

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích

Přírodovědecká fakulta

**Metodická příručka pro práci
s audio analyzátořem Audio Precision**

Bakalářská práce

Marek Dolejší

školitel: Ing. Ladislav Ptáček, Ph.D.

České Budějovice 2018

Bibliografické údaje

Dolejší M., 2018: Metodická příručka pro práci s audio analyzátořem Audio Precision.

[Methodological guide for working with Audio Precision Audio Analyzer. Bc. Thesis, in Czech.] – 91 p., Faculty of Science, The University of South Bohemia, České Budějovice, Czech Republic.

Anotace

Tato práce se zabývá využitím audio analyzátořu od firmy Audio Precision, řady APx515. Cílem práce je poučit operátora měřicího zařízení, analyzátořu Audio Precision, o jeho funkcích a užití. Podpůrné kapitoly vytvářejí prostor k hlubšímu pochopení souvislostí v oblasti audia. Tato práce vznikla na žádost laboratoře elektroniky a akustiky, Ústavu fyziky a biofyziky Jihočeské univerzity v Č. Budějovicích, a bude sloužit jako metodická příručka pro práci s tímto audio analyzátořem.

V teoretické části se věnuji popisu jednotlivých typů měření a audio testů. Je zde přihlédnuto k hlavním veličinám užívaných v audio inženýřství včetně jejich vysvětlení. Následuje kapitola Akustika, která uvádí obecné pojmy o zvuku z fyzikálního i psychoakustického pohledu, a věnuje se též lidskému sluchu. Část věnovaná HiFi se pak věnuje souvislostem z oblasti kvalitní produkce hudby.

V praktické části práce se zabývám využitím audio analyzátořu v praxi. Teoreticky jsou zde popsána zapojení pro různé typy měření. Následují výsledky vlastních měření na vybraných zařizenech těchto typů: předzesilovače, koncové zesilovače, integrované zesilovače, sluchátkové zesilovače, zvukové karty a DAC audio převodníky ve spotřební technice.

Klíčová slova: zvuk, měření, Audio Precision, audio testy, akustika, HiFi

Annotation

This thesis is focused on the use of the Audio Precision audio analyzer, model APx515. The goal of this thesis is to educate the operator of the measuring instrument about its functions and features. Supporting chapters cover deeper understanding in the field of audio. This thesis was written on the request of the Department of Physics and Biophysics, the University of South Bohemia and shall be used as a methodological guide for working with this audio analyzer.

The first part of this document will discuss the theory of audio analysis, and in the second section I will cover the practical usage of the instrument. In the theoretical part, there are various kinds of measurements and audio tests described. Special attention is devoted to commonly used units in audio engineering including their explanation. The next chapter, Acoustic, describes basic terms about sound from a physical and psychoacoustic point of view and also focuses on human hearing. The Chapter about Hi-Fi then describes issues relating to quality music reproduction.

The practical part focuses on the use of the analyzer. Several kinds of connections for different tests are described. They are followed by measurement results of a sample of devices of different kinds: preamplifiers, power amplifiers, integrated amplifiers and DACs in consumer electronics.

Key words: sound, measurement, Audio Precision, audio tests, acoustic, HiFi

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

V Českých Budějovicích dne 17.4.2018

.....

Marek Dolejší

Poděkování

Zde bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Ladislavu Ptáčkovi, Ph.D. za odborné vedení a zapůjčení audio analyzátoru. Dále děkuji rodině a blízkým za podporu při psaní práce a za zapůjčení přístrojů k měření.

OBSAH

1	ÚVOD	1
2	AUDIO TESTY A MĚŘENÍ (AUDIO TESTS AND MEASUREMENTS)	3
2.1	Měření úrovně (Level Measurements)	3
2.1.1	Efektivní hodnota - RMS (Root-Mean-Square Technique).....	3
2.1.2	Měření pomocí průměrování (Average-Response Measurements)	4
2.1.3	Měření maximální hodnoty – (Peak-Response Measurements)	5
2.1.4	Typy měřidel	8
2.1.5	Měření pomocí decibelů [dB]	9
2.1.6	Přeslech a měření separace (Crosstalk and Separation Measurements)	12
2.1.7	Měření šumu (Noise Measurement).....	13
2.1.8	CCIR Noise Measurement	15
2.1.9	Další měření šumu	15
2.1.10	Analýza šumu	15
2.2	Měření fáze (Phase Measurement).....	17
2.3	Měření frekvence (Frequency Measurement)	19
2.3.1	Charakteristika frekvence (Frequency Characteristics).....	19
2.3.2	Měření frekvence	20
2.3.3	Spektrální analýza (Spectrum Analysis).....	21
2.4	Rychlá Fourierova transformace (FFT).....	24
2.5	Nelineární zkreslení (Nonlinear Distortion).....	27
2.5.1	Harmonické a celkové zkreslení (Harmonic Distortion and THD)	27
2.5.2	Celkové harmonické zkreslení a šum (THD+N).	29
2.5.3	Intermodulační zkreslení (IMD, SMPTE IM, SMPTE DIN)	32
2.5.4	Intermodulační zkreslení CCIF (CCIF IMD, CCIT IMD, ITU-R).....	34
2.5.5	Intermodulační zkreslení DIM/TIM (Dynamic, Transient IM)	34
2.5.6	Sčítání a odčítání zkreslení	36
2.6	Propojení měřicího přístroje a DUT	37
2.6.1	Symetrické a nesymetrické připojení (Balanced & Unbalanced Interface)..	37
2.6.2	Potlačení souhlasného signálu (CMRR).....	37
3	AKUSTIKA	39
3.1	Akustika	39

3.2	Hudební akustika.....	39
3.3	Zvuk	39
3.4	Tón	40
3.5	Sluchový orgán.....	40
3.5.1	Zevní ucho	40
3.5.2	Střední ucho	40
3.5.3	Vnitřní ucho	41
3.6	Vnímání zvuku	42
3.6.1	Závislosti.....	42
3.6.2	Maskování.....	43
3.6.3	Výška	44
3.6.4	Ostrost.....	45
3.6.5	Kolísavost a hrubost.....	45
3.7	Kvalita zvuku	46
4	HiFi – HIGH FIDELITY – vysoká věrnost, vysoká kvalita.....	48
4.1	Frekvenční charakteristika	49
4.1.1	Spodní hranice frekvenční charakteristiky.....	49
4.1.2	Horní hranice frekvenční charakteristiky.....	50
4.1.3	Povolené odchylky.....	51
4.1.4	Frekvence a výkon	51
4.2	Výkon.....	51
5	PRÁCE S APLIKACÍ AUDIO PRECISION APx500	53
5.1	Režim aplikace	53
5.2	Základní popis ovládacích prvků a nastavení	54
6	PRAKTICKÉ UKÁZKY MĚŘENÍ S APx515.....	65
6.1	Potřebné pomůcky.....	65
6.2	Popis audio analyzátoru Audio Precision APx515	65
6.2.1	Konektory	65
6.2.2	Klíčové parametry.....	66
6.3	Měření předzesilovače.....	67
6.3.1	Zapojení	67
6.3.2	Nastavení a výběr testů	68
6.3.3	Měření loudness křivky	70
6.1	Měření výkonového (koncového) a integrovaného zesilovače.....	71

6.2	Měření sluchátkového zesilovače.....	75
6.3	Měření DAC.....	75
6.4	Měření ADC.....	77
7	VÝSLEDKY MĚŘENÍ S APX515	79
7.1	Měření zesilovačů	79
7.1.1	Souhrnná tabulka č. 10 - parametry zesilovačů	81
7.1.2	Měření závislosti THD+N na výkonu – obr. č. 70.....	82
7.1.3	Srovnání zesilovačů podle THD+N – obr. č. 71	83
7.1.4	Srovnání zesilovačů podle THD – obr. č. 72.....	84
7.1.5	Měření loudness křivek – obr. č. 73.....	85
7.2	Měření zařízení s DAC.....	87
7.2.1	Srovnání zařízení s DAC podle THD+N – obr. č. 74	87
8	ZÁVĚR	90
9	LITERATURA	91

1 ÚVOD

Už od nepaměti jsme obklopeni zvukem a hudbou. S rozvojem techniky v minulém století, je možné hudbu zaznamenat a reprodukovat s pomocí přístrojů od Edisonova fonografu, přes gramofon, magnetofon a CD přehrávač až po mobilní telefon. Od původního analogového přešla technika na převážně digitální způsob záznamu. Se vzrůstajícími možnostmi elektroniky, zejména co se týče rostoucího výkonu a zlepšování miniaturizace, se zlepšují možnosti produkce a záznamu zvuku. To zahrnuje všechny oblasti jako telefonie, hudební, filmový, automobilový průmysl a další.

Tato práce popisuje měřicí techniky v oblasti audia a jejich praktické provádění s využitím analyzátoru Audio Precision. Aby bylo možné od sebe zařízení využívaná v audiotechnice kvalitativně rozlišit, byly postupem času zavedeny četné audio testy, které podávají různé výsledky. Zmíněný analyzátor patří do skupiny přístrojů, které tyto testy umožní provádět a v současné době patří ke světové špičce, a je brán jako etalon mezi podobnými analyzátory.

Protože považujeme za důležité seznámit čtenáře se základními pojmy a měřenými parametry v akustice, věnujeme se jim v prvních kapitolách, Dále popisujeme základní pojmy související se zvukem v kapitole 3. Akustika. A protože pro kvalitní produkci v domácím prostředí se vžilo označení HiFi, diskutujeme tuto oblast v kapitole 4. Příklady a praktické ukázky těchto testů najdeme ve druhé části této práce. Na jejich základě je možno si vybrat dostatečně kvalitní přístroj pro dané využití.

V kapitole 5 je popsána základní práce s počítačovou aplikací APx500, která ovládá analyzátory Audio Precision řady 500. V následující kapitole jsou popsána základní zapojení v praxi.

V praktické části, kapitole 7, je zmapována oblast zesilovačů, často označovaná HiFi. Zahrnuje různé výrobky od roku 1978 až do roku 2014, které jsou proměřeny základními audio testy. Jsou změřeny loudness křivky a porovnány v grafu. Dále jsou otestována zařízení s DAC. Tato kategorie obsahuje z největší částí mobilní telefony a další zařízení užívaná v domácím prostředí.

Autor bude rád, pokud práce přispěje k lepšímu pochopení parametrů užívaných v akustických měření, při práci s analyzátozem a pro lepší orientaci v oblasti záznamu a reprodukce zvuku jako takové.

2 AUDIO TESTY A MĚŘENÍ (AUDIO TESTS AND MEASUREMENTS)

V této kapitole jsou popsány základní měřicí techniky, testy a postupy, s důrazem na jasné vysvětlení souvislostí. Tato část čerpá ze dvou knih: [1] a [2], viz seznam literatury.

První kniha [1] je velice rozsáhlá a zahrnuje velké množství informací. Na knize se podílel celý soubor autorů. V této práci převážně čerpám z předposlední kapitoly – Audio Tests and Measurements – jejímž autorem je Dr. Richard C. Cabot, který byl tehdejším vedoucím inženýrem v Audio Precision Inc. a patří k zakladatelům této společnosti.

Druhá kniha [2] obsahuje podobné množství informací. V některých případech je doprovázena kvalitnějšími a výstižnějšími obrázky/grafy.

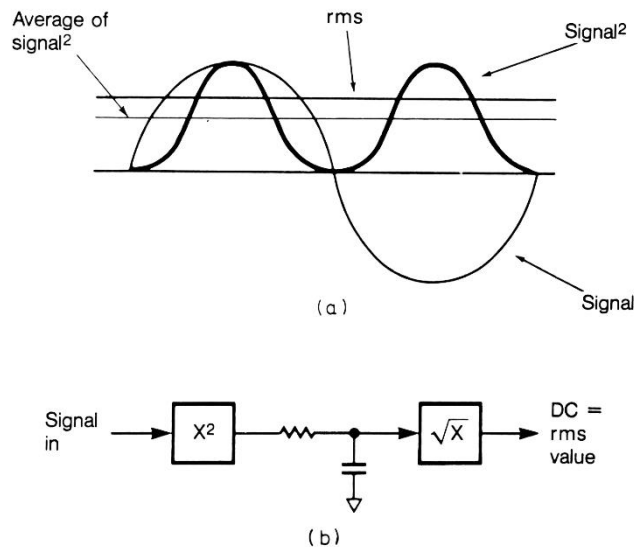
Obě knihy doporučuji všem zájemcům o hlubší získání znalostí v oblasti audio inženýrství. Bohužel na českém trhu nemají srovnatelnou, česky psanou náhradu. Čtenář omezený na česky psané prameny je odkázán na internetová fóra anebo stránky věnované audiotechnice, ale jejich slabinou bývá roztržité informace a obtížnější hledání vzájemných souvislostí.

2.1 Měření úrovně (Level Measurements)

2.1.1 Efektivní hodnota - RMS (Root-Mean-Square Technique)

Měření typu RMS měří efektivní hodnotu AC signálu. Vyjadřuje hodnotu, která je ekvivalentní DC napětí, které by předalo stejný výkon na rezistoru. Matematický postup ukazuje rovnice č. 1 níže a graficky vysvětluje obrázek č. 1.

$$RMS = \sqrt{\int signal^2} \quad (1)$$



Obrázek č. 1: a) grafické znázornění získání efektivní hodnoty
 b) principiální zapojení pro měření efektivní hodnoty [1]

Pro sinusový signál lze efektivní hodnotu vypočítat z amplitudy signálu

$$RMS = 0,707 * signal_{amplitude} \quad (2)$$

Předpokládejme, že signál se neskládá pouze z jednoho sin signálu, nýbrž v sobě nese další harmonické komponenty. Pokud změříme samostatně RMS amplitudu od každého harmonického komponentu a sečteme je, dostaneme hodnotu, která je rovna měření celkového signálu dohromady. Protože není možné RMS hodnoty sčítat přímo, je nutné provést součet podle RMS sčítání.

Efektivních hodnoty napětí se sčítají podle vzoru:

$$V_{rms\ total} = \sqrt{V_{rms\ 1}^2 + V_{rms\ 2}^2 \dots + V_{rms\ n}^2} \quad (3)$$

Výsledná hodnota sečtených signálů závisí pouze na efektivních hodnotách napětí, nikoliv na fázi ani na harmonických složkách signálů.

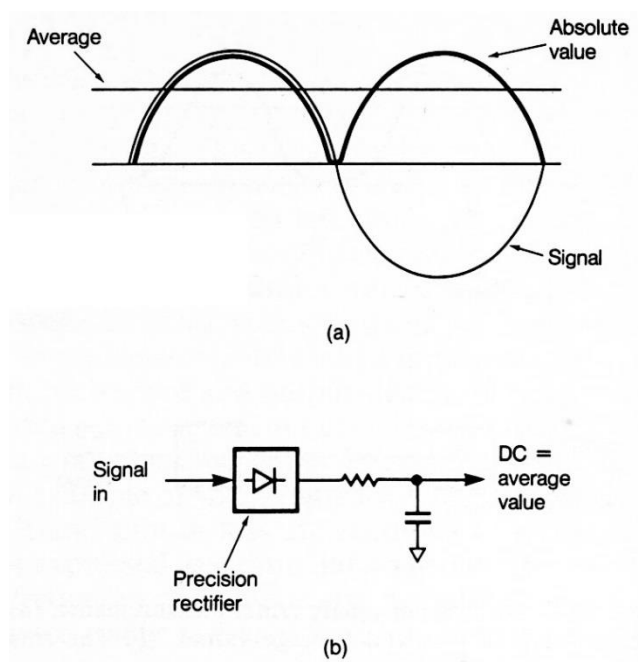
2.1.2 Měření pomocí průměrování (Average-Response Measurements)

Tyto měřidla patří mezi nejlevnější. Měří střídavé napětí pomocí usměrňovače a filtru, který získá průměrnou hodnotu. Je získáno stejnosměrné napětí, které může být přečteno na standardním DC voltmetru. Průměrná hodnota z amplitudy sinusového signálu je 0,637.

Tyto měřidla mohou být tedy kalibrována tak, že zobrazí správně RMS hodnotu napětí, pokud měříme jeden sinusový signál. Výsledné měření je škálováno konstantou K o hodnotě $0,707/0,637$ neboli $1,11$. Měřidla tohoto typu se nazývají average-responding, RMS calibrated. Pro signály jiného typu než sinus budou jejich měření těžko předvídatelná. Pokud bude měřeno více sinusových signálů, bude měřená hodnota záviset na fázovém posunu mezi složkami a nebude už odpovídat měření RMS. Matematický výpočet ukazuje rovnice č. 4 a č. 5. Grafické znázornění pro průměrovací měření zobrazuje obrázek č. 2.

$$Avg = K|signal| \quad (4)$$

$$K = 0,637/0,707 \quad (5)$$



Obrázek č. 2: a) grafické znázornění získání průměrné hodnoty

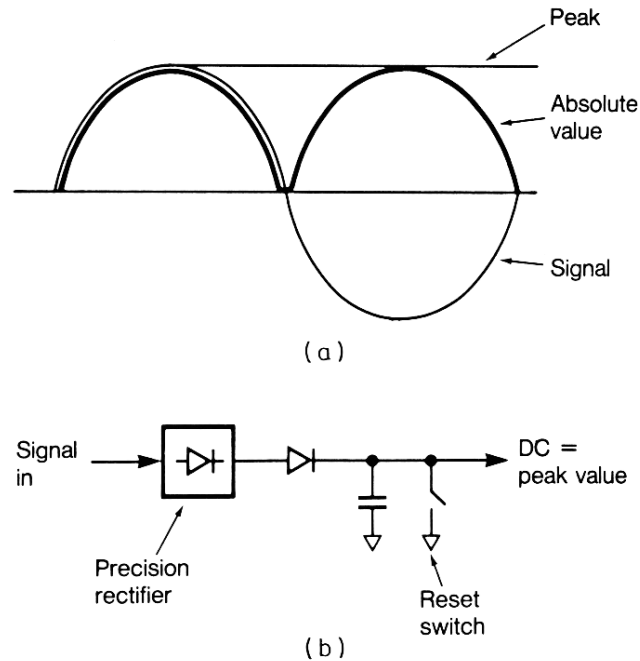
b) principiální zapojení pro měření průměrné hodnoty [1]

2.1.3 Měření maximální hodnoty – (Peak-Response Measurements)

Měření tohoto typu získává maximální hodnotu, které AC signál dosáhne během daného času. Tento signál je nejprve usměrněn pomocí diody a poté přiveden na kondenzátor. Když se absolutní hodnota napětí zvýší nad hodnotu uloženou na kondenzátoru, dioda začne vést a napětí na kondenzátoru se zvýší. Pokud se měřené napětí sníží, tak na kondenzátoru zůstává stále stejně vysoké napětí. Aby bylo možné měřit novou maximální hodnotu,

je nutné zabezpečit vybití kondenzátoru. V praxi se používá rezistor, který se připojí po přečtení hodnoty uživatelem. Princip fungování můžeme vidět na rovnici č. 6 a obrázku č. 3.

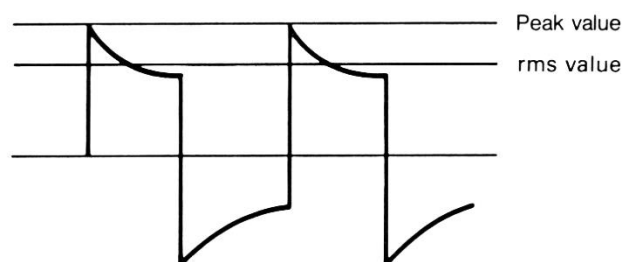
$$Peak = MAX(|signal|) \quad (6)$$



Obrázek č. 3: a) grafické znázornění získání maximální hodnoty
b) měřící obvod pro měření maximální hodnoty [1]


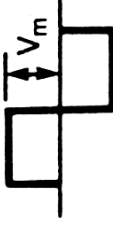


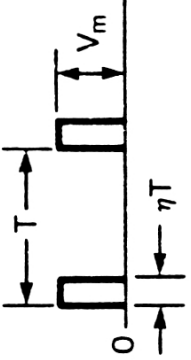
Poměr mezi maximální (peak) hodnotou a rms hodnotou se nazývá crest factor. Pro jakýkoliv signál, krom obdélníku, kde je crest factor = 1, bude crest factor větší než 1. Čím více je signál členitý, tím více roste crest factor. Matematický výpočet vyobrazuje rovnice č. 7 a grafické doplnění k této rovnici předkládá obrázek č. 4.

$$Crest\ factor = \frac{peak\ value}{rms\ value} \geq 1 \quad (7)$$



Obrázek č. 4: Grafické doplnění k výpočtu CF [1]

Porovnání typů měření pro různé signály najdeme v tabulce č. 1.

Waveform	rms	Avg.	rms avg.	Crest factor																								
	$\frac{V_m}{\sqrt{2}}$ 0.707 V_m	$\frac{2V_m}{\pi}$ 0.637 V_m	$\frac{\pi}{2\sqrt{2}}$	$\sqrt{2} = 1.414$																								
	V_m	V_m	1	1																								
	$\frac{V_m}{\sqrt{3}}$	$\frac{V_m}{2}$	$\frac{2}{\sqrt{3}} = 1.155$	$\sqrt{3} = 1.732$																								
	rms	$\frac{\sqrt{2}}{\pi}$ rms = 0.798 rms	$\sqrt{\frac{\pi}{2}}$ 1.253	<table border="1"> <tr> <th>C.F.</th> <th>q</th> </tr> <tr> <td>1</td> <td>32%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>4.6%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>0.37%</td> </tr> </table>	C.F.	q	1	32%	2	4.6%	3	0.37%																
C.F.	q																											
1	32%																											
2	4.6%																											
3	0.37%																											
 <p>$\eta = \text{"duty cycle"}$</p>	<table border="1"> <tr> <th colspan="2">Pulse train</th> </tr> <tr> <th>η</th> <th>Mark/space</th> </tr> <tr> <td>1</td> <td>∞</td> </tr> <tr> <td>0.25</td> <td>0.3333</td> </tr> <tr> <td>0.0625</td> <td>0.0667</td> </tr> <tr> <td>0.01</td> <td>0.0101</td> </tr> </table>	Pulse train		η	Mark/space	1	∞	0.25	0.3333	0.0625	0.0667	0.01	0.0101	$V_m \eta$ V_m 0.25 V_m 0.625 V_m 0.01 V_m	$\frac{1}{\sqrt{\eta}}$ 1 2 4 8 10	<table border="1"> <tr> <th colspan="2">Pulse train</th> </tr> <tr> <th>η</th> <th>Mark/space</th> </tr> <tr> <td>1</td> <td>∞</td> </tr> <tr> <td>0.25</td> <td>0.3333</td> </tr> <tr> <td>0.0625</td> <td>0.0667</td> </tr> <tr> <td>0.01</td> <td>0.0101</td> </tr> </table>	Pulse train		η	Mark/space	1	∞	0.25	0.3333	0.0625	0.0667	0.01	0.0101
Pulse train																												
η	Mark/space																											
1	∞																											
0.25	0.3333																											
0.0625	0.0667																											
0.01	0.0101																											
Pulse train																												
η	Mark/space																											
1	∞																											
0.25	0.3333																											
0.0625	0.0667																											
0.01	0.0101																											

Tabulka č. 1: Porovnání typů měření [1]

2.1.4 Typy měřidel

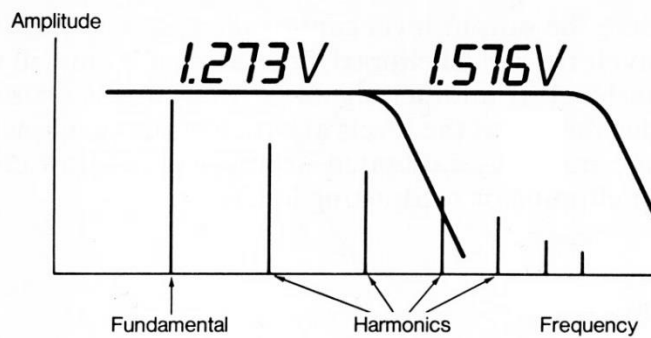
Většina současných měřidel nám nabídne měření rms hodnoty. To je velice důležité si uvědomit, protože v případě specifikací zesilovačů a reproduktorů nám měření průměrné hodnoty nestačí, nicméně mnoho specifikací pro měření šumu bylo vyvinuto v době průměrovacích měřidel a proto je nutné pro měření těchto parametrů mít odpovídající měřidlo.

Další zřetelný rozdíl mezi audio měřidly je v typu zobrazování – analogový/digitální. Každý má své výhody. U analogových měřidel se hůře hodnoty odečítají ze stupnice (stupnic může být i více) a proto nejsou proto tak přesné, jako digitální. Digitální měřidlo nám poskytne přesné číslo, které bychom nemohli pomocí analogového měřidla získat. Digitální měřidla nám umožňují měření s malou šancí pro chybu (zesílení, výkon).

Nicméně nic není perfektní. Digitální měřidlo je vhodné pro měření stabilních signálů. V případě měření systému v reálném provozu může být vhodnější měřidlo analogového typu, protože dostaneme dostatečný přehled o hodnotách signálu. Můžeme sledovat maximální i minimální hodnoty. Odhadnout i průměrnou hodnotu. Některé přístroje mají pro tyto případy, jak analogový, tak digitální výstup.

Šířka pásma voltmetru může mít nezanedbatelný vliv na přesnost měření. Například pro měřidlo se šířkou pásma o 100 kHz budeme mít 10 % chybu měření na signálu o frekvenci 50kHz. Pro dosažení 1% chyby měření, musí mít signál frekvenci nižší než 10 kHz.

Další problém s měřidly s omezenou šířkou pásma nastává při měření zkreslených signálů, kde měřidlo nezměří všechny harmonické komponenty, pokud nemá právě dostatečnou šířku pásma. Naměřená hodnota je nižší než skutečná. Viz obrázek č. 5. Tento jev má značný dopad i na měření šumu. Na většinu audioměření postačují přístroje se šířkou pásma o 500 kHz. To umožňuje se značnou přesností měřit signály o frekvenci 100 kHz. Měření maxim jsou ještě více citlivá na šířku pásma. Systémy s omezením na spodních frekvencích budou při produkci obdélníkového signálu vytvářet sklon v signálu a případě vysokých frekvencí přestřel (overshoot).



Obrázek č. 5: Vliv šířky pásma na měření zkresleného signálu [1]

Přesnost měřidla nám udává, jak dobře měřidlo měří signál na středním pásmu. Obvykle se uvádí 1 kHz. Dále je důležité se podívat do specifikací na plochost/monotónnost měření, což ukazuje, jak se mění hodnoty měření s měřenou frekvencí. Například měřidlo s 2 % chybou měření na 1 kHz a plochostí 1 dB (10 %) od 20 Hz do 20 kHz, může mít chybu až 12% na 20 kHz.

Nejčastěji je specifikována i přesnost na různé rozsahy. Například měřidlo s 1 % přesností na rozsahu 2 V a další 1% přesností na další rozsah bude mít 3 % přesnost na 200 V rozsahu. Pokud bychom zahrnuly do chyby měření i výše zmíněnou plochost, dostali bychom pro 100 V signál o frekvenci 20 kHz 14 % chybu.

Specifikace přesností nejsou normálně tak důležité jako plochost (flatness). Při měření frekvenční charakteristiky nebo zesílení jsou hodnoty relativní a nejsou ovlivněny absolutními hodnotami měření (napětí). Nicméně, jsou zde další prvky, které mohou i toto měření nepříznivě ovlivnit. Při měření zesílení například vstupní attenuátor.

Výše zmíněné specifikace pro přesnost se se stejnou platností uplatňují i pro zdroje signálu, dále jsou uvedené typy chyb uváděny ve specifikacích běžně užívaných voltmetrů/multimetrů.

2.1.5 Měření pomocí decibelů [dB]

Velmi často se nejen v audio odvětví setkáváme s hodnotami signálu vyjádřenými pomocí dB. Audio signál zabírá široký rozsah hodnot. Akustický tlak rock-and-rollové kapely je milionkrát větší než zvuk padajícího, šustícího, listí. Tento rozsah je příliš široký pro lineární stupnici. Proto je dB jednotkou logaritmickou, která nám umožňuje porozumět

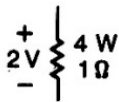
signálům o nízké i vysoké úrovni. Navíc i lidské ucho se chová logaritmicky, což přináší to, že měření přesně odráží lidskou slyšitelnost.

Decibel je definován jako logaritmický poměr měření dvou výkonů nebo dvou napětí. Rovnice níže definují dB jak pro výkon, tak pro napětí.

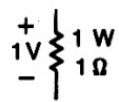
$$dB = 20 \log \left(\frac{E_1}{E_2} \right) \quad (8)$$

$$dB = 10 \log \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \quad (9)$$

Mezi měřeními výkonu a napětí pomocí dB není žádný rozdíl v hodnotách, pokud jsou impedance stejné. V obou rovnicích je dělitel obvykle určená reference. Toto je ilustrováno na obrázku č. 6. Ať už je dB hodnota vypočítána pomocí napětí či výkonu, výsledek je stejný.



Voltage $20 \log \frac{2V}{1V} = 6 \text{ dB} = 10 \log \frac{4W}{1W}$ **Power**



Obrázek č. 6: Vyobrazení ekvivalence napětí a výkonu v dB [1]

Zvýšení napětí o dvojnásobek způsobí nárůst hodnoty o 6,02 dB, zatímco zvýšení výkonu o dvojnásobek způsobí nárůst o 3,01 dB. Tabulka č. 2 přináší porovnání napětí a výkonu při využití jednotek dB.

dB	Napět'ový poměr	Výkonový poměr
+40	100	10000
+20	10	100
+10	3,162	10
+6	1,995	3,981
+3	1,412	1,995
+2	1,259	1,586
+1	1,122	1,259
0	1	1
-1	0,891	0,794
-2	0,794	0,631
-3	0,707	0,501
-6	0,501	0,251
-10	0,3163	0,1
-20	0,1	0,01
-40	0,01	0,0001

Tabulka č. 2 [1]

Výše zmíněný příklad ukázal, jak je možné získat dB hodnotu z dvou měřených hodnot. Audioinženýři velmi často vyjadřují dB hodnotu signálu jako poměr k nějakému standardu. Reference pro měření decibelu může být například hodnota výkonu dBm (1 dBm pro 1 mW). Při měření hodnot dBm anebo jakékoliv výkonnostní hodnoty je nutné znát referenční impedanci. Například, 0 dBm (600 Ω), je správné popsání měření pro zjištění hodnoty v dB. V audioinženýrství se používají impedanční reference o hodnotách 600 Ω a 150 Ω .

