

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY A TELEKOMUNIKACÍ**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**AUDIO D/A PŘEVODNÍK**

Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Kubík

2012

Autor: Bc. David Kříž



## Anotace

Kříž, D. Audio D/A převodník. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací, 2012, 62 s, vedoucí práce: Ing. Zdeněk Kubík

*V mé diplomové práci se zabývám analýzou zapojení běžně používaných D/A převodníků pro použití v audio technice. Též se zabývám možnostmi přenosu dat ze zdroje signálu do převodníku a formátem těchto dat. S využitím těchto informací jsou vybrané převodníky navrženy s ohledem na nejlepší možný výstupní signál a realizovány. Následně je na těchto realizovaných obvodech provedeno měření a výsledky jsou porovnány s hodnotami danými výrobcem.*

## Klíčová slova

Převodník, DAC, audio, S/PDIF

## Abstract

Kříž, D. Audio D/A converter. University of West Bohemia in Pilsen, Faculty of electrical engineering, Department of applied electronics and telecommunication, 2012, 62 s., head: Ing. Zdeněk Kubík

*In my diploma thesis I deal with analysis of circuits used in common audio D/A converters. I also deal with the data transfer from the data source to the converter and the data format. These circuits are designed with respect to best performance and realized using the obtained information. Then the realized circuits are measured and the results are compared to manufacturer stated performance.*

## Key words

Converter, DAC, audio, S/PDIF

## Prohlášení

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

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.

V Plzni dne: 30. 4. 2012

David Kříž

.....

## Poděkování

Tímto bych velmi rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Zdeňku Kubíkovi, za pomoc a vedení při vypracování mé diplomové práce, a Ing. Jiřímu Stifterovi a Ing. Martinu Sýkorovi za pomoc při měření.

## Obsah

1. Úvod .....	9
2. Zapojení převodníků.....	10
2.1 Blokové schéma převodníku.....	10
2.2 Vstup dat do převodníku.....	10
2.3 Dekodér S/PDIF signálu .....	11
2.4 D/A převodník.....	11
2.5 Výstupní filtr.....	12
3. Přenos dat do převodníku .....	13
3.1 Přenos dat ze zdroje signálu do převodníku .....	13
3.2 Přenos dat z dekodéru do D/A převodníku .....	14
3.2.1 Formát Left-justified .....	15
3.2.2 Formát Right-justified .....	15
3.2.3 Formát I2S .....	16
4. Návrh zapojení převodníků .....	17
4.1 Texas Instruments PCM 1792.....	17
4.1.1 Zapojení převodníku PCM1792 .....	18
4.1.2 Výstupní filtr .....	19
4.2 Wolfson WM8740.....	20
4.2.1 Zapojení převodníku WM8740 .....	20
4.2.2 Výstupní filtr .....	21
4.3 Cirrus Logic CS4398 .....	22
4.3.1 Zapojení převodníku CS4398.....	23
4.3.2 Výstupní filtr .....	24
4.4 Texas Instruments PCM5100.....	24
4.5 Wolfson WM8521.....	25
4.6 Cirrus Logic CS4352 .....	27
5. Realizace a Měření .....	29
5.1 Realizace převodníku.....	29
5.1.1 Realizace jednotlivých převodníků .....	29
5.1.2 S/PDIF dekodér .....	29
5.1.3 Napájecí zdroj.....	30

5.1.4	Ovládání převodníku .....	30
5.2	Měření realizovaných převodníků .....	32
5.2.1	Metodika měření.....	32
5.2.2	Výsledky PCM1792 .....	34
5.2.3	Výsledky WM8740.....	35
5.2.4	Výsledky CS4398 .....	35
5.2.5	Výsledky PCM5100 .....	35
5.2.6	Výsledky WM8521.....	36
5.2.7	Výsledky CS4352 .....	37
5.2.8	Frekvenční charakteristika převodníků .....	37
5.2.9	Linearita převodníků.....	38
6.	Závěr.....	39
	Použitá literatura.....	40
	Seznam obrázků.....	41
	Seznam tabulek.....	42
	Příloha.....	1



## 1. Úvod

Cílem této práce je ověřit možnosti návrhu audio D/A převodníků a takový převodník navrhnout. S D/A převodníky se lze dnes setkat ve velkém množství elektronických zařízení, například v počítačích, CD přehrávačích nebo studiové technice. D/A převodníky mohou mít různou podobu. Mohou to být samostatná zařízení, nebo součásti jiných větších celků, jako např. zesilovače nebo zvukové karty do počítače.

První část práce je věnována analýze zapojení převodníků běžně používaných v audiotechnice. Jsou zde popsány jednotlivé bloky převodníku a vysvětlena jejich funkce. V další části je popsán formát digitálních dat a možnost přenosu dat do převodníku a mezi vnitřními obvody převodníku.

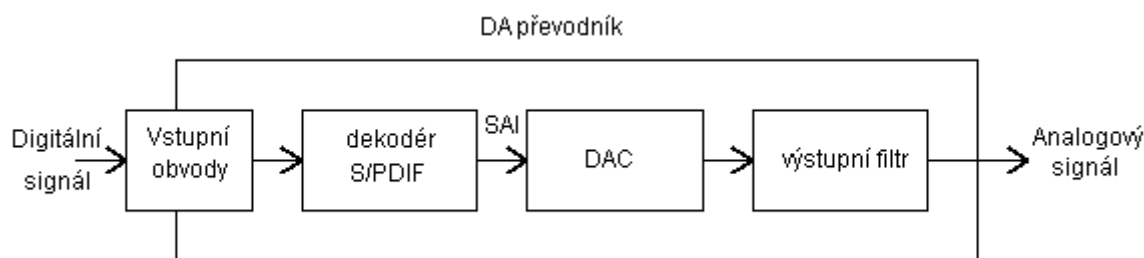
Následuje popis vybraných převodníků a návrh jejich zapojení. V poslední části se nachází metody měření parametrů převodníků a naměřené parametry jednotlivých převodníků a jejich zhodnocení. Na závěr jsou převodníky porovnány mezi sebou.

## 2. Zapojení převodníků

Tato kapitola je věnována popisu zapojení běžně dostupných audio D/A převodníků. Jsou zde popsány jednotlivé bloky, ze kterých je D/A převodník složen.

### 2.1 Blokové schéma převodníku

Blokové schéma běžného převodníku je na obr.1.

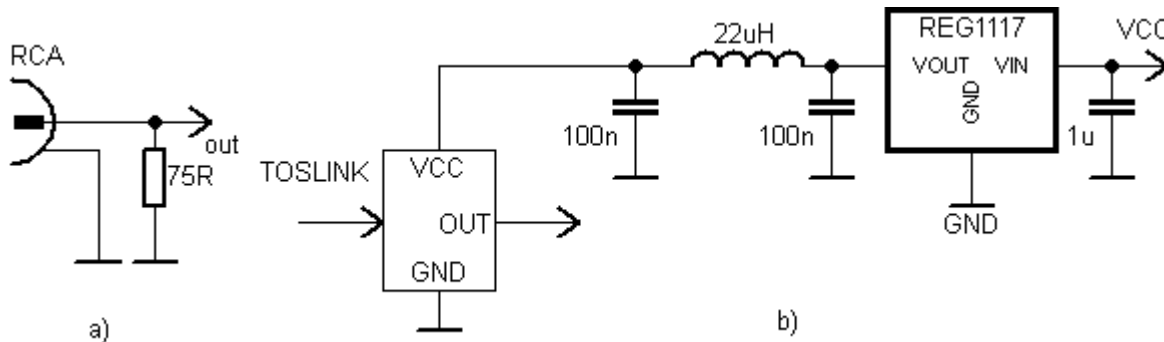


Obr. 1 - Blokové schéma zapojení D/A převodníku

Vstupní obvody se starají o správný přenos digitálních dat do převodníku. Dekodér S/PDIF dekóduje digitální data a připravuje je pro zpracování D/A převodníkem. Vlastní D/A převodník se stará o převod digitálního signálu na analogový. Výstupní filtr upravuje analogový signál tak, aby ho bylo možné zpracovat následujícími obvody.

### 2.2 Vstup dat do převodníku

O vstup digitálních dat do převodníku se starají vstupní obvody. Tyto obvody mají za úkol převést vstupní signál ze zdroje dat na takový signál, který je dále převodníkem zpracovatelný. Na následujícím obrázku jsou dva příklady nejběžnějších vstupních obvodů:



Obr. 2 - Vstupní obvody převodníku - a) Vstup RCA b) Vstup TOSLINK

Na obrázku 1 a) je vstupní obvod využívající konektory RCA a  $75\Omega$  koaxiální kabel pro přenos signálu. Na výstupu konektoru je patrný  $75\Omega$  zakončovací odpor pro zachování impedančního přizpůsobení. Signál je bipolární a je možné ho přivést přímo do S/PDIF dekodéru. Nevýhoda je ovšem galvanické spojení zdroje signálu a D/A převodníku, proto se často používají oddělovací transformátory.

Na obrázku 1 b) je vstupní obvod pro optický kabel. Přijímač signálu z optického kabelu by měl mít svůj stabilizátor napětí, kvůli nejmenšímu rušení. Výhoda optického kabelu je galvanické oddělení zdroje signálu a D/A převodníku. Výstup z přijímače lze běžně připojit do S/PDIF dekodéru.

### 2.3 Dekodér S/PDIF signálu

Dekodér S/PDIF (Sony – Philips digital interface) signálu slouží pro příjem digitálních dat a jejich zpracování pro převodník. Dekodér je zpravidla vybaven diferenčním vstupem, který je schopen zpracovávat i malé signály. Je tedy možné k němu připojit jak výstup z koaxiálního kabelu tak i výstup z přijímače optického signálu.

S převodníkem dekodér komunikuje pomocí rozhraní SAI (seriál audio interface). Po tomto rozhraní jsou do převodníku přenášena data, vzorkovací frekvence pro data, indikace levého a pravého kanálu a často i hodinový signál pro převzorkování.

### 2.4 D/A převodník

D/A převodník se stará o vlastní převod digitálních dat na analogový signál. Existují dvě hlavní architektury D/A převodníků: R-2R a  $\Sigma/\Delta$ . Existují i další architektury, ale tyto jsou nejpoužívanější pro audio aplikace.

U převodníků R-2R jsou všechny bity převedeny naráz, teoretická šumová úroveň těchto převodníků odpovídá kvantizačnímu šumu. Převodníky  $\Sigma/\Delta$  oproti tomu využívají  $\Sigma/\Delta$  modulaci.

Kvalita celého zařízení závisí na kvalitě převodníku. Proto jsou velmi důležité dynamické parametry jako harmonické zkreslení, odstup signálu od šumu nebo dynamický rozsah. Dnes se pro audio aplikace využívají převážně 24bitové převodníky.

## 2.5 Výstupní filtr

Výstupní filtr D/A převodníku se používá pro zamezení šíření nežádoucích složek výstupního signálu do dalších částí reprodukčního řetězce. Jsou to zejména produkty převodu ležící nad horní hranicí akustického pásma, tj. 20 kHz. Tyto složky, ač jsou pro lidské ucho neslyšitelné, mohou zatěžovat následující obvody, např. zesilovač nebo reproduktory, a významným způsobem ovlivnit kvalitu reprodukce.

U levnějších převodníků většinou postačuje RC článek, u kvalitnějších se používá zapojení filtrů s operačními zesilovači. Toto řešení má výhodu v tom, že je možné přizpůsobit výstupní signál dalším obvodům, např. velikost amplitudy nebo symetrický výstup.

### 3. Přenos dat do převodníku

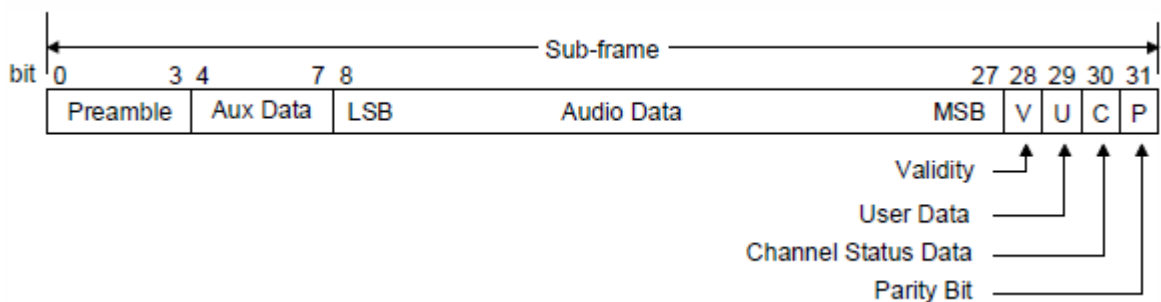


Obr. 3 – Vnitřní blokové schéma převodníku

Na obrázku 3 je znázorněno vnitřní blokové schéma převodníku. Z hlediska přenosu dat do převodníku se rozlišuje přenos dat do vstupních obvodů převodníku a přenos dat mezi dekodérem a samotným D/A převodníkem.

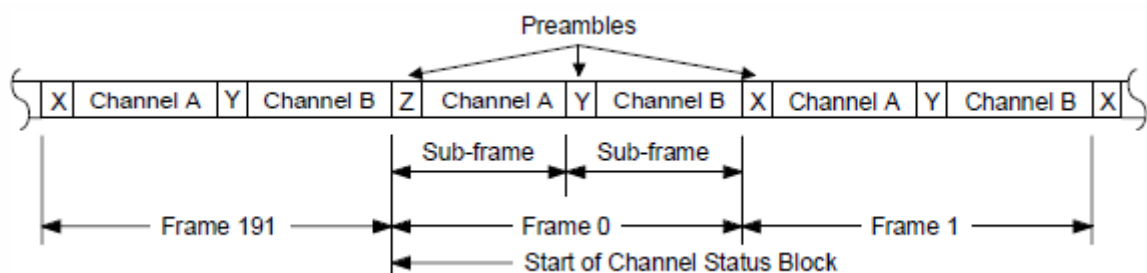
#### 3.1 Přenos dat ze zdroje signálu do převodníku

Na obrázku 4 je naznačen formát sub-rámce digitálních audio dat. Jeden sub-rámec představuje jeden vzorek audio dat. Formát těchto dat specifikuje norma IEC958.



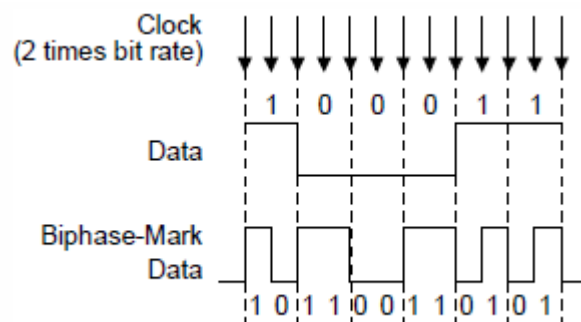
Obr. 4 – Formát sub-rámce. Obr. převzat z [1]

První čtyři bity sub-rámce jsou hlavička, sloužící pro synchronizaci dekodéru. Další čtyři bity jsou pomocná data, následuje 20 bitů audio dat. Na konci sub-rámce se nachází bit platnosti, uživatelských dat, kanálových dat a paritní bit. Data jsou vysílána LSB napřed. Pokud jsou vysílána data 24 bitová, zabírají prostor audio dat i pomocných dat. Sub-rámec pro levý a pravý kanál dávají dohromady jeden rámec, 192 rámců tvoří blok. Struktura tohoto bloku je naznačena na obr. 5:



Obr. 5 - Struktura bloku dat. Obr. převzat z [1]

Hlavička je pro každý audio kanál různá. Bit platnosti udává, zda jsou data připravena k převodu. Bit uživatelských dat slouží pro volné využití uživatelem. Bit kanálových dat přenáší informaci o kanálu. Paritní bit slouží pro detekci chyb, parita je sudá.

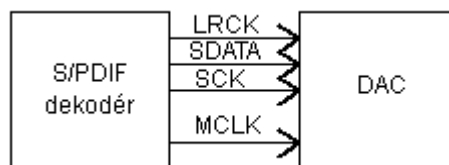


Obr. 6 - Dvofázová modulace. Obr. převzat z [1]

Pro přenos dat je použita dvofázová modulace pro snížení stejnosměrné složky a umožnění rekonstruovat hodinový signál z dat. Z obrázku 6 je patrné, že se mění polarita datového signálu každé dva taktů hodin. Navíc, když dojde ke změně polarity ve středu taktů, jsou data brána jako log. 1. V opačném případě jako 0. Výhodou tohoto řešení je možnost použití oddělovacího transformátoru a nezávislost na polaritě přijímaných dat.

### 3.2 Přenos dat z dekodéru do D/A převodníku

Pro přenos dat z dekodéru do převodníku se používá sériové audio rozhraní – SAI (Serial Audio Interface). Sériové audio rozhraní je složeno ze tří vodičů, jak je naznačeno na obrázku 7:



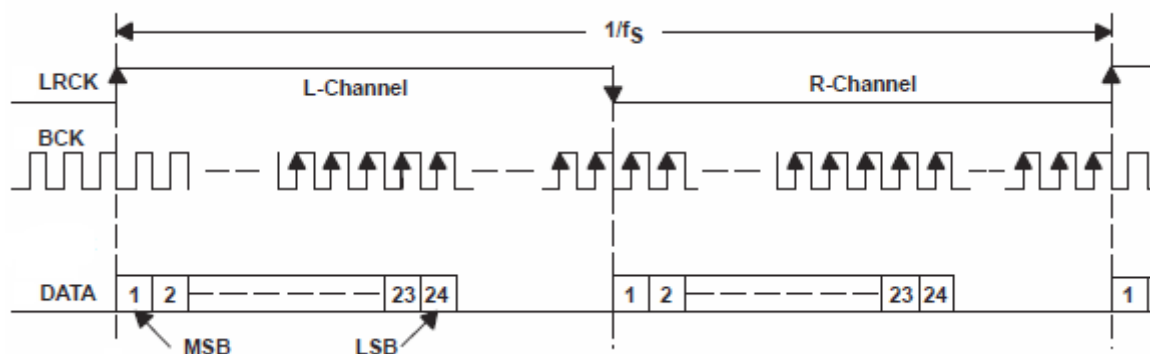
Obr. 7 - Rozhraní SAI

Signál LRCK (Left-Right Clock) slouží pro oddělení levého a pravého kanálu přenášených dat a pro určení vzorkovací frekvence. Vzorkovací frekvenci odpovídá frekvence signálu, kanály jsou identifikovány log. úrovní signálu.

Signál SDATA slouží pro přenos audio dat. Data se přenášejí nejvýznamnějším bitem napřed ve dvojkovém doplňku. Signál SCK (Seriál Clock, Bit Clock) slouží jako signál pro vzorkování přenášených dat. Často je přítomen i signál MCLK (Master Clock), který slouží pro převzorkování vstupního signálu.

