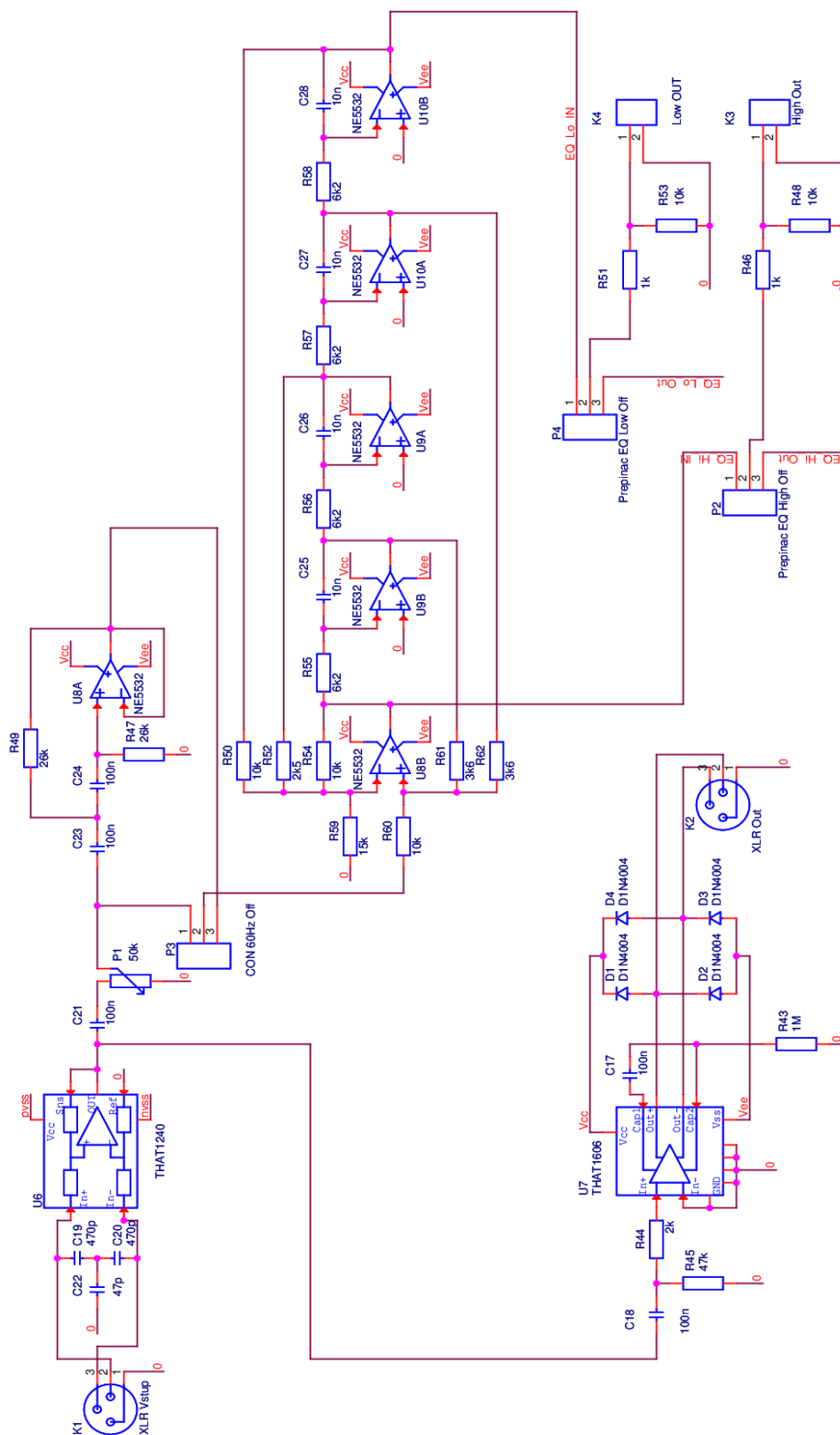
**Příloha B: Změřená přenosová charakteristika horní propusti 60Hz**



