

Měření frekvenční charakteristiky a neprůzvučnosti sluchátek

Lukáš Pelant^a, Pavel Dlask^b, Zbyněk Bureš^a

^a ČVUT–FEL, Technická 2, 166 27 Praha 6

^b Zvukové studio HAMU, Malostranské nám. 13, 118 00 Praha 1

The most suitable place to run psychoacoustic tests is an anechoic chamber, which suppresses echos from the walls. Unfortunately, such a chamber is not available for everybody. As a consequence, psychoacoustic tests often utilize headphones instead. In order to be able to substitute an anechoic chamber by headphones, we have to know the frequency characteristic of the headphones and preferably an attenuation characteristic too. However, measuring frequency characteristic of headphones constitutes several problems, which might not be apparent at a first glance.

Psychoakustické poslechové testy je vhodné provádět v bezodrazové komoře, ve které nedochází k odrazům zvukových vln od stěn komory. Toto uspořádání však není dostupné každému. Často se tedy k poslechu používají sluchátka. Abychom mohli sluchátka považovat za přijatelnou náhradu bezodrazové komory, je zapotřebí znát jejich frekvenční charakteristiku a pokud možno i charakteristiku přenosu okolního hluku do prostoru mušle sluchátek (neprůzvučnost neboli útlum). Měření těchto charakteristik však obnáší několik problémů, které nemusí být na první pohled patrné.

1. Měření přenosových vlastností sluchátek podle normy

Měřením sluchátek se zabývá norma IEC 268-7 Sound system equipment – Part 7: Headphones and earphones. Pro měření frekvenční odezvy norma navrhuje měření na umělé hlavě či umělém uchu, srovnávací metodu v přímém a v difuzním poli nebo měření ve zvukovodu.

Srovnávací metody jsou metody psychoakustické, vyžadující pro kvalitní provedení bezodrazovou nebo dozvukovou komoru. Tato měření je nutné opakovat na větším počtu měřených subjektů, což je časově i organizačně náročné, a i poté jsou výsledky zatíženy značnou neurčitostí měření.

Metoda měření ve zvukovodu je založena na změření akustického tlaku přímo ve zvukovodu několika měřených subjektů pomocí miniaturních mikrofonů a následné porovnání s akustickým tlakem ve zvukovodu při poslechu ve volném nebo difuzním poli. Tato metoda zvyšuje přesnost měření v porovnání se srovnávacími metodami, je však také značně náročná a vyžaduje miniaturní mikrofony, které nebývají na běžných měřicích pracovištích příliš obvyklé. Na výzkumných pracovištích by bylo možné sestavit měřicí sondu či nástavec na mikrofon, takováto metoda by však byla značně časově náročná, a proto zvláště v průmyslu těžko použitelná.

Měření na umělé hlavě nebo umělém uchu vyžaduje pouze tichou místnost a příslušnou umělou hlavu. Výho-

dou tohoto postupu je, že toto vybavení je relativně rozšířené a že metodika nevyžaduje opakování měření, což provedení měření dále zjednodušuje. Nevýhodou je závislost tvaru umělé hlavy nebo ucha na konkrétním typu. Přímo v normě není konkrétní hlava doporučena, je však nutné uvést ve výsledcích měření její typ. Tímto způsobem měření se budeme zabývat dále.

2. Vliv boltce a zvukovodu

Při měření na umělé hlavě vystává problém, zda použít hlavu se zvukovody a s boltcem. Přínos měření s hlavou opatřenou boltcem je na první pohled zřejmý, ale při praktickém provedení již nastávají potíže, viz dále. Použití hlavy se zvukovodem je také sporné. Zvukovod zvýrazňuje frekvence kolem 4 kHz [2], [3]. Jeho vliv není možné zanedbat. Při poslechu zvuku ve volném poli se vliv zvukovodu také projeví. Proto se zdá logické jeho vliv vyřadit a měřit s mikrofony umístěnými na vstupu zvukovodu. Na druhou stranu ale při uzavření uší sluchátky, zvláště při těsnicím polstrování, lze očekávat, že se změní akustické pole v uchu a tím i vliv zvukovodu. Tento jev by nebyl při měření s mikrofony na vstupech zvukovodu zachytitelný a ve výsledku může dojít k chybné interpretaci naměřených výsledků, pokud sluchátka tuto změnu kompenzují svým designem.