Tyto signály jsou často pojmenovány jinak, podle rozhodnutí výrobce, funkce ale zůstává stále stejná. Důležité je správné časování signálů. Existuje několik datových formátů, využívajících tyto signály, používaných pro přenos dat. Nejpoužívanější jsou I2S, Left-justified a Right-justified, jejichž popis je uveden níže:

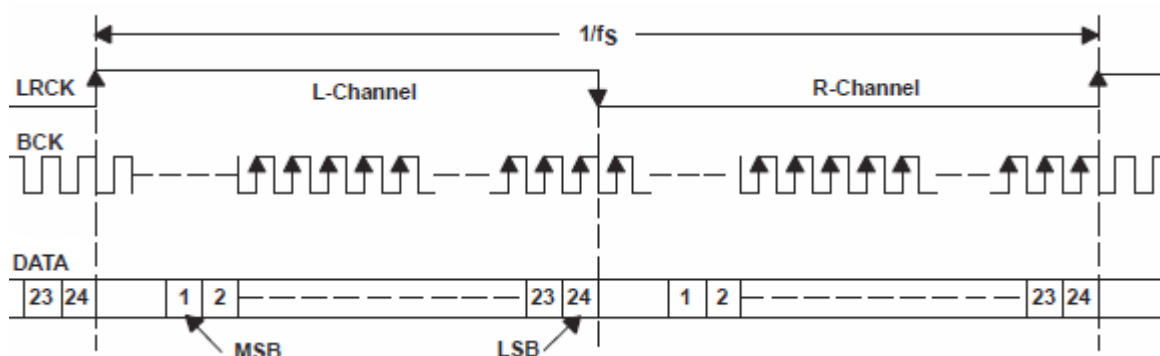
### 3.2.1 Formát Left-justified



Obr. 8 - Formát Left-justified. Obr. převzat z [2]

Na obrázku 8 je naznačen časový průběh formátu Left-justified. Vzestupná hrana nejvýznamnějšího bitu audio dat nastává ve stejný okamžik, kdy nastává změna na LRCK. Dalo by se říci, že je zarovnán doleva. Výhodou tohoto formátu je možnost zvolit libovolný počet bitů dat, podmínkou je dostatečný počet taktů SCLK v rámci. Data pro levý kanál jsou vysílána, když je LRCK v log. 1, pro pravý v log. 0.

### 3.2.2 Formát Right-justified

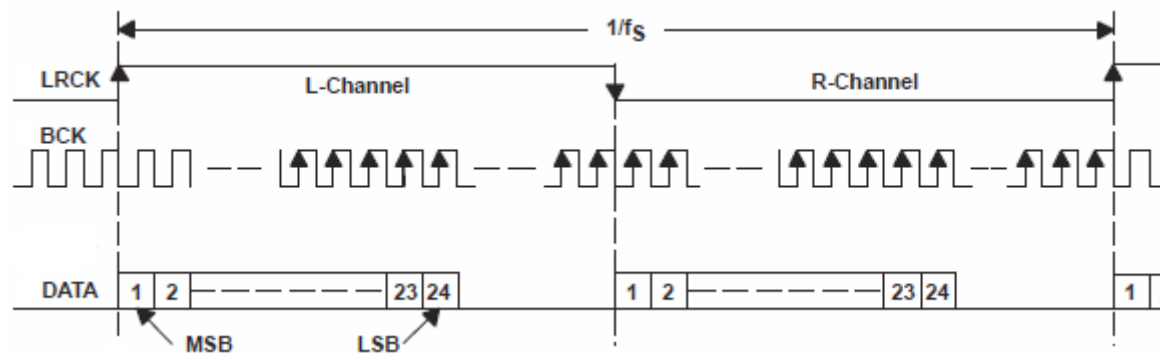


Obr. 9 - Formát Right-justified. Obr. převzat z [2]

Formát Right-justified, na obrázku 9, je velmi podobný formátu Left-justified. Rozdíl je v tom, že sestupná hrana nejméně významného bitu audio dat nastává ve stejném okamžiku jako změna na LRCK, LSB je tedy zarovnán doprava. Nevýhodou tohoto formátu je, že je nutné znát počet bitů dat. Data pro levý a pravý kanál jsou rozlišena stejně

jako v předchozím případě.

### 3.2.3 Formát I2S



Obr. 10 - Formát I2S. Obr. převzat z [2]

Formát I2S, který je na obrázku 10, se od předchozích formátů liší. Označení levého a pravého kanálu je obráceně a vzestupná hrana MSB dat je posunuta o jednu periodu SCLK doprava. Je zde možné volit libovolný počet bitů dat, jako u formátu Left-justified.



## 4. Návrh zapojení převodníků

Při návrhu zapojení převodníků bylo vybráno šest obvodů od tří nejznámějších světových výrobců – Texas Instruments, Cirrus Logic a Wolfson Microelectronics. Od každého výrobce byl vybrán jeden obvod s nejlepšími udávanými parametry a jeden obvod z levnější řady. Byl brán ohled na to, aby parametry jednotlivých převodníků byly přibližně srovnatelné. Obvody s nejlepšími parametry jsou Texas Instruments PCM1792, Wolfson WM8740 a Cirrus Logic CS4398. Jako zástupci levnější řady byly vybrány obvody Texas Instruments PCM5100, Wolfson WM8521 a Cirrus Logic CS4352.

Každý převodník je navržen jako samostatný modul s vlastní deskou plošných spojů. Pro propojení převodníků s dekodérem signálu S/PDIF je použit deseti pinový konektor, který je stejný u všech šesti převodníků i u dekodéru S/PDIF. To umožňuje jednoduchou výměnu jednotlivých modulů při měření. Odpadá tak nutnost použít pro každý převodník vlastní dekodér a velmi to zjednodušuje návrh, dekodér je tedy pouze jeden, stejný pro všechny převodníky.

### 4.1 Texas Instruments PCM 1792

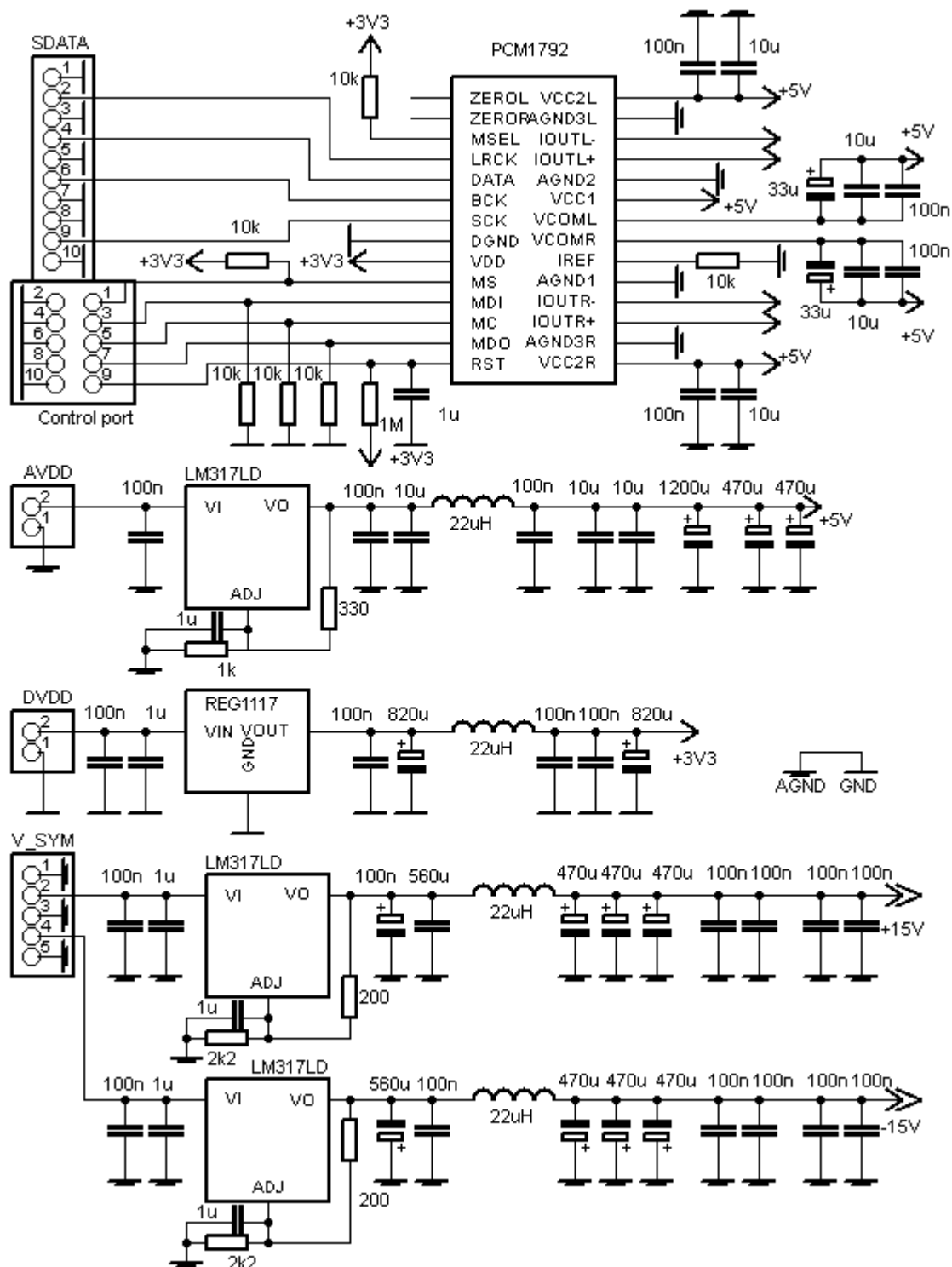
Obvod PCM1792 je 24 bitový D/A převodník od firmy Texas Instruments. Podporuje vzorkovací frekvence do 200 kHz a datové formáty I2S, Left-justified a Right-justified. Převodník pracuje v softwarovém módu, ovládací port je kompatibilní se sběrnici I2C a SPI. Pomocí ovládacího portu je možné nastavit funkci vnitřních obvodů, například výstupní hlasitost nebo formát přijímaných digitálních dat. Výstupní analogový signál z převodníku je diferenciální proudový. Napájecí napětí digitální části převodníku je 3,3 V, analogová část je napájena napětím 5 V. Hlavní parametry daného převodníku jsou uvedeny v tabulce 1:

**Tabulka 1 - Parametry PCM1792:**

Parametr	Pozn.	symbol	Min.	Typ.	Max.	jednotka
Dynamický rozsah				127		dB
Harmonické zkreslení	Vout = 0 dB	THD+N		0,0015		%
Odstup signál - šum	192 kHz	SNR		127		dB

Hodnoty dané v tabulce platí pro vzorkovací frekvenci 192 kHz.

## 4.1.1 Zapojení převodníku PCM1792



Obr. 11 - Schéma zapojení převodníku PCM1792

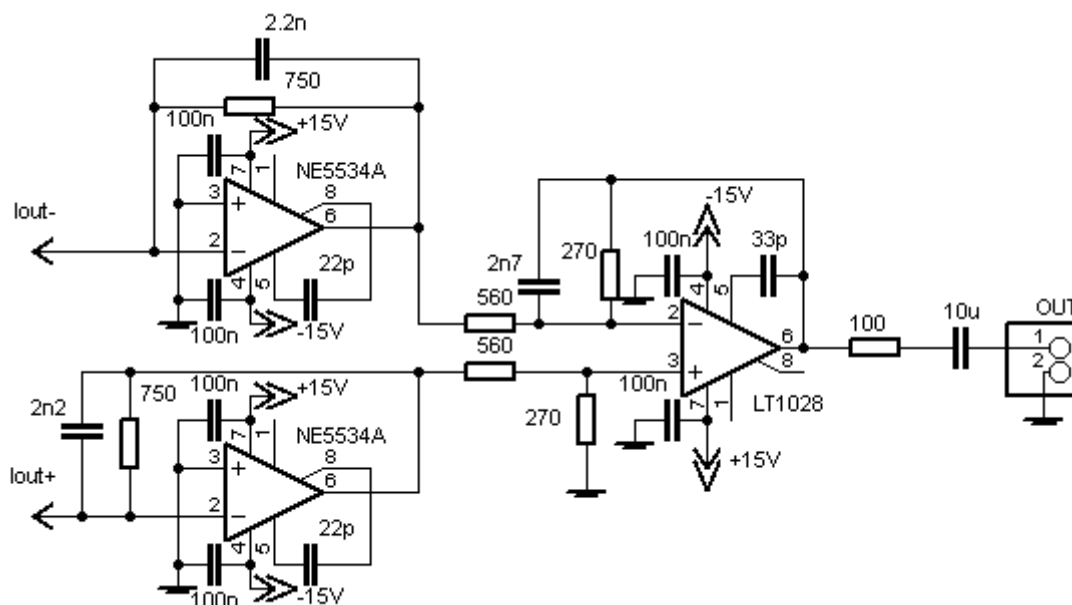
Zapojení převodníku je patrné z obrázku 11. Napájecí napětí 3,3 V pro digitální část převodníku je získáno z regulátoru TLV1117, napětí 5 V pro analogovou část z regulátoru LM317. Pro symetrické napájení operačních zesilovačů výstupního filtru je použita dvojice regulátorů LM317/337. Napájecí zdroje jsou opatřeny tlumivkou pro omezení rušení,

pronikajícího přes napájecí zdroj. Všechna napájecí napětí jsou od sebe oddělena, je také použita oddělená zem pro analogovou a digitální část.

Převodník je zapojen podle doporučení výrobce, ovládání převodníku bylo zvoleno po SPI sběrnici. Pro přenos dat do převodníku byl zvolen formát I2S. Napájení pro digitální část je opatřeno blokovacími kondenzátory 100 nF umístěnými co nejbližší obvodu, analogové napájení je blokováno dvojicí keramických kondenzátorů 100 nF a 10 µF. Analogové výstupy převodníku jsou připojeny k výstupnímu filtru, který je znázorněn na obrázku 12.

#### 4.1.2 Výstupní filtr

Schéma výstupního filtru použitého v převodníku je na následujícím obrázku:



Obr. 12 - Zapojení výstupního filtru PCM1792

Bylo použito výrobcem doporučené zapojení výstupního filtru. Protože výstup z převodníku je proudový 7,8 mA, je nejprve nutné použít převodník proud na napětí. K tomu slouží operační zesilovače NE5543A. Výsledný diferenciální signál je převeden na nesymetrický pomocí zapojení s operačním zesilovačem LT1028.

Funkce výstupního filtru je omezit harmonické složky v nadakustickém pásmu, které vznikají v důsledku vlastního převodu dat převodníkem. Tyto složky mohou nepříznivě ovlivňovat následující součásti reprodukčního řetězce a mohou mít vliv i na výsledný zvuk.

Operační zesilovače byly zvoleny vzhledem ke svým šumovým parametrům. Každý

zesilovač má v kladné i záporné větvi napájecího napětí blokovací kondenzátor 100 nF. Na obrázku je filtr pouze pro jeden kanál, pro převodník jsou tedy potřeba dva.

## 4.2 Wolfson WM8740

Wolfson WM8740 je 24 bitový stereo D/A převodník od firmy Wolfson Microelectronics. Podporuje vstupní data od 16 do 24 bitů a vzorkovací frekvence do 192 kHz. Přijímá vstupní data ve formátech I2S, Left-justified a Right-justified. Převodník pracuje v hardwarovém módu, tzn. všechno nastavení je provedeno přivedením logické 1 nebo 0 na příslušný vstup, nebo v softwarovém módu, využívající ovládací port. Ten je kompatibilní se sběrnici SPI, do převodníku lze ovšem pouze zapisovat. Výstupní analogový signál z převodníku je diferenciální napět'ový. Napájecí napětí digitální části převodníku je 3,3 V, analogová část je napájena napětím 5 V. Hlavní parametry převodníku jsou v tabulce 2:

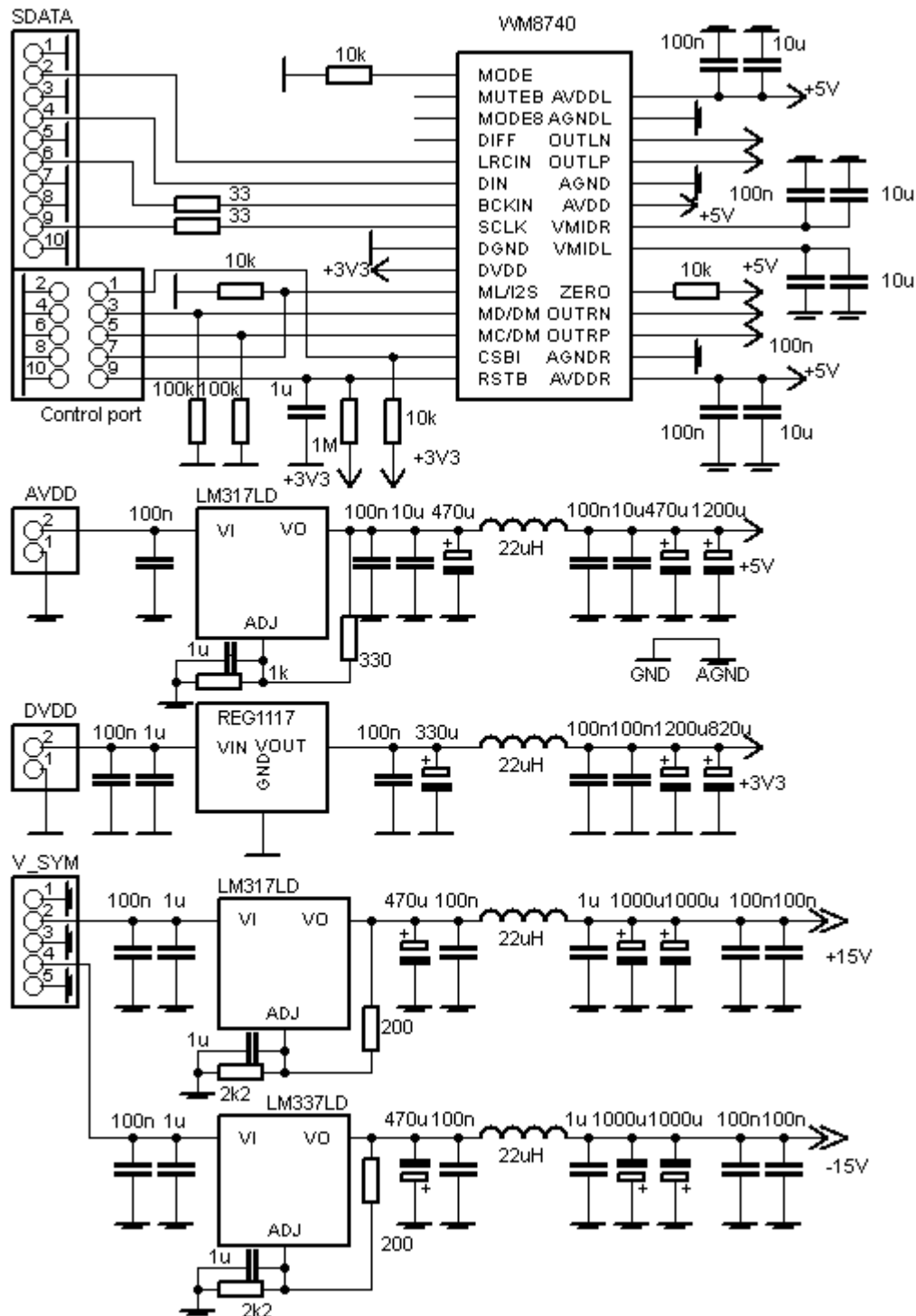
**Tabulka 2 - Parametry WM8740:**

Parametr	Pozn.	symbol	Min.	Typ.	Max.	jednotka
Dynamický rozsah				117		dB
Harmonické zkreslení	Vout = 0dB	THD	-95	-104		dB
Odstup signál - šum	96kHz	SNR		116		dB

### 4.2.1 Zapojení převodníku WM8740

Schéma zapojení převodníku WM8740 je uvedeno na obrázku 13. Napájecí napětí 3,3 V pro digitální část a 5 V pro analogovou obstarávají opět regulátory TLV1117 a LM317, stejně tak symetrické napájení +/- 15 V je získáno z dvojice regulátorů LM317/337. Všechna napájecí napětí jsou od sebe oddělena a jsou použity tlumivky v každé napájecí větvi. Zemní plocha pro digitální a analogovou část je oddělena, a spojena v jednom místě pod převodníkem.