Tyto postupy předpokládají, že je měřený obvod zakončen referenční impedancí. Nicméně, většina voltmetrů jsou vysoko-impedanční přístroje a jsou kalibrovány v dB k poměru napětí potřebného dosáhnout 1 mW v referenční impedanci. Toto napětí je 0,775V v případě 600 Ω . Zakončení je ponecháno na uživateli. V případě nezatíženého obvodu se měřená hodnota nazývá dBu či dBv, což naznačuje referenci k napětí 0,775 V, nikoliv k impedanci.

Další často užívaná reference v jednotkách Volt je 1 V. Při užití této reference se měřená hodnota označuje jednotkou dBV. Někdy bývá vhodné si stanovit referenční hodnotu ručně. Hodnota má pak jednotku dB_r, kde musí být samostatně specifikována referenční hodnota.

2.1.6 Přeslech a měření separace (Crosstalk and Separation Measurements)

Jedním z využití měření dvou signálů v dB je měření přeslechu. Přeslech, je jev, při kterém proniká signál z jednoho kanálu do jiného. V obecném případě přeslechu nemusí mít signály nic společného. Speciální případ měření přeslechu je měření stereo systému (2 kanály), popř. kvadrofonního systému (4 kanály), kde se běžně užívá termín separace. Bývá obecným pravidlem, že pokud dva kanály nesou stejný hudební program, užívá se termínu separace a pokud nejsou společné, užívá se termín přeslech.

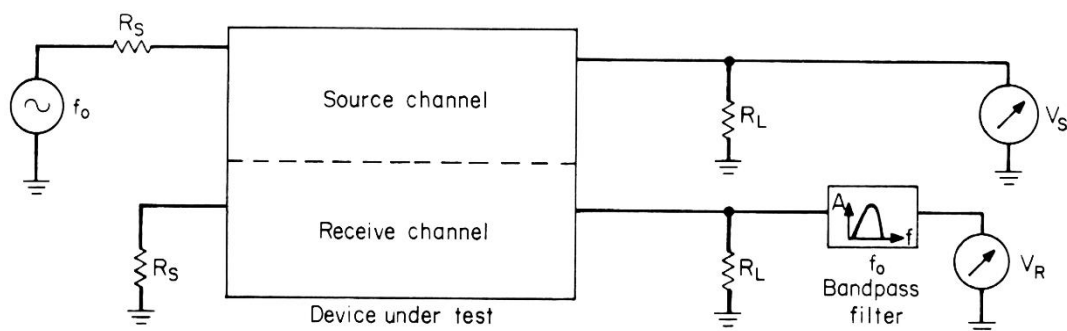
Přeslech nebo separace je definováno jako rozdíl v dB mezi interferujícím signálem v zdrojovém kanále a přijímacím kanálem. Tyto hodnoty jsou obvykle vyjádřeny v kladné hodnotě. Měření spočívá v aplikaci sinusového signálu na jeden kanál na zařízení v testu (device under test, dále DUT) a měření hodnoty signálu na druhém kanálu. Hodnota přeslechu závisí často na použité frekvenci, takže výsledky jsou často reprezentovány ve formě grafu, kde na ose x jsou vyneseny frekvence a na ose y je vynesena amplituda v dB. Výpočet představuje rovnice č. 10.

$$\text{Crosstalk [dB]} = 20 \log_{10} \left(\frac{V_R}{V_S} \right) \quad (10)$$

Vezměme příklad sinusového signálu 10V RMS, 1 kHz v levém kanálu stereo systému. Pokud na vstup pravého kanálu není připojen signál, neměl by být na výstupu přítomen žádný 1 kHz signál. Nicméně, pokud změříme na pravém kanálu hodnotu 10 mV, je separace rovna 60 dB.

Jeden možný problém s touto měřicí procedurou je ten, že ten signál o 10 mV nemusí být právě ten pronikající 1 kHz signál z druhého kanálu, ale také se může jednat o šum (noise floor) DUT. Pokud to je pravda, je měření separace nepřesné. Řešením je použití laditelného filtru (bandpass filter) na měřenou frekvenci, který odstraní nežádoucí signály. Pokud má být měření funkcí frekvence, musí být filtr spjatý s generátorem signálu. Toto je ilustrováno na obrázku č. 7. Zdrojový kanál dostává signál z generátoru sinusového signálu o svém nominálním výstupním napětí je zakončenou svou impedanční zátěží. Druhý kanál má vstup zakončen vstupní impedancí a výstup je zakončen svou impedanční zátěží (stejně jako zdrojový kanál). Hodnota na výstupu zdrojového kanálu je měřena voltmetrem a výstup na druhém kanálu je měřen voltmetrem, před kterým je laditelný filtr (centrovaný

na frekvenci generátoru) anebo je tento filtr přímo ve voltmetru. Získaná hodnota, vyjádřena v dB, je separace. Pokud mají tyto dva kanály každý jiný zisk, bývá zvykem provést opravu měření pro rozdílné zisky, aby byly hodnoty vztažitelné na vstupy kanálů.

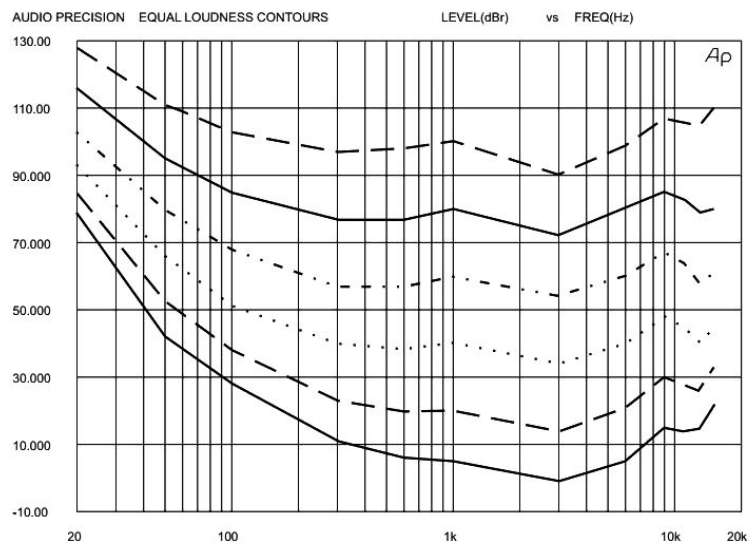


Obrázek č. 7: Principiální zapojení systému pro měření přeslechu [1]

Přeslech mezi dvěma audio kanály bývá někdy nelineární. Přítomnost signálu v jednom kanálu může v druhém kanálu vyvolat tóny o jiných frekvencích. Toto je výjimečně pravdivé v případě přenosových systémů, kde může docházet k jevu cross-modulation mezi nosnými. Tyto tóny zmizí, když dojde k odpojení zdrojového signálu, což jasně značí, kde je jejich původ. Měření může být tedy značně zdlouhavé a únavné pokud jsou použity sinusové signály jako zdroj, protože nemůžeme jednoduše předpokládat, na jakých frekvencích se interference objeví. Některé frekvence dokonce mohou způsobit to, že se interferenční signál objeví až za šířkou pásma DUT. Z těchto důvodů bývá tato měřicí procedura užita se zdrojem náhodného šumu a to proto, aby bylo možné všechny interferenční frekvence zjistit, otestovat a změřit.

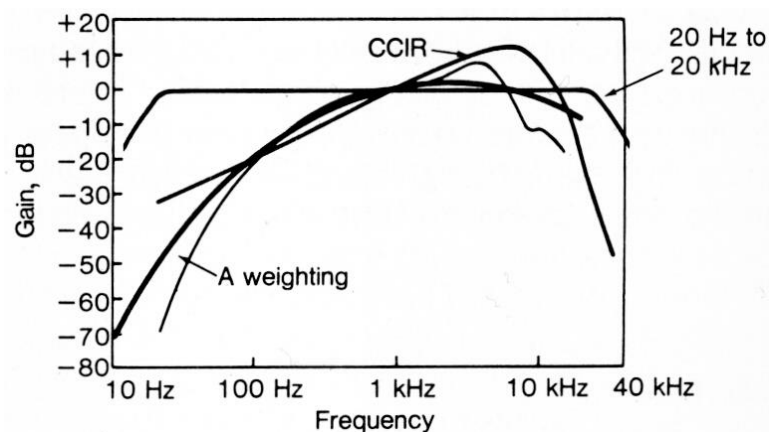
2.1.7 Měření šumu (Noise Measurement)

Měření šumu není nic jiného než specializovaný soubor měření hodnot signálů. Je již dlouho známo, že citlivost lidského ucha se mění s frekvencí, hlavně v nízkých amplitudách. Tento jev byl zkoumán detailně Fletcherem a Munsonem a později Robinsonem a Dadsonem. Fletcher-Munsonova křivka pro prahové hodnoty sluchu je na obrázku č. 8. Sluch je nejvíce citlivý v oblasti od 2 kHz do 4 kHz s hrbolky před a za těmito frekvencemi. Tento jev je zodpovědný za znatelnou ztrátu basů, když je snížena hlasitost hi-fi systému. Abychom mohli předpovědět, jak hlasitě bude něco znít, je nutné použití filtru, který bude duplikovat toto chování elektricky. Jedná se o tzv. váhový filtr (weighting filter).

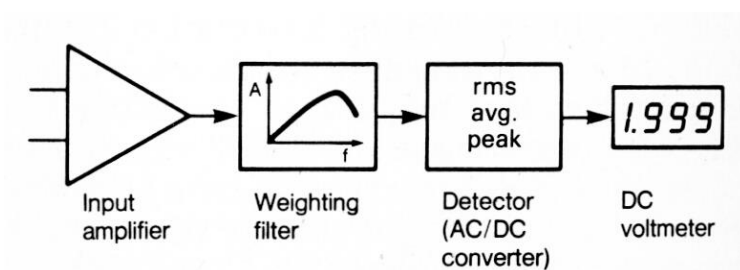


Obrázek č. 8: Fletcher-Munsonovy křivky [2]

Byly učiněny různé pokusy k sestrojení tohoto filtru, které vedly k zavedení k několika standardů v měření šumu. Některé z těchto filtrů jsou zobrazeny na obrázku č. 9. Nejpoužívanější filtr v USA je váhový filtr A. Tento filtr je zařazen před vysoce citlivý voltmetr a amplituda šumu je měřena – viz obrázek č. 10.



Obrázek č. 9: Váhové filtry [1]



Obrázek č. 10: Zapojení pro měření s váhovým filtrem [1]

2.1.8 CCIR Noise Measurement

Evropská zařízení jsou obvykle specifikována s CCIR filtrem a quasi-peak detektorem. Křivku CCIR filtru můžeme vidět na předchozím obrázku č. 9. Má značně větší peak než A křivka a taktéž je strmější na vyšších frekvencích. CCIR quasi-peak standard byl vyvinut ke kvantifikaci šumu v telefonních systémech. Quasi-peak detektor přesněji reprezentoval citlivost ucha na impulzní zvuky, které se dějí, když telefonní ústředny pracují. Pokud se použije CCIR filtr, předpokládá se, že měření bude lépe korelovat se subjektivním měřením šumu než měření s A-weighted filtrem s průměrováním.

Vzhledem k vysoké ceně true quasi-peak měřidel firma Dolby Laboratories navrhla použití CCIR křivky s měřidlem s průměrováním. Aby hodnoty korelovaly s měřením šumu s jinými technickými postupy, navrhly dále změnit frekvenci filtru z 2 kHz na 1 kHz standard. Tato modifikace posunula CCIR křivku dolů o 6 dB. Tato technika se nazývá CCIR ARM (average-responding meter).

2.1.9 Další měření šumu

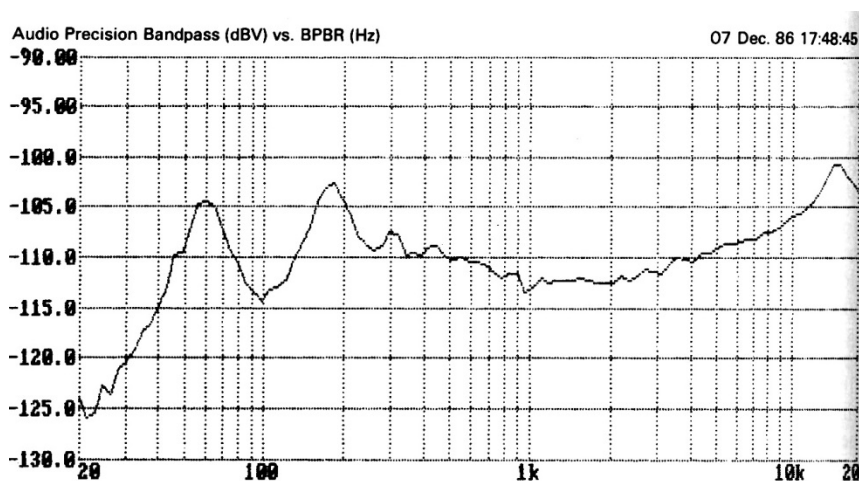
Někteří výrobci specifikují šum se šířkou pásma od 20 Hz do 20 kHz, kde je hodnota měřena pomocí RMS voltmetru. Tato hodnota pak odpovídá šumu na audio pásmu bez spojitosti s lidským sluchem. Mezinárodní elektrotechnická komise (IEC - International Electrotechnical Commission) definuje audio pásmo jako všechny frekvence od 22,4 Hz do 22,4 kHz. Tyto měření pod IEC standardy jsou označovány jako unweighted (nevážené).

2.1.10 Analýza šumu

Šum v napájecí síti je nízkofrekvenční interference tvořená frekvencí napájecí sítě a jejími násobky. Pro Severní Ameriku se komponenty objeví na 60 Hz, 120 Hz, 180 Hz, 240 Hz, atd. Pro Evropu, kde je 50 Hz, se objeví 50 Hz, 100 Hz, 150 Hz, 200 Hz, atd. Dominantními složkami jsou obvykle fundamentální, druhá a třetí harmonická, které mohou být odstraněny horní propustí na 400 Hz.

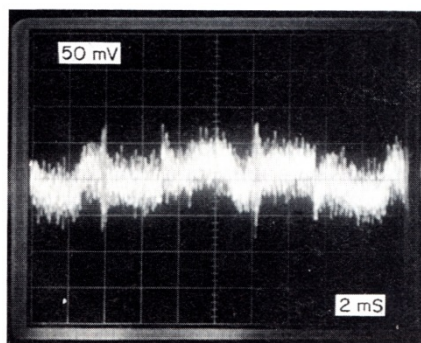
Mnohem více informací o zdrojích šumu můžeme získat pomocí spektrální analýzy šumu. Obrázek č. 11 zobrazuje spektrogram výstupu profesionálního ekvalizéru. Povšimněme si signálů na 120 Hz a 180 Hz, které jsou původem z napájecí sítě. Složka na 120 Hz

je produktem asymetrických proudů v napájecím zdroji, zatímco 180 Hz produkt je způsobem pronikáním pole transformátoru.



Obrázek č. 11: Spektrogram – výstup profesionálního grafického ekvalizéru [1]

Jiný přístup k analýze šumu představuje použití osciloskopu, kde se nastaví správný spouštěcí signál (trigger). Pak šum z tohoto zdroje (spjatý s triggerem) zůstane na obrazovce nehybný. Například pokud nastavíme trigger na elektrickou síť (power line), uvidíme na obrazovce nehybně interferenční signál právě ze sítě. Toto můžeme vidět na obrázku č. 12.

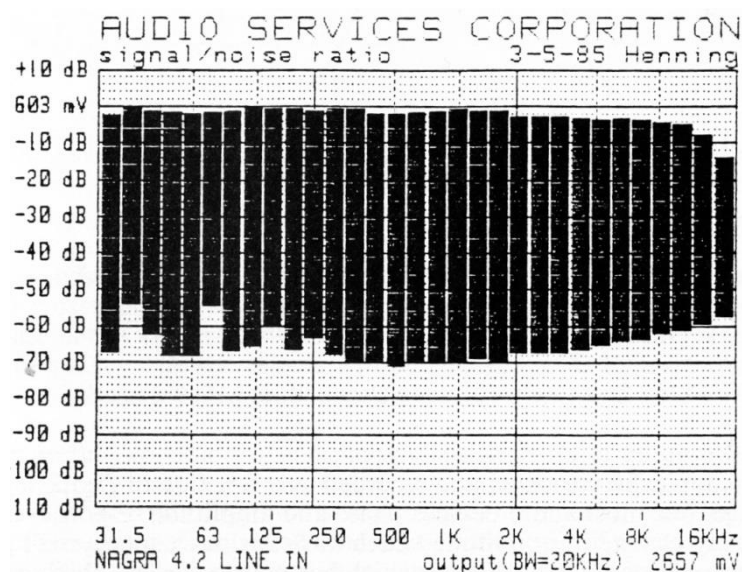


Obrázek č. 12: Zachycení šumu na osciloskopu [1]

Šum může být vyjádřen v absolutních hodnotách (obvykle dBm anebo dBu) jednoduše změřením váženého napětí (v případě dBm se předpokládá vhodné zakončení vedení). Nicméně tento přístup není vždy vhodný. Například 1 mV šumu na výstupu výkonového zesilovače je dobrá hodnota, ale na výstupu mikrofону je to nepřijatelná hodnota (odpovídající měření zvuku tryskového letounu). Lepším způsobem k vyjádření šumu je poměr signál-šum (SNR – signal to noise ratio). SNR je vyjádřeno v dB a referencí

je užitečný signál. Toto měření můžeme užít v různých místech systému, a přesto je můžeme přímo porovnávat.

Rozšíření této techniky zavedl Moller. Šumové spektrum je vhodně analyzováno. Limitační hodnoty signálu jsou vyznačeny jako funkce frekvence do stejného grafu. Výsledkem je obrázek č. 13, který znázorňuje dynamický rozsah DUT jako funkci frekvence. Ve své podstatě je to SNR jako funkce frekvence.



Obrázek č. 13: Dynamický rozsah zařízení měřený pomocí SNR [1]

2.2 Měření fáze (Phase Measurement)

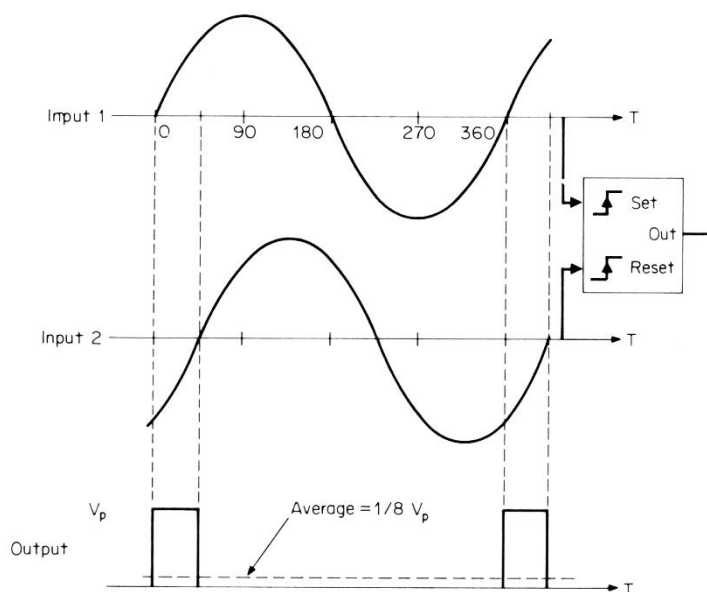
Při připojení signálu na vstup zařízení dojde k tomu, že signál na výstupu se objeví s určitým zpožděním. Pro vyjádření zpoždění sinusového signálu můžeme použít stupně, kde 360° představuje jeden sinusový cyklus. Tento způsob měření můžeme vidět na obrázku č. 14, kde je signál č. 2 zpožděn oproti signálu č. 1 o 45°.

Příklad matematického výpočtu:

$$Phase = \frac{V_{avg}}{V_p} \times 360^\circ = 45^\circ \quad (11)$$

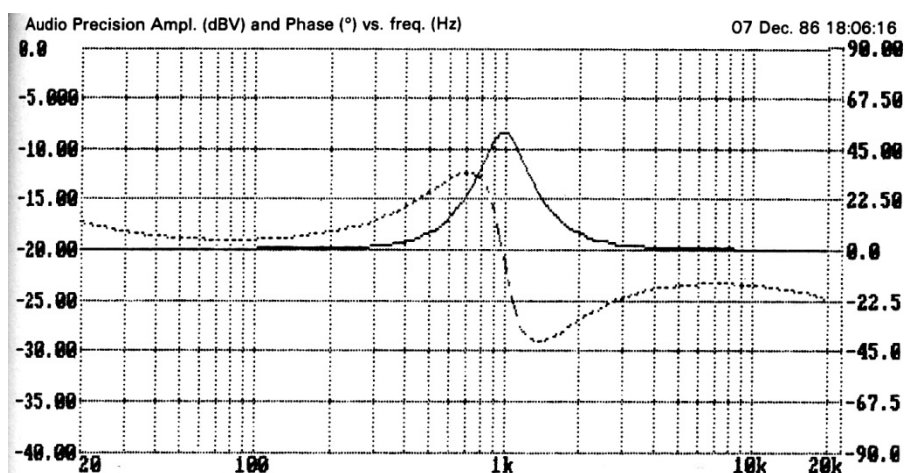
Většina audio měřidel měří fázi přímo pomocí měření části jednoho cyklu mezi kříženími nulou (zero crossings) obou signálů. Využívá se přitom klopného obvodu (edge-triggered

set-reset flip-flop) viz obrázek č. 14. Výstupem toho obvodu bude kladný signál v místě mezi zero crossings. Zprůměrováním amplitudy tohoto pulzu za dobu jednoho cyklu získáme měření fáze.



Obrázek č. 14: Měření fázového posunu [1]

Fáze je typicky měřena a zaznamenávána jako funkce frekvence na audio pásmu. Pro většinu audio zařízení jsou fáze a frekvenční charakteristika úzce spjaty. Jakákoliv změna amplitudy, která se mění s frekvencí, vytvoří korespondující fázový posun. Na obrázku č. 15. můžeme vidět frekvenčně fázovou charakteristiku grafického ekvalizéru.



Obrázek č. 15: Frekvenčně fázová charakteristika grafického ekvalizéru (spojitě frekvenční charakteristika; čárkovaně fázová charakteristika) [1]

Fixní časové zpoždění zavede fázový posun, který je lineární funkcí frekvence. Toto časové zpoždění může přinést velké hodnoty fázového posunu na vysokých frekvencích, které nejsou ale prakticky důležité. Toto zpoždění nebude zkreslovat komplexní signály a ani nebude možné jej sluchem nijak zaznamenat. Problémy mohou ovšem nastat, pokud se zpožděný signál použije ve spojení s nezpožděným signálem. Toto by byl případ, kdy ve stereo systému je jeden kanál zpožděný a druhý nikoliv.

Jedna z nejčastějších aplikací měření fázového posunu v nahrávacích studiích byla při zarovnávání hlavy magnetofonu. Pokud je hlava vícestopého magnetofonu nakloněna (azimutálně – ve směru pásky), pak signály jednotlivých stop budou zpožděné. V případě vysoké frekvence může být posun více než 360° . Z tohoto důvodu se začíná měřit na středních frekvencích, např. 1 kHz. Následně se frekvence zvýší, např. na 3 kHz a znova se měří, poté na 10 kHz. Během toho se hlava zarovnává. Díky měření na různých frekvencích si můžeme být jisti, že hlava je správně zarovnána, protože jakákoliv chyba je ihned zřejmá.

2.3 Měření frekvence (Frequency Measurement)

2.3.1 Charakteristika frekvence (Frequency Characteristics)

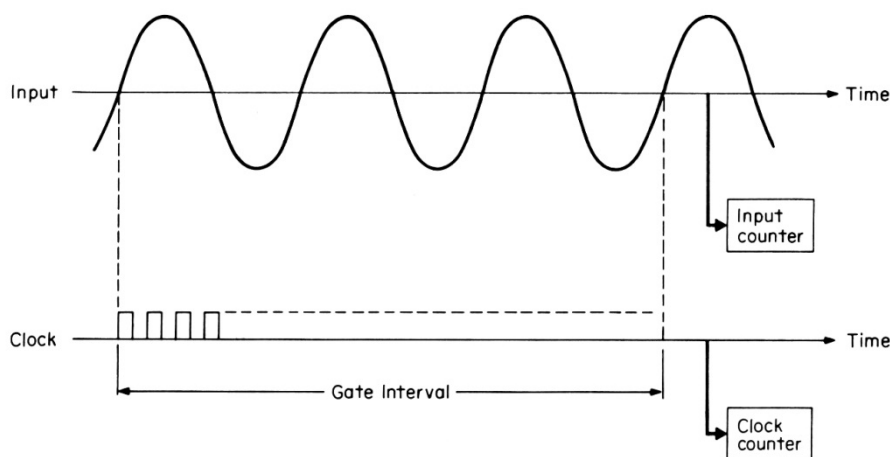
Jednou ze základních charakteristik periodických signálů je frekvence. Zjednodušeně, je to počet opakování periodického děje za 1 sekundu. Důležité je si neplést pojmy frekvence a pitch. Pitch je frekvence vnímaná lidským sluchem (tzv. výška tónu). V případě komplexních signálů jako např. úzkopásmový šum, modulované sinusové signály, je velice obtížné stanovit frekvenci. Vezměme sinusový signál složený ze 4 sinusových signálů o těchto frekvencích: 2 kHz, 3 kHz, 4 kHz a 5 kHz. Jaká je frekvence tohoto složeného signálu? Při poslechu uslyšíme tón, kde dominuje složka o frekvenci 1 kHz, kterou si mozek automaticky doplní. Pitch tedy není vždy zjevná veličina a záleží zcela na posluchači.

Matematický vztah mezi frekvencí f a periodou T popisuje rovnice č. 12.

$$f = \frac{1}{T} \quad (12)$$

2.3.2 Měření frekvence

V současné době se k měření frekvence využívá obvodů s mikroprocesorem, kde se měří perioda a z ní se zpětně získá frekvence. Čítač měří po určitou dobu (gate interval) vysokofrekvenční hodinový signál (clock) a vstupní signál viz obrázek č. 16 a frekvence se vypočítá dle rovnice č. 13.



Obrázek č. 16: Měření frekvence [1]

$$f = \frac{\text{clock frequency} \times \text{no. of signal cycles}}{\text{clock count}} \quad (13)$$

Povšimněme si, že gate interval ve výpočtu nefiguruje. Gate interval určuje rychlost měření a jeho rozlišení. Čím delší čas, tím je měření pomalejší a přesnější. Nicméně je nutností, aby interval byl celočíselným násobkem periody měřeného signálu. To s jednoduchostí zajistí logické obvody. Pro příklad uveďme signál o frekvenci 10 Hz, gate interval 0,1 s, clock 10 MHz z čehož dostaneme počet měření viz rovnice č. 14.

$$\frac{10 \text{ MHz} \times 1 \text{ cycle}}{10 \text{ Hz}} = 1\,000\,000 \quad (14)$$

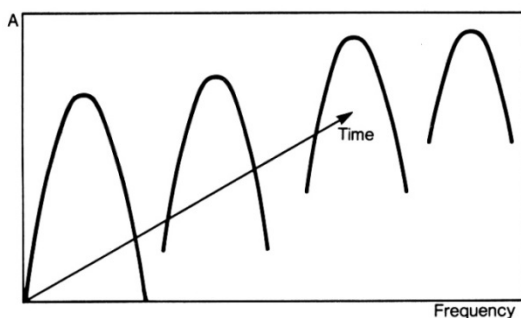
Toto měření nám poskytne rozlišení o 6 místech. Gate interval o 1 s zaznamená 10 cyklů, což by nám přineslo 10 000 000 měření.

Při měření nízkých frekvencí se může využít jiného postupu. Využívá se přitom napětím nastavitelného oscilátoru (VCO – voltage-controlled oscillator), který vstupní frekvenci znásobí (obvykle 100x) a fázového závěsu (PLL – phase-locked loop). Měření je pozdrženo o dobu, kterou trvá zavěšení PLL

Výše zmíněné techniky měření jsou limitovány dosažitelnou přesností, která závisí na referenci. Tou referencí je v audiotechnice obvykle krystalový oscilátor, který je teplotně závislý (temperature drift). Tento drift se může omezit a pro tento účel se zavádí teplotní stabilizace pomocí ohřívače anebo se krystal teplotně izoluje od okolí. Naštěstí pro většinu audio měření je základní přesnost krystalů dostačující.

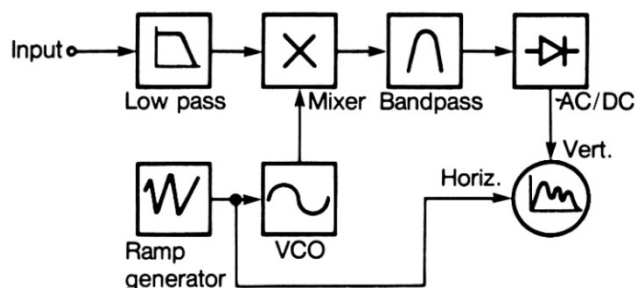
2.3.3 Spektrální analýza (Spectrum Analysis)

Spektrální analyzátor, zjednodušeně řečeno, je zařízení zobrazující signál jako funkci frekvence (frequency domain). Nejčastějším typem je analyzátor s přeladitelným filtrem (sweeping-filter). Můžeme si ho představit jako pásmovou propust, která se umí přeladit. Viz obrázek č. 17. Výstupní napětí filtru se pak vykresluje na vertikální ose a na ose horizontální je laděná frekvence. Získáme přehled o frekvenčních složkách ve zkoumaném signále. Jeden sinusový signál (nezkreslený - bez dalších složek) se vykreslí jako jeden úzký peak.