Norma naznačuje, že je potřeba měřit na simulátoru ucha. Simulátory ucha vycházejí z různých norem a norma IEC 268-7 blíže typ simulátoru nespecifikuje. Budeme-li považovat za standard simulátor výrobce Brüel & Kjaer, například typ 4152, pak lze požadavek na simulátor ucha chápat jako požadavek na přítomnost zvukovodu i boltce. Jejich vliv na měření však norma nerozvádí. Také nekomentuje případnou korekci na přítomnost zvukovodu. Možnost přímého srovnání výsledků například s přenosovou frekvencí reproduktorů a možnost interpretace výsledků je tedy sporná.

3. Výběr měřicí metody

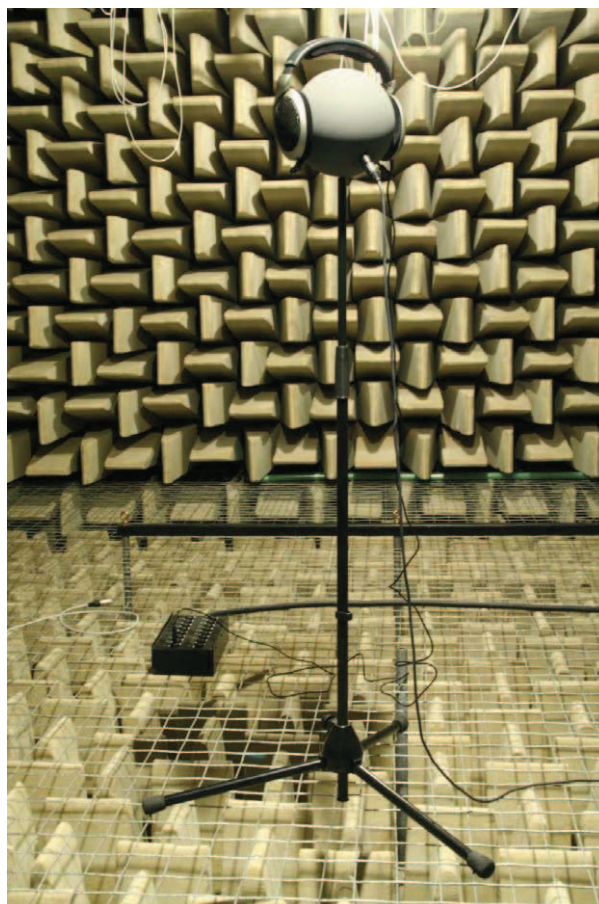
Měření je možné provést několika způsoby. Prvním je provést měření na umělém uchu. Pro měření studiových sluchátek obepínajících celý boltce to však předpokládá, že umělé ucho bude mít dostatečnou velikost, což mnohá umělá ucha nesplňují.

Druhý způsob měření spočívá v použití umělé hlavy s boltcem. Předpokládá hlavu s boltci z materiálu s podobnými mechanickými vlastnostmi jako skutečný boltce, tedy dostatečně měkkého, aby nenastal problém s usazením sluchátek. Pokusy o měření touto metodou potvrdily, že tuto podmínku umělé hlavy často nesplňují, podobně jako v [4]. Dále vnáší do měření nejistotu spojenou s nasazením sluchátek na boltci – jak se ukázalo při praktických pokusech, při sundání sluchátek z hlavy a opětovném nasazení již nesedí na přesně shodném místě a naměřené výsledky se od původních podstatně liší, což způsobí problém s opakovatelností měření.