**Příloha C: Změřená přenosová charakteristika pásmového korektoru:**

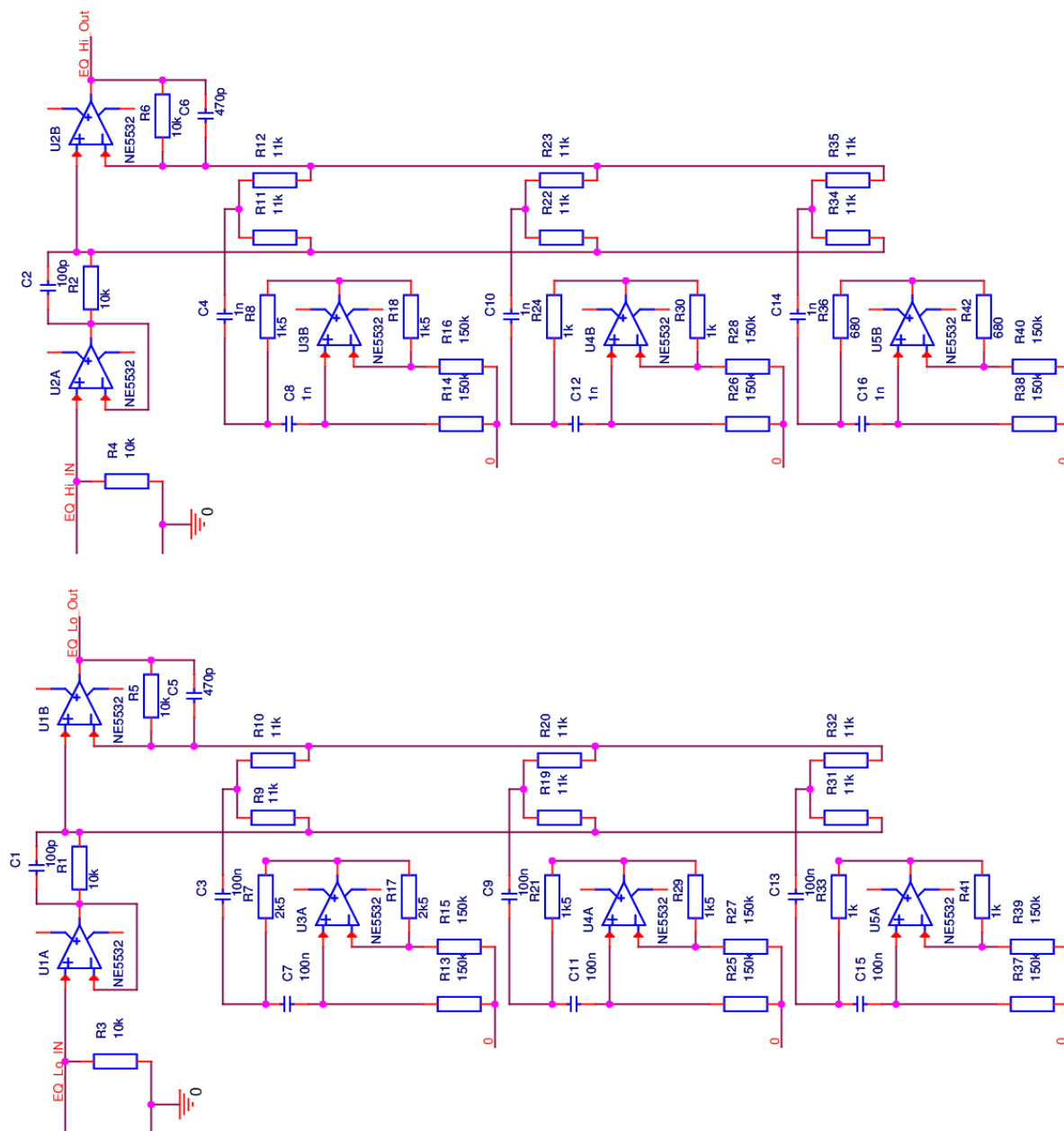


