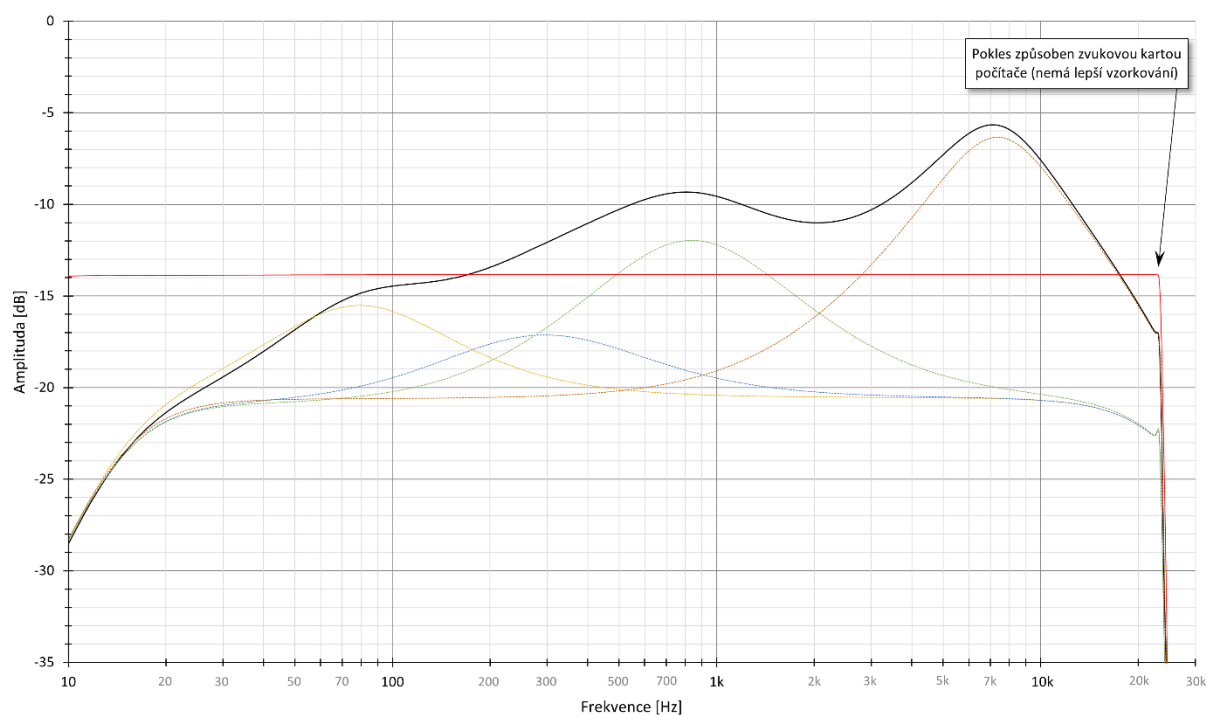


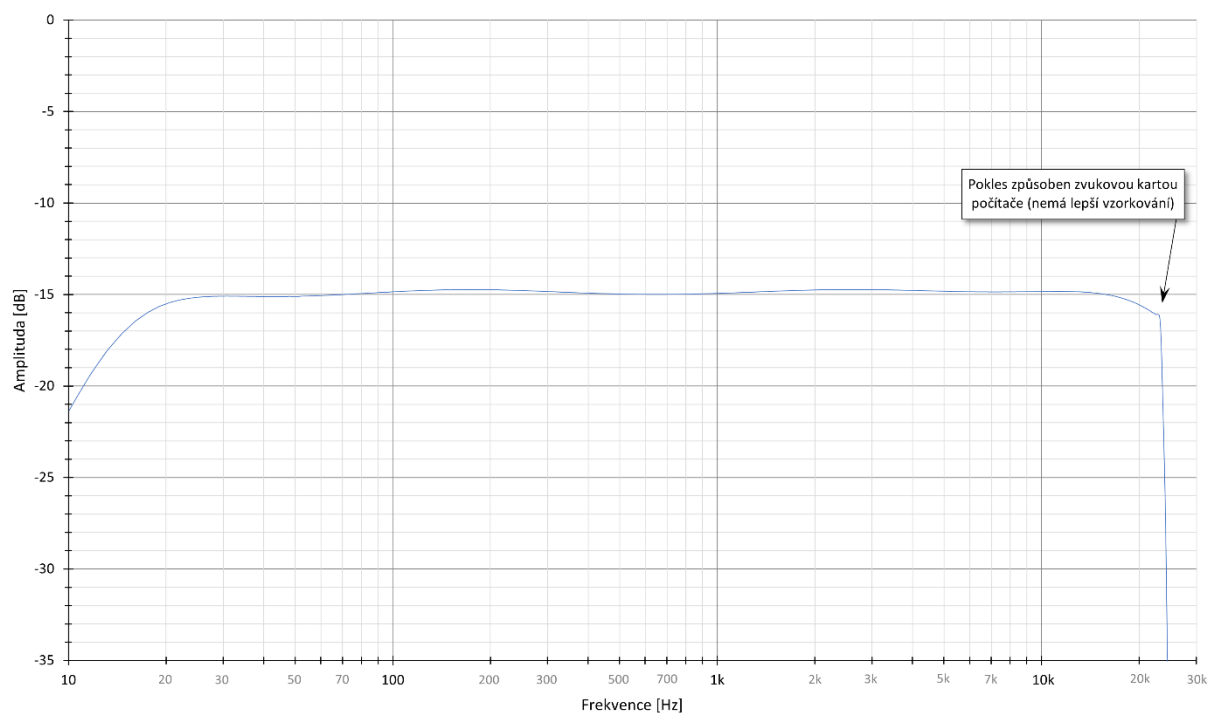
Nastavení z poslechu – při měření zapnuty: všechny filtry, každý filtr samostatně a vypnuty