Třetí metoda, kterou se budeme zabývat v tomto článku, obchází výše zmíněné problémy a využívá k měření kulovou umělou hlavu bez boltců i zvukovodů. Tím byla minimalizována neurčitost měření způsobená proměnným nasazením sluchátek na boltce. Uvedené měření se uskutečnilo v bezodrazové komoře zvukového studia HAMU v Praze, která kromě příznivě nízkého hluku pozadí při měření frekvenční charakteristiky umožnila i měření neprůzvučnosti sluchátek, tedy jejich schopnosti izolovat okolní hluk. Znalost neprůzvučnosti je užitečná při plánování měření na nižších úrovních v prostředí, které není dokonale tiché. V takové situaci je potřeba mít možnost odhadnout před začátkem měření poměr signálu k hluku pozadí.

4. Navržená metoda měření

Měření bylo provedeno pomocí impulzní měřicí metody s použitím MLS signálů a umělé kulové hlavy Schoeps, která byla použita pro snímání impulzní odezvy měřených objektů. Měření pomocí MLS signálů není sice v souladu s metodikou IEC 268-7, nicméně výsledky měření by měly být shodné s měřením pomocí rozmítaného harmonického signálu. Hlava Schoeps se používá pro stereofonní záznam a její výhodou je, že nemá zvukovod, který by jinak ovlivnil výslednou frekvenční charakteristiku sluchátek. Každá měřená sluchátka byla při měření frekvenčních charakteristik vybudena MLS signálem na stejnou úroveň hladiny akustického tlaku uvnitř mušle, přičemž tato úroveň byla měřena pomocí mikrofonní sondy uvnitř měřené mušle sluchátek nasazených na umělé kulové hlavě. Pro měření jak pravé, tak levé mušle sluchátek byla použita pouze jedna strana umělé kulové hlavy. Pro získání skutečné frekvenční charakteristiky sluchátek bylo dále nutné změřit frekvenční charakteristiku reprosoustavy, která byla použita jako zdroj zvuku při měření umělé hlavy a neprůzvučnosti sluchátek, a dále frekvenční charakteristiku umělé hlavy, tedy to, jak umělá hlava ovlivňuje svou přítomností



Obrázek 1: Uspořádání použitých zařízení uvnitř bezodrazové komory HAMU při měření sluchátek

a tvarem naměřené hodnoty (například stíněním apod.). Díky tomu bylo možné vyloučit jak vliv umělé hlavy, tak reprosoustavy na frekvenční charakteristiku sluchátek pomocí spektrálního odečítání.

Neprůzvučnost sluchátek se měřila opět prostřednictvím umělé kulové hlavy Schoeps, na které byla nasazena sluchátka daného typu. Sluchátka v tomto případě nebyla buzena MLS signálem, ale pouze plnila funkci zvukové izolace. Zdrojem zvuku (šumu) byla v tomto případě reprosoustava. Výsledná charakteristika neprůzvučnosti sluchátek je potom získána odečtením naměřené frekvenční charakteristiky hlavy s nasazenými sluchátky od naměřené frekvenční charakteristiky samotné hlavy.

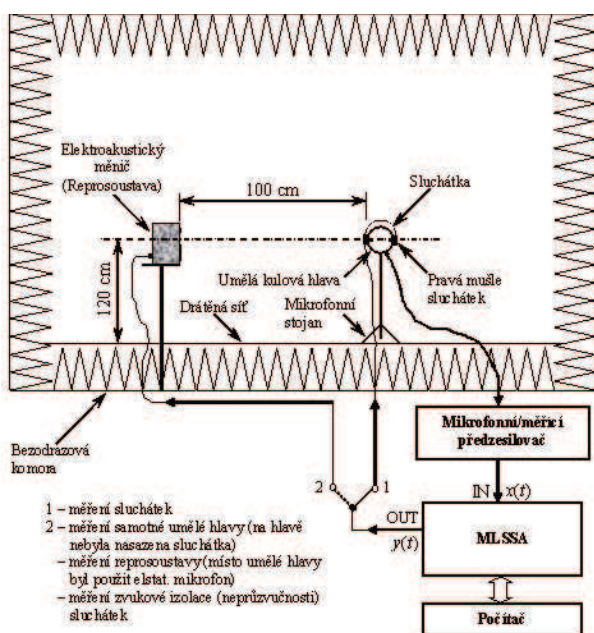
Všechna měření probíhala uvnitř bezodrazové komory kvůli potlačení nežádoucích hluků okolí. Analýza signálů snímáných umělou kulovou hlavou se prováděla pomocí MLSSA systému.

5. Popis měření

5.1. Měření sluchátek

Při měření frekvenční charakteristiky sluchátek byl budicí MLS signál generovaný z MLSSA systému přiváděn vždy

pouze do jedné mušle sluchátek. Pro snímání impulzní odezvy jak levé, tak pravé mušle sluchátek byla zvolena pouze levá strana umělé kulové hlavy, tedy pouze levý tlakový mikrofon umělé hlavy. Sluchátka byla nasazena na umělou kulovou hlavu vždy tak, aby přibližně střed každé měřené mušle sluchátek odpovídal středu levého tlakového mikrofonu umělé hlavy. Odezva měřené mušle snímána pomocí umělé kulové hlavy byla zesílena prostřednictvím mikrofonního předzesilovače a poté zpracována MLSSA systémem, viz. obr. 2. Každá měřená mušle sluchátek byla vybudena na hladinu akustického tlaku 70 dB (uvnitř mušle), což vyžadovalo pro každá měřená sluchátka jinou úroveň amplitudy budicího MLS signálu.



Obrázek 2: Schéma měření

5.2. Měření hlavy a reprosoustavy

Při měření frekvenční charakteristiky hlavy a reprosoustavy byl budicí MLS signál generovaný z MLSSA systému přiváděn vždy do reprosoustavy. Odezva reprosoustavy na MLS signál byla snímána jednak umělou kulovou hlavou a poté také elektrostatickým mikrofonem, z důvodu eliminace vlivu frekvenční charakteristiky reprosoustavy na frekvenční charakteristiku umělé hlavy. Při měření samotné umělé hlavy byla její levá strana přikloněná ke zdroji, kdežto její pravá strana byla v tzv. akustickém stínu. Měření probíhalo bez nasazených sluchátek. Impulzní odezva reprosoustavy snímána pomocí umělé hlavy byla zesílena prostřednictvím mikrofonního předzesilovače a poté zpracována MLSSA systémem. Při měření samotné reprosoustavy byl elektrostatický mikrofon použitý pro snímání impulzní odezvy umístěn přesně do místa, kde se nacházel levý tlakový mikrofon umělé kulové hlavy. Impulzní odezva reprosoustavy snímána pomocí elektrosta-

tického mikrofonu byla zesílena prostřednictvím měřicího zesilovače a poté opět zpracována MLSSA systémem. Při měření byla jak umělá hlava, tak mikrofon umístěny ve výšce 120 cm nad drátěnou sítí a ve vzdálenosti 100 cm od reprosoustavy, viz. obr. 2.

5.3. Měření neprůzvučnosti sluchátek

Při měření neprůzvučnosti sluchátek byl budicí MLS signál generovaný z MLSSA systému přiváděn opět do reprosoustavy. Odezva reprosoustavy byla snímána umělou kulovou hlavou s nasazenými měřnými sluchátky. Umělá hlava s nasazenými měřnými sluchátky byla umístěna ve výšce 120 cm nad drátěnou sítí a ve vzdálenosti 100 cm od reprosoustavy. Odezva snímána pomocí hlavy s nasazenými měřnými sluchátky byla zesílena prostřednictvím mikrofonního předzesilovače a poté zpracována MLSSA systémem, viz. obr. 2.

6. Předmět měření (Měřené objekty)

Měřena byla otevřená sluchátka AKG K501 a dvoje uzavřená sluchátka Sony MDR-7506 a Sennheiser HD280. U všech vzorků se jedná o profesionální studiová sluchátka, u kterých jsme zvažovali jejich použití pro psychoakustické testy. Při měření byla použita aktivní reprosoustava YAMAHA MSP5 a nahrávací hlava Schoeps KFM 360.

7. Naměřené hodnoty

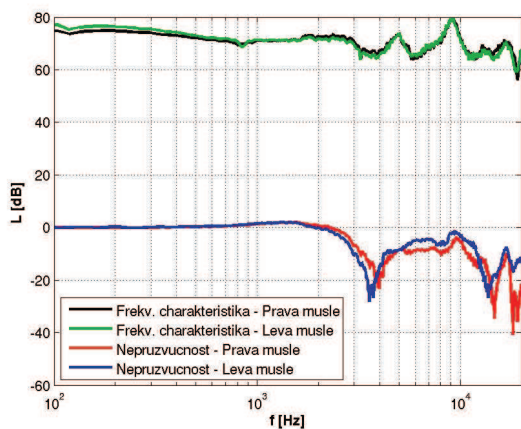
Změřené frekvenční charakteristiky pro výše uvedená sluchátka jsou znázorněny na obrázcích 3, 4 a 5. Na frekvenčních charakteristikách jsou pozoruhodné dva aspekty – prvním je sklon celé křivky, tedy fakt, že na nízkých frekvencích mají sluchátka vyšší zisk než na vysokých, a druhým je rezonance na 8 – 11 kHz o úrovni 15 dB nad okolní přenosovou charakteristiku.

Rezonanci je možné vysvětlit způsobem měření. Návrh sluchátek počítá s přítomností boltce. Při měření však byla použita hlava bez boltců, což zmenšilo prostor v mušlích sluchátek a tím se podstatně změnila akustická poměry. Měření publikovaná v [4] a [5] tuto rezonanci v některých případech také zaznamenala. Mezi jednotlivými metodami měření a sluchátky je přitom značný rozdíl. Tyto rozdíly by mohly být vysvětleny nejistotou způsobenou usazením sluchátek na boltcích.

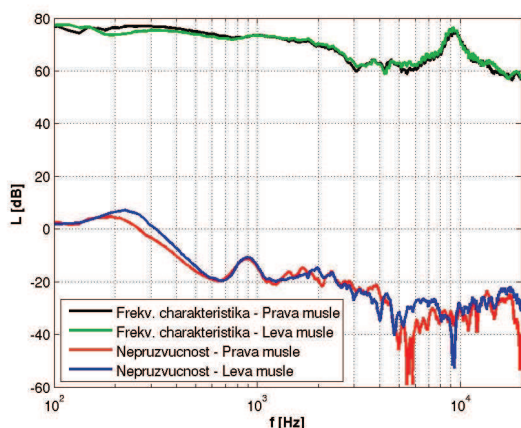
Jelikož byla při měření použita hlava bez zvukovodu, lze očekávat, že bude změřená frekvenční charakteristika absencí zvukovodu ovlivněna. To je pravděpodobně příčina lehkého propadu ve frekvenční charakteristice kolem 3 – 4 kHz, což je přibližně frekvence, na níž zvukovod rezonuje [2], [3].

Tyto změřené rezonance a antirezonance si tedy nelze vysvětlovat jako chybu sluchátek, ale spíše jako jejich žádoucí vlastnost, která se projevila kvůli odlišnosti měřicí metodiky od reálného použití. Při měření na hlavě se zvuk-

kovodem a boltci by měly být kompenzovány. Ve skutečnosti, jak ukázala další měření, není kompenzace úplná.

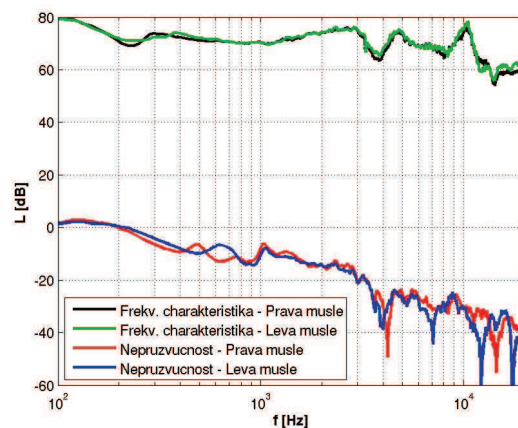


Obrázek 3: Frekvenční charakteristika a neprůzvučnost sluchátek AKG K501 (charakteristika přenosu okolního hluku do prostoru musle)



Obrázek 4: Frekvenční charakteristika a neprůzvučnost sluchátek Sennheiser HD280 (charakteristika přenosu okolního hluku do prostoru musle)

