

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Konstrukce ozvučovacího systému pro simulaci vnitřního hluku
automobilu**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2016/2017

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

Jméno a příjmení: **Bc. Ondřej BUFKA**
Osobní číslo: **E14N0103P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Dopravní elektroinženýrství a autoelektronika**
Název tématu: **Konstrukce ozvučovacího systému pro simulaci vnitřního hluku automobilu**
Zadávající katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

Zásady pro vypracování:

1. Posuďte úrovně a spektrální rozložení vnitřního hluku automobilu v různých režimech jízdy.
2. Navrhněte systém reproduktorových soustav, který umožní simulaci vnitřního hluku automobilu.
3. Navržené řešení realizujte a ověřte měřením jeho parametry.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

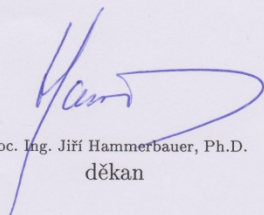
Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Oldřich Tureček, Ph.D.

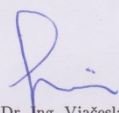
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: 14. října 2016

Termín odevzdání diplomové práce: 19. května 2017


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




Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

Abstrakt

Cílem této diplomové práce bylo analyzovat hluk v jedoucím vozidle, navrhnout a zrealizovat systém k jeho simulaci. V první části byla analýza provedena za pomoci zvukoměru, v druhé pomocí analyzátoru. Analyzátor byl také použit pro záznam hlukové stopy pomocí tří mikrofonů a umělé hlavy. Pro simulaci hluku byl navržen simulační systém a jeho parametry byly následně změřeny. Bylo provedeno několik variant simulace, které byly mezi sebou porovnány. Jízdní hluk se podařilo simulovat s větší přesností, než jakou předepisují normy zabývající se touto problematikou.

Klíčová slova

Automobil, jízdní hluk, simulace hluku, umělá hlava

Abstract

The aim of this diploma thesis was to analyze the noise in the moving vehicle, design and implement the system for its simulation. In the first part, the analysis was carried out with the aid of a sound-level meter, in the second using the analyzer. The analyzer was also used to record a noise using three microphones and an artificial head. A simulation system was designed to simulate the noise, which was subsequently measured. Several variants of the simulation were performed and compared to each other. Riding noise has been simulated with greater precision than prescribed by standards dealing with this issue.

Key words

Vehicle, driving noise, noise simulation, artificial head

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 24.5.2017

Ondřej Bufka

Obsah

OBSAH	1
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	3
1 ÚVOD	4
2 NORMY ZABÝVAJÍCÍ SE PROBLEMATIKOU MĚŘENÍ A SIMULACE HLUKU VE VOZIDLE	5
2.1 ETSI ES 202 396-1 V1.4.0 (2012-08).....	5
2.1.1 Umístění mikrofonů a reproduktorů	6
2.1.2 Záznam.....	6
2.1.3 Ekvalizace	7
2.1.4 Nahrávky hluku	9
2.2 ITU-T P.1100 (01/2015)	9
2.2.1 Záznam.....	10
2.2.2 Reprodukce	10
2.3 OBECNÉ FIREMNÍ SPECIFIKACE	10
2.3.1 Jízda a nastavení vozidla	11
2.3.2 Záznam.....	11
2.3.3 Reprodukce	11
3 ANALÝZA VNITŘNÍHO HLUKU POMOCÍ ZVUKOMĚRU	12
3.1 MĚŘENÍ ROZLOŽENÍ HLUKU	12
3.1.1 Specifikace vozu.....	12
3.1.2 Konfigurace zvukoměru	12
3.1.3 Pozice měřených bodů	12
3.1.4 Postup měření	14
3.2 FREKVENČNÍ ANALÝZA NAMĚŘENÝCH HODNOT	14
4 ANALÝZA A ZÁZNAM HLUKU POMOCÍ ANALYZÁTORU	17
4.1 SPECIFIKACE MĚŘENÍ.....	17
4.1.1 Automobil.....	17
4.1.2 Konfigurace analyzátoru	17
4.1.3 Pozice měřených bodů	18
4.1.4 Postup měření	19

4.2	VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT	20
5	KALIBRACE UMĚLÉ HLAVY NA VOLNÉ POLE.....	22
6	NÁVRH SYSTÉMU PRO SIMULACI VNITŘNÍHO HLUKU.....	26
6.1	POŽADAVKY NA SIMULAČNÍ SYSTÉM	26
6.2	REALIZACE SIMULAČNÍHO SYSTÉMU	26
7	SIMULACE HLUKU VE VOZIDLE.....	30
7.1	SIMULACE HLUKU POMOCÍ NAHRÁVKY UMĚLOU HLAVOU	32
7.1.1	<i>Simulace pomocí nahrávky levého ucha.....</i>	<i>32</i>
7.1.2	<i>Simulace pomocí nahrávky levého a pravého ucha.....</i>	<i>33</i>
7.2	SIMULACE HLUKU POMOCÍ PŘEVZATÝCH NAHRÁVEK	34
7.3	SIMULACE HLUKU POMOCÍ NAHRÁVKY Z OBLASTI NOHOU	35
7.4	SIMULACE HLUKU POMOCÍ RŮŽOVÉHO ŠUMU	36
7.5	SROVNÁNÍ SIMULAČNÍCH METOD	37
8	ZÁVĚR.....	39
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	40
	PŘÍLOHY.....	1

Seznam symbolů a zkratek

CPB	<i>Constant Percentage Bandwidth</i> . Konstantní šířka pásma
DRP	<i>Ear-drum Reference Point</i> . Referenční bod zvukovodu, viz ITU-T P.58
ERP	<i>Ear Reference Point</i> . Referenční bod na okraji ucha, viz ITU-T P.58
FFT.....	<i>Fast Fourier Transform</i> . Rychlá Furierova transformace
GPS	<i>Global Position System</i> . Globální polohový systém
HFT	<i>Hands Free Terminal</i> . Hlasový komunikační terminál
ID	<i>Independent of Direction</i> . Ekvalizace nezávislá na směru
LAN	<i>Local Area Network</i> . Lokální počítačová síť
LZ_{eq} [dB].....	Ekvivalentní hladina akustického tlaku bez váhového filtru
LZF_{max} [dB]	Maximální hladina akustické tlaku s časovou konstantou fast (125 ms)
SPL_A [dB]	Hladina akustického tlaku s referencí 20 μ P vážená křivkou A
SPL [dB]	<i>Sound Pressure Level</i> . Hladina akustického tlaku s referencí 20 μ P
WAV	<i>Waveform audio file format</i> . Zvukový formát pro PC

1 Úvod

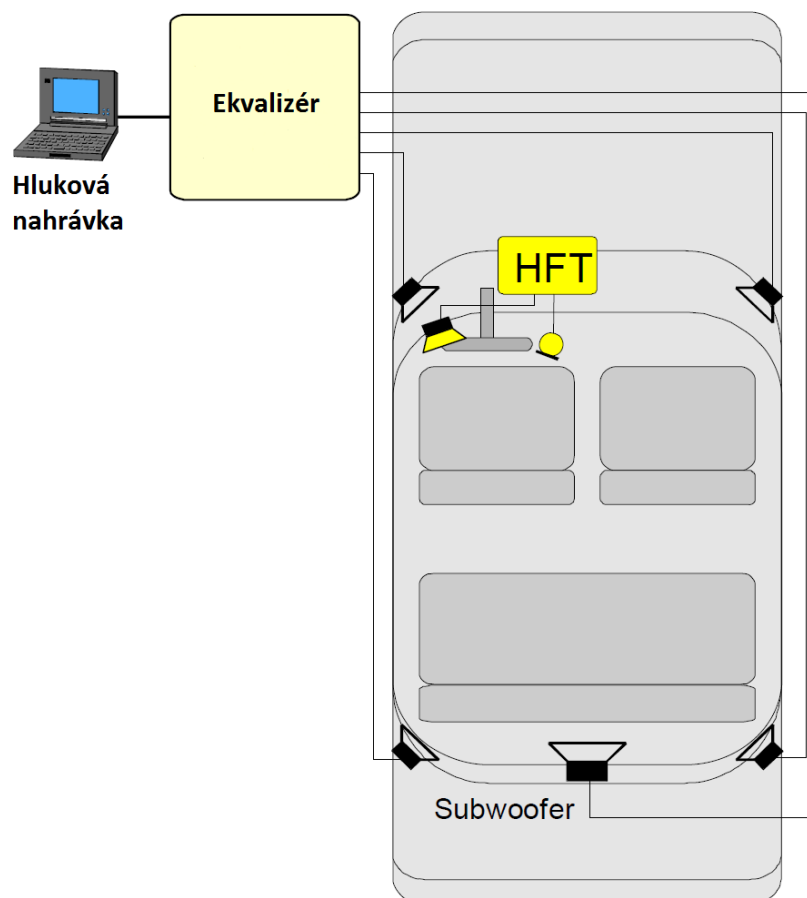
Cílem diplomové práce bylo nejprve prozkoumat hluk vznikající v jedoucím vozidle a následně navrhnout simulační systém, který by tento hluk věrně reprodukoval. Navržený systém poté zkonstruovat a změřit jeho parametry.

Simulace hluku ve vozidle je nedílnou součástí testování a kalibrace zařízení, která jsou do vozidla montována výrobcem nebo jsou pro provoz ve vozidle určena. Jedná se především o telekomunikační zařízení, takzvané hands-free, u kterých hluk může mít vliv na špatnou funkci zařízení. Záznam a simulace hluku jsou proto popsány v několika specifikacích, které se testováním takovýchto zařízení zabývají. Specifikace se v některých doporučeních rozcházejí a problematika záznamu a simulace v nich není uspokojivě popsána. Tato práce si klade za cíl sdružit tyto požadavky a sestavit vhodný postup k simulaci jízdního hluku ve vozidle.

Práce je rozdělena do šesti kapitol. První z nich je zaměřena na normy zabývající se záznamem a simulací hluku ve vozidle. V následující kapitole je popsáno měření jízdního hluku ve vozidle pomocí zvukoměru. Třetí kapitola popisuje měření a záznam jízdního hluku pomocí analyzátoru, mikrofonů a umělé hlavy. Kalibrace umělé hlavy na volné pole je probrána ve čtvrté kapitole. Následující kapitola pojednává o návrhu simulačního systému. V páté kapitole jsou porovnány různé simulační postupy pomocí navrženého simulačního systému.

2 Normy zabývající se problematikou měření a simulace hluku ve vozidle

Normy a specifikace zde uvedené se v několika kapitolách zmiňují o postupu jak hluk ve vozidle zaznamenat, tak i zreprodukovat. V převážné většině se jedná o potřeby měření telekomunikačních zařízení. Všechny normy, které jsou zde uvedené, jsou mezi sebou provázané a budou podrobněji popsány v následujících kapitolách.



Obr. 2.1: Schématické zapojení reproduktorů pro simulaci jízdního hluku

2.1 ETSI ES 202 396-1 V1.4.0 (2012-08)

Norma ETSI ES 202 396-1 V1.4.0 2012-08 (dále jen ETSI) řeší celkovou problematiku záznamu a následné reprodukce hluku nejenom ve vozidle ale také například v místnosti. Norma v krátkosti popisuje již existující komerční možnosti realistické reprodukce (IOSONO, Eidophonie a další). Kapitola 7 je zaměřena na záznam a reprodukci hluku právě uvnitř

vozidla. V kapitole 8 lze nalézt databázi již nahraných hluků a to jak binaurální, tak i stereofonní za různých podmínek jízdy a obsazenosti vozidla.

2.1.1 Umístění mikrofonů a reproduktorů

Norma ETSI jako jediná ze zde uvedených specifikuje umístění reproduktorů určených k simulaci. Subwoofer je umístěn v kufru. Dva zadní reproduktory se umísťují do zadní části auta mezi hlavovou opěrku a C-sloupek respektive okno. Přední reproduktory lze oba umístit na palubní desku nebo do prostoru nohou. Varianta, kdy jsou reproduktory umístěny do prostoru nohou, je možná jen v případě, že reproduktory nelze umístit na palubní desku. Rozložení reproduktorů je na obr. 2.1.

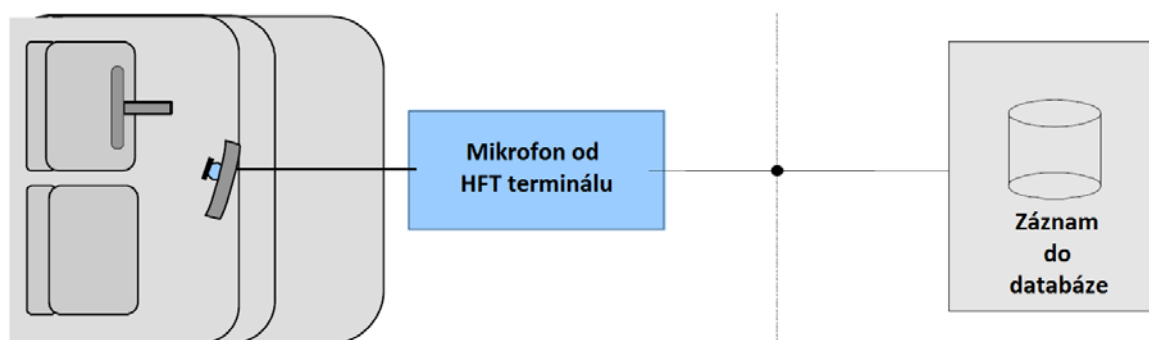
Pozice mikrofonů by se měla co nejvíce přibližovat výsledné pozici hands-free mikrofonu. Jedna z možností je uchycení mikrofonu/mikrofonů k vnitřnímu zpětnému zrcátku. Při tomto řešení je potřeba odizolovat mikrofon od chvění vozidla, aby nemělo vliv na výsledný záznam.

2.1.2 Záznam

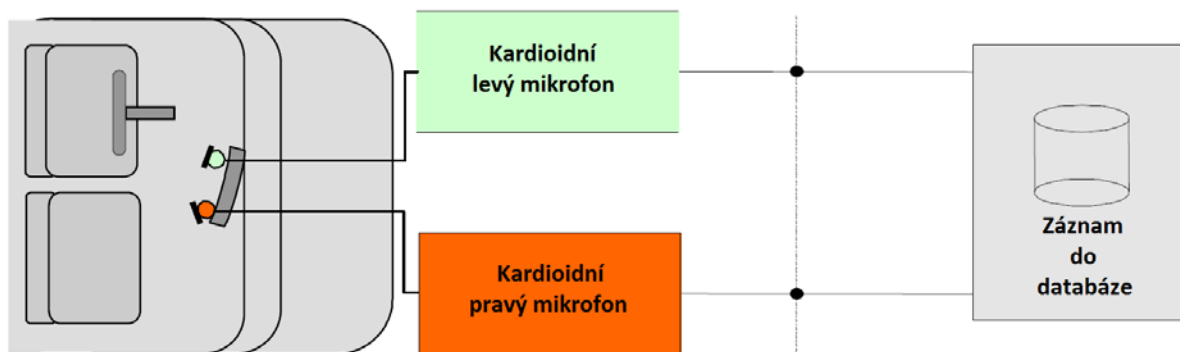
Možnosti jak zaznamenávat hluk ve vozidle podle normy ETSI:

- Záznam pomocí vestavěného mikrofonu HFT, viz obr. 2.2
- Záznam pomocí dvojice kardioidních mikrofonů, viz obr. 2.3

Využití dvou kardioidních mikrofonů je doporučeno, pokud není možné k ekvalizaci a kalibraci využít výstupní signál z hands-free mikrofonu. Vždy by se pozice měla co nejvíce přibližovat pozici, kde bude mikrofon sady hands-free následně umístěn.



Obr. 2.2: Záznam pomocí vestavěného mikrofonu HFT

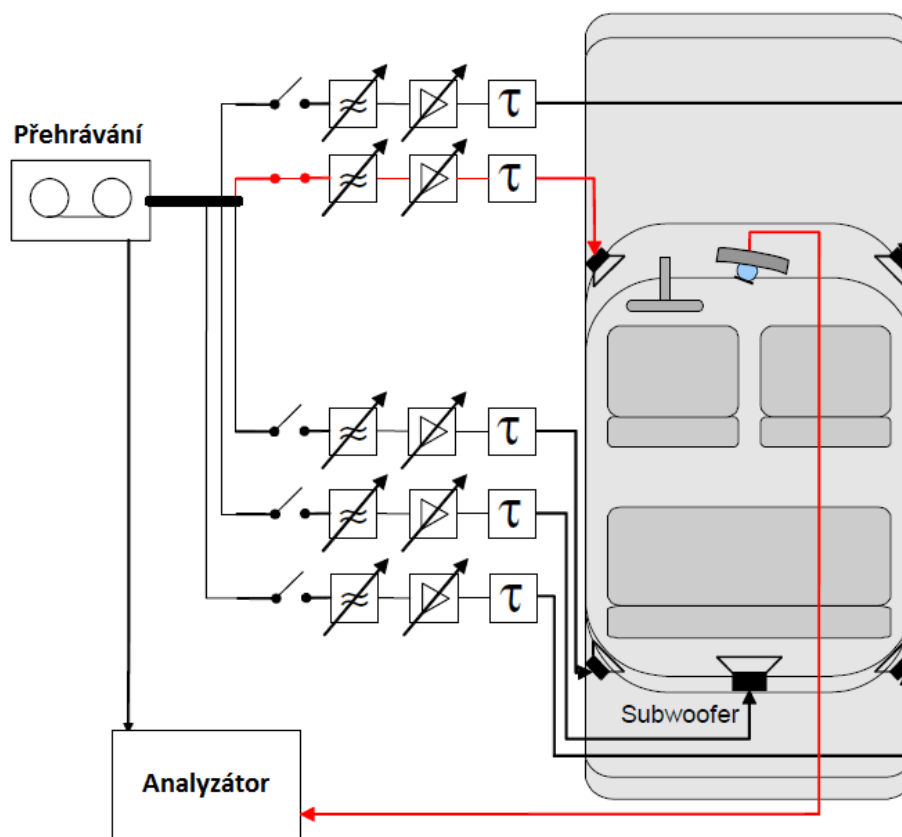


Obr. 2.3: Záznam pomocí dvojice kardioidních mikrofonů

2.1.3 Ekvalizace

Pro ekvalizaci výsledné simulace by měla být vždy použita sestava, pomocí které byla nahrávka pořízena. Taktéž by měla být zachována stejná pozice mikrofonů jako při pořízení nahrávky.

2.1.3.1 Ekvalizace pomocí mikrofону hands-free



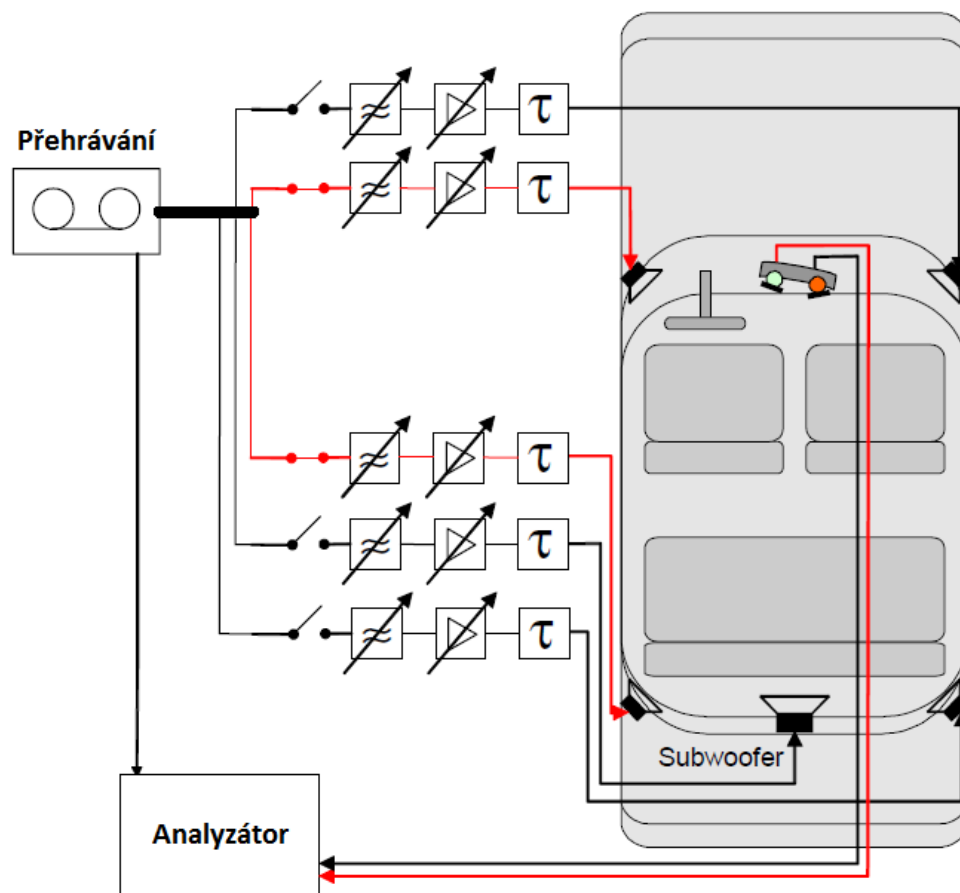
Obr. 2.4: Schéma ekvalizace pomocí vestavěného HFT mikrofону

Ekvalizace je tvořena z několika kroků:

- 1) Oddělená ekvalizace pro každý reproduktor
- 2) Oddělené nastavení úrovně zesílení pro každý reproduktor
- 3) Oddělená ekvalizace dvou levých a dvou pravých reproduktorů
- 4) Ekvalizace a nastavení úrovně zesílení subwooferu
- 5) Nastavení zpoždění
- 6) Celková ekvalizace

Celkové uspořádání soustavy pro simulaci a ekvalizaci je patrné z obr. 2.4. Červenou linkou je naznačen 1. krok, kdy dochází k ekvalizaci signálu pro samostatný reproduktor, konkrétně přední levý. Každý reproduktor je zde buzen signálem, který prochází skrze ekvalizační člen, zesilovací člen a následně skrze člen zpožďující daný signál.

2.1.3.2 Ekvalizace pomocí kardioidních mikrofonů



Obr. 2.5: Schéma ekvalizace pomocí dvojice kardioidních mikrofonů

Ekvalizace je tvořena z několika kroků:

- 1) Ekvalizace levého páru reproduktorů
- 2) Oddělené nastavení úrovně zesílení pro levé reproduktory
- 3) Ekvalizace pravého páru reproduktorů a oddělené nastavení úrovně zesílení pro pravé reproduktory
- 4) Ekvalizace a nastavení úrovně zesílení subwooferu
- 5) Nastavení zpoždění
- 6) Celková ekvalizace

Celkové uspořádání soustavy pro simulaci a ekvalizaci je patrné z obr. 2.5. Červenou linkou je naznačen 1. krok, kdy dochází k ekvalizaci signálu pro levý pár reproduktorů a generovaný hluk je měřen levým kardioidním mikrofonom. Každý reproduktor je zde buzen signálem, který prochází skrze stejné bloky jako u ekvalizace hands-free mikrofonom.