Zapojení převodníku odpovídá doporučení výrobce, ovládání převodníku je po SPI sběrnici. Formát přijímaných dat je I2S. V napájení jsou použity blokovací kondenzátory stejně jako u předchozího převodníku, analogové diferenciální napět'ové výstupy jsou připojeny k výstupnímu filtru.

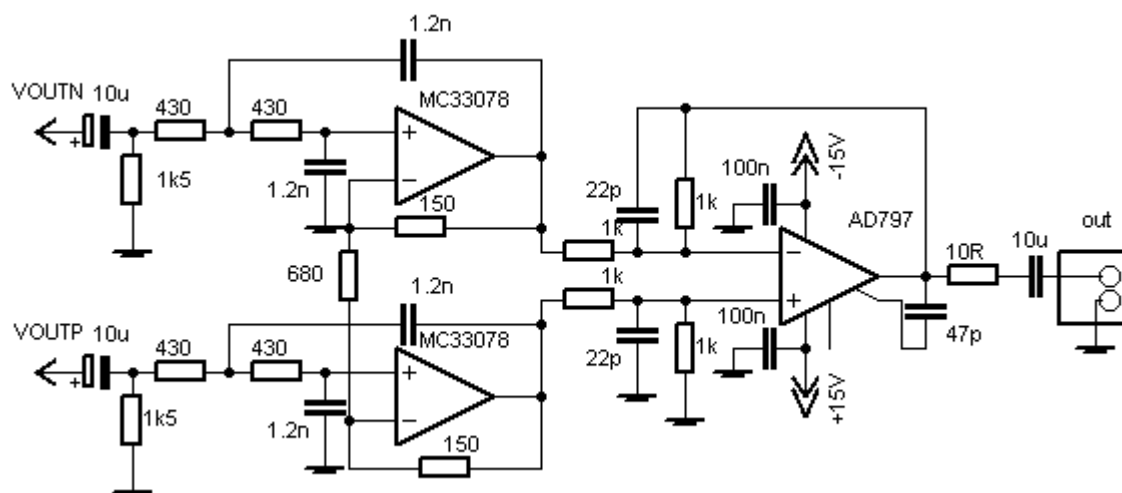


Obr. 13 - Schéma zapojení převodníku WM8740

#### 4.2.2 Výstupní filtr

Výstupní filtr převodníku WM8740 na obrázku 14 je podobný výstupnímu filtru předchozího převodníku. Výstup převodníku WM8740 je napěťový, není tedy potřeba převodníků proud na napětí. Výstup filtru je opět nesymetrický. Napájení filtru je

symetrické +/- 15 V, vyobrazen je jeden kanál.



Obr. 14 – Zapojení výstupního filtru WM8740

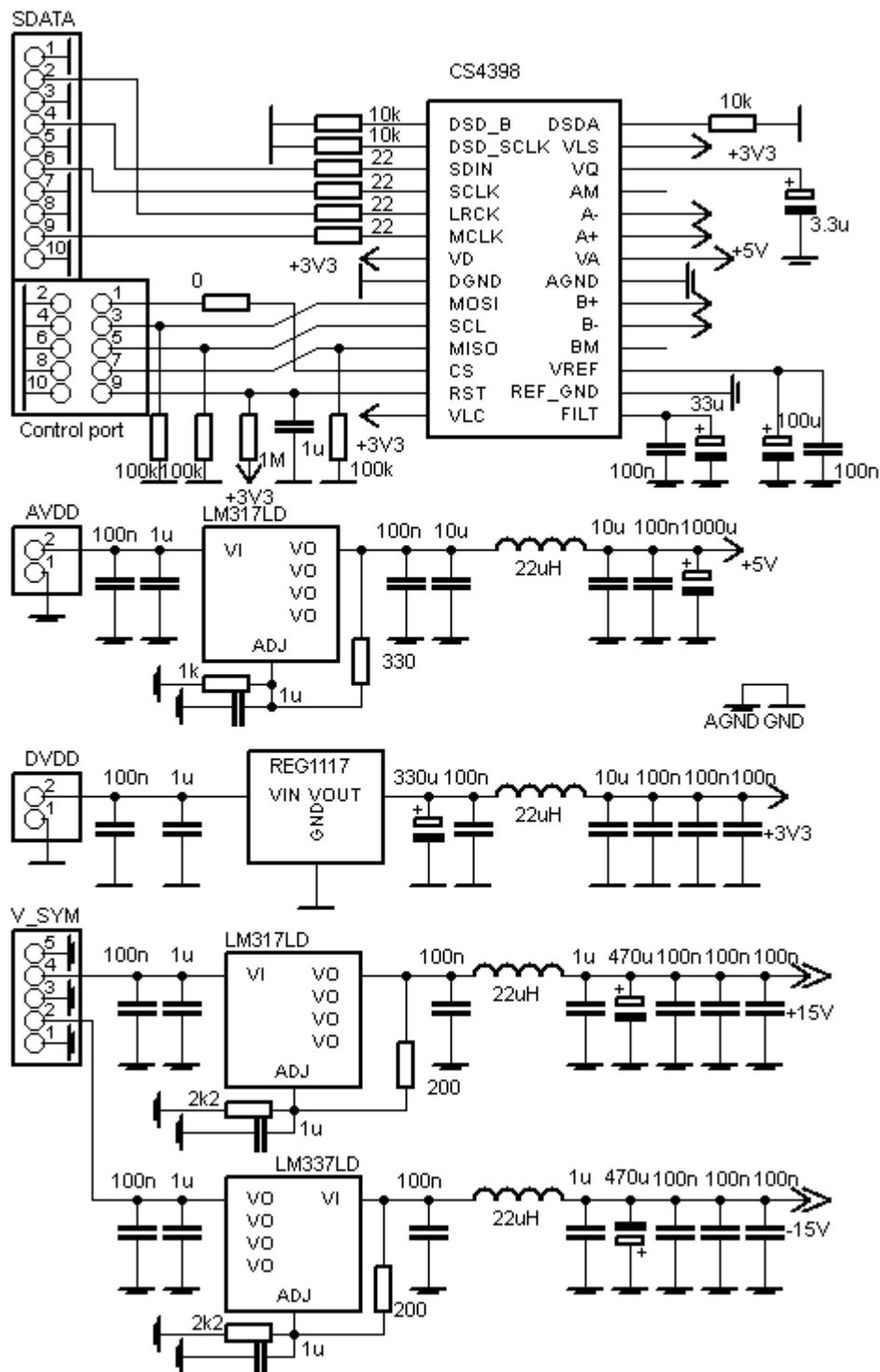
### 4.3 Cirrus Logic CS4398

Obvod CS 4398 je stereo D/A převodník firmy Cirrus Logic s  $\Delta/\Sigma$  strukturou. Převodník je 24 bitový a podporuje vzorkovací frekvence do 216 kHz. Převodník přijímá data ve formátu I2S, Right-justified nebo Left-justified. Uvnitř převodníku je obsaženo ovládání hlasitosti. Ovládání převodníku je realizováno prostřednictvím SPI nebo I<sup>2</sup>C portu, je možné měnit hlasitost, formát přijímaných dat, případně nastavovat de-emfázi. Výstupní analogový signál z převodníku je napěťový a diferenciální pro každý kanál. Napájecí napětí pro analogovou část převodníku je 5 V, pro digitální 3,3 V. Základní parametry dané výrobcem jsou v tabulce 3:

Tabulka 3 - Parametry CS4398:

Parametr	Poznámka	symbol	Min.	Typ.	Max.	jednotka
Dynamický rozsah	24 bit, váha A		117	120		dB
	24 bit		111	117		
Harmonické zkreslení	24 bit, 0 dB			-107	-100	dB
	-20 dB	THD+N		-97		
	-60 dB			-57		
Odstup signál - šum		SNR		120		dB
Kmitočtová charakteristika	10Hz – 20kHz		-0,01		0,01	dB

### 4.3.1 Zapojení převodníku CS4398



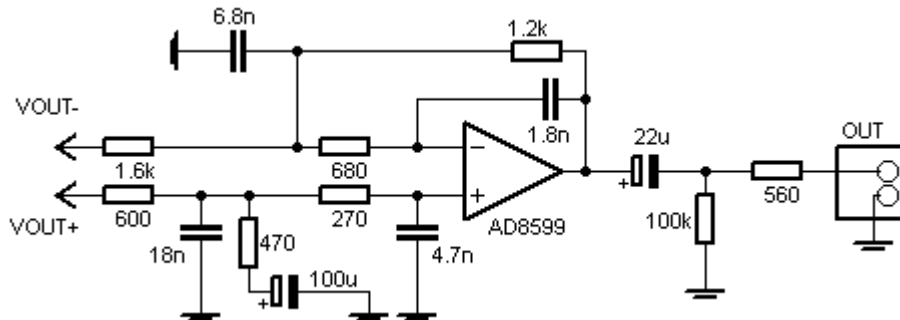
Obr. 15 - Schéma zapojení převodníku CS4398

Na obrázku 15 je uvedeno zapojení převodníku CS4398. K napájení převodníku jsou využity regulátory LM317 pro napájení 5 V analogové části a TLV1117 pro digitální 3,3 V část. Pro symetrické napájení +/-15 V výstupního filtru jsou použity regulátory LM317 pro kladnou větev a LM337 pro zápornou. Za každým regulátorem následuje odrušovací

tlumivka. Analogová a digitální zem je oddělená, spojena je pod převodníkem.

Zapojení převodníku je standardní, formát přijímaných dat je I2S. Ovládací port je nastaven pro komunikaci po SPI sběrnici. Z pohledu složitosti zapojení je převodník CS4398 jednodušší než předcházející dva převodníky.

### 4.3.2 Výstupní filtr



Obr. 16 – Zapojení výstupního filtru CS4398

Výstupní filtr pro tento převodník je jednodušší, obsahuje pouze jeden operační zesilovač. Ten je zapojen jako diferenční zesilovač a zároveň plní funkci filtru typu dolní propust. Výstup převodníku je napěťový, je tedy možné k němu připojit přímo diferenční zesilovač. Výstup filtru je tedy nesymetrický. Na obrázku je filtr pouze pro jeden kanál, v převodníku jsou tedy tyto filtry dva.

### 4.4 Texas Instruments PCM5100

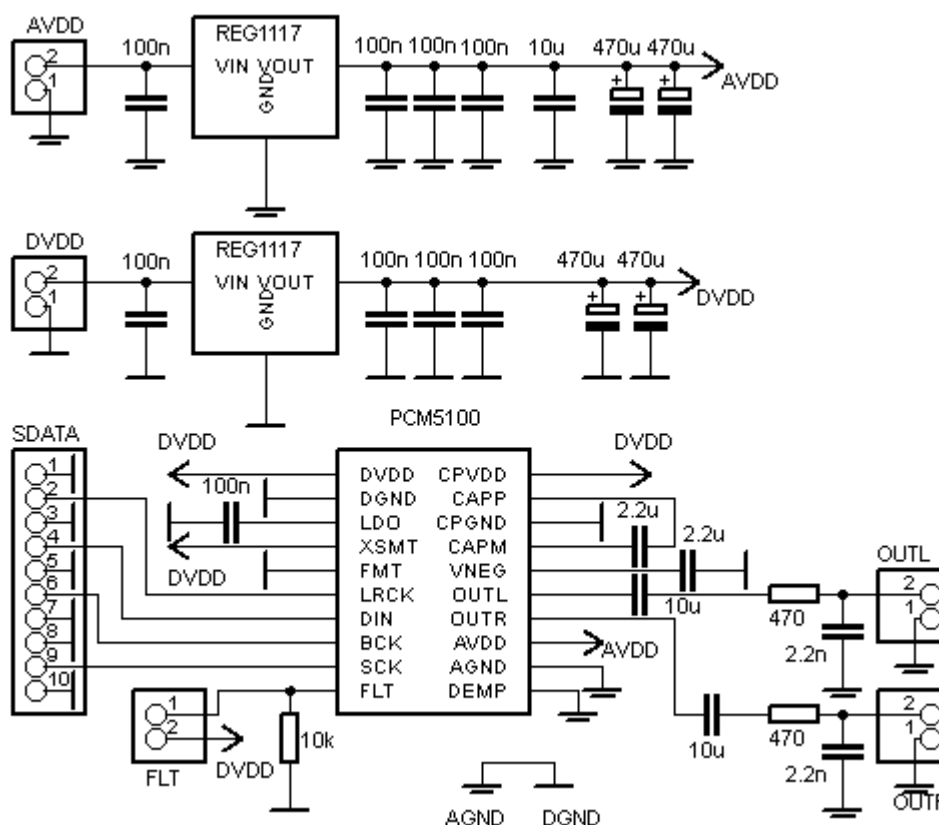
Převodník Texas Instrument PCM5100 je první převodník z řady levnějších převodníků. Uvnitř tohoto obvodu se nachází  $\Delta/\Sigma$  převodník a integrovaný měnič napětí spolu s výstupním budičem. Integrovaný měnič napětí je realizován nábojovou pumpou a jeho výstupní napětí je použito pro napájení výstupního budiče. To umožňuje požití jediného napájecího napětí pro celý převodník a zjednodušuje návrh.

Obvod přijímá data od 16 do 32 bitů a podporuje vzorkovací frekvence do 384 kHz. Podporované přijímané formáty dat jsou I2S a Left-justified. Integrovaný fázový závěs uvnitř převodníku umožňuje připojení převodníku i bez použití hlavního hodinového signálu. Připojení bez hlavního hodinového signálu zjednodušuje návrh převodníku a také zmenšuje nežádoucí rušení. V tomto návrhu ale fázový závěs nebyl použit.

Napájecí napětí převodníku je 3,3 V pro digitální část, analogovou část i pro nábojovou pumpu. Nábojová pumpa spolu s výstupním budičem umožňuje, aby měl převodník na výstupu analogové napětí o velikost 2 V RMS s nulovou stejnosměrnou složkou. Odpadá



tak nutnost použití oddělovacích kondenzátorů na výstupu převodníku.



Obr. 17 - Schéma zapojení převodníku PCM5100

Na obrázku 17 je naznačeno zapojení převodníku. Pro napájení převodníku postačují dva zdroje napětí 3,3 V – jeden pro digitální a jeden pro analogovou část. Parametry převodníku udávané výrobcem jsou v následující tabulce:

Tabulka 4 - Parametry PCM5100:

Parametr	Poznámka	symbol	Min.	Typ.	Max.	jednotka
Dynamický rozsah	24 bit, váha A			100		dB
Harmonické zkreslení	24 bit, -1 dBFS	THD+N		-90		dB
Odstup signál - šum		SNR		123		dB

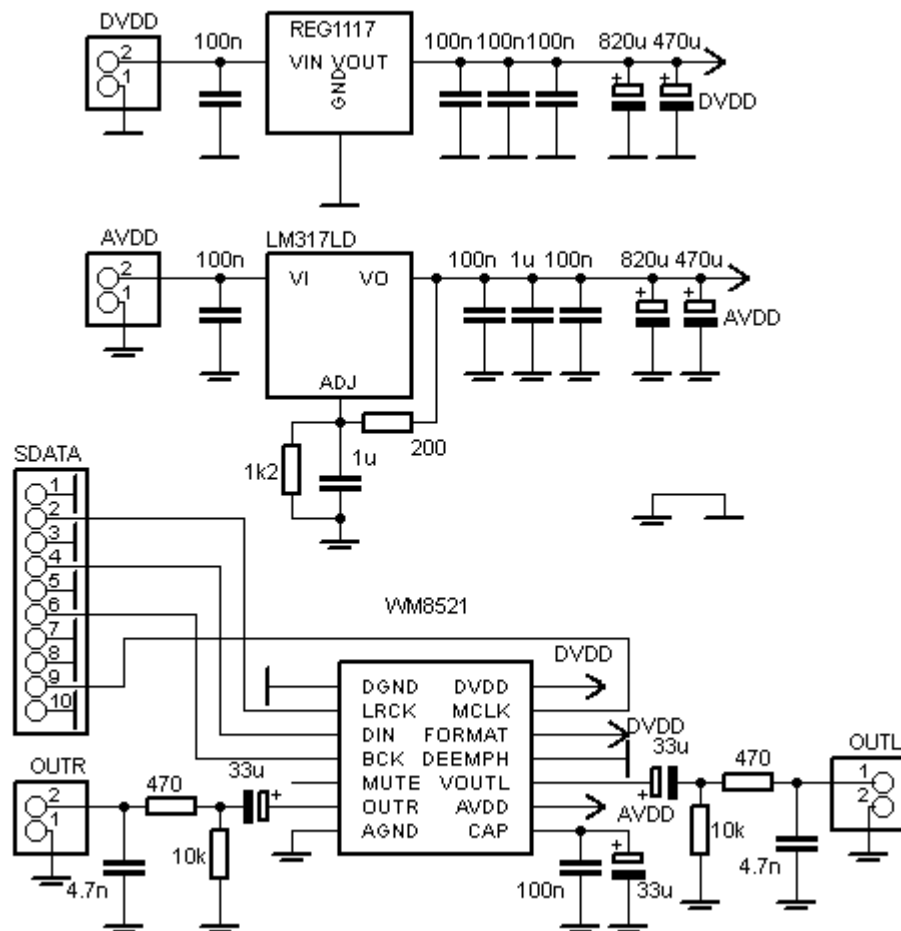
Analogový výstup převodníku je nesymetrický napěťový. To zjednodušuje výstupní filtr i celkové zapojení převodníku. Výstupní filtr obvodu je realizován pouze jako jednoduchý RC článek sestávající z rezistoru 470  $\Omega$  a kondenzátoru 2,2 nF. I přes výrobcem deklarovanou možnost zapojení bez oddělovacích kondenzátorů byly v návrhu tyto kondenzátory použity.

#### 4.5 Wolfson WM8521

Převodník Wolfson WM8521 je další z řady levných převodníků. Obvod se skládá z

$\Delta/\Sigma$  převodníku s převzorkováním a výstupního budiče. Převodník je 24 bitový a podporuje data od 16 do 32 bitů a vzorkovací frekvence od 8 do 192 kHz. Přijímá data ve formátech I2S a Right-justified.

Napájecí napětí převodníku je 3,3 V pro digitální část, pro analogovou se napájecí napětí pohybuje v rozmezí od 7,6 V do 13,2 V. V analogové části převodníku se nachází výstupní budič, který umožňuje dosáhnout velikosti výstupního napětí 2 V RMS, stejně jako u předchozího převodníku. Za výstupem převodníku je ale ovšem nutné použít oddělovací kondenzátory pro oddělení stejnosměrné složky, na výstupu je totiž stejnosměrné napětí rovné polovině napájecího napětí analogové části.



Obr. 18 - Schéma zapojení převodníku WM8521

Zapojení převodníku je patrné na obr. 18. Zapojení je velice jednoduché, nastavuje se pouze formát přijímaných dat a deemfáze pomocí pinů FORMAT a DEEMPH. Formát je nastaven na I2S a deemfáze vypnuta. Udávané dynamické parametry jsou v tabulce 5:

**Tabulka 5 - Parametry WM8521:**

Parametr	Poznámka	symbol	Min.	Typ.	Max.	jednotka
Dynamický rozsah			91	96		dB
Harmonické zkreslení	0 dBFS			-81		dB
Odstup signál - šum	fs = 96kHz, váha A fs = 48kHz	SNR	91	96 93		dB

Analogový výstup převodníku je nesymetrický napěťový. Za výstupem následují oddělovací kondenzátory 33  $\mu$ F. Výstupní filtr je tvořen RC členem, hodnota rezistoru je 470  $\Omega$  a hodnota kondenzátoru 4,7 nF. Výrobce udává, že převodník již filtr obsahuje uvnitř a tento externí výstupní filtr může být pro většinu aplikací vypuštěn.