Podle očekávání je rozdíl v neprůzvučnosti mezi uzavřenými a otevřenými sluchátky značný. Zatímco otevřená sluchátka mají prakticky nulovou neprůzvučnost až do zhruba 2 kHz a na vyšších frekvencích je neprůzvučnost kolem 10 dB (obr. 3), uzavřená sluchátka začínají tlumit okolní hluk od 200 (obr. 5) až 300 Hz (obr. 4), kolem 400 Hz tlumí 15 dB, na 2 – 3 kHz dosahují přibližně 20 dB neprůzvučnosti a na vyšších frekvencích kolem 30 dB. Vlivem uzavřené musle však na nízkých frekvencích kolem 200 Hz může nastat rezonance jako v případě sluchátek Sennheiser a okolní hluk je naopak zesilován v řádu jednotek decibelů. Tyto výsledky jsou v souladu i s dalšími měřeními [4].



Obrázek 5: Frekvenční charakteristika a neprůzvučnost sluchátek Sony MDR-7506 (charakteristika přenosu okolního hluku do prostoru musle)

8. Zhodnocení měření

Pro psychoakustická měření je důležitá nejen celková rovnoměrnost frekvenční charakteristiky, ale především absence rezonancí a antirezonancí, které mohou silně ovlivnit měření. Při měření s komplexními zvuky, jako je řeč a hudba, nám rezonance mohou zkreslit výsledky, kritické jsou však zejména při měření maskovacích křivek, kde posuzujeme dva frekvenčně blízké zvuky. V takovém případě nás příliš nezajímá, zda na opačném konci spektra je přenos tlumenější, ale musíme zaručit, aby oba přehrávané zvuky měly stejnou úroveň. V tomto ohledu vyhovují všechna změřená sluchátka na frekvencích do 2 kHz, na vyšších mají všechna měřená sluchátka nějaký nedostatek, který je nutné při měření zohlednit.

Po stránce neprůzvučnosti se ukázalo, že použití uzavřených sluchátek je přínosné na všech frekvencích vyjma nízkých, tedy pod 200–300 Hz. Použití uzavřených sluchátek je tedy v porovnání s otevřenými přínosné pouze na středních a vysokých frekvencích.

Vzhledem k tomu, že hladina akustického tlaku A hluku pozadí je i v tiché místnosti kolem 40 dB, je měřená uzavřená sluchátka možné pro poslechové testy použít s výjimkou nízkých hlasitostí, podle charakteru hluku pozadí.

Celkově se dá říci, že psychoakustická měření se sluchátky, zvláště pak uzavřenými, v tiché místnosti místo bezodrazové komory je možné provádět a lze očekávat, že dosažená chyba měření bude srovnatelná s chybou měření, které můžeme dosáhnout v bezodrazové komoře. Výjimkou jsou jen měření se signály nízké úrovně, kde jsou nutná další opatření k zajištění spolehlivosti měření.

Poděkování

Práce byla podpořena grantem GAČR č. 102/05/2054 *Kvalitativní aspekty zpracování audiovizuální informace v multimediálních systémech* a byla provedena v rámci

projektu MŠMT č. 1M6138498401 *Výzkumné centrum hudební akustiky*.

Reference

- [1] IEC 268-7: 1996, *IEC 268-7 Sound system equipment – Part 7: Headphones and earphones*.
- [2] Rund, F.: *Přenos akustického tlaku vnějším zvukovodem lidského ucha*. ČVUT, Praha, 2004
- [3] Zwicker, E., Fastl, H.: *Psychoacoustics: Facts and models*, Springer-Verlag, Heidelberg, 1990
- [4] Hirahara, T.: *Physical characteristics of headphones used in psychophysical experiments*. *Acoust. Sci. & Tech.* 25, 4, 2004
- [5] MARUI, A.: *Acoustics/Headphone Measurements* [online]. Dostupný z WWW: <<http://www.music.mcgill.ca/marui/index.php?cmd=read&page=Acoustics%2FHeadphone%20Measurements>>, 2005 [cit. 2008-02-28]