Obrázek č. 17: Přeladitelný filtr [1]

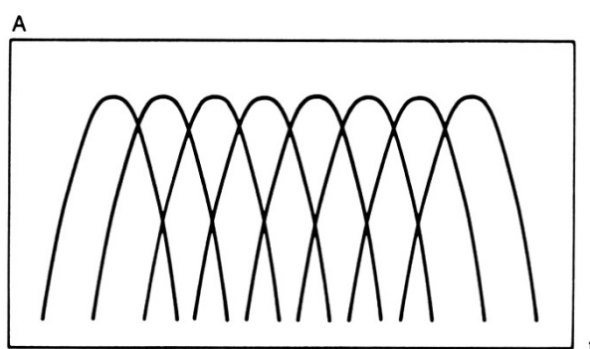
Kvůli obstrukcím v přeladování filtru elektronicky byla dříve většina spektrálních analyzátorů zapojena dle obrázku č. 18. Laděný oscilátor (sweeping oscilátor, LO – local oscillator) je smíšen se vstupním signálem v násobičce, která posune frekvenci signálu na frekvenci pásmové propusti. Tyto analyzátory se nazývají heterodynní (heterodyning) a byly nejrozšířenějším typem. V současné době převažuje využití digitálních zařízení.



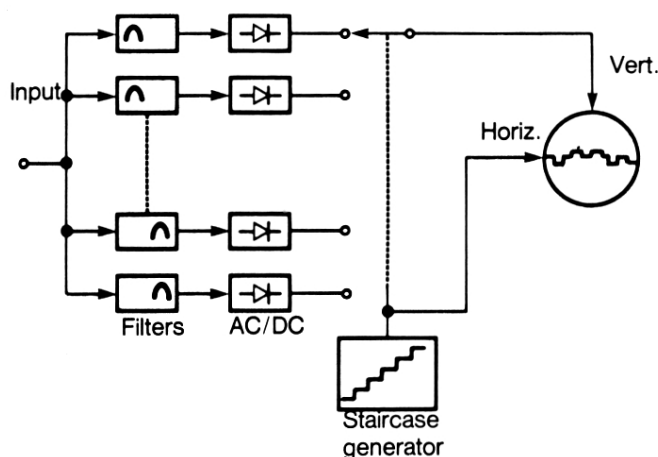
Obrázek č. 18: Zapojení heterodynního analyzátoru [1]

Tento typ charakterizují dvě věci. Zaprvé, šířka pásma analyzujícího filtru je pevně dána charakteristikou neladitelného filtru. Šířka pásma tedy nezávisí na signálu. Zadruhé, analyzátor se musí postupně přeladit přes pásmo, které analyzujeme. Pokud se něco stane na určité frekvenci, na kterou analyzátor není v té době naladěný, děj nezaznamenáme.

Jiným typem je spektrální analyzátor pracující v reálném čase (RTA – real-time analyzer). Do paralelního souboru filtrů vstupuje zkoumaný signál, signál je usměrněn a zobrazen na obrazovce. Obvyklou přenosovou charakteristiku filtrů vidíme na obrázku č. 19 a schéma zapojení na obrázku č. 20.



Obrázek č. 19: Přenos paralelních filtrů v RTA [1]



Obrázek č. 20: Zapojení RTA [1]

Obvykle je v analyzátoru 30 filtrů, které pokrývají pásmo od 20 Hz do 20 kHz. V tabulce č. 3 níže vidíme kmitočty, na které jsou filtry laděny. Tyto kmitočty jsou standardizovány IEC. Některé speciální modely mohou mít ovšem filtrů více.

25 Hz	80 Hz	250 Hz	800 Hz	2,5 kHz	8 kHz
31,5 Hz	100 Hz	315 Hz	1 kHz	3,15 kHz	10 kHz
40 Hz	125 Hz	400 Hz	1,25 kHz	4 kHz	12,5 kHz
50 Hz	160 Hz	500 Hz	1,6 kHz	5 kHz	16 kHz
63 Hz	200 Hz	630 Hz	2 kHz	6,3 kHz	20 kHz

Tabulka č. 3 [1]

Šířka pásma těchto analyzátorů je omezena právě šířkou pásma filtrů a je určitým procentem střední frekvence (center frequency). Výhoda tohoto typu analyzátoru je v rychlé, okamžité, odezvě, což umožňuje zaznamenat všechny přechodové jevy (transients). Nevýhodou je nízké rozlišení.

RTA se obvykle používají ve spojení s náhodným šumem anebo více tónovým testovacím signálem, aby odezva DUT byla zjištěna rychle. Náhodný šum je tvořen všemi frekvencemi přes celou šířku pásma šumu. Setkáváme se se dvěma typy šumu. Růžový (pink noise) a bílý (white noise). Bílý šum má stejnou energii na hertz. Pokud se měří analyzátozem jehož šířka pásma je konstantní s frekvencí, bude jeho spektrum ploché (heterodynní analyzátor). V případě RTA zaznamenáme vzrůst 3 dB na oktávu. Růžový šum je náhodný šum, který má stejnou energii na oktávu. Pokud je zobrazen na RTA bude jeho odezva plochá. Heterodynní analyzátor ukáže pokles (rolloff) 3 dB na oktávu.

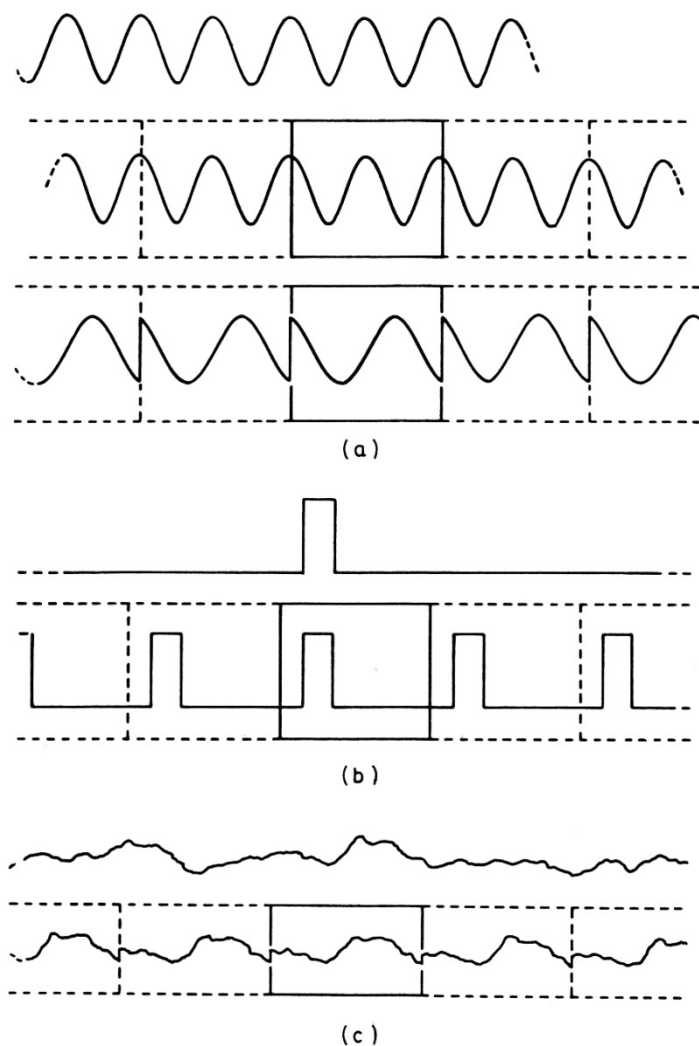
Pro většinu audio testování s RTA se používá růžový šum. Na obrazovce okamžitě vidíme frekvenční charakteristiku DUT. Kvůli náhodné povaze šumu, amplituda na výstupech filtrů kolísá a měření není zcela přesné. Pro přesnější měření se prodlužuje průměrovací čas v AC-DC převodnících.

Můžeme vytvořit vícetónový sinusový testovací signál, kde sinusová složka bude na střední frekvenci daného filtru. Když tento signál zobrazíme na RTA, uvidíme měření bez fluktuací, které je vlastní růžovému šumu. V současné době jsou v rozmachu digitální RTA, využívající DSP (digital signal processing).

2.4 Rychlá Fourierova transformace (FFT)

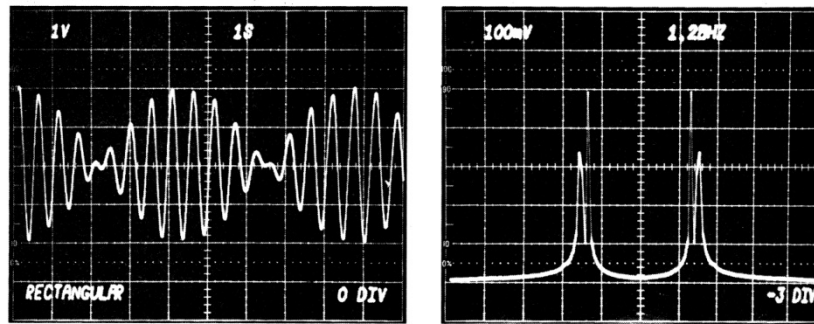
Francouzský matematik Fourier dokázal, že harmonický signál může být reprezentován jako součet sinusových vln. Technologické pokroky dovolili implementovat Fourierovu teorii s využitím digitálních výpočetních obvodů. Přístroje mají možnost vykonat Fourierovu analýzu a to tak, že nejprve digitalizují signál, vzorkují minimálně 2 x vyšší frekvencí, než je nejvyšší frekvence vstupního signálu (Nyquistův teorém) a převedou vzorky na číslo. Fourierova řada skýtá způsob, jak převést tyto signály do vzorků signálového spektra. Data se převedou z časové závislosti (time domain) na závislost frekvenční (frequency domain). FFT (rychlá Fourierova transformace) je pouze způsob, jak efektivně spočítat Fourierovu řadu pomocí eliminace nadbytečných matematických operací.

FFT pracuje na části signálu, který byl vzorkován a uložen do paměti pro výpočet. Pro příklad si vezmeme část sinusového signálu, viz obrázek č. 21. Tato část sinusového signálu pokračuje dále na obou stranách. FFT algoritmus neví nic o signálu mimo tento úsek (windows – okno). Předpokládá se tedy, že signál se periodicky opakuje mimo toto okno. Toto je velmi důležité, protože nevhodně vybraný úsek signálu, vede ke špatným výsledkům FFT. Podívejme se na obrázek č. 21a. První část zobrazuje vstupní signál. Druhá část správně vybraný úsek, který je charakteristický tím, že jeho opakováním získáme původní signál. Třetí část ukazuje nevhodně vybraný úsek, neceločíselný násobek frekvence signálu, který způsobí chybné měření.

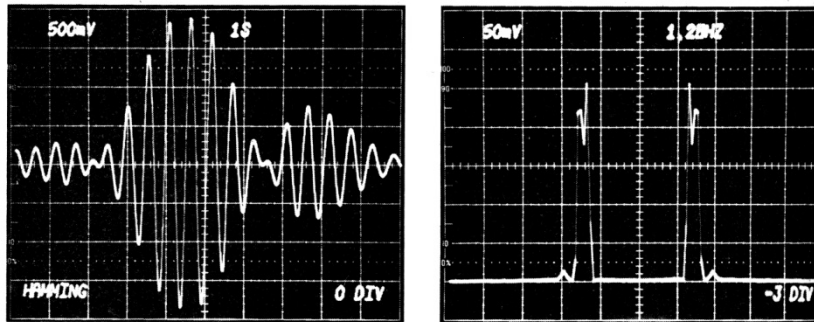


Obrázek č. 21: Výběr úseku k analýze pomocí FFT [1]

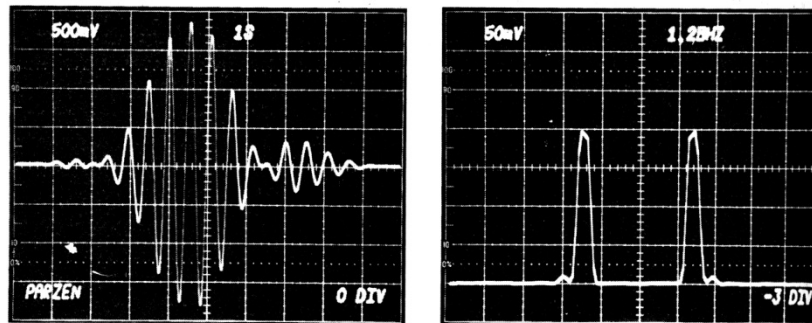
Je tedy zřejmé, že správná volba úseku k FFT je rozhodující pro přesné a pravdivé výsledky. Nejobtížnější bývá vybrání správných koncových bodů. Pokud je v koncových bodech nějaké ostré zakončení, objeví se v měření falešné signály. Stejně tak při vybrání špatných pozic koncových bodů. Využitím okna, které není obdélníkové a klesá k nule na svých koncích, odstraníme tyto chyby. Toto můžeme vidět na souhrnném obrázku č. 22. Nejčastěji používaným oknem je okno Hamming. Základní rozdíl oken je popsán v tabulce č. 4. Existují ale i další okna.



(a)

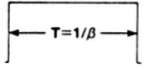
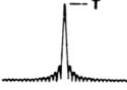

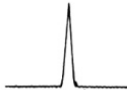


(b)



(c)

Obrázek č. 22: Různé výsledky měření podle výběru okna [1]

Unity-amplitude Window	Shape equation	Frequency-domain magnitude	Major-height	Highest side lobe dB	Bandwidth 3 dB	Theoretical roll-off, dB octave
Rectangle 	$A = 1$ for $t = 0$ to T		T	-13.2	0.86β	6
Hamming 	$A = 0.08 + 0.46 (1 - \cos 2\pi t/T)$ for $t = 0$ to T		$0.54 T$	-41.9	1.26β	6 (beyond 5β)

Tabulka č. 4: Popis vlastností oken [1]

Fourierova transformace může být napsána pro libovolný počet bodů, nicméně z výpočetních důvodů toto číslo vyjadřujeme jako mocninu 2. Nejčastějšími délkami transformace pro akustické signály jsou 512, 1024 a 2048 bodů.

Transformace z časové závislosti na závislost frekvenční s využitím FFT může být užita i obráceně. FFT tedy skýtá i velké možnosti v oblasti filtrování. Jedním z dalších využití je inverzní Fourierova transformace – keprstrální analýza (cepstrum analysis) využívaná při zpracování hlasu.

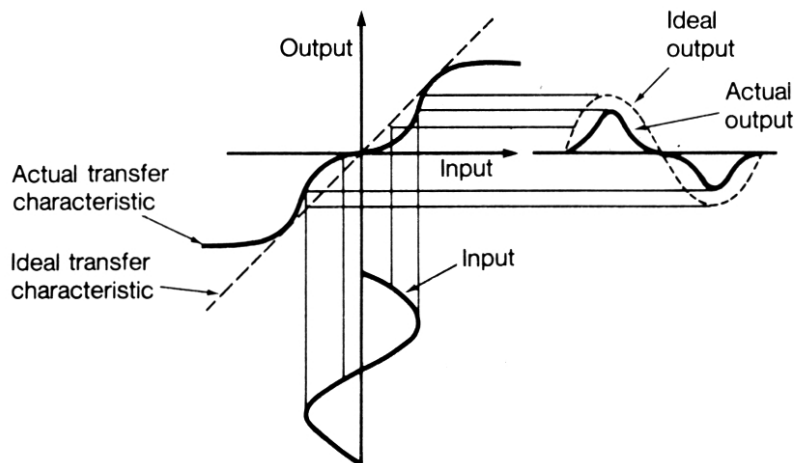
Při aplikaci Fourierově transformace se ztrácí informace o čase, dochází ke ztrátě časové osy. V aplikacích, kde potřebujeme tuto informaci zachovat, se využívají jiné transformace, např. vlnková (wavelet).

2.5 Nelineární zkreslení (Nonlinear Distortion)

Zkreslení (distorion) je měření nečistoty signálu. Obvykle je vyjádřeno jako procento anebo dB poměr nechtěných složek k složkám užitečným. Do DUT vstupuje signál tvořený jedním nebo několika sinusovými signály. Zjednodušeně, jakékoliv jiné frekvence, které nebyly na vstupu, jsou zkreslením. Nicméně, přesně řečeno, složky způsobené napájením z elektrické sítě a další falešné signály nejsou v tomto případě zkreslením. Setkáváme se s různými procedurami pro měření zkreslení a jejich interpretaci.

2.5.1 Harmonické a celkové zkreslení (Harmonic Distortion and THD)

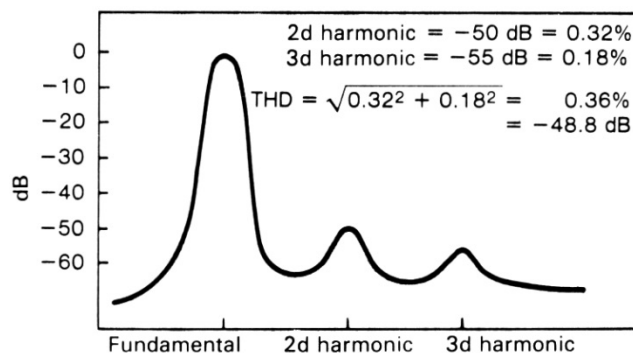
Na obrázku č. 23 vidíme typickou přenosovou charakteristiku DUT. Zobrazuje výstupní napětí v jakémkoliv místě obálky signálu pro dané vstupní napětí. V ideálním případě je to přímka. Výstupní obálka je projekcí vstupní sinusové vlny na DUT. Změna na vstupním signálu způsobí odpovídající změny na výstupním signálu. Protože je vlastní přenosová charakteristika nelineární, zkreslený tvar obálky signálu se objeví na výstupu.



Obrázek č. 23: Přenosová charakteristika a zkreslení [1]

Při měření harmonického zkreslení je DUT buzeno sinusovým signálem a na výstupu je měřeno jeho spektrum. Při použití FFT můžeme vidět, že signál na výstupu se skládá z původního vstupního signálu a navíc dalších složek, které jsou celočíselným násobkem frekvence původního signálu. Spektrum zkresleného signálu můžeme vidět na obrázku č. 24. Pro vstupní signál o frekvenci 1 kHz máme na výstupu DUT původní 1 kHz a navíc složky o frekvencích 2 kHz, 3 kHz, 4 kHz, atd. Amplitudy harmonických jsou úměrné celkovému zkreslení. Procento harmonického zkreslení se spočítá jako součet efektivních hodnot harmonických složek dělený efektivní hodnotou fundamentální složky.

Užitím spektrálního analyzátoru k měření harmonického zkreslení se podíváme na příklad na obrázku č. 24. Fundamentální složka je nastavena na displeji tak, aby odpovídala 0 dB. Amplitudy dalších harmonických složek jsou pak přečteny a převedeny do lineární stupnice. Proveďte se efektivní součet hodnot a právě ten reprezentuje celkové harmonické zkreslení (THD – total harmonic distortion). Matematický výpočet pro výpočet s dB je rovnice č. 15, pro efektivní hodnoty platí rovnice č. 16.



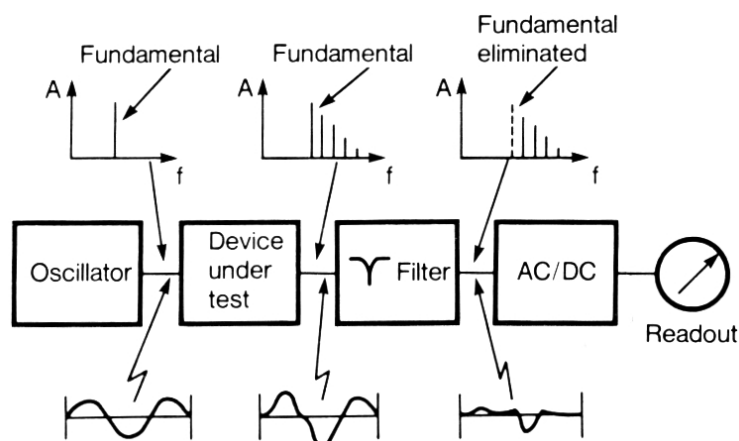
Obrázek č. 24: Měření a výpočet THD [1]

$$THD = 20\log_{10} \sqrt{\frac{(10^{|f_2|dB/20})^2 + (10^{|f_3|dB/20})^2 + \dots + (10^{|f_n|dB/20})^2}{(10^{|f_1|dB/20})^2}} \quad (15)$$

$$THD = 20\log_{10} \sqrt{\frac{|Sum\ of\ harmonics|_{RMS}}{|f_1|_{RMS}}} \quad (16)$$

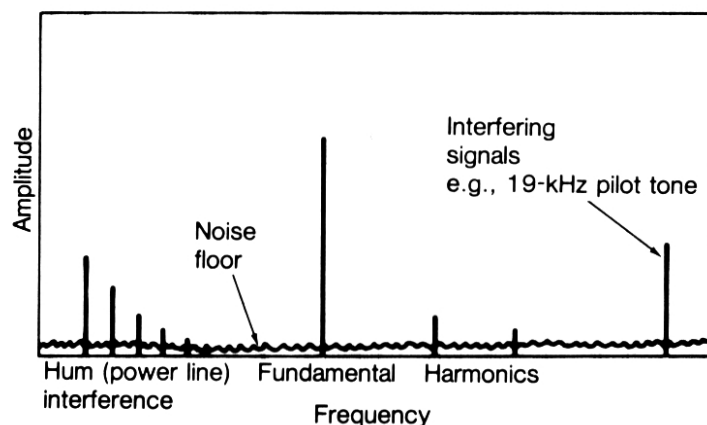
2.5.2 Celkové harmonické zkreslení a šum (THD+N).

Mnohem jednodušší je ale měření pomocí specializovaného přístroje. Jedná se o měřič zkreslení s pásmovou zádrží (notch-filter distortion analyzer). Toto zařízení pomocí filtru odfiltruje fundamentální složku signálu a měří zbytek. Principiální schéma fungování přístroje vidíme na obrázku č. 25.



Obrázek č. 25: Princip a blokové zapojení pro měření THD+N [1]

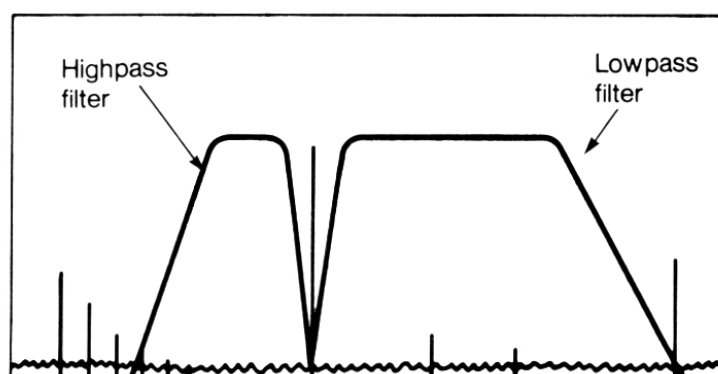
Kvůli frekvenční charakteristice pásmové zádrže je zřejmé, že jakýkoliv jiný signál než fundamentální složka, ovlivní výsledky měření. Některé z těchto rušivých signálů můžeme vidět na obrázku č. 26.



Obrázek č. 26: Příklad rušivých signálů [1]

Analyzátor je tedy při měření plně zohlední a výsledné měření se tedy nazývá celkové harmonické zkreslení a šum (THD + N – total harmonic distortion + noise). I když toto limituje měření přístrojů s velmi nízkým zkreslením, není to nutně špatné. Sluchový orgán zaregistruje všechny složky, nikoliv jen harmonické. Některé signály ale mohou být mimo pásmo slyšení, např. pilotní tón na 19 kHz pocházející z FM rádia.

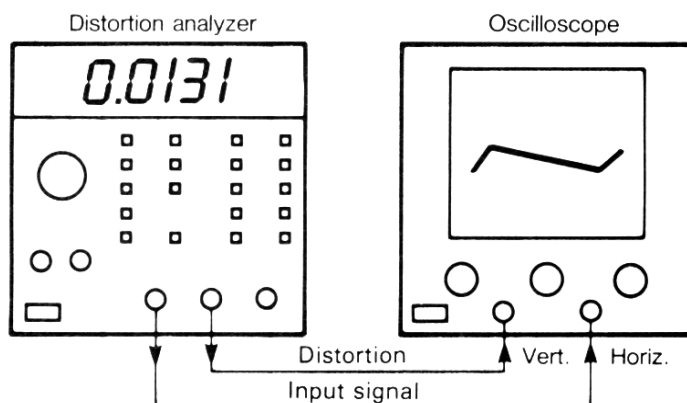
V analyzátoru jsou tedy i další filtry, které minimalizují šum a brum. Obvykle se skládají z jedné nebo více horních propustí na 400 Hz a dolních propustí (22,4 kHz, 30 kHz, 80 kHz). Viz obrázek č. 27. Lepší analyzátor bude mít ve výbavě všechny tyto filtry.



Obrázek č. 27: Filtry v měřiči zkreslení [1]

Výhodou použití sinusového testovacího signálu s analyzátozem s pásmovou zadržací je jednoduchost použití. Další výhodou skýtá možnost připojení na osciloskop, kde si můžeme zobrazit zbytkové složky signálu, které vlastně reprezentují nelinearitu DUT. V případě zcela lineárního převodu, tedy bez zkreslení, bychom viděli pouze rovnou přímku.

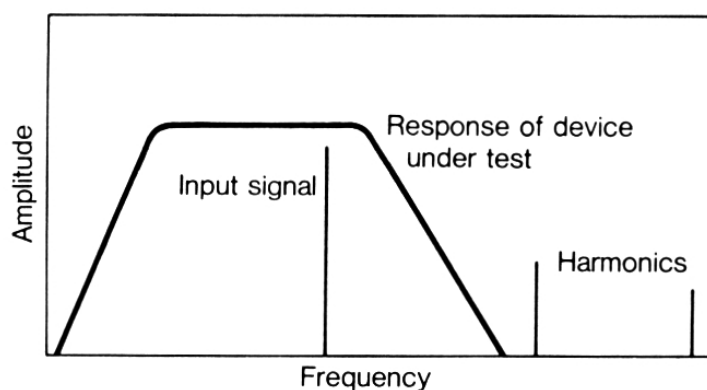
Tento přístup má využití ve vývoji a designu. Můžeme vidět oscilace na peaku signálu, přechodové zkreslení a chování v limitaci. Příkladové zapojení vidíme na obrázku č. 28.



Obrázek č. 28: Zobrazení nelinearity pomocí osciloskopu [1]

Jak frekvence, tak amplituda signálu jsou nastavitelnými parametry při tomto měření. Změnou těchto parametrů můžeme odhalit povahu mechanismů způsobující zkreslení v DUT. Například při užití frekvencí blízkých síťové napájecí frekvenci můžeme odhalit nedostatky v napájecím zdroji. Naopak měření na vysokých frekvencích mohou poukázat na nelineární kapacity nebo limitující rychlost přeběhu (slew-rate).

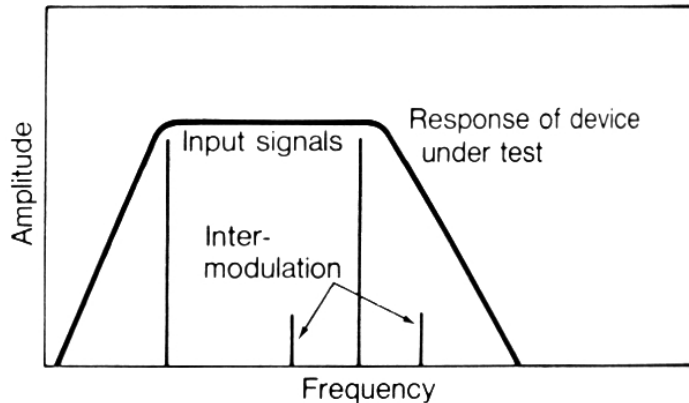
Hlavním problémem při tomto typu měření jsou DUT s omezenou šířkou pásma. Například v případě magnetofonu jsou vyfiltrovány všechny frekvence nad 22 kHz a v případě vstupního testovacího signálu o frekvenci 7 kHz změříme THD, do kterého může být zahrnutá maximálně 3. harmonická složka (21 kHz). Měření na vyšších kmitočtech není přesné, případně není prakticky možné. Viz obrázek č. 29.



Obrázek č. 29: Nepřesné měření zkreslení u přístroje s omezenou šířkou pásma [1]

2.5.3 Intermodulační zkreslení (IMD, SMPTE IM, SMPTE DIN)

Řešením výše zmíněného problému je měření zkreslení pomocí interakce (intermodulace, dále IM) dvou nebo více signálů procházející DUT současně. Nejznámější metodou tohoto druhu je SMPTE IM, pojmenována podle Society of Motion Picture and Television Engineers, která byla jako první standardizována. IM testy jsou dle SMPTE používány už od 30. let 20. Století. V Evropě se setkáváme s názvem SMPTE/DIN.