#### 4.6 Cirrus Logic CS4352

Poslední převodník je Cirrus Logic CS4352. Je to 24 bitový  $\Delta/\Sigma$  převodník s převzorkováním a integrovaným výstupním budičem. Přijímaná data jsou od 16 do 24 bitů a vzorkovací frekvence do 196 kHz. Formáty dat jsou I2S, Left-justified a Right-justified. Převodník navíc obsahuje funkci Auto-mute, která odpojí výstupy při nepřítomnosti vstupních dat.

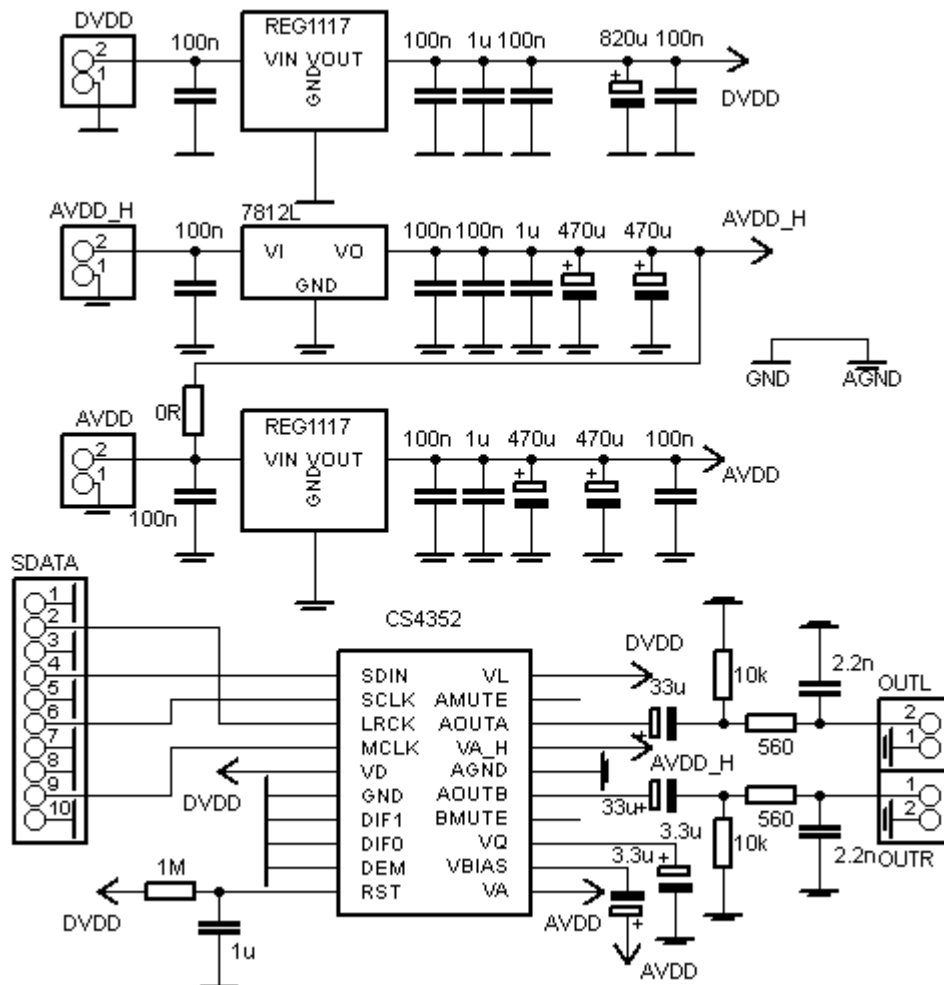
V tabulce 6 jsou výrobcem udávané základní parametry:

**Tabulka 6 - Parametry CS4352:**

Parametr	Poznámka	symbol	Min.	Typ.	Max.	jednotka
Dynamický rozsah	24 bit, váha A 24 bit, bez váhy		96 93	106 103		dB
Harmonické zkreslení	24 bit, 0 dB -20 dB -60 dB	THD+N		-93 -83 -43	-89 -73 -33	dB
Odstup signál - šum		SNR		106		dB
Kmitočtová charakteristika	10 Hz – 20 kHz		-0,01		0,01	dB

Napájecí napětí digitální části je 3,3V, analogové části 3,3V a napájení pro výstupní budič je od 8,4 V do 12,6 V. Stejně jako u obou předchozích převodníků i tento převodník obsahuje výstupní budič, velikost výstupního z převodníku je opět 2 V RMS. I u tohoto

převodníku je nutné použít blokovací kondenzátory kvůli stejnosměrnému napětí na výstupu převodníku. Zapojení převodníku je na obrázku 19:



Obr. 19 - Schéma zapojení převodníku CS4352

Zapojení převodníku je složitější než předchozí převodníky, zejména z důvodu použití tří napájecích zdrojů. Formát přijímaných dat je nastaven na I2S pomocí pinů DIF 1 a 0. Výstup převodníku je nesymetrický napěťový, následují oddělovací kondenzátory 33  $\mu$ F. Výstupní filtr je tvořen RC členem, hodnoty součástek jsou 560  $\Omega$  a 2,2 nF.

## 5. Realizace a Měření

Tato kapitola obsahuje popis realizovaného převodníku jako celku a měření jednotlivých převodníků. U realizovaného převodníku jsou uvedeny důležité části pro funkci převodníku a jejich úloha.

### 5.1 Realizace převodníku

Celý převodník byl zastavěn do ocelového boxu o rozměrech 23 x 70 x 22 cm. Na předním panelu je umístěn grafický displej, ovládací tlačítka a tlačítko napájení se signalizační LED diodou. Na zadním panelu je konektor síťového odrušovacího filtru, síťový vypínač a vstupní a výstupní konektory.

Vstupní konektory tvoří dvojice optických přijímačů, konektor RCA pro koaxiální kabel a konektor USB pro ovládání pomocí PC. Výstupními konektory převodníku je dvojice RCA konektorů pro analogový výstup.

#### 5.1.1 Realizace jednotlivých převodníků

Všechny převodníky jsou postaveny na dvouvrstvé desce plošných spojů. Převodníky jsou opatřeny 10pin konektorem pro jednoduchou výměnu při měření.

Součástí každého převodníku jsou konektory pro napájecí napětí, konektory jsou od sebe rozlišeny jiným typem konektorů, tak aby nemohlo dojít k jejich záměně. Odpovídající konektory jsou na každém převodníku stejné. Každý převodník má na desce vlastní stabilizátory napětí, namísto použití společných na desce zdroje, z důvodu snížení délky vodičů a tím snížení možnosti rušení. Součástí jsou i ochranné diody proti přepólování.

#### 5.1.2 S/PDIF dekodér

Jako dekodér S/PDIF signálu byl zvolen obvod Cirrus Logic CS8416. Dekodér je nastaven, aby pracoval v hardwarovém módu. Veškeré funkce obvodu jsou nastaveny pomocí pull-up a pull-down rezistorů na jedenácti vývodech obvodu. Stav na těchto vývodech se načtou po resetu a dekodér začne pracovat se zvoleným nastavením. Není tedy pro funkci obvodu zapotřebí mikrokontrolér.

Dekodér je nastaven pro komunikaci s D/A převodníkem ve formátu I2S. Přebzorkování vzorkovací frekvence je nastaveno na 128x fs. Propojení s převodníky je realizováno 10pin konektorem, pořadí signálů v konektoru je stejné pro všechny převodníky.

Dekodér může mít až čtyři vstupy, které je možné přepínat pomocí dvou vývodů. Vstupy dekodéru jsou diferenciální, mohou tedy zpracovávat různé úrovně signálů. V tomto případě jsou použity dva vstupy pro optický kabel a jeden pro koaxiální kabel.

### 5.1.3 Napájecí zdroj

Napájecí zdroj pro převodník se do značné míry podílí na kvalitě převodníku. Proto je důležité, aby byl napájecí zdroj navržen co nejlépe.

Zdroj v tomto převodníku obsahuje čtyři napájecí větve: napájení pro analogovou část převodníku, pro digitální část, symetrické napájení pro operační zesilovače a napájecí napětí pro mikrokontrolér a ostatní obvody. Pro analogovou, digitální i větvev se symetrickým napájením je použit vlastní transformátor. To napomáhá omezit rušení, které se šíří přes vinutí transformátoru. Pro omezení rušení ze sítě je zdroj vybaven síťovým filtrem.

Z hlediska rušení jsou největší nároky kladeny na napájení analogové části převodníku. Veškeré rušení, které by se zde objevilo, by přímo ovlivnilo výstup převodníku. Totéž platí i pro symetrické napájení operačních zesilovačů. Proto je nezbytné, aby na těchto napájecích větvích bylo co nejmenší možné rušení. Napájení pro digitální část už není tak kritické.

V každé větvi napájecího zdroje se nachází tlumivka pro zmenšení rušení. Na výstupu zdroje jsou v každé větvi zapojeny zenerovy diody jako přepětíová ochrana. Na primární straně zdroje je také umístěn varistor.

### 5.1.4 Ovládání převodníku

Ovládání převodníku je realizováno třemi způsoby: pomocí tlačítek a displeje na předním panelu, infračerveného dálkového ovládání a pomocí propojení s PC přes USB konektor.

Veškeré ovládání celého převodníku obstarává mikrokontrolér ATmega 1284. Tento mikrokontrolér komunikuje s převodníkem po SPI sběrnici a s dekodérem. Je tedy možné

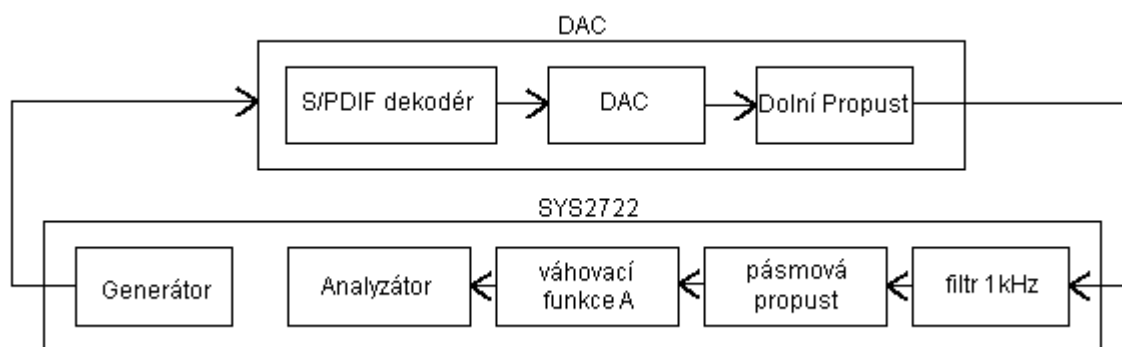
měnit výstupní hlasitost a volit zdroj digitálních dat.

Na předním panelu převodníku se nachází čtveřice tlačítek, které jsou připojeny k mikrokontroléru, jejichž pomocí je možné převodník ovládat. Aktuální stav převodníku je zobrazen na grafickém displeji na předním panelu. Na předním panelu je také umístěn přijímač infračerveného signálu z dálkového ovládání.

Pro komunikaci s PC je využit obvod FT232, který slouží jako převodník z USB na UART. Komunikace s převodníkem tedy probíhá po sériové lince.

## 5.2 Měření realizovaných převodníků

Měření probíhalo za použití analyzátoru SYS2722 firmy Audio Precision. Digitální vstup převodníku byl zapojen na digitální výstup generátoru pomocí optického kabelu. Analogový výstup převodníku byl zapojen na vstup analyzátoru nesymetrickým stíněným kabelem. Blokové schéma zapojení převodníku a analyzátoru je na následujícím obrázku. Pásmová zadrž 1 kHz není použita pro všechna měření.



Obr. 20 - Blokové schéma měřicího řetězce

### 5.2.1 Metodika měření

U převodníků byly měřeny především dynamické parametry, jelikož stejnosměrné charakteristiky převodníků nejsou na výstupu slyšet. Byly měřeny tyto parametry: dynamický rozsah, odstup signál-šum, harmonické zkreslení THD+N a harmonické zkreslení závislé na frekvenci, frekvenční spektrum výstupního signálu, linearita převodu a frekvenční charakteristika. Veškeré parametry byly měřeny pro 24bit/192kHz signál, z důvodu snadného porovnání výsledků. Metoda měření parametrů je pro všechny převodníky stejná. Norma pro testování převodníků je specifikovaná EIAJ (Electronic Industry Association of Japan) pod značkou CP2404. Výsledky jsou uvedeny u každého převodníku v přehledné tabulce, grafy ve větším rozlišení jsou k dispozici v příloze a na příloženém CD. Popis a metoda měření jednotlivých parametrů je následující:

#### Harmonické zkreslení THD+N

$$THD + N = \frac{\sum_{n=2}^{\infty} \text{harmonické složky} + \text{šum}}{\text{základní harmonická}}$$

Harmonické zkreslení THD+N je definováno jako poměr signálu k součtu šumu a



všech harmonických složek signálu ve slyšitelném spektru. Měřen byl tedy poměr úrovně vstupního signálu a úrovně harmonických složek a šumu. Bylo měřeno THD+N v závislosti na amplitudě signálu, první měření probíhalo pro signál 997 Hz a druhé pro 5 frekvencí od 20 Hz do 20 kHz, konkrétně 20 Hz, 112 Hz, 632 Hz, 3,56 kHz a 20 kHz. Při prvním měření byla v analyzátoru použita pásmová propust od 10 Hz do 20 kHz, při druhém 10 Hz – 80 kHz, z důvodu měření harmonických složek pro 20 kHz.

### **Dynamický rozsah**

Úroveň vstupního signálu do převodníku je -60dBFS, frekvence vstupního signálu je 997Hz. Výstup převodníku je přiveden do analyzátoru a je použita dolní propust s mezním kmitočtem 20 kHz. Poté je výstup zesílen o 60dB, výstupní hodnota z analyzátoru je kladné číslo reprezentující dynamický rozsah převodníku.

### **Odstup signál-šum**

Odstup signálu od šumu je definován jako poměr signálu při plné úrovni (0dBFS) o frekvenci 997 Hz k šumu v kanálu při nulovém vstupním signálu (digitální nula).  $SNR = \text{signál } 0\text{dBFS} - \text{signál digitální nula}$ . Odstup signál – šum byl měřen v prvním případě s RMS detektorem a váhou A, používanými pro měření běžné komerční elektroniky a použitými výrobcí převodníků, ve druhém případě s kvazi-špičkovým detektorem a váhou CCIR, používanými pro studiovou techniku.

### **Frekvenční spektrum**

U převodníků bylo též měřeno frekvenční spektrum. První měření probíhalo se signálem s frekvencí 997 Hz a úrovní 0dBFS na výstupu generátoru s použitím pásmové zádrže na vstupu analyzátoru. Pásmová zádrž slouží pro eliminaci spektrální čáry odpovídající vstupnímu signálu a tím zvyšuje přesnost analyzátoru na nízkých úrovních. Při tomto měření byly patrné harmonické frekvence vstupního signálu. Druhé měření probíhalo s digitální nulou na vstupu převodníku.

### **Linearita převodu**

Linearita převodu je jediný měřený statický parametr. Linearita představuje převodní křivku mezi digitálním a analogovým signálem. Ideálně by to měla být přímka. Na vstup převodníku byly přiváděny digitální hodnoty a měřeny jejich odpovídající analogové hodnoty. Frekvence vstupního signálu byla 500 Hz. Výsledkem by měla být přímka.

Jakákoli odchylka od přímky znamená chybu linearity.

### Frekvenční charakteristika

Měřena byla i frekvenční charakteristika převodníků, frekvenční rozsah vstupního digitálního signálu byl od 10 Hz do 96 kHz. Úroveň vstupního digitálního signálu byla -20dBFS. Frekvenční charakteristiky všech převodníků jsou uvedeny ve společném grafu na konci kapitoly.

#### 5.2.2 Výsledky PCM1792

Převodník PCM1792 měl mít ze všech převodníků nejlepší parametry, měření tomu nasvědčovalo. Naměřené hodnoty porovnané s hodnotami výrobce jsou v následující tabulce:

**Tabulka 7 - Výsledky PCM1792:**

Parametr	symbol	výrobce	naměřeno	jednotka
Dynamický rozsah		127	121	dB
Harmonické zkreslení	THD+N	0,0015	0,0032	%
Odstup signál - šum	SNR – RMS	127	124,7	dB
	SNR - QP		110,6	dB

Dynamický rozsah vyšel podobný, jako udává výrobce. Harmonické zkreslení je dvojnásobné, oproti tomu co udává výrobce. Z grafu změřeného THD+N je patrné zkreslení -90dB při 0dBFS, což je po přepočtu 0,00316%. Ovšem do úrovně vstupního signálu -30dBFS je zkreslení -121dB, po přepočtu 0,0000891%. Při měření THD+N pro různé frekvence vycházelo největší zkreslení pro 20 kHz, a to -73dB.

Odstup signál-šum tohoto převodníku byl 124,7dB při použití RMS detektoru. Měřená hodnota se od udávané liší jen velmi málo. Při použití kvazi-špičkového detektoru byla hodnota 110,6dB. Při měření frekvenčního spektra byla úroveň digitální nuly kolem -145dB, pouze v pásmu do 200 Hz bylo patrné rušení od napájecího zdroje. Linearita u tohoto převodníku byla za všech nejlepší, frekvenční charakteristika byla téměř plochá, klesat začala od 10 kHz. Na 20 kHz byl pokles 0,2dB. Tento převodník dopadl nejlépe z měřených převodníků, parametry udávané výrobcem je možné běžně dosáhnout správným zapojením obvodu a návrhem plošných spojů.

### 5.2.3 Výsledky WM8740

Dalším měřeným převodníkem byl WM8740. Jeho udávané parametry jsou trochu horší, než u předchozího, ale stále jsou velmi dobré.

Tabulka 8 - Výsledky WM8740:

Parametr	symbol	výrobce	naměřeno	jednotka
Dynamický rozsah		117	112,8	dB
Harmonické zkreslení	THD+N	-104	-97	dB
Odstup signál - šum	SNR – RMS	116	113,1	dB
	SNR - QP		95,6	dB

Dynamický rozsah převodníku se velmi blíží udávaným hodnotám. Z grafu THD+N je patrné zkreslení -97dB pro vstupní úroveň 0dBFS, do vstupní úrovně -15dBFS je harmonické zkreslení pod -112dB. Největší zkreslení pro různé frekvence vychází opět pro 20 kHz, a to -78dB při vstupní úrovni 0dBFS.

Odstup signál-šum převodníku s RMS detektorem byl 113,1dB, udávaný 116dB. Při použití kvazi-špičkového detektoru byl odstup 95,6dB. Úroveň digitální nuly při měření spektra byla kolem -140dB, s patrným rušením od napájecího zdroje. Frekvenční charakteristika byla plochá, pokles na koncích slyšitelného pásma byl kolem 0,1dB. Výrobce udávané hodnoty jsou opět dosažitelné.

### 5.2.4 Výsledky CS4398

Převodník CS4398 měl mít podle výrobce srovnatelné parametry jako WM8740. Při měření frekvenčního spektra tohoto převodníku však bylo zjištěno silné zkreslení harmonickými složkami, zvláště třetí harmonickou, jejíž vrchol ležel na úrovni -23dB. Měření dalších parametrů tohoto převodníku tedy nemělo smysl, změřena byla jen frekvenční charakteristika.

