

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Základní akustická měření pomocí standardního počítače
PC a zvukové karty**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Tomáš BYSTŘICKÝ**
Osobní číslo: **E09B0111P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Základní akustická měření pomocí standardního počítače PC
a zvukové karty**
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Prozkoumejte možnosti užití běžného počítače se zvukovou kartou pro základní akustická měření.
2. Vyberte z komerčně dostupných produktů vhodný hardware (zvuková karta, měřicí mikrofón) pro taková měření.
3. Zmapujte dostupný software pro taková měření. Zaměřte se zejména na programy, které jsou pro nekomerční užití zdarma.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

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

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Martin Sýkora

Katedra technologií a měření

Konzultant bakalářské práce: Ing. Oldřich Tureček, Ph.D.


Katedra technologií a měření

Datum zadání bakalářské práce: 17. října 2011

Termín odevzdání bakalářské práce: 3. června 2012


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




Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Anotace

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na zhodnocení možností akustických měření s využitím standardního PC. Uvádí výběr a porovnání dostupného softwaru, měřících mikrofonů a zvukových karet pro potřeby akustických měření. V teoretické části je stručně popsán zvuk a jeho parametry, dále metody měření akustického tlaku a frekvenčních analýz. Dále je uveden popis a hodnocení měřících komponentů. Poslední kapitolou je praktické testování a vyhodnocení výsledků vybraného softwaru, mikrofonu a zvukové karty.

Klíčová slova

Akustika, zvuk, měření, měřící software, mikrofon, zvuková karta, FFT, CPB, frekvenční analýza, frekvenční spektrum, real-time analýza

Abstract

The submitted Bachelor's final essay is aimed to evaluate the possibility of acoustic measurements using a standard PC. It presents a selection and comparison of available software, measuring microphones and sound cards for the needs of acoustic measurements. In the theoretical section it briefly describes the sound and its parameters, methods of measurement of sound pressure and frequency analysis. The following part is a description of the measurement and evaluation components. The last chapter is a practical test and evaluate the results of the selected software, a microphone and sound card.

Key words

Acoustics, sound, measurement, measurement software, condenser microphone, sound card, FFT, CPB, frequency analysis, frequency spektrum, real-time analysis

Prohlášení

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

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

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

V Plzni dne 28.5.2012

Tomáš Bystřický

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Martinovi Sýkorovi, za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ	10
1 ZVUK	11
1.1 AKUSTICKÝ TLAK	11
1.2 DIGITALIZACE ZVUKU.....	12
1.2.1 A/D převod.....	12
1.2.2 Používané formáty	13
2 DRUHY MĚŘENÍ	14
2.1 FREKVENČNÍ ANALÝZA.....	14
2.1.1 Fourierova transformace (DFT, FFT).....	14
2.1.2 Pásmová CPB analýza	15
2.2 MĚŘENÍ SPL.....	17
3 MĚŘÍCÍ VYBAVENÍ	17
3.1 MIKROFONY	17
3.1.1 Behringer ECM8000.....	19
3.1.2 Audix TM1.....	20
3.1.3 Sabine SQ1001.....	21
3.1.4 Srovnání parametrů měřících mikrofonů	21
3.2 PŘEVODNÍKY - ZVUKOVÉ KARTY	22
3.2.1 MXL Mic Mate Classic	22
3.2.2 T-bone MicPlug USB.....	23
3.2.3 M-Audio Fast track.....	24
3.2.4 M-Audio MobilePre	24
3.2.5 E-MU 0404 USB	25
3.2.6 Srovnání převodníků a zvukových karet.....	26
4 MĚŘÍCÍ SOFTWARE	27
4.1 SMAART v. 7.....	27
4.2 ARTA	28
4.3 REW	29
4.4 TRUERTA.....	30
4.5 SPECTRAPLUS.....	30
5 MĚŘENÍ	32
5.1 MĚŘÍCÍ ŘETĚZEC	32
5.2 VYHODNOCENÍ	32
5.2.1 FFT analýza růžového šumu.....	32
5.2.2 CPB analýza růžového šumu.....	34
5.2.3 FFT analýza 1 kHz.....	35
5.2.4 CPB analýza 1 kHz	37
6 ZÁVĚR	38
POUŽITÁ LITERATURA	39
PŘÍLOHY	1

Úvod

Základním akustickým měřením lze označit takové metody, které lze provést i v jednodušších a méně náročných podmínkách, než jsou akustické laboratoře. Výsledky sice nebudou dosahovat tak přesných výsledků, ale jsou mnohem dostupnější pro běžné využití při veřejných hudebních produkcích, domácím návrhu reprosoustav nebo akustických úpravách místností. Tato práce je zaměřena na výběr a testování potřebného vybavení k základnímu měření. Nabízí přehled dostupných komponentů vybraných podle poměru ceny a parametrů tak, aby mohla případně sloužit jako návod pro člověka, který chce začít měřit.

Vycházím z toho, že v dnešní době již téměř každý vlastní stolní počítač nebo notebook. PC vybavený vhodným softwarem je tak základní jednotkou pro vyhodnocení a zobrazení výsledků. Další dvě hledané součásti měřícího řetězce jsou mikrofon a převodník signálu mezi ním a počítačem. S tímto vybavením lze z notebooku udělat mobilní měřící jednotku, která umožňuje měřit hladinu SPL, frekvenční charakteristiky, spektrální analýzy a další.

V první kapitole je stručně popsán zvuk, jeho důležité parametry a způsob, jakým se dnes zpracovává do digitální podoby. Ve druhé kapitole jsou uvedeny dva typy měření, na které se zaměřím v praktické části práce. Třetí kapitola je věnována výběru a hodnocení měřících komponentů. Konkrétně jsou zde uvedeny 3 typy mikrofonů a 5 zvukových karet, mezi nimi i ty, které byly použity pro praktické měření. Kapitola č. 4 je věnována výběru a hodnocení měřícího softwaru. Uvádím zde 5 programů, mezi kterými jsou zahrnuty jak volně šiřitelné softwary bez omezení, tak i placené licence. U placených programů jsem testoval jen demoverze s různým omezením funkce. V této kapitole je uvedeno hodnocení z uživatelského hlediska, tedy nabídka funkcí, ovladatelnost a funkčnost programu. Výsledky programů a jejich rozbor jsou uvedené v kapitole č. 5 Měření. Zde uvádím několik charakteristických výsledků a popis. Veškeré výsledky v grafické podobě jsou umístěny na konci této práce v Příloze.

Seznam symbolů

L_p [dB]	Hladina akustického tlaku
p [Pa]	Akustický tlak
p_0 [Pa]	Práh slyšení
SPL [dB]	Hladina akustického tlaku
L_{eq} [dB]	Hladina ekvivalentního akustického tlaku
ω_v [Hz]	Vzorkovací frekvence
Q	Kvantovací úroveň
D	Bitové slovo
DFT	Diskrétní Fourierova transformace
FFT	Rychlá Fourierova transformace
CPB	Analýza konstantní procentuální pásmové šířky
XLR	Typ mikrofonního konektoru
DSP	Digitální signálový procesor
THD	Celkové harmonické zkreslení

1 Zvuk

Zvuk je mechanické vlnění vyvolané zdrojem zvuku a šířící se v látkovém prostředí podélnou (tlakovou) vlnou, schopnou vyvolat zvukový vjem. Každý zvuk je charakterizován frekvencí a intenzitou. Podle frekvence zvuky dělíme na tóny a hluky. Tónem je označován zvuk o jedné frekvenci vyvolaný např. hlasivkami nebo hudebním nástrojem. Hluk je vyvolán nepravidelným kmitáním zvukového zdroje a charakterizován frekvenčním spektrem s určitým rozsahem. Rozsah slyšitelných frekvencí je obecně stanoven na 20 Hz – 20 kHz, je to však subjektivní a u každého člověka se může lišit. Právě složení frekvenčního spektra signálu ovlivňuje jeho výslednou barvu

1.1 Akustický tlak

Akustický tlak p [Pa], kterým zdroj zvuku působí na sluchové ústrojí, udává měřitelnou poměrovou veličinu Hladinu akustického tlaku L_p [dB] nebo také SPL [dB], popisující subjektivně vnímanou hlasitost zvuku. Akustický tlak $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa odpovídá 0 dB a je označován jako práh slyšení. Druhou krajní hodnotou je $p = 10^2$ Pa, kdy $L_p = 130$ dB je cca práh bolesti. K poruchám sluchu může ale dojít i při nižších hodnotách SPL.[1]

Rovnice popisující hladinu akustického tlaku:

$$L_p = 20 * \log \frac{p}{p_0} [dB] \quad (1.1)$$

Citlivost lidského ucha v pásmu slyšitelných frekvencí není lineární. Proto při stejné hodnotě akustického tlaku vnímáme jinou hlasitost různých frekvencí. Právě akustický tlak je důležitým parametrem při veřejných hudebních produkcích. Kvůli ochraně zdraví je jeho maximální hodnota omezena normou. Protože se jeho hladina velmi rychle mění, je zavedena ekvivalentní veličina akustického tlaku L_{AeqT} [dB]. „Je to fiktivní ustálená hladina akustického tlaku L_p , která má stejné účinky na člověka během sledovaného časového úseku T , jako proměnlivá hladina akustického tlaku A za stejný čas“. [2] Tato ekvivalentní hodnota je dána vztahem:

$$L_{AeqT} = 10 \log \left[\frac{1}{T} \int_0^T \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right] [dB] \quad (1.2)$$

kde: $p_{A(t)}$ hladina okamžitého akustického tlaku A v probíhající čase t
 p_0 referenční akustický tlak $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa

Nejvyšší přípustná hodnota ekvivalentní hladiny akustického tlaku A pro zvuk elektronicky zesilované hudby v § 11 odst. 5 je podle Nařízení o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací stanovena na $L_{Aeq,T} = 100$ dB v prostoru pro posluchače

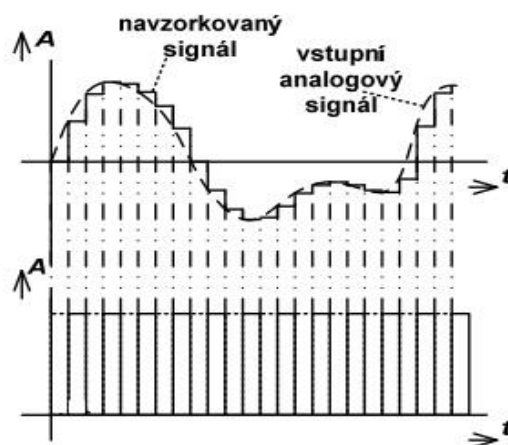
a to pro dobu $T = 4$ hodiny maximálně. [3] Hladina akustického tlaku A je hladina akustického tlaku měřená při použití váhového filtru A , který koriguje naměřené hodnoty akustického tlaku podle charakteristiky lidského ucha.

1.2 Digitalizace zvuku

Pokud chceme měření zvuku zpracovávat na PC, je převod analogového signálu na digitální nezbytný. Digitální podoba signálu umožňuje mnohem více možností zpracování, editování a ukládání. A/D převodníky jsou tedy ve všech zařízeních komunikujících s PC. Digitální zpracování se ale využívá i v samostatných měřicích jednotkách. Výhodou je nejen rychlost a spolehlivost, ale i prostorové nároky jsou menší díky integrovaným obvodům.

1.2.1 A/D převod

Digitalizace signálu probíhá ve třech krocích: vzorkování – kvantování – kódování. Ze vstupního signálu jsou frekvencí ω_v periodicky odebírány velmi krátké časové vzorky, které odpovídají amplitudě vstupního signálu v době jejich příchodu. Vzorkovací (sampler) frekvence ω_v je podle Shannon-Kotelnikova teorému volena alespoň 2x větší než maximální frekvence ω_m ve spektru vzorkovaného signálu. $\omega_v > 2 * \omega_m$. Při menším vzorkovacím kmitočtu vzniká tzv. Aliasing efekt a do výsledného signálu zanáší zkreslení. Tomu se bráníme filtrem, který omezí frekvenční spektrum vstupního signálu, nebo vzorkovacím kmitočtem větším než $\omega_v > 2 \omega_m$. [1]



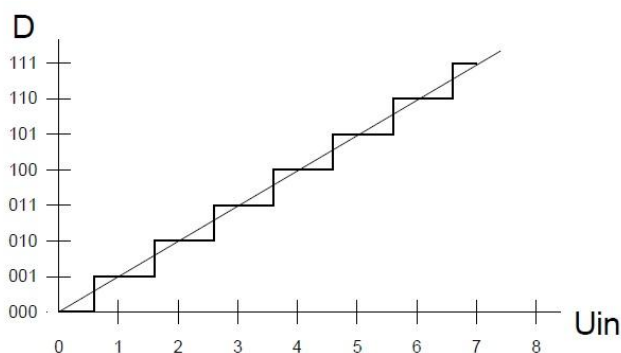
Obr. 1.1 Průběh vzorkování (převzato z [1])

Každému vzorku je poté podle tolerančního pásma přiřazena nejbližší kvantovací hladina. Vstupní analogový signál, který může nabývat libovolné úrovně v mezích vstupního rozsahu, je tedy kvantován do určitého počtu diskretních (kvantovacích) úrovní. Tímto procesem může

vzniknout kvantovací chyba (odchylka). Každá z těchto hladin je vyjádřena kódovým slovem (D). Při binárním vyjádření kódového slova, určuje počet jeho bitů počet kvantizačních hladin. V případě 3-bitového převodníku je vstupní rozsah rozdělen na 2^3 hladin. Počet těchto hladin udává *Rozlišovací schopnost* převodníku. Čím delší je bitové slovo, tím více úrovní vstupního signálu rozeznává a kvantovací odchylka je menší. Základní kvantovací úroveň je dána vztahem:

$$Q = \frac{U_R}{2^N} \quad (1.3)$$

Kde U_R je referenční napětí převodníku (zpravidla rozsah vstupní veličiny) a N počet bitů převodníku. Z převodní charakteristiky 3-bitového převodníku (Obr.2) lze vidět nízkou rozlišovací schopnost a velkou kvantizační odchylku, protože na každou kvantovací úroveň připadá velké množství vstupních hodnot. [4]



Obr. 1.2 Převodní charakteristika A/D převodníku [4]

1.2.2 Používané formáty

Protože slyšitelné pásmo má horní hranici 20 kHz, lze jako nejnižší vzorkovací frekvenci podle uvedeného teorému použít cca 40 kHz. K horní hranici pásma se ještě přidává 10% jako rezerva a až poté uplatňujeme vztah $\omega_v > 2 \cdot \omega_m$. V praxi běžně používaná vzorkovací frekvence je 44,1 kHz, nejčastěji ve spojení s 16bitovým převodníkem. Je to nejnižší rozlišení, se kterým se můžeme dnes setkat a používá se např. u standardních zvukových CD. Pro kvalitnější přenosy a záznamy se využívá 24bitových převodníků. Pro větší počet kvantovacích hladin lépe rozlišují dynamiku vstupního signálu. Protože na každý bit připadá 6 dB dynamického rozsahu, můžeme u 24bitového převodu teoreticky dosáhnout dynamického rozsahu až 144 dB. V praxi jsme ale většinou omezeni analogovou částí řetězce, takže využitelný rozsah je nižší. S vyšší samplovací frekvencí (48, 94 a 192 kHz) lze odebírat více vzorků a snímat tak nejen akustické pásmo přesněji, ale můžeme měřit i v ultrazvukovém pásmu, pokud to dovolí zbytek aparátu. Je proto výhodné pracovat s vyšším rozlišením již od začátku měřicího nebo nahrávacího řetězce, aby byla zachována co nejvěrnější podoba signálu.[5]

2 Druhy měření

2.1 Frekvenční analýza

Je metoda, sloužící k popsání signálu spektrem frekvencí, ze kterých se skládá. Převádíme tak časový průběh signálu na spektrální funkci. Z frekvenčního spektra můžeme zjistit frekvence nejvýraznějších složek a jejich amplitudy. Frekvenční analýzu můžeme použít pro „real-time“ měření, kdy vidíme časově proměnné spektrum právě snímaného signálu. Takové měření lze využít např. na hudebních produkcích při ekvalizaci zvuku. Dále frekvenční analýzu můžeme využít pro zaznamenané signály např. impulzních odezev reproduktorů. Výsledkem takové analýzy pak je frekvenční charakteristika reproduktoru, ze které lze vyčíst, jaké frekvence reproduktor vyznačuje nejlépe.