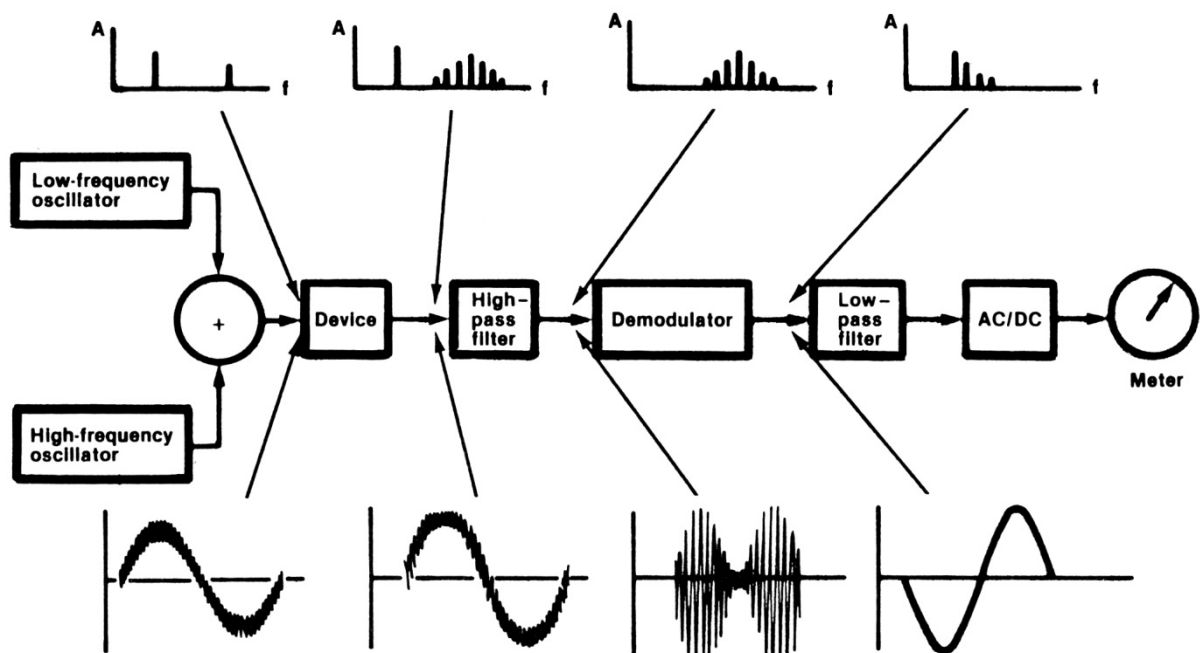


Obrázek č. 30: Měření intermodulačního zkreslení [1]

Testovací signál je tvořen nízkofrekvenčním tónem (obvykle 60 Hz) a vysokofrekvenčním tónem (obvykle 7 kHz) a smíšen v amplitudovém poměru 4:1. Jiné frekvence a poměry mohou být užity. Signál je připojen k DUT a výstupní signál je vyšetřován pro modulaci vrchní frekvence nízkým tónem. Čím více nižší frekvence moduluje vyšší tón, tím větší je nelinearita. Stejně jako při měření harmonického zkreslení, můžeme i IMD měřit spektrálním analyzátozem anebo specializovaným přístrojem. Modulační složky vrchního signálu se objeví jako postranní pásma v násobcích nízkého tónu, tak jak je ilustrováno na obrázku č. 30. Amplitudy postranních pásem jsou efektivně sečteny a vyjádřeny jako procento úrovně vyššího tónu.

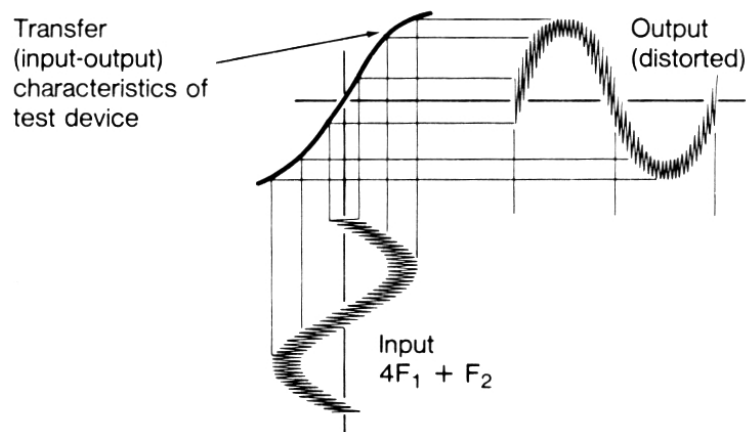
Nejpřímější metodou měření SMPTE IMD je změřit každou složku spektrálním analyzátozem a provést efektivní součet. Tento přístup má nevýhodu v tom, že spektrální analyzátoz je citlivý na nosnou frekvenci modulace, stejně tak i na amplitudovou modulaci. Protože Dopplerův jev je příčinou frekvenční modulace, nemůže tento postup být užit na reproduktorech. Podobný problém vyvěrá z kolísání v nahrávacích magnetofonech a CD rekordérech.

Principiální zapojení pro měření SMPTE vidíme na obrázku č. 31. Analyzovaný signál prochází horní propustí, aby se odstranil tón o nízké frekvenci. Tón o vysoké frekvenci je poté demodulován (úplně stejně jako AM rádio signál) pro získání postranních pásem. Ty jsou dále filtrovány dolní propustí pro odstranění složek o vysoké frekvenci. Výsledný demodulovaný NF signál pak kopíruje obálku VF tónu. Tato nízkofrekvenční fluktuace je právě tím zkreslením a je zobrazena jako procento amplitudy vysokofrekvenčního tónu. Protože právě dolní propust stanovuje měřenou šířku pásma, šum má velmi malý výsledný efekt na měření SMPTE. Analyzátor je velice tolerantní na harmonické složky testovacího signálu, což je výhodou pro užití velmi jednoduchých generátorů testovacího signálu.



Obrázek č. 31: Princip měření SMPTE [1]

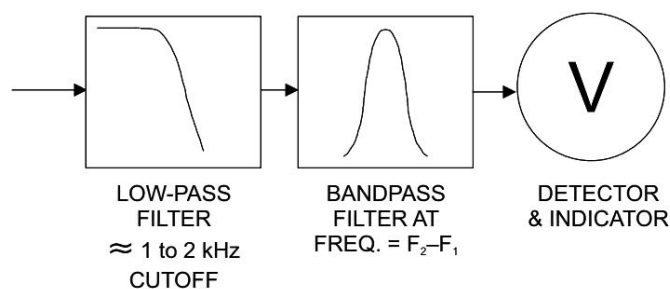
Jak můžeme vidět na obrázku č. 32, když je tento smíšený signál připojen k DUT, výstupní obálka signálu je zkreslená. Při pohybu vysokofrekvenčního tónu podél přenosové charakteristiky NF tónu dochází ke změnám jeho amplitudy. Vysokofrekvenční tón je použit ke změření zesílení v každém bodě přenosové charakteristiky. To se projevuje jako amplitudová nízkofrekvenční modulace vysokofrekvenčního tonu. Modulace se objevují v postranních pásmech okolo vysokofrekvenčního tónu. Tento test je tedy celkem citlivý na přechodové zkreslení a limitaci signálu. Nelinearity vyššího řádu způsobují nerovnosti v přenosové charakteristice, které způsobují vysoké hodnoty SMPTE IM.



Obrázek č. 32: Nelinearita přenosu [1]

2.5.4 Intermodulační zkreslení CCIF (CCIF IMD, CCIT IMD, ITU-R)

Tento typ měření byl ustanoven CCIT (International Telephone Consultative Committee, dnes ITU - International Telecommunication Union). Testovací signál se skládá ze dvou sinusových signálů, které mají blízkou frekvenci. Intermodulační signál, způsobený nelinearitou DUT, vznikne na kmitočtu, který je rozdílem testovacích signálů. V případě testovacích signálů o frekvencích 14 kHz a 15 kHz, vznikne intermodulovaný signál na frekvenci 1 kHz a je složky na frekvencích 2 kHz, 3 kHz, 4 kHz, atd. Tento test má několik výhod na SMPTE IM. Testovací signály mohou být vždy nastaveny tak, aby zkreslení vznikalo v širce pásma DUT. Tato metoda nicméně obtížně vyšetřuje oblast nízkých frekvencí o několika Hz. Blokové zapojení analyzátoru pro měření IMD ITU-R vidíme na obrázku č. 33.

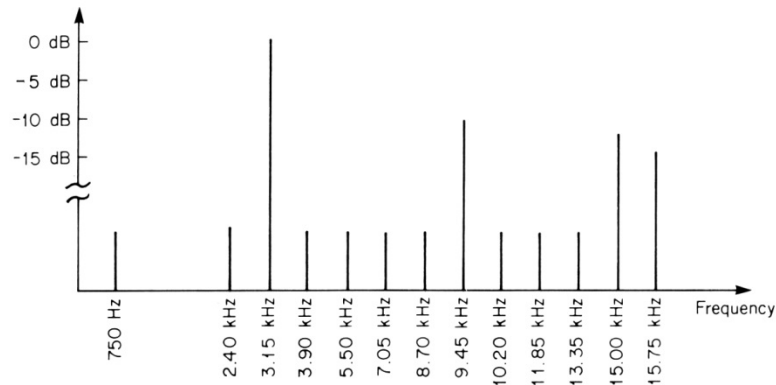


Obrázek č. 33: Blokové zapojení analyzátoru pro měření IMD ITU-R [2]

2.5.5 Intermodulační zkreslení DIM/TIM (Dynamic, Transient IM)

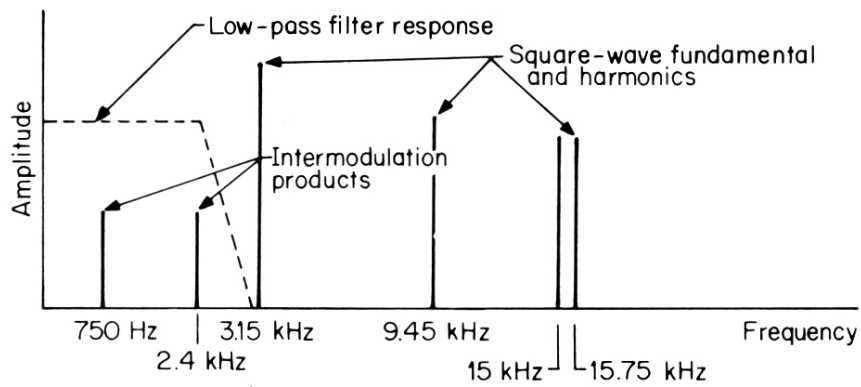
Zdrojem signálu je obdélníkový signál o frekvenci 3,15 kHz a sinusový signál o frekvenci 15 kHz, jehož amplituda je čtvrtinová oproti obdélníkovému signálu. Signál je filtrován dolní propustí na 30 kHz nebo 100 kHz a nazývá se DIM 30 nebo DIM 100. Provede se efektivní

součet 9 vzniklých intermodulací na frekvencích od 0,75 kHz do 13,35 kHz. Viz obrázek č. 34.

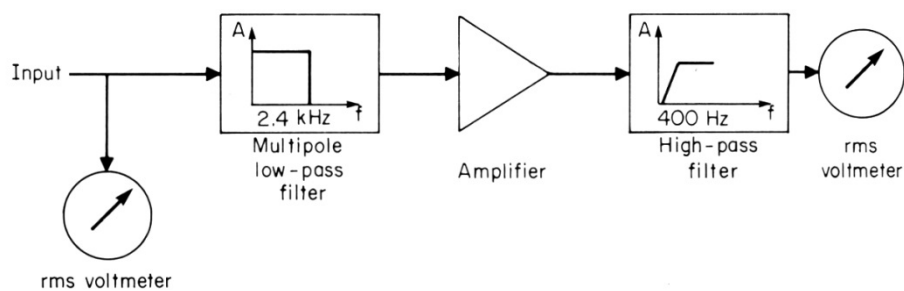


Obrázek č. 34: Frekvenční spektrum při TIM [1]

Tento test má zjednodušenou variantu, jejíž výsledky korelují s postupem výše. K DUT je připojen testovací signál a na výstupu je připojena dolní propust vyššího řádu na 2,5 kHz. Na spektrálním analyzátoru se poté měří intermodulační složky pouze na kmitočtech 750 Hz a 2,4 kHz. Viz obrázek č. 35. Tento test je zapsán u IEC. Dále je možné zařadit před spektrální analyzátor ještě horní propust laděnou na 400 Hz k potlačení brumu DUT. Zapojení můžeme vidět na obrázku č. 36.



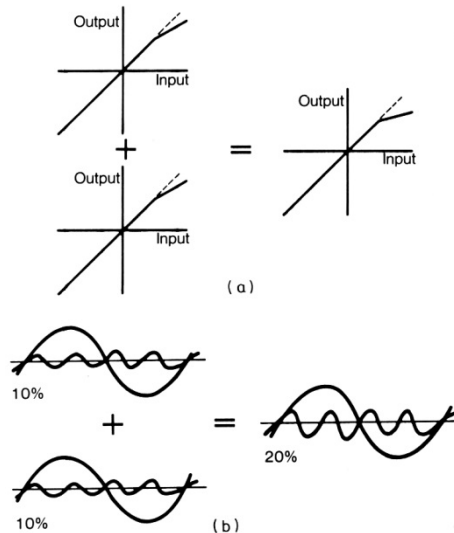
Obrázek č. 35: Zjednodušené měření TIM [1]



Obrázek č. 36: Zapojení pro měření TIM [1]

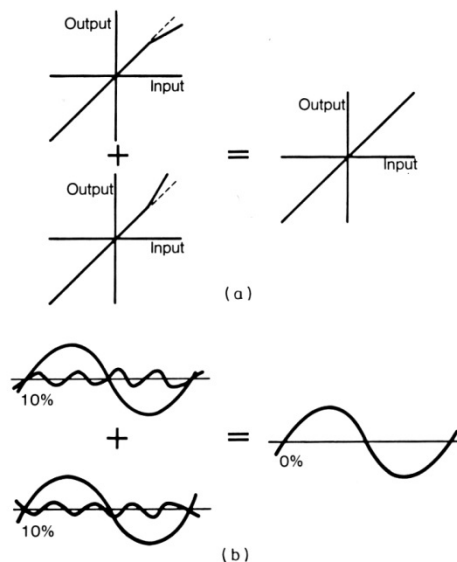
2.5.6 Sčítání a odčítání zkreslení

Zkreslení má příčinu v nelinearitě převodu DUT. Pokud zařadíme dvě stejné DUT sériově za sebe v signálové cestě, může dojít k sečtení zkreslení viz obrázek č. 37.



Obrázek č. 37: Sčítání nelinearit a zkreslení [1]

Může dojít i k opačnému jevu, když mají tyto DUT navzájem komplementární charakteristiku. Na obrázku č. 38 vidíme, že dojde k odečtení zkreslení. Tento jev se může nastat v samotném DUT mezi jednotlivými vnitřními částmi DUT.



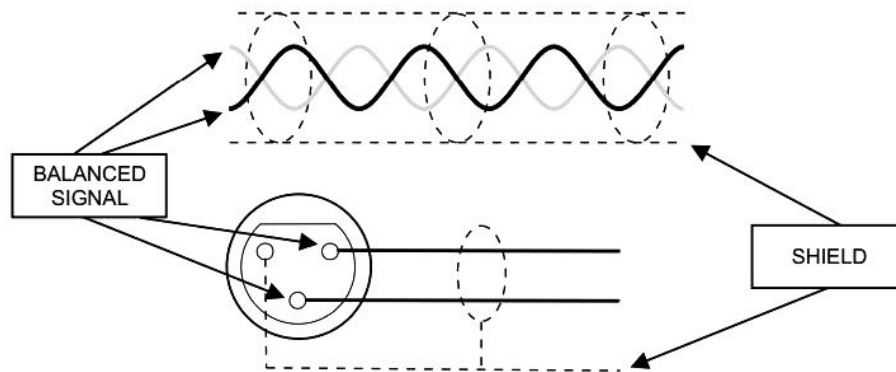
Obrázek č. 38: Odčítání nelinearit a zkreslení [1]

Při testování je tento jev běžný. Například když je měřicí přístroj zkreslení připojen ve své smyčce (loop-back), naměří zbytkové zkreslení 0,002%. Po připojení k DUT ale zobrazí hodnotu 0,001%.

2.6 Propojení měřicího přístroje a DUT

2.6.1 Symetrické a nesymetrické připojení (Balanced & Unbalanced Interface)

Symetrické vstupy a výstupy, tedy symetrické rozhraní, se používá k zamezení vytváření zemních smyček a k potlačení šumů a interferencí. Zařízení mají na výstupu 3 piny – positive (hot), negative (cold), ground. Viz obrázek č. 39. Symetrickými konektory v audio technice jsou např. XLR (Canon), TRS (Jack).



Obrázek č. 39: Symetrické vedení [2]

Symetrického rozhraní můžeme dosáhnout pomocí transformátoru anebo elektronických obvodů. Kabley by měly být stíněné a symetrický pár kroucený.

V komerční audio technice se často setkáváme s nesymetrickým rozhraním. Jeden vodič je živý a druhý je obvykle spojen se zemí (chassis) přístroje. Nesymetrické propojení je obvykle dostačující a bezproblémové v nezarušeném prostředí při dodržení krátké délky kabelu (cca 1 m). Nejčastěji používanými konektory jsou RCA (Cinch), TRS (Jack).

V digitálním prostředí se můžeme setkat s konektory RCA (komerční technika) a BNC a XLR (profesionální technika) pro přenos digitálního signálu pomocí koaxiálního kabelu. Dále se pro přenos užívá optického kabelu TOSLINK. Komerční sféra užívá standardu S/PDIF a profesionální sféra standardu AES/EBU.

2.6.2 Potlačení souhlasného signálu (CMRR)

Veškerý šum zachycený kabelem, se od sebe odečte na vstupních diferenciálních obvodech, protože se předpokládá, že šum je stejný na obou linkách. Hodnota CMRR (Common-Mode Rejection Ratio) se udává v dB a obvykle se setkáváme s hodnotami většími než 60 dB.

CMRR nám říká, o kolik dB bude zemní signál (šum, interference) méně zesílen než signál diferenciální. Tohoto jevu se užívá na symetrickém vedení.

$$CMRR[dB] = 20\log_{10}\left(\frac{\textit{differential gain}}{\textit{common - mode gain}}\right) \quad (17)$$

Souvisejícím parametrem je Common-mode Range (rozsah souhlasného signálu), který stanovuje, jaká je maximální úroveň souhlasného signálu pro ještě správnou funkci.

3 AKUSTIKA

Tato kapitola se věnuje pojmu akustika. Vysvětlují se zde základní pojmy z tohoto oboru a zároveň je popsán zevrubně lidský sluchový aparát. Kapitola čerpá z literatury [3].

Pro zájemce o obor akustika, fyzikálně matematický popis jevů v akustice a stavební akustiku (tyto témata nejsou v práci diskutovány) doporučuji zakoupení či zapůjčení tohoto skriptu.

3.1 Akustika

Akustika je obor zabývající se vznikem, šířením a působením zvuku. Ve většině publikací z akustiky se s tímto slovem nakládá jako s obecně známým a více méně přesně definovaným pojmem, avšak každý autor má svou vlastní definici. Proto i na nás bude, abychom si specifikovali, co budeme pod tímto pojmem rozumět. Ve starší literatuře najdeme nejčastěji definici vycházející z původního významu, že zvuk je to, co lze slyšet, která je dostačující pro obory, jež se nezabývají fyzikálními principy, ale z nich plynoucími důsledky (např. psychoakustika).

3.2 Hudební akustika

Hudební akustika, které se dříve říkalo také fyzikální teorie hudby, dává odpověď na otázku, jaké jsou fyzikální spojitosti mezi zvuky, které znějí lidskému uchu lahodně. Zabývá se především souzvuky tónů (dvou nebo více), čímž dává teoretický podklad pro nauku o harmonii. Kromě teorie stupnic a akordů do ní patří i fyzikální podstata tvorby tónů hudebními nástroji a otázky jejich ladění.

3.3 Zvuk

Obecně se za zvuk považují jakékoliv (periodické i neperiodické) vibrace částic plynného, kapalného nebo pevného média ve frekvenčním pásmu přibližně odpovídajícím schopnostem lidského ucha. Tento rozsah bývá nejčastěji uváděn od 16 Hz do 20 kHz, avšak z hlediska fyzikálních dějů v médiu tyto meze nejsou kritické a všechny vztahy platí řádově od jednotek Hz do několika desítek kHz. Vibrace částic s nižšími frekvencemi, než jsou vymezeny tímto pásmem, se nazývají infrazvuk a s frekvencemi nad tímto pásmem se nazývají ultrazvuk.

3.4 Tón

Zvuk, který je charakterizován sinusovými změnami akustického tlaku, se nazývá jednoduchý tón. Jednoduché tóny se v hudbě prakticky nevyskytují. Zvuky vydávané hudebními nástroji, které nazýváme tóny, mají složitější harmonickou skladbu. Ačkoliv jsou jejich spektra obvykle diskrétní (obsahují pouze jednotlivé kmitočty), mohou obsahovat i spojitou část, která reprezentuje různé šумы a šelesty.

3.5 Sluchový orgán

Zvuk, se kterým přicházíme do styku, vnímáme především sluchovým ústrojím. Extrémně silné zvuky, především nižších frekvencí, můžeme vnímat i povrchem těla, to ovšem není předmětem tohoto odstavce. Sluchový orgán z anatomického hlediska dělíme na tři části: zevní ucho, střední ucho a vnitřní ucho.

3.5.1 Zevní ucho

Zevní ucho se skládá z boltce a zvukovodu. Boltec určuje směrovou charakteristiku sluchového orgánu. Schopnost lokalizace směru, ze kterého zvuk přichází, souvisí s binaurálním vnímáním a projevuje se až od cca 500 Hz, přičemž nejlépe je možno lokalizovat zvuky s frekvencemi kolem 5 kHz. U zvířat je rozpoznávání směru, ze kterého přichází zvuk, zdokonaleno možností hýbat ušima. U lidí tato schopnost již zanikla a je nahrazena malými pohyby hlavy. Zvukovod je trubice o délce asi 25 mm a oválném průřezu s šířkou 7 až 8 mm. V něm dochází k rezonanci dopadajícího zvuku (v pásmu 2 - 6 kHz), což ovlivňuje frekvenční charakteristiku sluchového orgánu. Pro frekvence kolem 4 kHz tím dochází k nárůstu akustického tlaku před bubínkem až o 10 dB. Zvukovod není zcela přímý, avšak vhodným tahem za boltec je možné jej vyrovnat tak, až je (při vhodném osvětlení) vidět bubínek, který představuje předěl mezi zevním a středním uchem.

3.5.2 Střední ucho

Bubínek je oválná blanka z tenkého vaziva, která má tvar pláště kužele mířícího špičkou dovnitř. Vertikální průměr je 9 až 10 mm a horizontální je o něco menší. K bubínku je shora přirostlá rukojeť kladívka, které je první ze tří sluchových kůstek středního ucha: kladívka, třmínku a kovádlíčky.

Kladívko vrostlé rukojetí do bubínku se na horním konci rozšiřuje do hlavičky, která je spojena s kovádkou. Ta se rozděluje na dva výběžky. K prvnímu, kratšímu, jsou uchyceny závěsné vazy. Druhý, delší, probíhá dolů podél rukojeti kladívka a je sklouben s třetí kůstkou: třmínkem. Třmínek je zakončen oválnou ploténkou o ploše cca 3,5 mm², která je přirostlá k blance oválného okénka. Oválné okénko odděluje střední ucho od vnitřního ucha.

Do středního ucha ústí Eustachova trubice, která spojuje dutinu středního ucha (někdy nazývanou bubínková dutina) s nosohltanem. V klidu je uzavřena a otevírá se při polknutí. Ve středním uchu jsou dva malé svaly: napínač bubínku, který je upnut na krček kladívka a třmínkový sval, který je napnut mezi třmínkem a stěnou středního ucha. Tyto svaly mají důležitou funkci při ochraně vnitřního ucha při přílišném hluku.

Střední ucho z hlediska technického pracuje jako pákový mechanický impedanční převodník, který umí měnit své parametry podle velikosti podnětů. Převádí kmity vzduchu dopadající na bubínek v kmity v tekutině vnitřního ucha. Středoušní svaly se reflexivně stahují při překročení hladiny cca 70 dB, čímž chrání sluchový orgán. Reflexní reakce nastupuje s jistou latencí, takže pro krátké impulsy (méně než 30 ms) není účinná. Proto je impulsní hluk nebezpečnější z hlediska poškození sluchu.

3.5.3 Vnitřní ucho

Vnitřní ucho se nachází v kanálcích ve skalní kosti, které se nazývají labyrint. V kostěném labyrintu je uložen blanitý labyrint, což jsou vlastně dva smyslové orgány. Prvním je tzv. vestibulární ústrojí, které se nachází ve třech polokruhovitých kanálcích a v předsíni. Pohyb tekutiny uvnitř způsobuje podněty, které nám pomáhají udržovat rovnováhu. Sluchová část vnitřního ucha se nachází v hlemýždi. Hlemýžď (cochlea) tvoří necelé tři spirálovité závity a je rozdělen na dvě patra: horní, scala vestibuli a dolní, scala tympani vyplněná perilymfou. Mezi nimi je ještě hlemýžďová chodba, scala media, přibližně trojúhelníkového průřezu vyplněná endolymfou, která má oproti perilymfě vysokou koncentraci draslíku (35 x více) a nízkou koncentraci sodíku, což je příčinou elektrického potenciálového rozdílu mezi perilymfou a endolymfou (cca +80 mV). Hlemýžďová chodba je shora oddělená Reissnerovou membránou a zdola basilární membránou, na které se nachází Cortiho orgán. Cortiho orgán slouží jako převodník z mechanických oscilací vnitřního ucha na signály, které mohou být zpracovány nervovým systémem. Je složen

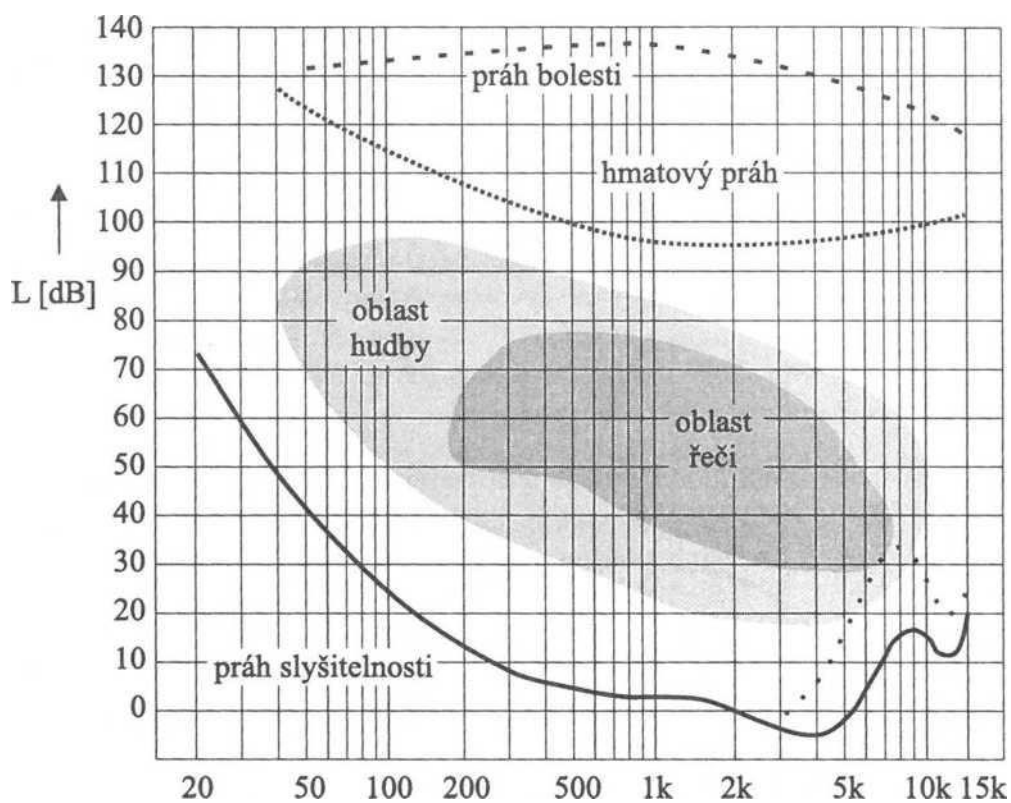
z piliřových a podpurných buněk, mezi nimiž je rozmístěno ve čtyřech řadách (jedna vnitřní a tři vnější) přibližně 20 000 vláskových buněk, jejichž vnitřní potenciál je -60 mV oproti perilymfě. Při rozkmitání basilární membrány se výběžky vláskových buněk ohýbají a deformují dotykem s krycí membránou. Tím jsou vyvolány změny elektrických poměrů, které jsou na spodní straně vláskové buňky předávány do nervových zakončení sluchového nervu. Ten přivádí zvukem způsobené vzruchy do sluchové oblasti kůry velkého mozku. Zde pak dochází ke konečné analýze zvukového podnětu.

3.6 Vnímání zvuku

3.6.1 Závislosti

Jak již bylo řečeno, sluchový orgán lze považovat za snímač akustického tlaku. Aby byl zvuk slyšitelný, musí intenzita, resp. akustický tlak, překročit určitou hodnotu, která se nazývá práh slyšitelnosti nebo sluchový práh. Práh slyšitelnosti je závislý na frekvenci, ale je také rozdílný podle toho, zda se jedná o čisté tóny nebo pásmový či širokopásmový šum. Závisí také na směru dopadu zvuku, a zda se jedná o práh monaurální (jedním uchem) nebo binaurální.

Naopak při určité velké intenzitě podnětu mohou být drážděny i hmatové receptory (kolem 120 dB), tomu odpovídá práh hmatový a při dalším zvýšení intenzity je již podráždění sluchového orgánu vnímáno jako bolest (okolo 140 dB). Zde se nachází práh bolesti. Při takovýchto intenzitách dochází poměrně rychle k trvalému poškození sluchového orgánu. Mezi prahem slyšitelnosti a prahem hmatovým se nachází oblast slyšitelnosti neboli sluchové pole. Ve sluchovém poli je možno najít oblast frekvencí a intenzit řeči a hudby, jak je znázorněno na obr. 40.



Obrázek č. 40: Sluchové pole [3]

3.6.2 Maskování

Maskování je jev, který hraje významnou roli v našem každodenním životě. Příklady tohoto jevu najdeme v pracovním prostředí, kdy silnější hluk jednoho stroje způsobí, že tišší stroj nelze kontrolovat sluchem, nebo ve venkovním prostředí, kde při průjezdu hlučného automobilu musíme zvýšit hlasitost našeho hlasu, aby nám bylo rozumět. Pro kvantifikování efektu maskování se nejčastěji určuje práh maskování, který odpovídá hladině akustického tlaku testovaného zvuku (nejčastěji čistého sinusového tónu) právě zamaskovaného maskujícím zvukem.