**Příloha D: Schéma vstupních a výstupních obvodů, výhybka a HP:**

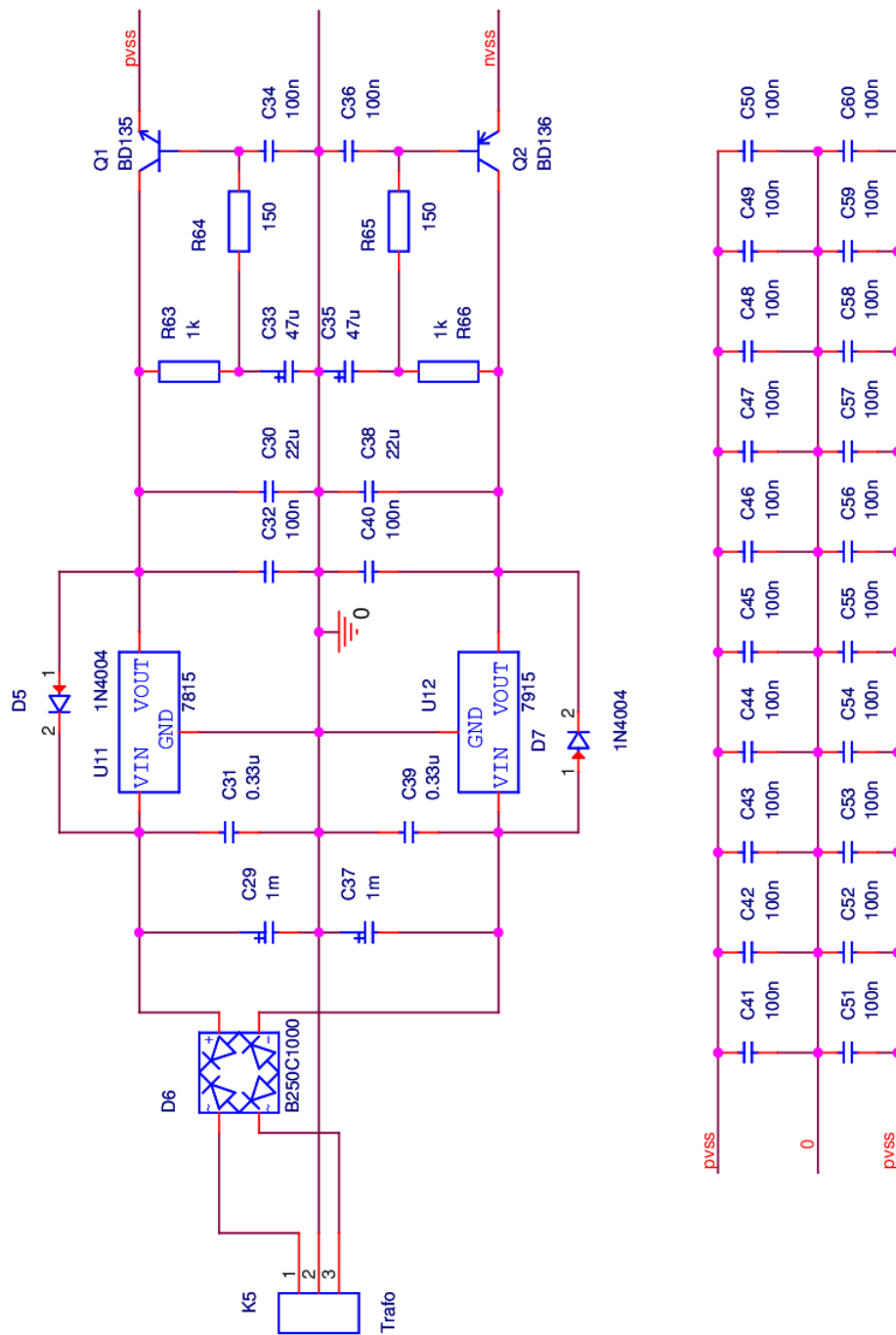