2.1.1 Fourierova transformace (DFT, FFT)

Jednou z metod pro frekvenční analýzu je Fourierova transformace, která umožňuje převod časového průběhu funkce na spektrální funkci. Pro signál $x(t)$ je obecně vyjádřena jako:

$$F(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (2.1)$$

A poskytuje spojité spektrum funkce frekvence. Tento výpočet je velmi složitý, protože potřebujeme znát funkci $x(t)$ a v praxi v měřicích přístrojích nepoužitelný kvůli mezím. Proto je výhodnější použití Diskrétní Fourierovy transformace. Ta pracuje s diskrétně vyjádřeným (navzorkovaným) signálem s N prvky opakujícími se s periodou T . Pro DFT platí rovnice (2.2), kde $k=0,1,2,\dots,N-1$

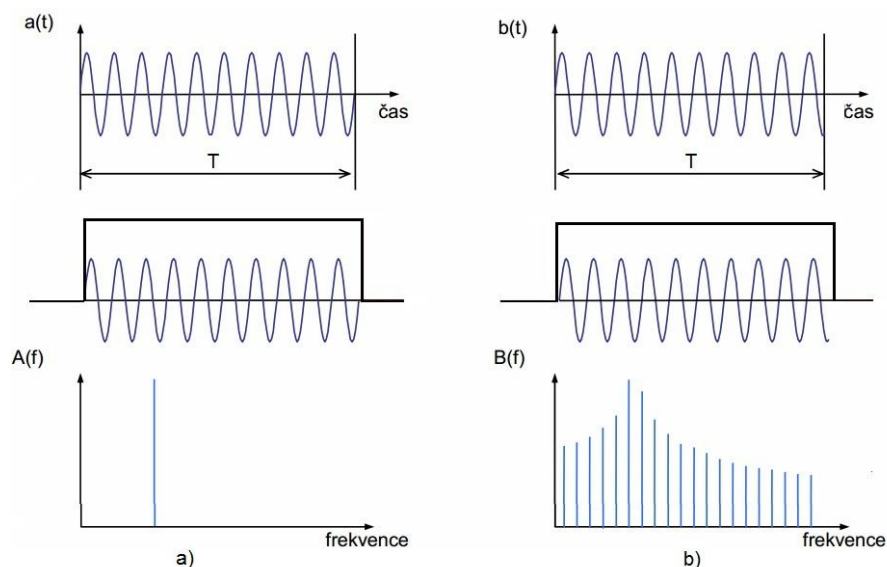
$$F(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{\frac{j2\pi fkn}{N}} \quad (2.2)$$

$$\Delta f = \frac{f_{vz}}{N} = \frac{1}{NT} \quad (2.3)$$

DFT poskytne frekvenční spektrum s N hodnotami vzdálenými o Δf dle rovnice (2.3), kde f_{vz} je vzorkovací frekvence a NT je celková délka signálu v čase. DFT považuje vstupní signál délky N (původně i neperiodický) za jednu periodu fiktivního signálu. V případě že se do daného úseku NT nepodaří zahrnout celistvý počet period, dojde k rušivému efektu rozmazání spektra - tzv. leakage (obr č. 50). Pro omezení tohoto jevu se využívá „okénkové

transformace“ tedy vynásobení signálu vhodnou funkcí (časovým oknem) a tím se utlumí amplituda na konci a začátku signálu, kde může vznikat rušení. Využívají se různé tvary okénkových funkcí pro různé typy signálu. V praxi se často používá Hanningovo okénko, popsané funkcí (2.4) pro $0 < n < N-1$, jinak $w(n) = 0$. [6]

$$w(n) = 1 - \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \quad (2.4)$$



Obr. 2.1 a) celočíselný násobek amplitud ve vybraném úseku a správné výsledné spektrum.

Obr. 2.1 b) nevhodný počet amplitud ve vybraném úseku a výsledné skreslené spektrum

Pro urychlení výpočtů se zavádí zrychlený algoritmus FFT - Fast Fourier Transformation neboli rychlá Fourierova transformace. Klasická Fourierova transformace potřebuje N^2 komplexních násobení a stejný počet komplexních sčítání. FFT algoritmus redukuje počet násobení, pracuje s počtem prvků v mocnině 2, $N=2^m$. [6]

2.1.2 Pásmová CPB analýza

Je frekvenční analýza, při níž se měřený signál rozkládá nikoliv na jednotlivé harmonické složky, ale na frekvenční pásma. Pásmová CPB (Constant Percentage Band) analýza historicky předcházela zavedení FFT analýzy. [7] Vychází z toho, že slyšitelné spektrum frekvencí lze rozdělit na pásma – oktávy s konstantní šířkou. Oktáva je interval mezi tónem o frekvenci f_1 a tónem s dvojnásobkem frekvence f_1 . Tedy jestliže první tón má frekvenci 440 Hz, tón o oktávu vyšší má frekvenci 880 Hz a o oktávu nižší pak 220 Hz. Poměr tónů vzdálených o oktávu je 1:2. V hudební teorii oktáva obsahuje osm tónů a první i poslední je označován stejným písmenem např. C.

V elektrotechnice se střední frekvence oktáv vztahují k hodnotě 1 kHz a je jich celkem 10 (Tab. 2.2 Střední frekvence oktáv). V analogové formě pásmové analýzy se používají

přepínatelné elektronické filtry. Ty mají střední frekvence posunuté o n násobek, u oktákové analýzy je to tedy dvojnásobek. Při $2x$ vyšší střední frekvenci je i frekvenční pásmo $2x$ širší., ale při vyjádření frekvenčního spektra v logaritmickém měřítku, mají pásma konstantní šířku. Dále se zavádějí i dělené oktákové analýzy, nejčastěji třetinooktáková ale i jemnější ($1/12$, $1/24$, $1/48$), které se dnes zpracovávají digitálně. [7]

Tab. 2.1 Vztahy pro frekvenční pásma CPB analýzy [7]

Frekvenční pásma pro:	Oktáovou analýzu	1/3 oktáovou analýzu
Dolní hranice	$f_d = \frac{f_s}{\sqrt{2}}$	$f_d = \frac{f_s}{\sqrt[6]{2}}$
Střední frekvence	$f_s = 2x f_{s(n-1)}$	$f_s = \sqrt[3]{2} x f_{s(n-1)}$
Horní hranice	$f_H = f_s \sqrt{2}$	$f_H = f_s \sqrt[6]{2}$

Tab. 2.2 Střední a hraniční frekvence oktáv

Číslo oktávy	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Dolní hranice [Hz]	22	44	88	176	353	707	1414	2825	5650	11300
Střední frekvence [Hz]	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Horní hranice [Hz]	44	88	176	353	707	1414	2825	5650	11300	22500

2.2 Měření SPL

Pro měření hladiny akustického tlaku primárně slouží zvukoměry, tedy měřicí přístroje vyhovující třídě 1 a 2 dle požadavků normy ČSN EN 61672-1 (368813). Zvukoměry se vyrábějí jak v mobilním kompaktním provedení na bateriové napájení, tak pro pevnou instalaci. Všechny musí být vybaveny váhovým filtrem typu A, který upravuje charakteristiku měřicí soustavy dle citlivosti lidského ucha a platným ověřovacím listem. Ceny takových zvukoměrů se pohybují řádově v desítkách tisíců Kč.

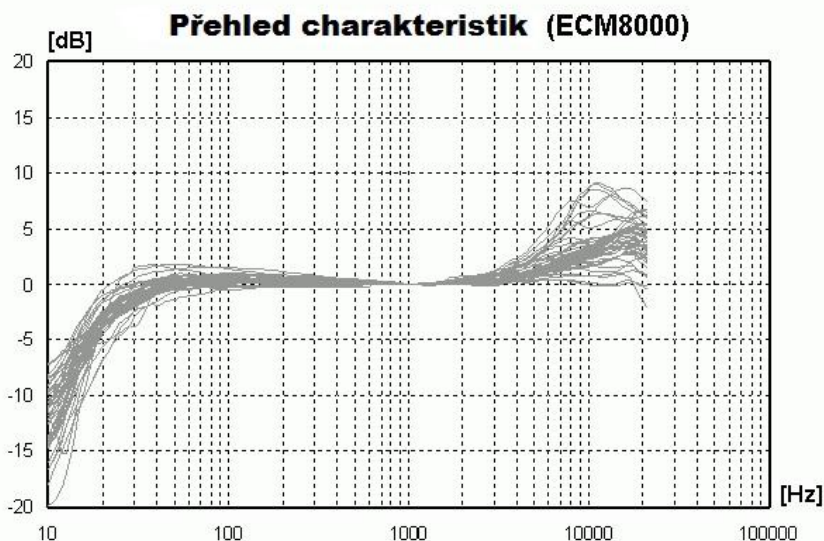
V případě této práce se snažím najít alternativu k těmto zvukoměrům pomocí PC. Pokud jsou k dispozici potřebné komponenty jako měřicí mikrofon a zvuková karta s Phantomovým napájením, lze PC využít jako improvizovaný zvukoměr. Po instalaci vhodného softwaru pro měření, který umožní zpracovávat okamžité hodnoty váhovými filtry. Tato funkce bývá ve většině případů integrována v softwaru pro více typů akustických měření, uživatel tak získá další možnosti. Výhodou použití softwaru mohou být funkce grafického záznamu SPL v čase, ukládání, volba z více druhů váhových filtrů, měření maximální, minimální, průměrně, či ekvivalentní hodnoty akustického tlaku apod. Před použitím takové sestavy je pro získání relevantních výsledků nutná kalibrace certifikovaným kalibrátorem. Po kalibraci, během měření je nutné zachovat nastavení všech ovládacích prvků vstupní citlivosti, kterých může v takové sestavě být několik, od nastavení v softwaru přes ovládání hlasitosti v systému PC až k ovládacím prvkům zvukové karty. V jiném případě jsou výsledky zkresleny. Kalibraci je potřeba věnovat dostatek pozornosti a měla by být provedena i po ukončení měření a nastavená hodnota by se neměla lišit o více než 0,5 dB.

3 Měřicí vybavení

3.1 Mikrofony

Z praktického hlediska od mikrofonu, převodníku mechanické energie na elektrickou, požadujeme rovnou frekvenční charakteristiku. Tedy aby byl na všechny frekvence v pásmu stejně citlivý. Toho dosahují jen ty nejlepší typy mikrofonů. Výrobce udávaná citlivost bývá pro frekvenci 1kHz. Horší kmitočtová závislost není na škodu, pokud známe její přesnou charakteristiku, podle které pak upravíme změřené hodnoty a dopracujeme se tak k objektivnímu výsledku.

V ideálním případě dodává výrobce ke každému kusu změřenou charakteristiku. Protože tu ovlivňuje mnoho faktorů včetně přesnosti usazení mikrofonní kapsle v pouzdře, může být u každého kusu odlišná (Obr. 3.1). Kalibrační křivku mikrofonu lze uložit v měřicím softwaru, který pak automaticky počítá s jeho odchylkou. Důležité je také kvalitní mechanické provedení pouzdra a konektoru. Standardně používaným je 3 pinová XLR vidlice.



Obr. 3.1 Charakteristiky 130ks mikrofonů ECM8000 (převzato z [8])

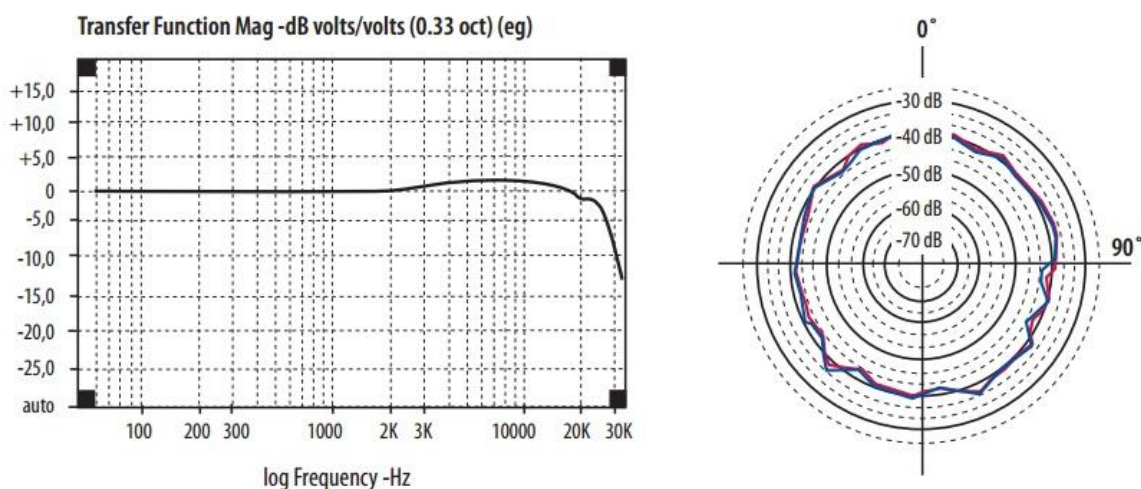
Pro měřicí účely se používají kondenzátorové (elektrostatické) mikrofony pro jejich velmi dobrou citlivost a vyrovnanou frekvenční charakteristiku v celém slyšitelném pásmu frekvencí. Jedna z elektrod kondenzátoru je velmi tenká membrána, reagující na přicházející změny akustického tlaku. Pohyblivá elektroda má díky nízké váze minimální setrvačnost a může tak reagovat na vysoké frekvence i za slyšitelným pásmem. Změnou tlaku se mění vzájemná vzdálenost elektrod a tím i jejich kapacita. Změnou kapacity se mění napětí na elektrodách, rozsah této změny lze snímat na sériovém odporu. Snímané napětí se přivádí na předzesilovač s velkou vstupní impedancí, aby nedocházelo k oslabování náboje. Napájecí, tzv. Phantomové ss napětí 48V je přivedeno po signálovém kabelu přímo ze zvukové karty, předzesilovače nebo mix pultu. Není tak zapotřebí externího zdroje. Při použití kvalitního předzesilovače má celá soustava velmi nízký šum. Nevýhodou u méně kvalitních provedení mikrofonů může být křehkost. Další je závislost na vlhkosti prostředí. Při velké vlhkosti může docházet k vodivému propojení elektrod a vybíjení náboje. V takovém případě rychle klesá citlivost mikrofonu. Proto je třeba mikrofony chránit a skladovat v suchém prostředí. [9]

3.1.1 Behringer ECM8000



Obr. 3.2 Behringer ECM800 (převzato z [10])

Je základní, velmi rozšířený mikrofon. Jeho hlavní výhodou je cena do 1500,- Kč a dobré parametry v této cenové relaci. Výrobce udává téměř ideální frekvenční i směrovou charakteristiku, ze které plyne nezávislost měření na úhlu otočení mikrofonu od osy měřeného objektu. Ve skutečnosti se však měření jednotlivých kusů ne zcela shoduje s ideálními udávanými parametry (Obr. 1). Obecně lze ale říci, že jde o mikrofon dostatečně kvalitní pro domácí podmínky měření. V hliníkovém těle je zabudován nízkošumový FET-tranzistorový vstupní obvod a přípojovací zlatěný XLR konektor. V balení je dodáván držák a transportní kufřík. [4] Do ČR je dovážen firmou Audiopro s.r.o. která ECM8000 nabízí za 1201,- Kč. Je možné jej koupit i u mnoha dalších distributorů po celé ČR za velmi podobnou cenu.



Obr. 3.3 Výrobce udávaná frekvenční a směrová charakteristika ECM8000 (převzato z [10])

3.1.2 Audix TM1

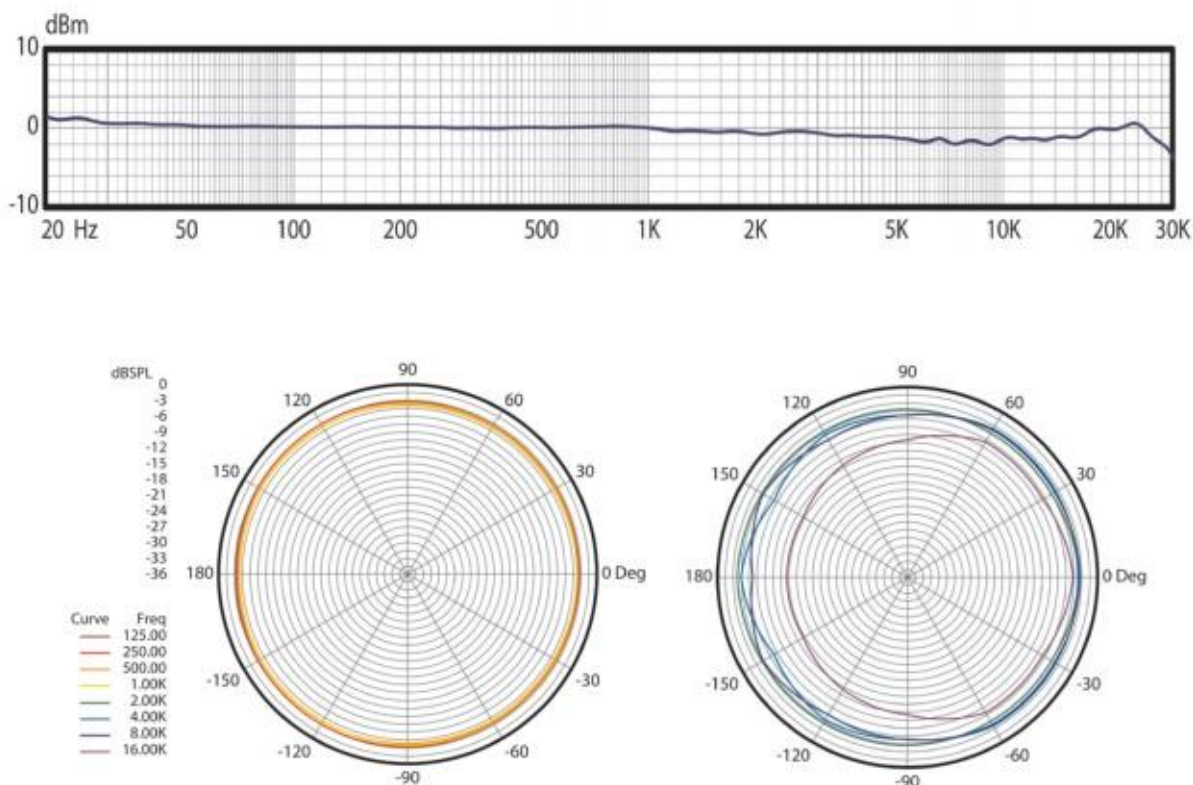


Obr. 3.4 Audix TM1 (převzato z [11])

Měřicí mikrofon amerického výrobce s vyměnitelnou elektronikou a kondenzátorovou kapslí v rozebíratelném, 4člávkovém mosazném těle. Frekvenční rozsah je 20Hz – 25kHz s maximální odchylkou 2 dB. Phantomové napájení 18-52V. Citlivost je o několik mV vyšší než u předchozího Behringeru a to 6,5mV/Pa s dynamickým rozsahem až 112dB. Hladina SPL, kterou lze ještě snímat se zkreslením menším než 1% THD je 130dB, maximální hodnota je 140dB. [11]

K mikrofonu je dodáván plastový držák a přepravní pouzdro. Je možné dokoupit další příslušenství, jako je protivětrný kryt, mini stativ a další. Ve verzi TM1 Plus je dodávána i kalibrační křivka konkrétního kusu.