Nastavení z poslechu: tuner ST100 a Country rádio, 20.6.2025. Potenciometr pro společný zisk nastaven na cca -8 dB.
Měření horní kanál CINCH. Všechny filtry, filtr 1, filtr 2, filtr 3, filtr 4, filtry vypnuty.



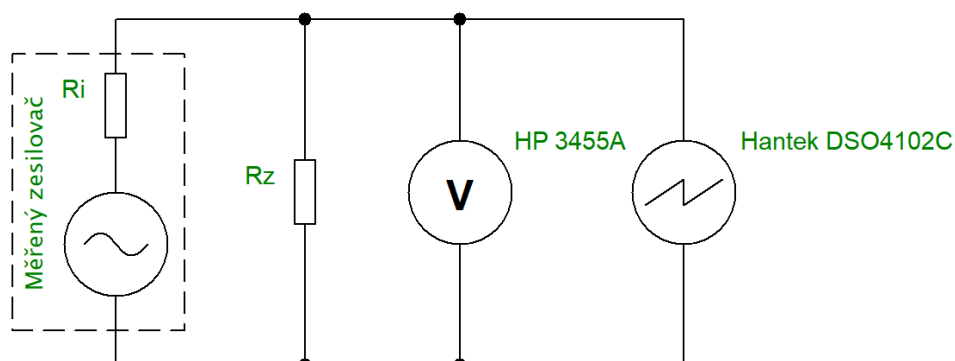
Charakteristika korektoru při nastavení na rovný průběh se všemi zapnutými filtry

Rovná charakteristika - všechny filtry zapnuty a nastaveny na rovný průběh.
Měření horní kanál CINCH.



Způsob měření výstupního odporu výstupního zesilovače

Výstupní odpor R_i byl měřen v zapojení:



Na výstup zesilovače, na kterém byl sinusový signál 1 kHz, byly postupně připojeny dva různé zatěžovací odpory R_z a napětí na nich bylo měřeno digitálním voltmetrem HP 3455A a kontrolováno osciloskopem Hantek DSO4102C. Voltmetr HP 3455A má podle dokumentace při měření RMS konvertorem vstupní impedanci $2\text{ M}\Omega \pm 1\%$ a osciloskop Hantek má vstupní impedanci $1\text{ M}\Omega$ a na paralelní kombinaci těchto vstupních odporů byly R_z korigovány, i když vzhledem ke změně odporu kterou to způsobí a přesnosti měření korekce není nutná.