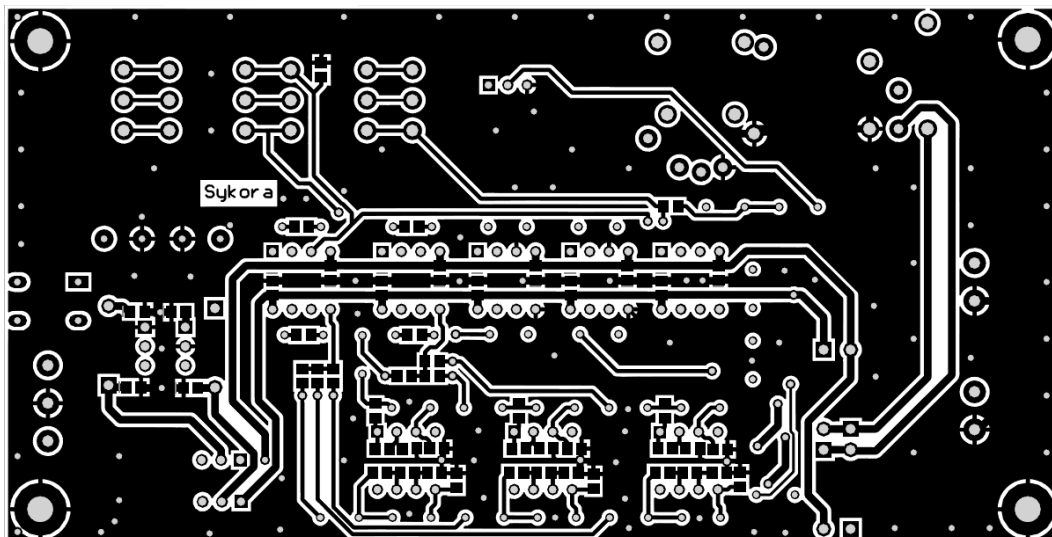
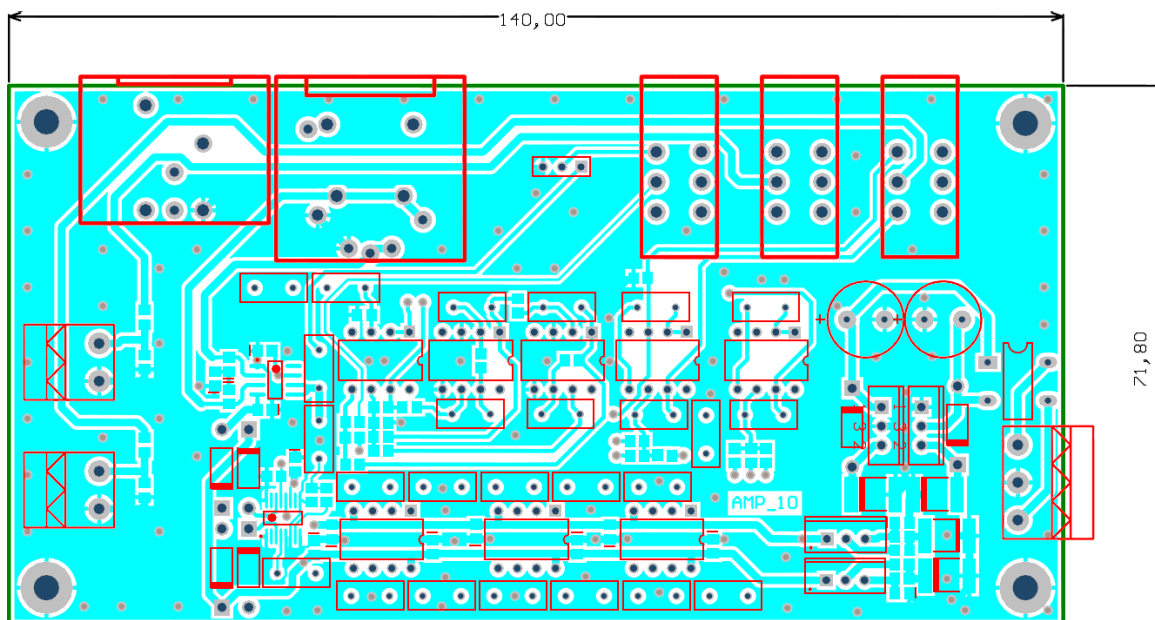
**Příloha E: Schéma zapojení korekčních filtrů:**



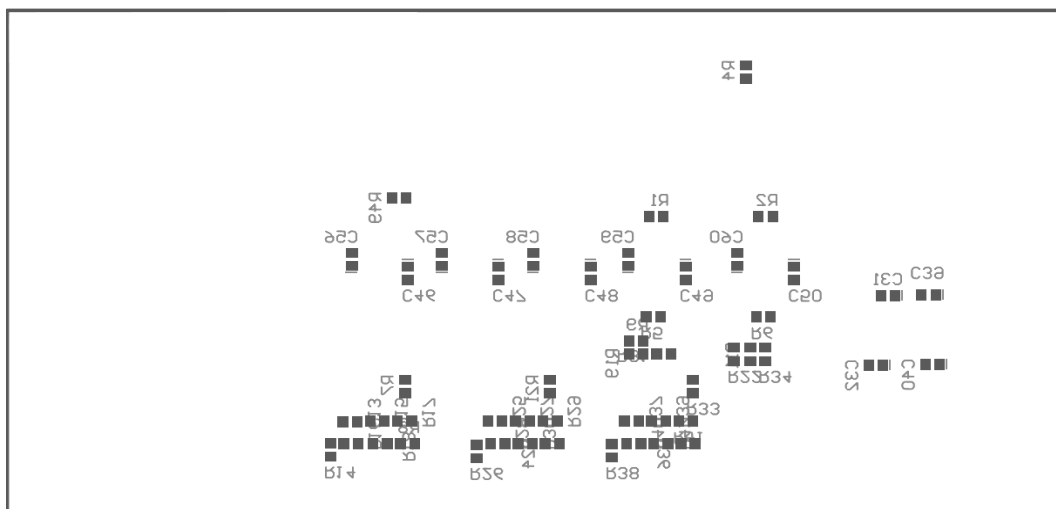
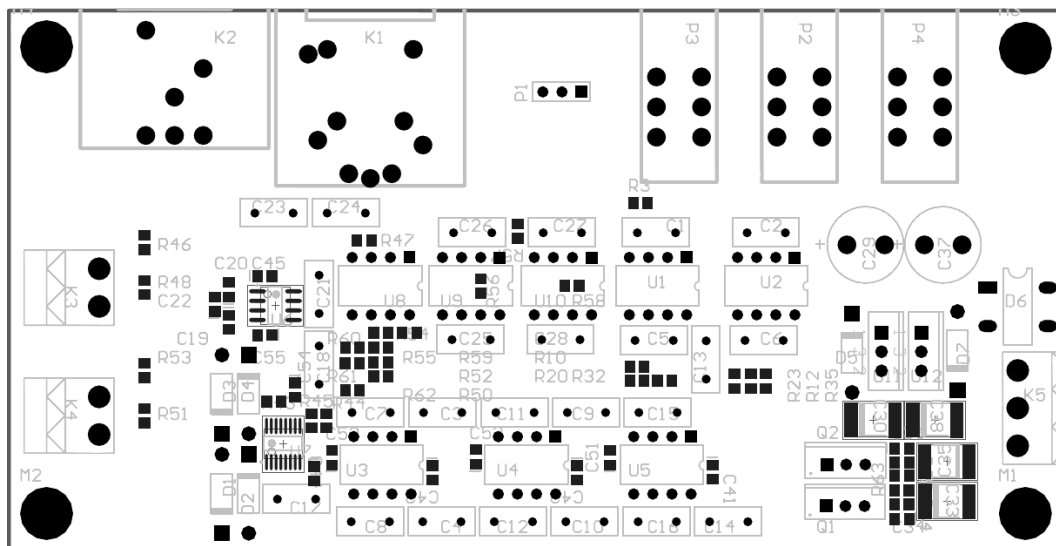
**Příloha F: Schéma zdroje:**



**Příloha G: Plošný spoj**



**Příloha H: Plošný spoj - osazení**



**Příloha I: Seznam použitých součástek**

Item	Quantity	Reference	Part
1	2	C1,C2	100p
2	35	C3,C7,C9,C11,C13,C15,C17, C18,C21,C23,C24,C32,C34, C36,C40,C41,C42,C43,C44, C45,C46,C47,C48,C49,C50, C51,C52,C53,C54,C55,C56, C57,C58,C59,C60	100n
3	6	C4,C8,C10,C12,C14,C16	1n
4	4	C5,C6,C19,C20	470p
5	1	C22	47p
6	4	C25,C26,C27,C28	10n
7	3	C29,C37	1m
8	2	C30,C38	22u
9	2	C31,C39	0.33u
10	2	C33,C35	47u
11	6	D1,D2,D3,D4,D5,D7	1N4004
12	1	D6	B560C1000
13	1	K1	NCJ6FA-H
14	1	K2	NC3MAAH
15	1	P1 potenciometr	50k
16	1	P2, P3, P4	SPUN191400
17	1	Q1	BD135
18	1	Q2	BD136
19	11	R1,R2,R3,R4,R5,R6,R48, R50,R53,R54,R60	10k
20	3	R7,R17,R52	2k5
21	4	R8,R18,R21,R29	1k5
22	12	R9,R10,R11,R12,R19,R20, R22,R23,R31,R32,R34,R35	11k
23	12	R13,R14,R15,R16,R25,R26, R27,R28,R37,R38,R39,R40	150k
24	8	R24,R30,R33,R41,R46,R51, R63,R66	1k
25	2	R36,R42	680
26	1	R44	2k
27	1	R45	47k
28	2	R47,R49	26k
29	4	R55,R56,R57,R58	6k2
30	1	R59	15k
31	2	R61,R62	3k6
32	2	R64,R65	150
33	1	R43	1M
34	8	U1,U2,U3,U4,U5,U8,U9,U10	NE5532
35	1	U6	THAT1240
36	1	U7	THAT1606
37	1	U11	7815
37	1	U12	7915