2.1.4 Nahrávky hluku

Nahrávky jsou vždy dvoukanálové a byly pořízeny vzorkovací frekvencí 48 kHz. Každá nahrávka je dlouhá 30 s a je nahrána jak ve verzi binaurální, tak i stereofonní. Pokud je potřeba, lze nahrávku pouštět opakovaně za použití plynulého přechodu. Lze zde nalézt nahrávky z následujících míst:

- Velké vozidlo – zaznamenáno na pozici řidiče
- Střední vozidlo – zaznamenáno na pozici řidiče
- Autobus – zaznamenáno na pozici pasažéra
- Tramvaj – zaznamenáno na pozici pasažéra
- Veřejné prostory – tělocvična, ulice, kavárna, restaurace
- Přírodní prostory – les, kukuřičné pole

2.2 ITU-T P.1100 (01/2015)

Celkové uspořádání simulace je totožné s normou ETSI, jak je uvedeno na obr. 2.1. Kapitola 7.1.1 se zabývá umístěním mikrofónů a reproduktorů a také obecnými požadavky na celkovou simulaci. V kapitole 9.2 lze nalézt podrobnější specifikaci záznamu a reprodukce hluku. Příloha D specifikuje nastavení vozu, rychlost a povětrnostní podmínky pro pořízení hlukové nahrávky.

2.2.1 Záznam

Pro pořízení hlukové nahrávky může být použit mikrofon HFT, pokud je výstupní signál dobře dostupný anebo lze použít nespecifikovaný mikrofon. Jedna z možností je umístit mikrofon na zpětné zrcátko nebo do jeho okolí tak, aby se pozice co nejvíc přiblížila výslednému umístění HFT mikrofonu.

Pro některá měření je potřeba hluk za určitých podmínek, které jsou definované v příloze D. Je zde definováno 6 druhů podmínek, za kterých může být hluk nahrán. Pokud nejsou potřeba tyto specifické podmínky, je obecně doporučeno zaznamenávat při rychlostech kolem 130 km/h. Pokud budou otevřená okénka nebo jiné netypické nastavení vozu, je vše potřeba zaznamenat ve výsledné zprávě.

2.2.2 Reprodukce

Jsou tři možnosti jak simulovat nahraný hluk:

- Přehrát hluk pomocí 4 reproduktorů a 1 subwooferu, viz obr. 2.1
- Hlukovou stopu vložit za měřící mikrofon na elektrické úrovni
- Digitálně hluk zaznamenat a poté digitálně vložit

Reproduktory mohou být umístěny na pozici poblíž nohou řidiče a spolucestujících. Po ekvalizaci nesmí být odchylka SPL_A mezi simulovaným hlukem a původní nahrávkou větší než ± 1 dB. V 1/3 oktávovém spektru v rozmezí 100 Hz až 10 kHz nesmí být rozdíl simulovaného hluku větší jak ± 3 dB od originálního spektra. Elektrické a digitální vkládání hluku zde nebude popsáno a je podrobně vysvětleno, viz [2].

2.3 Obecné firemní specifikace

Specifikace definují záznam a následnou reprodukci hluku ve vozidle pro účely testování telekomunikačních zařízení. Jsou udávány požadavky na frekvenční charakteristiku záznamu a také na samotné uspořádání simulace a jsou specifikovány požadavky na nastavení vozidla a podmínky pro záznam zvukové stopy.

2.3.1 Jízda a nastavení vozidla

Celkové nastavení vozidla, jako otevřená střecha u kabrioletu nebo stažená okna, je volitelné a záleží na požadavcích zadavatele. Obecně je ale doporučeno měřit se zavřenými okny a při rychlosti 130 km/h. Všechny tyto parametry je nutné zaznamenat do výsledné zprávy, aby mohlo být měření přesně zreprodukováno.

Pokud není vyžadováno zadavatelem jinak, je nutné jízdou vyvinout hladinu akustického tlaku minimálně 70 dB_{SPL(A)}, měřeno na pozici pravého ucha umělé hlavy.

2.3.2 Záznam

Samotný záznam hluku lze provést pomocí umělé hlavy a torza těla, které je umístěno na pozici spolujezdce. Druhou možností je využít pro záznam binaurálních sond, které se umístí na hlavu řidiče. V každém případě je nutné provést ekvalizaci (ekvalizaci volným polem nebo ID ekvalizaci) na základě zvoleného záznamového řešení. Speciálním případem je záznam pomocí mikrofonu umístěného na pozici měřené hands-free soupravy. Toto řešení lze použít jako případnou alternativu k měření pomocí umělé hlavy nebo binaurálních mikrofonů.

2.3.3 Reprodukce

Pro reprodukci nahraného hluku je doporučeno využít soustavy 4 reproduktorů a jednoho subwooferu, jak je ukázáno na obr. 2.1. Umělá hlava a torso jsou na pozici řidiče a záznam je ekvalizován tak, aby bylo dosaženo stejné výkonové hustoty akustického tlaku jako v průběhu záznamu. Maximální rozdíl hladiny akustického tlaku váženého křivkou A oproti záznamu je ± 1 dB. Pro 1/3 oktávové spektrum nesmí být rozdíl hladin akustického tlaku v rozmezí 100 Hz až 10 kHz větší než ± 3 dB od naměřeného spektra.

3 Analýza vnitřního hluku pomocí zvukoměru

Pro první prozkoumání charakteristiky hluku ve vozidle byl zvolen zvukoměr XL2 od společnosti NTI Audio, viz [8]. Zvukoměr byl zvolen s přihlédnutím k jednoduchosti realizace měření oproti řešení pomocí analyzátoru. Naměřená data pomohla lépe porozumět přibližnému rozložení a charakteristice hluku ve vozidle a tím zlepšit následný záznam a reprodukci.

3.1 Měření rozložení hluku

3.1.1 Specifikace vozu

Byl zvolen vůz Felicia z důvodu dostupnosti a nízké akustické izolovanosti od aerodynamického hluku tak i od podvozkové části. Z toho důvodu se očekávalo intenzivnější projevení těchto složek v celkovém hluku.

Škoda Felicia Combi LXI TMBEFF653

- Rok výroby 1997
- Typ motoru 1.6 Mpi
- 5 míst k sezení

3.1.2 Konfigurace zvukoměru

Měřicí sestava:

- Zvukoměr XL2 SNo. A2A-03090-D1, FW3.12
- Mikrofon NTi Audio M2210 SNo. 1364

Měření probíhalo v 1/3 oktávovém rozlišení. Rozsah zvukoměru byl nastaven 10-110 dB. Zvukoměr byl spuštěn v režimu Full Mode. Časový úsek (cca 5 s) byl volen ručně z důvodu nestálých okolních podmínek. Naměřené hodnoty se ukládali na SD kartu a jsou následně jednoduše přístupné k dalšímu zpracování.

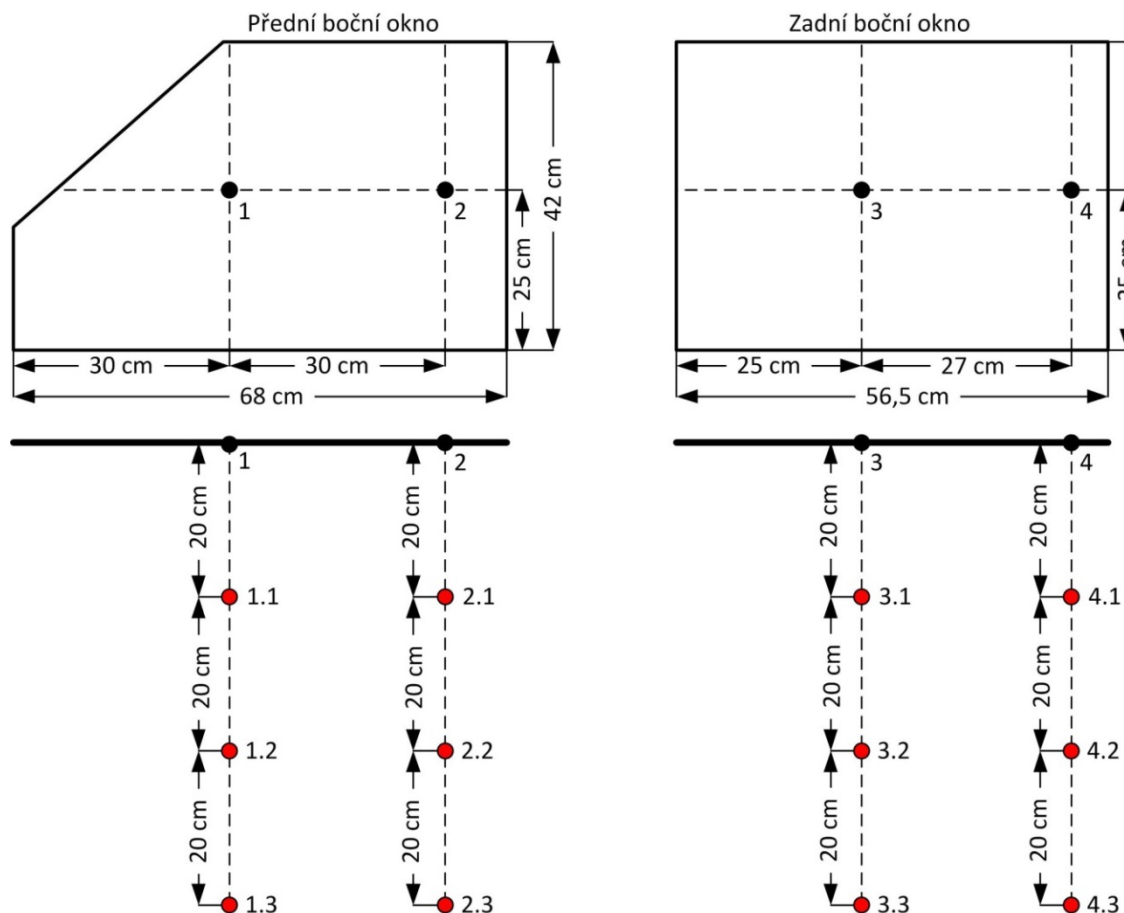
3.1.3 Pozice měřených bodů

Měřené body byly kotovány vůči oknůmvozu, čímž vznikl dvouosý souřadný systém, jak je patrné na obr. 3.1. Bylo zvoleno celkově 15 měřících bodů, z nichž dva se nacházely mimo

tento souřadný systém. Rovina souřadného systému se nacházela přibližně ve výšce uší pasažerů a byla vodorovná s vozovkou. Tímto rozložením bodů byla změřena pouze polovina vozu. Vychází se zde z předpokladu osově souměrného zvukového pole.

Vlastní určení polohy zvukoměru se provádělo za pomoci systému přísavek na sklo a okótovaných lanek. Kótovací lanko bylo vždy nataženo mezi levým a pravým oknem a to vždy mezi příslušnými body (například mezi body 1) jak je patrné z obr. 3.1. Poté byla určena vzdálenost od okna pomocí kótovacího lanka. Toto řešení vykazuje jistou míru nepřesnosti, ať už samotným určením pozice nebo potřebou udržet zvukoměr na jedné pozici v průběhu jízdy. Pro účely prvotního prozkoumání hlukového pole je ale toto řešení dostatečné.

U dvou měřících bodů nebyla přesně určována pozice z důvodu obtížné realizace. Jedná se o pozice v oblasti nohou, které jsou dále značené N_p (oblast nohou na přední pozici) a N_z (oblast nohou na zadní pozici). Tato oblast byla proměřena, protože ji norma ETSI zmiňuje jako jednu z možných pro umístění simulačních reproduktorů.



Obr. 3.1: Pozice měřených bodů

3.1.4 Postup měření

Pro každou definovanou pozici (15) byla provedena trojice měření pro každou rychlost a to 50 km/h a 130 km/h. Celkově tedy pro každý bod vzniklo 6 měření. Délka měřeného vzorku se pohybovala okolo 5 s, maximálně ± 1 s v závislosti na okolních podmínkách. Ve voze byl přítomen řidič a jedna osoba provádějící měření. V případě že byly měřeny body v přední části vozu, seděla měřící osoba na pozici spolujezdce. Pokud se měřily body v zadní části vozidla, měřící osoba seděla na pozici za spolujezdcem.

Nejprve byl změřen hluk za rychlosti 50 km/h. Měření začalo na pozici 1.1, poté bylo měřeno na pozici 1.2 a následně na pozici 1.3. Tento postup byl dvakrát zopakován a stejným systémem byly proměřeny i další řady (2,3,4). Následně byly změřeny pozice nohou u spolujezdce a na pozici za spolujezdcem. Tento systém byl stejně proveden i pro rychlost 130 km/h.

3.2 Frekvenční analýza naměřených hodnot

Z každého měření je k dispozici vždy čtveřice souborů s naměřenými hodnotami v textovém formátu, tak i zvuková stopa, která je zaznamenávána vzorkovací frekvencí 48 kHz a bitovým rozlišením 24 bitů. Pro následné zpracování byla data převedena do tabulkového formátu.

Pro frekvenční analýzu byly využívány dva generované soubory:

- 1/3 oktávový přehled změřených dat
- 1/3 oktávový záznam hodnot s časovým intervalem 0,1 s

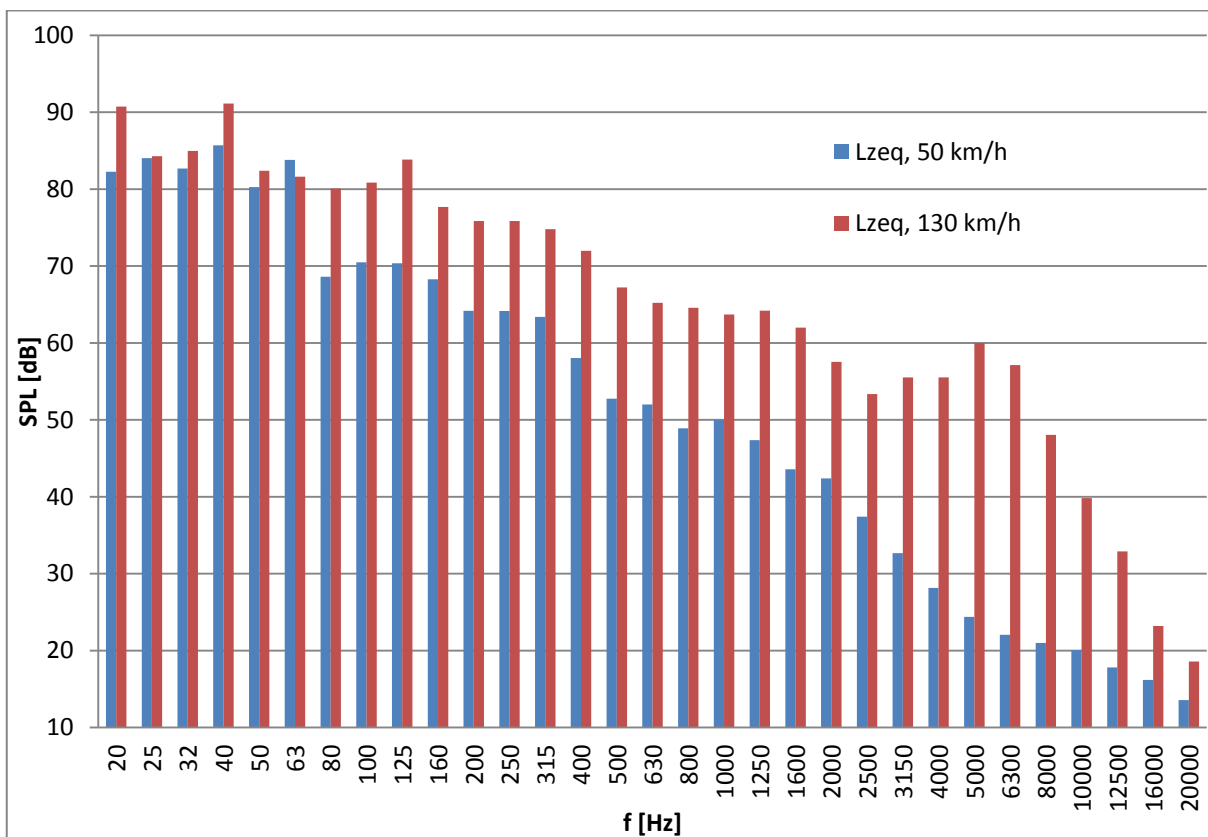
V prvním souboru se nachází vždy jedna hodnota pro každou měřenou veličinu za celou měřenou časovou oblast v rozsahu od 6,3 Hz do 20 kHz. Hodnoty jsou zde rozděleny do 1/3 oktávových pásem. Druhý soubor obsahuje záznamy pouze jedné veličiny a to ekvivalentního akustického tlaku ($L_{Z_{eq}}$ [dB]) zaznamenávaného také v 1/3 oktávových pásmech s intervalem 0,1 s. Jak již bylo uvedeno, pro každou pozici byly pořízeny tři měření pro danou rychlost. Z těchto tří měření byl vypočten průměr hladin akustického tlaku pomocí vzorce 3.1.

$$L_{průměr} = 10 \log_{10} \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{\left(\frac{L_i}{10}\right)} \right] \quad (3.1)$$

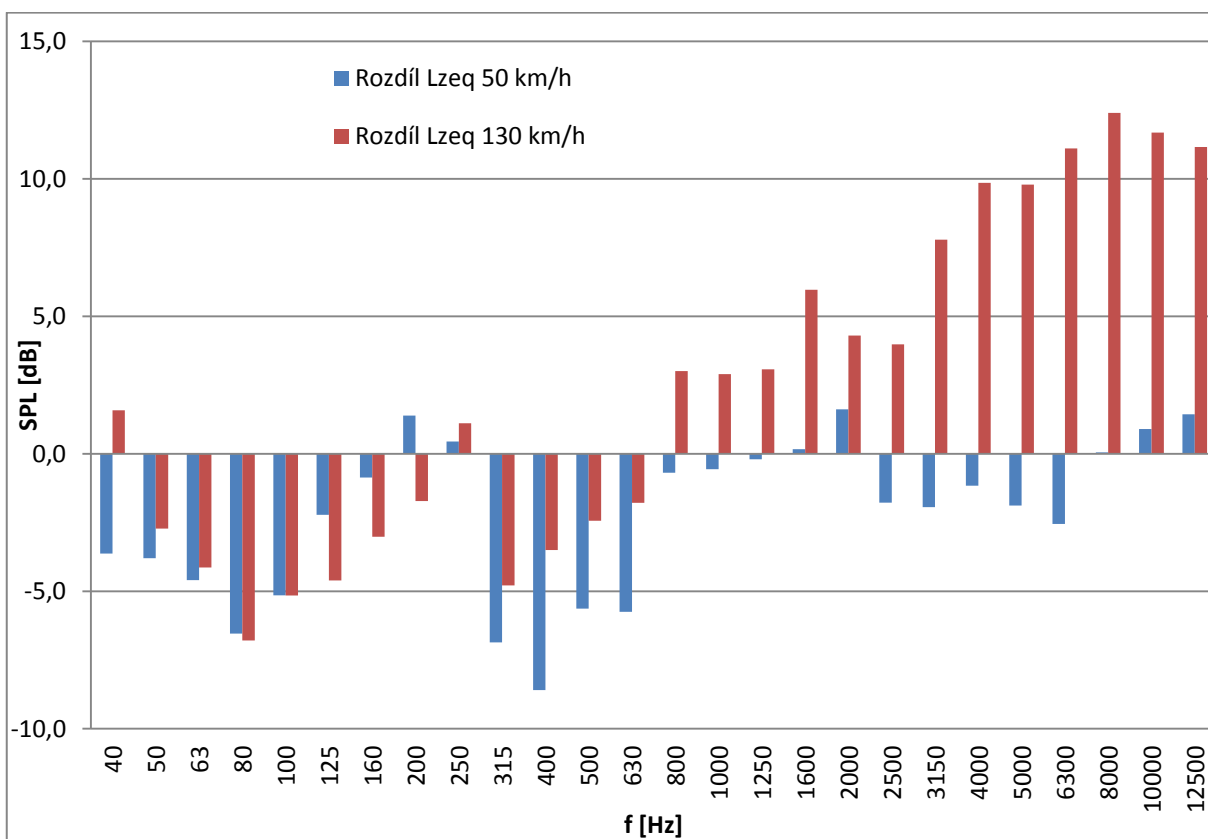
Tímto postupem byly také zprůměrovány všechny body ležící v jedné rovině, to znamená, že do průměru nebyly použity naměřené hodnoty z oblasti nohou. Výsledné hodnoty jsou vyneseny v obr. 3.2. Na první pohled je patrný nárůst hladiny akustického tlaku při rychlosti 130 km/h v oblasti kolem 5 kHz. Tento nárůst je příkládán nedostatečnému zatěsnění střešního okna, které při vyšších rychlostech generuje vysoko tónový zvuk přibližně v této frekvenční oblasti.

Hladina akustického tlaku je ve většině oblastí měřeného spektra vyšší při rychlosti 130 km/h. Výjimkou jsou oblasti se střední frekvencí 16 Hz a 63 Hz, kdy je hladina vyšší přibližně o cca 3 dB při rychlosti 50 km/h. Takto nízké frekvence jsou převážně generovány podvozkovou částí vozu, viz [6]. Lze proto tento rozdíl přisoudit rozdílnému povrchu vozovky, protože každá z rychlostí byla měřena na jiném povrchu. Pro následnou analýzu bude stěžejní zajistit totožný povrch vozovky pro všechny měřené rychlosti, aby mohly být výsledky adekvátně porovnávány.

Další sledovanou veličinou byl rozdíl hladin akustického tlaku mezi pozicí 2.2 a pozicí nohou u spolujezdce (N_p). Jak již bylo uvedeno, jedno z možných umístění reproduktorů pro simulaci je právě na pozici nohou. Pozice 2.2 je srovnatelná s pozicí, ve které se bude nacházet umělá hlava při záznamu a ekvalizaci na pozici spolujezdce. Hodnota rozdílu je vynesena do obr. 3.3 v 1/3 oktávových pásmech. Nejvyšší rozdíl byl vypočten pro oblast se střední frekvencí 8 kHz a to +12,4 dB při rychlosti 130 km/h. V pásmech nad 1 kHz je při rychlosti 130 km/h hladina akustického tlaku řádově vyšší na pozici 2.2. To je s největší pravděpodobností způsobeno nárůstem aerodynamického hluku, který se ve spodních částech vozu neprojeví tak intenzivně. Tento jev není patrný při nižších rychlostech. Pro rychlost 50 km/h byl vypočten maximální rozdíl -8,6 dB v pásmu se střední hodnotou 400 Hz.



Obr. 3.2: Průměr hladin akustického tlaku mezi body 1.1 až 4.3



Obr. 3.3: Rozdíl hladin akustického tlaku mezi pozicemi 2.2 a N_p

4 Analýza a záznam hluku pomocí analyzátoru

4.1 Specifikace měření

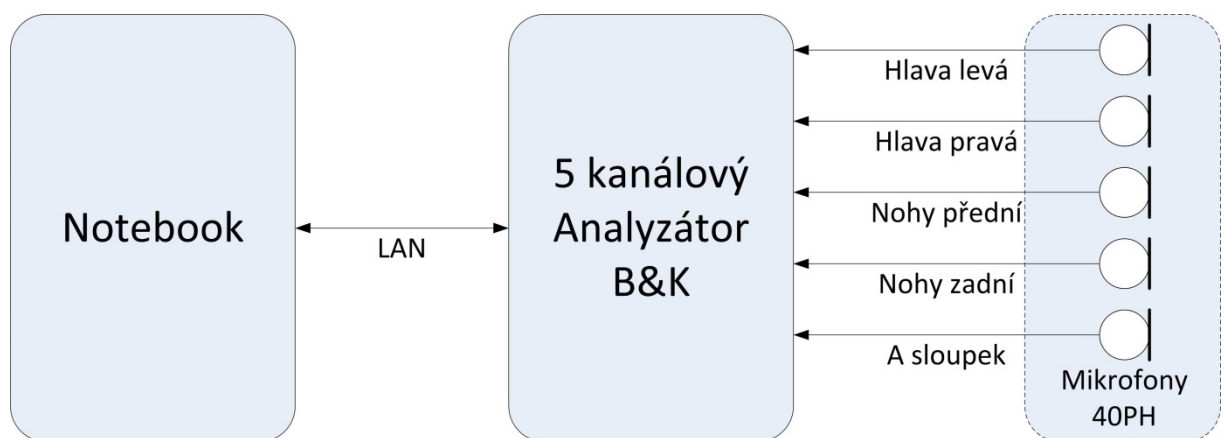
4.1.1 Automobil

Pro záznam stopy a následnou simulaci hluku byl zvolen novější automobil, oproti 3. kapitole, reprezentující střední třídu osobních vozů. Tento vůz byl využit jak pro záznam hlukové stopy a s ním spojenou analýzu hluku, tak i pro následnou simulaci.