Vnitřní odpor zesilovače se vypočítá podle vztahu ($\Delta U_{\text{výst}}$ a $\Delta I_{\text{přes } R_z}$ jsou rozdíly měřených napětí a proudů měřených na obou odporech R_z):

$$R_i = \frac{\Delta U_{\text{výst}}}{\Delta I_{\text{přes } R_z}}$$

Změřené a vypočítané hodnoty jsou v následující tabulce:

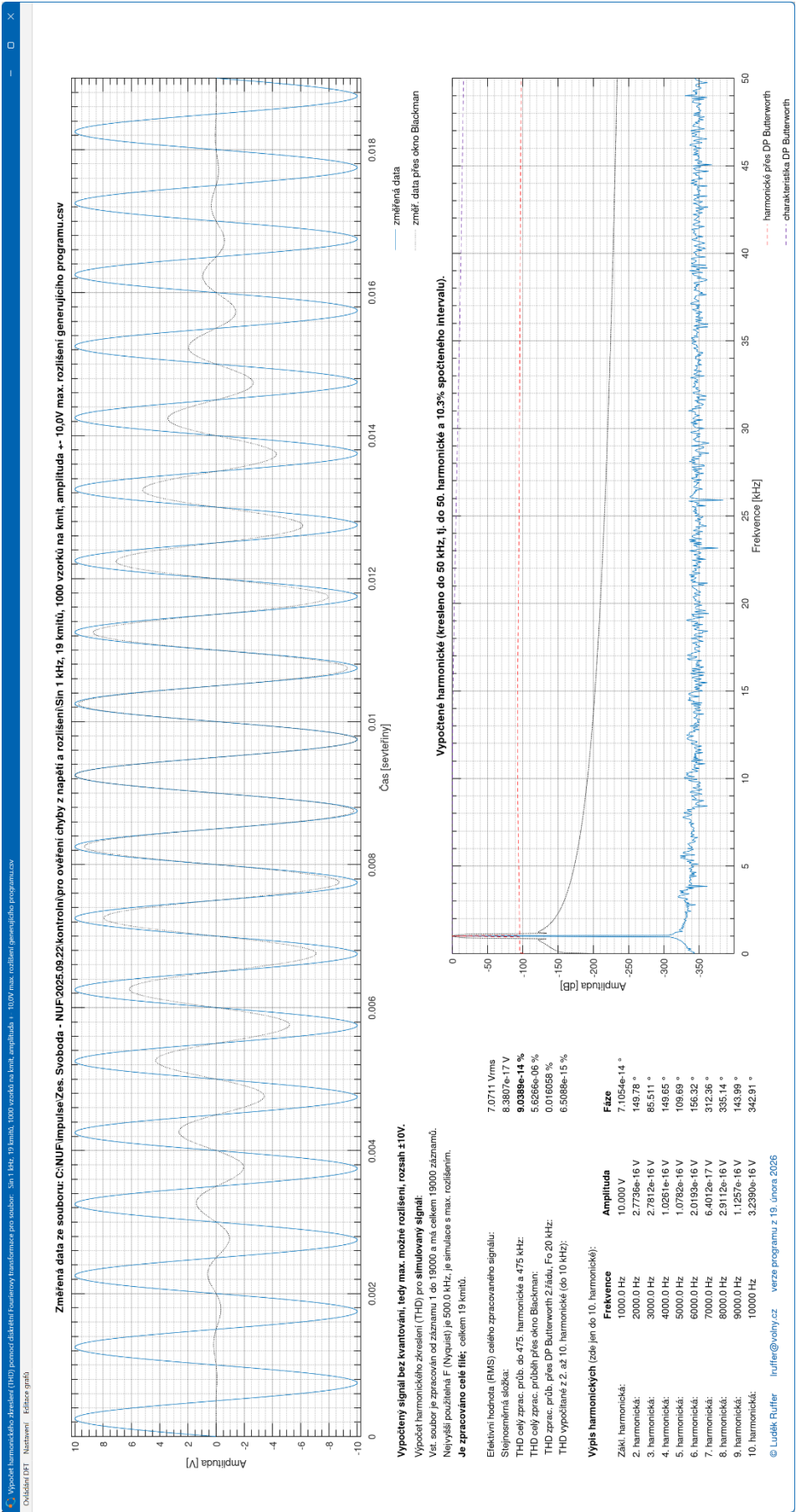
$U_{\text{výst}}$ [V _{rms}]	R_z [Ω]	R_z korigované [Ω]	I přes R_z [mA]	Vypočtené R_i [Ω]
3,102	46,97	46,966	66,047	11,77
3,718	270,88	270,77	13,7256	

Měření harmonického zkreslení:

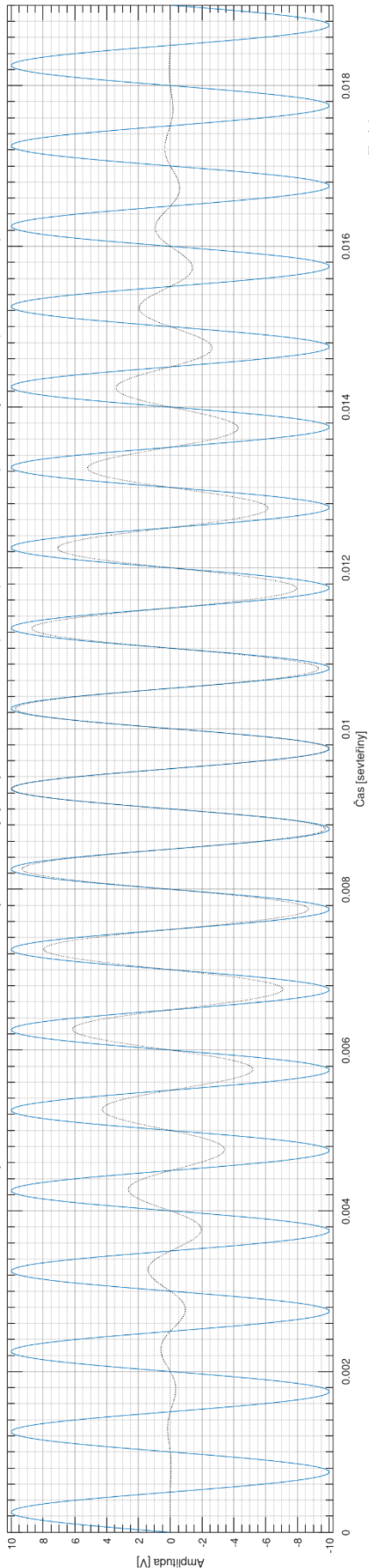
Protože měření harmonického zkreslení (THD) není úplně jednoduchá záležitost, je zde o tom trochu podrobnější pojednání. Měření dále vychází z myšlenky, že sinusový signál pro měření THD je generovaný generátorem a měří se digitálním osciloskopem se záznamem hodnot do souboru (v mém případě .csv) a z dat v těchto souborech se potom počítačovým programem (já jsem ho udělal v GNU Octave) pomocí FFT počítá THD. Generátor i osciloskop vnášejí do měření nějaké zkreslení. Generátor má svoje THD, u osciloskopu podstatná část zkreslení vzniká převodem v AD převodníku, a zkreslení bude různě velké podle toho, kolikabitový převodník je. Můj osciloskop Hantek DSO4102C má AD převodník jen 8bitový, což znamená, že signál je vzorkován (rozdělen) jen na 256 úrovní z maximálního rozsahu, v případě 12bitového převodníku je signál vzorkován na 4096 úrovní z rozsahu. Měřený signál samozřejmě bude vždy menší než vertikální rozsah osciloskopu, takže tato chyba vztažená k měřenému signálu bude větší. Z toho mě vyplynulo, že nejlepší bude měřit THD samotného generátoru a potom měřit THD zařízení se vstupním

signálem z generátoru a pro získání THD samotného zařízení odečíst změřené THD generátoru od celkového změřeného THD, tím by se tyto chyby měly zhruba eliminovat.

Jako ukázka chyb, které kvantováním vzniknou následují tři výpočty THD, první je vypočtený sinusový průběh bez kvantování a další dva jsou s umělým kvantováním na 8 a 12 bitů.



Změřená data ze souboru: C:\NUP\impulseZes. Svoboda - NUF\2025.09.22 kontrolní pro ověření chyby z napětí a rozlišení Sin 1 kHz, 19 kmitů, 1000 vzorků na kmit, 12 bitů amplituda +/- 10.0V z max +/- 10.0V; kontrolní.csv



Vypočtený signál, uměle rozdělený jako 12bitový převodník, tedy na 4096 úrovní z rozsahu ±10V.

Výpočet harmonického zkreslení (THD) pomocí diskretní Fourierovy transformace pro soubor: Sin 1 kHz, 19 kmitů, 1000 vzorků na kmit, 12 bitů amplituda +/- 10.0V z max +/- 10.0V; kontrolní.csv

Vst. soubor je zpracován od záznamu 1 do 19000 a má celkem 19000 záznamů.

Nejvyšší použitelná F (Nyquist) je 500.0 kHz, je simulace 12 bitů z 10 V.

Je zpracováno celé filtr, celkem 19 kmitů.

Elektivní hodnota (RMS) celého zpracovaného signálu:

Stejněměřit složka:

THD celý zprac. práb. do 475. harmonické a 475 kHz:

THD celý zprac. průběh přes okno Blackman:

THD zprac. práb. přes DP Butterworth 2 řádu, Fo 20 kHz:

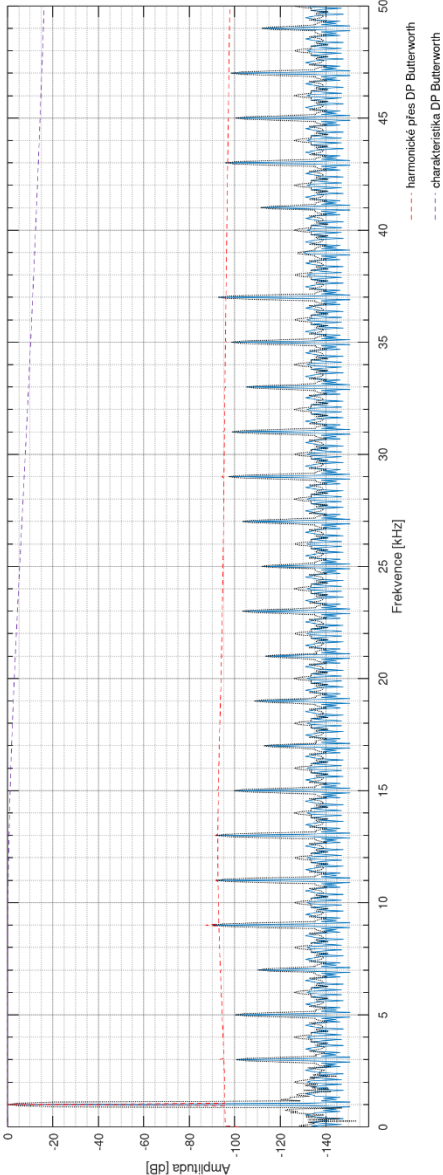
THD vypočítané z 2. až 10. harmonické (do 10 kHz):

7.0711 Vrms
1.2853e-06 V
0.019072 %
0.019088 %
0.016691 %
0.0033446 %

Výpis harmonických (zde jen do 10. harmonické):

Zákl. harmonická:	Amplituda	Fáze
1. harmonická:	10.000 V	0.0000 °
2. harmonická:	2.5705e-06 V	270.00 °
3. harmonická:	9.2747e-05 V	180.00 °
4. harmonická:	2.5705e-06 V	270.00 °
5. harmonická:	9.7173e-05 V	0.0000 °
6. harmonická:	2.5705e-06 V	270.00 °
7. harmonická:	3.0846e-05 V	0.0000 °
8. harmonická:	2.5705e-06 V	270.00 °
9. harmonická:	3.0468e-04 V	180.00 °
10. harmonická:	2.5705e-06 V	270.00 °

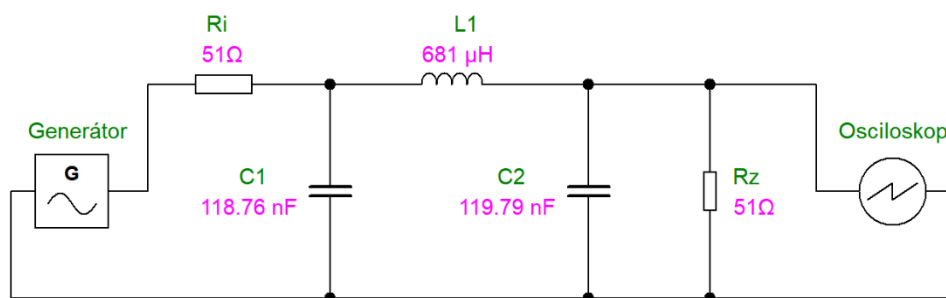
Vypočtené harmonické (kresleno do 50 kHz, tj. do 50. harmonické a 10.3% spočteného intervalu).



Také by obě zařízení měla mít přibližně stejné kmitočtové charakteristiky, protože harmonické se zde počítají pro celý měřený průběh. Tady jsem ze začátku trochu „narazil“, protože mě vycházelo THD samotného generátoru i větší než THD soupravy generátoru s korektorem, což je logicky „konina“. Chvilí (nějaké to měření) mě trvalo, než mě došlo, že korektor obsahuje neodpojitelné ořezové filtry hloubek a výšek (high a low-cut filtry) a že tyto filtry, respektive tady dělá tuto „neplechu“ jen ořezový filtr výšek. Je to proto, že high-cut filtr v korektoru způsobí (při nastavení na nejvyšší propustný kmitočet) ořez (neboli snížení úrovně) kmitočtů tak, jak je vidět na grafu dále, ale u měření THD samotného generátoru ořez není, takže se uplatní i harmonické za ním.

Abych tento problém alespoň zhruba potlačil a THD korektoru mohl jaksi změřit, udělal jsem pasivní (aby tam polovodiče nezaváděly další nelinearity) dolní propust typu Butterworth, přes kterou jsem měřil jen generátor, protože, jak vyplývá z předchozího textu, korektor už takovou propust trvale obsahuje. Generátor je mém případě generátor v osciloskopu Hantek DSO4102C, který sice není „žádná sláva“ ale na měření vyhoví, podle dokumentace má mít THD při 1 kHz -50 dBc a při 10 kHz -40 dBc. To přepočteno na mě bližší procenta je 0,316 % pro 1 kHz a 1 % pro 10 kHz.

Schéma použité dolní propusti je:



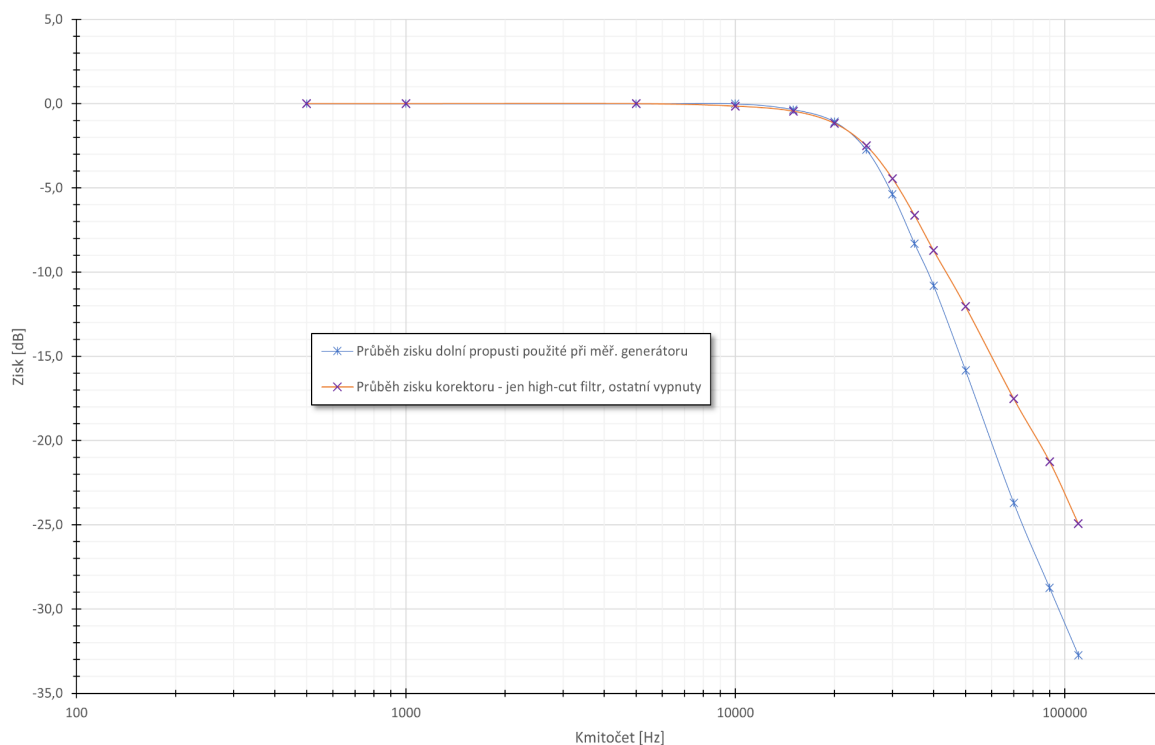
Generátor i osciloskop ve schématu jsou jeden přístroj: osciloskop s generátorem Hantek DSO4102C a DP byla ke generátoru připojena přímo (bez sondy), osciloskop byl připojen přes sondu 1x (není ve schématu kreslena). Odporů R_i a R_z mají být vnitřní odpory generátoru a osciloskopu, ale protože byla DP navržena na jejich hodnotu $53,5 \Omega$ a vstupní odpor osciloskopu je nejméně $1 \text{ M}\Omega$ a u generátoru jeho výstupní impedanci neznám, byly oba vytvořeny odpory o uvedených hodnotách.

Hodnoty součástek byly vypočteny programem na:

<http://sroll.net/ok1srd/technika/buttheworddolni/butterworth.php?frekvence=25000&impedance=75&stupen=2&B1=V%FDpo%E8et>

Protože zde dříve uvedený „Průběh regulace ořezového filtru výšek“ končí z důvodu omezení zvukovou kartou počítače na kmitočtu cca 25 kHz, což je pro tento případ hodně málo, změřil jsem průběh frekvenční charakteristiky jak korektoru, tak propusti Butterworth znovu měřením jejich napětí při daných kmitočtech a vynesl do následujícího grafu.

Závislost zisku na kmitočtu pro dolní propust použitou při měření generátoru
a pro high-cut filtr korektoru nastavený na maximální šířku



Z něho je viděti, že dolní Butterworthova propust má za bodem zlomu větší pokles než propust v korektoru, což může způsobit trochu menší harmonické zkreslení přes ni měřeného signálu generátoru (harmonické za poklesem budou mít logicky menší hodnotu), a tedy z rozdílu počítané THD korektoru by bylo trochu větší, ale to vzhledem k nepřesnostem měření zanedbávám. Z tabulek zisků se dá spočítat, že útlum high-cut filtru korektoru je asi 10,9 dB/oktávu (má být 12 dB/oktávu) a použité DP je asi 15,4 dB/oktávu.

Tabulky měření zisku popisované Butterworthovy dolní propusti a high-cut filtru korektoru pro jejich porovnání:

Průběh zisku dolní propusti použité při měř. generátoru

Kmitočet	U vstupní [V rms]	U výstupní [V rms]	Zisk [dB]
500 Hz	1,24	0,5200	0,00
1000 Hz	1,24	0,5200	0,00
5000 Hz	1,24	0,5200	0,00
10000 Hz	1,24	0,5200	0,00
15000 Hz	1,24	0,5000	-0,34
20000 Hz	1,24	0,4600	-1,06
25000 Hz	1,24	0,3800	-2,72
30000 Hz	1,24	0,2800	-5,38
35000 Hz	1,24	0,2000	-8,30
40000 Hz	1,24	0,1500	-10,80
50000 Hz	1,24	0,0840	-15,83
70000 Hz	1,24	0,0340	-23,69
90000 Hz	1,24	0,0190	-28,74
110000 Hz	1,24	0,0120	-32,74

Průběh zisku korektoru - jen high-cut filtr, ostatní vypnuty

Kmitočet	U vstupní [V rms]	U výstupní [V rms]	Zisk [dB]
500 Hz	1,40	1,2000	0,00
1000 Hz	1,40	1,2000	0,00
5000 Hz	1,40	1,2000	0,00
10000 Hz	1,40	1,1800	-0,15
15000 Hz	1,40	1,1400	-0,45
20000 Hz	1,40	1,0500	-1,16
25000 Hz	1,40	0,9000	-2,50
30000 Hz	1,40	0,7200	-4,44
35000 Hz	1,40	0,5600	-6,62
40000 Hz	1,40	0,4400	-8,71
50000 Hz	1,40	0,3000	-12,04
70000 Hz	1,40	0,1600	-17,50
90000 Hz	1,40	0,1040	-21,24
110000 Hz	1,40	0,0680	-24,93

Poznámka k následujícím výpočtům THD: protože Fourierova transformace použitá pro výpočet THD předpokládá periodický průběh zkoumaného signálu, musí být změřený signál ve většině případů na periodický upraven (tj. na celé kmity), což znamená úpravu tak, aby průběh začínal a končil ve stejném bodě (např. v průchodu nulou atp., přitom kde signál začíná není podstatné). Pokud nezačíná a nekončí ve stejném místě, může být spočítané THD i dost rozdílné proti skutečnosti, tj. větší (a možná) překvapivě i menší, protože neperiodicita způsobená tzv. „vocasem“ přidá harmonické, které v periodickém průběhu nejsou a výpočet THD mohou ovlivnit oběma směry.