Fyziologická teorie maskování vychází z teorie slyšení, která předpokládá, že v závislosti na frekvenci přijímaného zvuku je rozkmitávána basilární membrána v různých vzdálenostech od oválného okénka. Přicházejí-li na sluchový orgán dva zvuky o shodných či blízkých frekvencích, dochází k jejich obtížnému rozlišování tj. maskování.

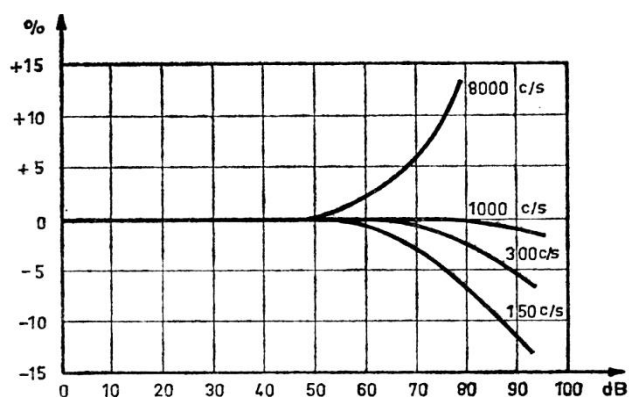
Efekt maskování se může projevat i v případě po sobě jdoucích zvuků. Nejčastěji předchází maskující zvuk maskovanému. Basilární membrána potřebuje na své zotavení

po vybuzení maskujícím zvukem jistý čas, než je schopna reagovat na vybuzení novým signálem. Hovoříme pak o postmaskovacím efektu.

3.6.3 Výška

Výška (pitch) zvuku je jednou ze základních subjektivních charakteristik sluchového vjemu. Je třeba rozlišovat mezi výškou jednoduchého tónu, složeného tónu (hudební tóny obvykle obsahují kromě základní harmonické i řadu vyšších harmonických) a výškou různých šumů a hluků. Zde se pro ilustraci zaměříme na výšku jednoduchého tónu.

Výška tónu přímo souvisí s jeho frekvencí, avšak není s ní totožná. Subjektivními testy se dá ukázat, že závisí i na jeho intenzitě, resp. hladině akustického tlaku (viz obr. č. 41). Posunutí výšky tónu související s hlasitostí je pro nízké frekvence směrem dolů a pro vysoké směrem nahoru.



Obrázek č. 41: Závislost výšky tónu na hlasitosti [4]

Podle způsobu určení rozlišujeme mezi absolutní výškou tónu, relativní výškou tónu a subjektivní výškou tónu. Absolutní výška tónu (sinusového) je dána jeho frekvencí. Určuje se pro vztahnou hladinu akustického tlaku 40 dB a jednotkou je Hz stejně jako pro objektivní (měřenou) frekvenci. Posluchači s tzv. absolutním hudebním sluchem umí určit absolutní výšku tónu, avšak obvykle ji zařadí podle hudební stupnice. Relativní výška tónu souvisí také s hudbou a je vyjádřena hudebním intervalem oproti základnímu tónu. Posluchač určuje tuto výšku srovnáním s nějakým referenčním tónem.

Z hlediska psychoakustiky je nejdůležitější subjektivní výška tónu, která se určuje pomocí subjektivního hodnocení tónů. Postup je takový, že posluchač má za úkol najít tón, o kterém se domnívá, že jeho výška je poloviční nebo dvojnásobná než výška nějakého vztahného

tónu. Tímto způsobem lze pak sestavit numerickou stupnici výšky tónu. Pro nízké kmitočty je tato stupnice shodná s objektivní frekvenční stupnicí, nad 1 kHz pak stoupá pomaleji. Jednotkou je 1 mel (ze slova melody). Za vztažený tón se bere tón o frekvenci 1 kHz nebo 440 Hz (normalizovaný tón a1). Poznamenejme, že subjektivní výška tónu neodpovídá ani frekvenční stupnici ani hudební stupnici.

3.6.4 Ostrost

Dříve byla snaha zahrnovat všechny psychoakustické znaky časově ustálených zvuků, které nebylo možno zahrnout pod hlasitost nebo výšku, pod společný znak barvu. Ukázalo se, že barvu zvuku však lze rozdělit do skupiny víceméně samostatných znaků, ze kterých je zřejmě nejvýraznější ostrost (sharpness). Velmi blízko ostrosti je také znak příjemnost, který je téměř opakem ostrosti.

Výzkumy ukázaly, že na sluchový znak ostrost má podstatný vliv tvar obálky spektra. Naopak jemná struktura spektra na ostrost v podstatě vliv nemá. Tedy hluk, který má spojitě spektrum, působí stejným dojmem ostrosti, jako zvuk složený z mnoha diskrétních složek, pokud spektrální obálka měřená po kritických pásmech je shodná. Nejvýznamnější pro ostrost je amplituda střední frekvence úzkopásmového šumu, resp. úzkopásmových šumů. Jednotkou ostrosti byl proto zvolen 1 acum (latinsky ostrý), který je definován jako ostrost úzkopásmového šumu o kritické šířce pásma se střední frekvencí 1 kHz a hladinou 60 dB. Pro nízké střední frekvence roste ostrost úměrně kritickopásmové stupnici (až přibližně do 3 kHz), pro vyšší frekvence pak roste dojem ostrosti rychleji. Proto jsou vyšší frekvence více odpovědné za ostrost zvuku. Šířka pásma také ovlivňuje pocit ostrosti. Rozšíříme-li pásmový šum odpovídající kritickému pásmu 1 kHz na pásmo do 10 kHz, vzroste pocit ostrosti. Naopak rozšíříme-li pásmo směrem k nižším frekvencím, ostrost klesá. Ostrost tedy můžeme snížit tím, že ke sledovanému zvuku přidáme nízkofrekvenční šum. To může vést k příjemnějšímu zvuku i při nárůstu hlasitosti.

3.6.5 Kolísavost a hrubost

V psychoakustickém hodnocení zvuků hraje také důležitou roli časová stabilita amplitudy zvuku. Ta se může periodicky měnit, tedy být amplitudově modulována. Při pomalých změnách do cca 20 Hz je výsledný zvuk hodnocen jako kolísavý a pro rychlejší změny je zvuk hodnocen jako hrubý nebo drsný.

Pro pomalé změny se proto zavádí veličina kolísavost (fluctuation strength), která má jako referenční hodnotu a jednotku 1 vacil kolísání tónu 1 kHz se střední hladinou akustického tlaku 60 dB, modulační frekvencí 4 Hz a hloubkou modulace 1 dB. Kolísavost závisí především na modulační frekvenci a na vnímané hloubce modulace, která je proti fyzické hloubce modulace omezená díky postmaskovacím jevům.

Při poslechu 100 % amplitudově modulovaného tónu 1 kHz od prakticky nulové modulační frekvence do modulace cca 300 Hz budeme nejprve zvuk hodnotit jako kolísavý. Dojem kolísavosti bude nejsilnější okolo 4 Hz. Při modulační frekvenci okolo 15 Hz se začne objevovat dojem hrubosti, který dosahuje svého maxima okolo 70 Hz. Kolem 300 Hz tento jev zaniká. Studie ukázaly, že změny amplitudy (modulace) nemusejí být periodické, proto jistý stupeň hrubosti vykazují např. i úzkopásmové šумы. Pro změny amplitudy v rozmezí od 15 Hz do 300 Hz se zavádí psychoakustická veličina hrubost (roughness), která je přímo úměrná vnímané hloubce modulace a modulační frekvenci. Vnímaná hloubka modulace klesá díky postmaskovacím jevům s rostoucí modulační frekvencí, proto je hrubost vnímána jako maximální právě okolo 70 Hz.

3.7 Kvalita zvuku

Pro člověka s funkčním sluchovým analyzátozem je sluchový vjem stálá individuální činnost, která mu umožňuje žít v dobré harmonii s okolním prostředím a ovlivňuje jeho chování. Umožňuje mu lokalizovat objekty i sebe v okolním prostoru, má funkci bezpečnostní (upozorňuje nás na nebezpečí) a v neposlední řadě je významným informačním kanálem. Sluchový vjem je dán kvalitou zvuku, která má z psychologického hlediska tři hlavní aspekty: vhodnost zvuku, příjemnost zvuku a identifikaci zvukového zdroje (nebo zdrojů).

Poměrně mladý obor s názvem kvalita zvuku se zabývá právě hodnocením zvuků z hlediska jejich příjemnosti, vhodnosti a jejich očekávání. Příjemnost (pleasantness), resp. nepříjemnost je sluchový znak, který je okamžitým hodnocením zvuku. Někdy bývá zaměňován s obtěžováním (anoyance), které obvykle kromě nepříjemnosti vyjadřuje i dlouhodobější stupeň vyrušování. Nepříjemnost i obtěžování jsou psychoakustické znaky, které se hodnotí pomocí stupnice (podobně jako známkování ve škole). Vhodností zvuku rozumíme slučitelnost mezi podnětem a vjemem. Očekávání pak souvisí s naší zkušeností,

jak očekáváme, že bude znít určitý zdroj. Tato zvuková typičnost může patřit nejen k určitému typu výrobků (jako např. podle zvuku rozeznáme různé domácí spotřebiče), ale také k výrobci. Asi nejznámějším příkladem jsou zvuky motorů jednotlivých sportovních automobilů.

Ukazuje se, že kvalita zvuku může být rozhodujícím faktorem při výběru mezi jinak srovnatelnými výrobky. Proto výrobci zařízení a strojů, jejichž hladina vyzářeného akustického výkonu již nejde dále rozumně snižovat, věnují značnou energii zlepšení psychoakustických znaků daného výrobku. Nejlepším příkladem jsou domácí spotřebiče, u kterých se dá ukázat, že dva výrobky se stejnou hladinou akustického výkonu A, jsou hodnoceny jako nepříjemný a méně nepříjemný, což si běžný zákazník pro sebe vyhodnotí jako hlučnější a méně hlučný. Vliv na prodejnost výrobku je pak zřejmý.

Hlavním úkolem akustiků pracujících s kvalitou zvuku je nalezení vazby mezi psychoakustickými veličinami, celkovým hodnocením kvality a fyzikálními veličinami, které lze technickými prostředky ovlivnit. Hodnocení kvality zvuku lze získat pouze pomocí subjektivních poslechových testů. Ty můžeme podle organizace rozdělit na analýzu slovního popisu, jednorozměrnou analýzu a vícerozměrnou analýzu. Vyhodnocování slovního popisu je velmi náročné, nicméně poskytuje přinejmenším vhodné termíny a slovní popisy pro jednorozměrnou i vícerozměrnou analýzu. Při jednorozměrné analýze posluchači hodnotí vliv určitého znaku (příjemnost, rušivost apod.) pomocí nějaké stupnice, například známkováním jako ve škole. U vícerozměrné analýzy se hodnotí více znaků podobně jako u jednorozměrné analýzy a zároveň se také vyhodnocuje statistický vztah mezi nimi. Pro technické aplikace je snaha nalézt objektivní míry, které by nahradily drahé a časově náročné subjektivní testování (alespoň ve stádiu návrhu). Některé tyto míry jsou normalizovány (hlasitost a ostrost), avšak většina dalších parametrů je obvykle vyvíjena pro potřeby konkrétního výrobku a pomocí subjektivních testů se zjišťuje jejich vypovídací hodnota.

4 HiFi – HIGH FIDELITY – vysoká věrnost, vysoká kvalita

Tato kapitola se věnuje pojmu HiFi a souvislostem v kvalitní produkci hudby – zejména se zde hovoří o důležitých parametrech a zároveň o experimentech, které byly vedeny ke zjištění hodnot. Kapitola čerpá převážně z literatury [4].

Pro hlubší pochopení souvislostí v HiFi produkci zvuku, opět doporučuji zájemcům zapůjčení této knihy.

S tímto označením se obvykle setkáváme u přístrojů, které nepatří mezi nejlevnější. Mezi jiné, podobné, označení patří: Professional, Studio, Transcription. Tyto termíny se obvykle užívají ve studiové technice, HiFi přístroje mohou dosahovat podobných kvalit, nicméně určité parametry jsou ve studiové technice jiné (např. ovládací prvky, životnost).

Definice High Fidelity nebyla doposud odsouhlasena. Různé organizace a normy stanovují specifikace HiFi přístrojů. Tyto specifikace se od sebe ale liší. Oxfordský slovník říká, že High Fidelity znamená: Complete, not deficient; faultless. V překladu: kompletní, bezchybný.

Hlavním zájmem HiFi reprodukce zvuku, hudby, je přinést posluchači potěšení z poslechu hudby. Není ale zcela jasné zdali instalace (veškeré věci, které souvisí s produkcí zvuku), sestavená podle vědeckých výzkumů přinese nejvíce uspokojující přednes. Taktéž není jasné, pokud daná instalace uspokojí daného posluchače, že bude uspokojen stejně či více, pokud vyměníme instalaci za lepší (navrženou podle objektivních technických specifikací).

Nicméně pokud máme hudební díla věrně reprodukovat, je zapotřebí aby instalace nebyla samotným „umělcem“ ale sloužila pouze k prostředkování kontaktu umělce a posluchače. Za tímto účelem se snaží firmy konstruovat přístroje s kvalitními parametry, které za normálních podmínek co nejméně modifikují původní zvuk. Zesilovače mohou mít ale různé možnosti vylepšení zvuku, které mohou mít i vědecké opodstatnění (korekce, loudness) a také nemusí (reverb, echo).

4.1 Frekvenční charakteristika

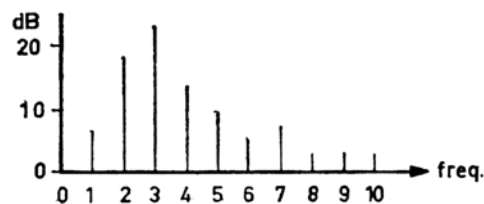
4.1.1 Spodní hranice frekvenční charakteristiky

Fundamentální složky hudebních nástrojů začínají od 16 Hz až po 4 kHz. Tabulka č. 5 ukazuje fundamentální frekvence různých hudebních nástrojů.

Hudební nástroj	Frekvence [Hz]
Varhany	16,351
Piano	27,5
Kontrafagot	30,868
Harfa	32,703
Harmonium	36,708
Kontrabas	41,203
Tuba	43,654
Zvonkohra	48,999
Bassaxofon	51,913
Bastrombon	55
Lesní roh	61,7
Violoncello	65,14
Tympány	87,307
Bas (hlas)	87,3
Klarinet	110
Trumpeta	146
Housle	196

Tabulka č. 5: Fundamentální frekvence vybraných hudebních nástrojů [4]

Nicméně skutečností je, že tato fundamentální složka může mít oproti dalším harmonickým značně nižší úroveň hlasitosti. Podívejme se na obrázek č. 42, který toto demonstruje na kontrabas.



Obrázek č. 42 : Hlasitost harmonických složek u kontrabasu [4]

Tyto nízké fundamentální složky nemusí být mnohdy ani slyšet a není nutné je zaznamenávat. Bylo zjištěno, že i když je fundamentální složka v záznamu potlačena, náš mozek si jí sám domyslí.

4.1.2 Horní hranice frekvenční charakteristiky

V tabulce č. 6 můžeme vidět, do jakých frekvencí sahají harmonické složky vybraných hudebních nástrojů.

Hudební nástroj	Frekvence [kHz]
Tympány	7
Bastuba	8
Zpěv	9,4
Harfa	11
Vyrhany	13
Xylofon	13
Saxofon	14
Violoncello	16
Housle	16
Činely	18

Tabulka č. 6 : Nejvyšší zaznamenané harmonické složky vybraných hudebních nástrojů [4]

Zde je zajímavé to, že tyto harmonické mají vysokou intenzitu. Např. 18 kHz složka činelů má stejnou intenzitu jako fundamentální složka na 680 Hz a je jenom o 8 dB slabší než harmonické složky mezi 1 kHz a 2 kHz. Vzhledem k citlivosti ucha na vyšších kmitočtech, je důležité, aby reprodukce byla bez jakýchkoliv omezení.

Nicméně je známo, že schopnost slyšet vysoké frekvence s věkem klesá. Malé děti slyší tóny do 20 kHz. Ve 20 letech bude horní limit okolo 16 kHz. V 40 letech 14 kHz a v 60 letech 10 kHz. Dalo by se usoudit, že HiFi instalace je pro mladého člověka, který jí může „plně využít“ příliš drahá anebo ji nedokáže patřičně ocenit a v dospělosti, kdy si ji člověk může dovolit koupit, už její kvality nedocení.

Pro vyřešení tohoto problému byl proveden experiment, kde dva vědečtí pracovníci v oboru elektroakustiky podstoupili slepý poslechový test. Jeden z pracovníků neslyšel frekvence nad 10 kHz a druhý na 11 kHz. Oba dokázali bezchybně určit, kdy byl zařazen do zvukové cesty filtr - dolní propust laděná na 11 kHz. Nedokázali přesně určit, co se se zvukem stalo, ale oba nezávisle tvrdili, že hudba (s filtrem) nezněla tak dobře.

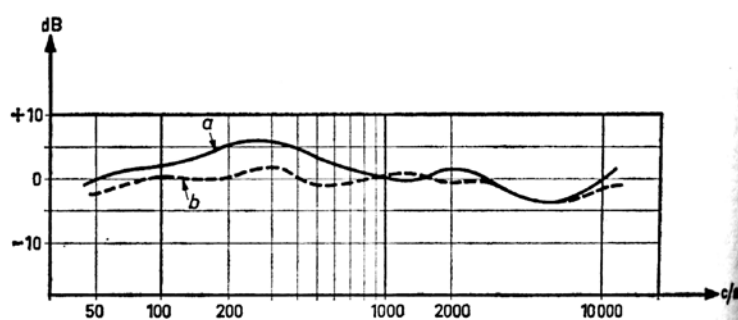
Přestože tyto frekvence tedy posluchač neslyší, je možné, že ve sluchovém aparátu vzbouzejí intermodulace. Je možné, že v tomto jevu hraje roli i jiný fenomén.

4.1.3 Povolené odchylky

Pro určení slyšitelné odchylky, změny v hlasitosti produkce, byl učiněn experiment, při kterém bylo zjištěno, že v případě možného přímého porovnání dvou zvuků, je člověk schopen rozlišit změnu o 1 dB a v případě, že přímé porovnání nemá, rozliší změnu až při 2 dB. Jedna z historických definic jednotky decibel hovoří o tom, že jeho rozměr byl zvolen též s ohledem na skutečnost, že lidský sluch zaznamená právě změnu o jeho jednu jednotku.

4.1.4 Frekvence a výkon

Podívejme se na obr. č. 43, který nám zobrazuje distribuci frekvencí vzhledem k relativní hlasitosti u 75 členného orchestru. Je správné uvažovat, že je potřeba mít dostatečný výkon v oblasti nižších frekvencí, nelze ponechat ke zkreslení vyšší tóny. U některých nástrojů je harmonická složka o vyšší frekvenci dokonce vyšší hlasitostí než složka fundamentální. Na obr. č. 43 je vidět, že maxima nejsou závislá na frekvenci a proto pokrytí přenosové frekvenční charakteristiky výkonem musí být rovnoměrné a dostatečné. Podobný požadavek platí na zkreslení, které má být co nejmenší.



Obrázek č. 43: Distribuce frekvence vzhledem k relativní hlasitosti u 75 členného orchestru
a) živá hudba b) záznam [4]

4.2 Výkon

Stanovit přesně potřebný výkon zesilovače není jednoduché. Klasická hudba klade vysoké nároky na výkon a to proto, že v koncertním sále může intenzita zvuku přesahovat až 100 dB. Máme zde mnoho proměnných veličin: Např. velikost sálu, dozvuk, účinnost reproduktorů a vlastní potřeba na danou intenzitu produkce hudby. Tabulka č. 7 zobrazuje, jaký výkon je potřeba pro věrné a správné vykreslení daného hudebního nástroje v domácím

pokoji s 5 % účinností reproduktoru. Kurzívou nadepsané složky se týkají produkce v koncertní síni.

Hudební nástroj	Špička elektrického výkonu [W]
Triangl	1
Klarinet	1
Lesní roh	1,1
Flétna	1,1
Pikola	1,7
Viola da gamba	3,1
Bastuba	4,1
Bassaxofon	5,8
Trumpeta	6,3
Piano	8,7
<i>Basové bubny</i>	<i>24 – 492</i>
<i>Trombon</i>	<i>128</i>
<i>15" činel</i>	<i>190</i>
<i>Vířivý buben</i>	<i>238</i>
<i>Varhany</i>	<i>252</i>
<i>15 čl. orchestr</i>	<i>180</i>
<i>75 čl. orchestr</i>	<i>1330</i>

Tabulka č. 7: Špičkový elektrický výkon daných hudebních nástrojů v domácím pokoji a v koncertní síti (pro reproduktor s 5% účinností) [4]

5 Práce s aplikací Audio Precision APx500

Tato kapitola se věnuje popisu řídicí aplikace pro audio analyzátor Audio Precision. Popis je stavěn tak, aby uživatel porozuměl základním ovládacím prvkům, možnostem nastavení, dovedl spustit test a uložit data. Pro plné využití možností aplikace je možno využít uživatelské příručky pro přístroje Audio Precision řady APx500.

Při práci na této kapitole jsem čerpal zejména z vlastních zkušeností s analyzátozem a využíval jsem manuál a firemní technické data-listy. Nevýhodou manuálu a podpůrných dokumentů je značná rozsáhlost. Jenom manuál má přes sedm set stran, vše je dostupné pouze v angličtině. Pro uživatele, který nepotřebuje dosáhnout úplně detailního zvládnutí práce s analyzátozem, bývá proto složitější zvládnout v kratším čase relevantních výsledků. Jak je zmíněno již v úvodu, cílem této bakalářské práce je vyjít právě těmto uživatelům vstříc.

Pro správné a účelné využití aplikace je potřeba si nejdříve určit jakou veličinu a jakým způsobem ji budeme chtít měřit. Tato teoretická příprava může být časově náročnější než samotné nastavení programu a měření.

Předpokládá se tedy, že obsluha má teoretické znalosti v oblasti audio měření a rozumí technickým pojmům užitých v audio technice (viz 2. kapitola této práce). Následující popisy slouží obsluze k rychlejšímu porozumění programu a jeho nastavení. Pro plné využití možností programu a analyzátoru je doporučeno konzultovat uživatelský manuál (736 stran), který lze najít v instalačním adresáři aplikace. Výchozí cesta k manuálu:

C:\Program Files\Audio Precision\APx500 4.5\ APx500_Users_Manual.pdf

5.1 Režim aplikace

Aplikace APx500 má dva pracovní režimy – Sequence Mode a Bench Mode. Pro analyzátor APx515 je dostupný pouze Sequence Mode, nicméně v laboratoři se nachází i APx525, který má Bench Mode dostupný.

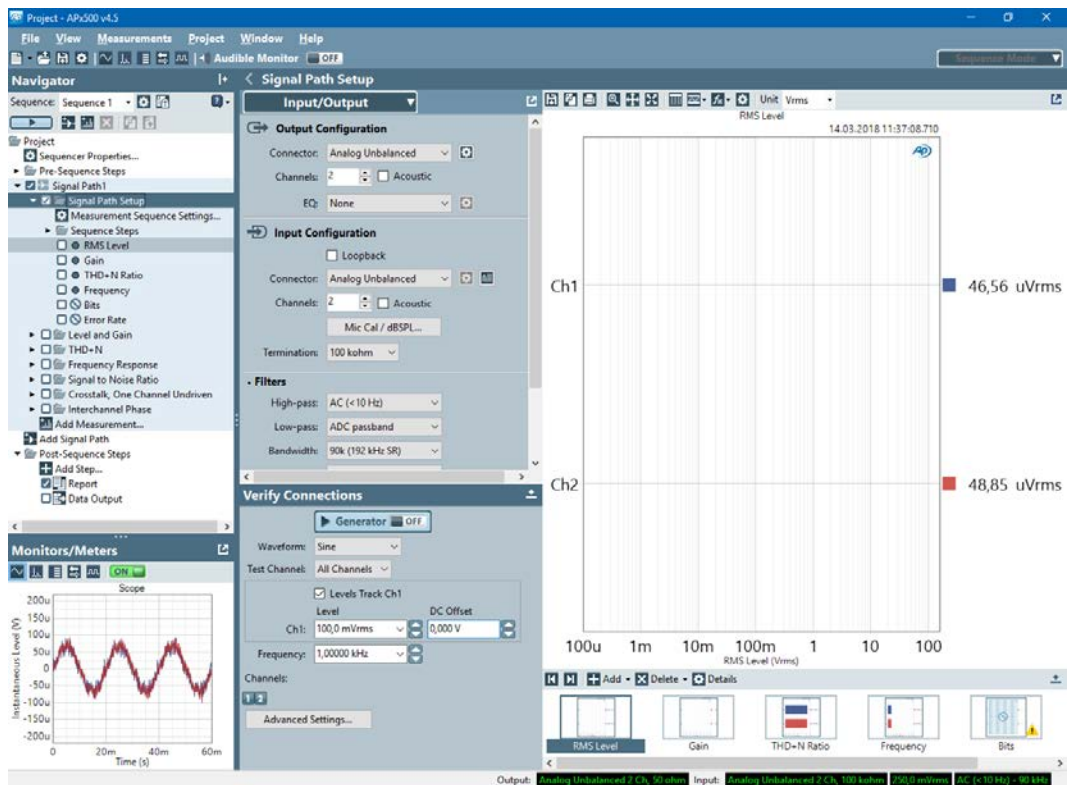
Sequence Mode, sekvenční režim, má primárně využití v sekvenčním spouštění testů, ale dovoluje spustit i jednotlivé testy v reálném čase. Tento režim je využit při praktických testech dále v této práci.

Bench Mode slouží k ladění parametrů daného DUT. Slouží primárně ke sledování více veličin v reálném čase, viz obr. č. 44. V této práci už nebude zmíněn.



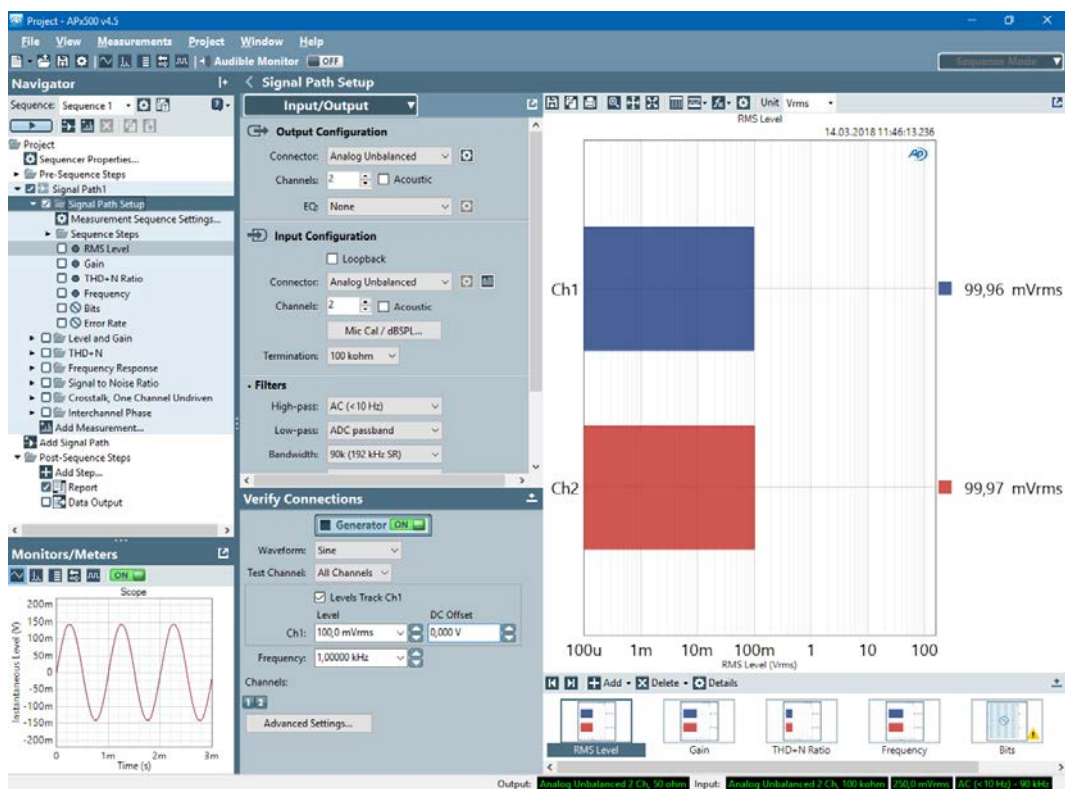
Obrázek č. 44: Bench Mode

5.2 Základní popis ovládacích prvků a nastavení



Obrázek č. 45: Výchozí projekt po spuštění aplikace

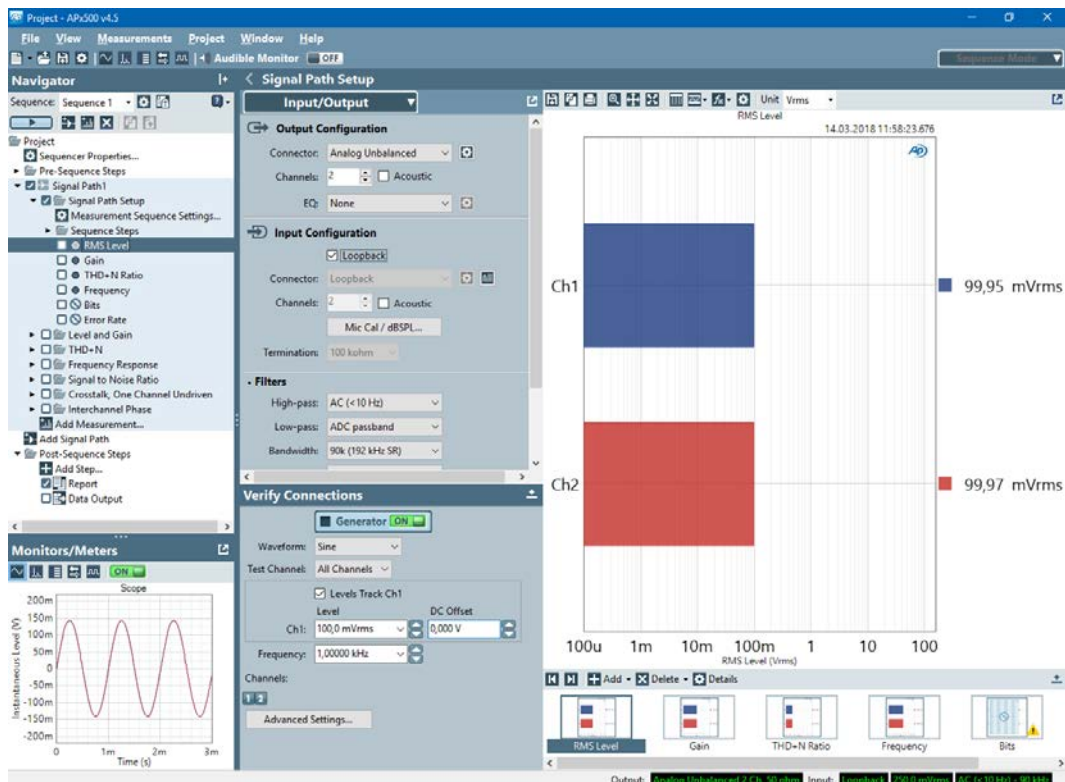
V pravé části programu (Navigator) se nachází předvolená nabídka testovacích procedur a jejich vybráním se přepneme na její nastavení. Při prvním spuštění je automaticky vybráno „Signal Path Setup“, což představuje nastavení signálové cesty. Toto nastavení vidíme ve středním sloupci. Pokud je zařízení připojeno např. k zesilovači, můžeme kliknout na tlačítko „Generator“, které spustí generátor signálu, což do DUT přivede signál a my v pravé části uvidíme hodnotu výstupního signálu z DUT, jako na obrázku č. 46.