FORD Mondeo Liftback

- Rok výroby 2004
- 5 míst k sezení
- Objem motoru 1,8 l Sci
- Výkon 81 kW

4.1.2 Konfigurace analyzátoru



Obr. 4.1: Schéma zapojení měřicího systému

Měřicí sestava:

- 5kanálový analyzátor B&K IDAe 3560
- Mikrofony G.R.A.S. 40PH
- Umělá hlava s torsem a zabudovanými mikrofony G.R.A.S. 40PH
- Notebook s programem PULSE Labshop verze 19.0
- Mobilní telefon se systémem GPS

Zapojení měřicí sestavy je patrné na obr 4.1 Záznam i analýza měření probíhali vždy současně. Z každého kanálu byla nahrávána zvuková stopa s rozlišením 32 bitů. Stopy se ukládají ve formátu REC ale lze je poté pomocí programu PULSE vyexportovat do jiných formátů. Každý kanál byl také analyzován a to pomocí 1/3 oktávové analýzy a FFT analýzy. Obě metody vyhodnocovaly jak ekvivalentní hodnotu akustického tlaku za celý časový úsek, tak také maximální hodnotu akustického tlaku s časovou konstantou 125 ms. Před začátkem samotného měření byly mikrofony kalibrovány pomocí elektroakustického kalibračního zařízení generujícího tón na frekvenci 1 kHz, který má hladinu akustické tlaku 94 dB.

4.1.3 Pozice měřených bodů



Obr. 4.2: Umístění techniky v zadní části vozu v průběhu měření

Mikrofon v oblasti A sloupku na předním skle byl připevněn pomocí přísavky a tato pozice byla zvolena kvůli očekávanému projevení aerodynamického hluku. Mikrofony v oblasti předních a zadních nohou byly upevněny pomocí stativů. Oblast nohou byla analyzována a především nahrávána, protože se v této oblasti nacházely simulační reproduktory a zvuková stopa z této pozice byla použita k simulaci hluku. Torso s umělou hlavou muselo být vypodloženo a nastaveno tak, aby pozice EEP odpovídala normě ITU-T P.581, měřicímu bodu číslo 17.



*Obr. 4.3: Umístění umělé hlavy s torsem
v přední části vozu*

4.1.4 Postup měření

Měření bylo prováděno na suché vozovce za minimálního provozu v nočních hodinách. V průběhu měření byla všechna okna zavřená, ozvučovací systém a klimatizace byly vypnuty. V automobilu byly v průběhu měření přítomny dvě osoby, řidič a obsluha analyzátoru, která seděla na pozici za řidičem.

Rychlost [km/h]	Otáčky motoru [ot/min]	Rychlostní stupeň
30	2100	2
50	2300	3
80	2600	4
100	2600	5
130	3500	5

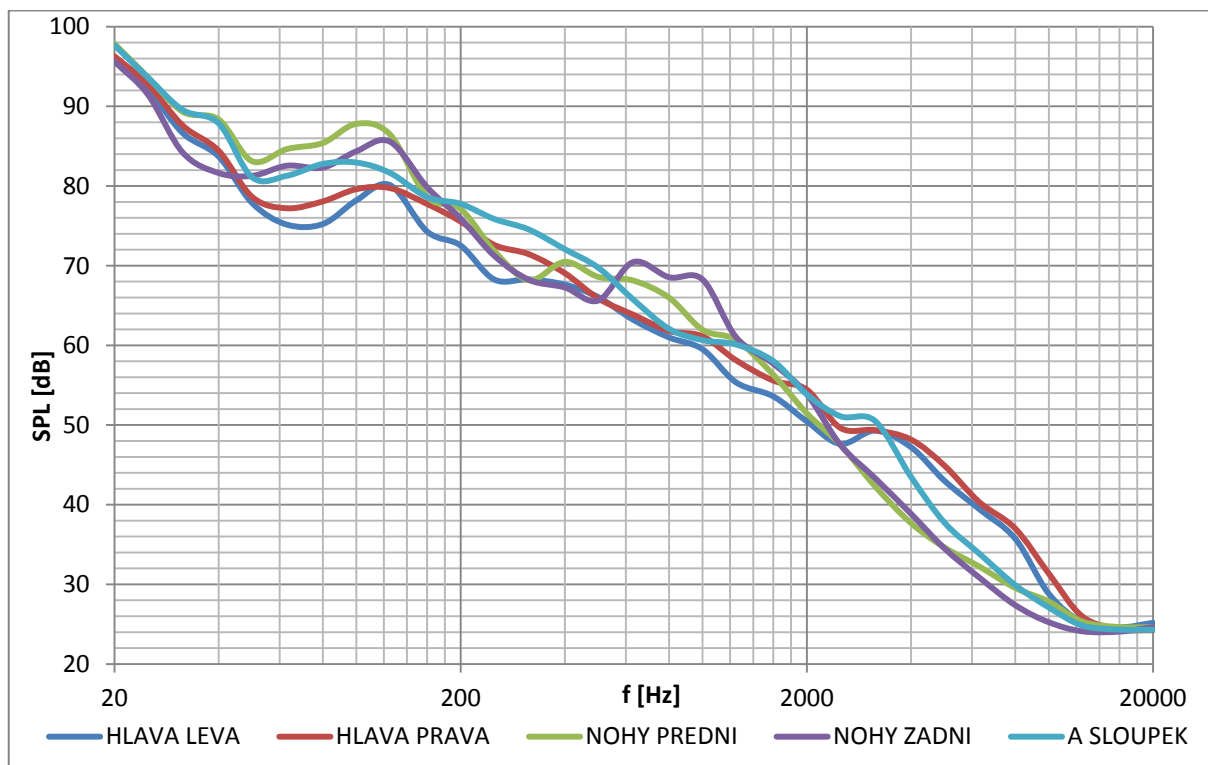
Tab. 4.1: Měřené rychlosti

Pro měření byly zvoleny rychlosti 30, 50, 80, 100 a 130 km/h. Rychlosti 80, 100 a 130 km/h vychází z normy ETSI, která obsahuje vzorky hluku o těchto rychlostech. Kvůli možnosti porovnání obou simulačních metod byly rychlosti voleny stejně. Rychlost byla určována pomocí mobilního telefonu s funkcí GPS a aplikací zobrazující aktuální rychlost. Současně byly logovány údaje o pozici pro možnost opakovaného měření. V rámci měření bylo naježděno okolo 150 km. Pro každou rychlost bylo provedeno více měření a z těchto měření byl vybrán vždy jeden nejvhodnější vzorek. Pro tento výběr posloužila analýza FFT, pomocí které byly odhaleny intenzivní rázy v jednotlivých měřeních. Měření probíhalo, dokud se nevyskytla větší nerovnost na vozovce nebo neprojel okolo jiný automobil, který záznam narušil. Délka jednotlivých měření byla v průměru 2 min.

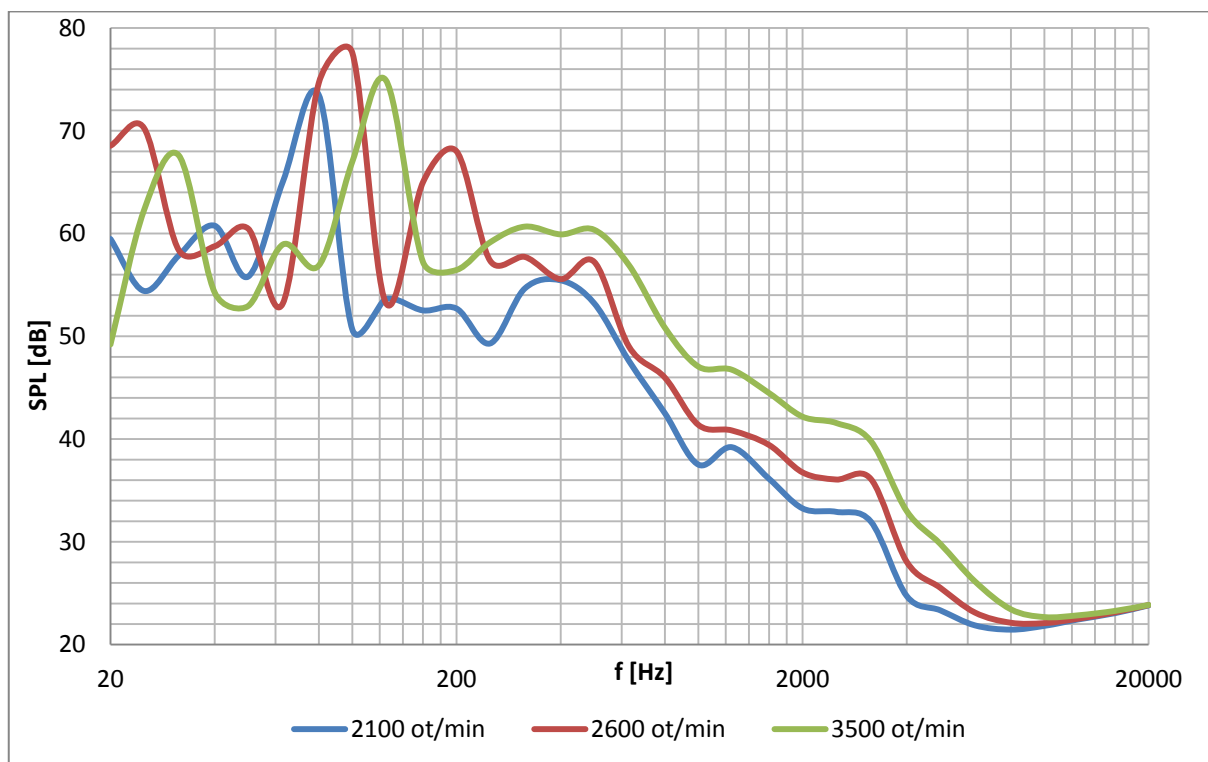
4.2 Vyhodnocení naměřených hodnot

Na první pohled je patrný nárůst akustického tlaku v oblasti 100 Hz, který se projevuje při všech měřených rychlostech, viz obr. 4.4. Tento nárůst je s největší pravděpodobností způsoben chodem motoru, viz [7]. Podobný nárůst je patrný i z měření hluku motoru při konstantních otáčkách a nulové rychlosti na obr. 4.5. V měřeném rozsahu otáček od 2100 ot/min do 3500 ot/min se hluk generovaný motorem přesunul z oblasti 80 Hz do oblasti 125 Hz. Hodnoty otáček motoru byly zvoleny na základě reálných otáček motoru v průběhu měření, viz tab. 4.1.

V oblasti od 500 Hz do 1250 Hz je patrný nárůst akustického tlaku, který se nejvíce projevuje v oblasti zadních nohou. Tento nárůst je taktéž pozorovatelný u všech měřených rychlostí a lze ho s největší pravděpodobností přisoudit valivému hluku vznikajícímu v oblasti pneumatik, viz [7]. Nárůst je patrný také v oblasti předních nohou, kde ale není tak dominantní.



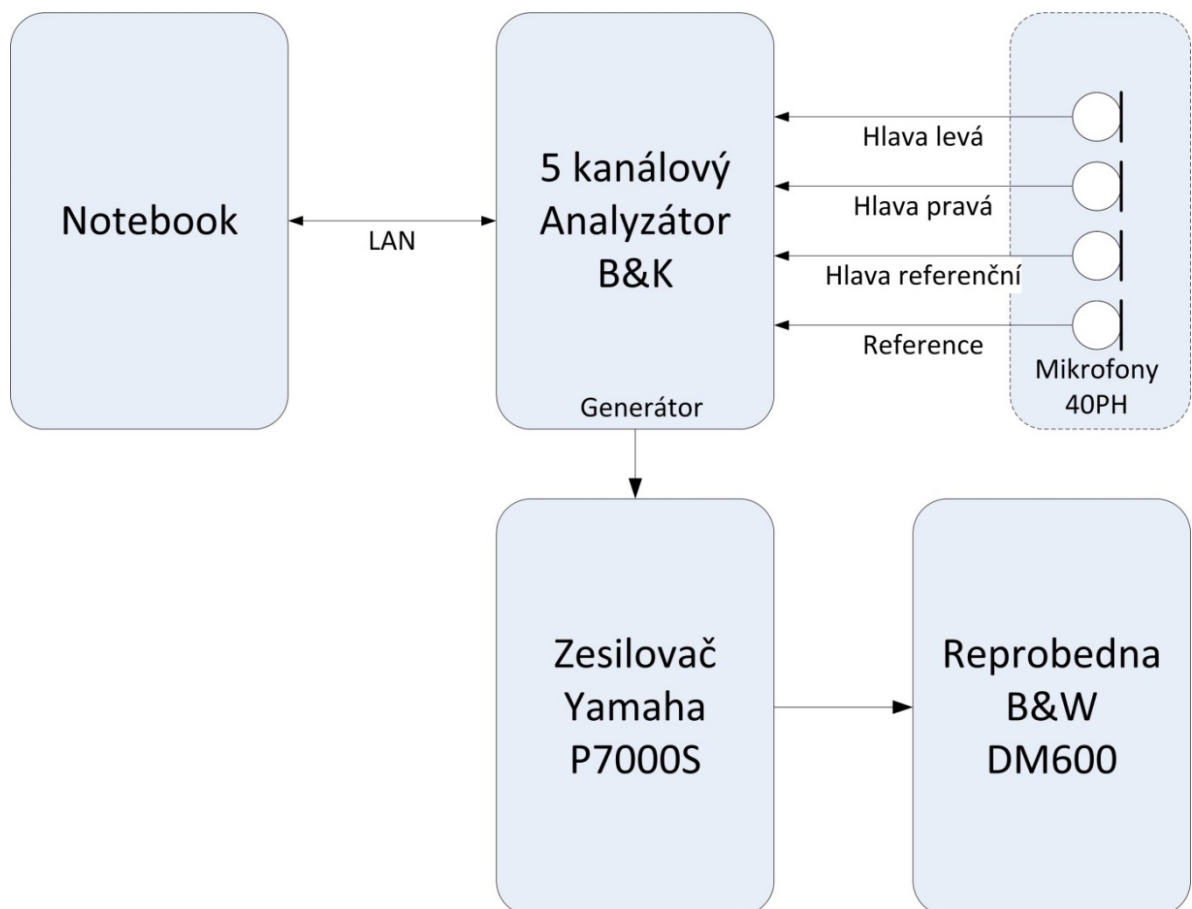
Obr. 4.4: Ekvivalentní hladina akustického tlaku změřena při rychlosti 130km/h



Obr. 4.5: Ekvivalentní hladina akustického tlaku na pozici A sloupku změřena při rychlosti 0 km/h

5 Kalibrace umělé hlavy na volné pole

Použití umělé hlavy vnáší do měřicího systému jistý druh zkreslení, který simuluje frekvenční odezvu podobnou lidskému uchu. Proto je dobré při použití hlavy znát její frekvenční charakteristiku. Kalibrace byla také provedena z důvodu, že mikrofony jsou v umělé hlavě umístěny napevno a bylo by velmi obtížné provést pomocí dostupných kalibračních přístrojů jejich kalibraci. Současně lze při tomto měření zjistit frekvenční charakteristiku reprobedny. Zapojení měřicí sestavy je patrné na obr. 5.1.

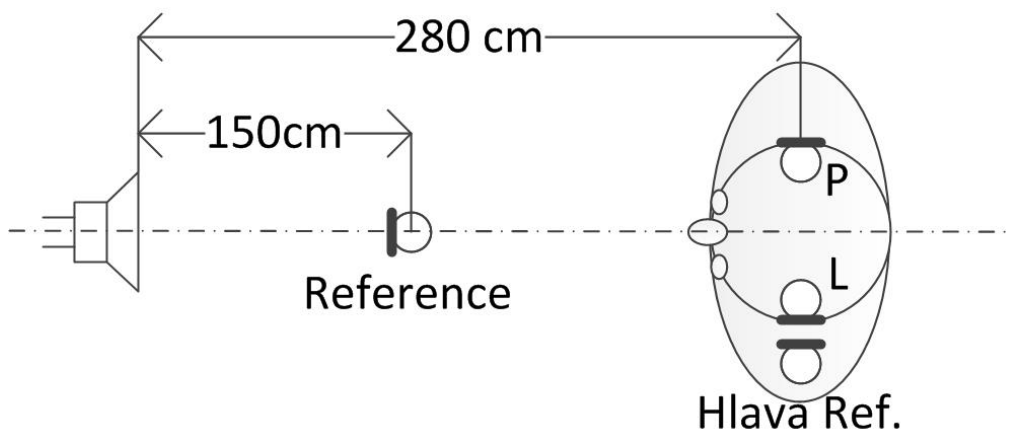


Obr. 5.1: Schéma zapojení kalibračního systému

Měřicí sestava:

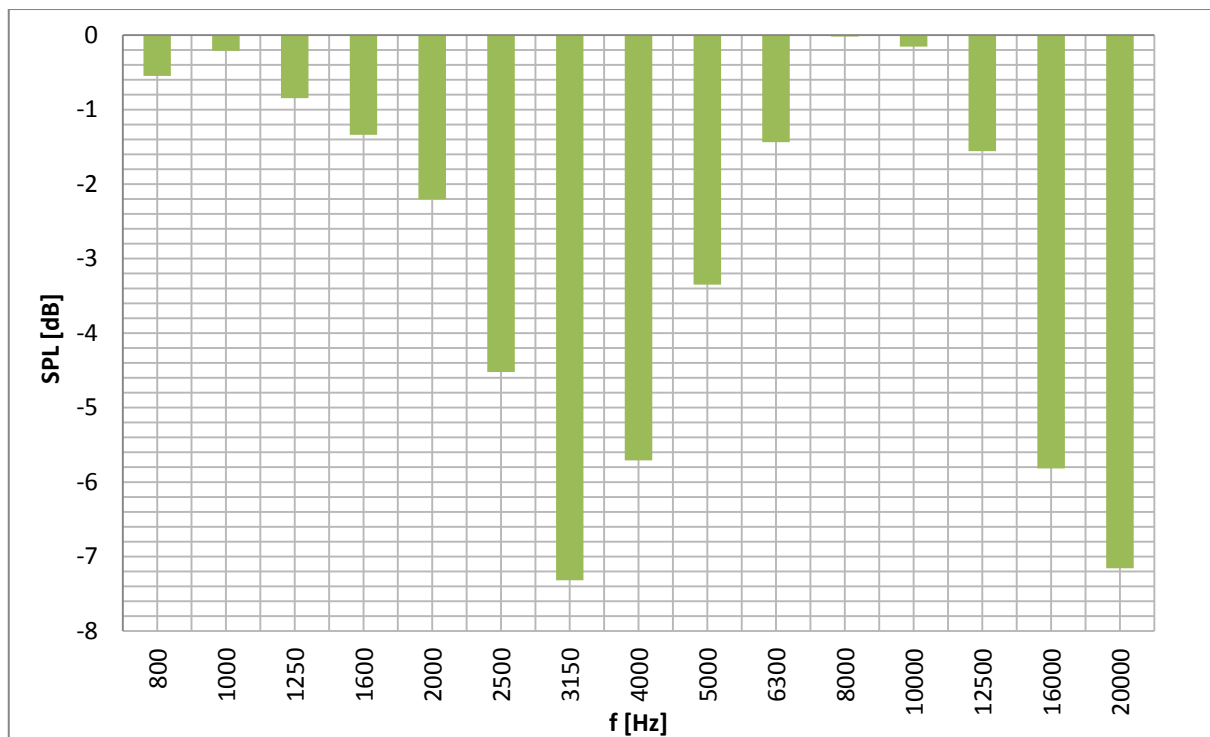
- 5kanálový analyzátor B&K IDAe 3560
- Mikrofony G.R.A.S.40PH
- Umělá hlava s torsem a zabudovanými mikrofony G.R.A.S. 40PH
- Notebook s programem PULSE Labshop verze 19.0
- Zesilovač Yamaha P 7000S
- Reprobedna B&W DM600S3

Měření bylo provedeno v bezodrazové místnosti. Rozmístění jednotlivých prvků je vyneseno na obr. 5.2. Šumový signál byl generován pomocí analyzátoru a dále zesílen. Byly použity dva druhy šumu a to bílý šum a růžový šum, kvůli možnosti porovnání správnosti výsledků.



Obr. 5.2: Pozice umělé hlavy v bezodrazové místnosti

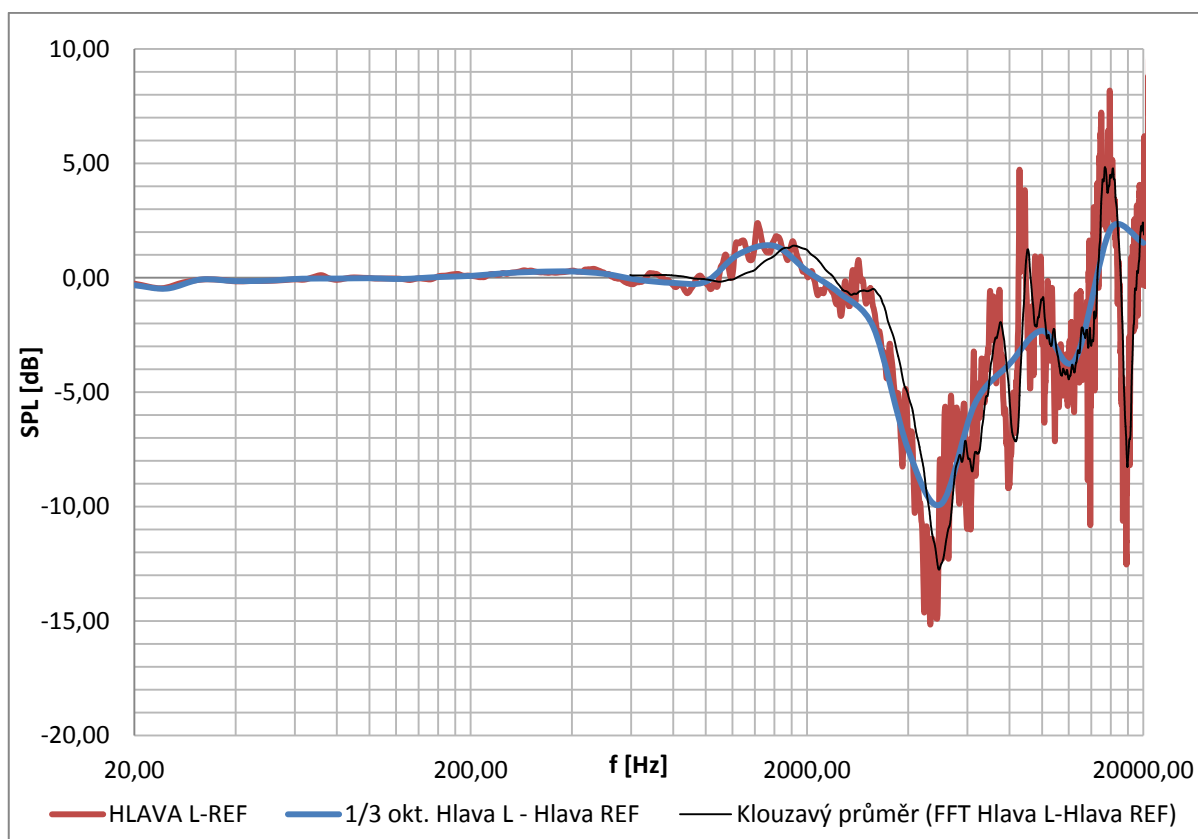
Reproduktor byl umístěn v rovině uší ve vzdálenosti 280 cm. Na spojnici protínající střed hlavy a střed reprobodny byl umístěn ve vzdálenosti 150 cm od reprobodny referenční mikrofon (Reference), který byl použit pro korekci frekvenční charakteristiky reprobodny. Další měřenou pozicí byl bod ERP, který je přesně definovaný ve specifikaci ITU-T P.57 a který na obr. 5.2 reprezentuje mikrofon „hlava referenční“.



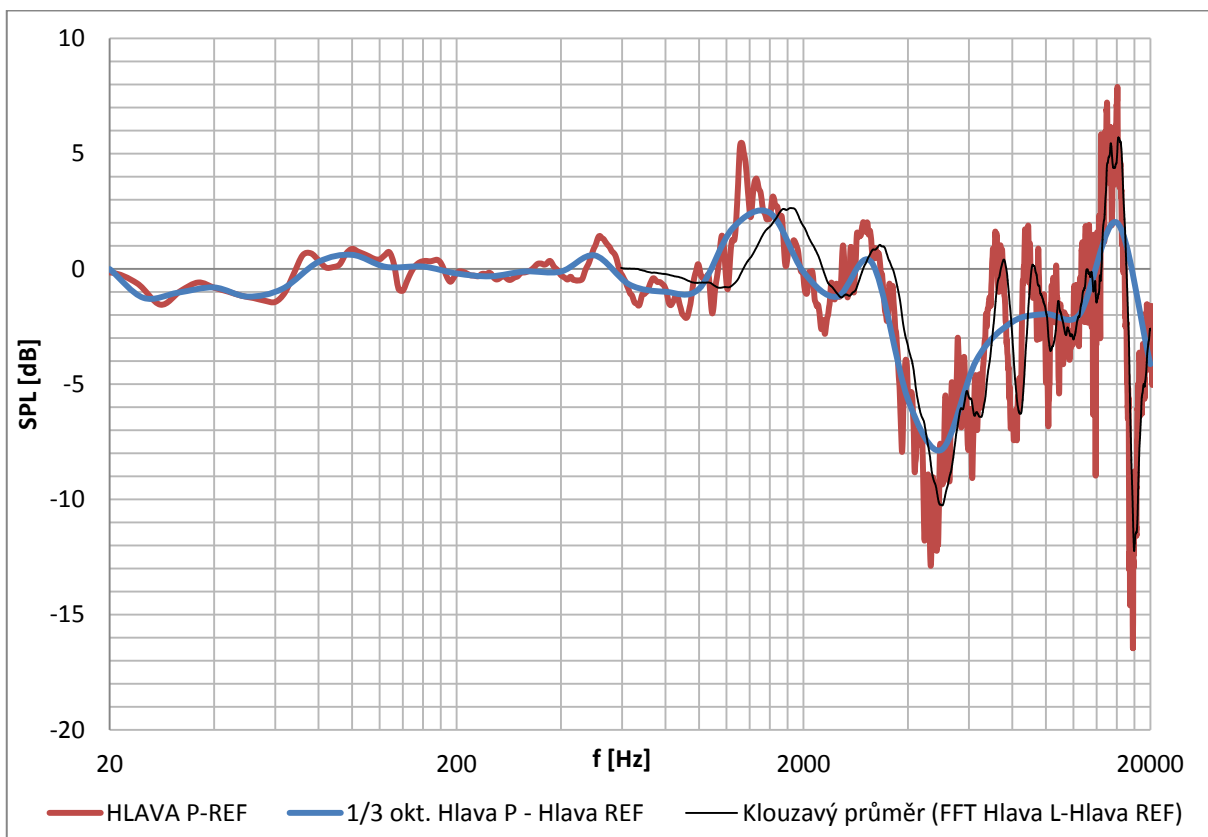
Obr. 5.3: Vypočítaná korekční křivka reproduktoru DM600S3

Pomocí změřených hladin akustického tlaku v 1/3 oktávovém spektru na pozici Reference, tedy ve vzdálenosti 1,5 m od reprobedny, byla vypočtena korekční křivka reprobedny. Tato korekce vychází z rozdílu naměřené hodnoty a předpokládaného průběhu, viz obr. 5.3. Korekční křivka byla vypočtena od 800 Hz do 20 kHz kde má korekce zásadní vliv. Jedná se o pásmo se střední frekvencí 3,15 kHz kde je velmi patrný útlum a také postupný útlum začínající na 12,5 kHz.

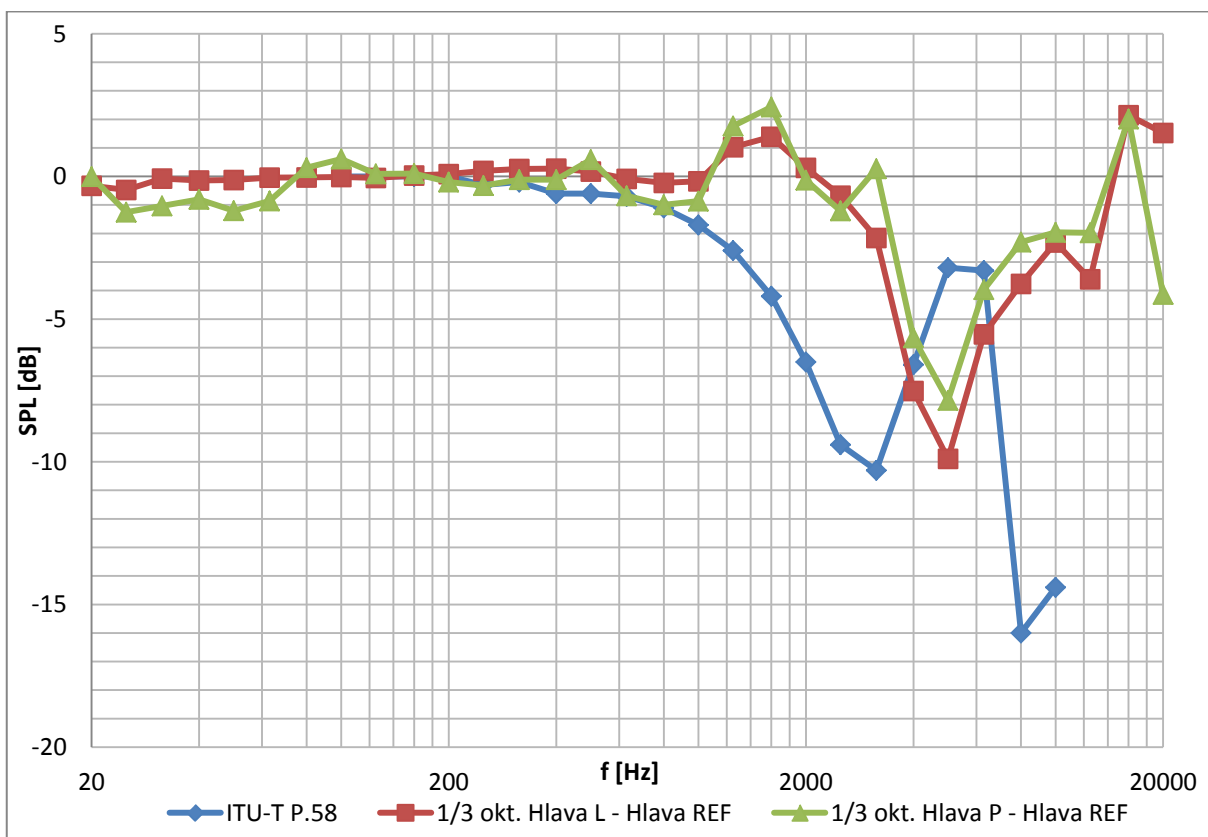
Pro kalibraci umělé hlavy byl použit růžový šum. Podle normy ITU-T P.58 se kalibrační křivka vypočte z rozdílu naměřených hodnot v bodě DRP a ERP. Frekvenční charakteristika reprobedny, viz obr. 5.3 byla zanedbána, protože se při výpočtu rozdílu hladin akustického tlaku eliminuje její vliv. Vypočtené průběhy jsou jak v 1/3 oktávovém pásmu, tak pomocí FFT analýzy na obr. 5.4 pro levé ucho a na obr. 5.5 pro pravé ucho. Norma ITU-T P58 také uvádí referenční průběh, který lze použít, pokud není možnost frekvenční charakteristiku umělé hlavy změřit. Referenční charakteristika je v rozsahu od 100 Hz do 10 kHz a porovnání s naměřenými charakteristikami je na obr. 5.6.



Obr. 5.4: Frekvenční charakteristika umělé hlavy pro levé ucho



Obr. 5.4: Frekvenční charakteristika umělé hlavy pro pravé ucho



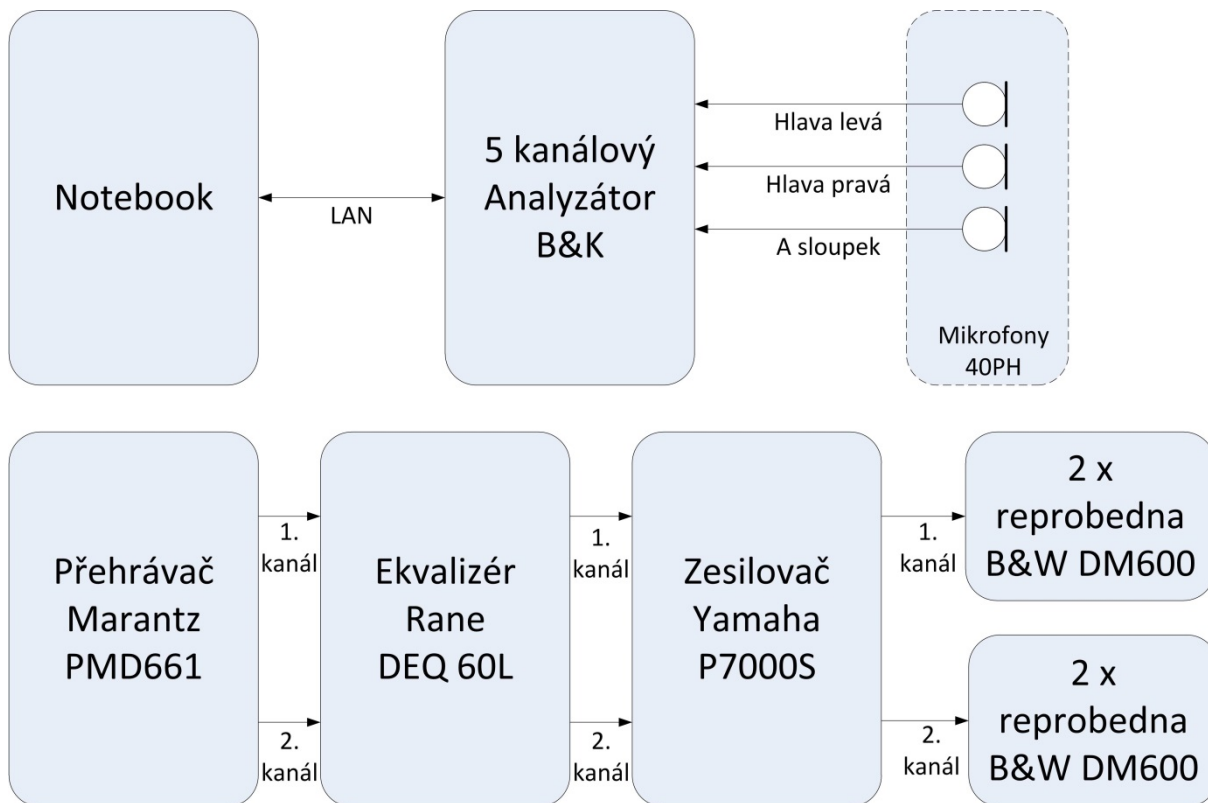
Obr. 5.5: Srovnání naměřené a referenční frekvenční charakteristiky

6 Návrh systému pro simulaci vnitřního hluku

6.1 Požadavky na simulační systém

Požadavek na frekvenční rozsah simulačního systému vycházel z předchozích měření, viz 3. a 4. kapitola, kde byl hluk ve vozidle analyzován ve frekvenční oblasti. Z těchto měření je patrné, že stěžejní pro simulaci bude spektrum nižších kmitočtů. U většiny norem se začíná sledovat hladina akustického tlaku při simulaci až od 100 Hz. Tento parametr je nedostatečný a byla snaha posunout spodní frekvenci ještě níž. To klade požadavky především na frekvenční rozsah reprobeden, které do simulačního systému vnášejí největší míru frekvenčního zkreslení. Dalším požadavkem na simulační systém jsou především rozměry reprobeden, které nesmí být příliš velké, aby svoji přítomností v interiéru zpětně neovlivňovaly celkovou akustiku uvnitř vozu. V průběhu simulace je také potřeba mít zpětnou vazbu o hladině akustického tlaku uvnitř vozu, který je stěžejní údaj o přesnosti simulace. Jako nutné se jeví použití 1/3 oktávového ekvalizéru, protože jinak by bylo velmi obtížné dosáhnout normami požadované přesnosti simulace v 1/3 oktávovém pásmu.

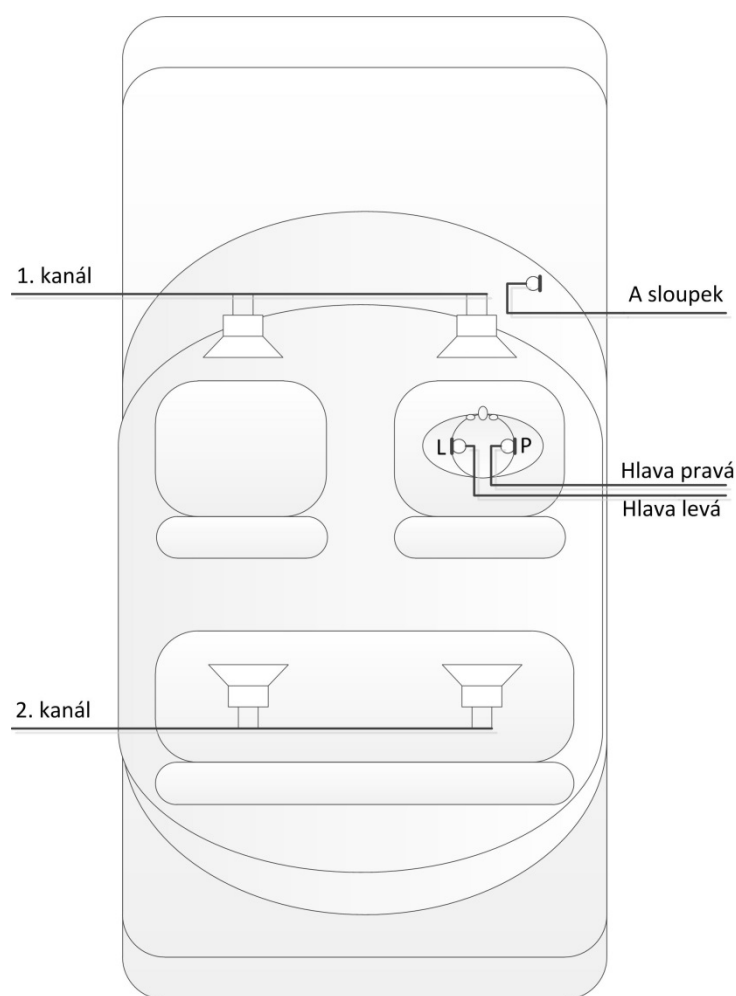
6.2 Realizace simulačního systému



Obr. 6.1: Schéma zapojení simulačního systému

Simulační systém:

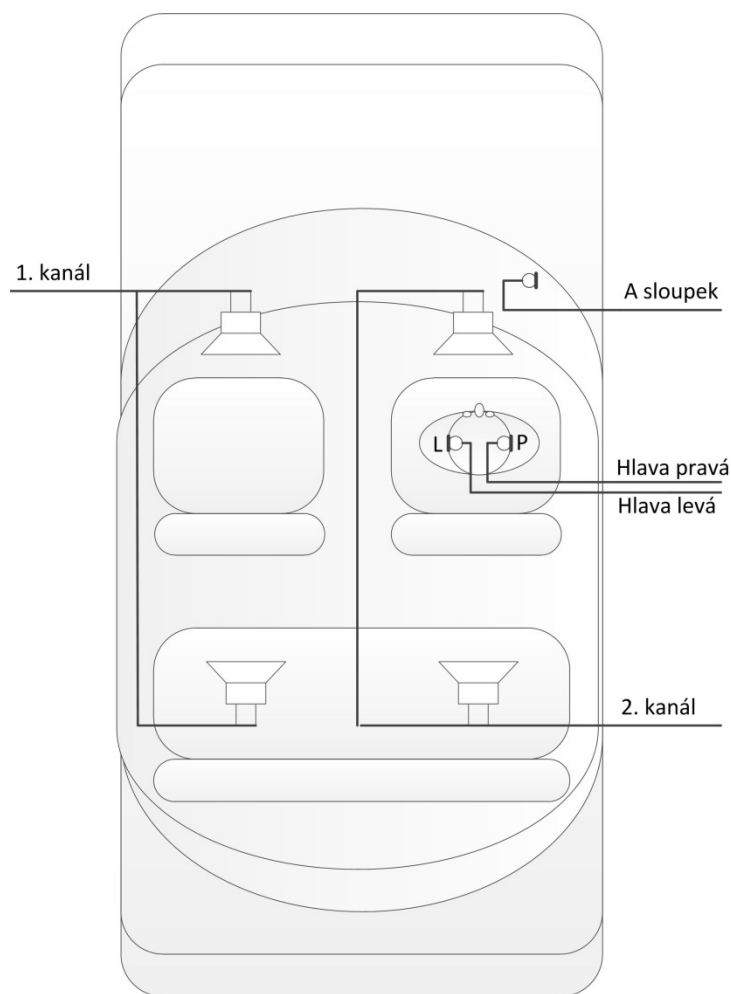
- Přehrávač Marantz PMD661
- Ekvalizér Rane DEQ 60L
- Zesilovač Yamaha P7000S
- 4 x Reprobedna B&W DM600S3
- Notebook s programem PULSE Labshop verze 19.0
- Analyzátor B&K IDAe 3560
- Umělá hlava s torsem a zabudovanými mikrofony G.R.A.S. 40PH
- Mikrofon G.R.A.S. 40PH



Obr. 6.2: Schématické rozmístění ve vozidle č. 1

Přehrávání hlukové stopy probíhá pomocí dvoukanalového přehrávače. Lze takto přehrávat pouze zvukové stopy ve formátu WAV. Následuje 1/3 oktávový grafický ekvalizér, který může nezávisle ekvalizovat dva zvukové kanály. Maximální rozsah ekvalizace na každém pásmu je ± 12 dB. Poté je zvukový signál zesílen pomocí zesilovače s výstupním

výkonem 2 x 950 W v režimu pracujícím do 4 Ω . Takto zesílený signál je vyzářen pomocí reprobeden s frekvenčním rozsahem 55 Hz až 42 kHz (-6 dB) a impedancí 8 Ω . Reprobedny byly spojeny paralelně, proto jejich vstupní impedance byla 4 Ω . Zpětnou informaci o hladině akustického tlaku dal analyzátor společně s mikrofony 40PH, který byl již použit v předchozích kapitolách.



Obr. 6.3: Schématické rozmístění ve vozidle č.2

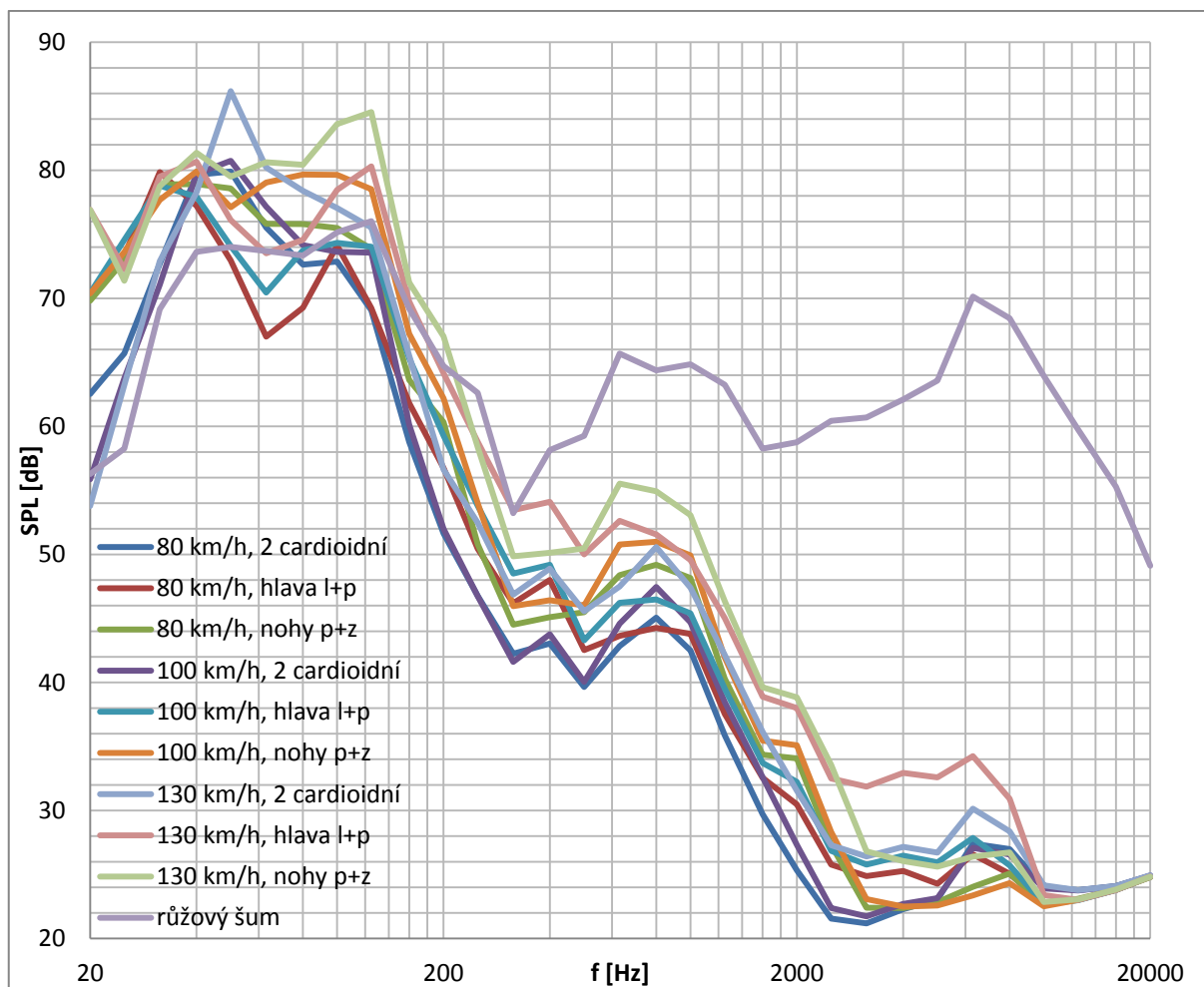


Obr. 6.4: Ukázka simulačního systému

7 Simulace hluku ve vozidle

Hluk byl vždy simulován pro tři rychlosti jízdy a to 80, 100 a 130 km/h. Jak již bylo uvedeno, tyto rychlosti vychází z normy ETSI kde se nachází hlukové vzorky, které byly také pro simulaci použity, viz [1]. Navržený simulační systém byl umístěn do stejného automobilu, ve kterém probíhalo měření ve 4. kapitole a ve kterém také vznikly hlukové nahrávky. Obdobně jako ve 4. kapitole probíhala v průběhu simulace také analýza hluku uvnitř vozu. Okamžitá znalost hladin akustického tlaku uvnitř vozu v průběhu simulace byla klíčová pro správné nastavení ekvalizéru pro jednotlivé kanály.

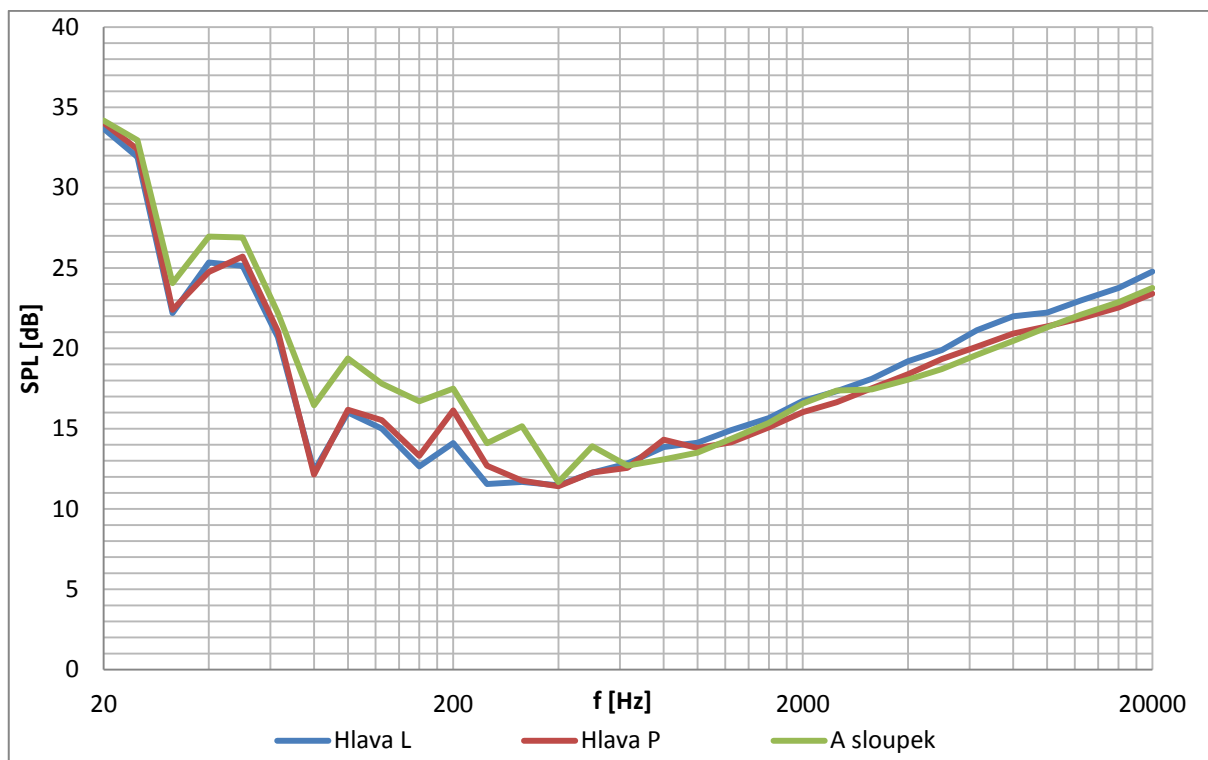
Pozice mikrofonu v blízkosti A sloupku byla stejná jako v průběhu měření a záznamu. Umělé torso s umělou hlavou se také nacházeli na stejné pozici jako při měření hluku za jízdy. Totožná pozice mikrofonů byla nezbytná kvůli možnosti porovnání simulačních metod vůči reálně naměřenému hluku.



Obr. 7.1: Hladina akustického tlaku na pozici levého ucha bez ekvalizace

Jako první byl vždy přehráván signál se stejným zesílením na obou kanálech a bez zásahu ekvalizéru viz obr. 7.1. Z tohoto měření již lze dopředu odhadnout, jak moc bude potřeba přehrávaný signál ekvalizovat. Následná ekvalizace probíhala v 1/3 oktávovém pásmu od frekvence 31,5 Hz s přihlédnutím k frekvenčním vlastnostem reprobeden. Normy se shodují na maximálním rozptylu ± 3 dB od originální nahrávky v pásmu od 100 Hz do 10 kHz. Tyto hodnoty jsou vždy vztahovány na pozici levého ucha spolujezdce respektive pravého ucha na pozici řidiče. Protože umělé torso s hlavou zůstalo na pozici spolujezdce, jednalo se zde o levé ucho.

Na samotnou simulaci měl velký vliv okolní hluk, který pronikal do zavřené kabiny automobilu. Jelikož nebyla možnost umístit automobil do bezodrazové a odhlučněné místnosti, bylo potřeba provádět měření v době relativního „ticha“. Průstup okolního hluku do kabiny byl nejvíce patrný při simulacích nižších rychlostí, kdy v kabině byla nižší hladina akustického tlaku. Pro regulérnost simulace byla změřena hladina akustického tlaku okolního hluku, který je vynesena na grafu 7.2.

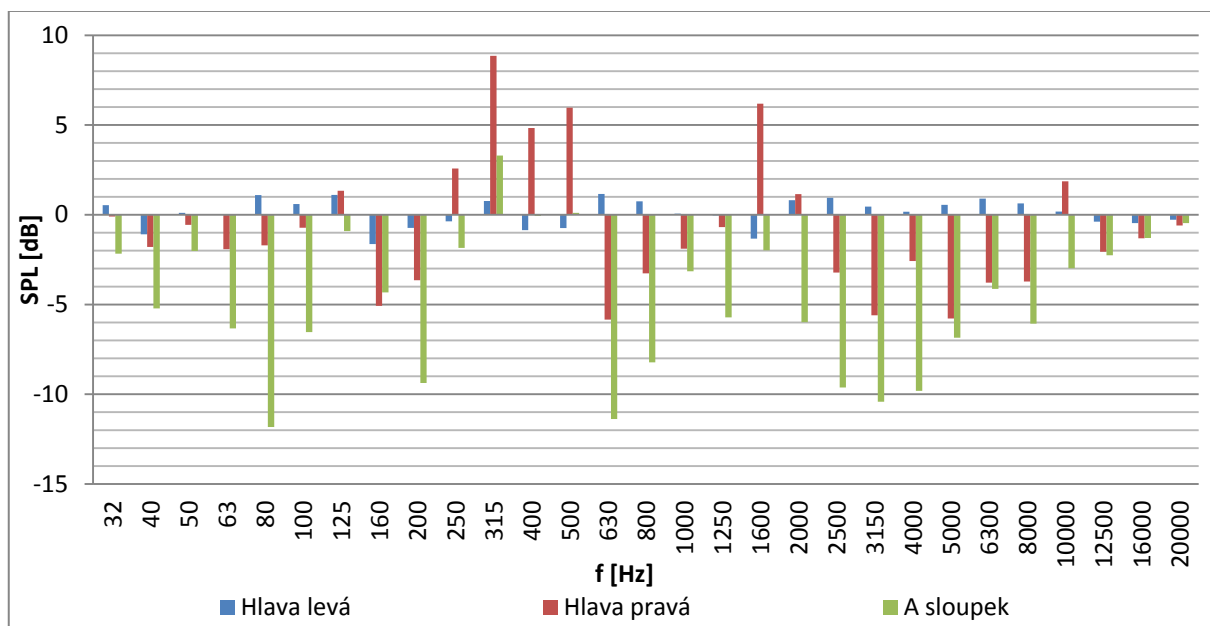


Obr. 7.2: Hladina akustického tlaku okolního hluku

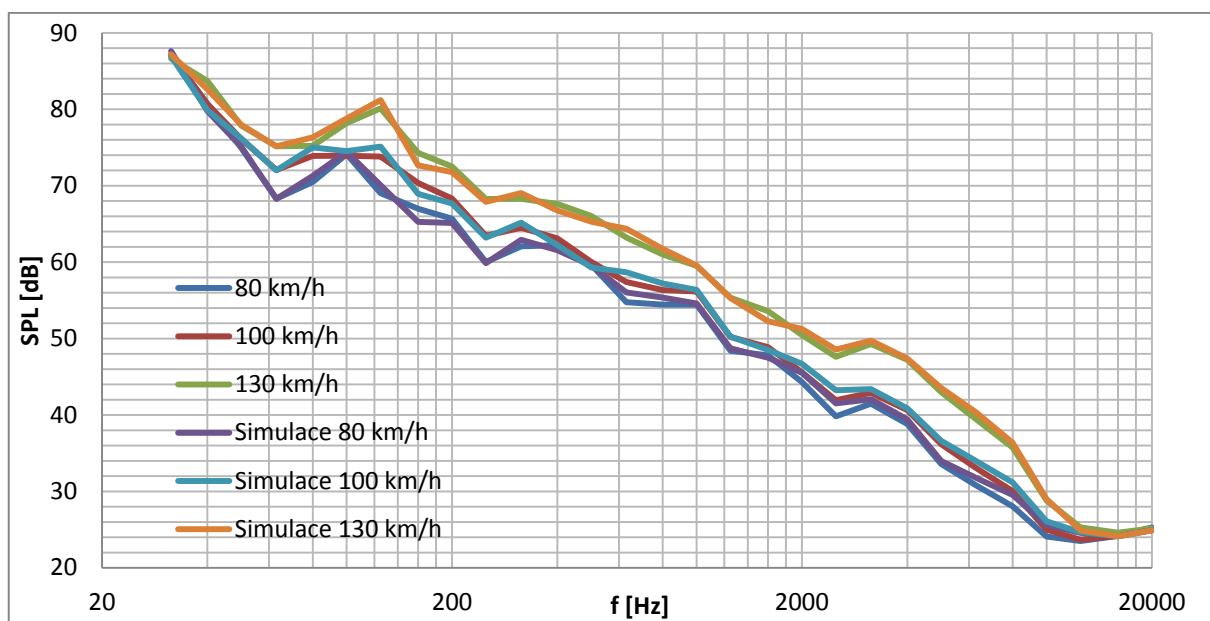
7.1 Simulace hluku pomocí nahrávky umělou hlavou

7.1.1 Simulace pomocí nahrávky levého ucha

Simulace byla zapojena podle obr. 6.3. Pro simulaci byla využita nahrávka z levého ucha umělé hlavy. I přes to že byla nahrávka jednokanálová, probíhala ekvalizace dvoukanalově. Jak již bylo uvedeno, ekvalizace zvukové stopy měla jako referenční hodnotu levé ucho. Z tohoto důvodu měla simulace relativně malou odchylku na pozici levého ucha od původního záznamu.



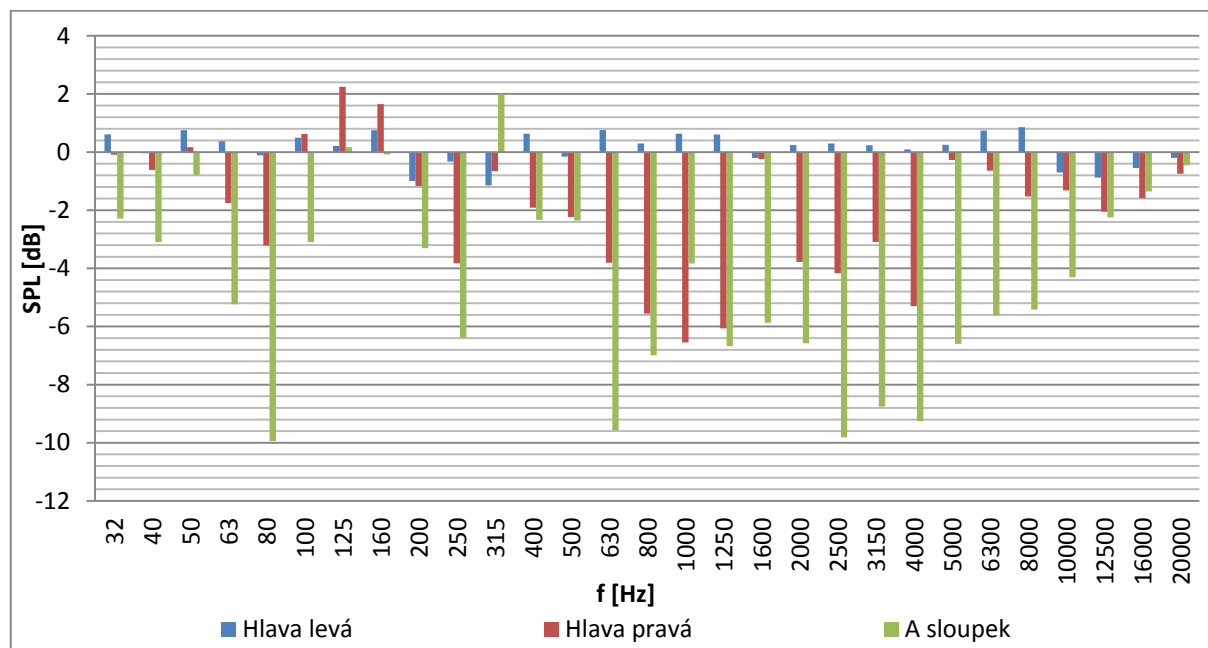
Obr. 7.3: Rozdíl hladin akustického tlaku mezi původní nahrávkou a simulací při 130 km/h



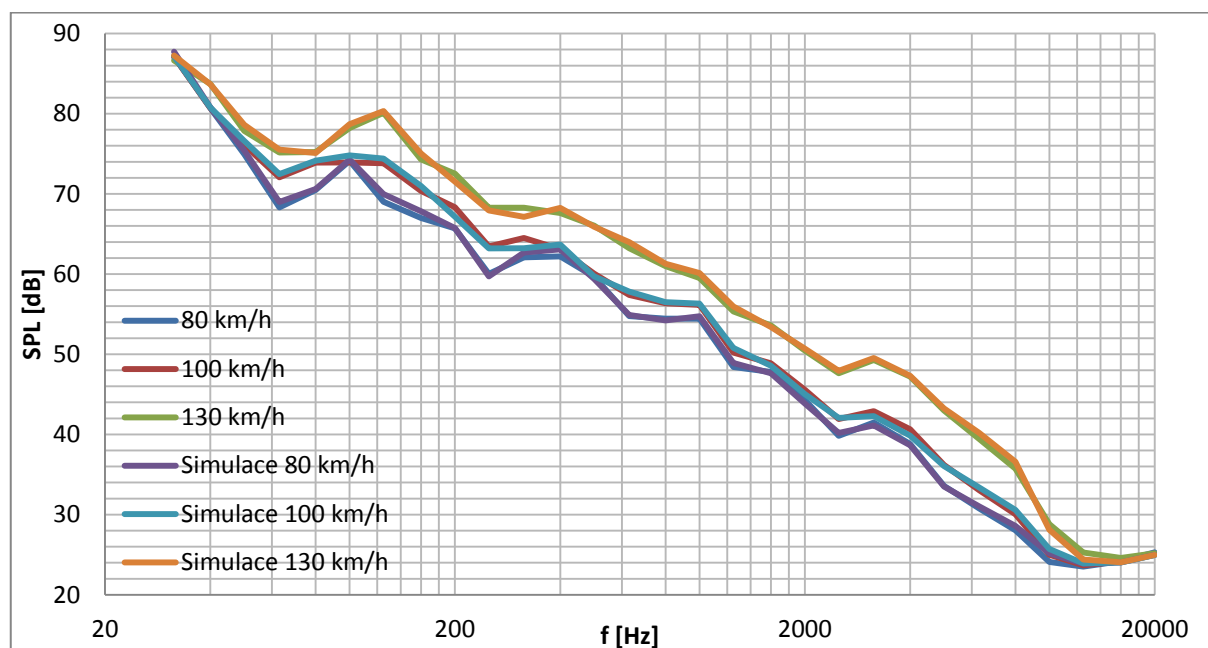
Obr. 7.4: Hladiny akustického tlaku na pozici levého ucha

7.1.2 Simulace pomocí nahrávky levého a pravého ucha

Simulace byla zapojena podle obr. 6.3. Pro simulaci byly použity stopy pořízené na pozici levého a pravého ucha umělé hlavy. Tuto simulační metodu uvádí některé firemní specifikace. Od této metody byly očekávány nižší odchylky na pozici pravého ucha oproti naměřenému spektru.



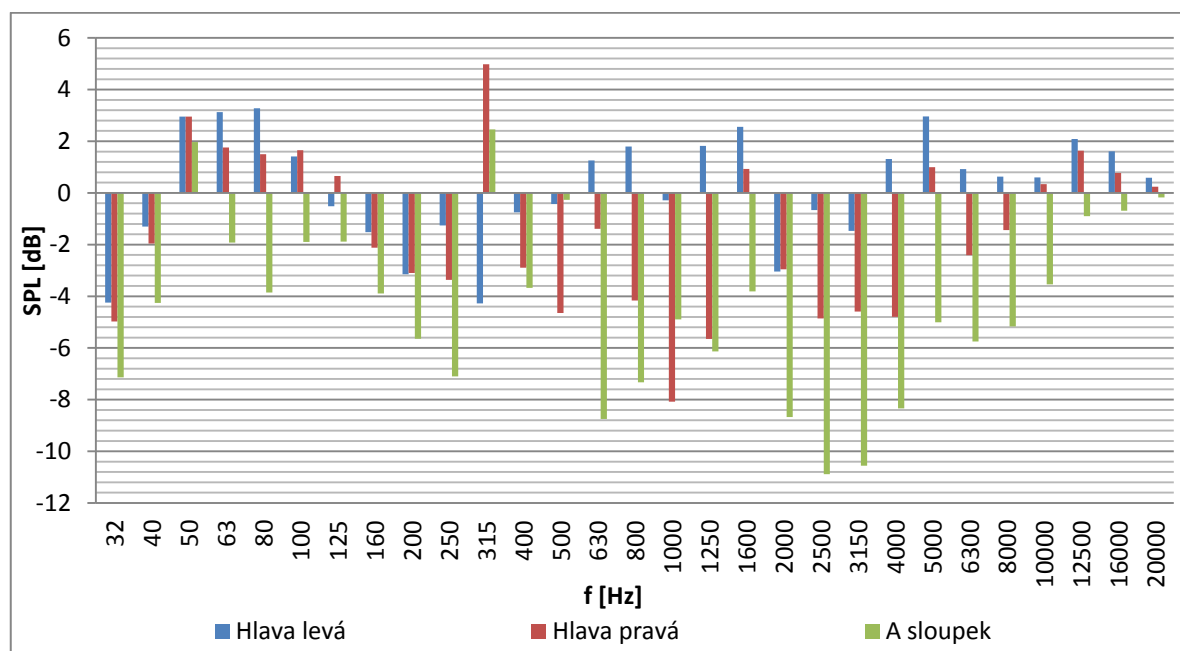
Obr. 7.5: Rozdíl hladin akustického tlaku mezi původní nahrávkou a simulací při 130 km/h



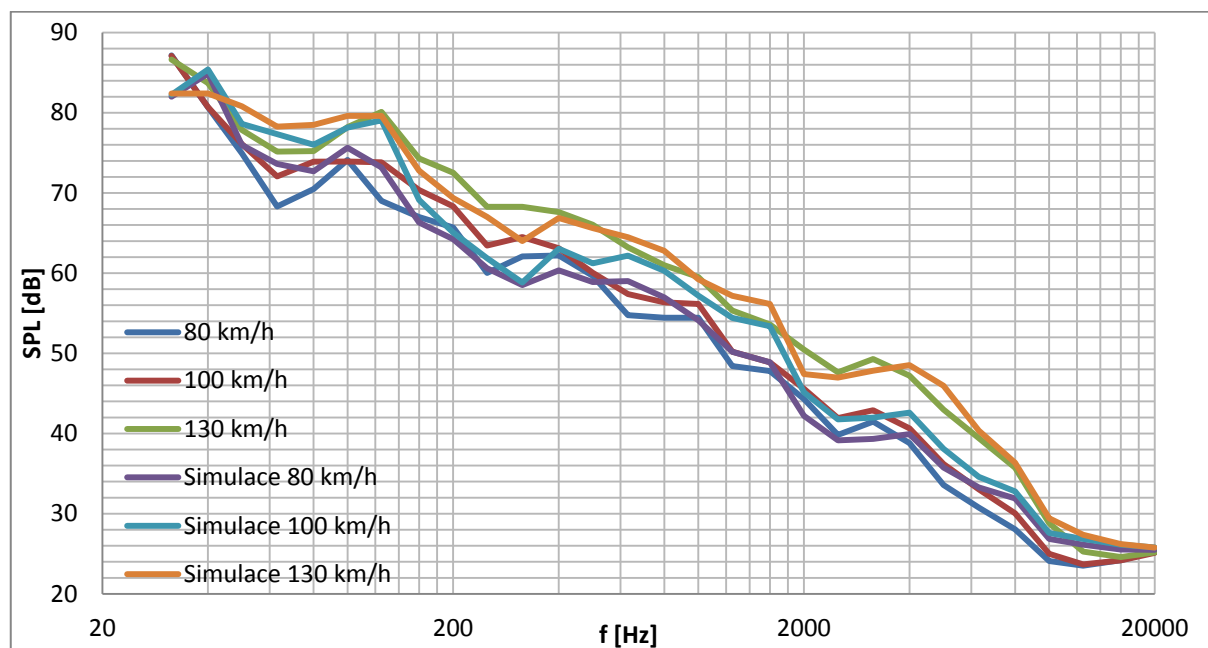
Obr. 7.6: Hladiny akustického tlaku na pozici levého ucha

7.2 Simulace hluku pomocí převzatých nahrávek

Simulace byla zapojena podle obr. 6.3. Zvukové stopy byly převzaty z normy ETSI viz [1] ve formátu wav. Jedná se o nahrávky „Midsize_Car1_rychlost_2cardioid_mic(0.0-30.0s)“ kde za rychlost lze dosadit 80, 100 a 130 km/h. Všechny stopy měly délku 30 s. Bližší podmínky záznamu ani pozice mikrofonů nejsou v normě specifikovány.



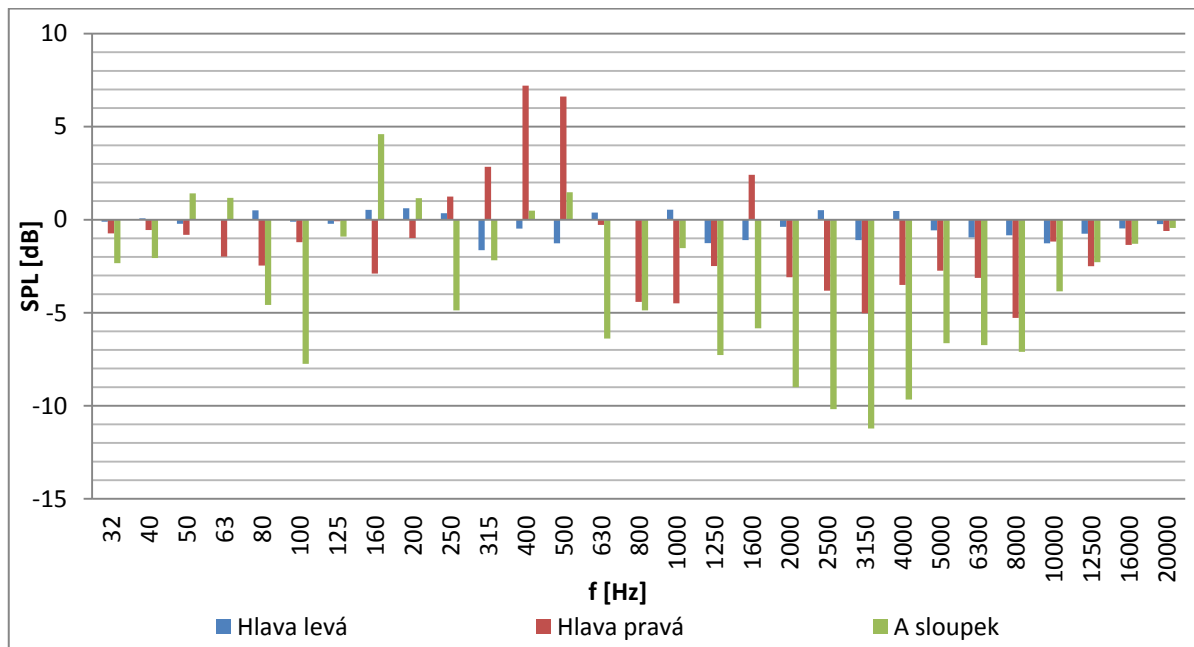
Obr. 7.7: Rozdíl hladin akustického tlaku mezi původní nahrávkou a simulací při 130 km/h



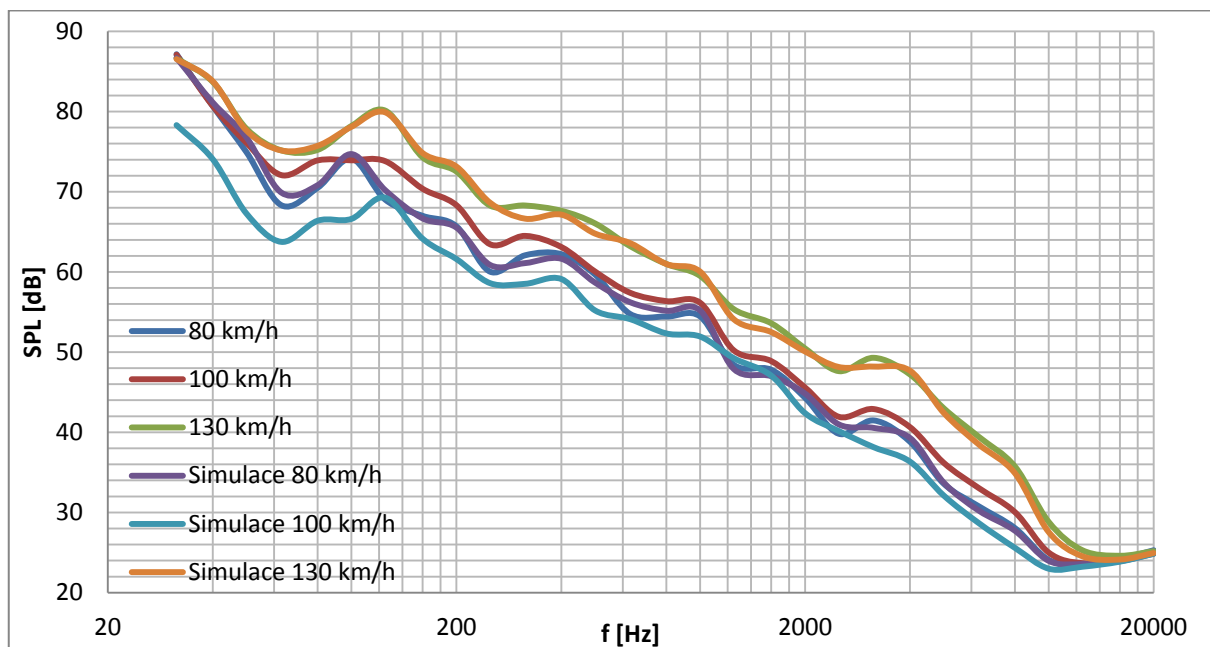
Obr. 7.8: Hladiny akustického tlaku na pozici levého ucha

7.3 Simulace hluku pomocí nahrávky z oblasti nohou

Simulace byla zapojena podle obr. 6.2. Využití nahrávky z oblasti nohou se jeví jako jedna z možných alternativ k metodám popsaných ve specifikacích, protože právě v této oblasti byly umístěny reprobedny.



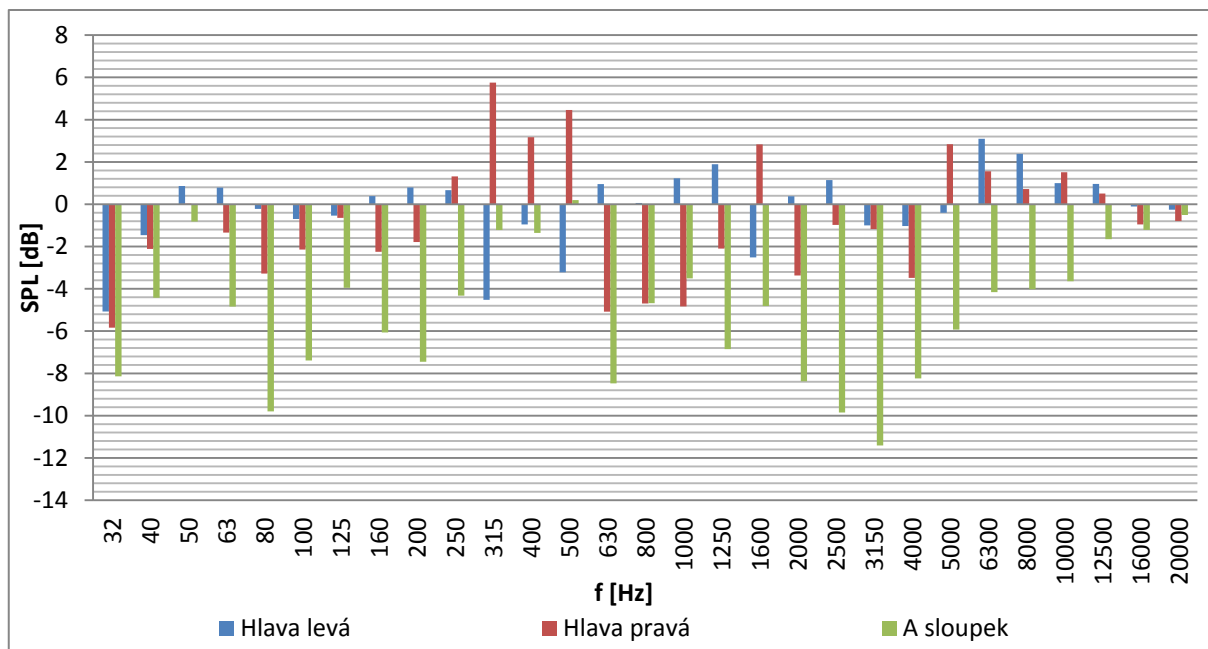
Obr. 7.9: Rozdíl hladin akustického tlaku mezi původní nahrávkou a simulací při 130 km/h



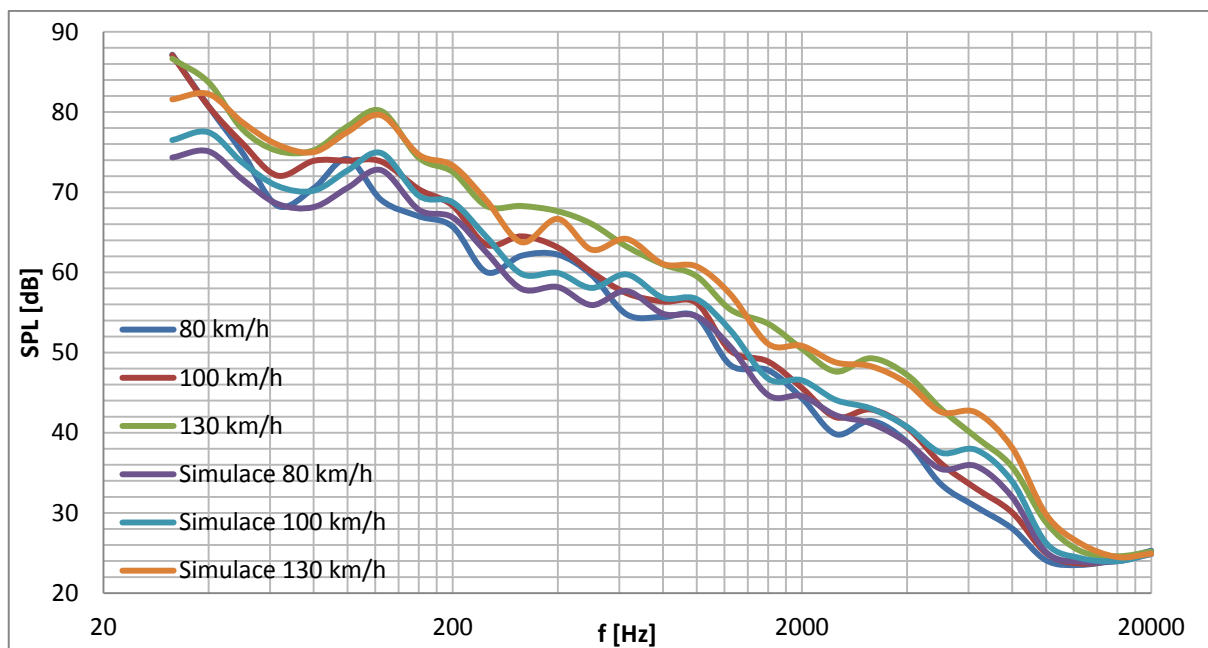
Obr. 7.10: Hladiny akustického tlaku na pozici levého ucha

7.4 Simulace hluku pomocí růžového šumu

Simulace byla zapojena podle obr. 6.2. Využití šumu k simulaci není nikde specifikováno a mělo dokázat, jestli je třeba používat pouze nahrávek z reálné jízdy. Pro simulaci byl využit růžový šum o délce 10 s, normalizovaného k -1 dB. Výkonová frekvenční hustota růžového šumu je přímo úměrná převrácené hodnotě frekvence. Touto charakteristikou se částečně podobá naměřenému hluku.



Obr. 7.11: Rozdíl hladin akustického tlaku mezi původní nahrávkou a simulací při 130 km/h



Obr. 7.12: Hladiny akustického tlaku na pozici levého ucha

7.5 Srovnání simulačních metod

Srovnání použitých metod pomocí nasimulovaných hodnot je velice spekulativní, protože nesporný vliv na celkový výsledek mělo nastavení ekvalizéru. Objektivnější srovnání, které není zatížené momentálním nastavením ekvalizéru, je porovnat hodnoty odchylek naměřené bez ekvalizace od původních nahrávek. Tyto hodnoty určují, jak bude potřeba danou metodu upravit ekvalizací aby se přiblížila originální nahrávce. Srovnání těchto odchylek je v tab. 7.1, nenachází se zde pouze hodnoty pro zvukovou stopu pořízenou na pozici levého ucha, protože došlo k jejich neobnovitelné ztrátě s největší pravděpodobností při generování hodnot. Zvuková stopa růžového šumu byla porovnávána pouze proti rychlosti 130 km/h. Z vypočtených hodnot vyplývá, že nejnižších hodnot dosahuje zvuková stopa zaznamenaná na pozici levého a pravého ucha. Zvuková stopa zaznamenaná v oblasti nohou zaostává při simulaci rychlosti 130 km/h, jinak dosahuje srovnatelných hodnot.

	80 km/h			100 km/h			130 km/h		
	A sloupek	Hlava P	Hlava L	A sloupek	Hlava P	Hlava L	A sloupek	Hlava P	Hlava L
hlava l+p	15,3	11,4	11,0	15,5	11,9	11,2	16,6	12,1	10,8
převzaté	18,0	14,8	14,5	18,8	15,7	15,4	20,7	17,0	15,9
nohy p+z	14,0	10,8	11,3	15,0	12,4	12,0	18,7	15,6	13,7
růžový šum							19,2	25,0	25,7

Tab. 7.1: Vypočtené odchylky bez ekvalizace [dB]

V tabulce 7.2 jsou uvedeny vypočtené průměry, maximální a minimální hodnoty odchylek hladin akustického tlaku mezi původní nahrávkou a ekvalizovanou simulační metodou. Průměr byl vypočten z 1/3 oktávových pásem v rozsahu 31,5 Hz až 20 kHz podle vztahu 3.1. Z vypočtených hodnoty vyplývá, že simulací se povedlo nejvíce přiblížit metodou využívající nahrávku z levého a pravé ucha. Simulace pomocí stopy z levého ucha se jeví také jako dostačující, i když dosahuje horších výsledků na pozici pravého ucha. Hodnot, které nesplňují normy, tedy ± 3 dB od původní nahrávky, bylo dosaženo pomocí simulace převzatými nahrávkami a simulace pomocí růžového šumu.

		80 km/h			100 km/h			130 km/h		
		Hlava L	Hlava P	A sloupek	Hlava L	Hlava P	A sloupek	Hlava L	Hlava P	A sloupek
Simulace hlava levá	Maximum	1,7	9,2	2,3	1,3	9,2	3,4	1,2	8,9	3,3
	Průměr	0,5	2,1	-2,8	0,3	1,4	-2,9	0,2	1,1	-3,2
	Minimum	-1,7	-5,5	-13,3	-1,4	-5,9	-13,3	-1,6	-5,8	-11,8
Simulace hlava levá + pravá	Maximum	1,1	5,4	3,6	0,9	2,0	2,5	0,9	2,2	2,0
	Průměr	0,2	-0,5	-2,9	0,1	-1,2	-3,2	0,2	-1,5	-3,3
	Minimum	-0,4	-5,9	-11,2	-1,3	-6,2	-11,3	-1,1	-6,6	-9,9
Simulace převzaté	Maximum	5,3	5,3	0,9	5,3	5,2	1,9	3,3	5,0	2,5
	Průměr	1,6	0,9	-2,6	2,2	1,0	-2,2	0,7	-0,5	-3,1
	Minimum	-5,1	-7,9	-9,4	-5,7	-6,2	-9,4	-4,3	-8,1	-10,9
Simulace nohy	Maximum	1,8	8,1	2,9	-0,3	3,8	-0,4	0,6	7,2	4,6
	Průměr	0,2	1,2	-2,1	-3,8	-3,0	-5,7	-0,3	0,1	-2,0
	Minimum	-1,0	-3,6	-8,8	-8,8	-11,0	-16,6	-1,6	-5,3	-11,2
Simulace růžový šum	Maximum	5,1	7,1	-0,4	4,8	5,8	0,7	3,1	5,8	0,2
	Průměr	0,6	1,6	-3,7	0,4	1,1	-3,8	0,1	0,2	-4,0
	Minimum	-12,8	-13,7	-15,9	-10,6	-11,6	-15,4	-5,1	-5,8	-11,4

Tab. 7.2: Vypočtené odchylky simulací [dB]

8 Závěr

Cílem této práce bylo prozkoumat hluk v jedoucím automobilu, navrhnout simulační systém pro jeho reprodukci a poté změřit parametry navrženého simulačního systému. Hluk ve vozidle byl prozkoumán ve dvou krocích a to pomocí zvukoměru a poté pomocí analyzátoru. Na základě těchto znalostí byl navržen simulační systém, jehož parametry byly následně ověřeny.

Pomocí zvukoměru bylo provedeno první prozkoumání jízdního hluku v 1/3 oktávových pásmech. Pro tuto metodu bylo zvoleno celkově 15 měřících bodů, které byly proměřeny při dvou rychlostech jízdy a to 50 a 130 km/h. Záznam hlukové stopy byl realizován za pomoci torza těla a umělé hlavy se zabudovanými mikrofony. Využití umělé hlavy vychází z norem a specifikací, které jsou na začátku práce rozebírány. Při využití umělé hlavy bylo také potřeba provést kalibraci, pomocí které byla zjištěna frekvenční charakteristika ve volném poli.

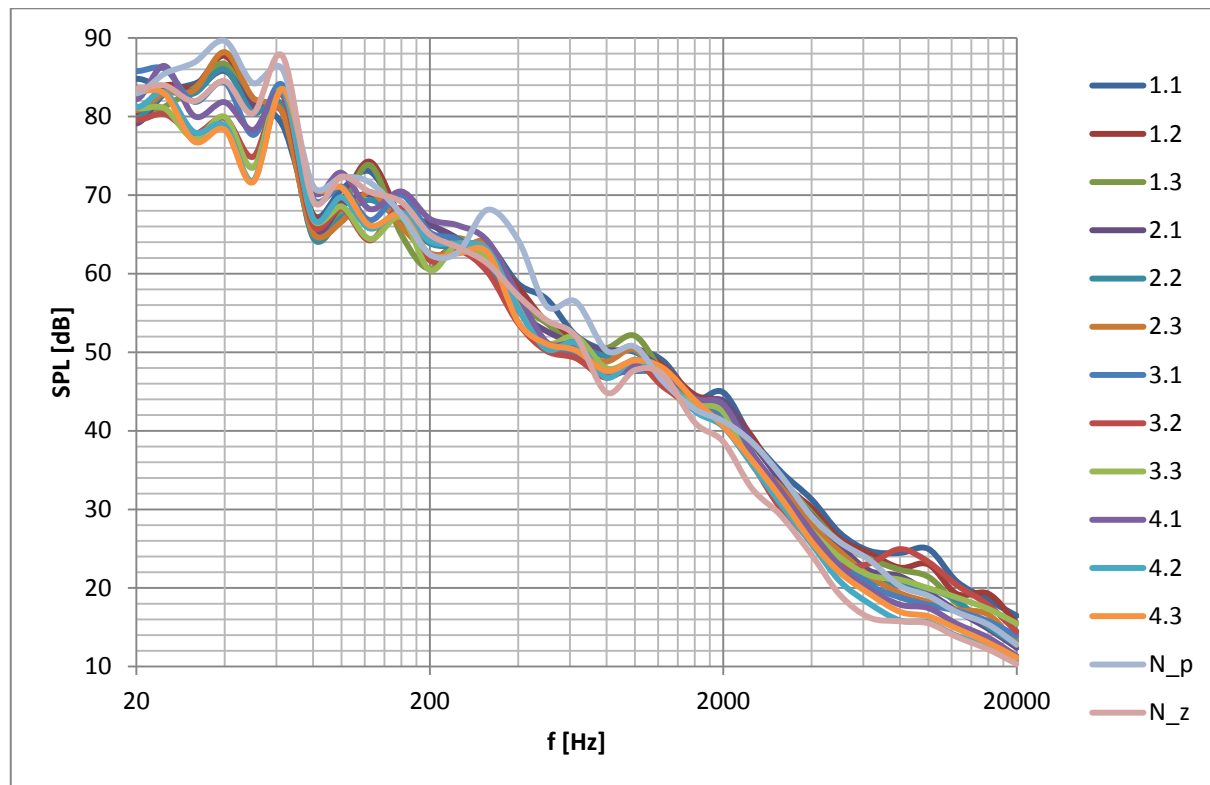
Při návrhu simulačního systému byla využita znalost z předchozích měření, především frekvenční rozložení hladin akustického tlaku. Simulační systém byl zrealizován za pomoci 4 reprobeden, výkonového zesilovače, 1/3 oktávového ekvalizéru a přehrávače. Zpětnou vazbu o hladině akustického tlaku uvnitř vozu dávalo zapojení s analyzátozem, pomocí kterého byly pořízeny referenční nahrávky. Simulace byla změřena ve dvou variantách zapojení simulačního systému. Na těchto zapojeních bylo vyzkoušeno 5 zvukových stop, které byly mezi sebou porovnány. Pomocí těchto stop byl simulován hluk pro rychlosti 80, 100 a 130 km/h. Jako nejvhodnější se jeví využití zvukové stopy pořízené umělou hlavou a to ve variantě využívající obě stopy. Tato varianta dosahuje lepších výsledků na pozici pravého ucha oproti variantě využívající nahrávku pouze z levého ucha. Jako nedostatečné se jeví simulace využívající převzatých nahrávek a také simulace využívající různého šumu.

Seznam literatury a informačních zdrojů

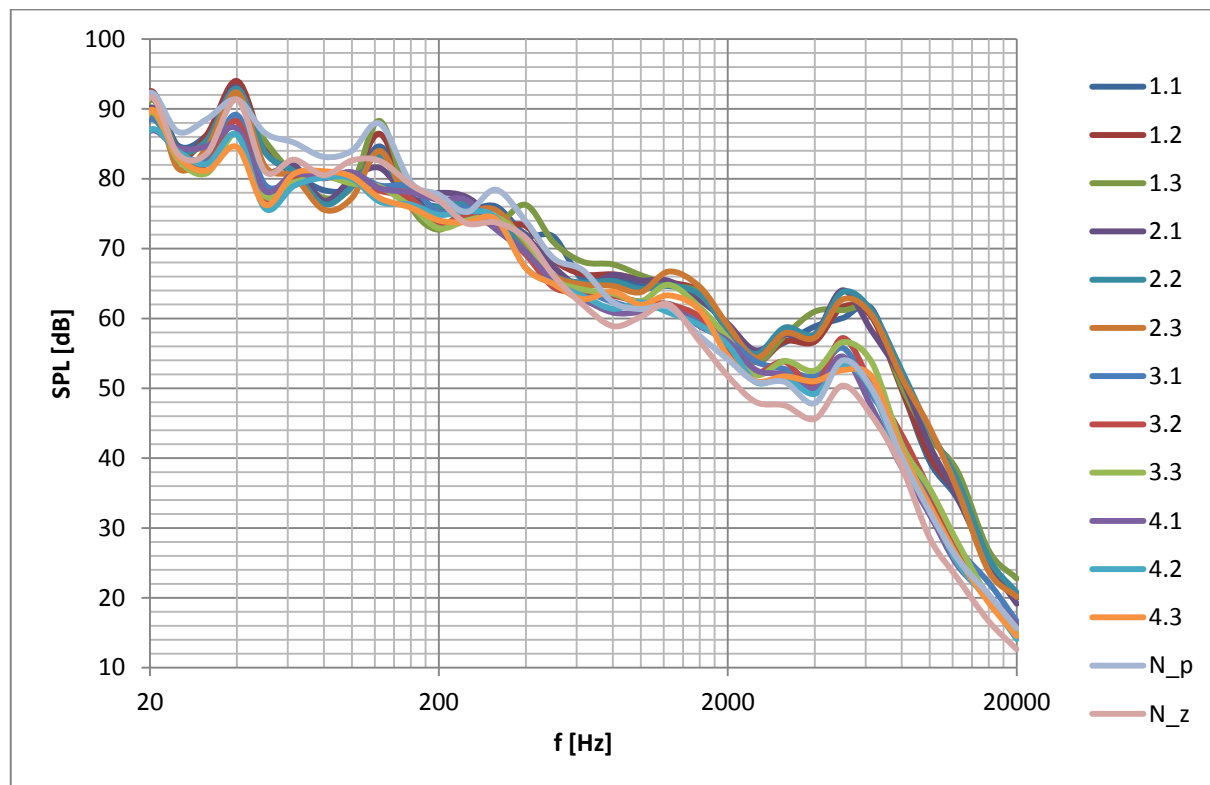
- [1] ETSI ES 202 396-1 (2014), Speech and multimedia Transmission Quality (STQ); Speech quality performance in the presence of background noise; Part 1: Background noise simulation technique and background noise database.
- [2] ITU-T Recommendation P.1100 (01/2015). Narrow-band hands-free communication in motor vehicles.
- [3] ITU-T Recommendation P.581(02/2014). Use of head and torso simulator for hands-free and handset terminal testing.
- [4] ITU-T ITU-T Recommendation P.57(12/2011). Artificial ears.
- [5] TOMÁŠ SKRŮCANÝ, MARTIN KENDERA. Noise measurement in the interior of passenger road vehicles 2/2015 pp. 40-46 ISSN 2392-3954.
- [6] LEVULYTÉ L, ŽURĀULIS V, SOKOLOVSKIJ E. The research of dynamic characteristics of a vehicle driving over road roughness. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and reliability* 2014; 16 (4): 518–525
- [7] HARRISON, MATTHEW. Vehicle refinement : controlling noise and vibration in road vehicles / Matthew Harrison. Oxford : Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004. xi, 345 s. : il. ISBN 0-7506-6129-1
- [8] NTi AUDIO AG. Operating manual : XL2 Handheld audio and acoustic analyzer [online]. Dostupné z <http://www.nti-audio.com/Portals/0/data/en/XL2-Manual.pdf>.
- [9] VLACHÝ VÁCLAV, : Praxe zvukové techniky /3., aktualiz. a dopl. vyd.. Praha : c2008. 297s. ISBN 978-80-86253-46-5.

Příloha A

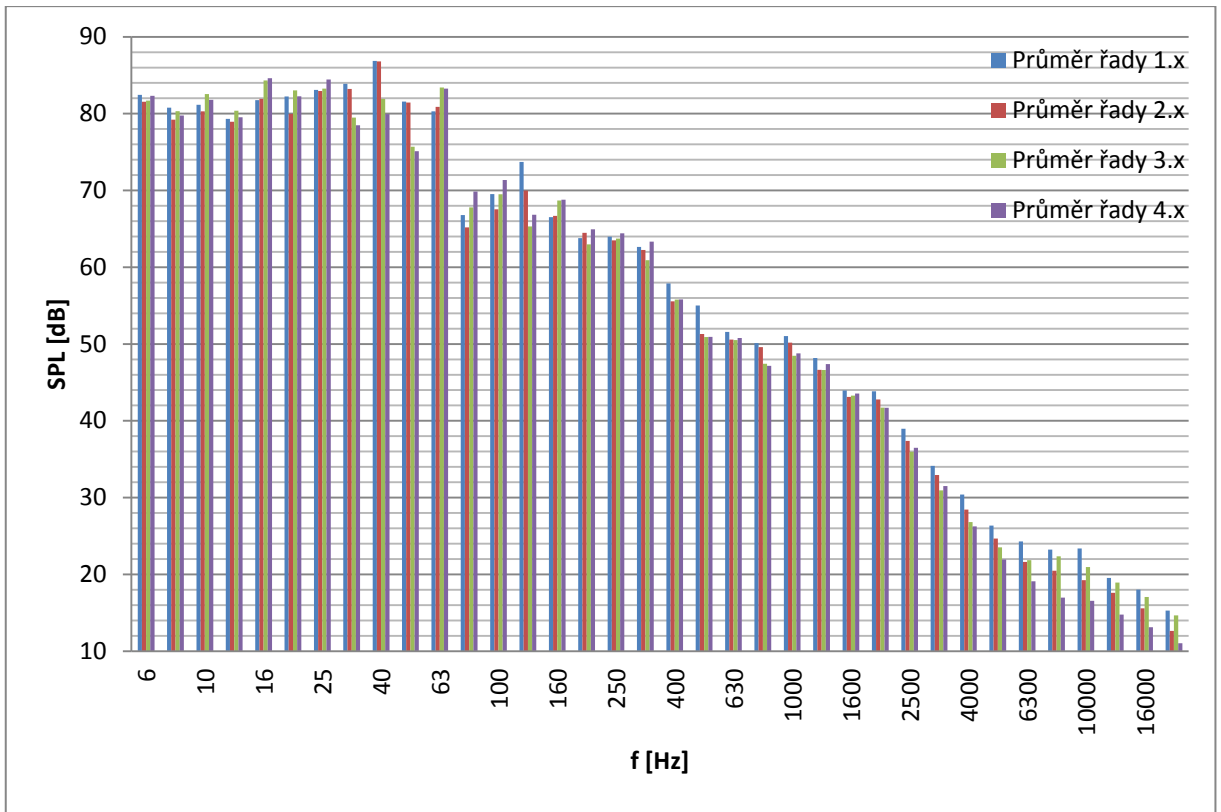
Hodnoty změřené za jízdy pomocí zvukoměru



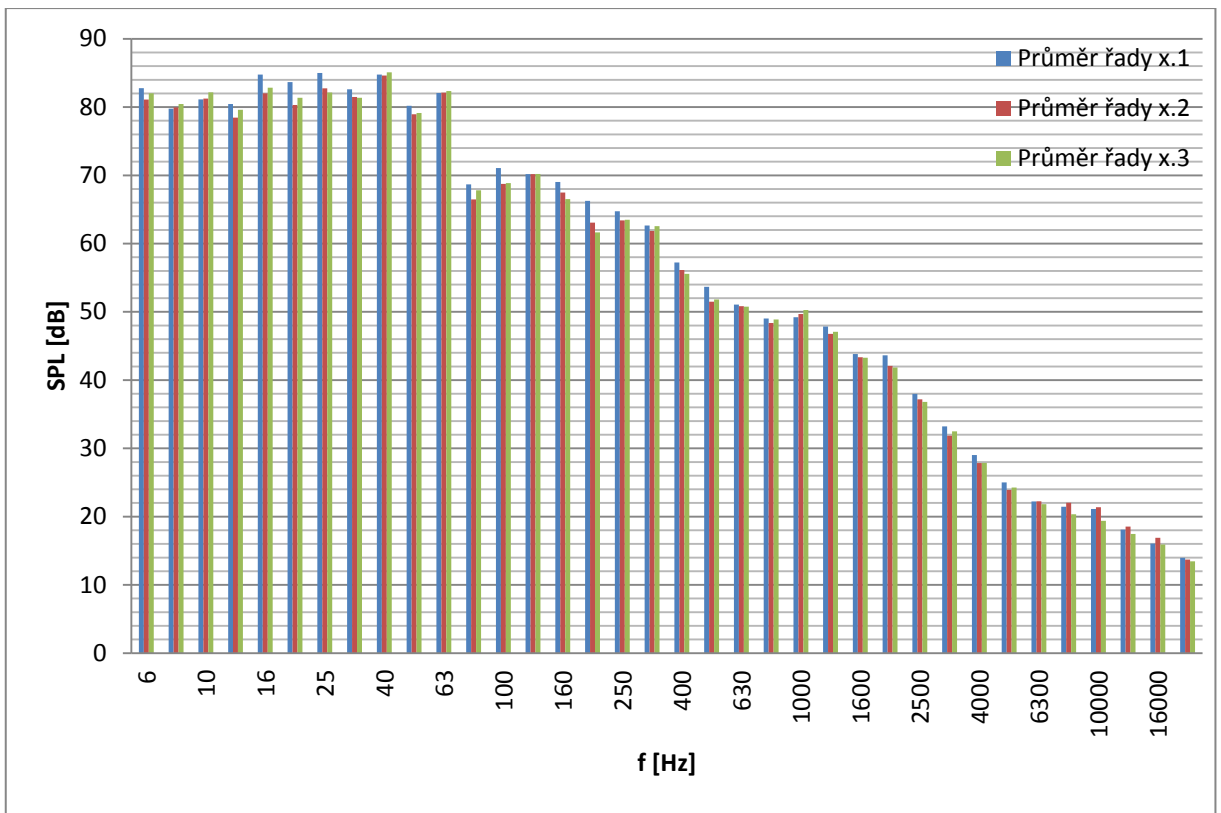
Obr. A.1: Hladina akustického tlaku změřena při rychlosti 50 km/h



Obr. A.2: Hladina akustického tlaku změřena při rychlosti 130 km/h



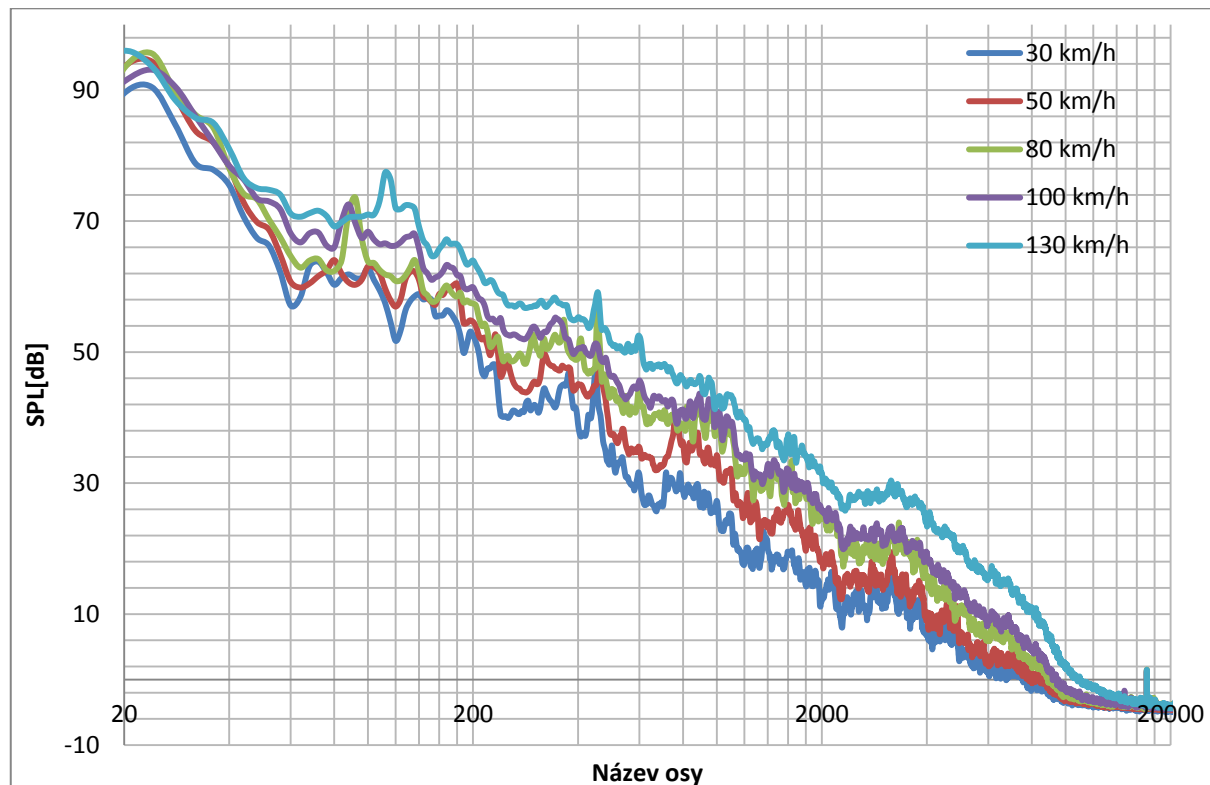
Obr. A.3: Průměr hladin akustického tlaku přes řady kolmé ke směru jízdy, měřeno při rychlosti 130 km/h



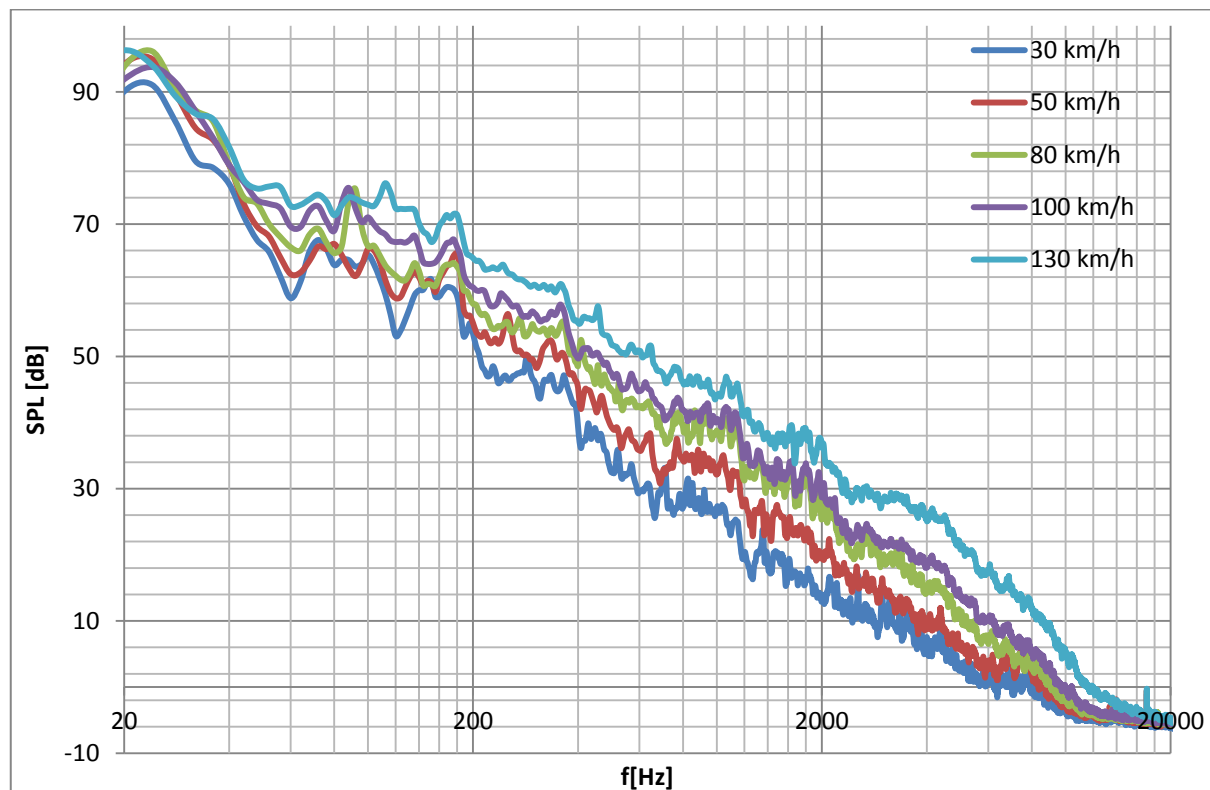
Obr. A.4: Průměr hladin akustického tlaku přes řady souběžné se směrem jízdy, měřeno při rychlosti 130 km/h

Příloha B

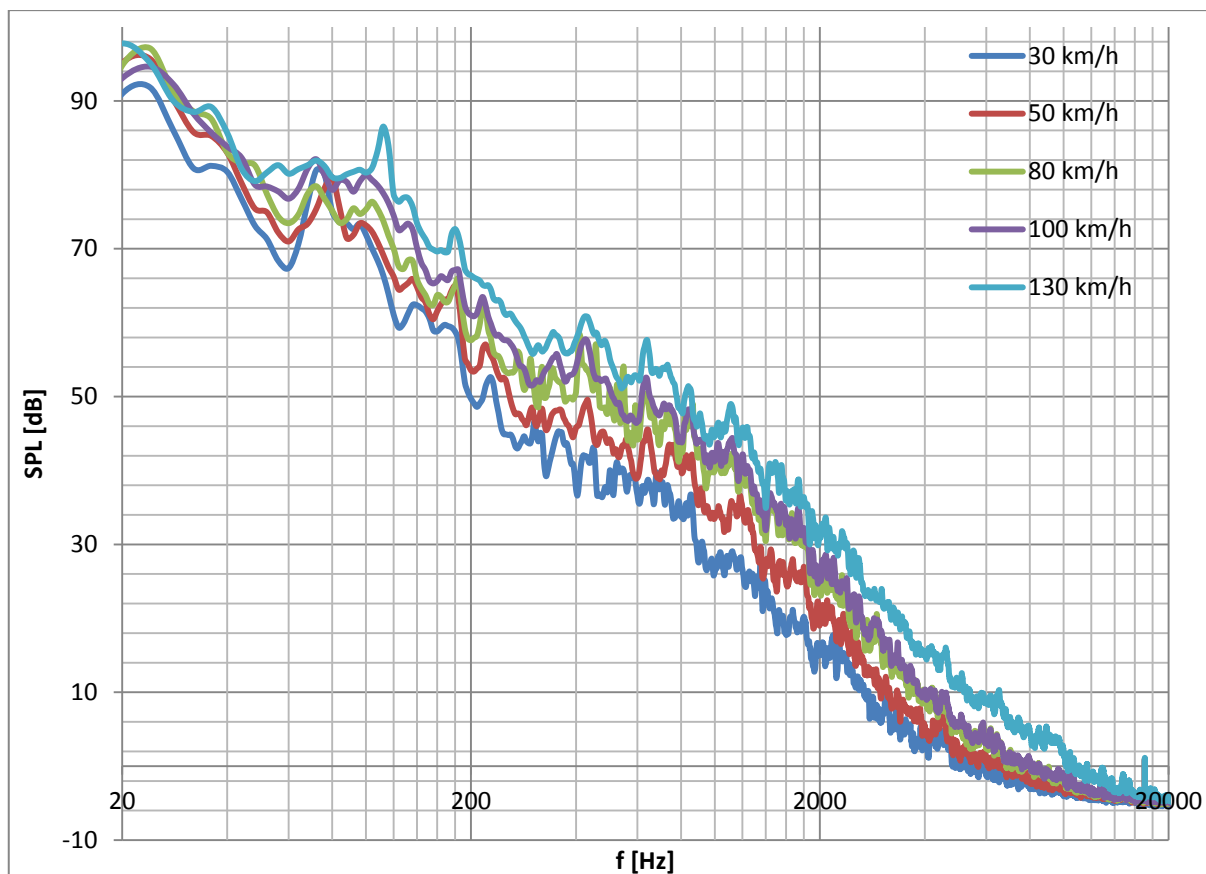
Hodnoty změřené za jízdy pomocí analyzátoru



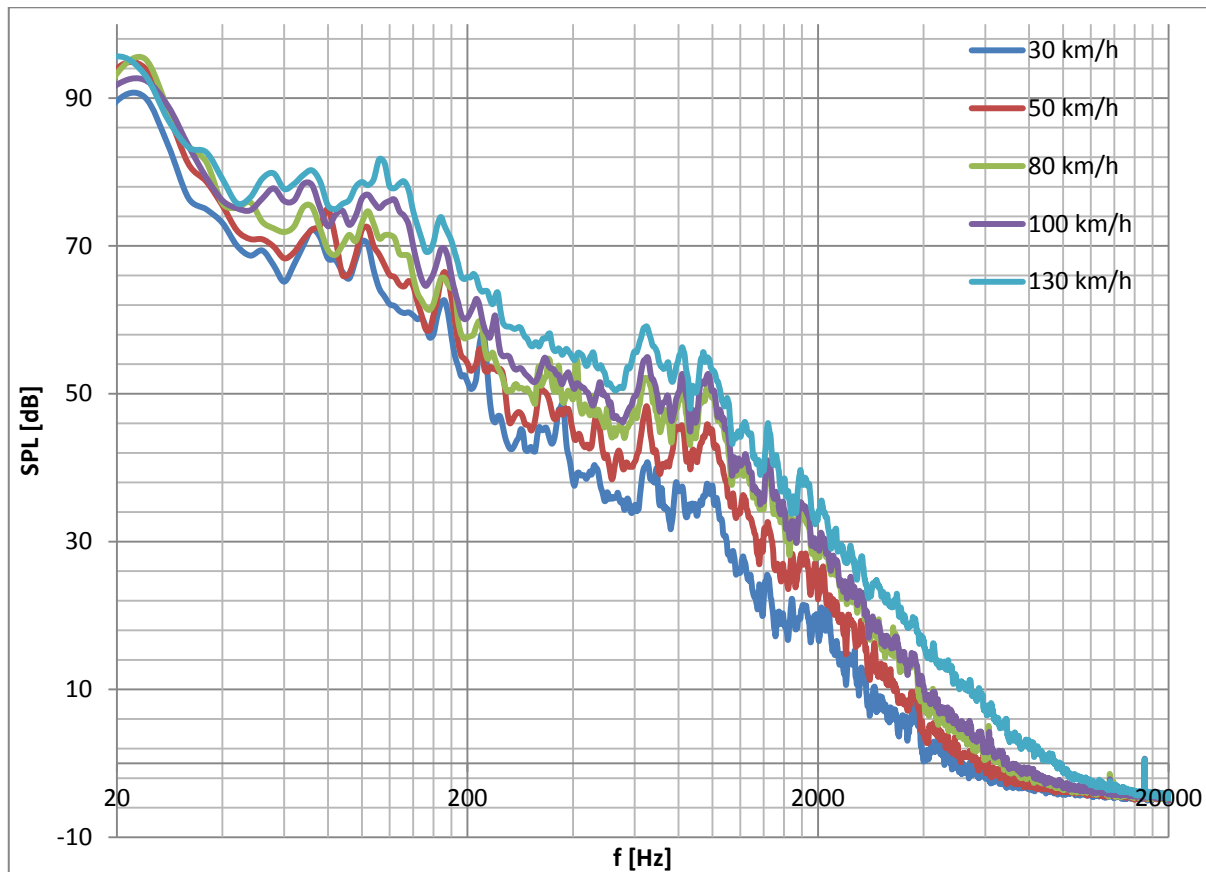
Obr. B.1: Hladiny akustického tlaku na pozici hlava levá, vypočtené pomocí FFT



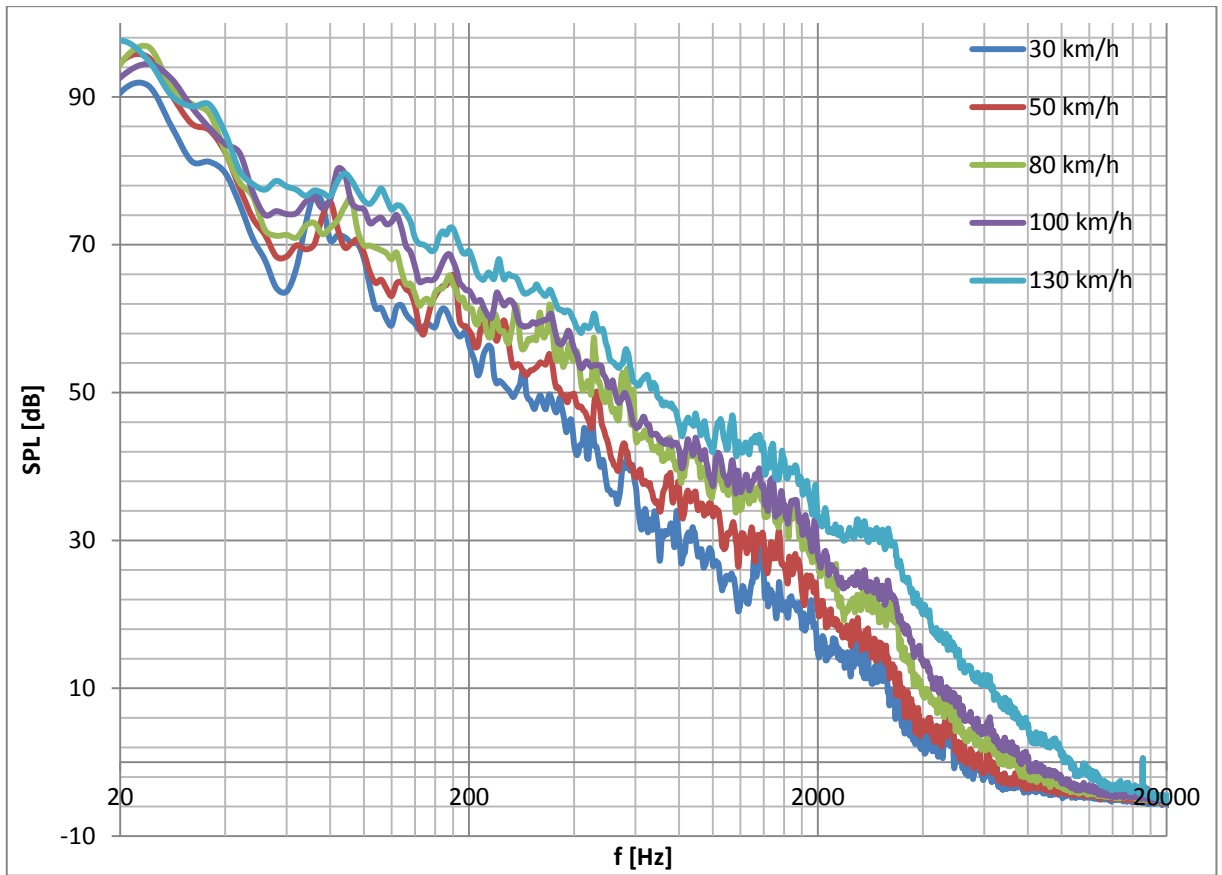
Obr. B.2: Hladiny akustického tlaku na pozici hlava pravá, vypočtené pomocí FFT



Obr. B.3: Hladiny akustického tlaku na pozici nohy přední, vypočtené pomocí FFT



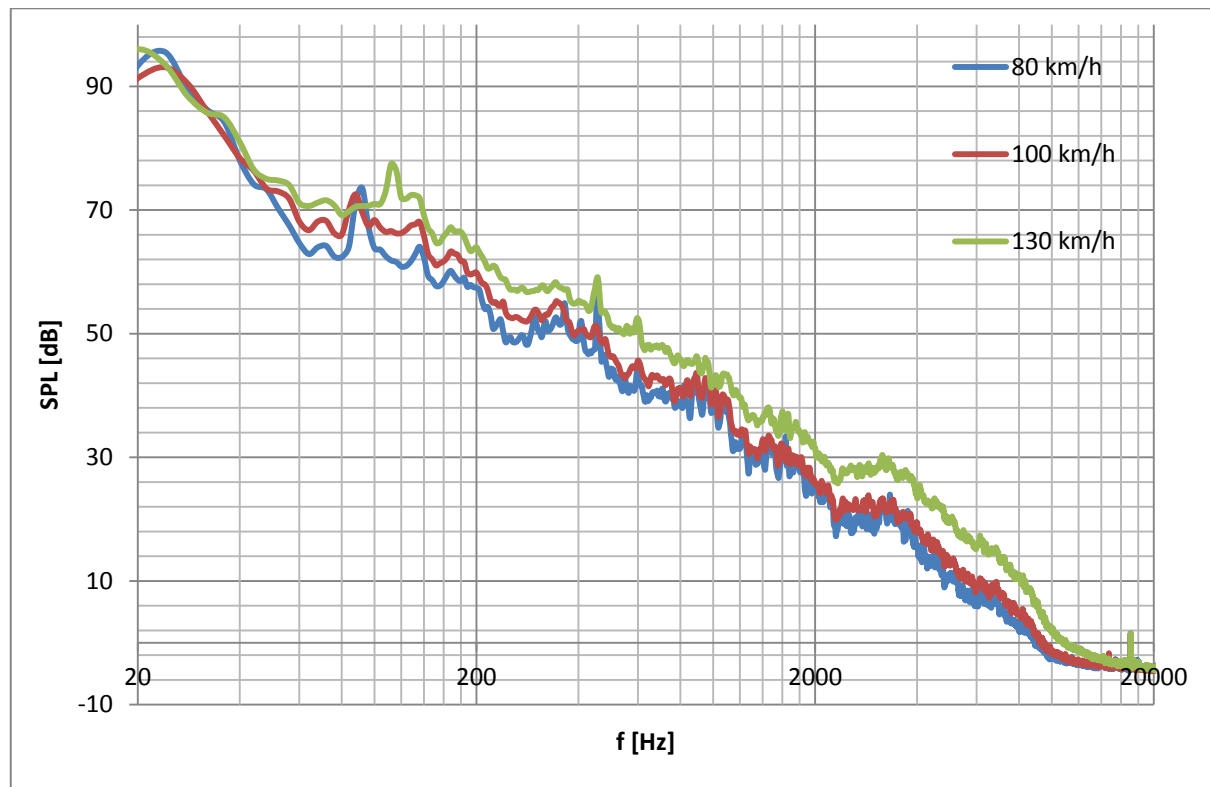
Obr. B.4: Hladiny akustického tlaku na pozici nohy zadní, vypočtené pomocí FFT



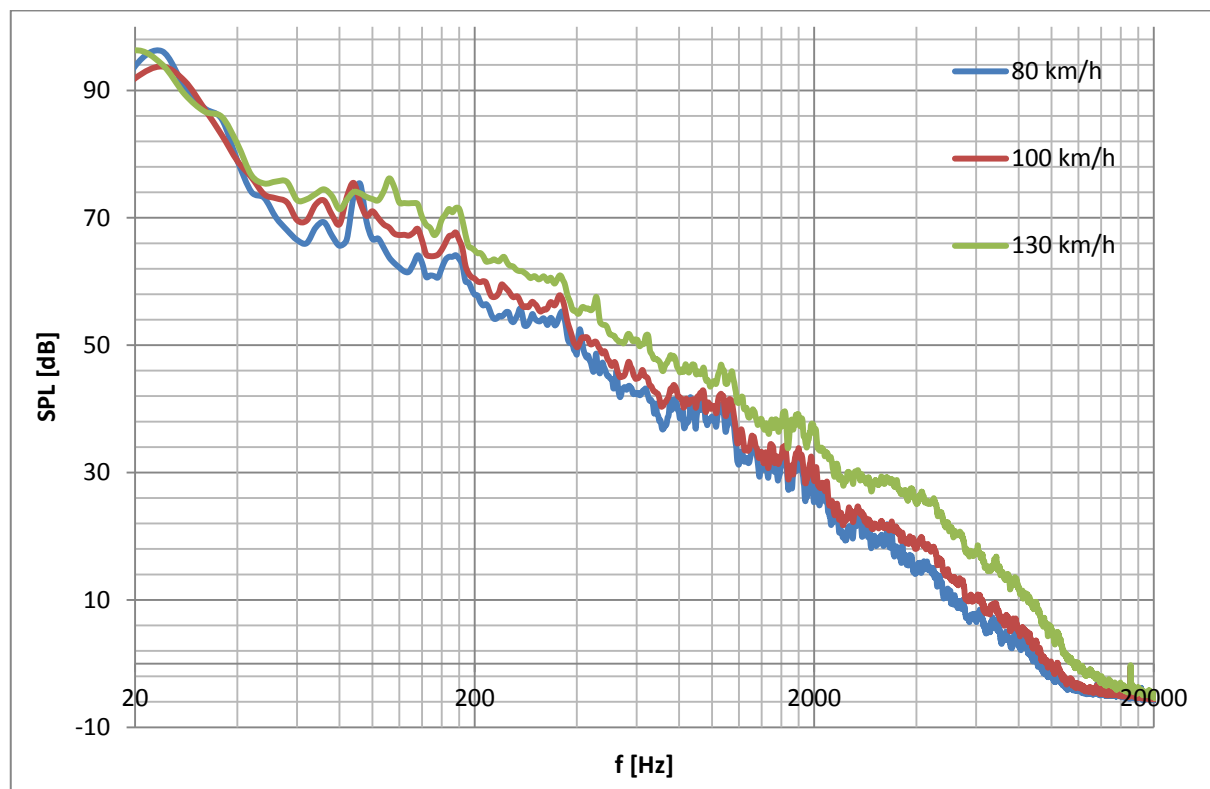
Obr. B.5: Hladiny akustického tlaku na pozici A sloupek, vypočtené pomocí FFT

Příloha C

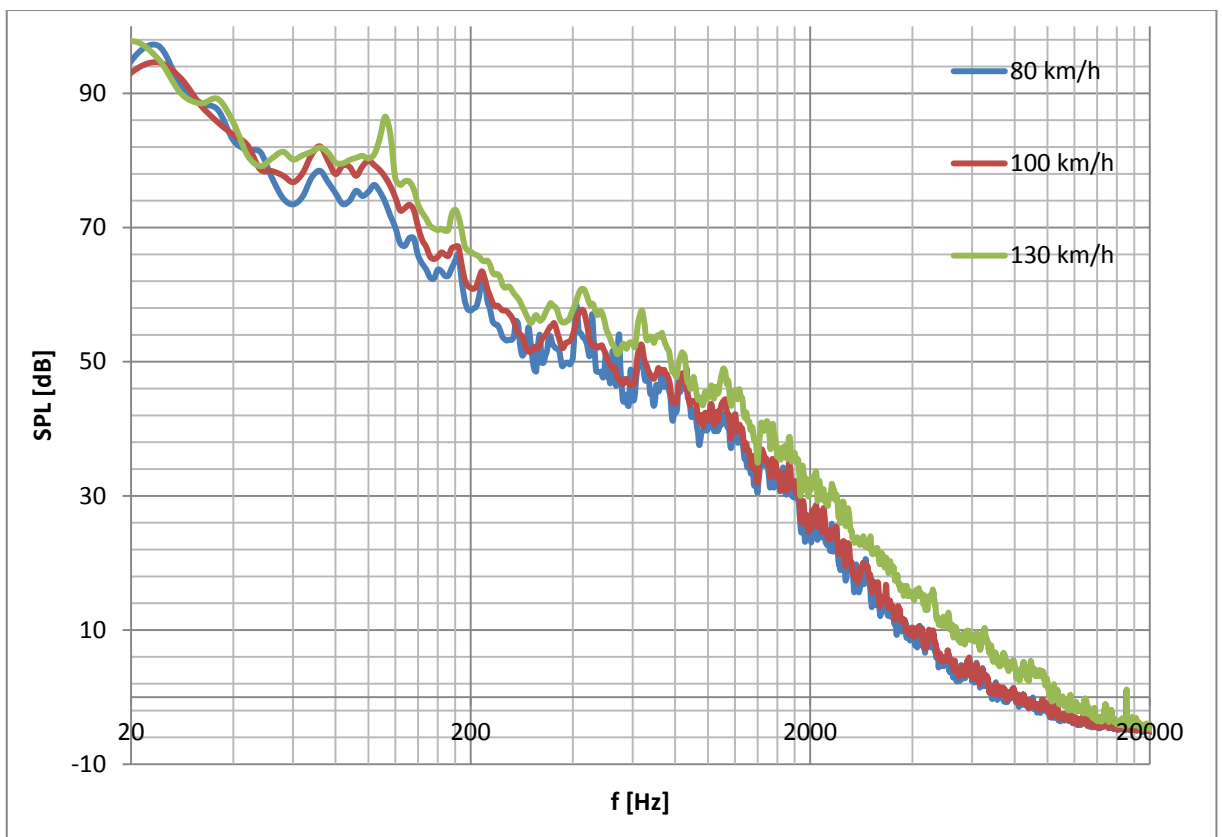
Hodnoty změřené při simulaci



Obr. C.1: Hladiny akustického tlaku na pozici hlava levá vypočtené pomocí FFT



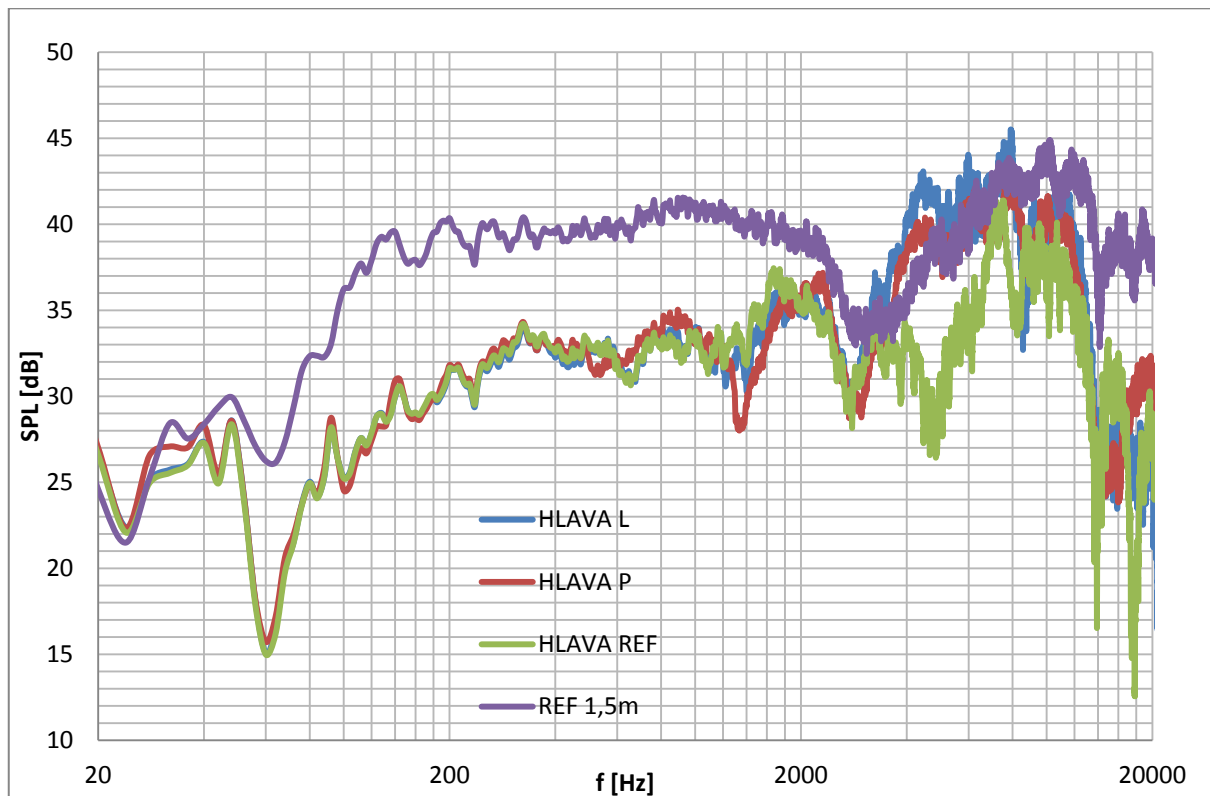
Obr. C.2: Hladiny akustického tlaku na pozici hlava pravá vypočtené pomocí FFT



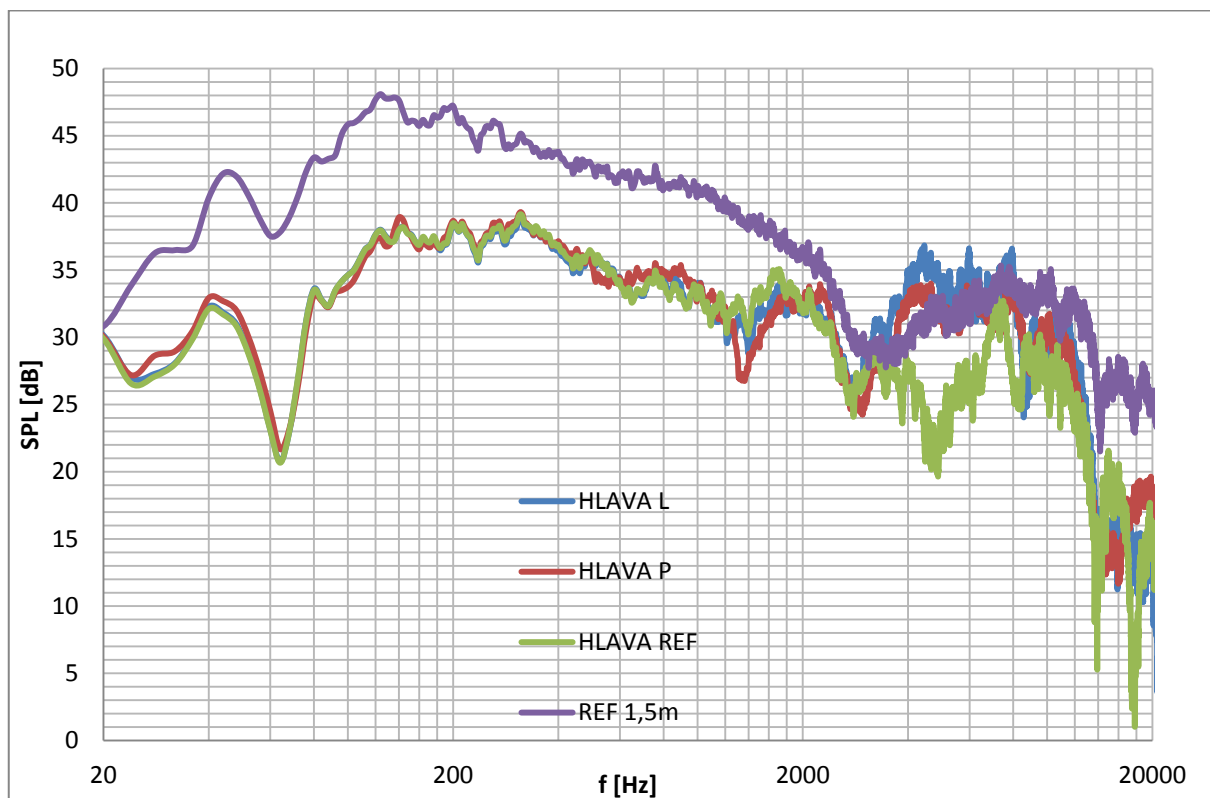
Obr. C.3: Hladiny akustického tlaku na pozici A sloupek, vypočtené pomocí FFT

Příloha D

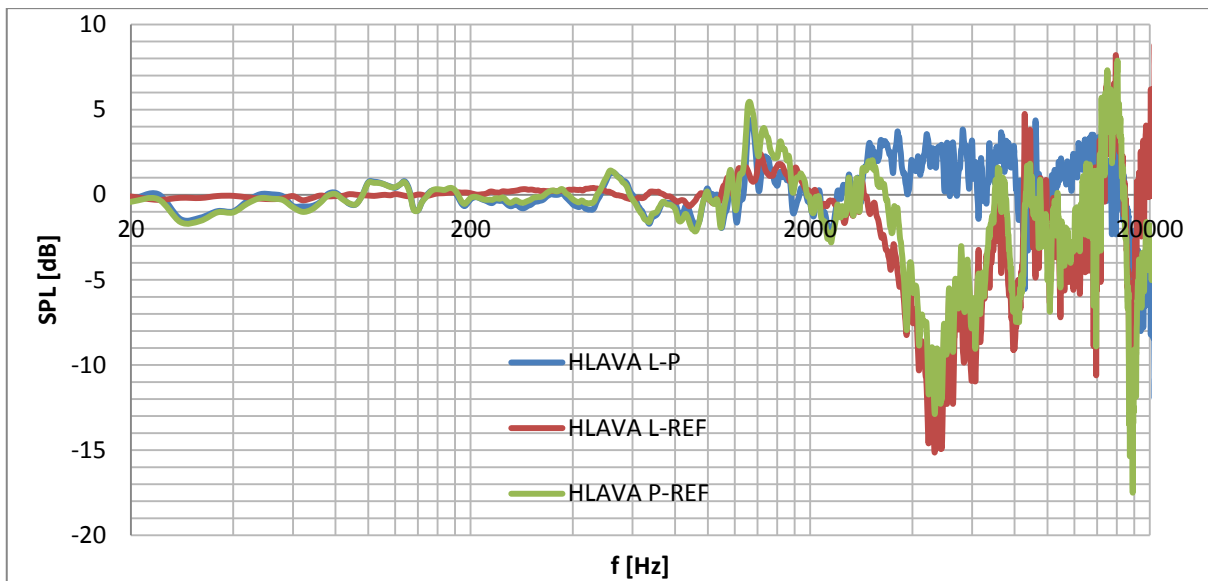
Naměřené hodnoty při kalibraci umělé hlavy



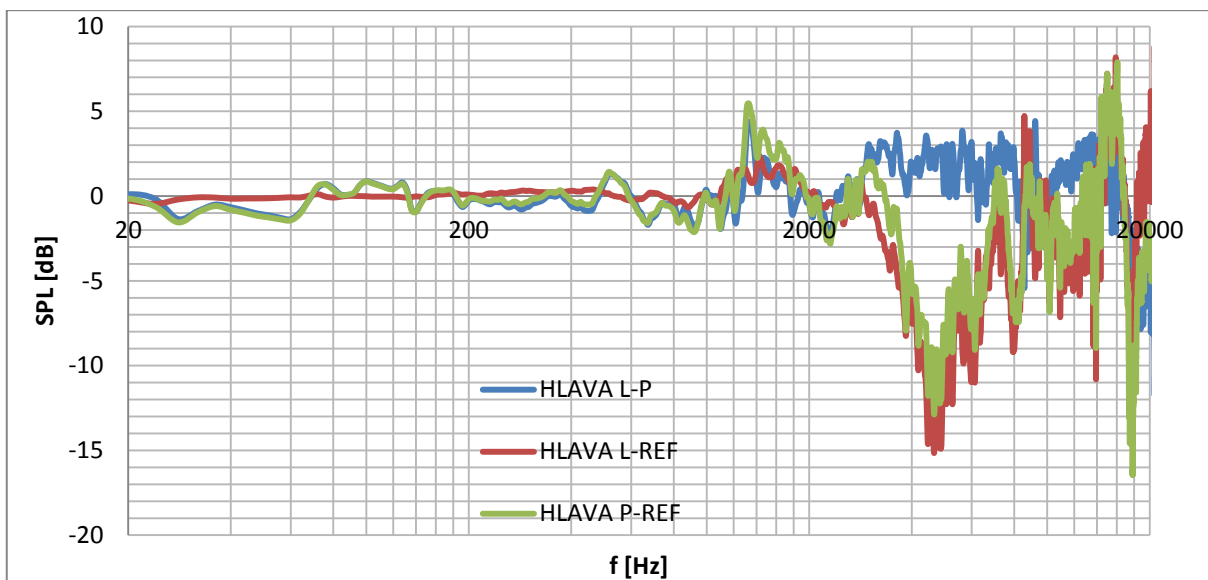
Obr. D.1: Hladiny akustického tlaku vypočtené pomocí FFT, zdroj hluku bílý šum,



Obr. D.2: Hladiny akustického tlaku vypočtené pomocí FFT, zdroj hluku růžový šum



Obr. D.3: Vypočtené hladiny akustického tlaku, zdroj hluku bílý šum



Obr. D.4: Vypočtené hladiny akustického tlaku, zdroj hluku růžový šum