Toto přibližně řeší zpracování neperiodického změřeného signálu přes tzv. okna, zde jsem použil okno typu Blackman. Okna signály na začátku a konci zpracovávaného průběhu různým způsobem plynule zeslabí až k nule, což tyto „vocasy“ potlačí. Ovšem při dobrém výběru period signálu je z nich spočítané THD o něco menší než THD počítané přes okna ze signálu bez úpravy na celé periody, takže výpočet THD přes Blackmanovo okno se k výpočtům THD korektoru zde nepoužívá. Ve výpočtech jen na ukázkou anebo pro případ, kdyby se výběr celých period nezdařil, tak aby byl výpočet aspoň nějaký.

Následují dvě tabulky se změřeným THD: v horní je THD celého korektoru kdy byl signál z generátoru měřen přes popisovanou dolní propust, v dolní je pro porovnání měření THD jen filtrů korektoru (vstupní deska korektoru byla odpojena odpájením) a v tomto případě byl signál z generátoru měřen samozřejmě přímo, bez dolní propusti.

Měřen celý korektor tak jak je zapojen, při jeho měření nebyla použita žádná DP a výstup korektoru byl zapojen přímo na osciloskop. Ovšem při měření generátoru pro výpočet THD generátoru byla použita popisovaná DP zapojená podle předchozího textu.

Kmitočet	THD generátor osciloskopu Hantek DSO4102C s DP typu Buterworth s jednou cívkou 680 μ H a F_s = cca 25 kHz	THD korektoru dle Urei 546, vyrovnaná charakteristika, vše zapnuto	THD jen korektoru, bez THD generátoru
20 Hz	0,326 %	0,635 %	0,309 %
25 Hz	0,336 %	0,542 %	0,206 %
50 Hz	0,367 %	0,587 %	0,220 %
100 Hz	0,359 %	0,568 %	0,210 %
500 Hz	0,373 %	0,607 %	0,234 %
1000 Hz	0,373 %	0,583 %	0,210 %
5000 Hz	0,404 %	0,579 %	0,175 %
10000 Hz	0,478 %	0,579 %	0,101 %
15000 Hz	0,374 %	0,506 %	0,132 %
20000 Hz	0,472 %	0,626 %	0,154 %
THD korektoru průměr:			0,195 %

Měření JEN všechny čtyři filtry tak jak jsou zapojeny, bez vstupně-výstupní desky, jejíž výstup byl odpájen. Žádná DP nepoužita – vše bylo zapojeno přímo na osciloskop.

Kmitočet	THD generátor osciloskopu Hantek DSO4102C	THD JEN filtrů korektoru podle Urei 546, vyrovnaná charakteristika, bez vstupně-výstupní desky.	THD jen filtrů korektoru, bez THD generátoru
20 Hz	0,644 %	0,755 %	0,111 %
25 Hz	0,602 %	0,694 %	0,093 %
50 Hz	0,637 %	0,805 %	0,168 %
100 Hz	0,613 %	0,819 %	0,206 %
500 Hz	0,600 %	0,787 %	0,187 %
1000 Hz	0,587 %	0,874 %	0,287 %
5000 Hz	0,611 %	0,770 %	0,159 %
10000 Hz	0,612 %	0,760 %	0,148 %
15000 Hz	0,546 %	0,696 %	0,150 %
20000 Hz	0,629 %	0,716 %	0,087 %
THD korektoru průměr:			0,160 %

Protože výše popisovaná DP se samozřejmě dá udělat taky v prostředí Octave, doplnil jsem ji tam a vyzkoušel. Ovšem zde třeba u kmitočtů 10 až 20 kHz byly výsledky odlišné od měření přes fyzickou DP a úplně nevím proč, tak jsem je zde nepoužil. Je ale logické, že když je kmitočet zlomu dolní propusti 25 kHz a měří se např. kmitočet 20 kHz, tak bude propustí hodně utlumená už i druhá harmonická (40 kHz) a ještě víc také vyšší harmonické, takže THD neodpovídá. Ovšem nezdálo se mě (a nespál jsem), že by se toto nějak významně projevilo při měření přes fyzickou propust, takže zatím nevím...

Zde uvádím jako příklad výpočet THD z měření generátoru osciloskopu na kmitočtu 1 kHz bez externí DP, kde je i výpočet THD přes DP počítanou v programu Octave a toto THD celkem sedí.