Obrázek č. 46: Spuštění generátoru

V dolním levém rohu vidíme zobrazení signálu jako funkce času – osciloskop. Pomocí myši je možné změnit časovou základnu i vertikální zesílení (ukázáním na osy a pomocí kolečka myši). Je možné také jednoduše ukázat myši na vybraný bod a kolečkem myši si danou část přiblížit.

Dále je možné si ověřit, zdali samotný analyzátor funguje správně a to pomocí funkce „loopback“ – zapojení ve zpětné smyčce. Předpokládá se, že vstupy a výstupy nemají připojeny žádné vnější vodiče. Po kliknutí na políčko u „Loopback“ dojde k tomu, že výstupy a vstupy analyzátoru se uvnitř analyzátoru propojí. Dále zapneme generátor signálu. Můžeme tedy vidět, jak analyzátor pracuje a zdali výstupní veličiny odpovídají veličinám vstupním a jaké jsou hodnoty samotného analyzátoru v testech.



Obrázek č. 47: Analyzátor v režimu loopback

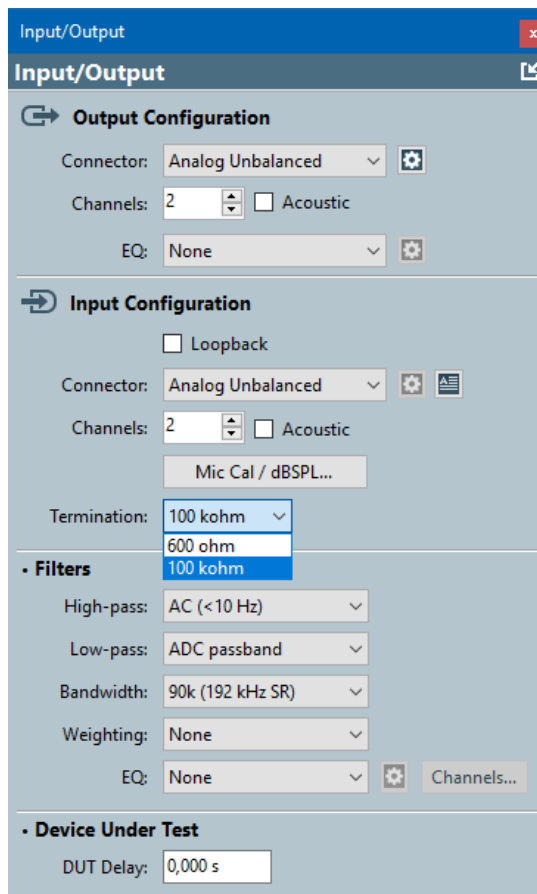
V dolním pravém rohu vidíme, jaký máme nastavený výstup (+ výstupní impedanci), vstup (+ vstupní impedanci), vstupní rozsah (analyzátor volí rozsah automaticky) a šířku pásma, viz obrázek č. 48.

Output: **Analog Balanced 2 Ch, 100 ohm** Input: **Analog Unbalanced 2 Ch, 100 kohm** **250,0 mVrms** **AC (<10 Hz) - 90 kHz**

Obrázek č. 48: Přehled nastavení výstupů a vstupů

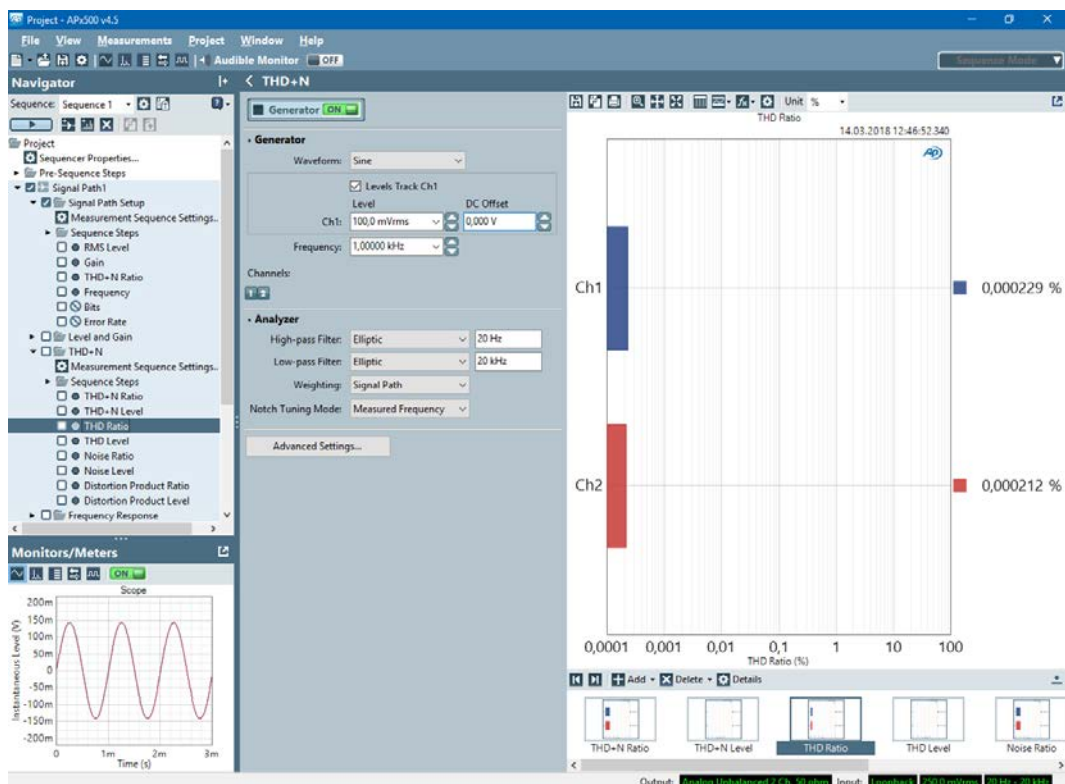
Na obrázku č. 49 vidíme nastavení signálové cesty. Analyzátor umožňuje volbu ze dvou zakončovacích impedancí na vstupu. Pro testy linkových signálů volíme impedanci 100 k Ω , v případě sluchátkových zesilovačů impedanci 600 Ω .

Na obr č. 49 taktéž vidíme nastavení horních a dolních propustí a nastavení šířky pásma (vzorkovací frekvence).



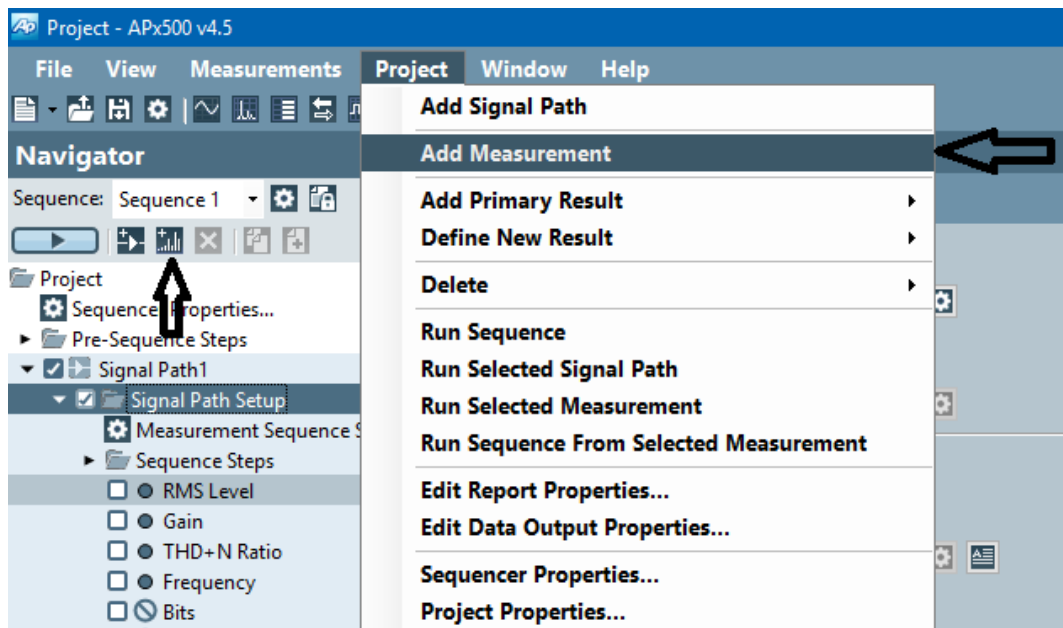
Obrázek č. 49: Nastavení výstupů, vstupů a filtrů

Jak bylo zmíněno, v levém sloupci se nachází testovací procedury. Ty je možno spouštět manuálně, kliknutím a spuštěním generátoru, popř. spuštěním pomocí tlačítka „Start“. Viz obrázek č. 50.

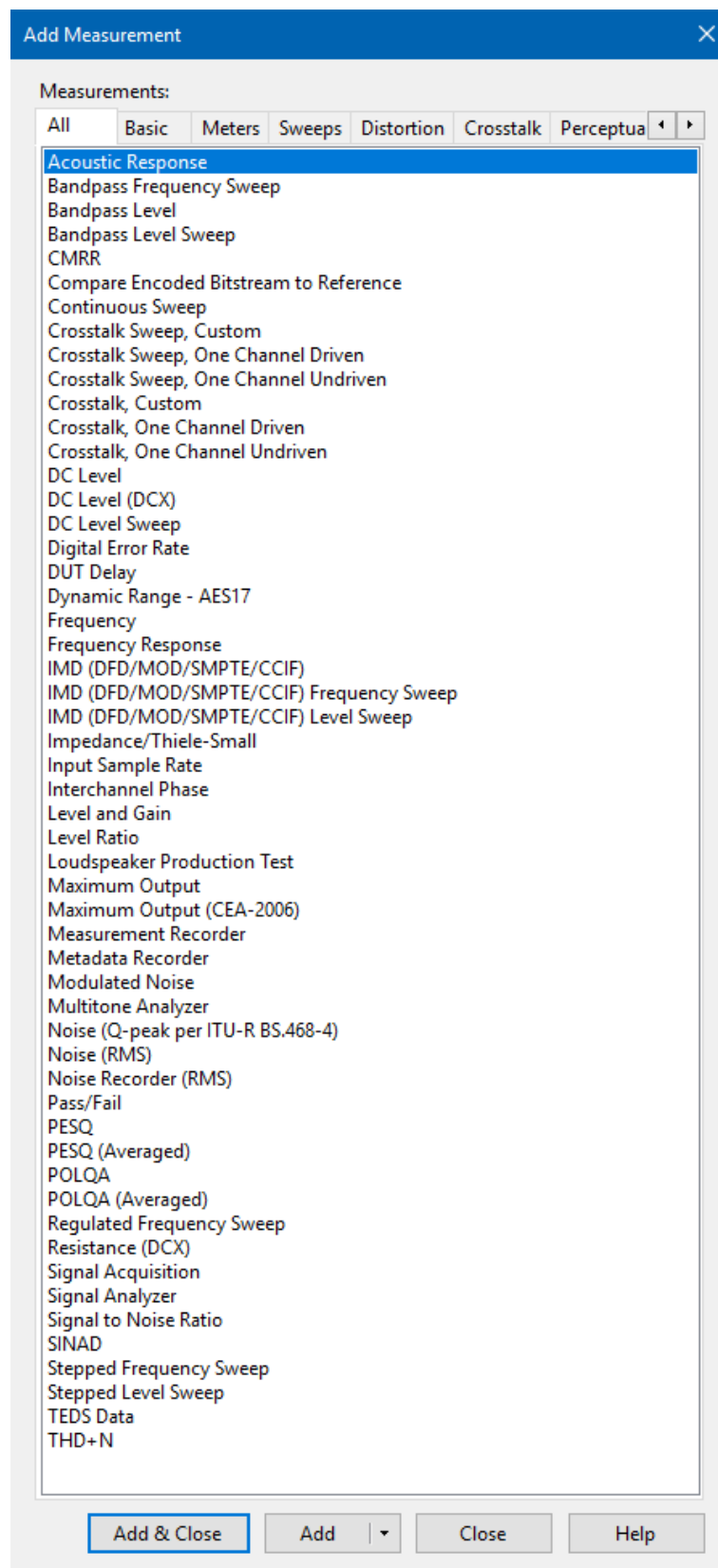


Obrázek č. 50: Manuální výběr testovací procedury

Pokud nám nějaká procedura v seznamu schází, je možné ji manuálně přidat kliknutím na tlačítko anebo z nabídky „Project“, viz obrázek č. 51. Zobrazí se nám seznam dostupných testů, viz obr. č. 52, ze kterého můžeme vybírat testy. Přidat test můžeme pomocí tlačítek anebo dvojklikem levého tlačítka myši. Je potřeba vědět, že není možno využít všechny testy, neboť daný přístroj nemusí být schopný dané testy vykonat. Některé testy vyžadují přikoupení licence. Ovšem některé testy, které je potřeba u APx515 zakoupit, umí lepší analyzátor APx525 už od počátku. Tyto možnosti se dají najít v manuálu.



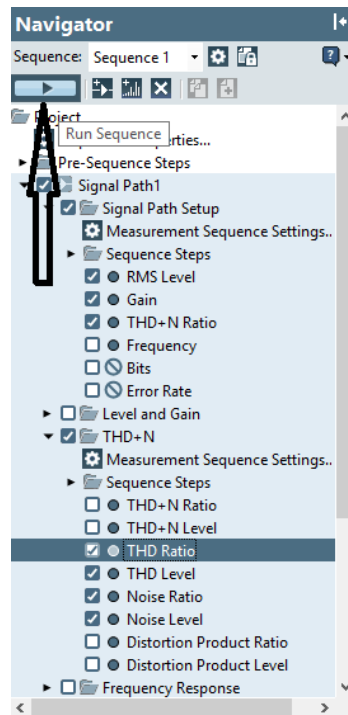
Obrázek č. 51: Přidání testovací procedury



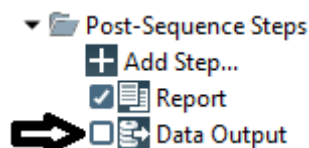
Obrázek č. 52: Dostupné měřicí procedury

Aplikace má v komerčním zázemí využití ve vývoji a výstupní kontrole. V případě výstupní kontroly je potřeba rychle a správně změřit určené parametry a zároveň popř. označit přístroj jako nesplňující výstupní kontrolu. Pro rychlé měření po sobě jdoucích několika přístrojů je tedy vhodné vybrat si testovací procedury a nastavit jejich parametry. Následně spustit sekvenci měření a analyzovat výstupní protokoly.

Nyní se podíváme, jak takový report vytvořit. Nejprve si vybereme (označením políčka) testy, které chceme zahrnout do sekvence. Následně si jednotlivé testy projdeme a zkontrolujeme nastavení. Poté už můžeme kliknout na symbol přehrávací šipky, viz obr. č. 53, která sekvenci testů spustí a na konci vygeneruje report v pdf, který si můžeme uložit a vytisknout. Pokud bychom chtěli surová data, ze kterých report vychází, je potřeba označit políčko „Data Output“, viz obrázek č. 54.



Obrázek č. 53: Spuštění sekvence



Obrázek č. 54: Získání surových dat

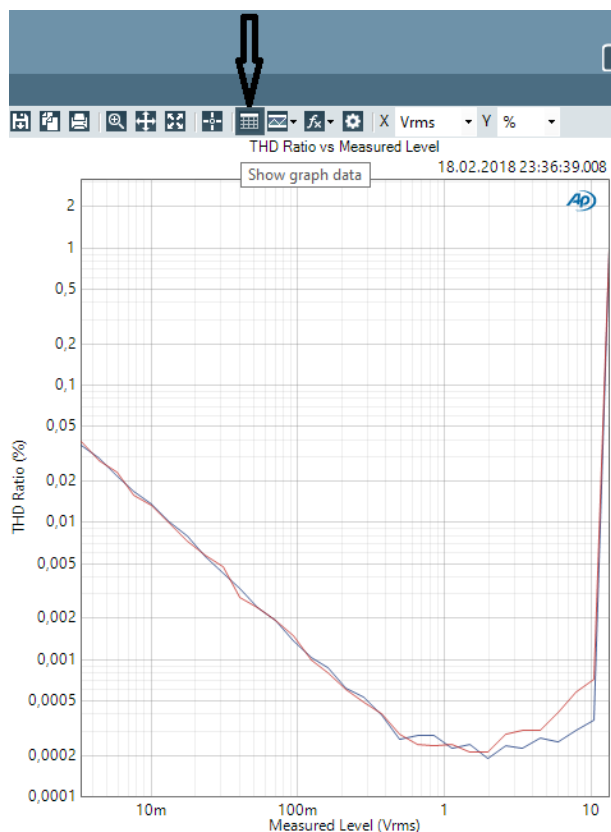
Tento postup je tedy vhodný pro měření v krátkém čase pro velké množství přístrojů, protože následně můžeme data z reportů použít a zpracovat (popř. se mohou analyzovat automaticky; podle pravidel). Nicméně u některých typů měření je výstupem graf, protože číselné hodnoty nejsou tak dobře pochopitelné (obecně závislosti, např. závislost zkreslení na vstupním signálu). Pokud bychom chtěli srovnat více přístrojů, je vhodnější výsledek daného testu uložit v číselných hodnotách, a až následně poté tyto data zpracovat v tabulkovém procesoru, kde vytvoříme graf, který bude zahrnovat soubor výsledků měření daný souborem měřených přístrojů. Aplikace nám dovoluje celkem 3 možnosti exportu.

1. *Export pomocí reportu – Data Output*
2. *Exportem souboru dat konkrétního souboru měření*
3. *Export pomocí uložení vybraných dat do schránky*

První možnost jsme již zmínili. V mém praktickém testování nebyla použita.

Druhá možnost má v současné době chybu v aplikaci. Výchozí výstupní formát je *.xlsx. Závadou je to, že vyexportovaná data jsou poškozena. Pokud změníme výstup na *.xls či *.csv, je výstup v pořádku a kompletní. Doporučuji formát *.xls. Tato možnost byla při praktickém měření využívána nejvíce. Pro export postačuje klepnout na tlačítko „export“ v daném souboru měření.

Ukážeme si jak postupovat pro třetí možnost. Pro demonstraci tohoto postupu jsem zvolil měření zkreslení jako závislost na vstupním napětí DUT. Předpokládejme, že test proběhl a máme změřeno DUT (v tomto případě předzesilovač). Jak můžeme vidět na obrázku č. 55, klikneme na ikonu, která nám zobrazí soubor dat. Viz obr. č. 56.



Obrázek č. 55: Ikona pro zobrazení souboru dat

Stepped Level Sweep

Import Export X Unit Vrms Y Unit % Points All Points Data Set Measured 1

	Ch1		Ch2	
	X	Y	X	Y
1	3,349m	0,036200	3,349m	0,038506
2	4,416m	0,029139	4,415m	0,027770
3	5,822m	0,021724	5,821m	0,022846
4	7,676m	0,016595	7,675m	0,015803
5	10,12m	0,013508	10,12m	0,013062
6	13,34m	0,009940	13,34m	0,009797
7	17,59m	0,007862	17,59m	0,007206
8	23,20m	0,005611	23,19m	0,005775
9	30,58m	0,004193	30,58m	0,004720
10	40,32m	0,003254	40,32m	0,002798
11	53,16m	0,002395	53,16m	0,002361
12	70,09m	0,001921	70,09m	0,001915
13	92,42m	0,001350	92,41m	0,001484
14	121,8m	0,001036	121,8m	0,000987
15	160,7m	0,000863	160,6m	0,000803
16	211,8m	0,000615	211,8m	0,000607
17	279,3m	0,000536	279,3m	0,000491
18	368,2m	0,000395	368,2m	0,000401
19	485,8m	0,000264	485,6m	0,000283
20	640,5m	0,000279	640,3m	0,000239
21	844,5m	0,000282	844,3m	0,000236
22	1,113	0,000224	1,113	0,000243

THD+N Level vs Measured Level THD Ratio vs Measured Level THD Level vs Measured Level SINAD SINAD

Obrázek č. 56: Zobrazení dat vybraného testu

V dolních záložkách si najdeme test, který je předmětem našeho zájmu. Data si vybereme pomocí myši a uložíme do schránky pomocí zkratky CTRL+C, popř. kliknutím na ikonu

napravo od tlačítka „Export“. Před tímto exportem si můžeme změnit jednotky obou os podle potřeby. Dále je možné zmenšit počet bodů (počet jednotlivých měření). Po vložení dat do tabulkového procesoru se postupuje standardním postupem pro tvorbu grafu.

6 PRAKTICKÉ UKÁZKY MĚŘENÍ S APx515

Tato kapitola se věnuje využití audio analyzátoru v praxi. Jsou zde popsána zapojení pro daný typ měřeného zařízení a doporučená nastavení měřicích procedur. Autor předpokládá u čtenářů využití informací obsažených v teoretických kapitolách této práce. Podpůrným materiálem byla uživatelská příručka pro audio analyzátory Audio Precision řady APx500.

6.1 Potřebné pomůcky

- *Počítač s nainstalovanou aplikací APx500*
- *Audio analyzátor APx515*
- *USB kabel k propojení APx515 s PC*
- *napájecí kabel*
- *propojovací kabely*
- *adaptéry/přechodky (BNC-RCA, BNC-JACK 3.5mm)*
- *odporová zátěž pro měření výkonových zesilovačů*
- *měřené zařízení*

V případě propojovacích kabelů využijeme kvalitní kabely, jasného původu, od renomované firmy, protože kvalita kabelů může ovlivnit měření.

Většina komerčních zařízení používá nesymetrické konektory RCA (cinch). Z tohoto důvodu se zapojuje vedení takto: kabel BNC->RCA, popř. kabel BNC-BNC -> adaptér BNC-RCA. V mých měřeních se nevyskytl ani jeden přístroj se symetrickým připojením a z toho důvodu bude v ukázkách pouze nesymetrické připojení. V určitých konkrétních případech se může postupovat jinak, viz konkrétní příklady níže.

6.2 Popis audio analyzátoru Audio Precision APx515

6.2.1 Konektory

Tento audio analyzátor disponuje těmito vstupy a výstupy:

Analogové:

- *BNC 2x – Nesymetrický stereo vstup a výstup - Unbalanced Stereo Input and Output*
- *XLR 2x – Symetrický stereo vstup a výstup - Balanced Stereo Input and Output*

Digitální

- *BNC 2x – Nesymetrický stereo vstup a výstup - Unbalanced Input and Output*
- *XLR 2x – Symetrický stereo vstup a výstup - Balanced Input and Output*
- *TOSLINK 2x – Optický vstup a výstup – Optical Input and Output*

Přístrojový

- *RS232 2x – AUX Control Out and In*
- *Zemní svorka 2x*

Napájení

- *IEC Socket C14*

Všechny přípojné body jsou vhodně popsány. Analyzátor má pouze jeden uživatelsky použitelný spínač a to je napájecí vypínač.

6.2.2 Klíčové parametry

Zbytkové THD+N (20 kHz BW)

-102 dB + 1,4 uV

Typické <- 106 dB (1 kHz, 2 V)

Generátor:

Frekvenční rozsah: 0,1 Hz – 80,1 kHz

IMD testovací signály: SMPTE, MOD, DFD

Maximální amplituda (symetricky): 16 V

Přesnost: +-0,05 dB

Plochosť (5 Hz – 20 kHz): +- 0,01 dB

Analyzátor:

Maximální hodnota vstupního signálu: 125 Vpk Analog / 10 Vpp Digital

Maximální šířka pásma: >90 kHz

Měření IMD: SMPTE, MOD, DFD

Amplitudová přesnost (1 kHz): +- 0,05 dB

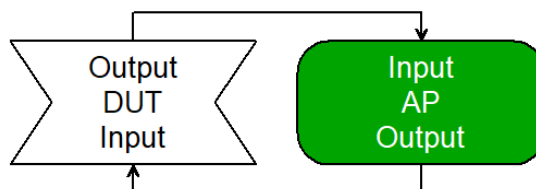
Amplitudová plochosť (10 Hz – 20 kHz): +- 0,01 dB

Zbytkový vstupní šum (20 kHz BW): 1,4 uV

6.3 Měření předzesilovače

6.3.1 Zapojení

Měření je principiálně velmi jednoduché. Viz obr. č. 57. (Pro jeden kanál)



Obrázek č. 57: Principiální zapojení pro měření předzesilovače

Jak můžeme vidět, analyzátor je zapojen v přímé smyčce s předzesilovačem. Předzesilovač by měl mít vypnuty korekční filtry (nastaveny na 0, popř. „defeat“), pokud nejsou předmětem měření. Volič hlasitosti by měl být nastaven na maximum. Praktickou ukázkou zapojení vidíme na obr. č. 58.

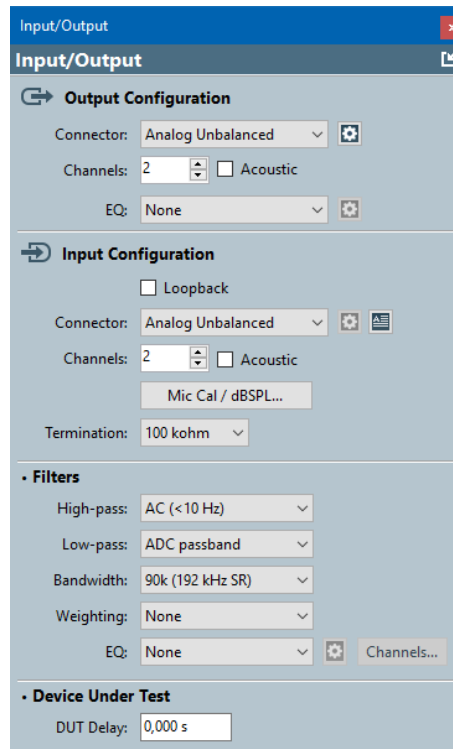


Obrázek č. 58: Ilustrace měření předzesilovače

6.3.2 Nastavení a výběr testů

Nyní se podíváme na výčet audio testů a jejich nastavení, které jsem vybral pro testování předzesilovačů.

Nastavení signálové cesty viz obr. 59.



Obrázek č. 59: Nastavení signálové cesty pro měření předzesilovače

6.3.2.1 THD+N – THD+N Ratio, THD Ratio

Waveform: Sine

Level: 315 mV

DC Offset: 0 V

Frequency: 1 kHz

High-pass Filter: Elliptic 20 Hz

Low-pass Filter: Butterworth 20 kHz

Weighting: Signal path

Notch Tuning Mode: Measured Frequency

6.3.2.2 Frequency Response – Gain, Deviation (20 Hz – 20 kHz) + (20 Hz – 80 kHz)

Start Frequency: 20 Hz

Stop Frequency: 80 kHz

Level: 315 mV

Offset: 0V

Pre-Sweep: 100 ms

Sweep: 350 ms

Extend Acquisition By: 50 ms

6.3.2.3 Crosstalk, One Channel Undriven – Crosstalk

Level: 315 mV
DC Offset: 0 V
Frequency: 10 kHz

6.3.2.4 Signal to Noise Ratio – Signal to Noise Ratio

Waveform: Sine
Level: 315 mV
DC Offset: 0 V
Frequency: 1 kHz
High-pass Filter: Elliptic 20 Hz
Low-pass Filter: Butterworth 20 kHz
Weighting: Signal Path

6.3.2.5 Noise (RMS) – Noise Level

Waveform: Noise
Noise Shape: White
Level: 0 V
Offset: 0 V
High-pass Filter: Elliptic 20 Hz
Low-pass Filter: Butterworth 20 kHz
Weighting: Signal Path

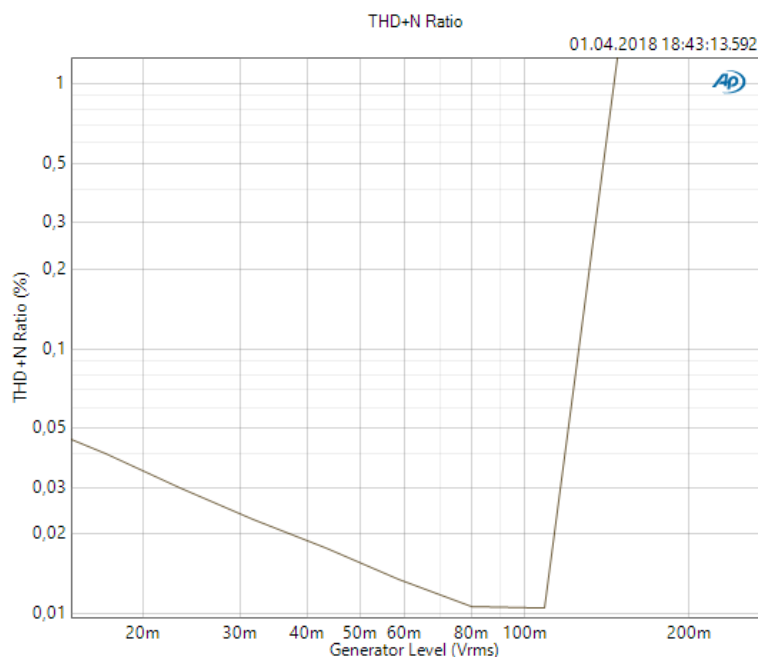
6.3.2.6 Stepped Frequency Sweep – Deviation (20 Hz – 20 kHz), THD Ratio

Waveform: Sine
Start Frequency: 20 Hz
Stop Frequency: 20 kHz
Sweep: Logarithmic
Points: 100
Level: 315 mV
Offset: 0V
EQ: None
High-pass Filter: Elliptic 20 Hz
Low-pass Filter: Signal Path
Weighting: Signal Path
Phase Ref Channel: Ch1

6.3.2.7 Stepped Level Sweep – THD Ratio

Waveform: Sine
Start Level: 1 mV
Stop Level: 4 V
Sweep: Logarithmic
Points: 100
Frequency: 1 kHz
Offset: 0V
High-pass Filter: Elliptic 20 Hz
Low-pass Filter: Elliptic 20 kHz
Weighting: Signal Path
Notch Tuning Mode: Measured Frequency

Doporučuji spustit jako první test Stepped Level Sweep (THD+N), pomocí kterého můžeme najít vstupní citlivost zařízení. Na obrázku č. 60 vidíme, že vstupní citlivost je cca 100 mV. Po zjištění vstupní citlivosti, toto napětí nastavíme na všechny testy. Pokud není vstupní citlivost (úroveň testovacího signálu) správně nastavena, měření podá jiné parametry. Obvyklé hodnoty vstupní citlivosti byly zjištěny v praktické části – kap. 7.1.