### 5.2.5 Výsledky PCM5100

Převodník PCM5100 je první zástupce řady levnějších převodníků, jeho naměřené hodnoty jsou v následující tabulce:

**Tabulka 9 - Výsledky PCM5100:**

Parametr	symbol	výrobce	naměřeno	jednotka
Dynamický rozsah		100	99	dB
Harmonické zkreslení	THD+N	-90	-91	dB
Odstup signál - šum	SNR – RMS	123	127,7	dB
	SNR - QP		114,7	dB

Naměřený dynamický rozsah převodníku téměř odpovídá hodnotám výrobce. Zkreslení THD+N vychází o 1dB lépe než udávané. Největší zkreslení pro různé frekvence je pro 20 Hz, -64dB, důvodem je zřejmě nízká kapacita vazebního kondenzátoru.

Odstup signálu od šumu byl u tohoto převodníku 127,7dB s RMS detektorem, respektive 114,7dB s kvazi-špičkovým detektorem. Hodnota odstupu je lepší, než udávaná a také lepší než u předchozích převodníků. To může být způsobeno použitím automatické funkce zatlumení výstupu obsažené uvnitř převodníku. Při měření spektra vycházela úroveň digitální nuly kolem -155dB s výrazným rušením kolem 50 Hz z napájecího zdroje. Frekvenční charakteristika byla s poklesem na koncích pásma 0,1dB. Udávané hodnoty jsou bez problému dosažitelné, převodník je vzhledem ke své ceně velmi dobrý.

### 5.2.6 Výsledky WM8521

Další z řady levných převodníků je WM8521, jehož výsledky jsou následující:

**Tabulka 10 - Výsledky WM8521:**

Parametr	symbol	výrobce	naměřeno	jednotka
Dynamický rozsah		96	91	dB
Harmonické zkreslení	THD+N	-81	-74	dB
Odstup signál - šum	SNR – RMS	96	94,4	dB
	SNR - QP		81,2	dB

Dynamický rozsah tohoto převodníku vychází hůře, než udává výrobce. Také harmonické zkreslení vychází o 7dB hůře. Z grafu zkreslení pro různé frekvence je patrné, že zkreslení je pro všechny frekvence téměř stejné.

Odstup signálu od šumu je 94,4dB, podobný jako hodnota výrobce. S kvazi-špičkovým detektorem je hodnota odstupu 81,2dB. Úroveň digitální nuly při měření spektra je kolem -115dB s rušením do 100 Hz. Frekvenční charakteristika vykazovala výrazné zvlnění kolem 50Hz a patrný vrchol od 10 do 20 kHz.

### 5.2.7 Výsledky CS4352

Posledním z měřených převodníků je cs4352. Jeho parametry jsou následující:

Tabulka 11 - Výsledky CS4352:

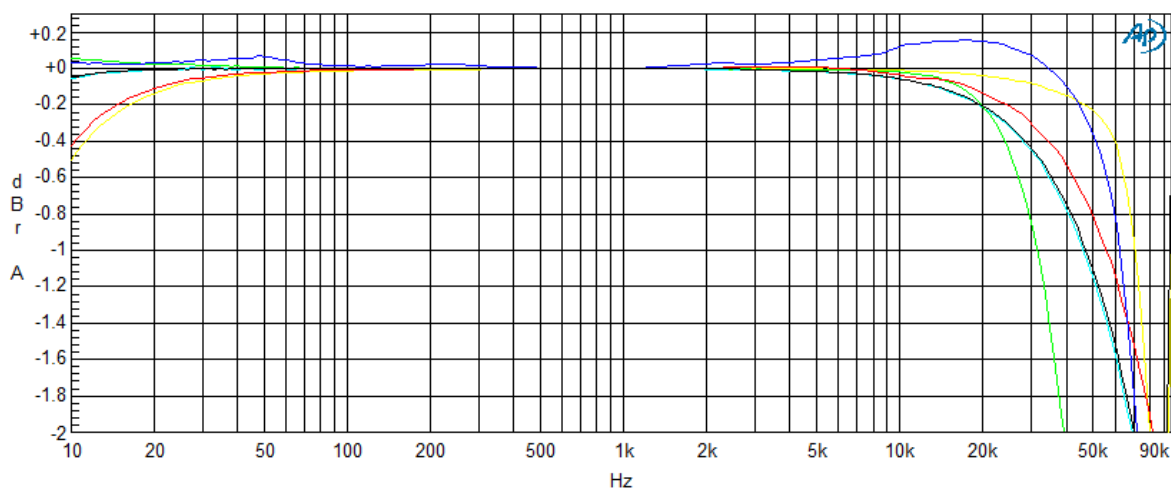
Parametr	symbol	výrobce	naměřeno	jednotka
Dynamický rozsah		106	103,2	dB
Harmonické zkreslení	THD+N	-93	-84	dB
Odstup signál - šum	SNR – RMS	106	105,1	dB
	SNR - QP		93,6	dB

Dynamický rozsah převodníku je 103,2dB, je tedy podobný, jako udává výrobce. Harmonické zkreslení je téměř o 10dB vyšší. Převodník měl na výstupu výrazné spektrální složky těsně za hranicí slyšitelného pásma 20 kHz, bylo proto nutné použití dodatečné dolní propusti pro měření. Tato skutečnost ovlivnila měření harmonického zkreslení a linearity.

Odstup signálu od šumu činí 105,1dB, což je téměř stejné jako hodnota výrobce. S kvazi-špičkovým detektorem je odstup 93,6dB. Frekvenční charakteristika převodníku vykazuje pokles na vyšších frekvencích, na 20 kHz je to 0,2dB.

### 5.2.8 Frekvenční charakteristika převodníků

Na následujícím grafu je zobrazena frekvenční charakteristika všech převodníků:

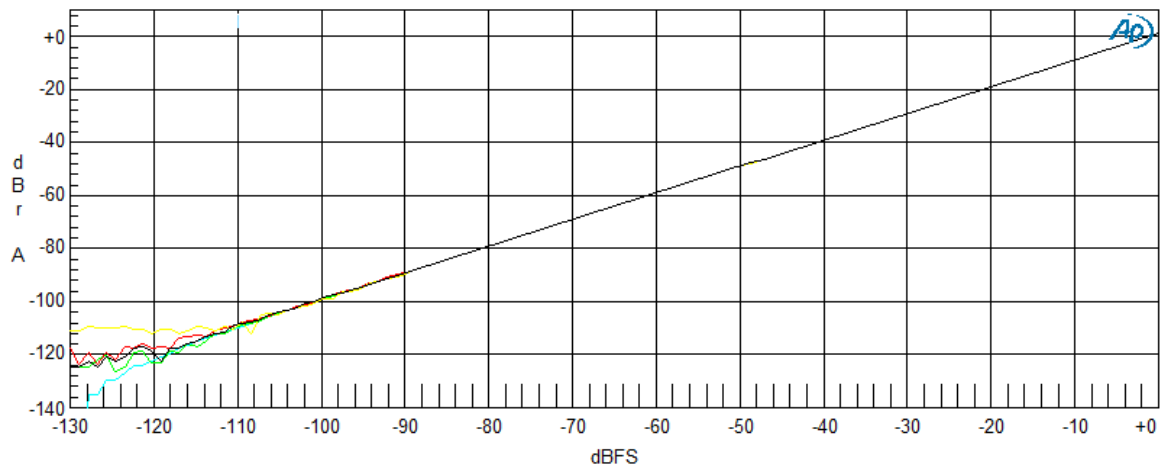


Obr. 21 - Frekvenční charakteristika převodníků

Azurový průběh je pro PCM1792, žlutý pro WM8740, zelený pro CS4398, červený PCM5100, modrý WM8521 a černý CS4352.

### 5.2.9 Linearita převodníků

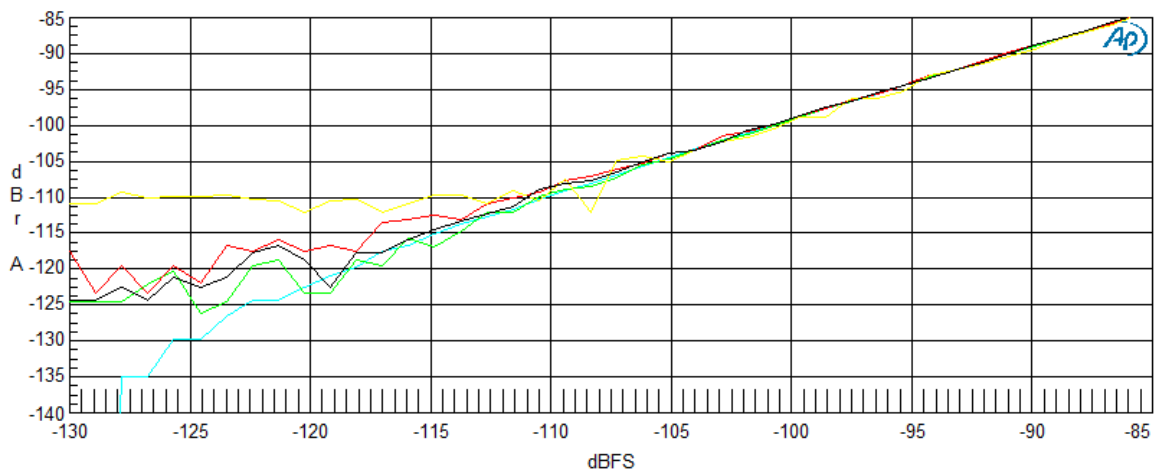
V rámci měření dynamických parametrů byla změřena i linearita převodníků. Naměřené hodnoty jsou na obrázku 22:



Obr. 22 - Linearita převodníků

Azurový průběh je pro PCM1792, zelený pro WM8740, červený PCM5100, žlutý WM8521 a černý CS4352.

Na následujícím grafu je detail linearity převodníků pro nízké úrovně vstupního signálu. Popis průběhů je stejný.



Obr. 23 - Detail linearity převodníků

## 6. Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout a realizovat audio D/A převodník. Úspěšná realizace a měření se podařilo u pěti ze šesti převodníků, převodník Cirrus Logic CS4398 byl sice funkční, ale vykazoval velké harmonické zkreslení.

Ve druhé kapitole je uvedeno zapojení nejčastěji používaných audio D/A převodníků a u jednotlivých bloků je uvedena jejich funkce. Ve třetí kapitole je uveden popis přenosu signálu do D/A převodníku a jeho možné formáty.

Z navržených a realizovaných zapojení, popsaných ve čtvrté kapitole, dopadl podle očekávání nejlépe převodník Texas Instruments PCM1792, který vykazoval nejlepší parametry podle výrobce i při měření. Z řady levnějších převodníků dopadl nejlépe převodník Texas Instruments PCM5100. U tohoto převodníku se podařilo dosáhnout parametry specifikované výrobcem a některé i lepší. Postup měření jednotlivých parametrů je popsán v páté kapitole, je zde také popis realizovaných převodníků a popis dalších obvodů, potřebných pro úspěšné měření parametrů.

## Použitá literatura

- [1] Overview of digital audio interface data structures *Application note*, Cirrus Logic, 1998.
- [2] PCM1792 *Datasheet*. Texas Instruments, 2006.
- [3] KESTER, W.: *The data conversion handbook*. Analog Devices, 2004. ISBN 0-916550-27-3.
- [4] The 2-channel serial audio interface *Application note*. Cirrus Logic, 2005.
- [5] GADDY, L.-KAWAI, H.: *Dynamic performance testing of digital audio D/A converters*. Burr-Brown, 1997.



## Seznam obrázků

Obr. 1 - Blokové schéma zapojení D/A převodníku	10
Obr. 2 - Vstupní obvody převodníku - a) Vstup RCA b) Vstup TOSLINK	10
Obr. 3 – Vnitřní blokové schéma převodníku	13
Obr. 4 – Formát sub-rámce. Obr. převzat z [1]	13
Obr. 5 - Struktura bloku dat. Obr. převzat z [1]	13
Obr. 6 - Dvoufázová modulace. Obr. převzat z [1]	14
Obr. 7 - Rozhraní SAI	14
Obr. 8 - Formát Left-justified. Obr. převzat z [2]	15
Obr. 9 - Formát Right-justified. Obr. převzat z [2]	15
Obr. 10 - Formát I2S. Obr. převzat z [2]	16
Obr. 11 - Schéma zapojení převodníku PCM1792	18
Obr. 12 - Zapojení výstupního filtru PCM1792	19
Obr. 13 - Schéma zapojení převodníku WM8740	21
Obr. 14 – Zapojení výstupního filtru WM8740	22
Obr. 15 - Schéma zapojení převodníku CS4398	23
Obr. 16 – Zapojení výstupního filtru CS4398	24
Obr. 17 - Schéma zapojení převodníku PCM5100	25
Obr. 18 - Schéma zapojení převodníku WM8521	26
Obr. 19 - Schéma zapojení převodníku CS4352	28
Obr. 20 - Blokové schéma měřicího řetězce	32
Obr. 21 - Frekvenční charakteristika převodníků	37
Obr. 22 - Linearita převodníků	38
Obr. 23 - Detail linearity převodníků	38

**Seznam tabulek**

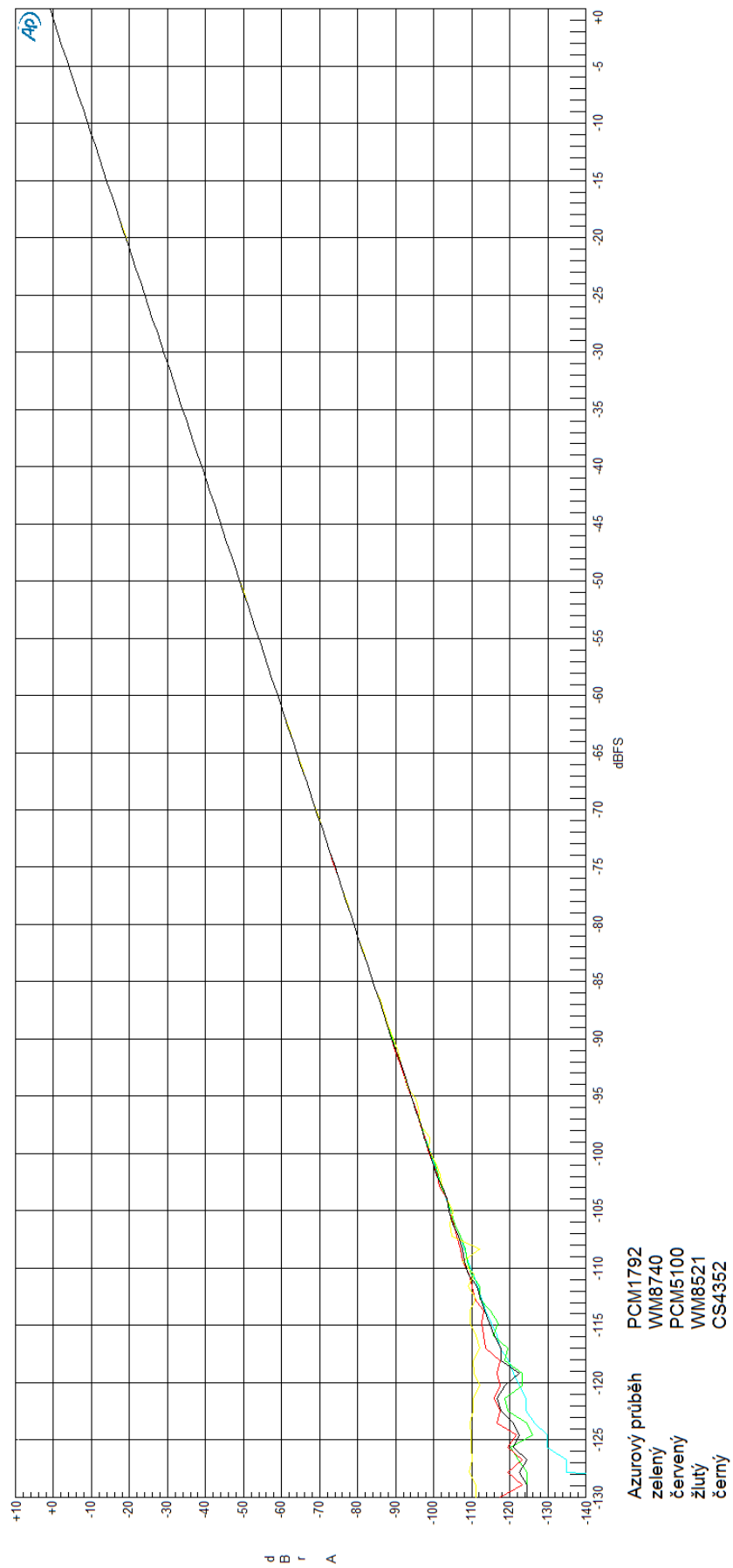
<b>Tabulka 1 - Parametry PCM1792:</b>	<b>17</b>
<b>Tabulka 2 - Parametry WM8740:</b>	<b>20</b>
<b>Tabulka 3 - Parametry CS4398:</b>	<b>22</b>
<b>Tabulka 4 - Parametry PCM5100:</b>	<b>25</b>
<b>Tabulka 5 - Parametry WM8521:</b>	<b>27</b>
<b>Tabulka 6 - Parametry CS4352:</b>	<b>27</b>
<b>Tabulka 7 - Výsledky PCM1792:</b>	<b>34</b>
<b>Tabulka 8 - Výsledky WM8740:</b>	<b>35</b>
<b>Tabulka 9 - Výsledky PCM5100:</b>	<b>36</b>
<b>Tabulka 10 - Výsledky WM8521:</b>	<b>36</b>
<b>Tabulka 11 - Výsledky CS4352:</b>	<b>37</b>

## **Příloha**

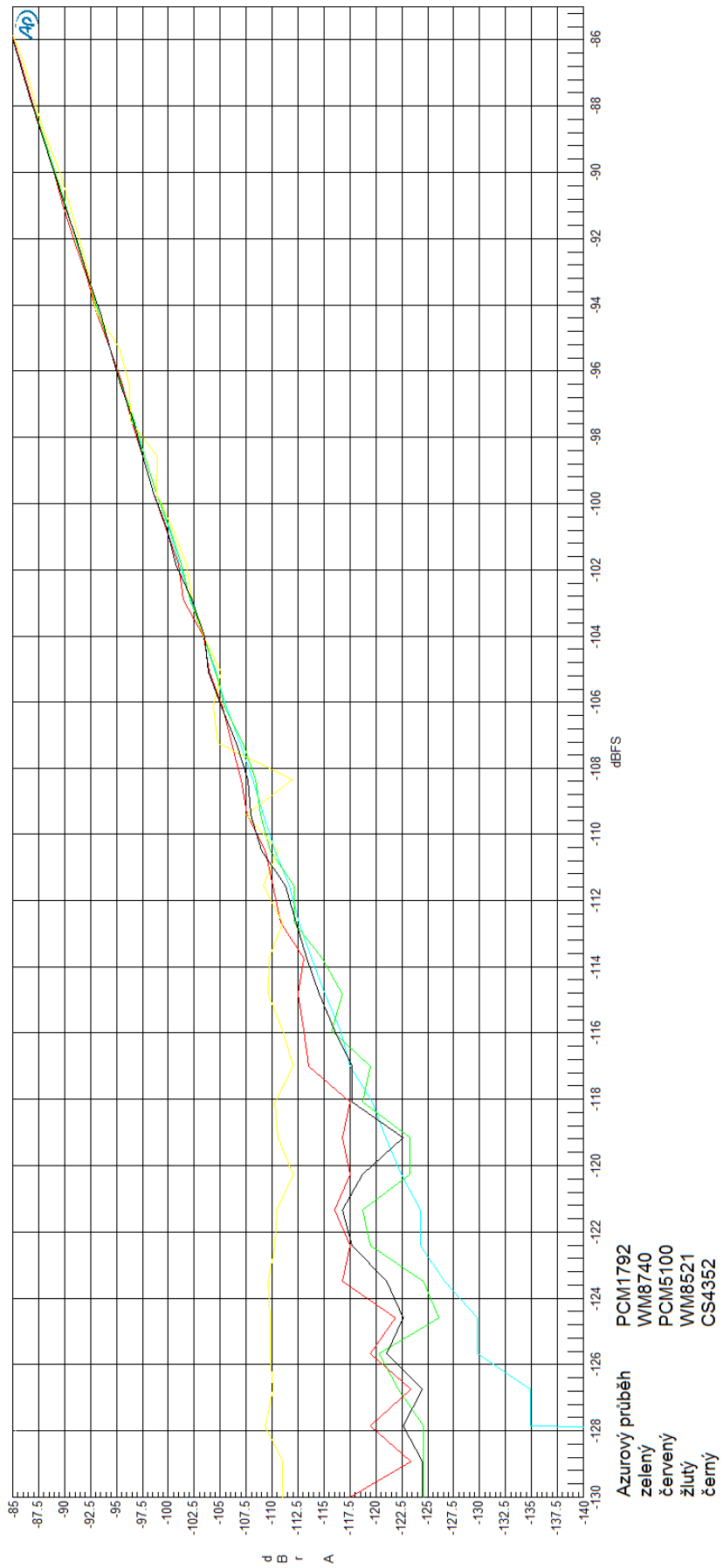
### **Naměřené průběhy jednotlivých obvodů:**

Příloha obsahuje naměřené průběhy jednotlivých obvodů. Popis čar v grafu je uveden pod grafem.