Do ČR je dodáván firmou Music Data s.r.o. za cenu 6 555,- Kč.



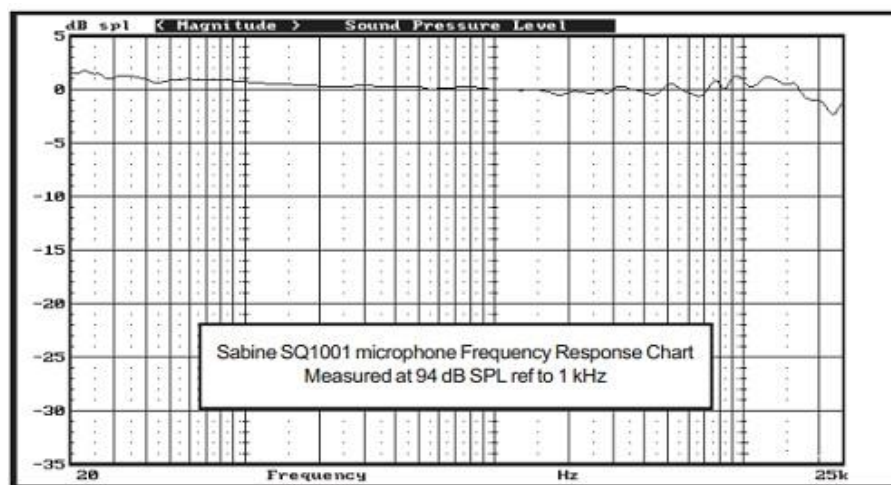
Obr. 3.5 Výrobce udávaná frekvenční a směrová charakteristika Audix TM1 (převzato z [11])

3.1.3 Sabine SQ1001



Obr. 3.6 Sabine SQ1001 (převzato z [8])

Jedná se také o kondenzátorový všesměrový mikrofon. Za citelně vyšší cenu nabízí nejlepší citlivost z trojice uváděných mikrofonů, 18mV/Pa, s dynamickým rozsahem až 102 dB. Pracuje s napájecím napětím v rozsahu 9-52V a frekvenční charakteristika by, dle výrobce, neměla v rozsahu 20Hz – 19kHz být zvlněná o více než 4dB. Na frekvenci 20kHz už je citlivost o další 4dB nižší [12]. Mikrofon Sabine dováží a v ČR distribuuje jediná firma Prodance s.r.o. za cenu 8582,- Kč.



Obr. 3.7 Frekvenční charakteristika mikrofonu Sabine (převzato z [12])

3.1.4 Srovnání parametrů měřících mikrofonů

Tab. 3.1 Srovnání parametrů mikrofonů

	Behringer ECM8000	Audix TM1	Sabine SQ1001
Frekvenční rozsah	15Hz – 20kHz	20Hz – 25kHz	20Hz – 19kHz
Citlivost [mV/Pa]	1	6,5	18
Napájení [V]	15-48	18-52	9-52
Impedance [Ω]	600	200	200
Dynamický rozsah[dB]	-	112	102
Maximální SPL[dB]	-	140	128
Hmotnost [g]	120	-	142
Cena [Kč]	1 201,-	6 555,-	8 582,-

3.2 Převodníky - zvukové karty

K převedení analogového elektrického signálu na digitální, počítačem zpracovatelný typ signálu, potřebujeme převodník. Jde tedy o zařízení, spojující mikrofon a PC, obsahující ve většině případů A/D převodník typu sigma-delta, protože má velmi dobrou rozlišovací schopnost s bitovou hloubkou 24bitů [14]. Další funkcí by mělo být Phantomové napájení, které pro svůj provoz vyžadují mikrofony. Vybavení Phantomem není základní funkcí převodníku, ale je výhodné, aby jej obsahoval z důvodu minimalizace vybavení. Napájení celého zařízení s převodníkem by mělo být řešeno přímo z PC, aby bylo možné používat jej s mobilním notebookem, i když není přístup k síťovému zdroji. Jako vstup převodníku je vhodný symetrický konektor XLR, běžně používaný ve zvukové technice. K propojení s počítačem se využívá univerzální USB rozhraní verze min. 2.0 pro vyšší přenosovou rychlost. Vhodným zařízením, které splňuje výše popsané požadavky pro domácí využití, je speciální druh zvukové karty. Jedná se o nahrávací a ve většině případů externí kartu, která disponuje minimálně jedním mikrofonním vstupem s Phantomovým napájením. Kromě toho nabízí další funkce pro úpravu a poslech signálu. Taková karta má tedy širší využití nejen pro měření, ale i poslech a nahrávání např. hudebních nástrojů.

Zaměřím se zde tedy na výběr a srovnání především zvukových karet, coby signálového převodníku. Při jejich výběru bylo hlavním kritériem vybavení Phantomovým napájením, pokud možno napájením z USB a nízká cena při zachování kvality známého výrobce. Karty jsou řazeny od nejlevnější verze a všechny přitom obsahují minimálně jeden ovladatelný a napájený vstup pro mikrofon, 24bitové převodníky a sluchátkový výstup. Kromě zvukových karet zde uvádím i mikrofonní USB převodníky, které jsou velmi malou a přenosnou alternativou, ale s horším rozlišením A/D převodníků.

3.2.1 MXL Mic Mate Classic

Nabízí cestu, jak se vyhnout externí zvukové kartě a použít integrované součásti PC. Tento adaptér velmi kompaktních rozměrů umožňuje připojit běžné kondenzátorové mikrofony do USB portu. Obsahuje předzesilovač, 16bitový A/D převodník i Phantomové napájení +48V. Samplovací frekvence 48kHz. Vstupní citlivost lze ovládat pouze třípolohovým přepínačem. To je veškerá možnost nastavení. Instalace probíhá Plug and Play bez dalších ovladačů a je kompatibilní s PC i Mac. [14]

Jedná se tedy o velmi malé zařízení pro rychlé připojení profesionálního mikrofonu k PC, které pro účely jednoduchých měření postačuje. Otázkou zůstává, jestli není výhodnější si za velmi podobnou cenu pořídit základní víceúčelovou zvukovou kartu. Do ČR tento převodník dováží společnost AUDIOTEK s.r.o. a je výhradním distributorem. Cena je 1 717,- Kč.



Obr. 3.8 MXL Mic Mate Classic (převzato z [14])

3.2.2 T-bone MicPlug USB

Zajímavější verzí jednoduchého USB převodníku je MicPlug. Za podstatně nižší cenu než MXL také nabízí 16bitový A/D převodník se vzorkovací frekvencí 48kHz a phantomové napájení +48V, které lze ovládat malým vypínačem na zadní straně. Při napájení svítí červená kontrolka. Navíc má sluchátkový výstup pro přímý poslech s nastavitelnou hlasitostí a mikrofonní předzesilovač s ovládáním citlivosti. Pro připojení k PC je zapotřebí mikro USB kabel, který je přiložen. Provedení konektorů není příliš kvalitní, proto je třeba pečlivého usazení. Po připojení k počítači proběhne instalace Plug and Play, rozsvítí se modrá kontrolka a MicPlug se nastaví jako výchozí zařízení pro nahrávání. Kompatibilní je s Windows XP/Vista i Mac OSX. [15]

Umožňuje tedy pouze jednokanálové měření, ale svými rozměry a vybavením je to praktický převodník pro mobilní měření např. hladiny hluku s malým netbookem.

Výhradním distributorem je české zastoupení společnosti Thomann Cyberstore, kde jej lze koupit za 641,- Kč.



Obr. 3.9 T-bone MicPlug (převzato z [15])

3.2.3 M-Audio Fast track

Je velmi malá a skladná externí zvuková karta, nabízející základní parametry pro měření nahrávání. Napájení a připojení k PC nebo notebooku je řešeno pomocí USB kabelu. Nezávislost na externím napájení je velkou výhodou pro mobilní měření. Karta nabízí jeden mikrofonní vstup XLR s Phantomovým napájením +48V a jeden nástrojový s 6,3 jack konektorem. U obou kanálů je signalizace vstupu a přebuzení. Na přední straně je umístěn i sluchátkový výstup a tlačítko přímého poslechu vstupních signálů před zpracováním. Zadní panel nabízí výstupní konektory RCA, připojení USB kabelu a vypínač Phantomového napájení. Ovládací prvky vstupní citlivosti obou vstupů a výstupní úrovně jsou umístěné na horním krytu v zapuštěném prostoru. Hlasitost linkového a sluchátkového výstupu jsou řízeny společně. [16]

Připojení a základní instalace probíhá Plug and Play a je kompatibilní s PC i Mac. Ovšem na každém OS umožňuje jiné nastavení. Ve Windows Vista umožňuje volbu smplovací frekvence mezi 44,1 a 48kHz, to je veleskromný rozsah. Další ovladače a studiový software Pro Tools M-powered Essentials („ekonomická“ verze) je přiložen na CD. Fast Track zpracovává signál v rozlišení 16/ 24bit/48 kHz a umožňuje použít oba vstupy současně. [16]

V ČR je distribuována firmou Disk Multimedia s.r.o. za cenu 1 990,- Kč.



Obr. 3.10 M-Audio Fast Track mk2 (převzato z [16])

3.2.4 M-Audio MobilePre

MobilePre je nástupcem modelu M-AUDIO Mobile. Designově i funkčně vychází z předchozí popsané karty Fast Track. Jedná se o malou dvoukanalovou zvukovou kartu napájenou přes USB, kterým se připojuje k PC. Díky tomu ji lze snadno používat mobilně s notebookem. Instalace pro základní využití je automatická. Pro použití ovladačů ASIO

apod. je třeba instalace z příloženého CD. Balení obsahuje navíc nahrávací software ProTools SE. [13]

Oba kanály nahrává v rozlišení až 24bit se smplovací frekvencí 48kHz. Stejně jako u předchozí karty si lze vybrat jen ze dvou možností bitové hloubky 16/24bit a vzorkovací frekvence 44,1/48kHz. Umožňuje připojit současně linkový signál, mikrofon a nástroj. Dva mikrofonní vstupy s konektory XLR/jack disponují vypínatelným Phantomovým napájením +48V a indikací signálu i přebuzení. Na předním panelu je umístěn ještě sluchátkový výstup a tlačítko přímého poslechu vstupů bez zpracování. Další dvě tlačítka přepínají mezi předním a zadním konektorem obou kanálů. Ovládací potenciometry jsou umístěné na horním panelu. Je možné ovládat úrovně obou kanálů, sluchátkového a linkového výstupu odděleně. Zadní panel obsahuje linkové vstupy a výstupy s konektory jack 6,3, USB konektor a vypínač Phantomového napájení. [17]

V ČR je distribuována firmou Disk Multimedia s.r.o. za cenu 3 290Kč



Obr. 3.11 M-AUDIO MobilePre (převzato z [17])

3.2.5 E-MU 0404 USB

Externí zvuková karta střední třídy nabízí již větší množství funkcí a sofistikovanější nastavení. Vyniká poměrem cena/kvalita a velkým odstupem signál/šum 113dB. Obsahuje dva analogové nahrávací kanály s nastavením citlivosti. Oba současně disponují vypínáním Phantomového napájení +48V, indikací úrovně signálu a kombinovanými konektory XLR/Jack. Funkce Soft Limit zabraňuje přebuzení vstupů jejich postupnou limitací při dosažení úrovně -12dB. Tlačítkem Mono je možné oba kanály sloučit. Karta umožňuje i Direct monitor, tedy přímý poslech signálu ze vstupu bez zpoždění. Na předním panelu jsou umístěné další vstupy/výstupy MIDI, koaxiální, optické a sluchátkový výstup s nastavitelnou úrovní. [18] Interní DSP procesor je 32 bitový a kartu lze použít i bez PC např. jako mikrofonní předzesilovač. Digitální převodník pracuje s 24bitovou hloubkou a vzorkovací

frekvencí až 192kHz na analogových vstupech. Při smplovací frekvenci do 96kHz pracuje se všemi druhy vstupů. Tu lze nastavovat pomocí přiložených PC ovladačů. Přiloženo je i kromě dalších programů, i Steinberg Cubase LE.

Karta se k PC se připojuje pomocí USB 2.0, ale vyžaduje externí napájení adaptérem. Ten je nevýhodou při častém převážení a měření v terénu. Při pevné instalaci karty mohou překážet veškeré ovládací prvky umístěné na vrchním panelu. [18]



Obr. 3.12 E-MU 0404 USB (Převzato z[18])

3.2.6 Srovnání převodníků a zvukových karet

Tabulka 3.1: Srovnání převodníků a zvukových karet

	T-bone MicPlug	MXL Mic Mate	Fast Track	Mobile Pre	E-MU 0404
Napájení z USB	<i>ANO</i>	<i>ANO</i>	<i>ANO</i>	<i>ANO</i>	<i>NE</i>
Phantomové napájení	<i>ANO</i>	<i>ANO</i>	<i>ANO</i>	<i>ANO</i>	<i>ANO</i>
Mikrofonní vstupy	<i>1x XLR</i>	<i>1x XLR</i>	<i>1x XLR</i>	<i>2xXLR/jack</i>	<i>2x XLR/jack</i>
Celkem vstupů	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>4</i>	<i>4</i>
Sluchátkový výstup	<i>ANO</i>	<i>NE</i>	<i>ANO</i>	<i>ANO</i>	<i>ANO</i>
Ovládání sluch. výstupu	<i>ANO</i>	<i>NE</i>	<i>NE</i>	<i>NE</i>	<i>ANO</i>
Bitová hloubka	<i>16</i>	<i>16</i>	<i>24</i>	<i>24</i>	<i>24</i>
Smplovací frekvence	<i>48 kHz</i>	<i>48 kHz</i>	<i>48 kHz</i>	<i>48 kHz</i>	<i>96/192 kHz</i>
Direct Monitor	<i>ANO</i>	<i>NE</i>	<i>ANO</i>	<i>ANO</i>	<i>ANO</i>
Optické připojení	<i>NE</i>	<i>NE</i>	<i>NE</i>	<i>NE</i>	<i>ANO</i>
MIDI	<i>NE</i>	<i>NE</i>	<i>NE</i>	<i>NE</i>	<i>ANO</i>
Cena	<i>641Kč</i>	<i>1 717Kč</i>	<i>1 990Kč</i>	<i>3 290Kč</i>	<i>4 590Kč</i>

4 Měřicí software

V této části práce se zaměřuji na popis a hodnocení programu z hlediska ovládání a funkčnosti. Požadavkem na programy bylo měření SPL a frekvenčních analýz, pokud možno FFT i CPB. Vybral jsem tedy software typu real-time analyzátor, který provádí frekvenční analýzu právě snímaného signálu. Mezi 5 zde uvedenými programy je zastoupen freeware (REW) i drahé licence (Smaart). Každý z nich umožňuje export změřených dat a kromě jedné výjimky všechny pracují s FFT i CPB analýzou. Pro měření SPL nabízí, buď samostatnou funkci s řadou dalších možností, nebo je ukazatel integrován v základní ploše programu. Některé programy byly vybrány na doporučení vedoucího této práce, další jsem vyhledal pomocí internetu, na základě diskusních fór a referencí. Výsledky měření jsou uvedeny v další kapitole.

4.1 Smaart v. 7

Vydavatelem 7. verze programu je Rational Acoustic, malá společnost programátorů, kteří pracovali na dřívějších verzích programu pod firmou EAW. Nyní se samostatně zabývají pouze produkcí programu Smaart. Program je určen především pro real-time měření a jeho struktura je k tomu přizpůsobená. Ihned po spuštění vyzývá k vytvoření měřicího kanálu. Těch je možné vytvořit několik a v průběhu měření je zobrazovat současně či jednotlivě. Při použití zvukové karty s více vstupy nebo mixážního pultu, je možné pro každý kanál nastavit jiné parametry průměrování či váhového filtru.

Pro jednosměrná real-time měření nabízí FFT s nastavitelným průměrováním i počtem vzorků a CPB analýzu v rozlišení 1 až 1/48 oktávy. Další možností je zobrazení spektrogramu. Měření impulzní odezvy nebo přenosových charakteristik vyžaduje obousměrný převodník pro přehrávání interního generátoru. Pracovní plochu lze rozdělit na dvě zobrazovací okna a sledovat tak průběh vysílaného i měřeného signálu. Funkcí Capture lze okamžité průběhy zaznamenat, pojmenovat, upravit nastavení a exportovat do tabulek, ukládání v demo verzi není možné. Seznam zachycených průběhů je v pevném panelu na levém okraji pracovní plochy. V pravém horním rohu je umístěn zvukoměr, který nabízí zobrazení okamžitého nebo ekvivalentního akustického tlaku. Pro přesné měření SPL je zapotřebí kalibrace. Tu lze provést buď připojením kalibrátoru o známé úrovni na mikrofon, nebo změřit akustický tlak v místě mikrofonu externím zvukoměrem a tyto hodnoty zapsat do programu, který podle nich upraví zobrazované stupnice. Pro mikrofony je možné nahrát ze souboru kalibrační křivku, pokud je k dispozici.

Uživatelské rozhraní Smaartu je jednoduché, přehledné a má kvalitní grafické zpracování. Z vybraných programů v této BP se mi s ním pracovalo nejlépe. Vyzkoušená 30 denní demo verze je ke stažení zdarma na internetových stránkách vydavatele, ale není možné ukládat nastavení programu a změřených průběhů. Plná verze programu Smaart v. 7 je zpoplatněna velmi vysokou částkou 895,- \$ na CD nebo ke stažení online. Pokud již uživatel vlastní předchozí verzi, vyjde ho upgrade levněji. Doporučené vybavení PC je Win XP, 2 GHz CPU, 2 GB RAM a vyšší. Na testovacím notebooku s horší konfigurací ale přesto běžel bez obtíží.

4.2 ARTA

Software ARTA je už v základní verzi profesionálnější nástrojem pro akustická měření. Strohý design ale široká nabídka funkcí a nastavení, jej, dle mého názoru, řadí spíše k laboratorním měřením. Samotná ARTA nabízí měření impulzních metod, real-time analýzy signálů a frekvenční přenosové charakteristiky. Dále ji lze rozšířit o doplňky LIMP pro měření parametrů reproduktorů, včetně impedančních charakteristik. Doplňek STEPS je program pro měření frekvenční odezvy pomocí stupňovaného sinusového buzení. Měření impulzních odezev ARTA využívá vlastního generátoru růžového i bílého šumu, harmonických a rozmítaných signálů. K tomu je zapotřebí převodník (zvuková karta) pro přehrávání i záznam. Pro real-time měření, které jsem s programem prováděl, nabízí FFT i CPB analýzu s možností veškerého nastavení. Pro FFT lze vybrat ze sedmi typů okének, nastavit průměrování i počet vzorků od 4096 po 131072 ve frekvenčním rozsahu 20 Hz – 100 kHz. CPB analýza je na výběr oktávová nebo 1/3 oktávy. Spektrální graf FFT je zobrazený v hlavní pracovní ploše programu, pro CPB je třeba otevřít samostatné okno. Z obou typů lze exportovat zachycený graf jako obrázek a hodnoty jako *.csv soubor. Dalším modulem je měření SPL. V novém okně ARTA zobrazuje ekvivalentní hodnotu L_{aeq} , kde je na výběr několik váhových filtrů i okamžitý akustický tlak a zaznamenává maximální hodnotu. Pro přehlednější záznam je akustický tlak v závislosti na čase vykreslován do grafu, který lze také exportovat jako csv soubor nebo obrázek.

ARTu v poslední verzi 1.7.1 lze stáhnout ze stránek vývojáře Ivo Mateljna na www.artalabs.hr. Až po jeho instalaci program vyzve k výběru demo, nebo zakoupení licence online. Demoverze není placená ani časově omezená. Nabízí všechny možnosti programu, ale nelze ukládat výsledky měření. Cena licence pro nekomerční použití je 79,- €. Ve srovnání s programem Smaart je tato částka velmi nízká. Systémové nároky na PC nejsou vysoké, na zkušebním notebooku program fungoval bez chyby.

4.3 REW

Software, celým názvem Room EQ Wizard v. 5 je možné po registraci stáhnout na internetovém fóru www.hometheatershack.com. Registrace je zdarma, ale je relativně zdouhavá, instalace nevyžaduje licenci a používání programu bez jakýchkoliv omezení je také zdarma. REW je Java aplikace, jsou tedy nezbytné nainstalované a aktualizované ovladače pro tuto platformu. Design a struktura programu je jednoduchá a přehledná. V úvodním okně je umístěná navigace formou velkých ikon. Každá z funkcí programu pracuje v samostatném okně, v případě generátoru a SPL metru jsou malá a dobře přehledná, lze je tedy umístit do pozadí plochy Windows při další práci. Generátor nabízí sinus, šumy, obdélník a rozmítané signály. Při měření SPL a L_{eq} je na výběr A, C nebo nulový váhový filtr. Pro kalibraci interního SPL metru je možné využít REW testovacích signálů nebo externí zdroj. V případě REW generátoru je zapotřebí vlastní SPL metr pro zadání změřené hodnoty a při externím zdroji zvuku také buď SPL metr nebo kalibrátor o známé úrovni. Další funkcí REW SPL metru je Logger, který vykresluje graf aktuálních a maximálních hodnot SPL i L_{eq} v závislosti na čase, ten je možné zachytit jako obrázek, nebo exportovat do číselného souboru.

Na svých internetových stránkách je REW propagován jako software především pro měření prostorové akustiky a analýzy místností. Dále pro měření přenosových charakteristik reproduktorů a TS parametrů. Celkově je program zaměřen spíše na offline zpracování a analýzu změřených signálů. Ze zaznamenaných průběhů lze dopočítávat zpoždění, fázi, spektrogram a waterfall křivky. Testovaný režim real-time taktéž pracuje v novém okně a veškeré nastavení parametrů se provádí až v něm. REW pracuje pouze v rozlišení 48 kHz/16bit, takže je možné měřit jen v akustickém pásmu. FFT analýzu lze měřit s počtem vzorků 8192 až 131072, z okének je na výběr Hann, Blackman-Harris a Flat-Top. Dále lze nastavit průměrování, překrytí vzorků a obnovovací interval. CPB analýzu lze zobrazovat sloupcově nebo křivkou v rozlišení 1/1 až 1/48 oktávy. Ikona fotoaparátu slouží pro ukládání průběhů jako obrázek ve formátu JPEG a PNG. Měření je také možné uložit do hlavního okna programu REW, kde je možné je editovat, srovnávat a ukládat měření jako soubory ve formátu pouze pro REW nebo exportovat jako číselný soubor txt pro další zpracování. U exportu je důležité nastavit vhodný způsob oddělování sloupců frekvence a amplitudy, jinak je např. v programu MS Excel není možné načíst sloupce odděleně. Zajímavou funkcí je export impulzní odezvy do zvukového formátu *.wav.

4.4 TrueRTA

Jak ze z názvu patrné, jedná se o software určený k real-time analýze. TrueRTA je napsán Johnem L. Murphym a poslední verze 3.5.2 je ke stažení z internetových stránek www.trueaudio.com. Software pracuje pouze s CPB analýzou a záleží na uživateli, jaké rozlišení požaduje a kolik je za něj ochoten zaplatit. TrueRTA je rozdělen na úrovně Level 1 až Level 4, přičemž testovaný Level 1 je zdarma a nabízí pouze 1/1 CPB a omezuje některé funkce programu. Nejdražší Level 4 umožňuje 1/24 CPB analýzu a jeho cena je 99,95 \$. Samplovací frekvence je pro všechny verze stejná 96kHz, nelze jí změnit.

Všechny funkce a ovládací prvky jsou umístěny v hlavní pracovní ploše. Program nepoužívá žádná samostatná okna. TrueRTA nabízí dva režimy měření. Jedním je osciloskop, který zobrazuje průběh amplitudy signálu v závislosti na čase a druhým právě real-time CPB analýza. Pásmovou analýzu lze zobrazovat sloupcově i křivkou. Další integrovanou funkcí je generátor, ten ve verzi Level 1 nabízí průběhy sinus, trojúhelník, obdélník, růžový šum a impulzy. Bílý šum a rozmítání obsahují až placené verze programu. Další omezení je v zachycování průběhů do paměti programu, kdy není možné zaznamenat více průběhů v čase a pak je srovnávat. Ukládání měření a export průběhů do textového souboru není omezeno. Kalibraci SPL je taktéž nutno provést pomocí externího kalibrátoru nebo SPL metru při spuštění analyzátoru. Praktickou funkcí je real-time ukazatel úrovně vstupního signálu v mV. Minimální požadavky na PC jsou 500 MHz CPU, 46 MB RAM, OS Windows XP a vyšší. Udávané systémové nároky jsou nižší, než byla konfigurace zkušebního notebooku, program se však často zpomaloval a přestával pracovat.

4.5 SpectraPlus

Další z řady RTA spektrálních analyzátorů, napsaný pouze pro potřeby analýzy signálů. Ve srovnání např. s programem Smaart nabízí podstatně větší množství funkcí a zařadil bych jej spíše do laboratorních podmínek, kde nezáleží na grafickém designu, ale především na vybavenosti programu. Pracovní prostředí softwaru je graficky velmi strohé, bez jediného barevného prvku, proto chvíli trvá, než se uživatel zorientuje. Na druhou stranu je zde široká lišta, kde má každá funkce svůj ikonu se symbolem a není tak nutné je vyhledávat v rozbalovacích záložkách. Matoucí je však jeden symbol umístěný na dvou ikonách, přičemž každá má jinou funkci. Vedle těchto tlačítek jsou nástroje pro rychlou úpravu měřítek spektrálního grafu, který zabírá prakticky 90% plochy programu, je tedy velmi dobře čitelný. Nastavení parametrů grafu frekvenčního spektra ale vyžaduje více času a pozornosti.

Problémem je obnovovací interval, jehož hodnota je v základním nastavení velmi nízká a graf nepříjemně rychle bliká, takže z něho v podstatě není možné odečítat. Dalším úskalím je frekvenční osa, jejíž rozsah se automaticky mění podle zvoleného typu analýzy. Konkrétně při CPB analýze se dolní hranice zvyšuje s počtem frekvenčních pásem. Při použití 1/3 oktávové analýzy je možné měřit od 89 Hz, čili první zobrazované frekvenční pásmo má střední frekvenci na 100 Hz. Navíc po přepnutí na FFT analýzu se tento limit nezmění a je třeba ho upravit ručně v nastavení. Protože se u ostatních softwarů tento problém nevyskytoval, všiml jsem si ho, jak je vidět na Obr. 4 v Příloze, až při vyhodnocování výsledků. Čím je toto automatické nastavení dáno nebo jak ho lze změnit, jsem při používání softwaru nezjistil. SpectraPlus umožňuje ukládání konfigurací programu, takže je možné se tomuto problému napříště vyhnout uložením několika variant nastavení pro různé typy měření.

Jednou z praktických funkcí je např. zobrazení frekvence a úrovně signálových špiček buď jako další křivku v grafu, nebo ve formě číselných ukazatelů v samostatných oknech. Do frekvenčního spektra lze umístit až 8 kurzorů amplitudy na zvolené frekvence. Hodnoty frekvenční analýzy lze zobrazovat i jako číselnou tabulku v novém okně. V dalších samostatných oknech je možné sledovat hodnoty THD, SNR, L_{eq} a další. Pravým tlačítkem myši lze snadno zachytit aktuální průběh a ihned jej exportovat do textového a tabulkového editoru nebo jako obrázek. Dalšími zajímavými funkcemi jsou spektrogram a frekvenční spektrum, zobrazované ve 3D grafu v závislosti na čase. Tyto průběhy lze ukládat jako obrázky. Generátor je ze všech programů nejvíce vybavený, kromě standardních signálů umožňuje nadefinovat vlastní např. skládáním tónů, nebo použít vlastní audio soubor formátu wav.

Testovaná demo verze je na 30 dní zdarma, není v ní žádná funkce programu omezena a nabízí tedy FFT i CPB analýzu s veškerým možným nastavením. Cena základní verze programu SpectraPlus s velkým omezením je 295,- \$. V této konfiguraci je i CPB analýza omezena jen na 1/1 a 1/3 oktávy. Další funkce a rozšíření jsou rozděleny do 10 balíčků, které lze dokupovat po 200,- \$. Některé z nich jsou např. generátor, 3D graf, spektrogram, dvoukanálové měření a vícepásmová CPB analýza. Relativně výhodnou nabídkou je základní software a 3 volitelné balíčky za cenu 695,- \$. Na internetových stránkách www.spectraplus.com jsou kromě samotného programu a jeho rozšíření k zakoupení i další měřicí komponenty včetně kalibrátoru. Minimální požadavky na PC jsou OS Windows XP, Pentium, 1 GB RAM a vyšší. Na testovacím notebooku software pracoval bez problémů.

5 Měření

Jako způsob porovnání měřících programů byla zvolena metoda real-time FFT a CPB analýzy dvou typů signálů. Cílem bylo zjistit jak přesně a rychle programy vyhodnocují měřený signál. Měření probíhalo v akustických laboratořích Fakulty elektrotechnické ve dvou dnech. Přehrávaný signál byl snímán testovaným řetězcem a analyzátozem PULSE, jeho výsledky jsou brány jako referenční, se kterými jsem porovnával výsledky z ostatních softwarů. Ke každému změřenému průběhu byl uložen i aktuální průběh z Pulsu. V příloze jsou samostatné grafy všech změřených průběhů ve srovnání s vlastním výsledkem z Pulsu.

5.1 Měřicí řetězec

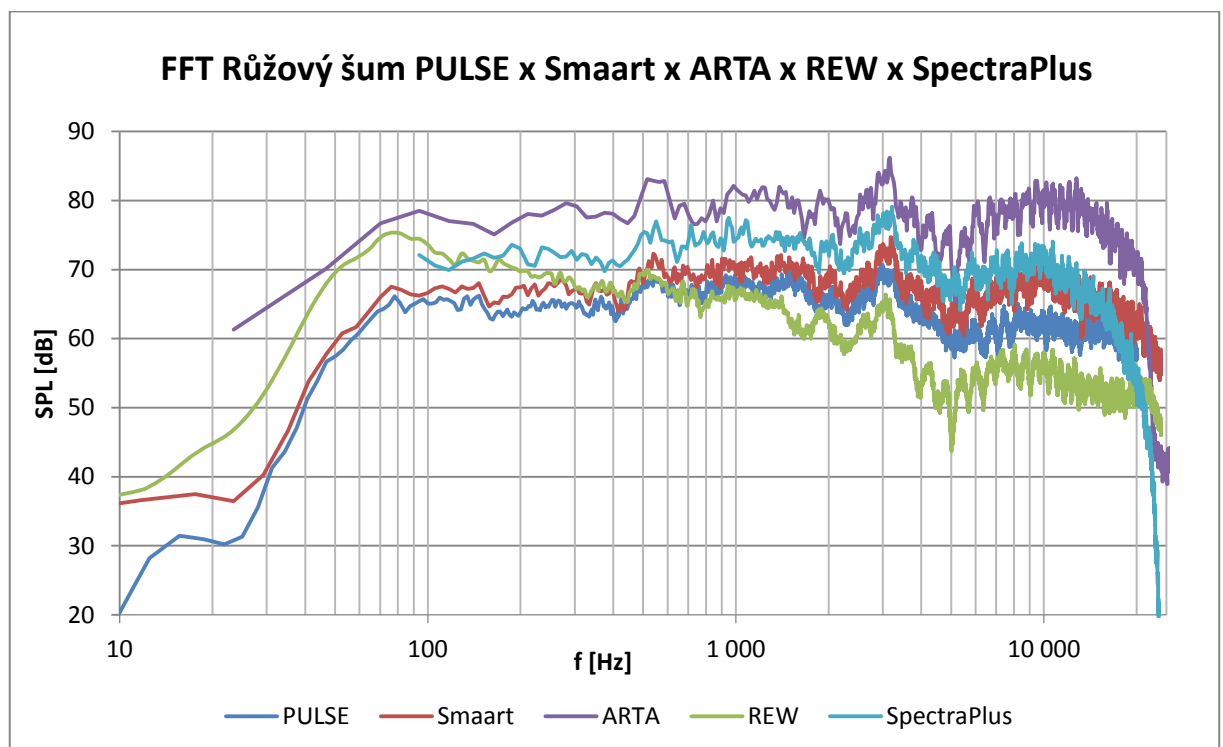
Všechny měřící programy uvedené v kapitole č. 4 byly současně nainstalovány na starším notebooku Asus M6000 s konfigurací CPU Intel Pentium M 1,6 GHz, 384 MB RAM, grafická karta ATI Radeon 9000 IGP 128 MB a operačním systémem Windows XP Professional SP3. Další komponenty měřícího řetězce byly USB převodník MXL Mic Mate Classic a mikrofon Behringer ECM8000, obojí je uvedené v předchozích kapitolách této práce. Jako zdroj signálu a referenční měřící kanál byl použit analyzátor PULSE od firmy Brüel & Kjaer, ovládaný softwarem PULSE LabShop. Pro přehrávání signálu v bezodrazové komoře sloužila jedna z laboratorních reproduktorových soustav. Přenosové parametry soustavy nebyly v tomto typu měření důležité. Použité testovací signály byly 1 kHz sinus a růžový šum. Každý z programů byl testován samostatně a jejich nastavení v rámci možností podobné.

5.2 Vyhodnocení

5.2.1 FFT analýza růžového šumu

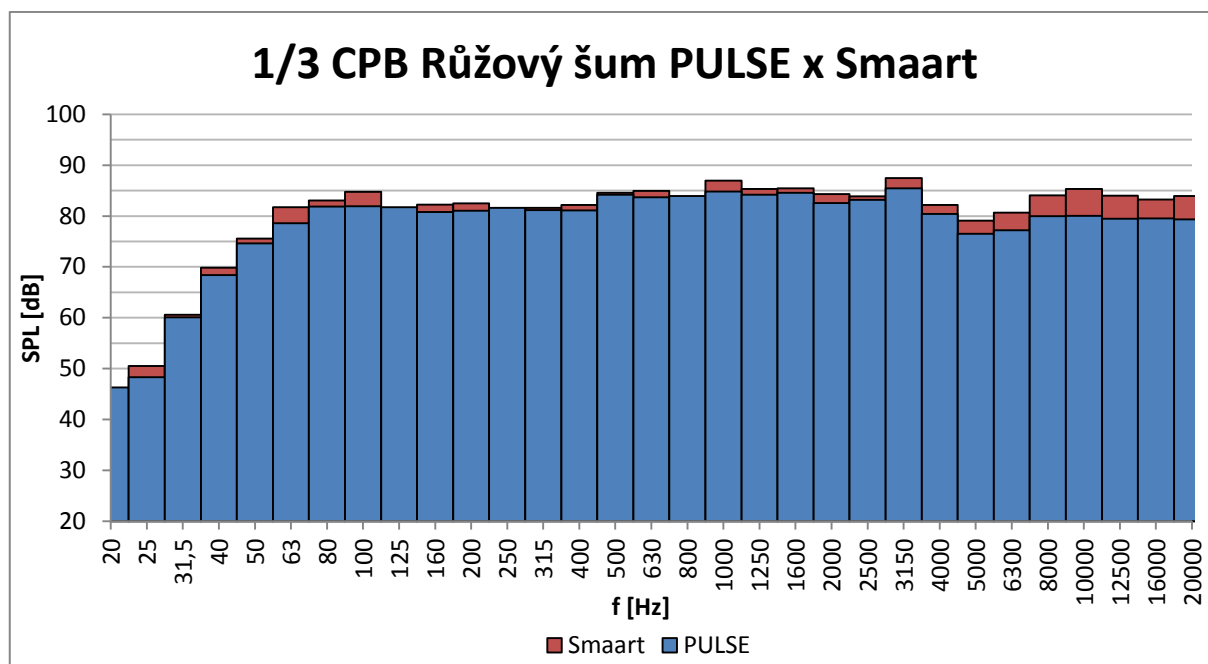
V grafu na obrázku obr. 5.1 jsou vyneseny hodnoty změřených průběhů růžového šumu z každého testovaného softwaru. Pro přehlednost je v grafu znázorněn pouze jeden průběh z analyzátoru PULSE a to ten, který byl zachycen při měření softwaru Smaart. Takže pro ostatní průběhy není toto srovnání zcela relevantní, ale dává alespoň základní informaci o tvaru referenčního signálu. Z výsledků plyne, že nejpřesnější výsledek je právě z programu Smaart. Jeho průběh se od 30 Hz téměř shoduje s referenčním. Ostatní průběhy jsou tvarově také velmi podobné, ale ve většině případů jsou celé posunuty o několik dB výš na ose SPL, pouze výsledek REWu je pod svojí referenční hodnotou. Tyto rozdíly v hodnotách akustického tlaku jsou pravděpodobně dány ne zcela přesnou kalibrací softwaru před

měření. Všechny programy byly kalibrovány kalibrátorem 94 dB 1 kHz. Protože každý z programů potřeboval jinak dlouhý časový interval a mikrofon i notebook byly v oddělených místnostech, bylo zapotřebí dvou osob a hlasových signálů pro domluvu. Tímto způsobem se do kalibrace zřejmě zaneslo zkreslení. Aby se dosáhlo přesnějších výsledků úrovně SPL, bylo by potřeba věnovat kalibraci více pozornosti. Největší chyba SPL je ve výsledcích z programu ARTA. Tvarově je průběh velmi podobný referenčnímu, ale je hlasitější cca o 10 dB. Tento software byl měřen jako první a projevila se zde velká chyba kalibrace. V každém změřeném průběhu se dále projevuje malé zesílení kmitočtů v oblasti 10 kHz. Protože je tato chyba v každém výsledku, je na vině mikrofon a jeho nevyrovnaná kmitočtová charakteristika. Pokud by byla k dispozici jeho kalibrační křivka, bylo by možné podle ní výsledky upravit. Do všech programů lze tuto křivku nahrát a získat tak přesnější výsledky. Další nestandardní výsledek se objevil při měření programu REW (Obr. 9 v Příloze). Na referenčním i testovaném průběhu je hrb v oblasti nízkých kmitočtů a to +12 dB na 80 Hz oproti ostatním měřením. Tuto chybu přisuzuji probíhajícím stavebním pracím v těsné blízkosti akustických laboratoří. Ve vzdálenosti několika desítek metrů probíhala výstavba nové univerzitní budovy, proto mohly stavební stroje způsobit momentální zvýšení hlukového pozadí na nízkých kmitočtech.



Obr. 5.1 Srovnání změřených průběhů růžového šumu

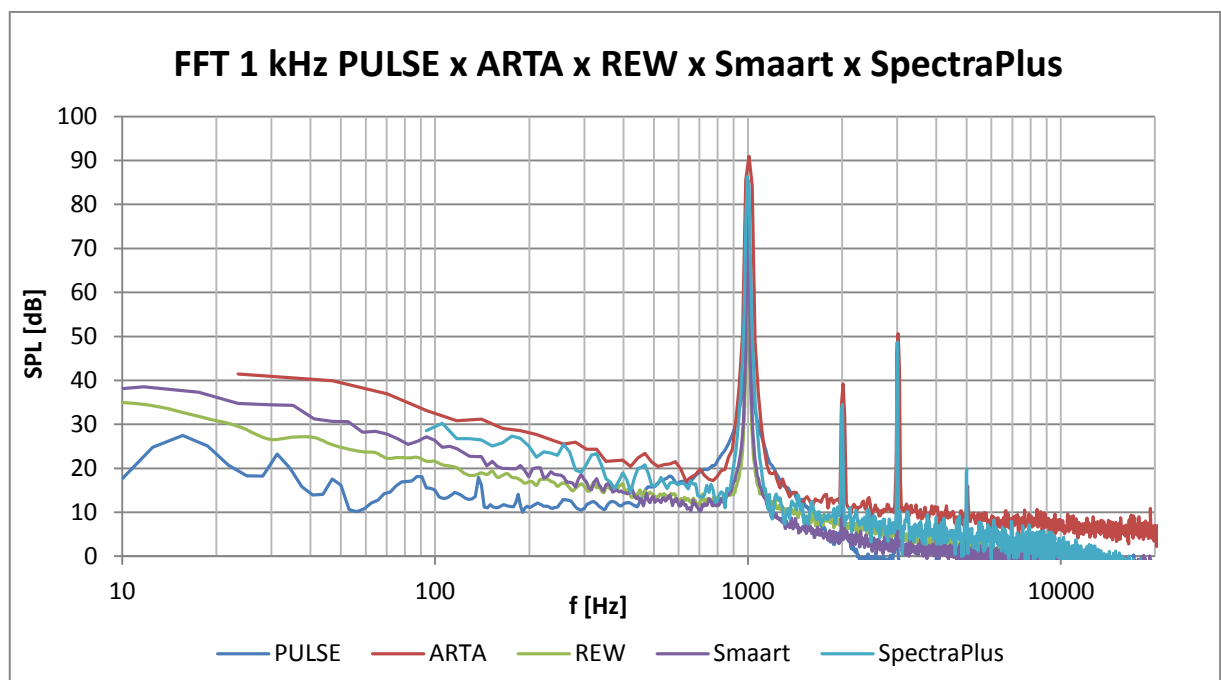
5.2.2 CPB analýza růžového šumu



Obr. 5.2 CPB analýza růžového šumu programem Smaart v.7

Výsledky CBP analýzy vycházejí téměř ve všech případech podstatně přesněji než v předchozím měření. Výsledek z programu REW je stejně jako u FFT o několik dB méně hlasitý než jeho referenční signál. Druhá největší odchylka vznikla v programu TrueRTA. Při oktávové analýze na nízkých kmitočtech je amplituda o cca 10 dB nižší. Od 6. oktávy je již průběh zcela shodný s referenčním. Tato odchylka může být způsobena celkovým pomalým zpracováním v programu. I při nastavení rychlejšího obnovovacího intervalu a nižšího počtu průměrů (100) trvalo vykreslení grafu delší dobu než u ostatních programů a tak jsem průběh nejspíš zaznamenal ještě před vykreslením maxima. Problém s programem SpectraPlus a jeho frekvenční osou, popisovaný v kapitole č. 4 je vidět na výsledcích této analýzy v příloze práce. Zcela zde chybí frekvenční spektrum pod 90 Hz, zbytek analýzy je velmi přesný s maximální odchylkou + 3 dB v pásmu 10 kHz. Tu, jak jsem popisoval výše, přisuzuji mikrofonu, protože se objevila v každém měření růžového šumu. V ostatních frekvenčních pásmech je největší odchylka + 2 dB od referenčního Pulsu. Na grafu v Obr 5.2 je znázorněn průběh 1/3 analýzy ze softwaru Smaart, který hodnotím jako nejlepší, protože poskytl výsledek v celém frekvenčním spektru 1/3 analýzy s odchylkou max. + 3 dB, když přehlédnu zesílení mikrofonu na 10 kHz.

5.2.3 FFT analýza 1 kHz

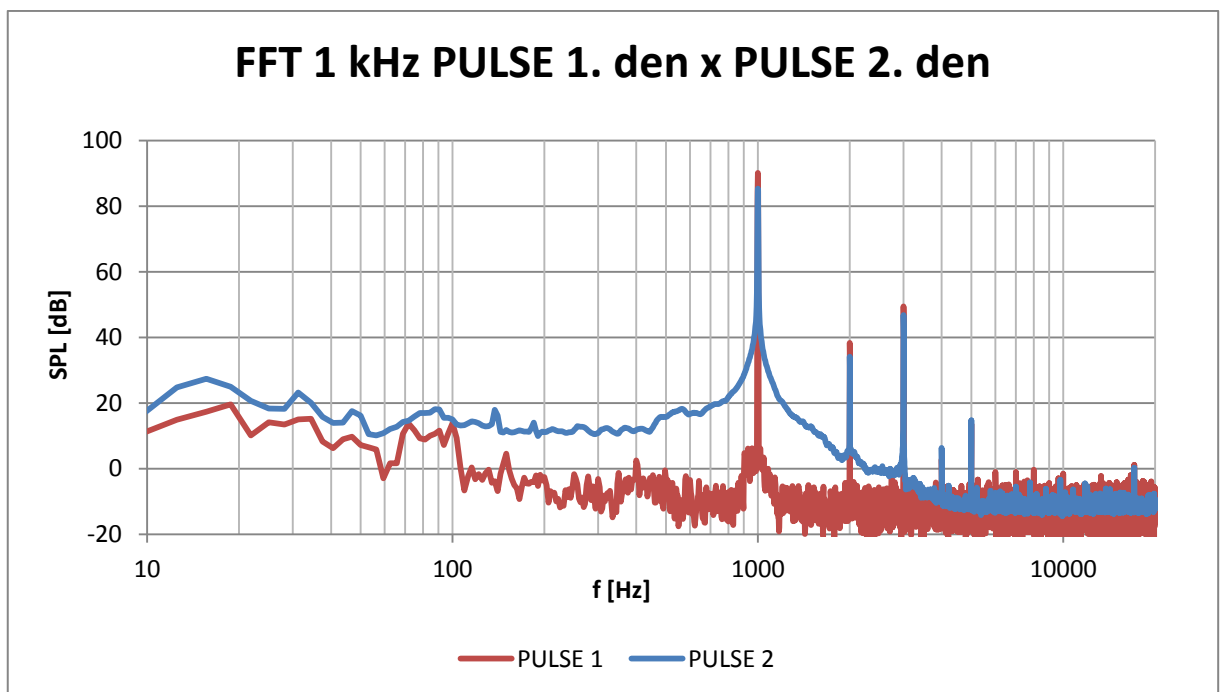


Obr. 5.3 FFT analýza 1 kHz

Měření s programy ARTA a REW probíhalo v jiný den, než se Smaartem a Spectrou. V grafu na obr. 5.3 je jako referenční průběh z Pulsu uveden ten, který byl zachycen při měření Smaartu. Vzhledem k tomuto průběhu vycházejí výsledky ve sledované oblasti 1 kHz velmi přesně. Rozdílem při měření v prvním a druhém dni jsou právě frekvenční spektra z analyzátoru PULSE. První měření probíhalo v pátek v poledních hodinách a druhé následující čtvrtek ráno v 9 hodin. Přestože nastavení analyzátoru a softwaru LabShop zůstalo stejné, průběhy se velmi liší. Tyto dva výsledky jsou znázorněny v grafu na obr. 5.4. Vysvětlením tohoto rozdílu v úrovni nižších kmitočtů mohou být výše zmiňované stavební práce, probíhající velmi blízko akustických laboratoří. Průběh PULSE 1 z pátečního poledne není zkreslený hlukovým pozadím, protože pohyb strojů na stavbě nebyl tak intenzivní jako ve čtvrtek ráno.

Při srovnání testovaných programů s průběhem PULSE 1 z pátečního poledne již výsledky nejsou tak přesné, zejména v úrovni šumu pod hlavním signálem 1 kHz. Největší odchylka je ve výsledku programu ARTA. Amplituda 1 kHz se liší od referenčního o pouhých 0,7 dB, ale ve zbytku spektra je odchylka až 20 dB. Podobně jsou na tom také výsledky programu REW, změřené ve stejný den. Na Obr. 13 v Příloze je ale vidět i odchylka v amplitudě 1 kHz a to -6 dB, která se projevila ve všech typech měření tímto programem. Výsledky programů Smaart a SpectraPlus měřené v jiný den vycházejí ve srovnání se svým

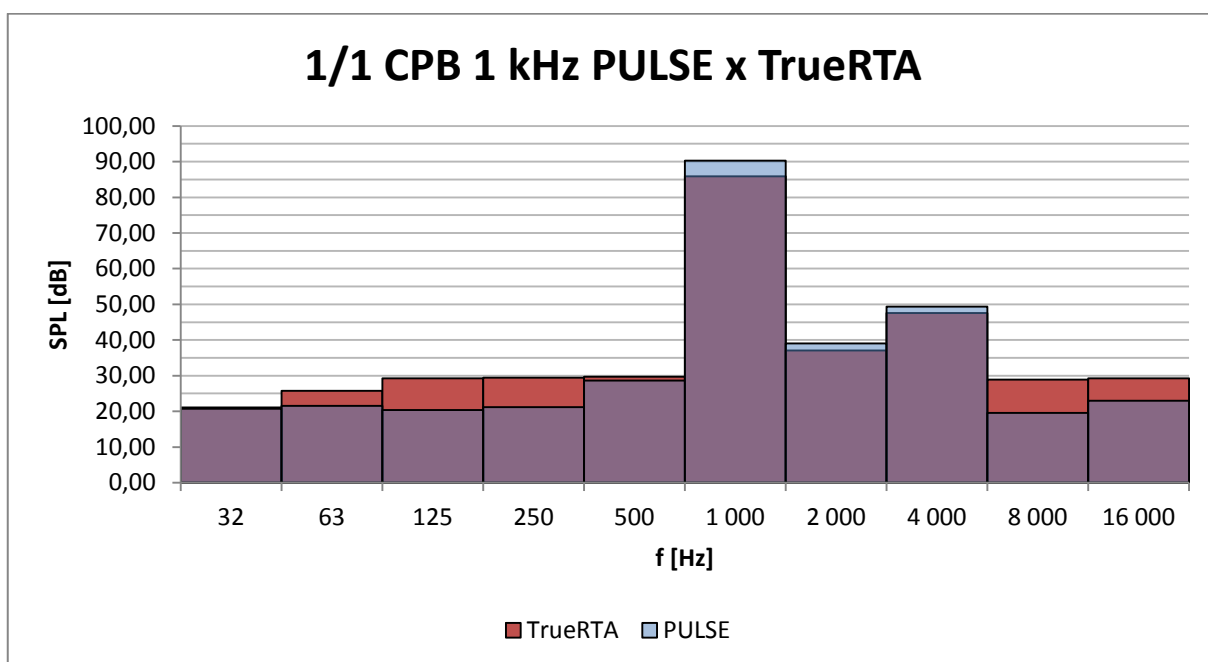
referenčním signálem lépe než předchozí dva, ale v porovnání s průběhem PULSE 1, který není zkreslen hlukem ze stavby, jsou na tom velmi podobně jako REW a ARTA. V amplitudě signálu 1 kHz, je ale Smaart i SpectraPlus velmi přesná, s odchylkou menší než 1 dB. Při měření tohoto průběhu se již v kvalitě zpracování projevil rozdíl mezi analyzátozem PULSE a testovaným řetězcem. Ten se skládal z nejdostupnějšího měřicího mikrofonu a jednoduché zvukové karty s rozlišením 16 bit/ 48kHz. Použitím méně bitového převodníku je maximální měřitelný dynamický rozsah teoreticky 96 dB. Ten je ale dále omezen parametrem SNR, odstupem signálu od šumu samotného převodníku. Efektivní počet bitů je tedy nižší než jmenovitý. Znamená to, že převodník nezpracuje signály pod úrovní, která vznikne odečtením skutečného dynamického rozsahu od maximální amplitudy signálu, v tomto případě 1 kHz. Dynamický rozsah celého řetězce může být dále snížen šumem mikrofonu. Matematickým zpracováním v měřicím softwaru také může vzniknout odchylka použitím nevhodného časového okna. Pro předem známý průběh signálu lze použít konkrétnější typ okénkové funkce, než obecné okno Hann v mém případě. Rozdíl v matematickém zpracování je ale až ve druhé řadě za technickými parametry snímacího řetězce a jeho nastavením.



Obr. 5.4 Dva průběhy signálu 1 kHz změřené analyzátozem PULSE v jiných dnech

5.2.4 CPB analýza 1 kHz

Tento typ analýzy pro signál, obsahující pouze čistý tón nebo jednotlivé harmonické, není příliš vhodný, protože z ní nezískáme přesnou frekvenci tónu, ale přibližné frekvenční pásmo, do kterého spadá. Pokud by ale byla použita velmi jemná např. 1/24, 1/48 analýza, můžeme dosáhnout podstatně přesnějších výsledků než v mém případě s programem TrueRTA, který ve freeware verzi nabízí pouze oktávovou analýzu. Z frekvenčního spektra na obr 5.5 nelze odečíst, zda má měřený signál frekvenci 800 Hz nebo 1200 Hz. V některých aplikacích však může i takto obecná analýza stačit.



Obr. 5.5 CPB analýza programem TrueRTA

6 Závěr

Cílem této práce bylo zmapovat možnosti běžného PC pro akustická měření a vybrat potřebný hardware k tomuto účelu. Výběr je zaměřen na vybavení nižší třídy pro základní a nelaboratorní měření. Jedním z kritérií je cena, proto je v práci uvedeno několik cenových a kvalitativních alternativ každého komponentu. V práci jsem popsals i základní problematiku zvuku, jeho vlastností a digitalizace. Praktickou částí je testování vybraných komponentů. Může tak sloužit jako přehled dostupných možností pro čtenáře, začínajícího s oborem akustických měření.

Použití dnes běžného počítače pro akustická měření je možné po jeho dovybavení vhodnými komponenty. V takovém případě je jeho použití výhodné z hlediska snížení nákladů za měřicí techniku a také z hlediska mobility při použití notebooku. Za dnes běžný počítač považuji vybavení CPU 32 bit s rychlostí kolem 1 GHz, 256 MB RAM a operačním systémem Windows XP. Prvním z uváděných komponentů měřicího řetězce je mikrofon, pro tyto účely výhradně kondenzátorový typ. Ve druhé kapitole jsou uvedeny 4 měřicí mikrofony v cenovém rozpětí cca 1 – 9 tisíc Kč. V nízké cenové relaci je v podstatě jedinou možností typ ECM8000 za zhruba 1 200,-Kč. Nelze ale od něj očekávat velmi přesné výsledky. Ke konkrétnímu kusu mikrofonu není k dispozici korekční křivka a jeho citlivost je nízká. Pro začátečnická, orientační a nenáročná měření je však více než dostačující, aby uživatel získal představu a hladině SPL, časovém nebo frekvenčním spektru signálů. U kvalitnějších alternativ cena exponenciálně vzrůstá do řádů desítek tisíc korun.

Dalším hledaným komponentem je zvuková karta, tedy převodník spojitého signálu do digitální podoby. Integrované zvukové karty v PC jsem vyloučil, protože k takovému použití nejsou primárně určeny a jejich zpracování nebývá kvalitní. Uvádím zde tedy 5 typů externích USB karet s cenou pod 5000 Kč, přičemž jedna z nich také byla použita pro měření.

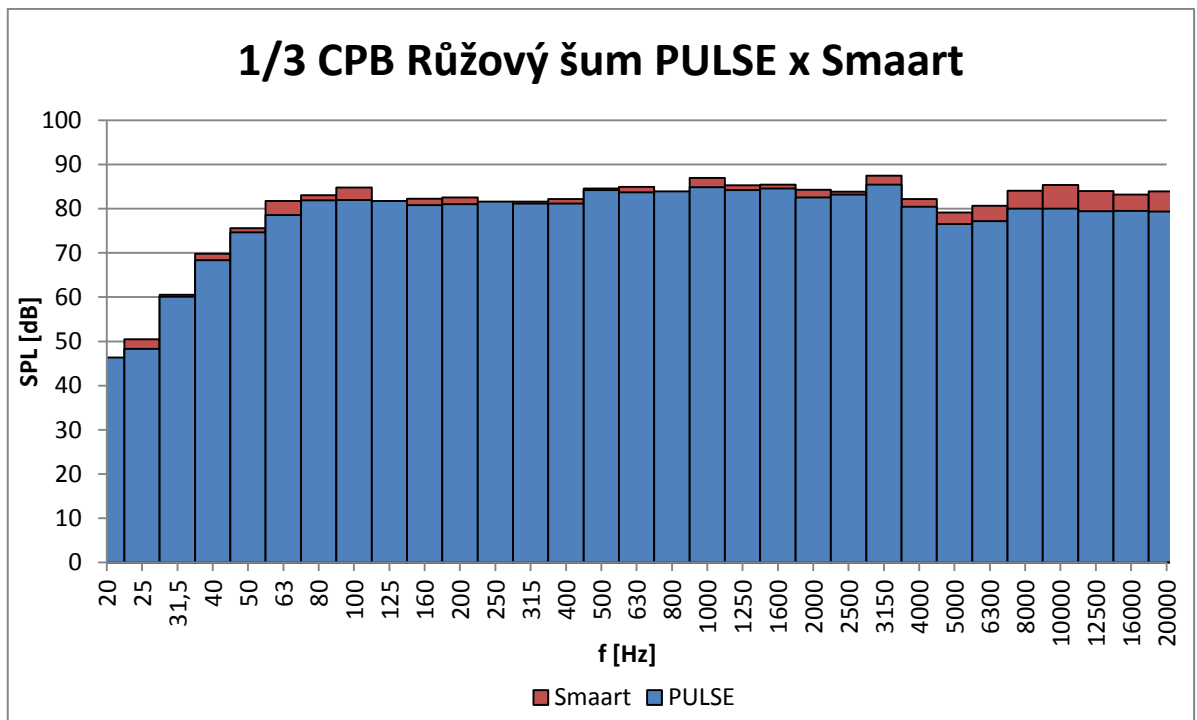
Měřicího softwaru je dostupné velké množství, aby byl ale program dobře funkční a nabízel širší možnosti, bylo třeba sáhnout i pro placené verze. Ve většině případů byla použita demoverze omezená časem nebo zablokovanou některou z funkcí. Jediným zástupcem freewaru je REW, který poskytl vyrovnané výsledky ve všech typech měření. V každém z nich se vyskytla stejná chyba nižší amplitudy, ale tu lze odstranit přesnější kalibrací. Nejlevnějším placeným je program ARTA, který za 79,- € nabízí všechny požadované funkce a je možné jej dále rozšiřovat. Výsledky z tohoto programu však nebyly vyrovnané v amplitudě SPL, rozdíl je vidět z FFT a CPB analýzy růžového šumu. Nejdražším uváděným softwarem je Smaart v. 7, jehož výsledky byly ale nejpřesnější a jeho obsluha nejsnazší.

Použitá literatura

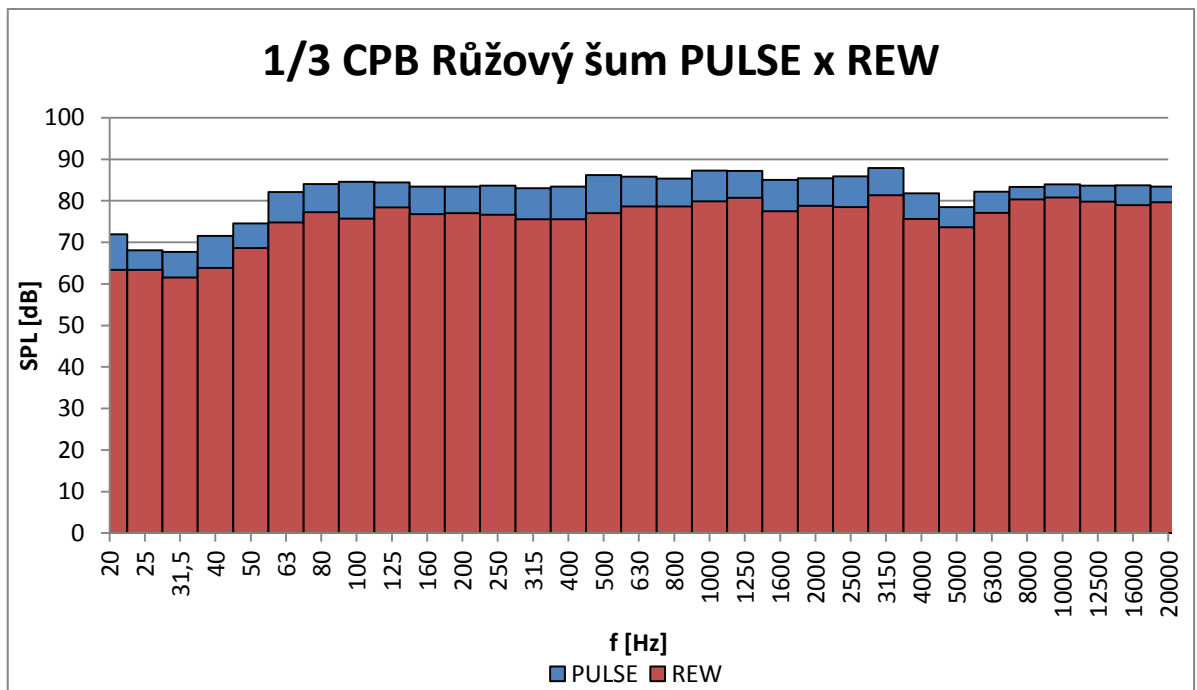
- [1] STIFTER J. *Přednášky z Úvodu do sdělovací techniky: Přenosové veličiny ve sdělovací technice*. Katedra aplikované elektrotechniky a telekomunikací
- [2] NOVÝ, R.: *Hluk a chvění*, vyd. 1., CVUT Praha 1995. ISBN 80-01-01306-5.
- [3] Nařízení vlády ze dne 24. srpna 2011 o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací. *Hluková legislativa*. [online]. [cit. 2012-04-20]. Dostupné z: <http://www.nrl.cz/legislativa/narizeni-272-2011.pdf>
- [4] PINKER J.; KOUCKÝ V. *Analogové elektrotechnické systémy 2. část*. Plzeň: 2006. Tiskové středisko ZČU, Plzeň
- [5] URBAN, Ondřej. *Digitální zpracování zvuku: 1.díl. Pixel 129*. roč. 07, č. 9. Dostupné z: <http://www.pixel.cz/pdf/129-36-digitalni-zpracovani-zvuku.pdf>
- [6] PANDUR, Sanjin. *Frekvenční analýza akustických signálů v diagnostice výkonových transformátorů*. Plzeň, 2008. Diplomová práce. Západočeská univerzita, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Eva Müllerová.
- [7] REGNER, Jan. *Optimalizace ozvučení poslechového prostoru systémem Surround 5.1*. Plzeň, 2005. Diplomová práce. Západočeská univerzita. Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Oldřich Tureček.
- [8] 500 Mikrofonkalibrierungen. *HiFi-Selbstbau: Online magazin* [online]. [cit. 2012-04-21]. Dostupné z: http://www.diylautsprecher.de/index.php?option=com_content&view=article&id=367:500-mikrofonkalibrierungen-eine-uebersicht&catid=36
- [9] Audio technica: Kondenzátorový mikrofon. [online]. [cit. 2012-04-20]. Dostupné z: <http://www.audio-technica-cz.com/kondenzatorovy-mikrofon.html>
- [10] MEASUREMENT CONDENSER MICROPHONE ECM8000. *Behringer* [online]. [cit. 2012-02-19]. Dostupné z: <http://www.behringer.com/EN/Products/ECM8000.aspx>
- [11] Audix TM1: Test and measurement microphone. AUDIX CORPORATION. [online]. [cit. 2012-04-20]. Dostupné z: http://www.audixusa.com/docs_12/specs_pdf/TM1.pdf
- [12] Sabine SQ1001: Reference Microphone. *SABINE*. [online]. [cit. 2012-04-20]. Dostupné z: <http://www.sabine.com/resources/Real-Q2/Literature/SQ1001-specifications-020822.pdf>
- [13] MONHART, Aleš. *Srovnání A/D a D/A převodníků se sériovou sběrnicí*. Plzeň, 2009. Bakalářská práce. Západočeská univerzita, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Tomáš Džugan.
- [14] MXL USB Mic Mate™ Classic: Microphone adapter. *Marshall Electronics* [online]. [cit. 2012-03-02]. Dostupné z: http://www.marshallmonitors.com/products/microphones/MicMate_Classic/index.html

-
- [15] T-Bone USB Audio Interface. *HiFi-Selbstbau: Online magazin* [online]. 15.1.2009 [cit. 2012-03-03]. Dostupné z: http://www.hifiselbstbau.de/index.php?option=com_content&view=article&id=266:t-%20%20%20bone-usb-audio-interface&catid=36:software--messtechnik&Itemid=66
- [16] SOBOTKA, František. Externí USB zvuková karta: M-Audio Fast Track mkII. *Music Store* [online]. roč. 10, č. 2 [cit. 2012-04-20]. Dostupné z: <http://www.music-store.cz/testy2.asp?ID=2354>
- [17] M-Audio MobilePre - druhá generace velmi úspěšné zvukovky. *Muzikus* [online]. roč. 11, č. 4 [cit. 2012-04-20]. Dostupné z: <http://www.muzikus.cz/pro-muzikanty-testy/MAudio-MobilePre-druha-generace-velmi-uspesne-zvukovky~22~prosinec~2011/>
- [18] KOSTELNÝ, Štefan. E-MU 0404 USB - externí zvukový interface. *Muzikus* [online]. roč. 07, č. 1 [cit. 2012-04-20]. Dostupné z: <http://www.muzikus.cz/pro-muzikanty-testy/EMU-0404-USB~25~cervenec~2007/>

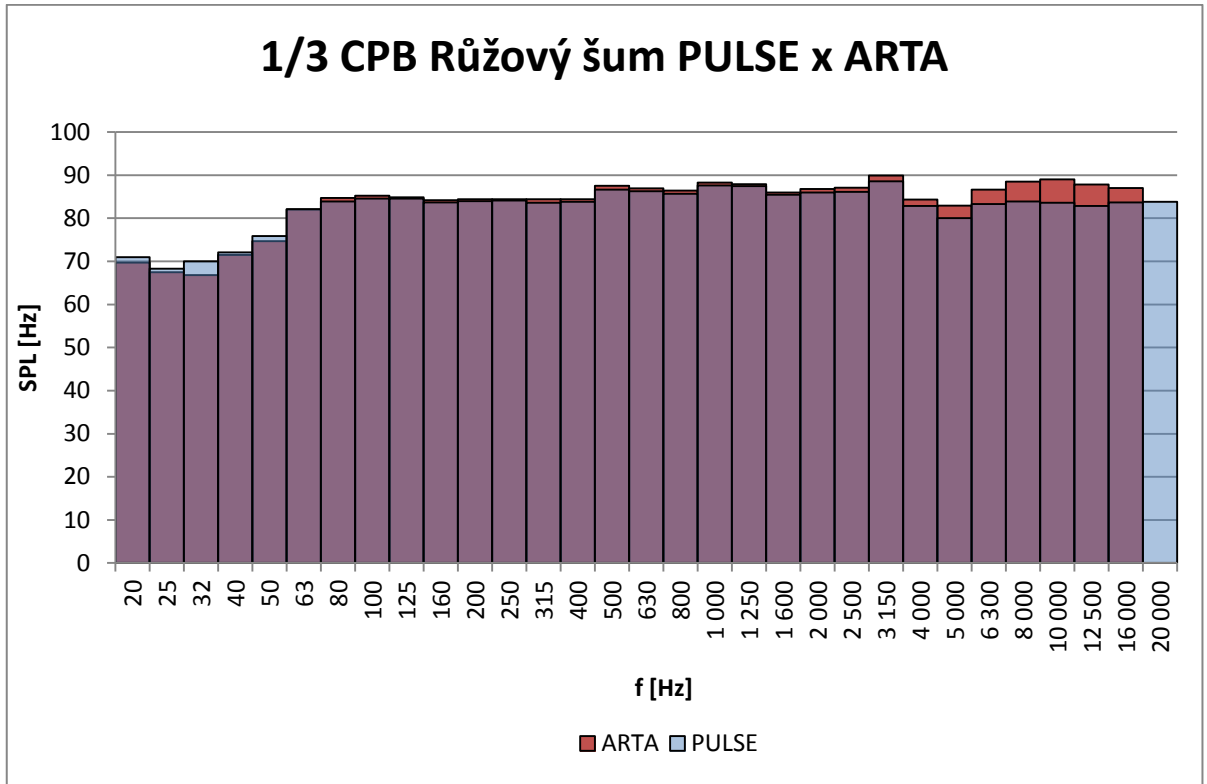
Přílohy



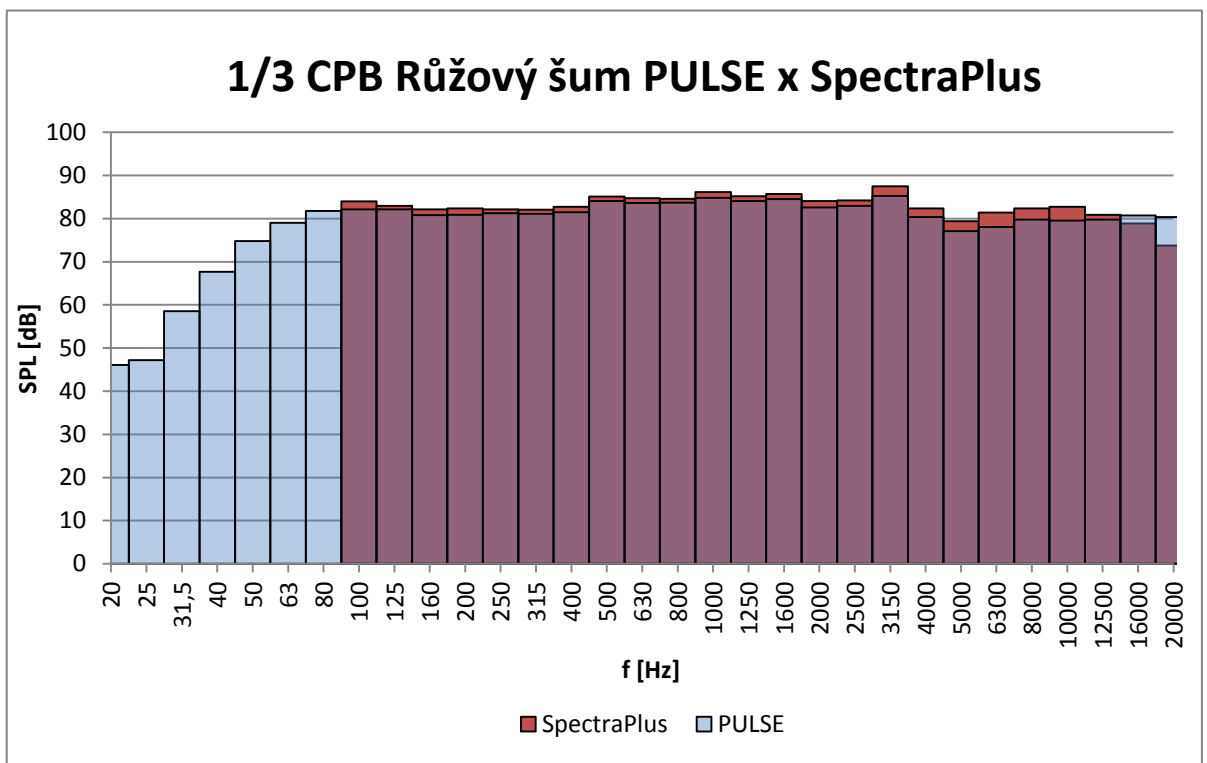
Obr. 1 CPB analýza růžového šumu programem Smart v. 7



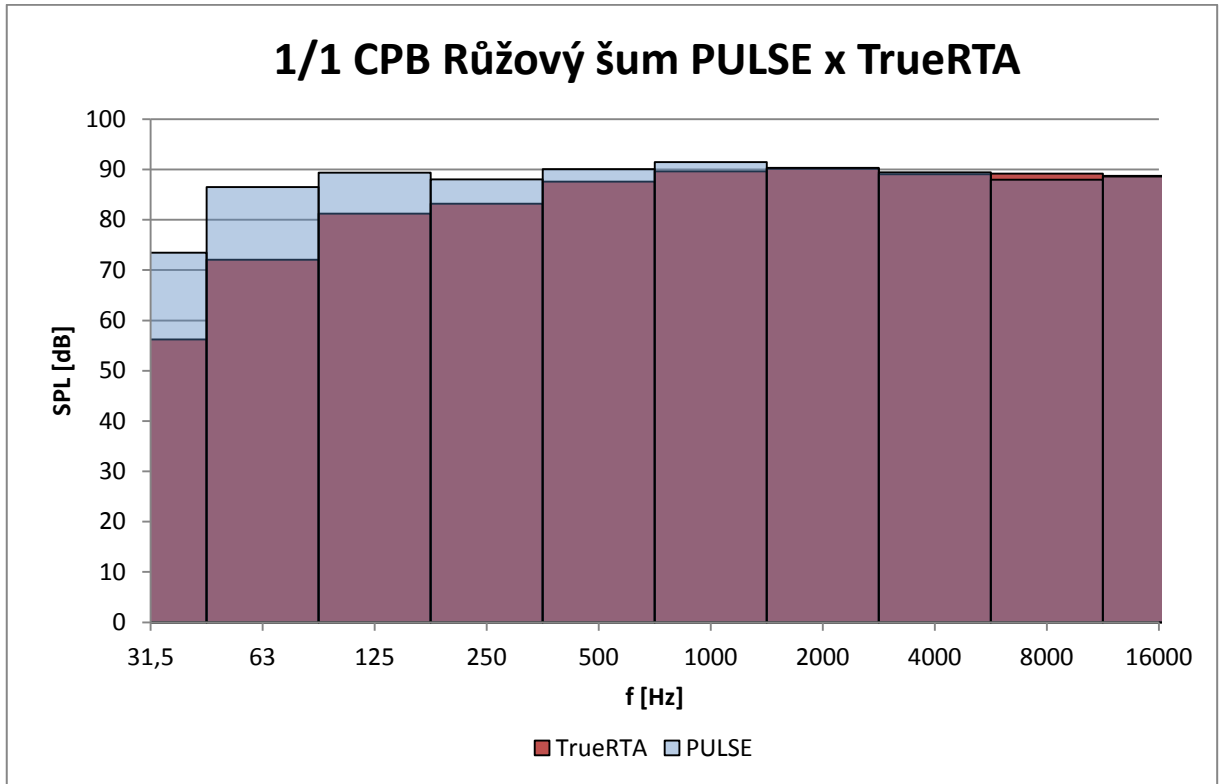
Obr. 2 CPB analýza růžového šumu programem REW



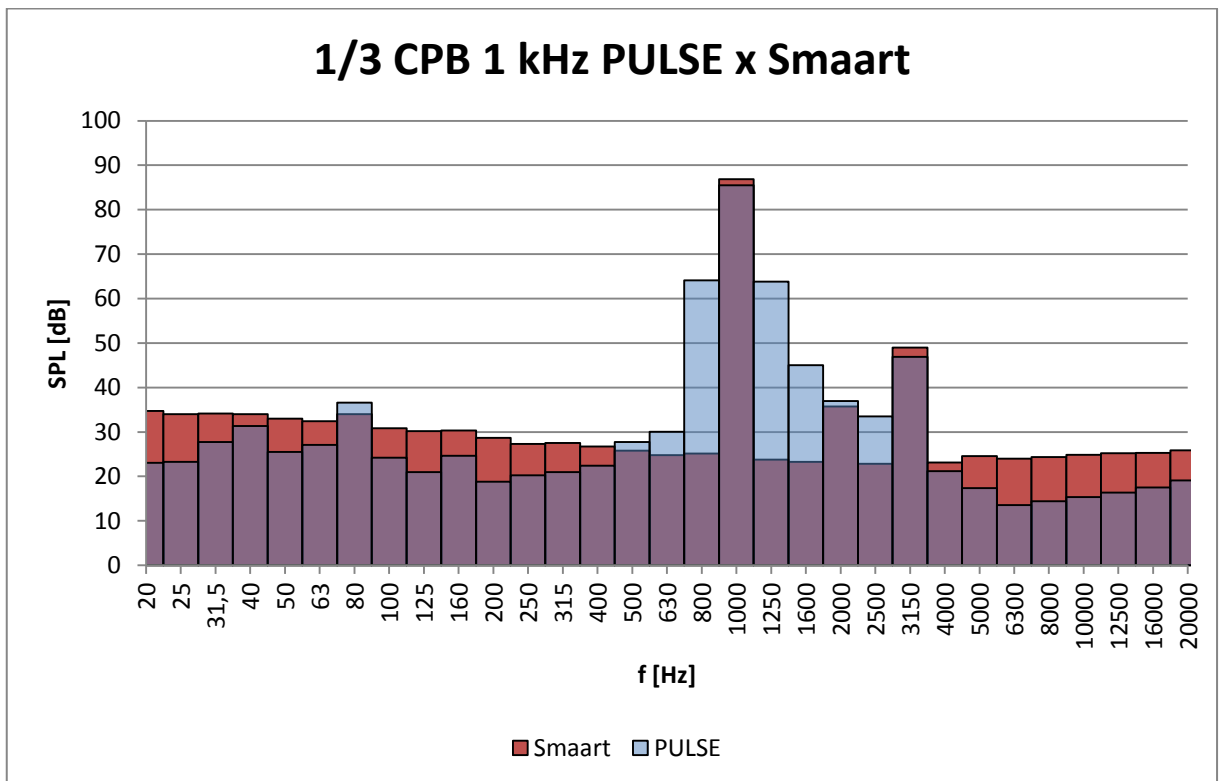
Obr. 3 CPB analýza růžového šumu programem ARTA



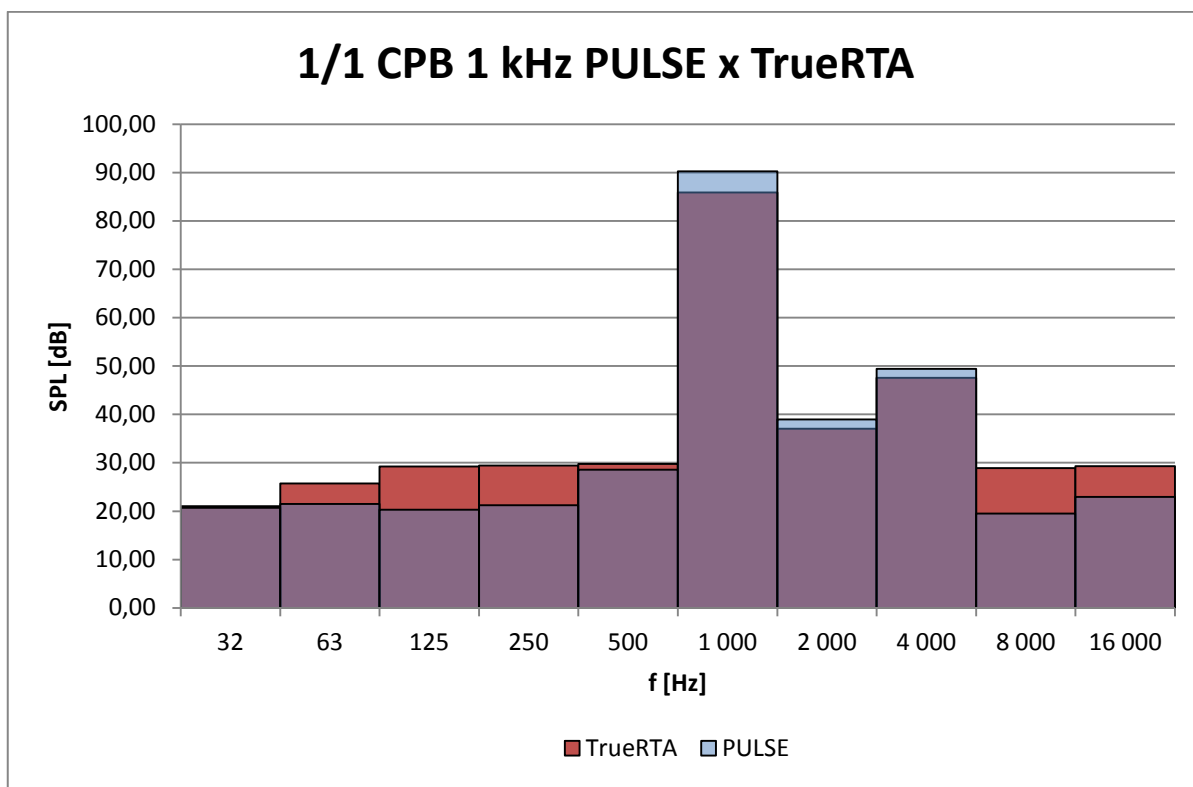
Obr. 4 CPB analýza růžového šumu programem SpectraPlus



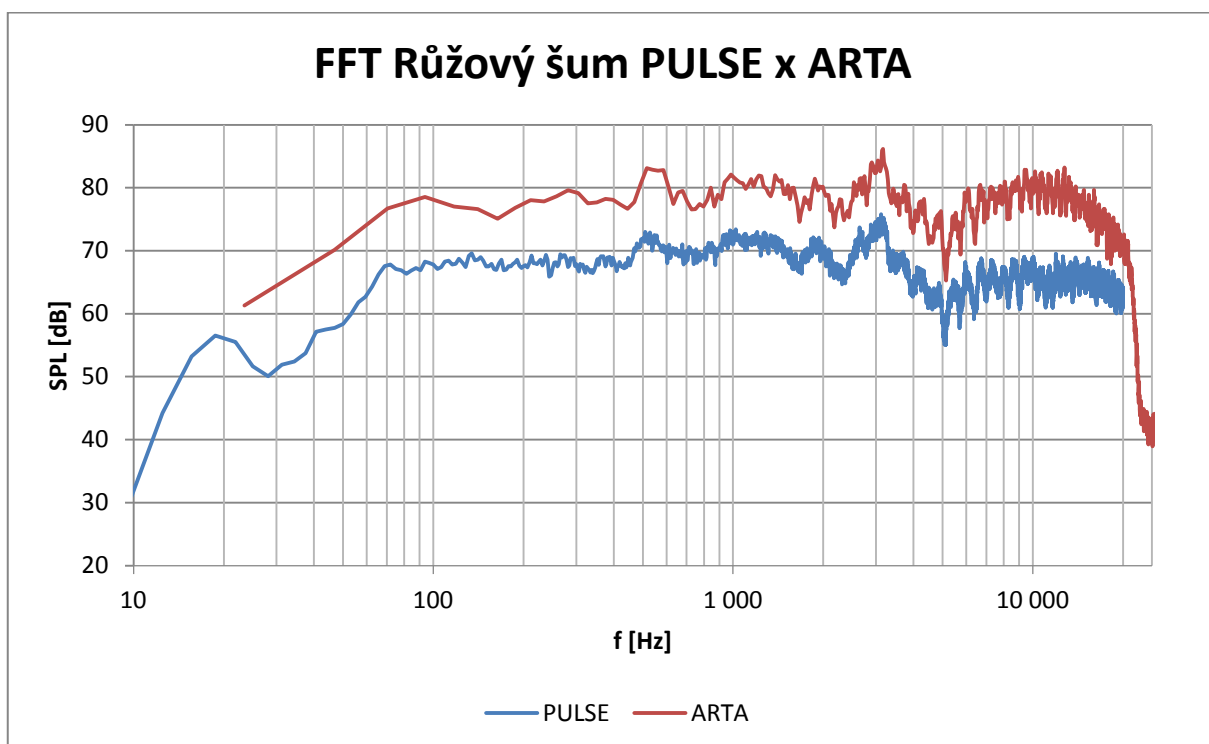
Obr. 5 CPB analýza růžového šumu programem TrueRTA



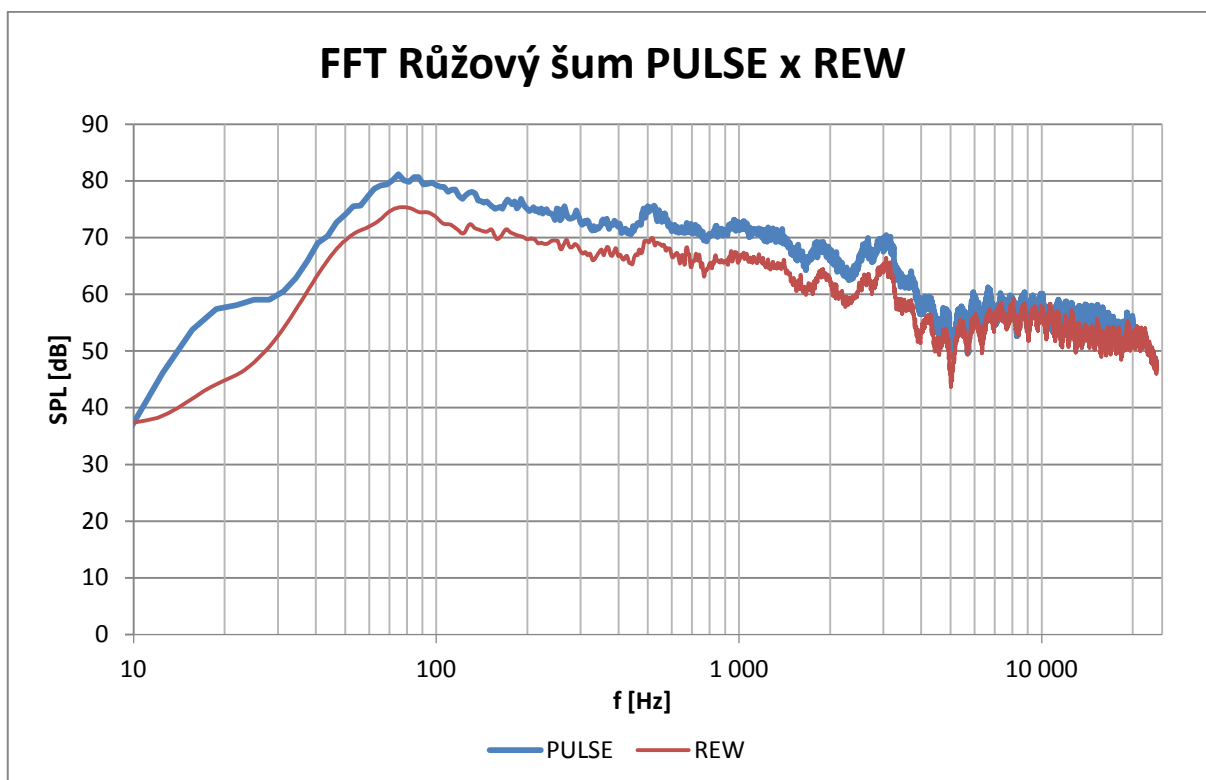
Obr. 6 CPB analýza 1 kHz programem Smaart v. 7



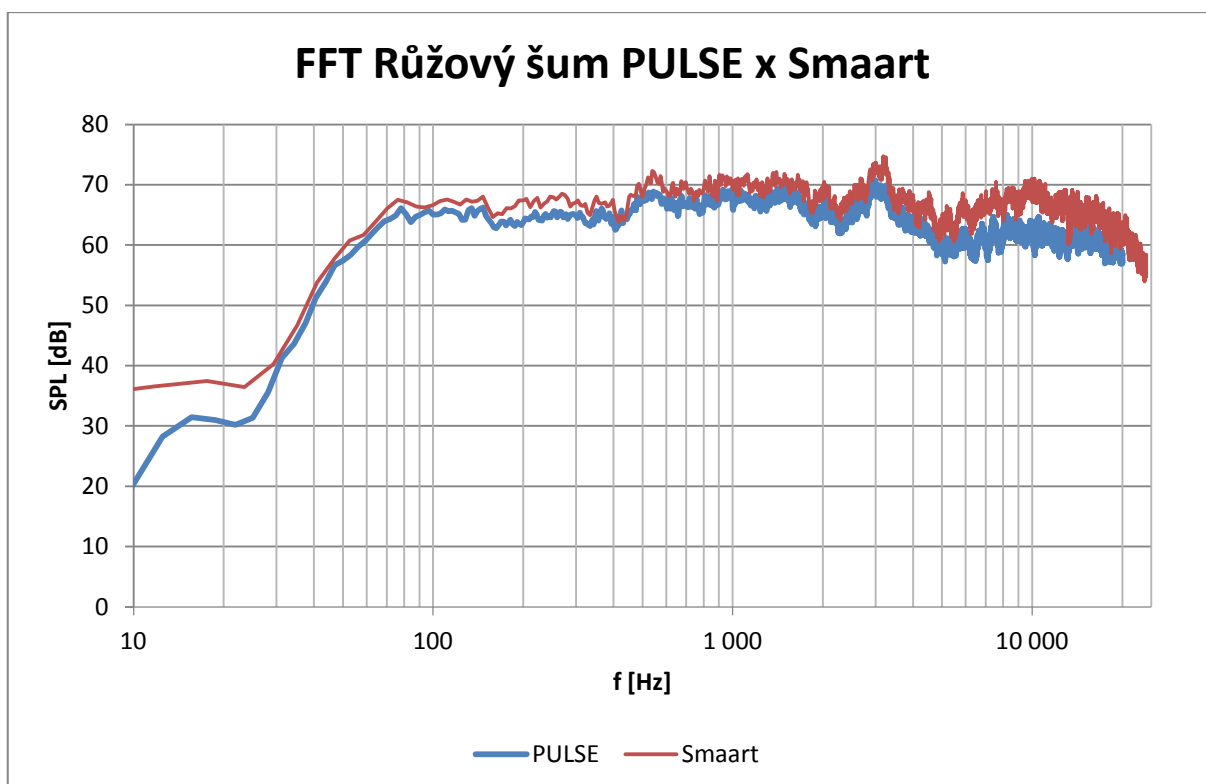
Obr. 7 CPB analýza 1 kHz programem TrueRTA



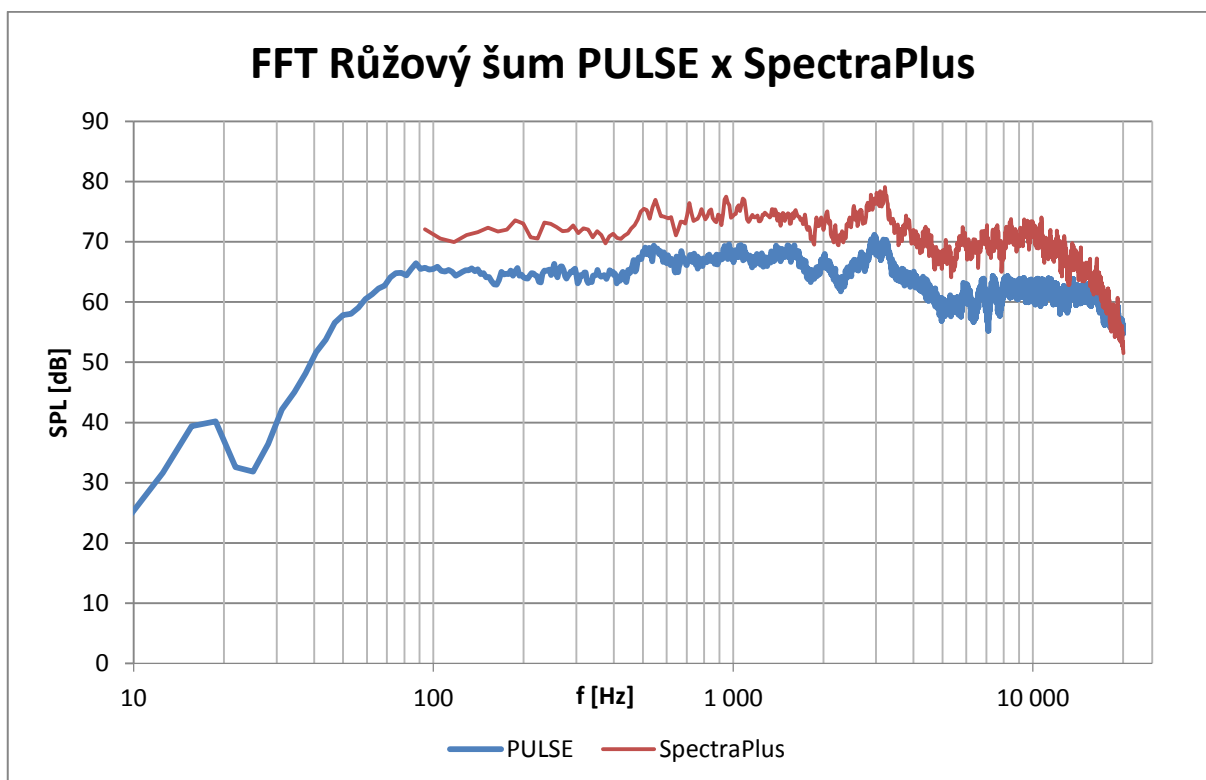
Obr. 8 FFT analýza růžového šumu programem ARTA



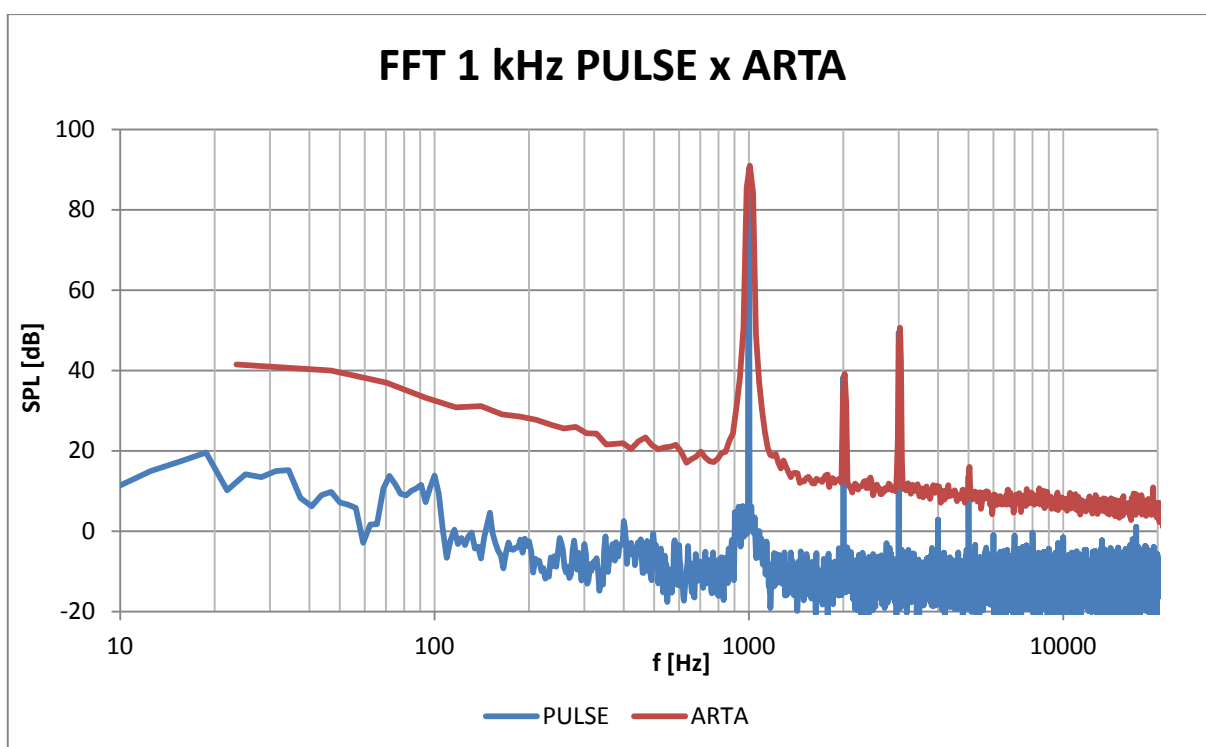
Obr. 9 FFT analýza růžového šumu programem REW



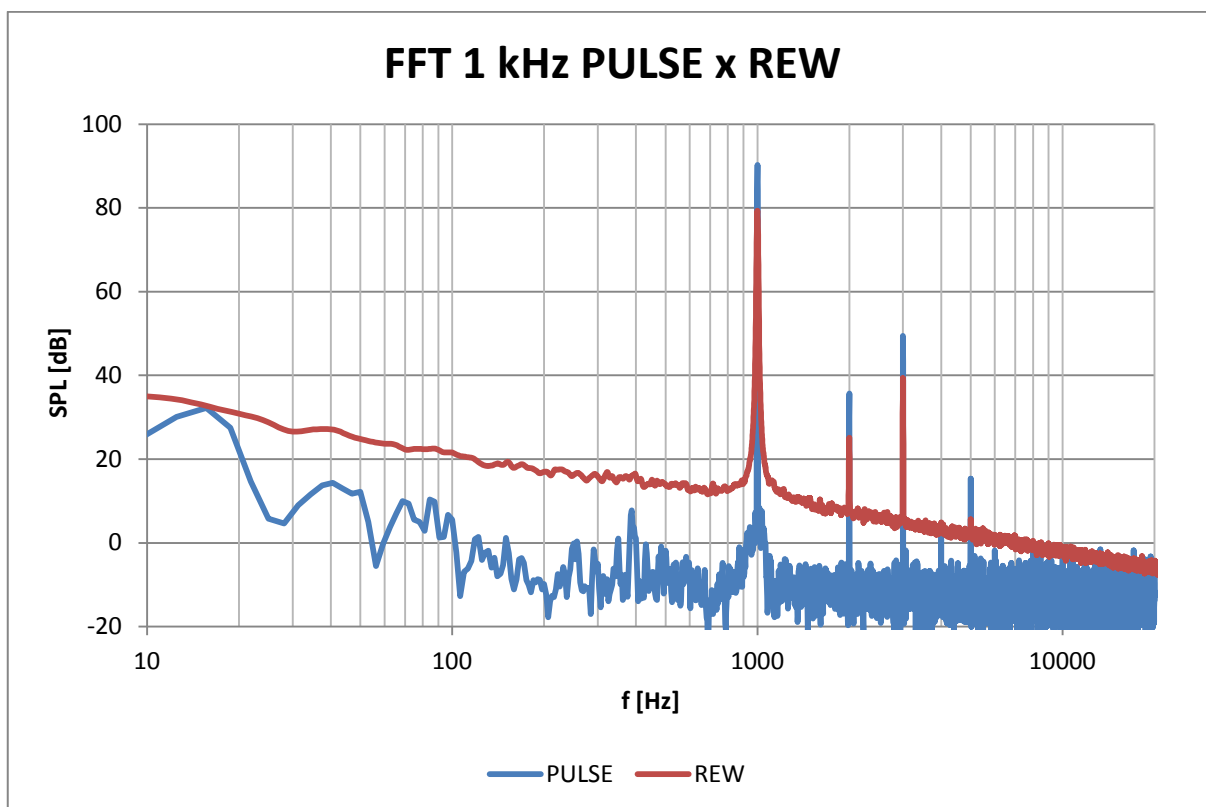
Obr. 10 FFT analýza růžového šumu programem Smart v. 7



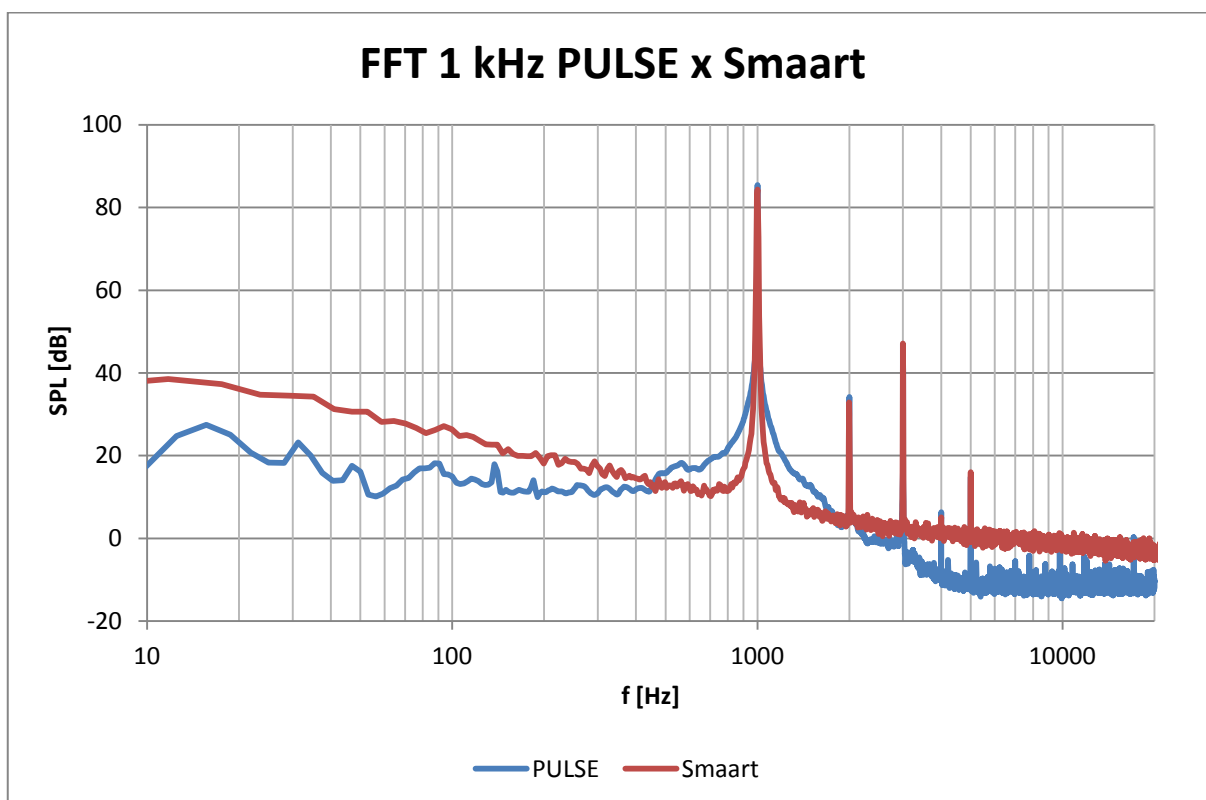
Obr. 11 FFT analýza růžového šumu programem SpectraPlus



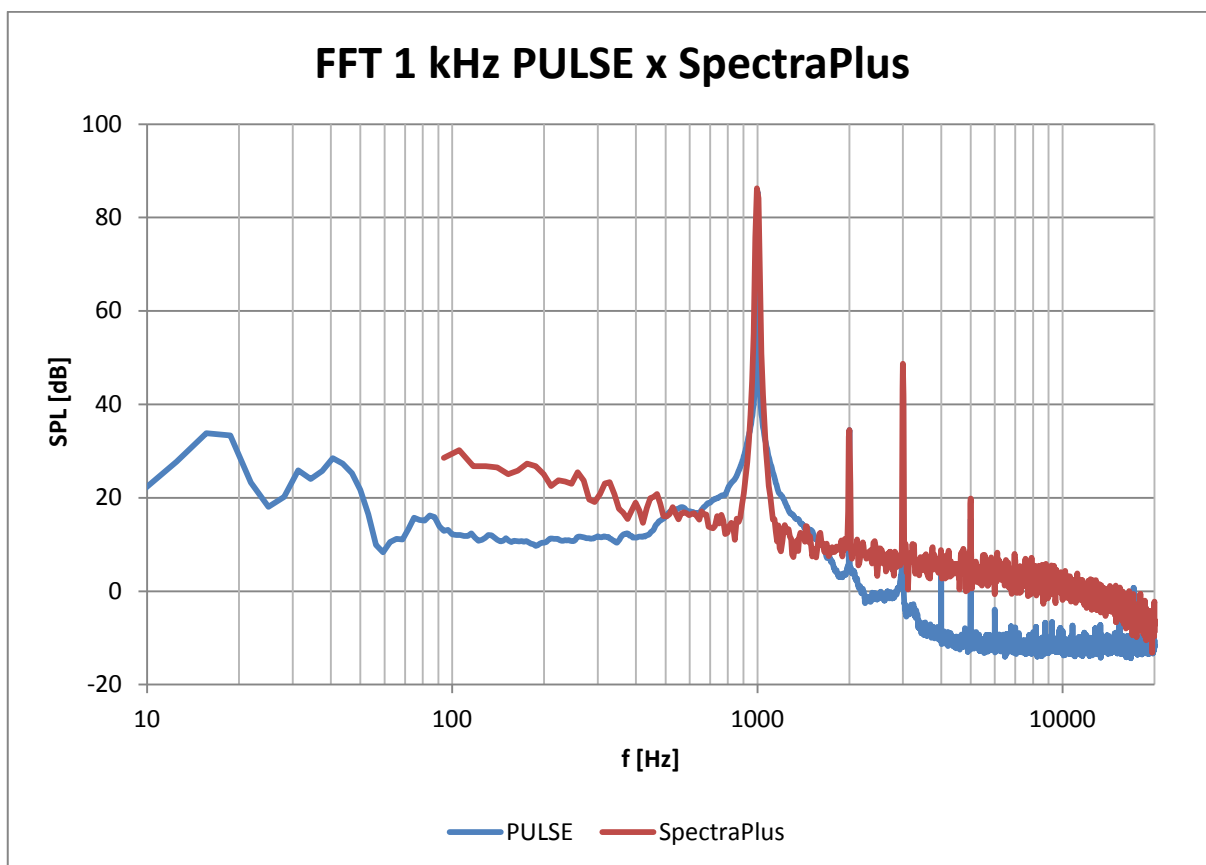
Obr. 12 FFT analýza 1kHz programem ARTA



Obr. 13 FFT analýza 1 kHz programem REW



Obr. 14 FFT analýza 1 kHz programem Smaart v. 7



Obr. 15 FFT analýza 1 kHz programem SpectraPlus