Obrázek č. 60: Hledání vstupní citlivosti

6.3.3 Měření loudness křivky

Loudness, je typ ekvalizace (fyziologický regulátor), který v praxi, podle natočení potenciometru hlasitosti, zesiluje basové a někdy i vyšší frekvence cca pouze v první čtvrtině dráhy potenciometru (záleží na umístění odbočky potenciometru). Tato funkce vychází z nižší citlivosti sluchového systému na určité frekvence na nízké hlasitosti - viz kap. 2.1.7, obr č. 8. Vzhledem k tomu, že hladina zesílení nízkých, popř. vyšších frekvencí, závisí na natočení potenciometru, stanovíme si natočení potenciometru, které budeme vždy nastavovat. V našem případě jsem nastavil vždy ukazatel potenciometru vodorovně doleva, tzn. obvykle na číslo 2.

Pro měření uijeme tento test:

Frequency Response – Relative Level

Start Frequency: 20 Hz

Stop Frequency: 20 kHz

Level: 315 mV (nastavíme podle vstupní citlivosti)

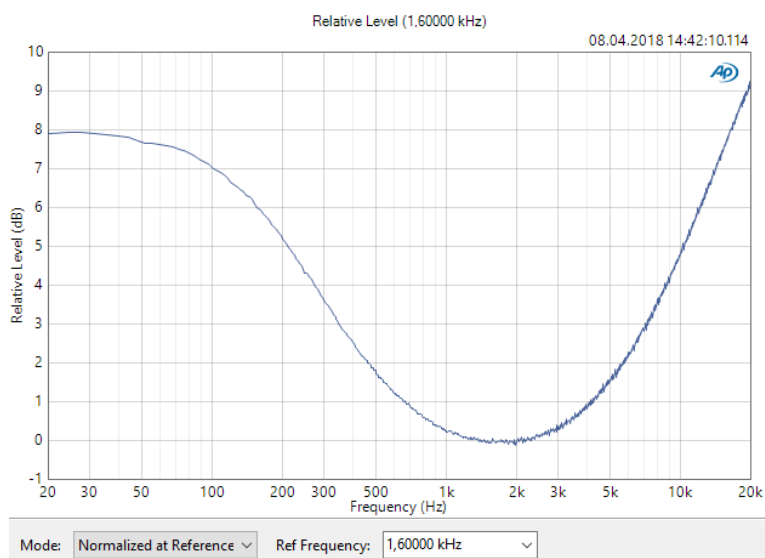
Offset: 0V

Pre-Sweep: 100 ms

Sweep: 350 ms

Extend Acquisition By: 50 ms

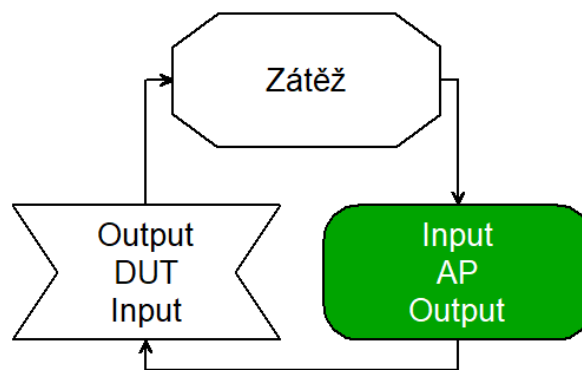
Jako referenční frekvenci (relativní zesílení 0 dB), nastavíme frekvenci ve střední oblasti, kde se nachází minimum funkce grafu. Pro snadnější vyhledání toho bodu, můžeme využít kurzoru.



Obrázek č. 61: Měření loudness křivky

6.1 Měření výkonového (koncového) a integrovaného zesilovače

Pro měření zesilovačů se vztahují úplně stejné měřicí procedury a jejich nastavení, pouze se mění vnější zapojení. Na výstup zesilovače je připojena odporová a současně i vodiče pro vstup do analyzátoru. Viz obr. č. 62.

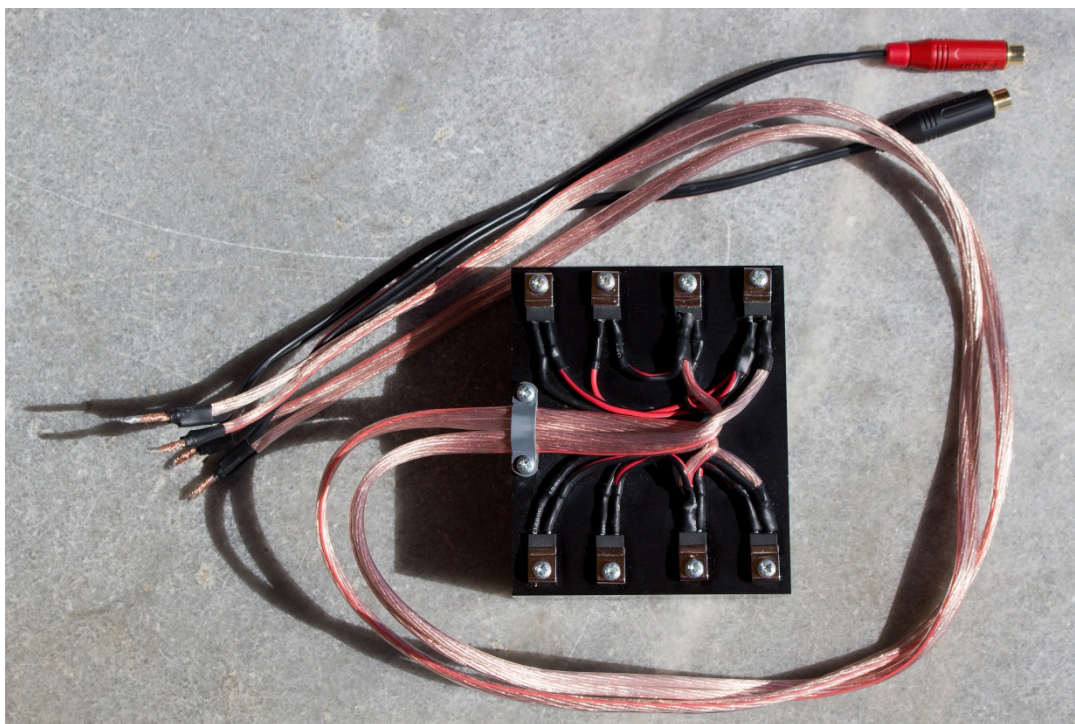


Obrázek č. 62: Principiální zapojení pro měření výkonového zesilovače

Pro účel měření výkonových zesilovačů byla během psaní bakalářské práce zhotovena zátěž. Tato zátěž se skládá z následujících součástí:

- 8x Rezistor ARCOL AP851-4R7J – 4,7 ohm - nízkoindukční – 50W, TO220
- 1x Chladič ALUTRONIC PR173/50/SE – 1,8K/W – 50x100x40mm – 274 g
- Vodiče 2x 2.5mm²
- Vodiče 2x 1.0mm²
- 2x Konektory - AMPHENOL ACJR
- 4x Kabely - GOOBAY 50047 – BNC-RCA – 50 ohm – 1 m

Zhotovenou zátěž můžeme vidět na obrázku č. 63.



Obrázek č. 63: Odporová zátěž

Tato zátěž je konstruována na nominální výkon 200 W na kanál. Dohromady tedy 400 W (při sériovém zapojení zátěže pro mono – 9,4 ohm). Krátkodobě umožňuje větší zatížení než nominální. Při delším měření je vhodné kontrolovat teplotu rezistorů, aby nedošlo k jejich zničení.

Upozornění

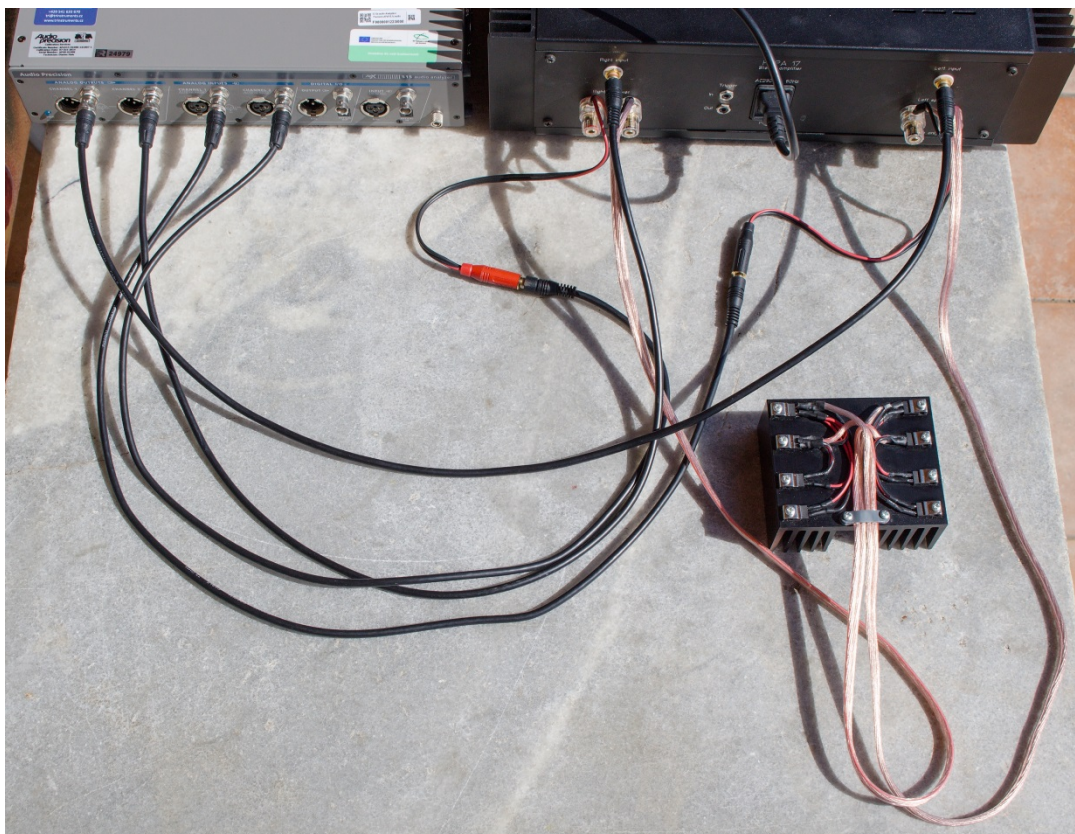
DUT musí být při připojování měřicích vodičů vypnuté!

Je nutné dbát na dodržení správné polarity při zapojování zátěže. Při nerespektování polarity může dojít k poškození DUT, případně i měřicího zařízení!

Vodiče zátěže musí být k DUT kvalitně připojeny! Zejména svorka minus, vzhledem k tomu, že proud může téci přes minus signálových kabelů skrze analyzátor a proto může dojít k poškození audio analyzátoru i DUT!

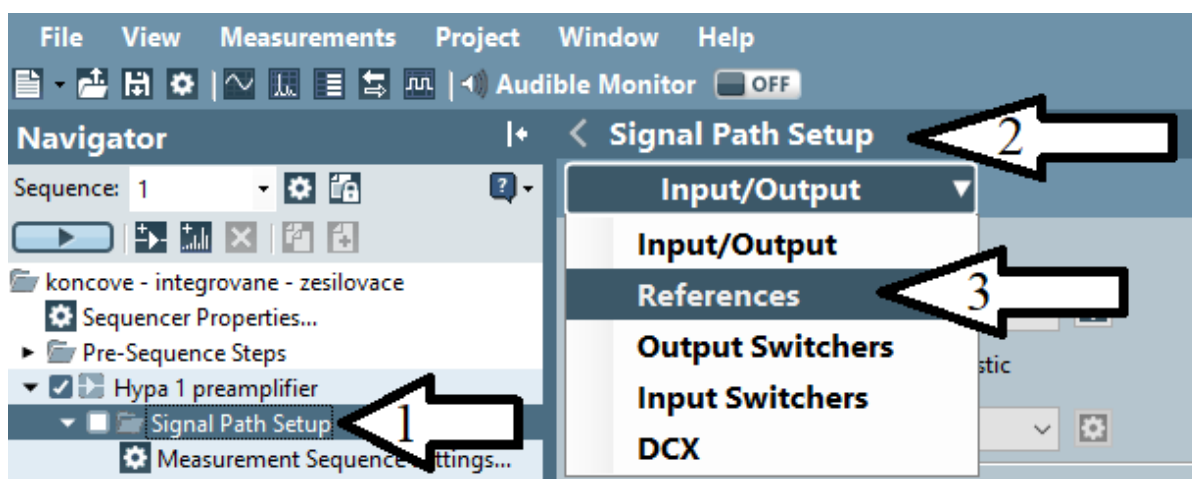
Nesmí být překročeno max. dovolené vstupní napětí analyzátoru 125 V_{pk}!(platí pro APx515) a zároveň je doporučeno nepřekračovat výkon do zátěže nad 200W na kanál.

Na obrázku č. 64 můžeme vidět příklad měření koncového zesilovače CustomWorks Hypa 17.



Obrázek č. 64: Měření výkonového zesilovače CustomWorks Hypa 17


Pokud si budeme chtít v aplikaci APx500 nechat zobrazit i pravdivou informaci o výkonu, je nutné nastavit odporovou referenci. Toto nastavení najdeme v kategorii *Signal Path Setup*, viz obr. č. 65 a č. 66.



Obrázek č. 65: Nastavení referencí v aplikaci APx500

• Input References

	dBr	Reference Offset
dBrA:	1,000 Vrms	0,000 dB
1,000 Vrms = 0,000 dBrA		
dBrB:	1,000 Vrms	0,000 dB
1,000 Vrms = 0,000 dBrB		
Set dBr...		
	dB SPL	Calibrator Level
dB SPL1:	10,00 mVrms	94,000 dB SPL
10,00 mVrms = +94,000 dB SPL1		
dB SPL2:	10,00 mVrms	94,000 dB SPL
10,00 mVrms = +94,000 dB SPL2		
Mic Cal / dB SPL...		
dBm:	600,0 ohm	
W(watts):	4,700 ohm	



Obrázek č. 66: Nastavení odporové reference pro měření výkonu

6.2 Měření sluchátkového zesilovače

Pro měření sluchátkového zesilovače se aplikují stejné jako pro předchozí procedury. Je zde ale rozdíl v zatěžovací impedanci. Sluchátka se vyrábějí v impedanci několika ohm (obvykle se jedná o sluchátka s vysokou citlivostí) až po sluchátka s impedancí v řádech stovek ohm. Nelze tedy přímo rozhodnout, jaká impedance je pro měření vhodná. Doporučuji užít zatěžovací impedanci 600 ohm, která je implementována v analyzátoru APx515.

6.3 Měření DAC

Měření D/A převodníků lze rozdělit do dvou typů podle zapojení s analyzátozem.

- *Převodník je ve smyčce s analyzátozem*
- *Převodník není ve smyčce s analyzátozem*

V této práci se věnuji pouze druhé variantě, a to z toho důvodu, že všechna zařízení, která byla testována, neměla možnost přímého zapojení s D/A (zařízení neměla digitální vstup typu koaxiál/optický). Druhou variantou se rozumí to, že dané zařízení s D/A převodníkem (mobilní telefon) má možnost spuštění digitálního souboru. Dané zařízení tedy v testu

přehrává digitální soubor s testovacím signálem, který má vysokou kvalitu a analyzátor daný signál očekává. Je tedy možné ručně vytvořit jeden digitální soubor, který dané zařízení přehraje a analyzátor změří jeho základní parametry automaticky, jako v předchozích příkladech. Podstatné je, že testovací soubory musí být v bezztrátovém formátu (např. WAV). Pro měření parametrů, kde se mění amplituda v závislosti na čase, doporučuji oddělení měření *Measurement Recorder*.



Obrázek č. 67: Měření mobilního telefonu Apple iPhone SE

Pro test zařízení jsem si vytvořil testovací signály v aplikaci APx500 a v programu Audacity.

- *Stepped frequency sweep v aplikaci APx500 pro měření frekvenčních závislostí*
- *Log level sweep od 0,1 po 1,0 dBFS o fr. 10 kHz pro měření závislostí na úrovni*
- *1 kHz 1 dBFS sinus pro měření SNR*

6.4 Měření ADC

Měření A/D převodníků se týká audio zařízení, která digitalizují analogový zvuk. Stejně jako v předchozím případě lze rozdělit měření na dvě varianty:

- *Převodník je ve smyčce s analyzátorem*
- *Převodník není ve smyčce s analyzátorem*

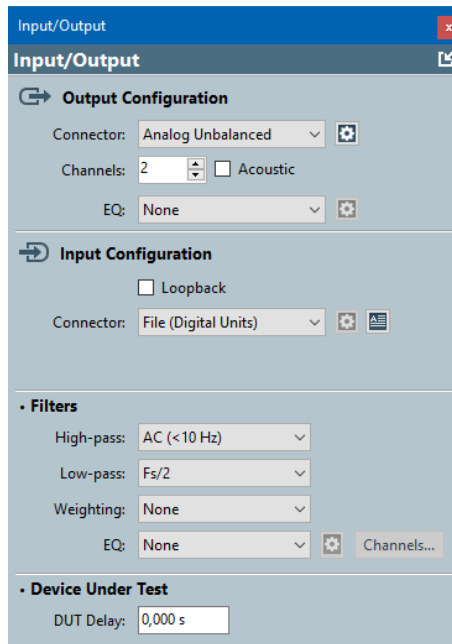
Vzhledem k tomu, že nebyl k dispozici přístroj pro první zapojení, ukáži příklad na druhém zapojení – zvuková karta v počítači (opět zde hovoříme o měření celého zařízení, nikoliv pouze převodníku). V tomto případě je z generátoru audio analyzátoru přiveden testovací analogový signál na vstup zvukové karty, která zvuk digitalizuje. V počítači je tento signál zaznamenan a uložen

Nastavení záznamu a uložení:

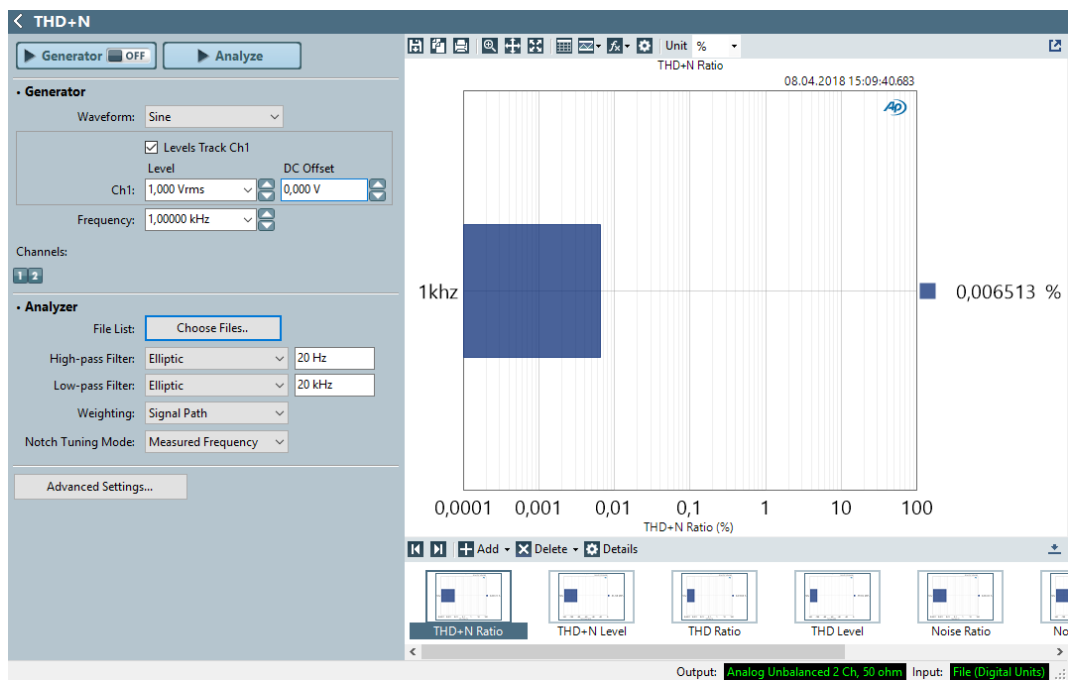
- *bitové rozlišení 16, 24, 32*
- *vzorkovací frekvence nejvyšší možná – 192kHz, popř. nižší*
- *bezztrátový formát WAV*

Pro zaznamenání a uložení signálů můžeme použít např. freeware aplikaci Audacity. Tento soubor se v aplikaci APx500 následně vloží jako vstupní signál pro test. V daném testu klikneme na *Choose Files* a přidáme soubor. Dále klikneme na *Analyze*, pro spuštění analýzy. Aplikace signál zanalyzuje a zobrazí výsledek testu.

Nastavení vstupu a výstupu APx vidíme na obr. č. 68 a ukázkou analýzy souboru na obr. č. 69.



Obrázek č. 68: Nastavení signálové cesty pro měření zařízení ADC



Obrázek č. 69: Výsledek analýzy zařízení s ADC

7 VÝSLEDKY MĚŘENÍ S APX515

Tato kapitola prezentuje výsledky měření na vzorku zařízení. Celkem bylo změřeno 36 zařízení, jejichž vybrané parametry zde nalezneme.

7.1 Měření zesilovačů

V tomto oddíle najdeme předzesilovače, integrované zesilovače (kombinace předzesilovače a výkonového zesilovače), receivers (integrovaný zesilovač s FM rádiem) a koncové (výkonové) zesilovače.

Všechny přístroje vyrobené v minulém století, prošly v nedávné době mou kontrolou a ve většině případů bylo potřeba servisního zásahu. Nejčastěji se jednalo o výměnu relé, nastavení klidových proudů, vyčištění trimrů a potenciometrů, výměna kondenzátorů. Následně byly přístroje otestovány a změřeny. Vzhledem k tomuto přístupu, by přístroje měly mít tovární parametry.

Z výsledků můžeme vidět, že vládnoucí zemí ve výrobě zesilovačů bylo Japonsko, kde se vyráběly na zakázku přístroje různých značek (např. BASF, Denon, Dual, Hitachi, JVC, Sony, Technics, Yamaha).

Mezi měřenými přístroji jsou měřitelné rozdíly. Tyto rozdíly je možné spatřit v souhrnné tabulce v kapitole 5.1.1. Zde jsou přístroje seřazeny podle THD+N (ze dvou kanálů je pro srovnání vybrán ten horší). Zeleně jsou označeny 3 nejlepší přístroje v daném měření a červeně 3 nejhorší přístroje v dané kategorii.

Pro integrované zesilovače a receivers byly zjištěny tyto hodnoty:

<i>Gain</i>	$(40,0 \pm 0,4)$ [dB]
<i>Odchylka frekvenční charakteristiky (20 Hz – 20 kHz)</i>	$(0,5 \pm 0,9)$ [dB]
<i>Odchylka frekvenční charakteristiky (20 Hz – 80 kHz)</i>	$(1,7 \pm 0,3)$ [dB]
<i>Přeslech @10 kHz</i>	$(-47,9 \pm 2,2)$ [dB]
<i>Odstup signálu od šumu</i>	$(87,7 \pm 1,2)$ [dB]
<i>Šum</i>	$(0,6 \pm 0,6)$ [mV]

Tabulka č. 8

V souhrnné tabulce, tabulka č. 10, můžeme vidět, že měřený výkon je někdy vyšší a někdy nižší než měřený (max. výkon). To je dáno dvěma parametry:

- *udávaný výkon je do jiné zátěže, než se kterou měříme*
- *udávaný výkon je specifikován při obvykle vyšším zkreslení*

V mém měření byl výkon a další parametry zařízení měřeny při vstupní citlivosti (tzn. nedocházelo k přebuzení zesilovače). Ve specifikacích zesilovačů od výrobců jsem se setkal s THD od 0,1 % po 100 %.

Bylo zjištěno, že vstupní citlivost lze rozřadit do několika kategorií

- 100 mV (nejčastěji používaná hodnota v komerční sféře)
- 150 mV (druhá nejčastěji používaná hodnota v komerční sféře)
- 1000 mV (hodnota využívaná obvykle v profesionální oblasti)

Je potřeba podotknout, že byl měřen velmi malý vzorek koncových zesilovačů (1 ks) a navíc se jedná o přístroj vyšší jakosti. Stejný komentář přísluší i předzesilovačům (2 ks), viz tabulka č. 9 níže. Nadto se jedná o stejné modely (ale jiného výrobce – tovární výroba/domácí výroba ze stavebnice od výrobce, ale s výběrovými součástkami).

Výsledky předzesilovače CustomWorks Hypa 1 (tovární výrobek/domácí stavba)

<i>Gain</i>	$(10,3 \pm 0,3)$ [dB]
<i>Odchylka frekvenční charakteristiky (20 Hz – 20 kHz)</i>	(0 ± 0) [dB]
<i>Odchylka frekvenční charakteristiky (20 Hz – 80 kHz)</i>	$(0,1 \pm 0)$ [dB]
<i>Přeslech @10 kHz</i>	$(-89,4 \pm 9,7)$ [dB]
<i>Odstup signálu od šumu</i>	$(107,6 \pm 3,7)$ [dB]

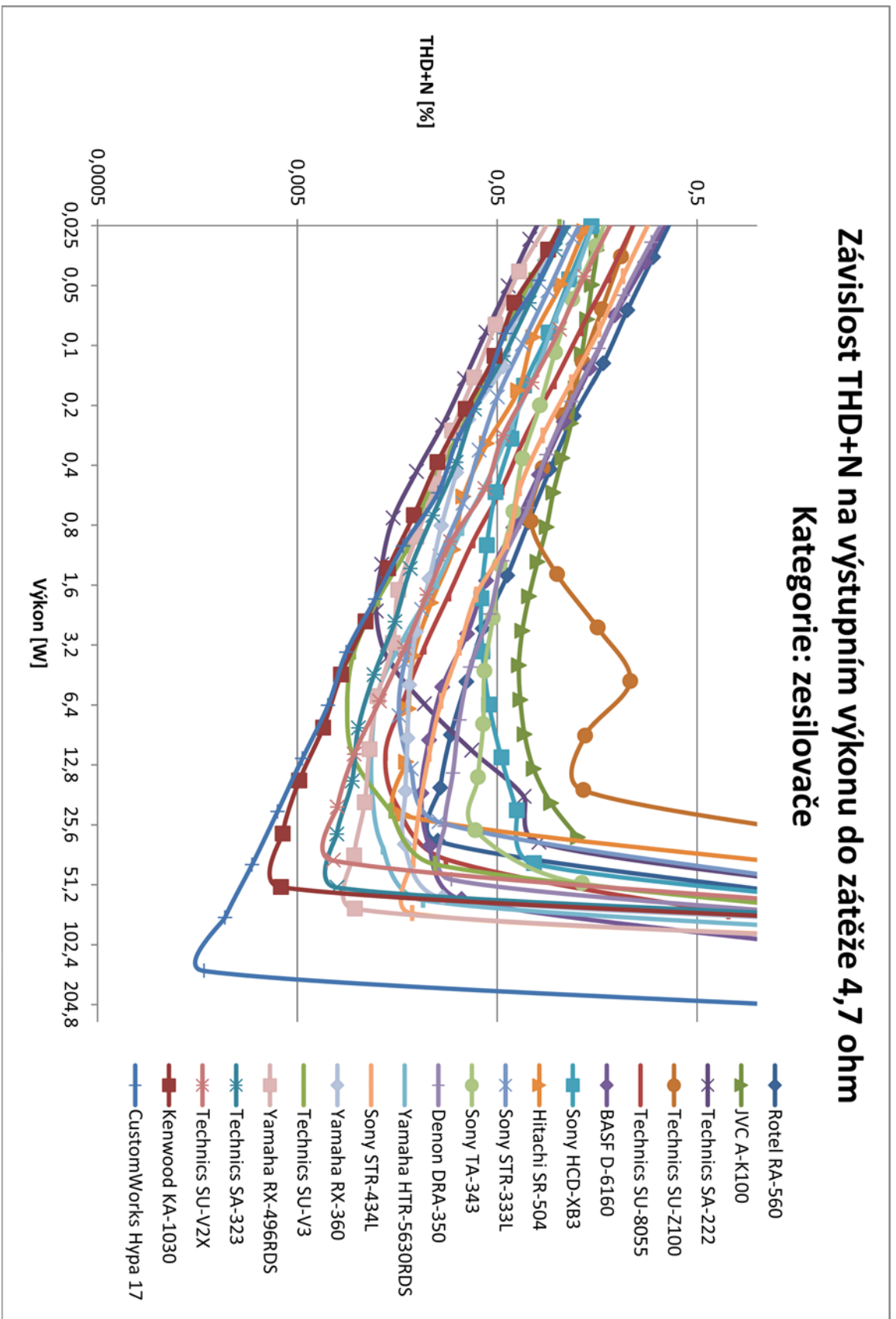
Tabulka č. 9

V dalších kapitolách vidíme seřazené zesilovače podle THD+N, což je v praxi pojem stanovující komplexní kvalitu zesilovače. Dále vidíme přístroje seřazené podle THD. Je možné si všimnout, že je drobný rozdíl v pořadí přístrojů v těchto měření. To je dáno různými úrovněmi zkreslení a šumu. Proto se pro správné vyhodnocení kvality uvádějí do specifikací obvykle oba parametry.

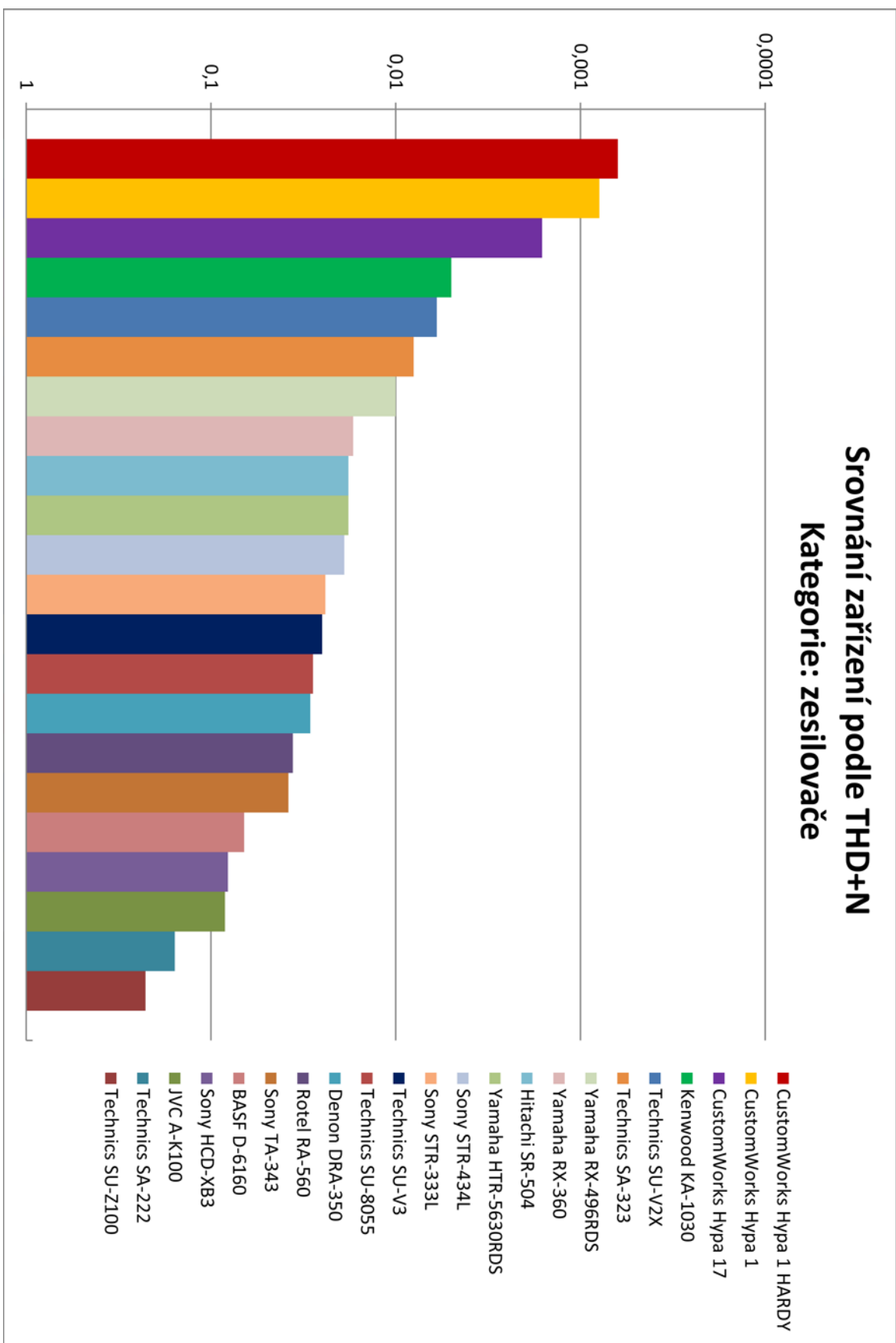
7.1.1 Souhrnná tabulka č. 10 - parametry zesilovačů

Modelové označení	typ zařízení	Rok výroby círca	Země výroby	THD+N		THD		Gain		Odděly			Preslec		SNR		input limit [mV]	max výkon [W]	specifiko výkon [W]	
				Lch [%]	Rch [%]	Lch [%]	Rch [%]	Lch	Rch	ka Lch 20 Hz	a Rch 20 kHz	ka Lch 80 kHz	ka Rch 80 kHz	h Lch [dB]	h Rch [dB]	Lch [dB]				Rch [dB]
BASE D-6160 CustomWorks	receiver	1980	Japonsko	0,066	0,032	0,0650	0,0307	41,8	41,2	0,5	0,4	1,5	1,6	-55,7	-42,1	84,2	82,8	150	60	30@8 Ω
Hypa 1 CustomWorks	předzesilovač	2014	ČR	0,0008	0,0008	0,0003	0,0002	10,5	10,5	0,0	0,0	0,1	0,1	-97,7	-97,9	104,1	104,7	1000	1	
Hypa 1 HARBY CustomWorks	předzesilovač		ČR	0,0006	0,0006	0,0004	0,0003	10,0	10,0	0,0	0,0	0,1	0,1	-80,9	-81,0	110,1	111,4	4000	1	
Hypa 17 CustomWorks	koncový zesilovač	2014	ČR	0,002	0,002	0,0004	0,0004	28,8	28,8	0,0	0,0	0,1	0,1	-104,9	-85,2	98,0	98,0	1000	150	130@8 Ω
Denon DRA-350	receiver	1984	Japonsko	0,019	0,029	0,0157	0,0249	40,3	40,3	0,3	0,3	1,7	1,8	-47,7	-45,5	86,8	84,3	150	50	36@8 Ω
Hitachi SR-504	receiver	1978	Japonsko	0,018	0,017	0,0057	0,0111	39,7	39,7	2,5	2,3	3,5	3,8	-43,5	-46,0	83,9	85,6	100	25	27@8 Ω
JVC A-K100	integrovaný zesilovač	1983	Japonsko	0,084	0,054	0,0766	0,0426	39,5	39,2	0,4	0,3	1,0	1,0	-53,2	-52,1	88,0	89,1	100	20	25@8 Ω
Kenwood KA-1030	integrovaný zesilovač	1991	Singapur	0,004	0,005	0,0015	0,0011	40,6	40,4	0,2	0,2	2,0	2,1	-51,5	-52,8	93,4	94,2	150	60	65@8 Ω
Reel RA-560	integrovaný zesilovač	1981	Tchaj-wan	0,036	0,025	0,0083	0,0116	40,9	41,0	0,5	0,3	1,1	1,2	-40,8	-46,4	70,4	79,0	100	30	40@8 Ω
Sony HCD-XB3	receiver	1997	-	0,081	0,076	0,0645	0,0651	23,4	23,5	0,4	0,4	1,4	1,5	-57,6	-57,3	90,6	90,4	1000	40	55@6 Ω
Sony STR-333L	receiver	1979	Japonsko	0,024	0,021	0,0223	0,0200	40,0	39,7	1,1	1,0	4,2	4,0	52,8	53,5	87,7	89,5	100	25	25@8 Ω
Sony STR-434L	receiver	1980	Japonsko	0,018	0,019	0,0166	0,0172	44,6	44,2	0,3	0,1	1,6	1,4	-40,6	-42,7	84,7	87,7	100	70	40@8 Ω
Sony TA-343	integrovaný zesilovač	1981	Japonsko	0,038	0,036	0,0127	0,0117	40,5	40,5	0,3	0,4	2,2	2,4	-55,3	-52,5	85,1	85,3	100	30	30@8 Ω
Technics SA-222	receiver	1981	Japonsko	0,157	0,099	0,1582	0,0977	40,3	40,0	0,2	0,1	1,2	0,9	-40,9	-45,8	91,6	93,2	100	30	30@8 Ω
Technics SA-323	receiver	1982	Japonsko	0,008	0,008	0,0027	0,0020	40,6	40,7	1,2	1,4	2,6	2,7	-60,1	-54,8	91,7	92,8	150	55	35@8 Ω
Technics SU-8055	integrovaný zesilovač	1979	Japonsko	0,010	0,028	0,0058	0,0264	42,0	41,9	0,2	0,3	0,7	0,8	-64,1	-71,1	83,8	84,0	100	40	47@8 Ω
Technics SU-V2X	integrovaný zesilovač	1984	Japonsko	0,006	0,006	0,0009	0,0009	41,5	41,4	0,1	0,1	1,1	1,4	-78,3	-46,9	85,2	88,1	100	35	45@8 Ω
Technics SU-V3	integrovaný zesilovač	1981	Japonsko	0,004	0,025	0,0030	0,0245	42,2	42,1	0,0	0,1	0,5	0,4	-59,5	-50,0	91,7	91,2	100	40	40@8 Ω
Technics SU-Z100	integrovaný zesilovač	1984	Japonsko	0,180	0,226	0,1672	0,2281	38,4	38,3	0,6	0,6	1,6	1,5	-44,2	-50,2	82,6	81,8	100	18	18@8 Ω
Yamaha HTR-5630RDS	receiver	2003	Japonsko	0,016	0,018	0,0156	0,0178	41,1	41,3	0,0	0,0	1,8	1,8	-59,9	-71,6	93,2	93,4	150	60	60@6 Ω
Yamaha RX-360	receiver	1992	Japonsko	0,017	0,017	0,0068	0,0037	41,1	41,1	0,2	2,0	1,5	1,4	-60,5	-63,3	90,4	90,5	150	60	55@8 Ω
Yamaha RX-496RDS	receiver	1998	Malajsie	0,010	0,010	0,0032	0,0048	41,7	41,8	0,1	0,1	0,9	0,9	-58,9	-63,4	92,9	92,0	150	70	75@8 Ω

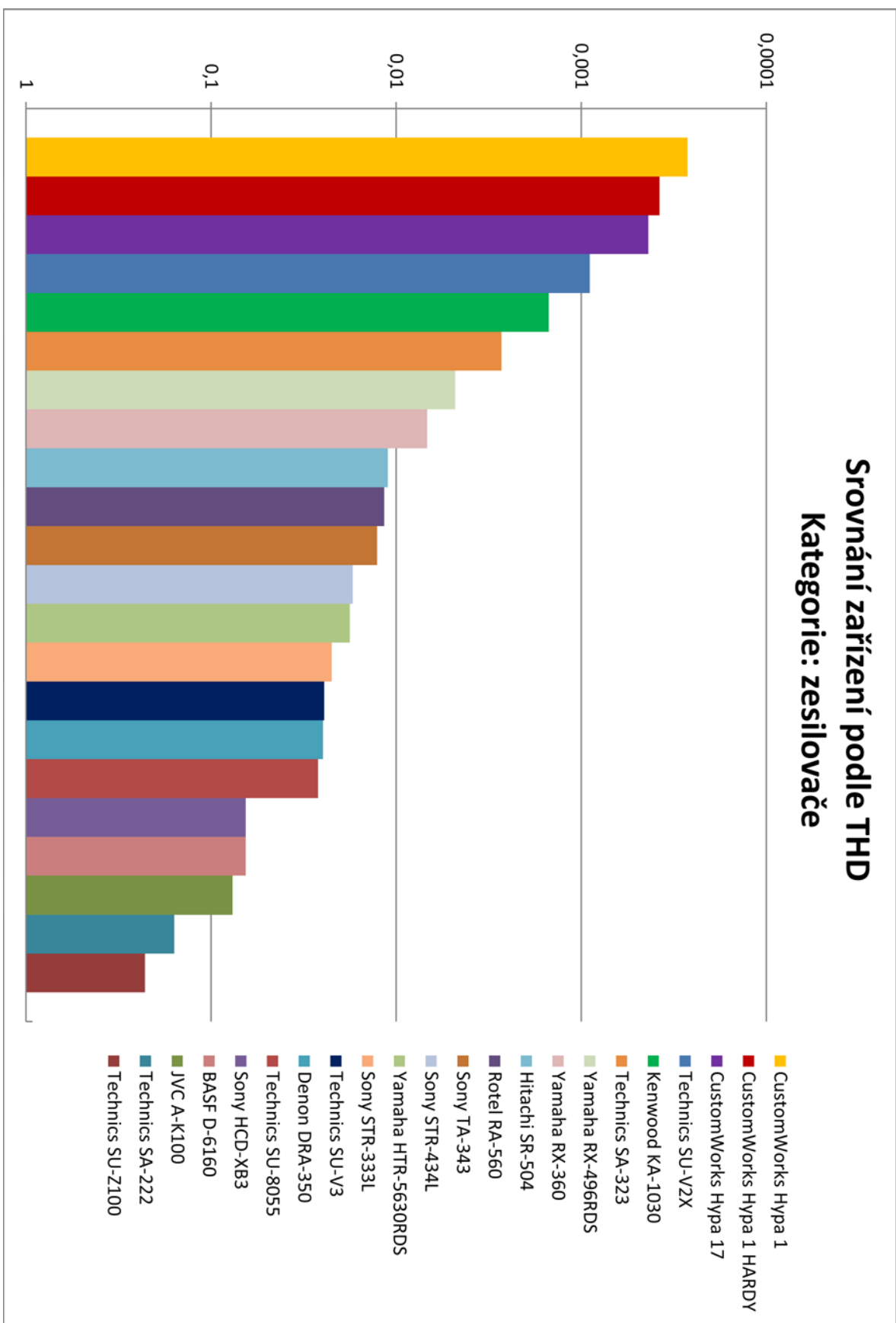
7.1.2 Měření závislosti THD+N na výkonu – obr. č. 70



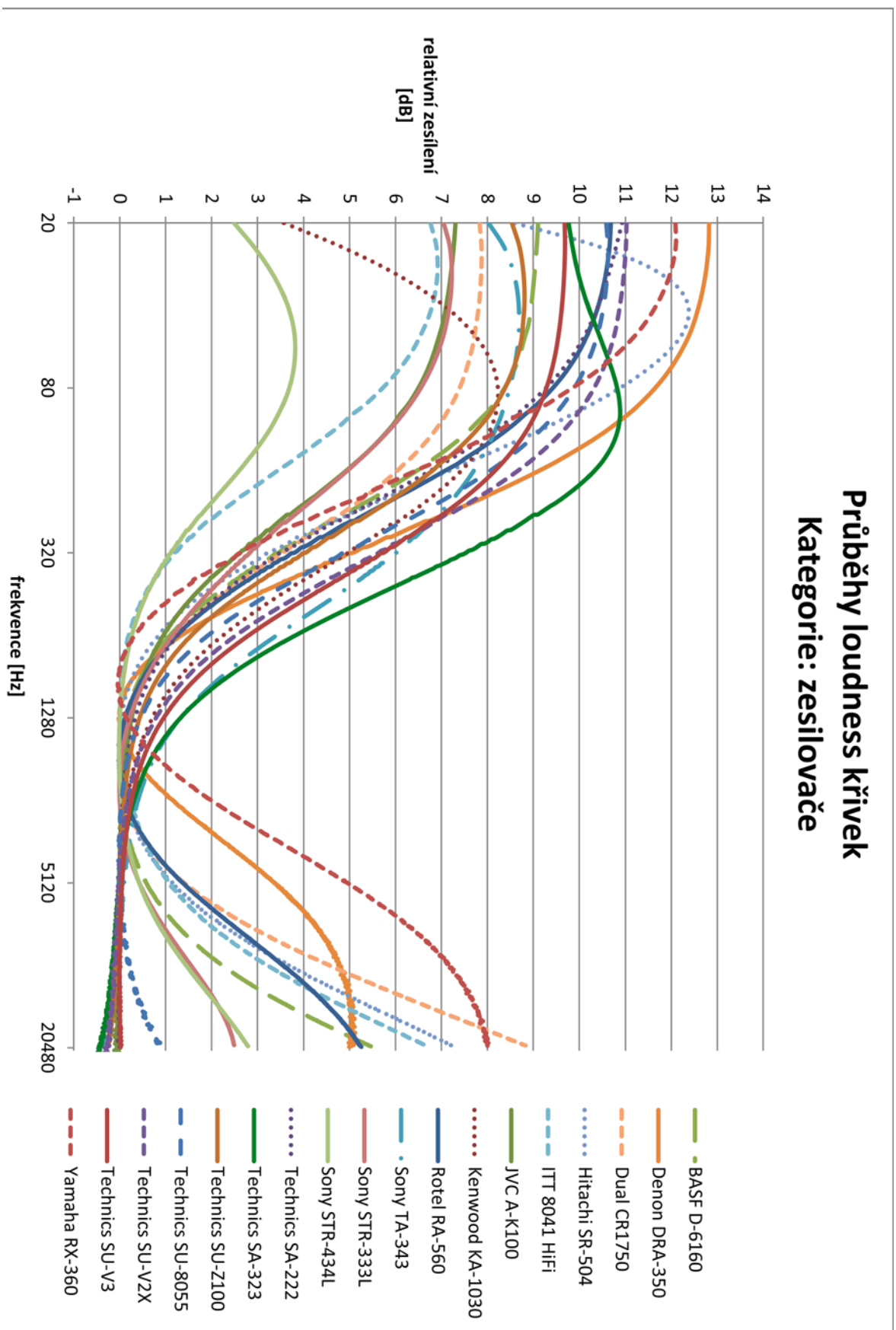
7.1.3 Srovnání zesilovačů podle THD+N – obr. č. 71



7.1.4 Srovnání zesilovačů podle THD – obr. č. 72



7.1.5 Měření loudness křivek – obr. č. 73



Z měření vyplynulo, že každý zesilovač má jinou loudness křivku. Rozdíly jsou vidět v několika parametrech:

- *relativní zesílení na basových frekvencích*
- *relativní zesílení na vyšších frekvencích*
- *basová frekvence s nejvyšším ziskem*
- *vyšší frekvence s nejvyšším ziskem*
- *strmost filtru na basových frekvencích*
- *strmost filtru na vyšších frekvencích*

Na základě zjištěných rozdílů těchto křivek (obr. č. 73), lze vysvětlit tento problém:

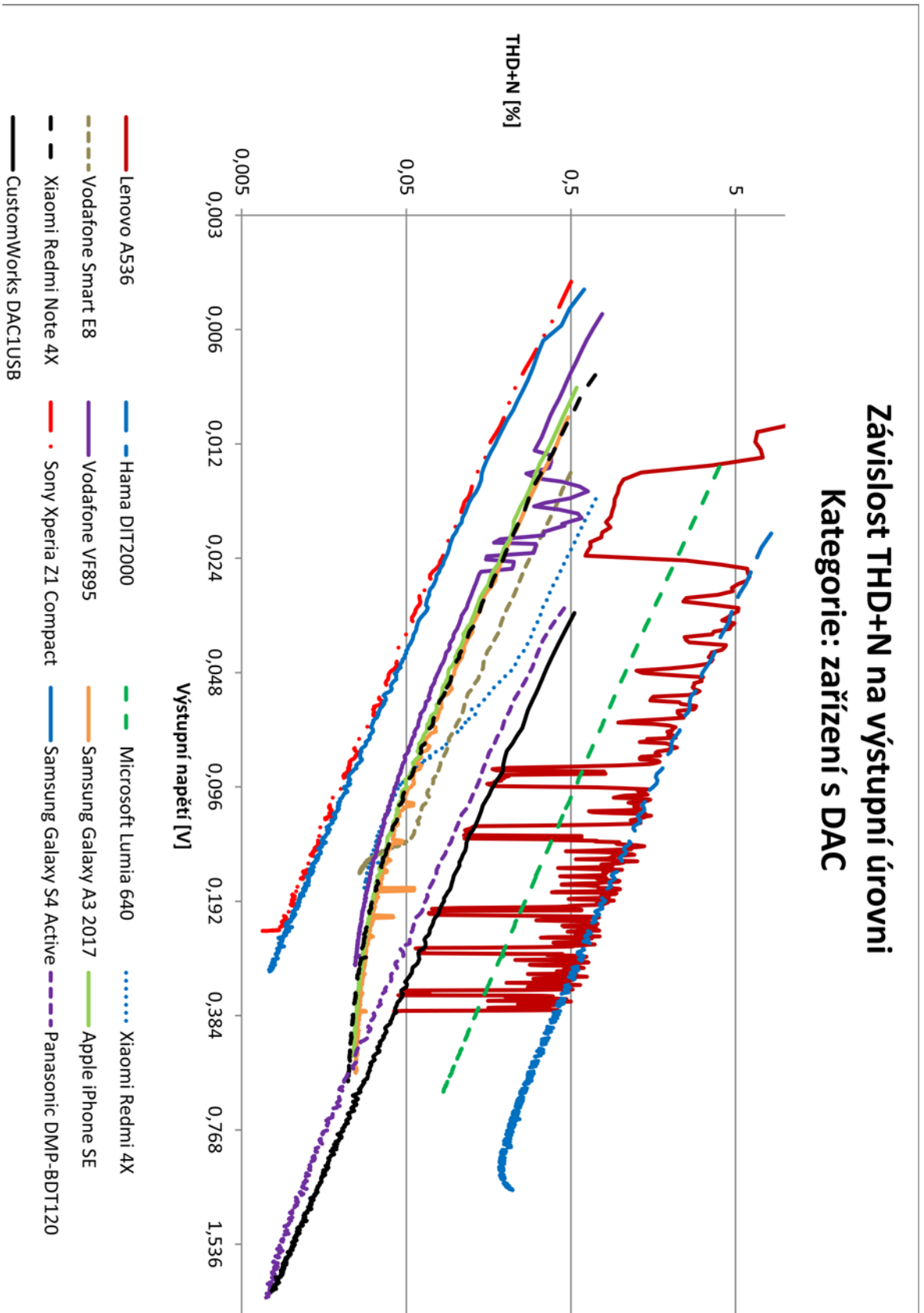
Představme si, že si posluchač koupí nový zesilovač se skvělými parametry, kterým nahradí starý, ale i přesto má pocit, že zvuk nedosahuje takové kvality jako předtím. Tento rozdíl jsou schopni potvrdit i další lidé.

Pokud vyloučíme vedlejší faktory, např.: nostalgický cit či estetický zjev zařízení, které mohou ovlivnit posudek člověka, lze tvrdit, že tento jev je způsoben rozdílnými loudness korekcemi. Výsledný zvuk je totiž tvořen souhrou všech věcí v řetězci a to počínaje akustikou místnosti, místem posluchače až po parametry reproduktorů a přístrojů. Reprobedny mají různé frekvenční charakteristiky a zjednodušeně lze tvrdit, že s větším rozměrem boxu/ozvučnice/reproduktoru se zlepšuje reprodukce basových frekvencí. Je tedy zjevné, že z teoretického hlediska by loudness korekce měla být pro každou reprosoustavu nastavena samostatně. To se ale v praxi neděje a proto můžeme slyšet významné rozdíly v kvalitě produkce mezi zesilovači.

Zmíněný problém se vytrácí, pokud produkce nevyužívá loudness korekce a hudba je tedy produkována ve vyšší/koncertní hlasitosti, kde je sluchové pole vyrovnanější. Viz kapitola 2.1.7, obr. č. 8 – citlivost sluchu při různých hlasitostech.

7.2 Měření zařízení s DAC

7.2.1 Srovnání zařízení s DAC podle THD+N – obr. č. 74



V této práci byly otestovány tyto typy zařízení s D/A převodníkem:

- *Mobilní telefony:*
Apple iPhone SE, Lenovo A536, Microsoft Lumia 640, Samsung Galaxy S4 Active, Samsung Galaxy A3 2017, Sony Xperia Z1 Compact, Xiaomi Redmi Note 4X, Xiaomi Redmi 4X, Vodafone Smart E8, Vodafone VF895
- *Multimediální centrum – Hama DIT 2000*
- *Blu-Ray přehrávač – Panasonic DMP-BDT120*
- *audio DAC USB – CustomWorks DAC1USB*

Dohromady tedy celkem 13 zařízení s DAC. Z největší části se jednalo o mobilní telefony. Byla zjištěna korelace mezi cenou telefonu a kvalitou zvukového výstupu.

Dále bylo zjištěno, že všechna zařízení dosahují skvělých hodnot SNR – okolo 90 dB, kromě jediného přístroje, Hama DIT 2000, který měl SNR 58 dB. U mobilních telefonů lze skvělé SNR očekávat, protože jsou napájeny z akumulátoru a mají tedy relativně čisté napájení. To ale neplatí u telefonu Lenovo A536, kde pronikalo do zvuku rušení z jiné hardwarové části.

Vzhledem k tomu, že byla zjišťována závislost THD+N a THD na úrovni (0,1 – 1,0 dBFS), lze si všimnout, že některá zařízení provádí u zvuku kompresi (křivka je krátká, popř. se na konci neposouvá dále doprava, ale směrem dolů) a že některá zařízení při vyšší úrovni více zkreslují (křivka se narovná, až ohýbá směrem vzhůru).

Z grafu lze vyčíst následující parametry:

- *rozsah výstupní úrovně (při 0,1 dBFS až 1,0 dBFS) – délka křivky*
- *závislost zkreslení na úrovni – sklon křivky*
- *zkreslení při nejvyšší úrovni*
- *náchylnost na pronikání rušení z jiné části zařízení*
- *komprese hlasitosti v blízkosti 1,0 dBFS*

Níže v tabulce č. 11 můžeme vidět oranžově podbarvené parametry přístroje, které podle mého názoru ukazují na vadný zvukový čip. Lze tak usuzovat z vysokých fázových posunů mezi kanály, případně z odchylek ve frekvenční charakteristice.

	Odchylka Lch 20 Hz až 20 kHz [dB]	Odchylka Rch 20 Hz až 20 kHz [dB]	Fáze 1kHz [°]	Fáze 10kHz [°]
Apple iPhone SE	0,3	0,3	0	0,1
CustomWorks DAC1USB	0,2	0,2	0	0,1
Hama DIT2000	1,5	1,5	0	1
Lenovo A536	2,5	2,5	0	0,3
Microsoft Lumia 640	0,1	0,1	0	0
Panasonic DMP-BDT120	0,1	0,1	0	0
Samsung Galaxy A3 2017	0,1	0,1	0	74,9
Samsung Galaxy S4 Active	0,1	0,1	0	0
Sony Xperia Z1 Compact	2	3,5	10	4
Vodafone Smart E8	0,7	0,7	0	0
Vodafone VF895	0,2	0,2	0	1
Xiaomi Redmi 4X	12	7	18	26
Xiaomi Redmi Note 4X	0,1	0,1	0	0

Tabulka č. 11: Odchylky ve frekvenční charakteristice a fázi mezi kanály

Ze souboru měření lze vybrat jen několik zařízení, která zvuk významně nedegradují.

Mezi pomyslné vítěze patří:

1. *Samsung Galaxy S4 Active*
2. *CustomWorks DAC1USB*
3. *Panasonic DMP-BDT120*

8 ZÁVĚR

Audio testy mají v měřicím odvětví své nezastupitelné místo. Oblast akustiky je specifická tím, že ani naměření těch teoreticky nejlepších hodnot nemusí nutně znamenat tu nejlepší reprodukci zvuku z pohledu člověka - posluchače. Jde o oblast, která silně závisí na subjektivním posouzení každého jednotlivce. Proto je důležité pochopení jednotlivých parametrů a schopnost určitého komplexního pohledu na celou problematiku.

Na základě provedených testů v praxi lze usuzovat, že mezi přístroji jsou značné rozdíly. Dále bylo zjištěno, že v oblasti zesilovačů byly dostupné kvalitní výrobky již v minulém století, které jsou srovnatelné se současnými. Vzhledem k tomu, že každý výrobce udává kvality přístroje při různých parametrech, je obtížné si vybrat. Byly zavedeny normy, které ale nejsou výrobci celoplošně využívány. Zajímavým zjištěním provedených měření je, že kvalita zvukového výstupu mobilního telefonu koreluje s cenou zařízení. Je to dáno užitím kvalitnějšího, dražšího, DAC a podpůrných obvodů. Na druhou stranu je nižší kvalita výstupu, která je často dána nízkými klidovými proudy, ku prospěchu výdrže akumulátoru.

Předložená práce vznikla na žádost laboratoře elektroniky a akustiky, Ústavu fyziky a biofyziky Jihočeské univerzity v Č. Budějovicích. Zde bude sloužit jako metodická příručka pro práci s audio analyzátozem Audio Precision, řady APx515. Jejím cílem je poučit operátora o způsobech měření, o funkcích přístroje a využití. Podpůrné kapitoly vytvářejí prostor k hlubšímu pochopení souvislostí v oblasti audia.

9 LITERATURA

[1] BENSON, K. Blair. *Audio engineering handbook*. New York: McGraw-Hill, 1988. ISBN 00-700-4777-4.

[2] METZLER, Bob. *Audio measurement handbook*. 2nd for PDF. Beaverton: Audio Precision, 2005.

[3] JIŘÍČEK, Ondřej. *Úvod do akustiky*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-010-2460-1.

[4] SLOT, G. *Audio Quality: Requirements for High Quality Audio Equipment*. Eindhoven: Philips Paperback, 1964.