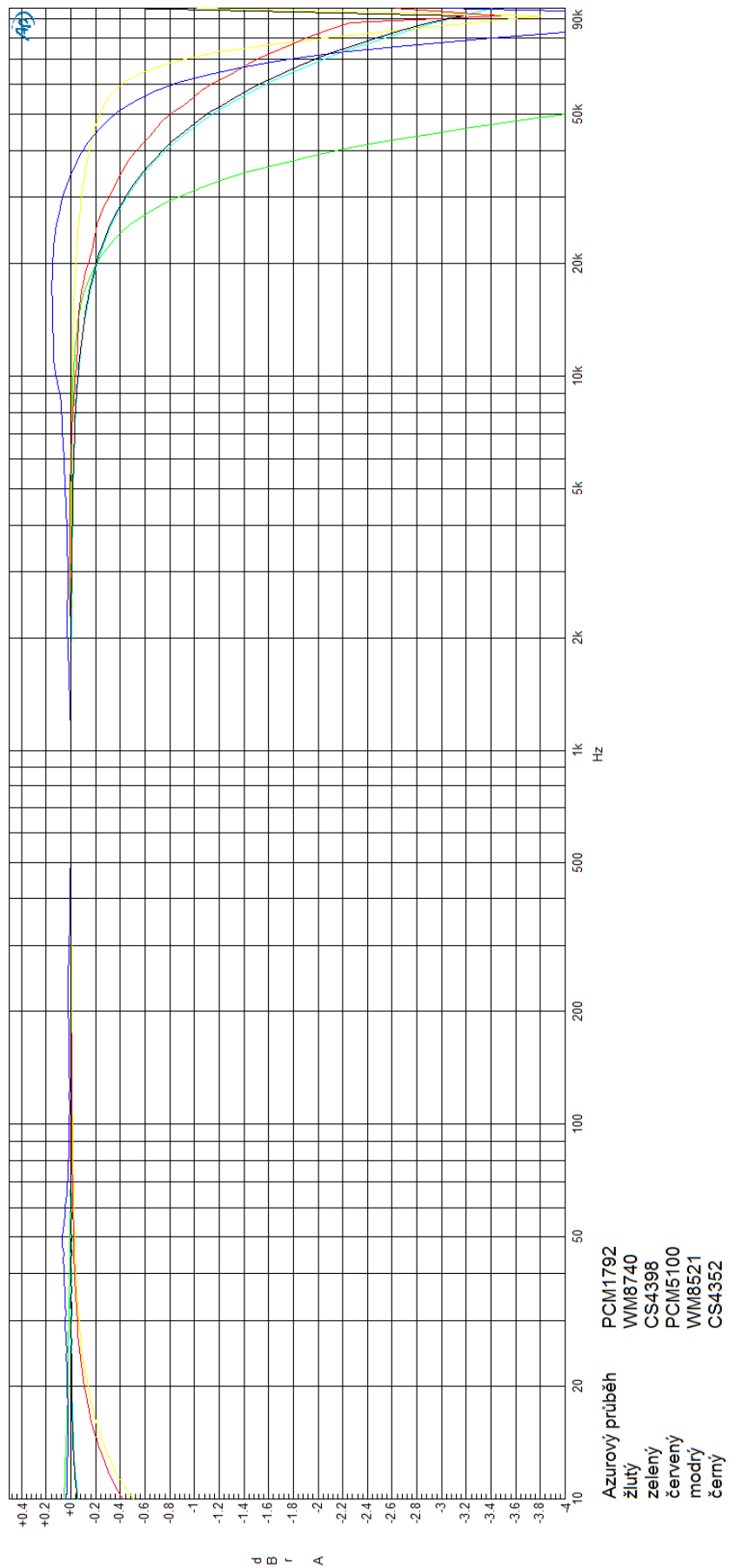
Linearita převodníků:



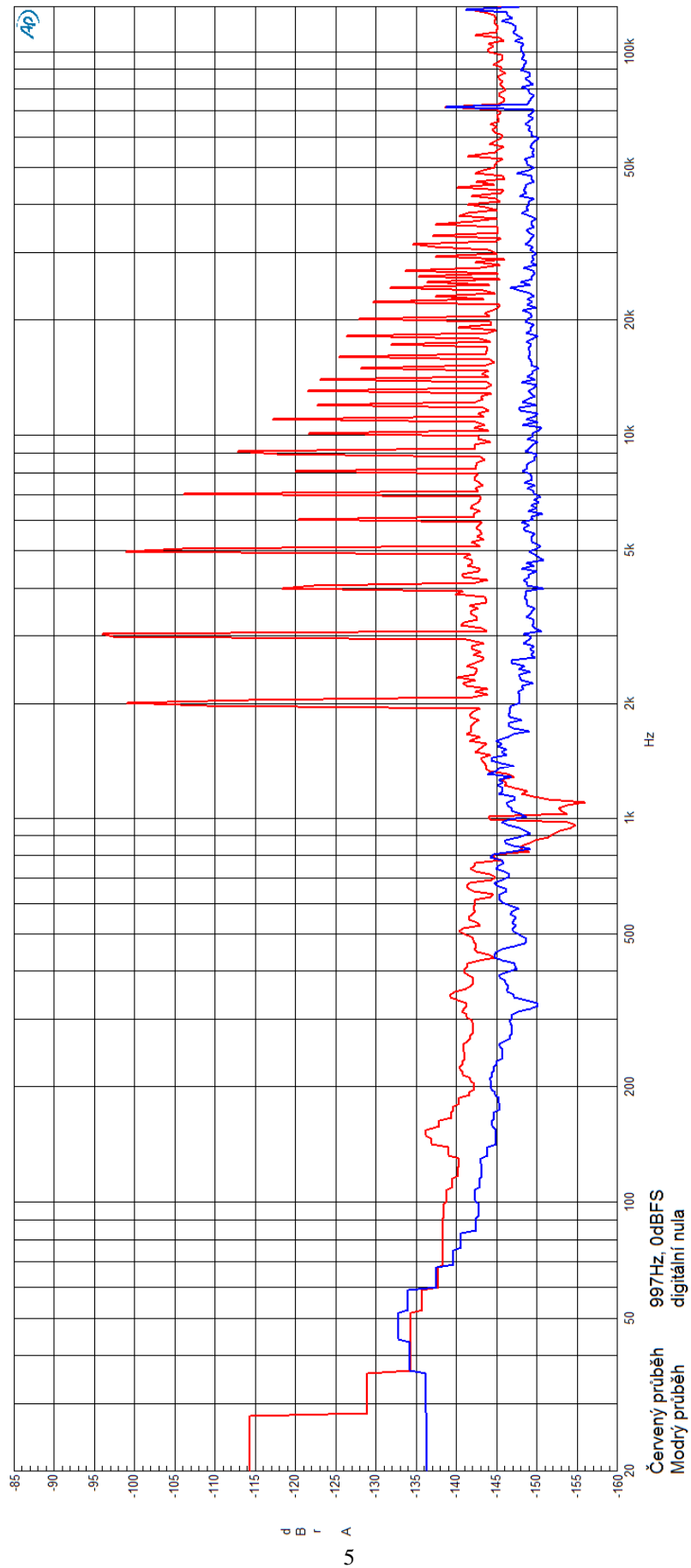
Detail linearity:



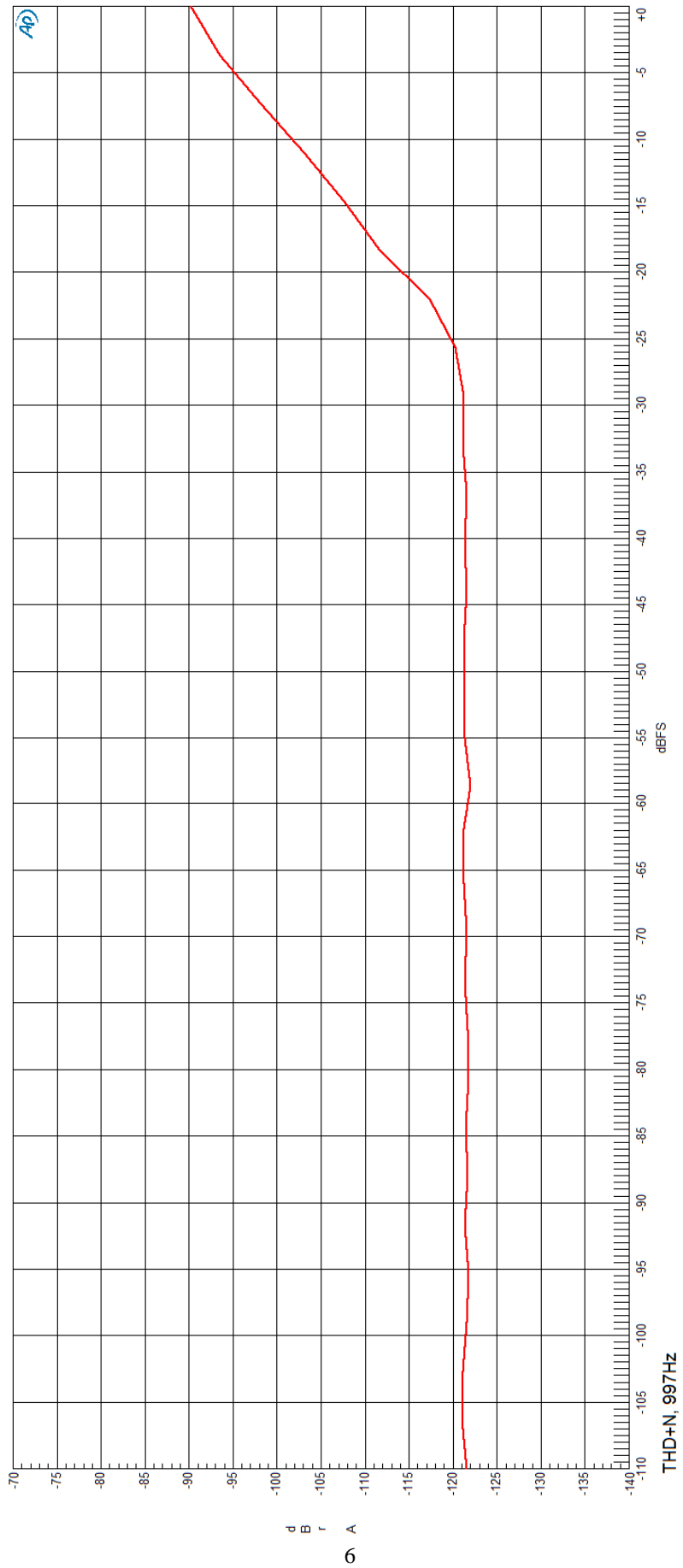
Frekvenční charakteristika:



PCM1792, FFT:

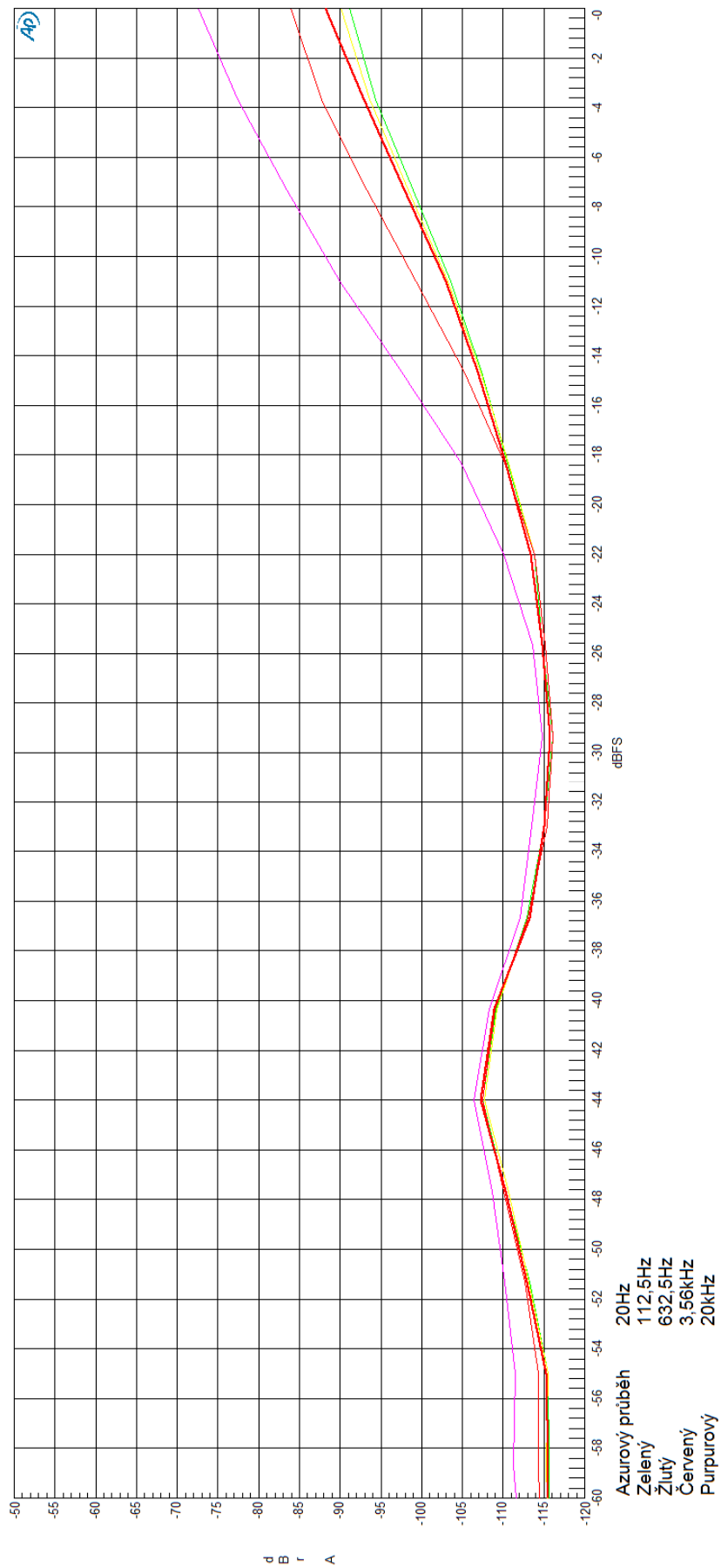


PCM1792, THD+N:

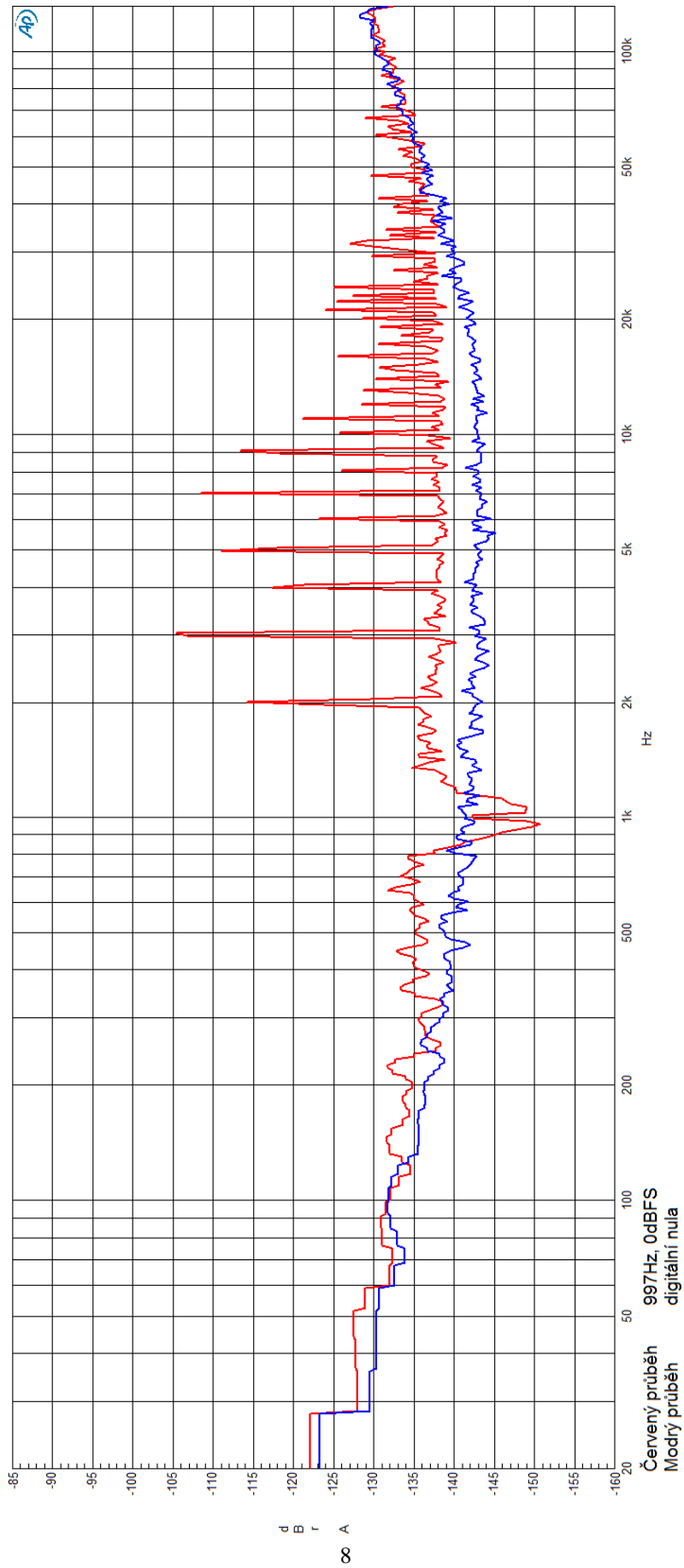




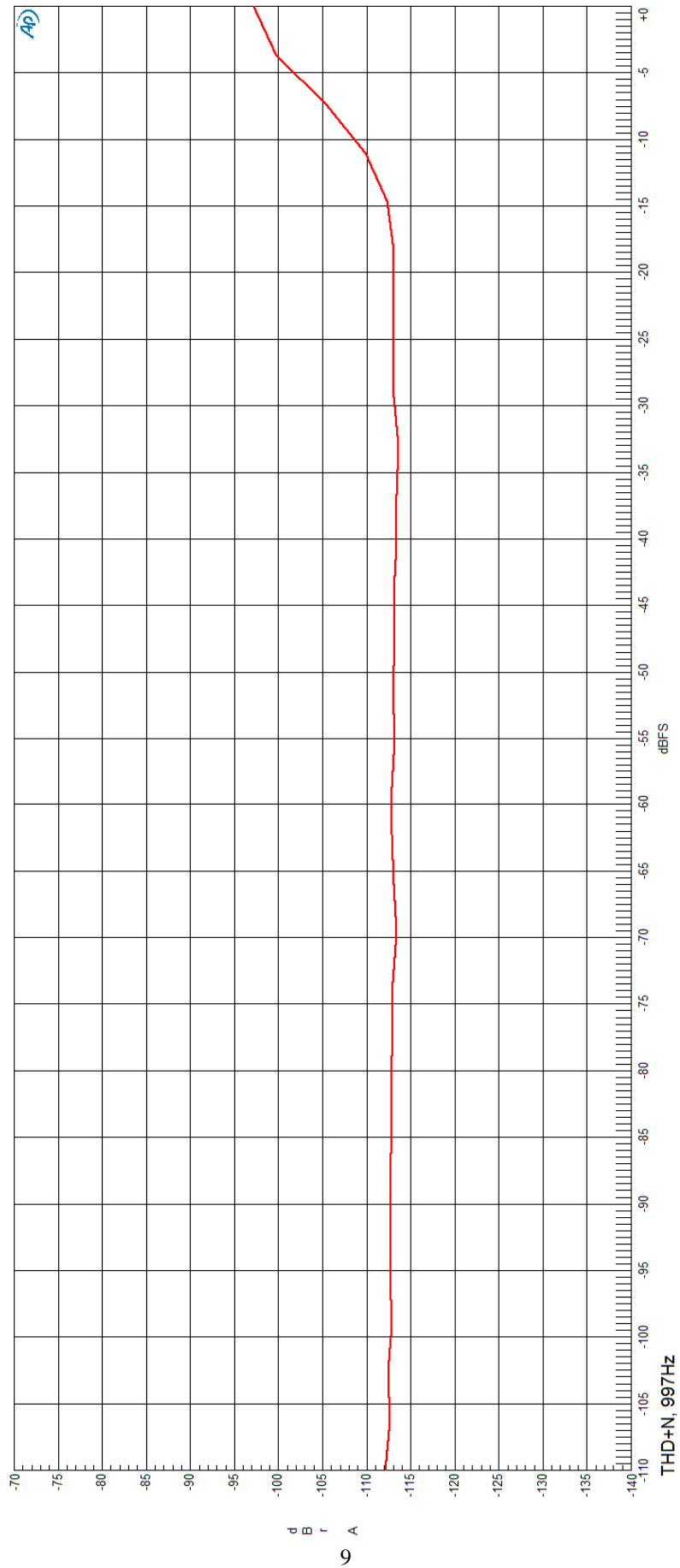
PCM1792, THD+N+f:



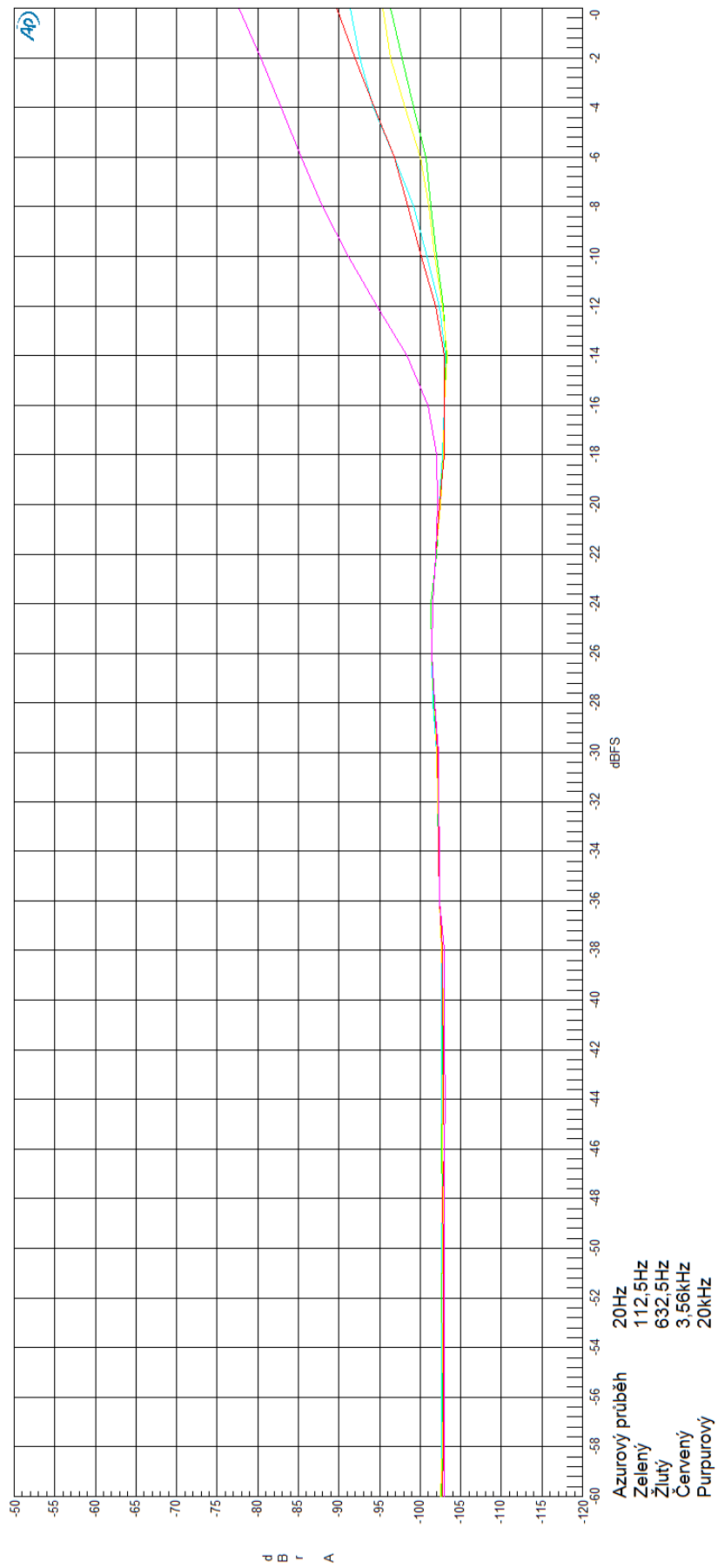
WM8740, FFT:



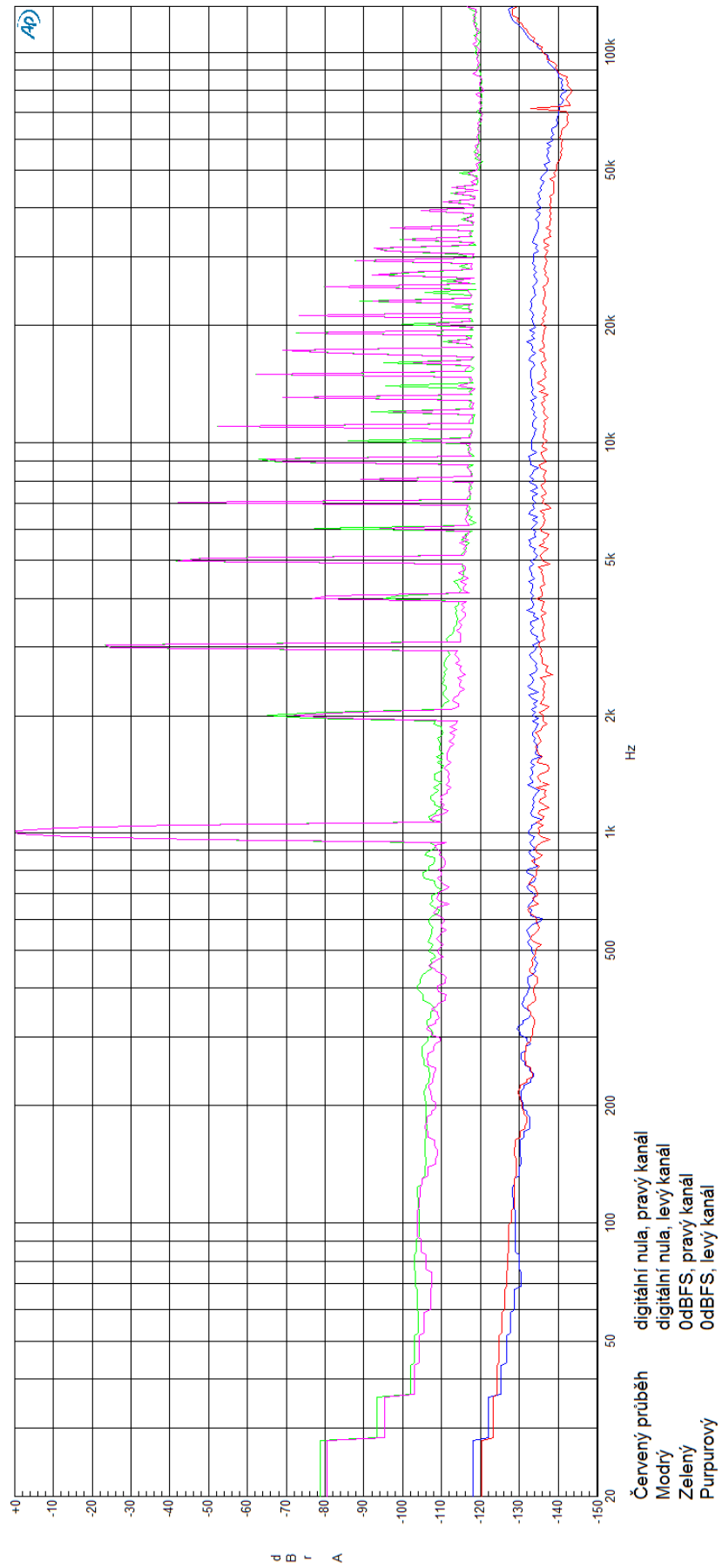
WM8740, THD+N:



WM8740, THD+N+f:

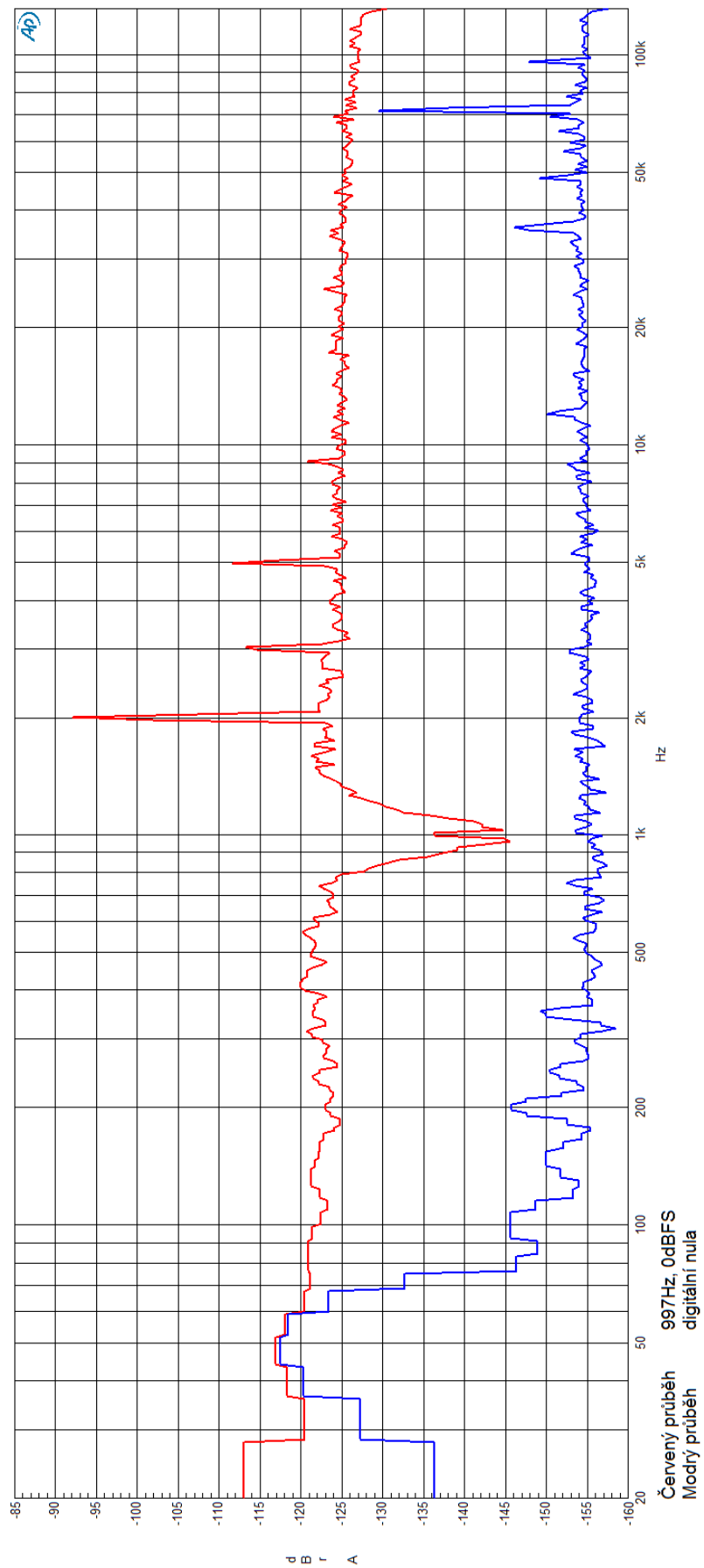


CS4398, FFT:

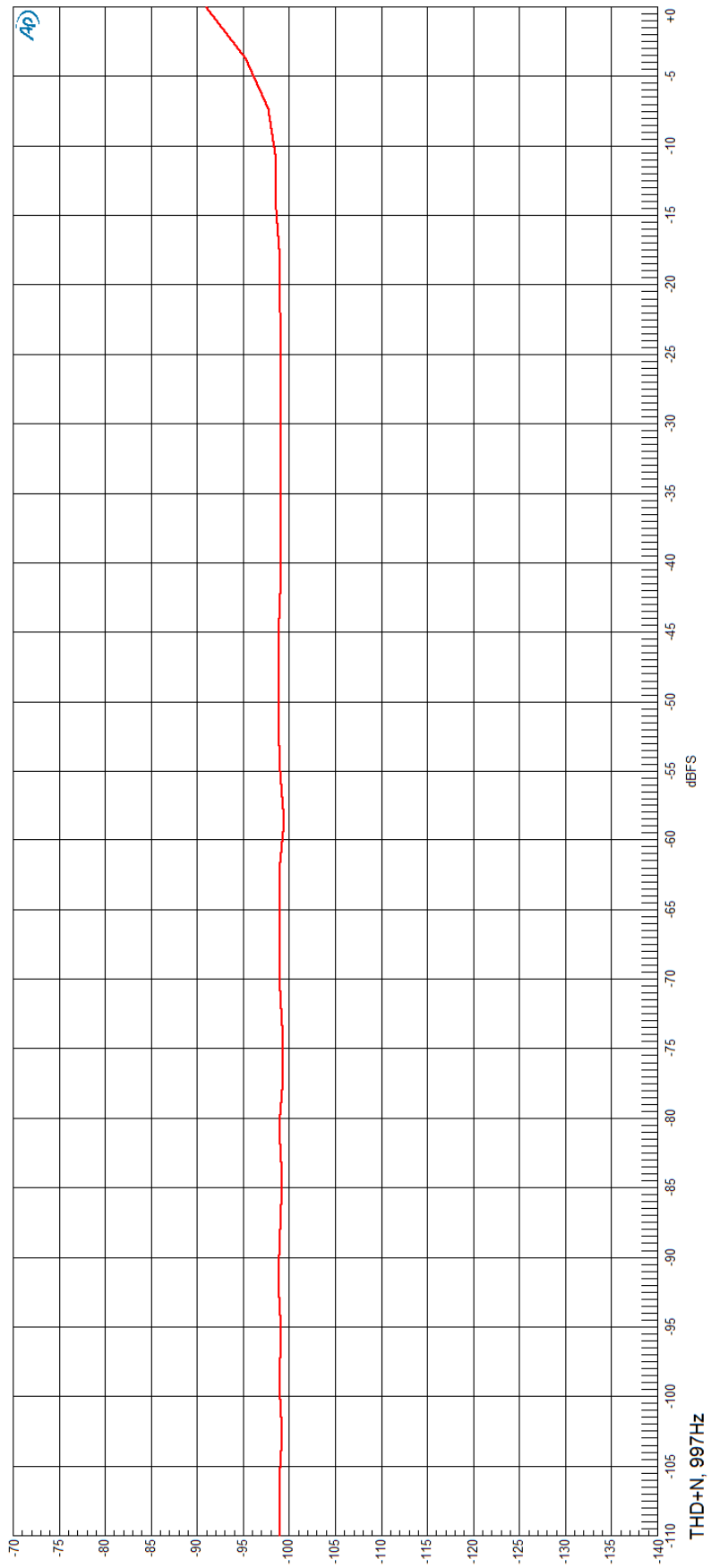


d  
B  
r  
A

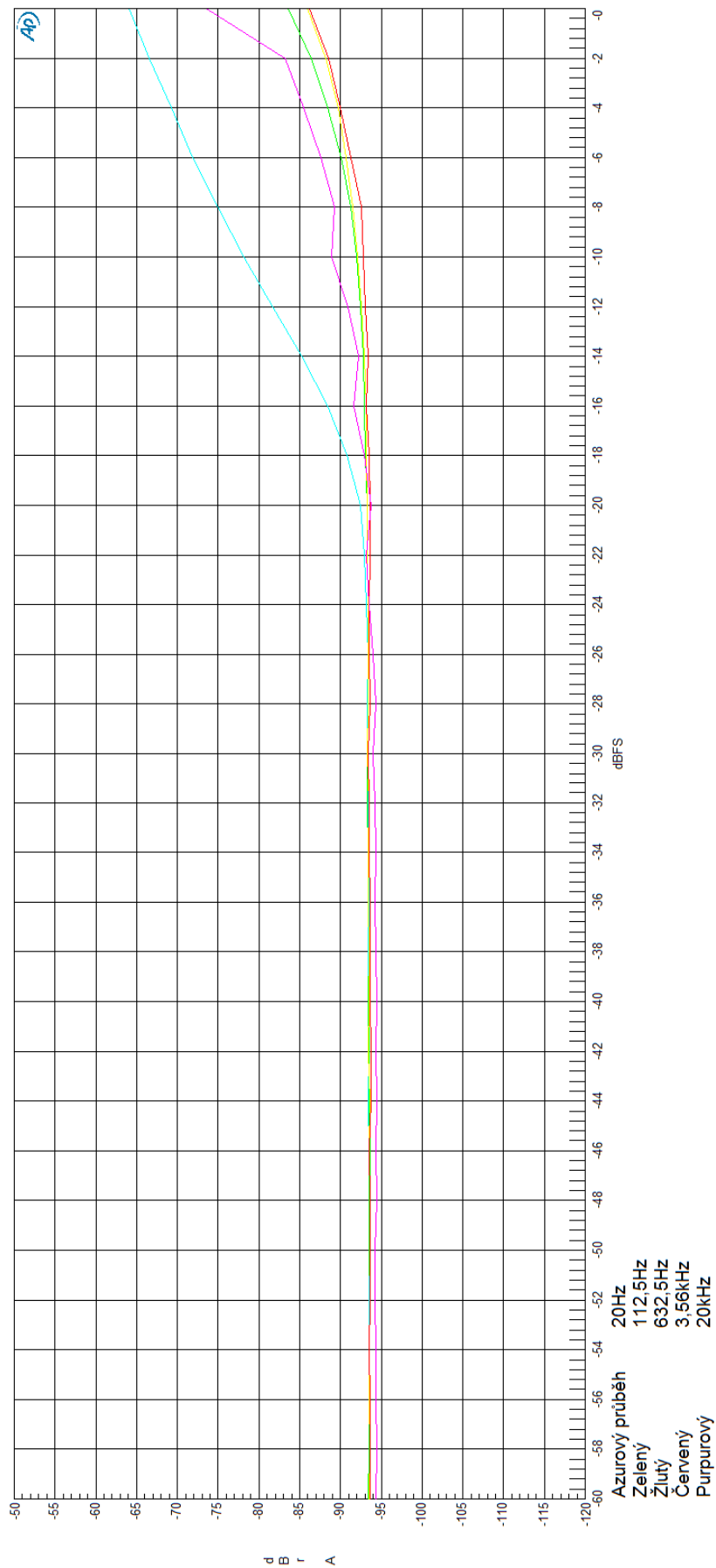
PCM5100, FFT:



PCM5100, THD+N:

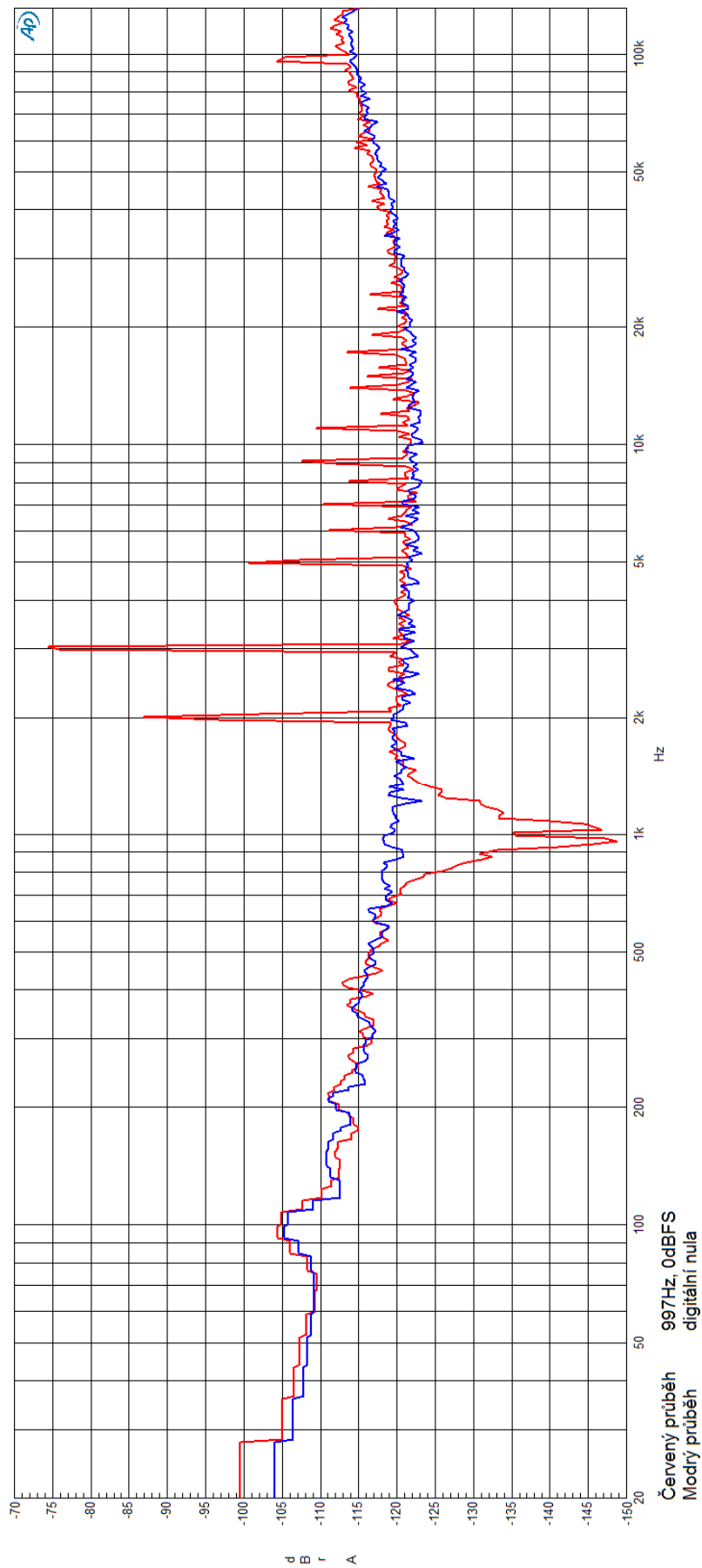


PCM5100, THD+N+f:

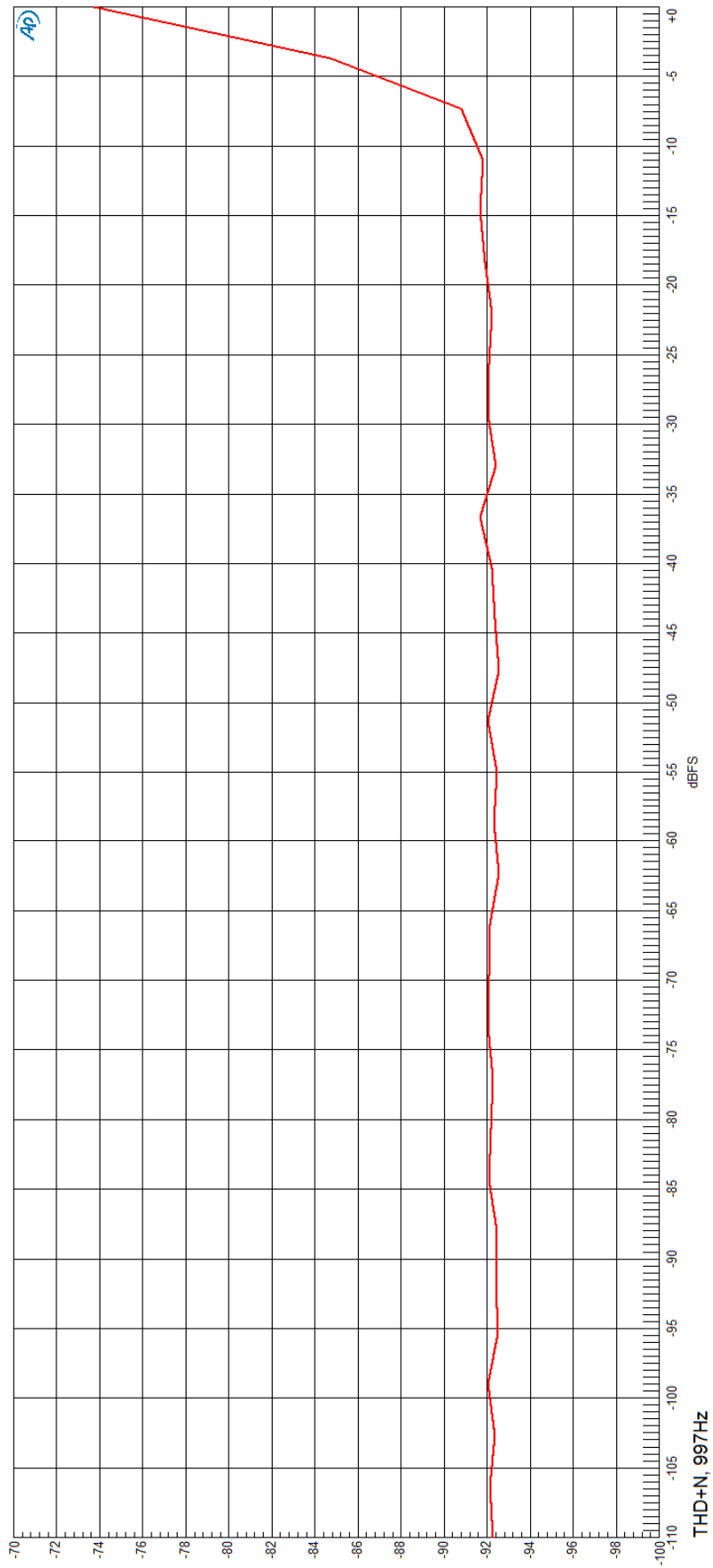




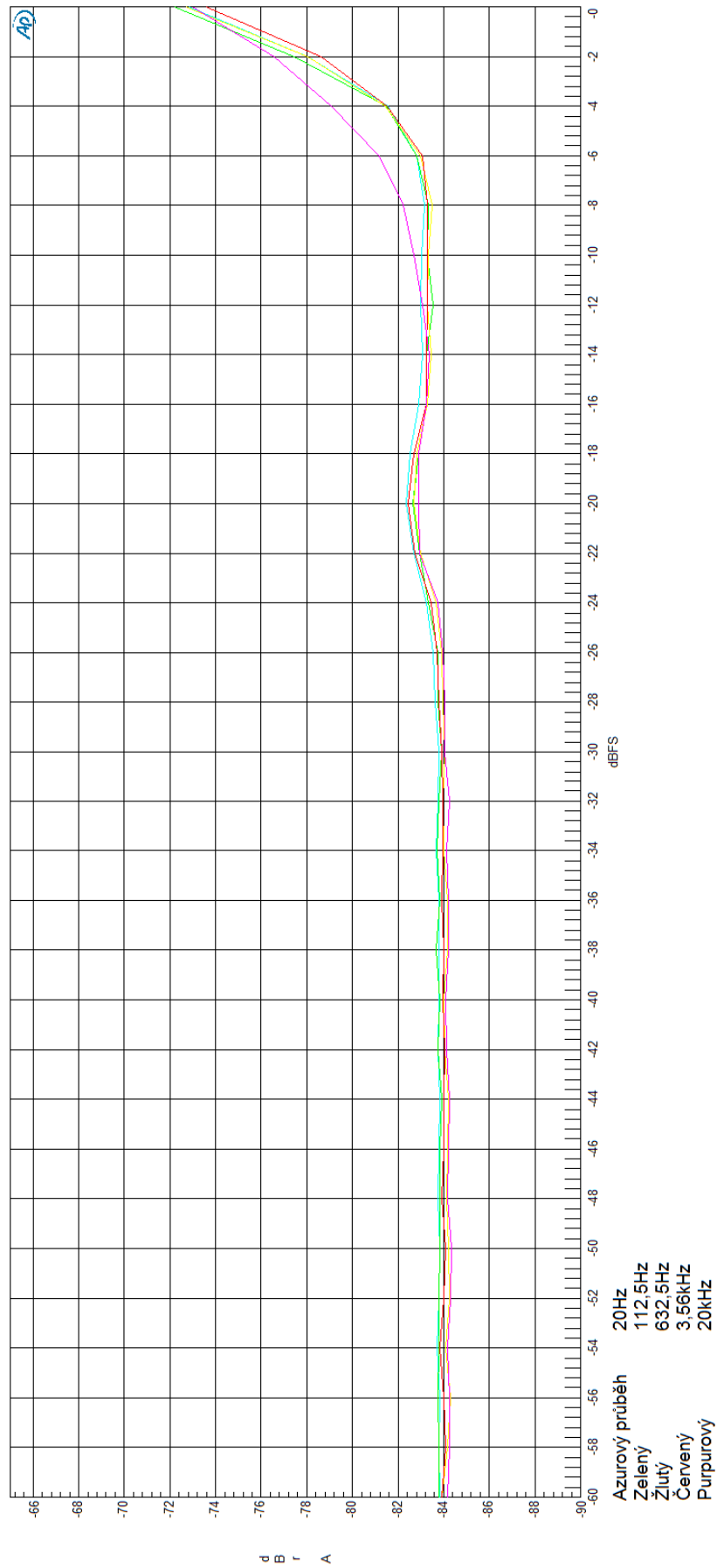
WM8521, FFT:



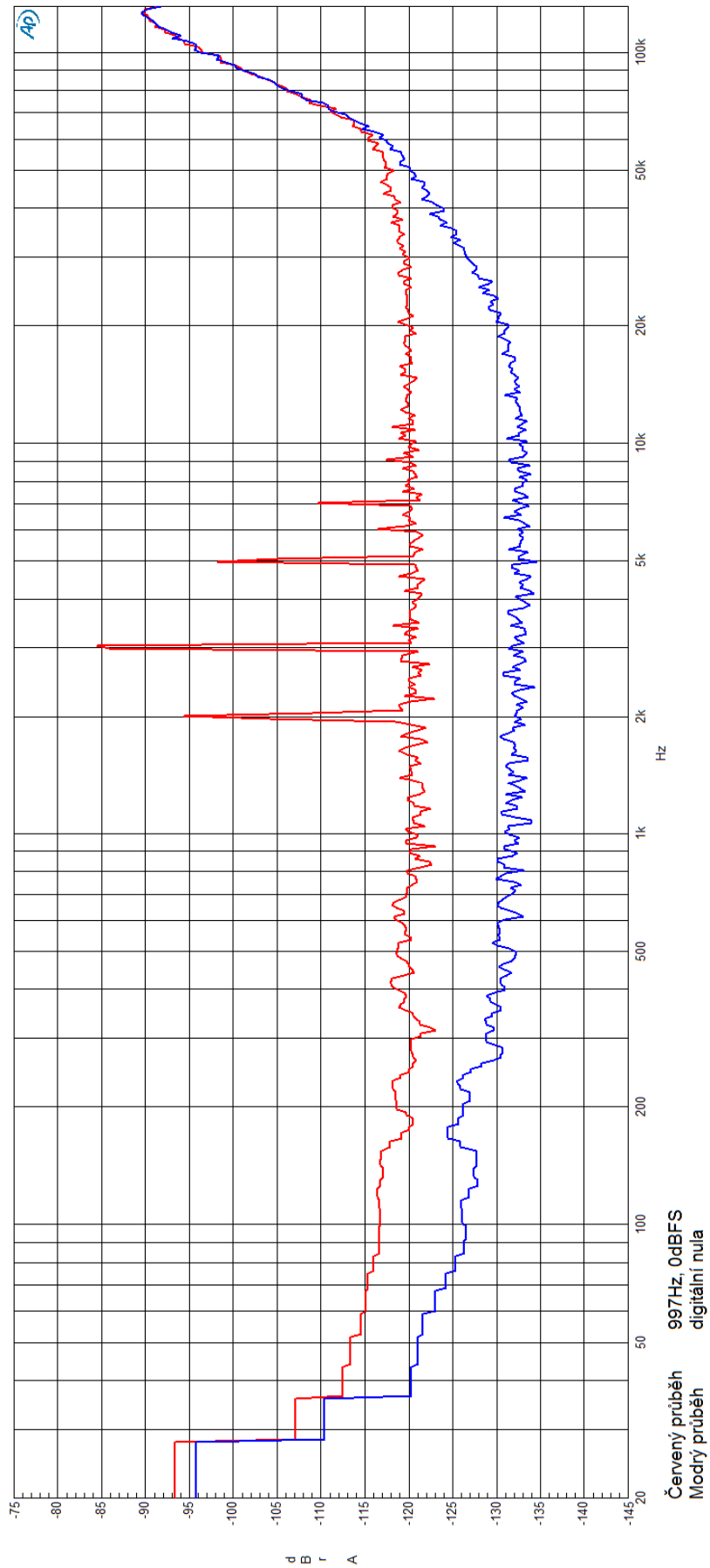
WM8521, THD+N:



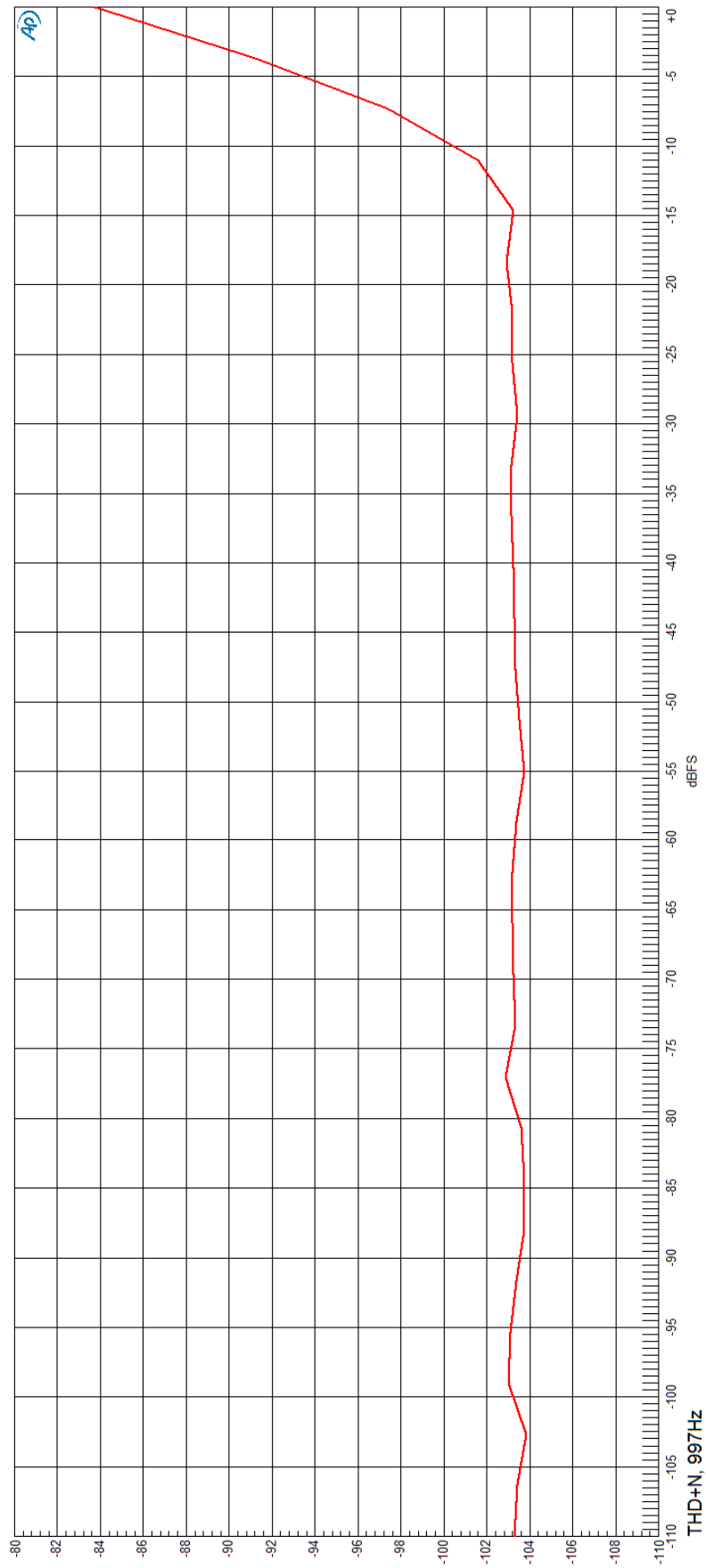
WM8521, THD+N+f:



CS4352, FFT:



CS4352, THD+N:



CS4352, THD+N+f:

