

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

**Pokročilá metoda pro měření parametrů
vícekanálových ozvučovacích systémů**

Ing. Ladislav Zuzjak

disertační práce

k získání akademického titulu doktor v oboru Elektronika

Školitel: Ing. Oldřich Tureček, Ph.D.

Katedra technologií a měření

Plzeň 2018

UNIVERSITY OF WEST BOHEMIA
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING

**Advanced method for measurement of parameters
of multi-channel sound systems**

Ing. Ladislav Zuzjak

A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy
in the field of Electronics

Supervisor: Ing. Oldřich Tureček, Ph.D.
Department of Technologies and Measurement

Plzeň 2018

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě disertační práci zpracovanou na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, jejichž seznam je její součástí.

V Plzni dne 24. 09. 2018

.....

Anotace

Vícekanálové ozvučovací systémy jsou v současné době využívány v řadě různých aplikací, ať už pro ozvučování filmových nebo hudebních produkcí, případně ve specifických situacích například pro zvýšení kvality poslechu v členitém nebo akusticky nevhodném poslechovém prostoru. Samostatnou oblastí použití vícekanálových zvukových systémů je ozvučování interiéru automobilů. Specifickými vlastnostmi při ozvučení automobilu je relativně velká ozvučovaná plocha vzhledem ke vzdálenostem elektroakustických měničů od sebe i od posluchačů, omezené možnosti zástavby měničů a výrazný podíl vedlejších cest šíření zvuku jak odrazy zvuku, tak šířením vibrační částí konstrukce automobilu. Pro kompenzování těchto omezujících vlastností jsou vícekanálové ozvučovací systémy v automobilech vybaveny poměrně rozsáhlými možnostmi signálového zpracování, ať už jde o frekvenční a dynamické úpravy zvuku nebo nastavení zpoždění v jednotlivých kanálech systému. V souvislosti s rozvojem vícekanálových ozvučovacích systémů se rychle rozvíjí i odpovídající měřicí metody, které lze využít pro návrh a nastavování jednotlivých parametrů těchto zvukových systémů.

Tato disertační práce je věnována návrhu a realizaci měřicí metody, která je využitelná pro optimalizaci nastavení vícekanálových ozvučovacích systémů používaných v automobilech. Primárními měřenými parametry jsou frekvenční charakteristiky a frekvenční závislosti zpoždění jednotlivých kanálů těchto zvukových systémů ve specifických podmínkách akustického pole v automobilu.

Klíčová slova

Vícekanálové ozvučovací systémy; Frekvenční závislost zpoždění; Přenosové charakteristiky; Impulzní měření.

Anotation

Multi-channel sound systems are very often used in many areas. One of the significant area is music playback in the entertainment industry. A specific area is high-quality car sound system. At the present, the sound systems in the automotive are realized using multi-channel loudspeaker systems positioned at different distances of the listening positions. These different placements of the loudspeakers cause strong non-uniform frequency distribution of the sound field. The possibility of the placement of the loudspeakers into the optimal position in the car is limited and very often it is not possible. Thus, it is necessary to solve the consequences of the inappropriate position of the loudspeakers on the sound field using some sophisticated digital signal processing.

This thesis is focused on design of advanced method for measurement of parameters of multi-channel sound systems, such as frequency response, impulse response, time delay, etc. Based on these parameters the compensation of the non-uniform sound field can be performed. The method is demonstrated on a real measurement in the car cabin with subsequent determination of the parameters of multi-channel sound systems.

Key words

Multi-channel sound systems; Group delay; Transfer characteristics; Impulse measurement.

Obsah

1	Úvod	1
2	Cíle disertační práce	3
3	Stávající možnosti měření zvukových systémů	4
4	Vícekanálové ozvučovací systémy automobilů	6
4.1	Požadované frekvenční rozsahy	8
4.2	Požadované parametry při měření ozvučovacích systémů automobilů	8
5	Návrh měřicí metody	10
5.1	Pozice měřicích mikrofónů	12
5.2	Princip měřicí metody	14
5.3	Vícekanálové řešení měřicí metody	15
5.4	Přímé a vedlejší cesty šíření zvuku	16
5.5	Návrh technického řešení měřicí metody	18
5.6	Spektrální analýza – metoda FFT	18
5.7	Realizace experimentů pro ověření měřicí metody	19
5.7.1	Modelové měření ve volném akustickém poli	19
5.7.2	Modelové měření v automobilu	20
5.7.3	Měření odpovídající reálnému použití	21
6	Měření přenosových charakteristik	23
6.1	Měření v ustáleném stavu	23
6.2	Impulzní měření	24
6.2.1	Impulzní signály	24
6.2.2	Výběr vhodných skupin impulzních signálů	29
6.3	Měření přenosové charakteristiky	33
6.4	Skládání přenosových charakteristik získaných z impulzních odezev	37
7	Měření frekvenční závislosti zpoždění	39
7.1	Frekvenční závislost zpoždění získaná z fázové přenosové charakteristiky	39
7.2	Frekvenční závislost zpoždění získaná z korelační funkce	42
8	Možnosti identifikace vedlejších cesty šíření zvuku	46
9	Celková konfigurace a řešení měřicí metody	52
9.1	Ukázky použití měřicí metody	56
10	Závěr	59
11	Citovaná literatura	61

12 Práce disertanta	64
Seznam použitých symbolů a zkratk	66
Přílohy	68

1. Úvod

V současné době je v oblasti ozvučovací techniky patrný trend, kdy jsou ozvučovací systémy pro různé aplikace koncipovány jako vícekanálové. Rozvoj vícekanálových systémů je významný zejména v souvislosti s ozvučováním filmů, kde je s rostoucím počtem kanálů cílem vytvořit pro diváka/posluchače co nejlepší dojem příslušné lokalizace zvuků v prostoru. Právě v oblasti filmové produkce se postupně vyvíjely standardy Dolby Stereo, Dolby Surround a řada systémů ProLogic, DTS, případně SDDS.

Druhou oblastí, kde jsou používány vícekanálové ozvučovací systémy, je ozvučování využívající standardní stereofonní reprodukci, kdy je však ozvučovaný prostor rozsáhlý, případně velmi členitý nebo jiným způsobem komplikovaný. Pak je nutné pro dosažení rovnoměrnosti v úrovních i v kvalitě ozvučení celého prostoru použít větší množství kanálů, které slouží pro přehrávání standardního stereofonního signálu, ale jednotlivé elektroakustické měniče jsou vhodně rozmístěny a pokrývají pouze příslušné části prostoru. Nastavením parametrů pro frekvenční i dynamické úpravy zvuku v každém kanálu lze optimalizovat parametry ozvučení s ohledem jak na členitost prostoru, tak na požadované úrovně hlasitosti i v jeho jednotlivých částech. Zároveň lze do jisté míry korigovat i případné nedokonalosti v akustických vlastnostech ozvučovaného prostoru. Především s výrazným rozvojem digitální techniky i možností digitálních signálových procesorů se výrazně zvyšují i možnosti úprav signálu separátně v každém kanálu.

Při masovém rozšíření takových vícekanálových systémů se pak obvykle výrazně snižuje i jejich cena. Ta se pak stává obvykle nižší, než je cena vhodných akustických úprav ozvučovaných prostorů. V některých případech pak uživatelé a provozovatelé ozvučovacích systémů nabývají mylného dojmu, že lze například vhodnou koncepcí ozvučení zcela nahradit akustické úpravy prostorů. Naopak v některých specifických prostorech lze vhodné akustické úpravy řešit jen obtížně nebo dokonce vůbec (nádražní haly, velká nákupní centra, výrobní haly) a vícekanálové a vícebodové ozvučení je jedinou možností, jak zajistit přijatelný kompromis mezi finanční náročností, realizovatelností, dosaženými parametry a rovnoměrností ozvučení. Proto je dnes použití vícekanálových systémů i v akusticky nevhodných prostorech velice časté. Dochází zde k vícenásobným nežádoucím odrazům a mnohacestnému šíření zvuku, kdy některé z cest mohou být i důsledkem šíření souvisejících vibrací mechanickými konstrukcemi v okolí poslechového prostoru.

Specifické a z hlediska ozvučení značně problematické jsou i prostory, ve kterých jsou vzdálenosti od zdrojů zvuku k místům poslechu malé. Často pak dochází k poslechu v blízkém akustickém poli od jednotlivých zdrojů zvuku, případně jejich kombinací. Zcela specifická a problematická z hlediska schopnosti lokalizace zvuku v prostoru (ve stereobázi) je situace, kdy je poslech realizován v blízké vzdálenosti od elektroakustických měničů a vzdálenosti jednotlivých měničů, které reprodukuje zvuk v různých frekvenčních pásmech, jsou od posluchače různé. To je typické například pro ozvučení vnitřního prostoru kabiny automobilu. Zde je výrazný problém jednak s omezeným objemem kabiny automobilu, relativně velkou

ozvučovanou plochou vzhledem ke vzdálenostem jednotlivých měničů od sebe i od posluchačů a především s velmi omezenými možnostmi, které zástavbu jednotlivých měničů do kabiny charakterizují.

Obecně lze konstatovat, že rozvoj a využití vícekanálových ozvučovacích systémů sice přináší značné možnosti ve zvyšování kvality ozvučení různých, i značně komplikovaných poslechových prostorů, ale zároveň výrazně zvyšuje nároky na instalaci a nastavení parametrů těchto systémů.

V souvislosti s rozvojem vícekanálových ozvučovacích systémů se rychle rozvíjí i odpovídající měřicí metody, které lze využít pro zjednodušení při relativně komplikovaném nastavování vícekanálových zvukových systémů. Pracoviště Akustických laboratoří ZČU FEL dlouhodobě spolupracuje s řadou firem, které působí v oblasti návrhů a realizace ozvučovacích systémů. Kromě profesionálních zvukových systémů, které slouží například pro ozvučování veřejných hudebních produkcí, je těžiště práce ve specifických aplikacích, především ozvučení automobilů. V tomto směru pracoviště dlouhodobě spolupracuje s výrobcem automobilů ŠKODA Auto a.s., kdy jsou navrhovány, měřeny a následně optimalizovány parametry zvukových systémů určených pro zástavbu do automobilů různých cenových a kvalitativních tříd. V souvislosti s průběžně rostoucí složitostí ozvučovacích systémů (počty kanálů i možnosti nastavení) postupně stoupají nároky i na související měření akustických i elektrických parametrů jednotlivých částí zvukových systémů.

2. Cíle disertační práce

Disertační práce je věnována návrhu a realizaci měřicí metody, která je využitelná pro optimalizaci nastavení vícekanálových ozvučovacích systémů používaných v automobilech. Jedná se o prostředí, které je charakteristické různými typy akustických polí (blízké/vzdálené, volné/odrazové), kdy je dominantní vliv různé vzdálenosti elektroakustických měničů od posluchače, která může být i nižší, než vzdálenost jednotlivých měničů mezi sebou. Zcela běžná bývá i ne zcela optimální zástavba měničů vzhledem k pozici posluchače, především vzhledem ke směrovým charakteristikám vyzařování jednotlivých měničů a k tomu, že ozvučovaná plocha je relativně velká vzhledem k celkovým rozměrům vnitřního prostoru automobilu. Charakter zvukového pole v automobilu je značně ovlivněn i podílem vedlejších cest šíření zvuku, jak odrazy, tak vibracemi konstrukcí. Specifické bývá i hlukové pozadí, měřicí metoda musí být funkční i v automobilu stojícím ve venkovních prostorech zkušeben, ve kterých nastavování zvukových systémů probíhá.

Předpokládá se, že navržená měřicí metoda bude sloužit jako základ pro připravovaný systém automatizace celého procesu nastavování a optimalizace parametrů vícekanálových ozvučovacích systémů v automobilech.

Problematiku realizace požadované měřicí metody a cíle disertační práce lze stanovit následovně:

- Posoudit různé koncepce měřených ozvučovacích systémů v automobilech z hlediska jejich parametrů a parametrů jejich jednotlivých komponentů, stanovit požadované měřené parametry nutné pro nastavování těchto specifických vícekanálových zvukových systémů. Jako ozvučovací systém musí být uvažovaný celý elektro - akustický systém používaný v automobilu, včetně přehrávání signálů například pomocí přehrávače s SD paměťovou kartou nebo CD mechanikou v automobilu.
- Posoudit různé možnosti a měřicí metody pro měření jednotlivých vybraných parametrů zvukových systémů, stanovit limity těchto jednotlivých měřících metod především s ohledem na frekvenční rozsahy používaných kanálů/měničů, na dostupný dynamický rozsah a na hlukové pozadí.
- Navrhnout a realizovat měřicí metodu použitelnou ve specifickém prostředí automobilu (blízké/vzdálené, volné/odrazové akustické pole, různá vzdálenost měničů od posluchače i mezi sebou) pro stanovení parametrů jak vlastních elektroakustických měničů, tak i parametrů ostatních částí elektroakustického řetězce (zesilovače a další komponenty signálového zpracování). Posoudit možnosti detekce a identifikace vedlejších cest šíření zvuku, které jsou například důsledkem mechanických vibrací částí karosérie.
- Funkčnost měřicí metody včetně způsobu vyhodnocení jednotlivých parametrů experimentálně ověřit jednak na modelových situacích ve volném akustickém poli a jednak ve specifickém prostředí v automobilu.

3. Stávající možnosti měření zvukových systémů

V oblasti ozvučovací techniky a obecně elektroakustiky existuje celá řada souvisejících měřicích metod, případně kompletních komerčně dostupných nebo specificky použitelných systémů. Pro měření parametrů jednotlivých komponentů zvukových systémů existuje ucelená řada norem [1, 2], případně navazujících norem ITU. Tyto normy i odpovídající měřicí metody jsou orientované na měření dílčích komponentů zvukových systémů (elektroakustických měničů, zesilovačů a dalších prvků) a neposuzují zvukový systém jako celek.

Problematicke nastavení a měření ozvučovacích systémů jako celků jsou věnovány normy a standardy používané především při realizaci kinosálů, například [3–5]. Tato je velmi propracovaná a její řešení vychází z mnohaletých zkušeností řady odborných pracovišť, ale bývá omezená na specifická akustická řešení prostorů – obvykle kinosálů nebo koncertních sálů, kde jsou poměrně přesně dané limity parametrů prostorové akustiky. Zároveň jde ve většině případů o poslech ve vzdáleném akustickém poli od elektroakustických měničů. Naopak v těchto ozvučovacích systémech bývá častým limitujícím faktorem možnost nastavení jednotlivých kanálů pouze v 1/3-oktávních frekvenčních pásmech. Související měřicí metody vychází z měření frekvenčních závislostí hladin akustického tlaku v různých místech poslechu v ustáleném stavu, kdy měřicím signálem bývá bílý nebo růžový šum.

Specifickými případy je realizace ozvučení pomocí vícekanálových systémů pro produkci hudby, například při pořádání velkých koncertů. Prakticky každý výrobce těchto rozsáhlých zvukových systémů využívá vlastní nástroje, tedy měřicí metodu a související softwarovou aplikaci, která umožňuje vhodně konfigurovat a nastavit zvukový systém pro optimální použití v daném prostoru. Všechny tyto nástroje od renomovaných výrobců, například software *SoundVision* firmy *L-Acoustic*, *Resolution* od firmy *EAW* nebo *MApp XT* firmy *Meyer Sound* využívají podobnou filozofii a koncepci: Systémy jsou založené na databázi konkrétních používaných reprosoustav dané firmy, ve které jsou uvedeny jejich naměřené parametry ve volném akustickém poli a často i databází známých prostředí, například známých koncertních sálů, divadel a stadionů. Pro simulaci akustických parametrů prostorů je používána metoda odrazu paprsků (*Ray-Trace*), což neřeší pásmo nejnižších frekvencí. Při simulaci vyzařování konkrétně použitých reprosoustav v daném prostředí se jako primární parametr prostorové akustiky využívá frekvenční závislost doby dozvuku, která je měřena předem při instalaci zvukového systému. Rovnoměrnost a kvalita zvukového pole v oblasti posluchačů jsou ověřovány v různých měřicích místech při měření frekvenčních závislostí hladin akustického tlaku, kdy jsou využívány buď měřicí metody založené na šumových signálech, nebo impulsních měřicích metod. Na základě výsledků měření i využití databází konkrétních elektroakustických měničů umožňuje návrhový systém provádět simulace, které pomohou uživateli zvolit správnou sestavu reprosoustav, jejich správné rozmístění v prostoru a navrhnout částečné signálové úpravy pro základní nastavení celého ozvučovacího řetězce. Použití těchto zvukových systémů se předpokládá ve vzdáleném akustickém poli v definovaných podmínkách a parametrech prostorové akustiky.

Pro měření zvukových systémů ve specifickém prostředí, jako je ozvučení prostoru kabiny osobního automobilu, již takto komplexní systémy pro měření a nastavená parametrů ozvučovacího řetězce nejsou často dostupné. Na trhu existují dostupné nástroje jako například *BitTune* od společnosti *Audison*, který v kombinaci s vlastním výkonovým zesilovačem a DSP jednotkou tvoří systém, ve kterém lze některé parametry měřit a nastavit. Často se jedná jen o nastavení frekvenčních ekvalizérů s filtry vycházející z 1/3-oktávových frekvenčních pásem [6]. Jako další komerčně dostupné systémy využitelné pro měření lze považovat různé modifikace mikrofonních polí a souvisejících měřicích metod, které obvykle vychází z metod pro lokalizaci zdrojů zvuků, tedy různé použití mikrofonních polí [7, 8]. Jako další možnost měření a nastavení je použití HATS (*Head and Torso Simulator* – umělá hlava). To je možnost vhodná hlavně z hlediska psychoakustického hodnocení zvukových systémů, případně hodnocení komunikačních systémů [9]. V poslední době je patrná také snaha o virtuální vývoj zvukových systémů v automobilech, tedy snaha o navržení optimálního rozmístění a vlastností měničů. To lze s ohledem na takřka nemožné následné úpravy považovat za velice důležité a výhodné [10, 11].

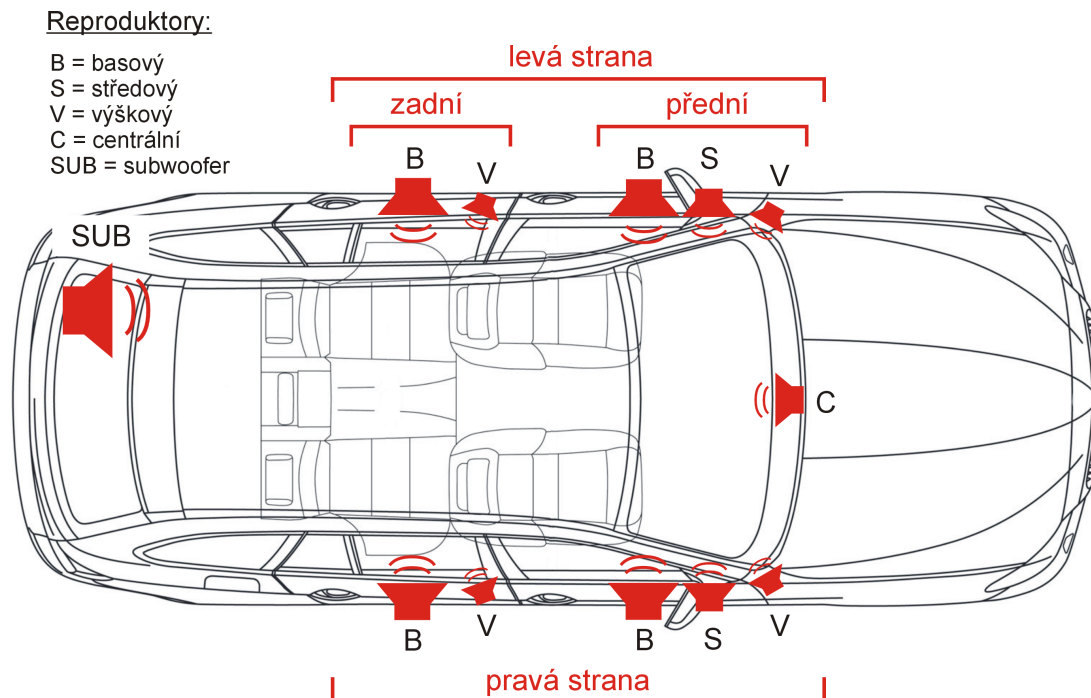
Samostatnou oblastí ozvučovacích systémů v automobilech jsou jednoúčelové systémy pro demonstraci nových koncepčních řešení, například použití velkého množství měničů, které jsou samostatně buzené a řízené, kdy je možné zvolit a měnit směrovost vyzařování takto navržené elektroakustické soustavy. Tato řešení ale nepřesahují rámec demonstrace konceptu [12]. Výrazně jednodušší a v praxi používanou variantou je zástavba reproduktorů do hlavových opěrek sedadel posádky [13].

Při měření charakteru akustického pole v kabině automobilu jsou často využívána mikrofonní pole různého provedení, například [14]. Další používaná možnost, je získání představy o šíření zvukového pole v kabině automobilu v závislosti na čase, jako jedna z používaných metod je TDOA (*Time Direct of Arrival*), což je část metody používané v lokalizaci akustických zdrojů zvuků v akustických kamerách [15]. Z následné znalosti akustického pole v kabině automobilu je možné provádět nastavení zvukového systému a také například preferenci míst zvukového systému (řidič, přední sedadla) [16, 17].

Bohužel všechny uvedené systémy jsou obvykle komerčně nedostupné a firmy neuvádějí ani žádné konkrétní informace o používaných měřicích metodách a metodách vyhodnocení, jejich přesnosti, případně omezení.

4. Vícekanálové ozvučovací systémy automobilů

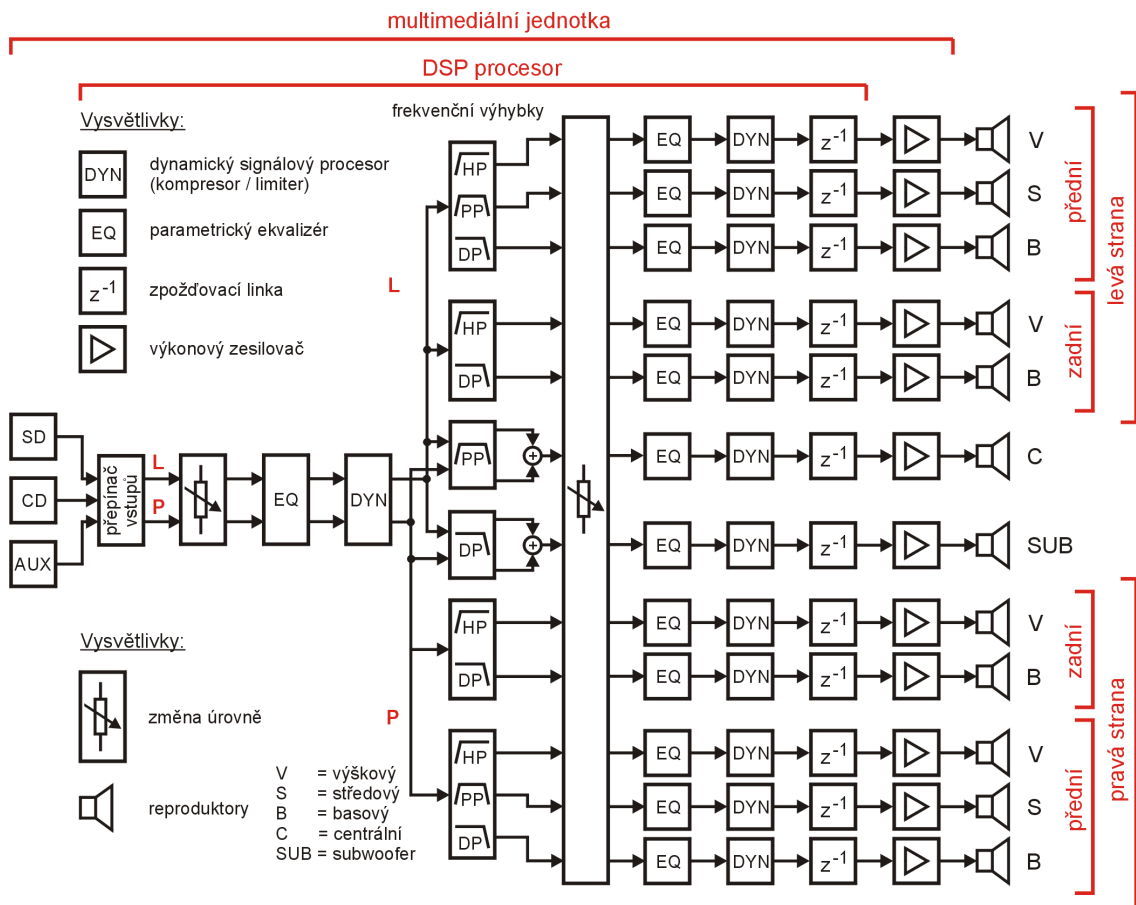
Ozvučení automobilů je řešeno s ohledem na jejich cenovou a kvalitativní třídu, ale ideově je zpracování signálu napříč těmito třídami obdobné. Základem obvykle bývá multimediální jednotka, která obsahuje jak přehrávače signálu (SD karty, CD mechaniku, případně jiné zdroje signálu), DSP procesor, ve kterém je softwarově řešeno celé signálové zpracování (obvykle nazývané *SignalFlow*) a výkonové zesilovače pracující ve třídě AB nebo D. Cenové třídy automobilu nebo příplatkové výbavě obvykle odpovídá počet kanálů zvukového systému. Nejlevnější systémy mohou být pouze dvoukanálové a ozvučení je realizováno dvěma širokopásmovými reproduktory umístěnými v předních dveřích vozu, častější bývá vícekanálové řešení, kdy stereofonní signál bývá reprodukován nezávislými kanály pro přední i zadní dveře zvlášť, případně reprodukcí systém může být vícepásmový, kdy je frekvenční výhybka pro jednotlivé reproduktory (basový/výškový) řešena buď pasivně (sériově řazený kondenzátor u výškového reproduktoru) nebo aktivně, kdy jsou využity samostatné kanály pro basový a výškový, případně i středový reproduktor. V příplatkových ozvučovacích systémech nebo ve výbavách dražších modelů automobilů mohou být použity i samostatné středové kanály, kanál pro reprodukci nejnižších frekvencí (*Subwoofer*), centrální kanál (*Center*), případně různé efektové kanály, například pro simulaci lepšího prostorového rozložení zvuku (*Surround*). S tím samozřejmě výrazně narůstá počet kanálů ozvučovacího systému, ale i možnosti jeho nastavení pro optimální reprodukci. Schématické znázornění poměrně často využívané varianty vícekanálového zvukového systému je na obr. 4.1.



Obr. 4.1: Schématické znázornění často využívané varianty vícekanálového zvukového systému v automobilu.

4 Vícekanálové ozvučovací systémy automobilů

I když je variabilita v počtu kanálů v závislosti na cenové i kvalitativní třídě vozu velmi rozdílná, ideově je signálové zpracování v současné době ve všech systémech obdobné. I v nejlevnějších systémech jsou využívány DSP procesory s řadou možností zpracování signálu, od frekvenční ekvalizace až po různé dynamické úpravy (kompresor/limiter) a změnu zpoždění a nastavení úrovní v jednotlivých kanálech. Obvykle se tím kompenzují vlastnosti neideální zástavby reproduktorů, případně použití měničů, které mohou být výkonově méně dimenzované, konstrukčně lehčí a jednodušší. Zjednodušené blokové schéma signálového zpracování zvukového systému z obr. 4.1 je uvedené na obr. 4.2.



Obr. 4.2: Zjednodušené blokové schéma signálového zpracování zvukového systému.

4.1. Požadované frekvenční rozsahy

Zcela zásadní pro návrh měřicí metody je stanovení frekvenčního rozsahu, ve kterém budou jednotlivé sledované parametry udávány. Je neefektivní (a ve specifickém prostoru kabiny automobilu prakticky nerealizovatelné) provádět s dostatečnou přesností měření všech parametrů v plném frekvenčním rozsahu 20 Hz – 20 kHz na všech kanálech, zvláště při uvažovaném hlukovém pozadí automobilu stojícího ve venkovním prostoru zkušebny. Požadavky na šířky pásma při měření jednotlivých kanálů vychází z frekvenčního rozsahu jednotlivých kanálů ozvučovacího systému. Dlouhodobým měřením parametrů reproduktorů v různých typech a cenových kategoriích automobilů byly stanovené frekvenční rozsahy jednotlivých měničů (kanálů), které jsou dostačující pro dosažení požadované kvality reprodukce. Náhled na některé zjištěné frekvenční závislosti citlivosti jednotlivých typů měničů jsou uvedené v Příloze 1, souhrnně pak jsou jednotlivá frekvenční pásma uvedena v tab. 4.1. Na základě těchto zjištěných frekvenčních pásem jsou pak stanovená rozšířená frekvenční pásma (tab. 4.1) pro jednotlivé kanály jako požadavek na měření metodu. To je klíčové pro definici vhodných měřicích signálů a zajištění dostatečného odstupu od hlukového pozadí.

Tab. 4.1: Frekvenční pásma jednotlivých kanálů a požadovaná frekvenční pásma pro měření.

Měnič	Frekvenční pásma jednotlivých měničů/kanálů			Frekvenční pásma jednotlivých měničů; požadavek na měření
	Systém reproduktorů ve dveřích			
	1-pásmový	2-pásmový	3-pásmový	
Širokopásmový	100 Hz – 10 kHz	100 Hz – 10 kHz	–	80 Hz – 12 kHz
Basový	–	40 Hz – 3 kHz	40 Hz – 1 kHz	35 Hz – 5 kHz
Středový	–	–	200 Hz – 12 kHz	100 Hz – 15 kHz
Výškový	–	1,5 kHz – 18 kHz	1,5 kHz – 18 kHz	1 kHz – 20 kHz
Centrální	–	200 Hz – 12 kHz	200 Hz – 12 kHz	100 Hz – 15 kHz
Subwoofer	–	35 Hz – 150 Hz	35 Hz – 150 Hz	35 Hz – 200 Hz

4.2. Požadované parametry při měření ozvučovacích systémů automobilů

Stanovení parametrů, které je podstatné znát při nastavování vícekanálových zvukových systémů této koncepce a složitosti, je zcela podstatné při návrhu a realizaci související měřicí metody. Výsledné nastavení se vždy ověřuje subjektivním poslechem řady zvukových nahrávek na všech sedadlech automobilu, kdy poslech obvykle provádí řada lidí. I související měření by z tohoto důvodu mělo probíhat na všech místech v automobilu, v některých případech jsou stanoveny priority poslechu daného nastavení na konkrétních sedadlech (například nastavení optimalizované pro poslech na místě řidiče nebo na obou předních sedadlech).

Vzhledem k tomu, že ozvučovací systém je v automobilu vždy nastavován ve stejné konfiguraci, v jaké je standardně provozovaný, předpokládá se i generování měřicích signálů z médií, která slouží pro přehrávání běžných nahrávek (hudby). K dispozici obvykle bývá CD mechanika nebo SD karty, což výrazně limituje možnosti navrhované měřicí metody, především z důvodu možné synchronizace měření s generováním měřicích signálů. Způsob práce při nastavování zvukového systému reflektuje poměrně striktně danou koncepci pro každý typ vozu. Veškeré dostupné signálové zpracování je řešeno v DSP procesoru a vhodným uživatelským rozhraním lze nastavovat obvykle následující parametry:

- parametrické filtry pro frekvenční ekvalizaci (různé počty a typy podle konkrétní konfigurace zvukového systému),
- kompresory dynamiky (různé parametry – časy, prahové úrovně, kompresní poměry),
- omezovače výstupního signálu – limitery (časy, prahové úrovně),
- zpoždění signálu v jednotlivých kanálech,
- úrovně signálu v jednotlivých kanálech.

Přehrávač, DSP procesor i výkonové zesilovače jsou součástí multimediální jednotky, ke které lze přistupovat pouze jako k jednomu celku, bez možnosti přístupu k jednotlivým částem. Tím i parametry jednotlivých kanálů lze sice popsat řadou parametrů (amplitudová a fázová charakteristika, zesílení, zpoždění), ale v automobilu lze jejich měření provést jen velmi obtížně. Předpokladem je měření ve vybraných měřicích místech v kabině automobilu pomocí měřicího mikrofonu, kdy budicí signál bude přehráván z přehrávače multimediální jednotky a všechny potřebné parametry, jak multimediální jednotky, tak elektroakustických měničů (reproduktorů) i charakter akustického pole budou zjišťovány z výsledků tohoto měření.

Parametry zcela zásadní pro nastavení ozvučovacího systému, jak bylo definováno výše, jsou:

- $A(f)$ – relativní amplitudová frekvenční charakteristika stanovená vzhledem k úrovni na zvolené referenční frekvenci. Je potřeba zjišťovat jak pro jednotlivé kanály, tak pro jejich zvolené kombinace,
- $L(f)$ – frekvenční závislost hladiny akustického tlaku pro jednotlivé kanály nebo jejich zvolené kombinace měřená ve zvoleném měřicím místě,
- $\tau_s(f)$ – frekvenční závislost zpoždění jednotlivých kanálů vzhledem ke zvolenému měřicímu místu.

Frekvenční rozsah sledovaných parametrů je závislý na měřených kanálech a je uvedený v tab. 4.1.

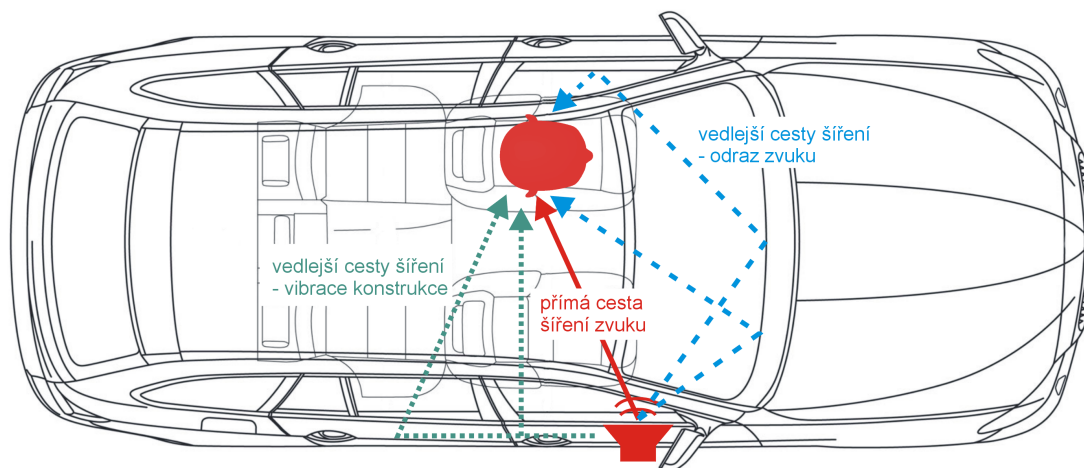
5. Návrh měřicí metody

Při návrhu měřicí metody, která by měla poskytovat podklady pro nastavení zvukového systému automobilu (kap. 4.2), je třeba zohlednit charakter zvukového pole v automobilu, možné cesty šíření zvuku od reproduktorů k posluchači i reálné možnosti použití celého měřicího systému v praxi.

Při šíření zvuku v prostoru automobilu je nutné zohlednit následující cesty šíření zvuku:

- přímá cesta šíření zvuku od elektroakustického měniče k měřicímu mikrofonu (posluchači). Zde jsou promítnuty vlastnosti měniče i celého signálového zpracování v příslušném kanálu a případně vliv zástavby měniče do dveří automobilu,
- vedlejší cesty šíření zvuku odrazy – odrazy zvuku prvního i vyšších řádů od jednotlivých odrazivých ploch v interiéru automobilu,
- vedlejší cesty šíření jako důsledek šíření vibrací částí konstrukce automobilu (karosérie a jiných konstrukčních celků).

Schematicky jsou jednotlivé situace pro jeden reproduktor naznačeny na obr. 5.1. Vedlejší cesty šíření odrazy zvuku i vibracemi není obvykle nutné od sebe odlišovat, protože při nastavování parametrů zvukového systému není možné ovlivňovat šíření každým způsobem zvlášť.



Obr. 5.1: Schematické znázornění různých cest šíření zvuku.

Měřicí metoda je navržena jako vícekanálová, kdy jednotlivé měřicí mikrofony mohou být umístěny buď ve vhodně uspořádaném mikrofonním poli (finančně výrazně náročnější řešení) nebo v jednodušší konfiguraci a menším počtu kanálů, kdy jsou mikrofony upevněné například k hlavové opěrce a jednoduše lze využívat polohování sedadla. Zvolené pozice mikrofonů odpovídají předpokládanému pohybu posluchače v místě poslechu, tedy zohledňují možnost nastavení sedadla a předpokládaný pohyb hlavy (natočení hlavy posluchače). Volba měřicí sítě a pozic mikrofonů je podrobněji popsána v kap. 5.1.

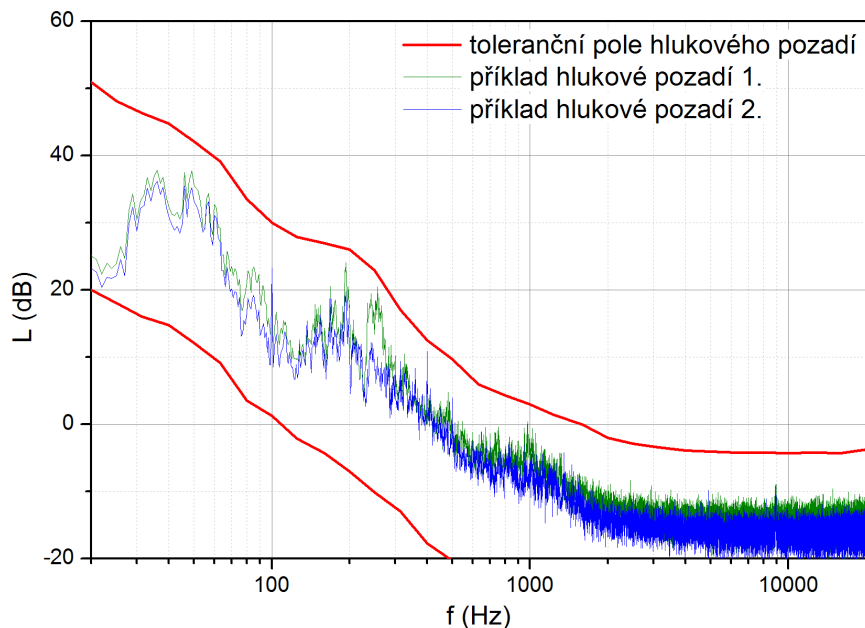
Aby bylo možné co nejjednodušším způsobem určit požadované parametry jednotlivých kanálů (kap. 4.2), je optimální zvolit měření pomocí impulsních signálů. S výhodou lze použít měření impulsních odezev jednotlivých kanálů zvukového systému i jejich kombinací, ze kterých je možné získat amplitudové frekvenční charakteristiky $A(f)$, tomu odpovídající frekvenční závislosti hladin akustického tlaku $L(f)$ i frekvenční závislost zpoždění $\tau_s(f)$ ze znalosti fázových frekvenčních charakteristik.

U impulsních měřicích metod se obecně ukazuje jako problematické zajištění dostatečného odstupu měřeného signálu od hlukového pozadí, případně šumu, hlavně s ohledem na požadavek měření v takřka celém slyšitelném pásmu. Se zvyšující se šířkou pásma budícího impulzního signálu klesá množství energie, které lze efektivně přes měřený systém reprodukovat a následně snímat měřicím mikrofonom s dostatečným odstupem od hluku pozadí. Částečné zjednodušení může přinést požadavek na užší frekvenční pásma jednotlivých kanálů (kap. 4.1).

Dlouhodobým měřením hlukového pozadí v kabině automobilu při jednotlivých zkouškách bylo stanoveno frekvenční rozložení hluku pozadí jako jedno z kritérií pro použitelnost navržené měřicí metody i v automobilu stojícím ve venkovních prostorech zkušeben, ve kterých měření obvykle probíhá (viz obr. 5.2).

Měřicí metoda je koncipována tak, aby umožňovala získání následujících informací a parametrů vhodných pro nastavování zvukových systémů:

- určení skutečné pozice elektroakustických měničů vůči posluchači z měření zpoždění,
- určení rozložení akustického pole, které je vytvořeno vícekanálovým uspořádáním měničů,
- měření parametrů elektroakustických měničů v jednotlivých kanálech poslechového systému (především frekvenčních charakteristik), včetně vlivu jejich zástavby do dveří automobilu,
- sledování vlivu vedlejších cest šíření zvuku vznikajících odrazy zvuku od překážek v prostoru a šířením vibrací konstrukce automobilu.

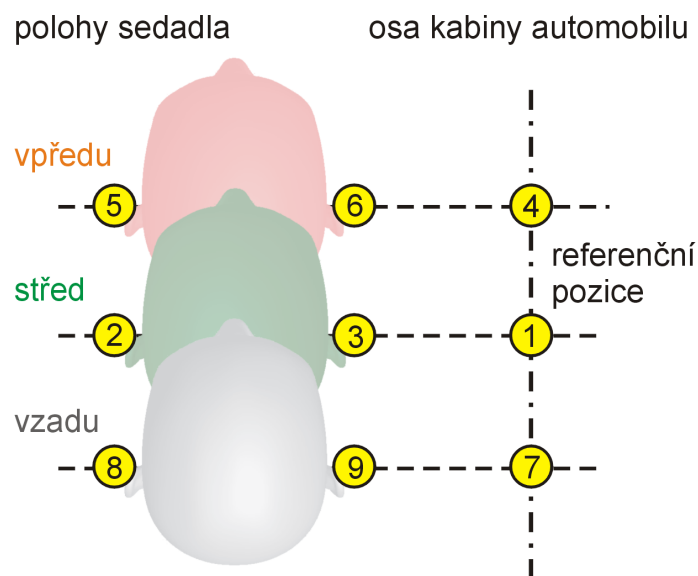


Obr. 5.2: Dlouhodobé frekvenční rozložení hlukového pozadí v kabině automobilu.

5.1. Pozice měřicích mikrofonů

Volba měřicích míst vychází z požadavků na minimální počet měřicích míst požadovaných při nastavování zvukových systémů automobilu. Při posuzování kvality poslechu provádí poslech řada osob různého vzrůstu v různě nastavených polohách sedadla. Extrémními případy jsou pozice sedadla zcela vpředu, zcela vzadu a jako referenční pozice je uvažována střední poloha nastavení sedadla. Pozice nastavení sedadla se samozřejmě liší v závislosti na modelu a rozměrech automobilu, ale rozdíly nejsou nijak zvláště zásadní. Podrobnosti o rozměrech interiérů automobilů různých kategorií lze nalézt například v [18].

Naopak podstatná je pozice měřicích mikrofonů vzhledem k poloze sedící osoby. Jako nejjednodušší konfigurace byla zvolena poloha sedící osoby ve třech polohách sedadla – zcela vpředu, střední a zcela vzadu, kdy měřicí mikrofony jsou umístěny v poloze uší sedící osoby. Poloha uší byla stanovena na základě standardizované pozice torza s umělou hlavou (HATS – *Head and Torso Simulator*) dle normy [19], vybavené umělými ušima dle [20]. Mikrofony jsou umístěny do pozice ERP (*Ear Reference Point*) dle [20] a odpovídají tak v podstatě pozici okraje vnějších uší posluchače. Ke každé poloze sedadla je ještě zvolené měřicí místo v ose kabiny automobilu, z důvodu měření parametrů zvukového systému při nastavování optimálního poslechu symetricky pro sedadla na levé i pravé straně automobilu. Náčrtek s pozicemi a číslováním měřicích mikrofonů je na obr. 5.3.



Obr. 5.3: Náčrtek s pozicemi a číslováním měřicích mikrofonů.

Pro jednoduchost je uchycení mikrofonů realizováno pomocí polohovacího přípravku upevněného na hlavovou opěrku sedadla (viz obr. 5.4).



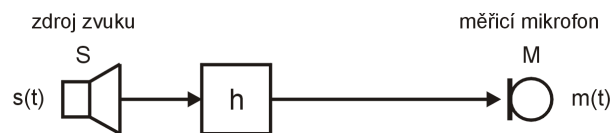
Obr. 5.4: Umístění měřicích mikrofonů v kabině automobilu.

Jako měřicí mikrofony jsou použity standardní měřicí mikrofony třídy 1, je nutné použít mikrofony pro difúzní akustické pole, tedy s kulovou směrovou charakteristikou. Ověřené jsou typy Brüel&Kjær 4943 nebo GRAS 40PH. [21]

5.2. Princip měřicí metody

Princip měřicí metody spočívá v generování vhodného impulzního signálu, který je postupně vyzařovaný jednotlivými elektroakustickými měniči poslechového systému a následným snímáním jejich impulzní odezvy pomocí měřicích mikrofonů v poslechovém prostoru. Z impulzních odezev je možné vyhodnotit všechny požadované parametry (kap. 4.2), i když s řadou omezení, která jsou daná především charakterem akustického pole, hlukovým pozadím a požadovaným frekvenčním rozsahem. Rozmístění měřicích mikrofonů odpovídá v nejjednodušším případě situaci na obr. 5.4 (kap. 5.1). V případě požadavků na prostorové průměrování lze počty měřicích mikrofonů pochopitelně zvyšovat, ale za cenu výrazného zvyšování ceny celého měřicího řetězce.

Zjednodušená situace pro jeden zdroj signálu S a jeden měřicí mikrofon M je znázorněná na obr. 5.5.



Obr. 5.5: Schéma zjednodušené situace přenosu signálu při uvažování jednoho zdroje signálu a jednoho měřicího mikrofonu.

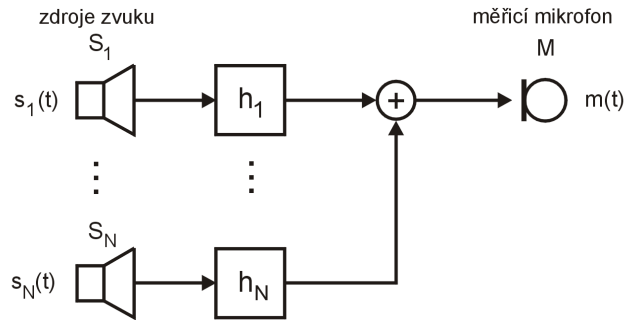
Tuto situaci lze v lineárním systému popsat pomocí následujícího vztahu, kde veličina $s(t)$ reprezentuje generovaný impulzní signál a $m(t)$ je měřená odezva v prostoru:

$$m(t) = h(t) * s(t) = \int_0^{\infty} h(t - \tau) \cdot s(\tau) dt. \quad (5.1)$$

Měřená odezva $m(t)$ je tedy dána konvolucí generovaného signálu $s(t)$ a impulzní odezvy $h(t)$, která reprezentuje následující vlastnosti prostoru a systému:

- vlastní impulzní odezvu elektroakustického měniče včetně jeho směrového vyzařování,
- umístění elektroakustického měničů v prostoru (vzdálenost vůči posluchači, zpoždění a vliv zástavby),
- geometrii poslechového prostoru, odrazy zvuku od stěn a překážek,
- vliv parametrů prostředí (teplota, tlak, vlhkost).

Pokud uvažujeme situaci s více zdroji signálu $S_1 \dots S_N$ (reproduktory), lze schéma rozšířit tak, jak je znázorněno na obr. 5.6.



Obr. 5.6: Schéma zjednodušené situace přenosu signálu při uvažování více zdrojů signálu a jednoho měřicího mikrofónu.

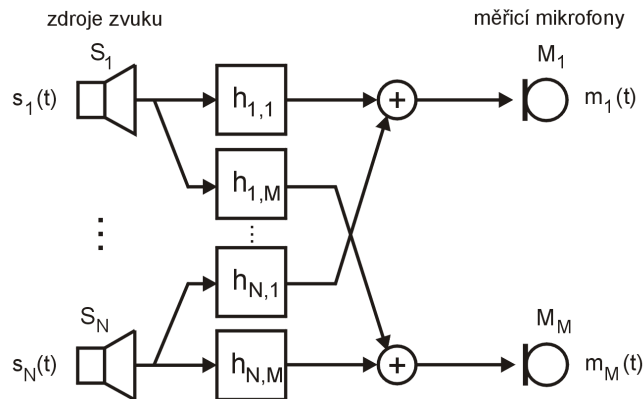
Pro popis přenosu signálu a odezvu $m(t)$ měřenou v jednom místě poslechu M lze psát:

$$m(t) = \sum_{n=1}^N h_n(t) * s_n(t) = \sum_{n=1}^N \int h_n(t - \tau) \cdot s_n(\tau) dt. \quad (5.2)$$

Veličiny $s_1(t) \dots s_N(t)$ reprezentují generovaný impulzní signál na elektrické straně pro jednotlivé měniče $S_1 \dots S_N$. Signál z měřicího mikrofónu $m(t)$ je zaznamenán analyzátozem. Impulzní odezvy $h_1 \dots h_N$ opět reprezentují vlastnosti prostoru a systému.

5.3. Vícekanálové řešení měřicí metody

Pokud uvažujeme vícekanálové řešení měřicí metody [22], ať už z důvodu různých pozic posluchače (kap. 5.1) nebo z požadavku na prostorové průměrování parametrů, lze blokové schéma metody pro M měřicích mikrofónů $M_1 \dots M_M$ znázornit na obr. 5.7.



Obr. 5.7: Schéma zjednodušené situace přenosu signálu při uvažování vícekanálového měření.

Impulzní odezvy $h_{1,1} \dots h_{N,M}$ opět reprezentují impulzní odezvy měničů $S_1 \dots S_N$ včetně jejich směrového vyzářování, vlivu zástavby a přímých i ostatních cest šíření zvuku odrazy i vibra-

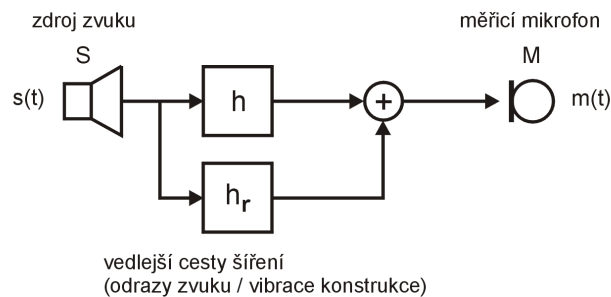
ceci konstrukce automobilu. Impulzní odezvy jsou snímány měřicími mikrofony $M_1 \dots M_M$. Pro signály snímané jednotlivými mikrofony lze opět psát konvoluce:

$$\begin{bmatrix} m_1(t) \\ \vdots \\ m_M(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{1,1}(t) & \cdots & h_{1,N}(t) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{M,1}(t) & \cdots & h_{M,N}(t) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} s_1(t) \\ \vdots \\ s_N(t) \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

5.4. Přímé a vedlejší cesty šíření zvuku

Jak bylo uvedeno v kap. 5 a je znázorněno na obr. 5.1, pro nastavování zvukového systému je vhodné alespoň rámcově znát vliv přímé cesty šíření zvuku a vedlejších cest šíření, ať už se uvažuje šíření formou odrazů zvukových vln (různých řádů) nebo šíření vibracemi konstrukce automobilu. Naopak je při nastavování zvukových systémů nepodstatné (a v praxi zřejmě velmi obtížně řešitelné) rozlišovat vedlejší cesty šíření vznikajících právě odrazy zvuku od odrazivých překážek v interiéru automobilu od cest šíření vibracemi konstrukcí.

Pokud budeme uvažovat nejjednodušší situaci s jedním zdrojem zvuku a jedním místem měření, lze šíření zvuku schematicky znázornit obr. 5.8.



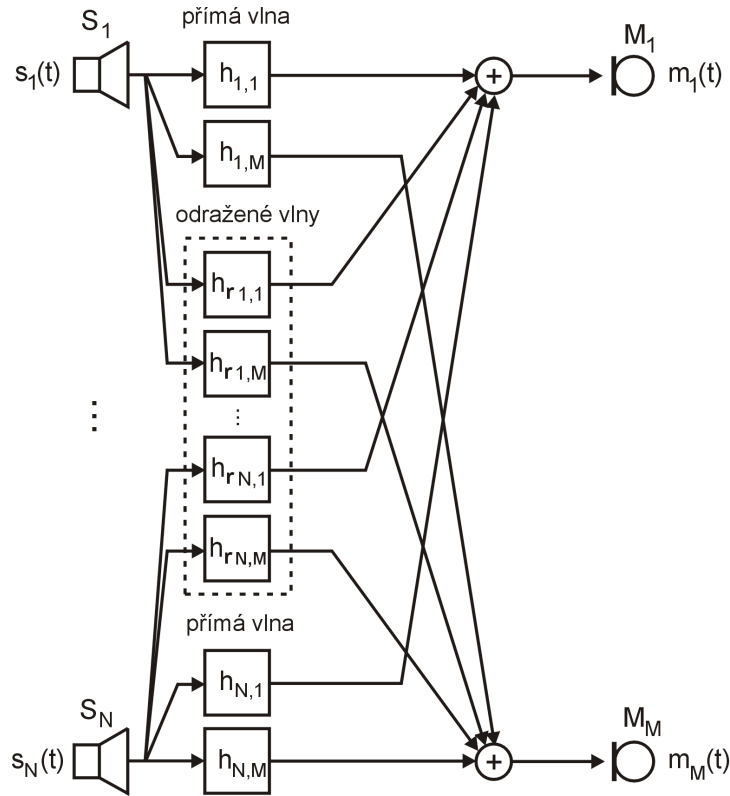
Obr. 5.8: Schéma zjednodušené situace přenosu signálu při uvažování vedlejší cesty šíření zvuku.

Odezvu měřenou mikrofonom lze opět vyjádřit konvolucí:

$$m(t) = h(t) * s(t) + h_r(t) * s(t). \quad (5.4)$$

Impulzní odezva $h(t)$ reprezentuje přímou cestu šíření, odezva $h_r(t)$ pak reprezentuje vedlejší cestu (cesty) šíření zvuku od zdroje k měřicímu mikrofону.

V případě vícekanálového zvukového systému i vícekanálové měřicí metody lze schéma znázornit pomocí obr. 5.9, kde impulzní odezvy pro vedlejší cesty šíření jsou označeny jako $h_{r1,1} \dots h_{rN,M}$ a N je počet zdrojů zvuku a M počet kanálů měření.



Obr. 5.9: Schéma přenosu signálu při vícekanálovém měření a uvažování vedlejších cest šíření zvuku.

Pro signál měřený jednotlivými mikrofony lze psát vztah:

$$\begin{bmatrix} m_1(t) \\ \vdots \\ m_M(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{1,1}(t) & \cdots & h_{1,N}(t) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{M,1}(t) & \cdots & h_{M,N}(t) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} s_1(t) \\ \vdots \\ s_N(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_{r1,1}(t) & \cdots & h_{r1,N}(t) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{rM,1}(t) & \cdots & h_{rM,N}(t) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} s_1(t) \\ \vdots \\ s_N(t) \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

Z matic impulzních odezev \mathbf{H} , případně \mathbf{H}_r lze vyhodnotit všechny požadované parametry $A(f)$, $L(f)$ i $\tau_s(f)$, jednotlivé metody vyhodnocení budou popsány v kap. 6.3 a 7. Ze znalosti geometrie sítě měřících mikrofonů lze u jednotlivých parametrů provádět například prostorové průměrování výsledků, což v řadě případů koresponduje s možnostmi reálného poslechu v daném poslechovém místě.

5.5. Návrh technického řešení měřicí metody

Cílem realizace měřicí metody není řešit hardware měřicího systému, ale pokud možno využít dostupnou stávající a pro daný účel již používanou měřicí techniku. Jako hardware je využitý čtyřkanálový akustický analyzátor Brüel&Kjær PULSE 3560C s odpovídajícími měřicími mikrofony. Důležitým předpokladem je použití mikrofونů třídy 1 pro difúzní akustické pole (všesměrové), prakticky vyzkoušené jsou typy Brüel&Kjær 4943 a GRAS 40PH. Akustický analyzátor slouží prakticky jen pro ukládání signálu (časového průběhu) do souboru, veškeré vyhodnocení pak probíhá jako post-processing v příslušných skriptech napsaných v prostředí Matlab. Z toho důvodu lze použít prakticky libovolný hardware, který umožňuje připojit měřicí mikrofony včetně jejich napájení a disponuje A/D převodníky s dostatečným dynamickým rozsahem. Pro následné zpracování signálu jsou zvolené parametry vzorkování/záznamu signálu tak, aby byly s dostatečnou rezervou splněny všechny požadavky, které požadují následné metody vyhodnocení [21, 23, 24].

Parametry jsou, s ohledem na technické možnosti použitého analyzátoru, nastavené následovně:

vzorkovací frekvence:	$f_S = 65\,536$ Hz
doba záznamu:	$T_r = 1$ s
počet vzorků posloupnosti v záznamu:	$N_S = 65\,536$
mezní šířka frekvenčního pásma:	20 Hz – 20 kHz

5.6. Spektrální analýza – metoda FFT

Pro frekvenční analýzu signálů, která je používána v návrhu měřicí metody v této práci, je používána Fourierova transformace. Pro obecný signál $x(t)$ je možné psát Fourierův integrál:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt. \quad (5.6)$$

Zpětná Fourierova transformace je definovaná vztahem

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega)e^{j\omega t} d\omega. \quad (5.7)$$

Pro použití v systémech se vzorkovaným signálem s jeho konečnou délkou, musíme použít diskrétní Fourierovu transformaci:

$$X[k] = T_S \sum_{n=0}^{N_S-1} x[n]e^{-j\frac{2\pi kn}{N_S}}, \text{ kde } k = 0, 1, \dots, N_S - 1. \quad (5.8)$$

A inverzní diskretní Fourierova transformace

$$x[n] = \frac{1}{NT_S} \sum_{k=0}^{N_S-1} X[k] e^{j \frac{2\pi kn}{N_S}}, \text{ kde } n = 0, 1, \dots, N_S - 1, \quad (5.9)$$

kde $x[n]$ je diskretní signál s konečnou délkou N_S vzorků a T_S je vzorkovací perioda.

Pro analýzu signálu je použitý algoritmus rychlé Fourierovy transformace (dále uváděná jako FFT $\{x[n]\}$), ale principy metod budou i nadále pro jednoduchost udávány ve spojitě formě. Celý výpočet FFT i použitý algoritmus je převzatý z [25–28].

V celém následujícím textu budou pro jednoduchost udávány vztahy tak, jak jsou obvykle odvozené pro úhlovou frekvenci, ale v obrázcích a grafech s udávanými frekvenčními charakteristikami bude pro větší přehlednost a souvislost s praktickým použitím metody udávána frekvence f , kdy samozřejmě platí vztah $\omega = 2\pi f$.

Pro zvolenou vzorkovací frekvenci $f_S = 65\,536$ Hz, délku záznamu $T_r = 1$ s a počet vzorků $N_S = 65\,536$ jsou pevně dány parametry vypočítaných spekter, které jsou pro další použití v navrhované měřicí metodě naprosto dostačující v celém uvažovaném frekvenčním pásmu 20 Hz – 20 kHz:

frekvenční rozlišení:	$\Delta f = 1$ Hz
počet spektrálních čar:	32 768
časové okno:	obdélníkové (pokud není v dalším textu uvedeno jinak)

5.7. Realizace experimentů pro ověření měřicí metody

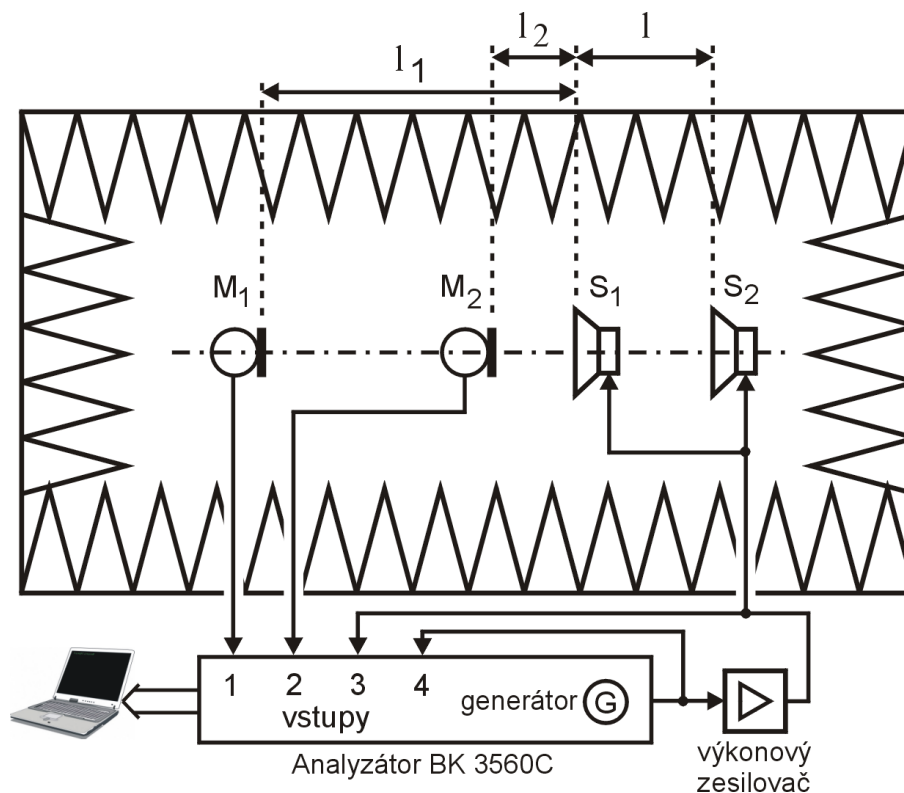
Jednotlivé postupy měření a vyhodnocení požadovaných parametrů byly ověřeny při prakticky prováděných měřeních zvukových systémů a jejich komponentů v řadě variant:

- modelové měření ve volném akustickém poli,
- modelové měření v automobilu,
- měření odpovídající reálnému použití.

5.7.1. Modelové měření ve volném akustickém poli

Měření ve volném akustickém poli (bezodrazové komoře) byla realizována pro počáteční ověření funkčnosti jednotlivých metod vyhodnocení, jejich limitů a stanovení požadavků na měřicí metodu použitelnou přímo v automobilu. Byly použity dva měřicí mikrofony a dva elektroakustické měniče (reproduktory) známých (a dostačujících) parametrů, geometrie rozmístění reproduktorů i mikrofonů byla jednoduše konfigurovatelná do různých variant

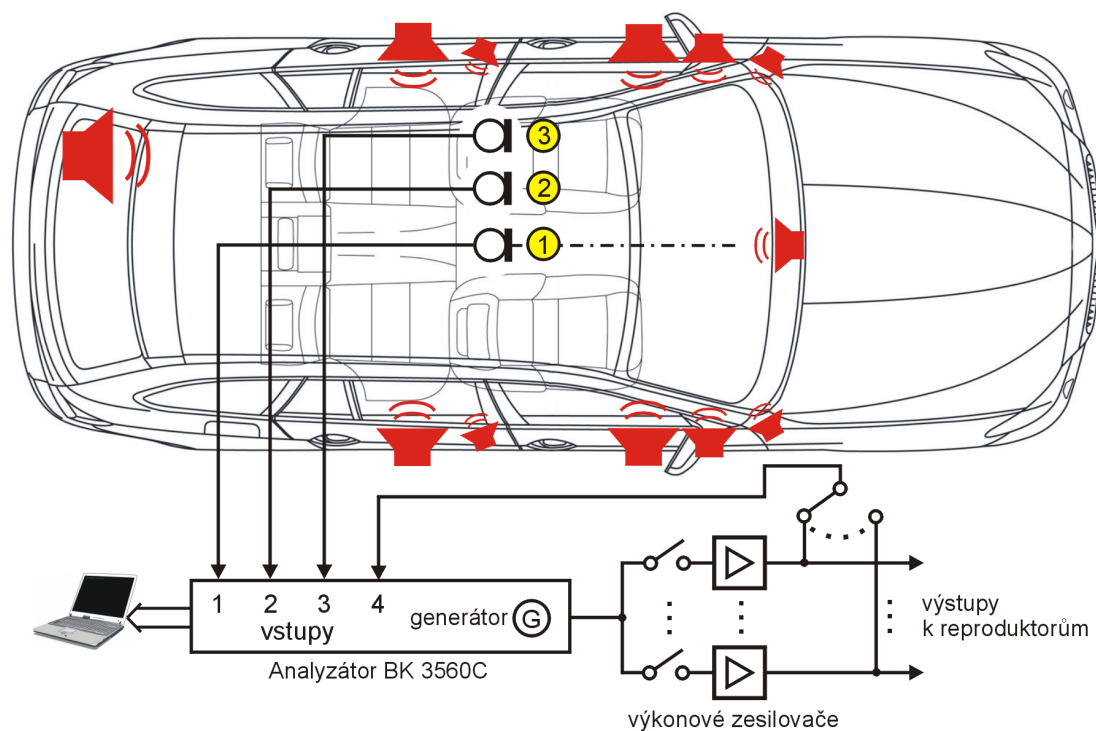
rozměrů. Schématicky je situace zobrazena na obr. 5.10. Zcela zásadní výhodou bylo použití vestavěného signálového generátoru, kterým je akustický analyzátor vybavený. Další výhodou je možnost záznamu signálu jak přímo na výstupu generátoru, tak na výstupu výkonového zesilovače, což umožnilo snadnou synchronizaci měření pomocí generovaného signálu [21, 29].



Obr. 5.10: Schéma modelového měření ve volném akustickém poli.

5.7.2. Modelové měření v automobilu

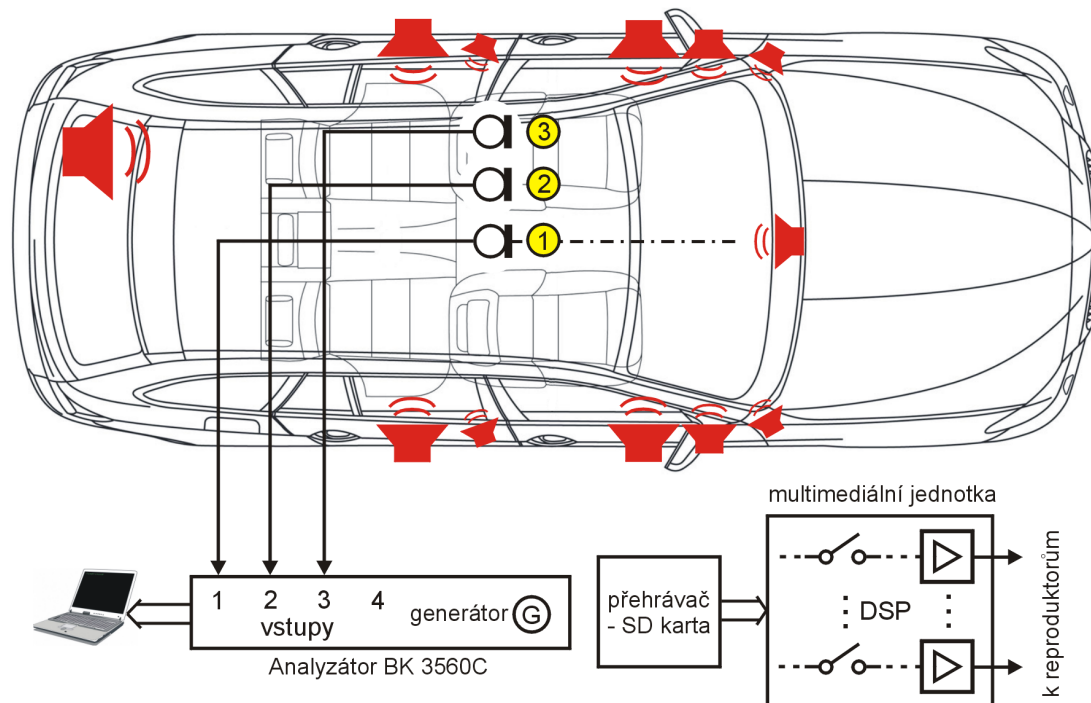
Měření v automobilu bylo prováděno na jedné z rozsáhlejších variant zvukového systému (obr. 4.1 a 4.2), který využívá i kanály *Center* a *Subwoofer* a třípásmový reprodukcí systém v předních dveřích. Obdobně jako v kap. 5.7.1 byl zaznamenávaný i budicí signál pro aktuálně hrající reproduktor (kombinaci reproduktorů), což umožňuje synchronizaci mezi generovaným signálem a signály z měřicích mikrofónů (viz obr. 5.11). Rozmístění měřicích mikrofónů odpovídá situaci popsané v kap. 5.1, kdy je využíváno polohování sedadla, na kterém jsou měřicí mikrofony umístěné.



Obr. 5.11: Schéma modelového měření v kabině automobilu.

5.7.3. Měření odpovídající reálnému použití

Stejným způsobem, jako na obr. 5.11, byl použitý rozsáhlejší ozvučovací systém, ale není zaznamenávaný signál pro buzení reproduktorů. To odpovídá reálnému použití měřicí metody v praxi, kdy jen malá část měření je prováděna s odpovídajícím technickým vybavením, které umožňuje připojení reproduktorů a snímání a záznam budícího signálu. Tímto způsobem lze sice použít jednodušší způsob vyhodnocení všech požadovaných parametrů (především přenosových charakteristik), ale prakticky jsou měřené pouze vlastnosti reproduktorů v zástavbě v automobilu. Nelze tímto způsobem měřit vlastnosti kompletního kanálu ozvučovacího systému, což je značně omezující, protože řada problémů v technickém řešení používaných multimediálních jednotek je odhalena právě při těchto probíhajících měřeních kompletních zvukových systémů. Multimediální jednotka obvykle neumožňuje připojení externího měřicího signálu, ale ten musí být přehráván ve vhodném zvukovém formátu (například „*.wav“ nebo „*.mp3“) přímo z měřicí karty. To významně zvyšuje požadavky a nároky na koncepci a řešení navrhované měřicí metody. Ideové schéma takového měření využívající multimediální jednotku zvukového systému a její přehrávače je uvedené na obr. 5.12.



Obr. 5.12: Schéma reálné měřicí situace v kabině automobilu.

6. Měření přenosových charakteristik

Měření prvních dvou požadovaných parametrů – relativní amplitudové charakteristiky měniče (kanálu) $A(f)$ a frekvenční závislosti hladiny akustického tlaku $L(f)$ jsou v podstatě velmi obdobné úlohy, takže je možné je realizovat jedním způsobem vyhodnocení. Frekvenční závislost hladiny akustického tlaku měniče $L(f)$ lze získat z relativní amplitudové charakteristiky $A(f)$ buď znalostí charakteristické citlivosti měniče, případně zvolené úrovně zesílení daného kanálu.

$$L_f = A_f + A_z + L_c, \quad (6.1)$$

kde A_z je hodnota zesílení zesilovače a L_c je citlivost měniče.

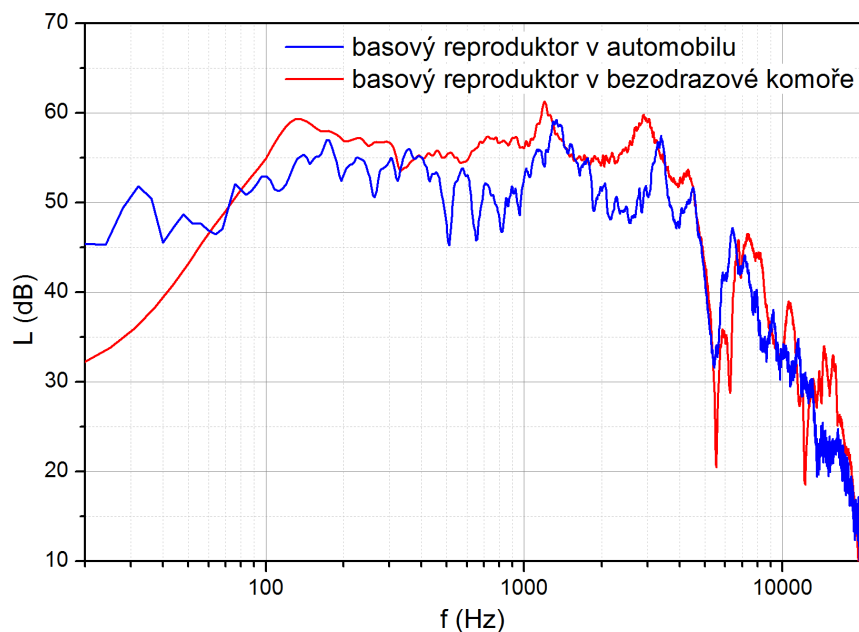
Oba požadované parametry tak budou určeny jedním způsobem vyhodnocení přenosových charakteristik. Podle druhu budícího signálu lze rozdělit měření přenosových charakteristik na dvě základní skupiny:

- měření v ustáleném stavu,
- impulzní měření.

6.1. Měření v ustáleném stavu

Nejčastěji používaným způsobem měření přenosových charakteristik je měření v ustáleném stavu za využití šumového signálu a průměrování změřených amplitudových frekvenčních spekter. To je umožněno vlastností šumového signálu, který má v omezeném frekvenčním rozsahu rovnoměrné frekvenční spektrum. Jako problematické se na základě zkušeností ukazuje velká náchylnost na vnější rušení v průběhu měření. To je způsobeno dobou průměrování v řádu sekund, případně desítek sekund. Největší problém nastává v oblasti nízkých frekvencí, kde je často významná hladina rušení z vnějšího prostředí (hlukové pozadí), kterou není možné jednoduše odstranit. Další nevýhodou je skutečnost, že šumový signál má ze své podstaty náhodný průběh fáze a není tedy možné získat fázovou a další od toho odvozené charakteristiky [21, 30].

Na obr. 6.1 je změřená amplitudová frekvenční charakteristika jednoho vybraného reproduktoru v bezdrazové komoře dle [2] (ve standardní ozvučnici) a v zástavbě v kabině automobilu. Je zde patrný výrazný vliv zástavby reproduktoru na výsledné parametry.



Obr. 6.1: Porovnání měřených amplitudových frekvenčních charakteristik reproduktoru v bezodrazové komoře a v kabině automobilu.

6.2. Impulzní měření

Pro získání impulzních charakteristik je nutné použít pro buzení celé elektroakustické soustavy vhodný impulzní signál. Zcela zásadní vlastností budicího signálu je vyzářená energie s dostatečným odstupem od hluku pozadí (případně šumu) v celém požadovaném frekvenčním pásmu. Zároveň se předpokládá rovnoměrné frekvenční spektrum vyzářené energie bez výrazných propadů. Jak již bylo uvedeno v kap. 5, z důvodu dostatečného odstupů od hlukového pozadí nebude možné pro měření použít jeden impulzní signál pro celé požadované pásmo, ale je nutné vybrat určitou kombinaci signálů s rozdílnými vlastnostmi pro různé části požadovaného frekvenčního pásma.

6.2.1. Impulzní signály

Při výběru impulzního signálu je nutné zohlednit jako základní kritérium šířku pásma, ve kterém má signál přibližně konstantní amplitudové spektrum. Jako první skupina signálů byly uvažovány obdélníkové průběhy s různou šířkou pulsu. V tab. 6.1 jsou shrnuty vlastnosti obdélníkových signálů s délkou 5 až 25 μs . Spektrální vlastnosti jsou odvozené například v [31].

Tab. 6.1: Vlastnosti obdélníkových signálů s délkou 5 až 25 μs . Převzato z [31].

Šířka impulzu τ (μs)	Pokles úrovně [dB] v závislosti na frekvenci	
	10 kHz	20 kHz
5	$< -0,1$	$-0,1$
10	$-0,1$	$-0,6$
15	$-0,3$	$-1,3$
20	$-0,6$	$-2,4$
25	$-0,9$	$-3,9$

Pro potřeby měření uvažované konfigurace zvukového systému ale nejsou tyto signály příliš vhodné z důvodu vysoké hladiny hlukového pozadí v automobilu, především v oblasti nízkých frekvencí. Jako možné řešení je prodloužení měřicího signálu a tím lze dosáhnout výrazně lepšího odstupu od hlukového pozadí. Na druhou stranu toto řešení přináší komplikaci v podobě zúžení frekvenčního pásma, ve kterém je signál použitelný pro měření, případně vzniku výrazných propadů ve frekvenčním spektru signálu [31–33]. Pro získání parametrů některých měničů a kanálů zvukového systému v různých frekvenčních pásmech (kap. 4.1, tab. 4.1) je nutné kombinovat různé měřicí signály i jiného typu, než obdélníkové s různou šířkou pásma a výsledné parametry získat skládáním dílčích výsledků z měření.

Jako vhodné signály byly uvažovány signály několika typů:

(A) Impulzní obdélníkové signály nesymetrické **x1**

$$x1(t) = K \left(t - t_0 + \frac{\tau}{2} \right), \text{ pro } |t| \leq \frac{\tau}{2} \quad (6.2)$$

$$x1(t) = 0, \text{ pro } |t| > \frac{\tau}{2} \quad (6.3)$$

V praktickém použití v dalším textu budou signály označeny jako $x1_\tau$, kde τ je délka signálu, například $x1_{15\mu\text{s}}$.

(B) Impulzní obdélníkové signály symetrické **x2**

$$x2(t) = K \left(t - t_0 + \frac{\tau}{2} \right), \text{ pro } |t| \leq \frac{\tau}{2} \quad (6.4)$$

$$x2(t) = -K \left(t - t_0 - \frac{\tau}{2} \right), \text{ pro } |t| > \frac{\tau}{2} \quad (6.5)$$

V praktickém použití v dalším textu budou signály označené $x_{2\tau}$, kde τ je délka signálu, například $x_{215\mu s}$.

(C) Impulzní signál průběhu $\sin(\omega t)$ značené **x3**

$$x_3(t) = K \sin \left[\frac{\pi(t - t_0)}{\tau} \right], \text{ pro } |t| \leq \frac{\tau}{2}, \tau = \frac{1}{f} \quad (6.6)$$

$$x_3(t) = 0, \text{ pro } |t| > \frac{\tau}{2} \quad (6.7)$$

V praktickém použití v dalším textu budou signály označené x_{3f} , kde f označuje frekvenci harmonického signálu použitého pro generování impulzního signálu, například $x_{3100\text{Hz}}$.

(D) Impulzní signál průběhu $\cos^2(\omega t)$ značené **x4**

$$x_4(t) = K \cos^2 \left[\frac{\pi(t - t_0)}{\tau} \right], \text{ pro } |t| \leq \frac{\tau}{2}, \tau = \frac{1}{f} \quad (6.8)$$

$$x_4(t) = 0, \text{ pro } |t| > \frac{\tau}{2} \quad (6.9)$$

V praktickém použití v dalším textu budou signály označené x_{4f} , kde f označuje frekvenci harmonického signálu použitého pro generování impulzního signálu, například $x_{4100\text{Hz}}$.

(E) Impulzní signál průběhu $\cos^4(\omega t)$ značené **x5**

$$x_5(t) = K \cos^4 \left[\frac{\pi(t - t_0)}{\tau} \right], \text{ pro } |t| \leq \frac{\tau}{2}, \tau = \frac{1}{f} \quad (6.10)$$

$$x_5(t) = 0, \text{ pro } |t| > \frac{\tau}{2} \quad (6.11)$$

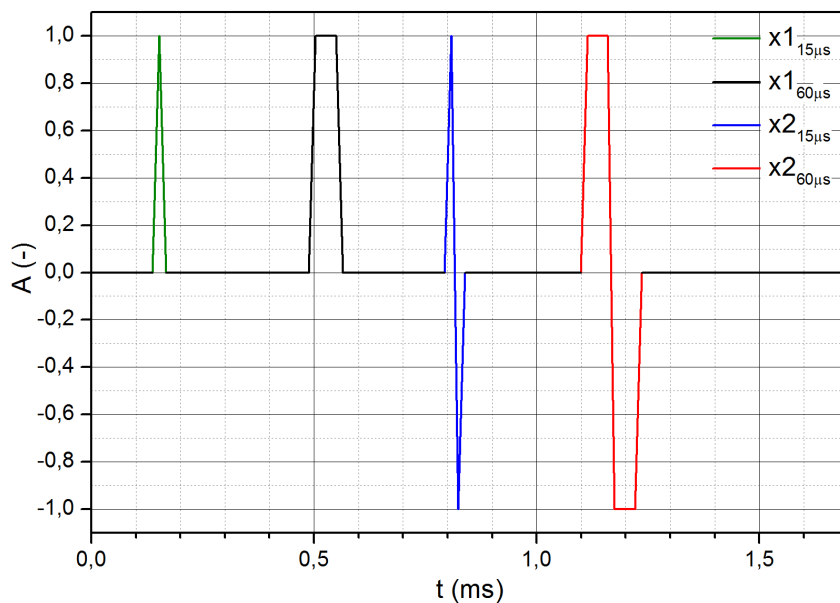
V praktickém použití v dalším textu budou signály označené x_{5f} , kde f označuje frekvenci harmonického signálu použitého pro generování impulzního signálu, například $x_{5100\text{Hz}}$.

Pro uvedení amplitudově frekvenčních spekter je nutné ze signálů získat Fourierův obraz:

$$X(\omega) = F\{x(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt. \quad (6.12)$$

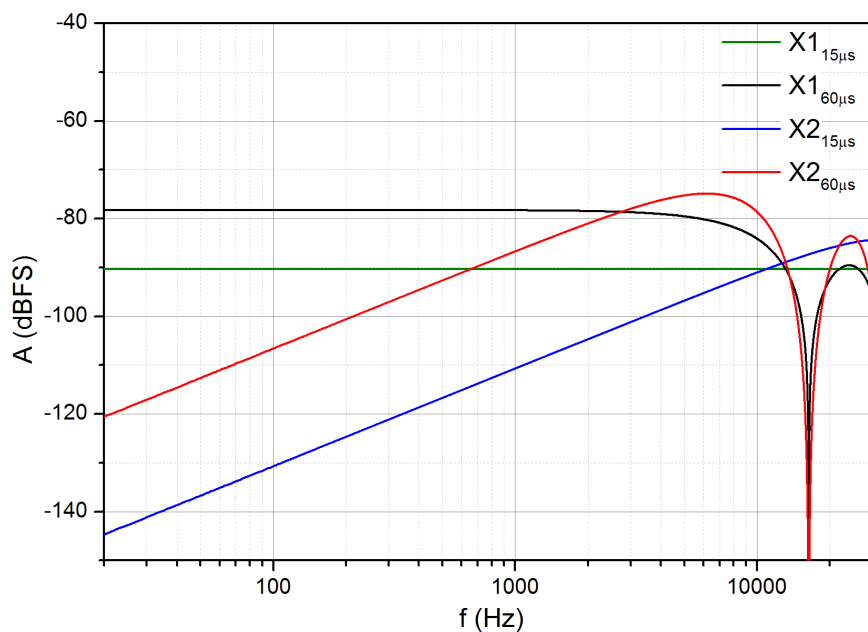
6 Měření přenosových charakteristik

Na obr. 6.2 jsou uvedeny časové průběhy impulzních signálů $x_{15\mu\text{s}}$, $x_{60\mu\text{s}}$, $x_{2_{15\mu\text{s}}}$ a $x_{2_{60\mu\text{s}}}$.



Obr. 6.2: Časové průběhy impulzních signálů $x_{15\mu\text{s}}$, $x_{60\mu\text{s}}$, $x_{2_{15\mu\text{s}}}$ a $x_{2_{60\mu\text{s}}}$.

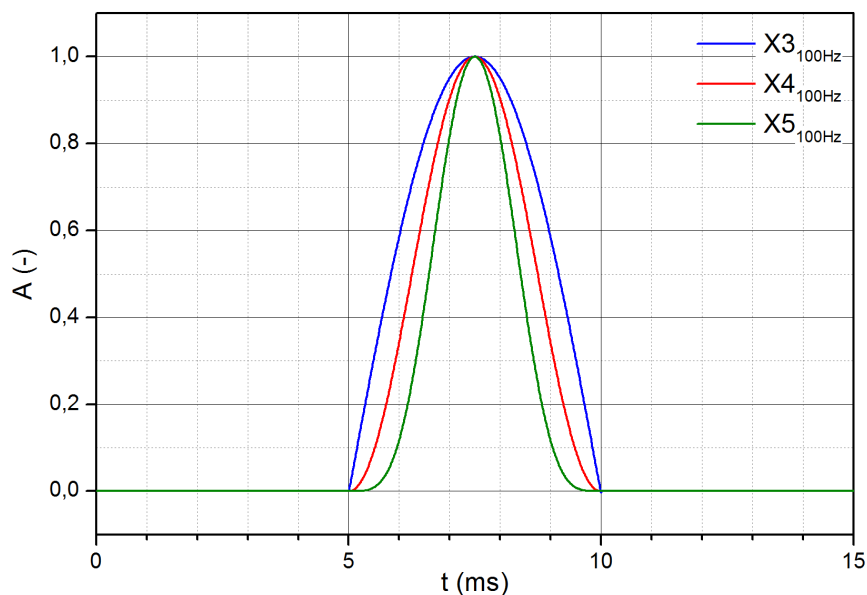
Na dalším obr. 6.3 jsou uvedena amplitudová frekvenční spektra signálů $X_{15\mu\text{s}}$, $X_{60\mu\text{s}}$, $X_{2_{15\mu\text{s}}}$ a $X_{2_{60\mu\text{s}}}$.



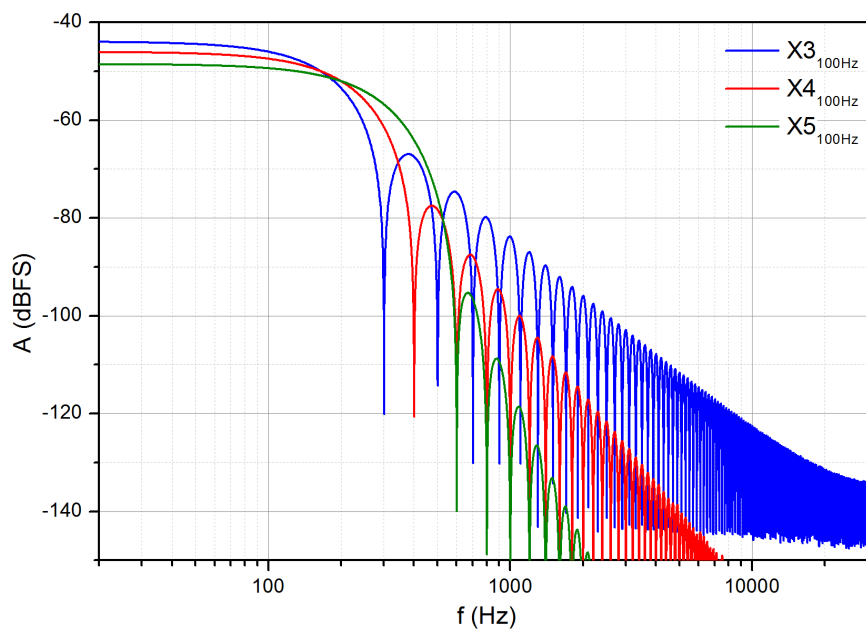
Obr. 6.3: Amplitudová frekvenční spektra signálů $X_{15\mu\text{s}}$, $X_{60\mu\text{s}}$, $X_{2_{15\mu\text{s}}}$ a $X_{2_{60\mu\text{s}}}$.

6 Měření přenosových charakteristik

Pro signály $x_{3_{100\text{Hz}}}$, $x_{4_{100\text{Hz}}}$ a $x_{5_{100\text{Hz}}}$ jsou časové průběhy uvedeny na obr. 6.4. Jejich amplitudová frekvenční spektra $X_{3_{100\text{Hz}}}$, $X_{4_{100\text{Hz}}}$ a $X_{5_{100\text{Hz}}}$ jsou na obr. 6.5. Amplitudová spektra dalších vybraných signálů jsou uvedeny v Příloze 2.



Obr. 6.4: Časové průběhy signálů $x_{3_{100\text{Hz}}}$, $x_{4_{100\text{Hz}}}$ a $x_{5_{100\text{Hz}}}$.



Obr. 6.5: Amplitudová frekvenční spektra $X_{3_{100\text{Hz}}}$, $X_{4_{100\text{Hz}}}$ a $X_{5_{100\text{Hz}}}$.

Z uvedených grafů je patrné, kde nastává pokles amplitud ve spektrech a tedy i oblasti, ve kterých jsou signály použitelné. Podle amplitudových frekvenčních spekter se jeví jako výhodné použít impulzní signál $x_{15\mu s}$ případně signál $x_{60\mu s}$ s úrovní vyšší o 6 dB. Tyto signály mají vyrovnané frekvenční spektrum v téměř celém slyšitelném frekvenčním pásmu.

6.2.2. Výběr vhodných skupin impulzních signálů

Jak již bylo uvedeno výše, je nutné provést výběr vhodných skupin impulzních signálů. To je nutné provést na základě znalostí frekvenčních pásem, ve kterých má být měření prováděno. Šířky frekvenčních pásem vycházejí z požadavku v kap. 4.1 a jsou uvedeny v tab. 4.1. Z důvodu zjednodušení postupu měření je možné některá frekvenční pásma rozšířit, což vede na využití stejného frekvenčního pásma i pro jiné typy měničů (kanálů). Z tab. 4.1 je patrné, že požadavky na frekvenční pásmo pro středový a centrální měnič jsou stejné a pro širokopásmový a středový měnič jsou podobné. Rozšíříme-li mírně dolní rozsah pro středový měnič, lze pokrýt jedním frekvenčním pásmem všechny tři druhy měničů, tedy středový, centrální i širokopásmový.

Požadavky na šířky zjednodušených frekvenčních pásem jsou znovu shrnuty v tab. 6.2. Původních 6 frekvenčních pásem lze zjednodušit na 4 rozšířená pásma, pro které budou zvoleny kombinace vhodných impulzních signálů.

Tab. 6.2: Požadavky na šířky zjednodušených frekvenčních pásem.

Měnič	Frekvenční pásmo		
	požadavek – měření	zjednodušení	označení pásma
Širokopásmový	80 Hz – 12 kHz	80 Hz – 15 kHz	1.
Basový	100 Hz – 15 kHz	80 Hz – 15 kHz	1.
Středový	100 Hz – 15 kHz	80 Hz – 15 kHz	1.
Výškový	1 kHz – 20 kHz	1 kHz – 20 kHz	2.
Centrální	35 Hz – 5 kHz	35 Hz – 5 kHz	3.
Subwoofer	30 Hz – 200 Hz	30 Hz – 200 Hz	4.

Frekvenční pásma 1 až 4 nám určují požadavky na skupinu měřicích signálů. Měřicí signály je možné generovat ve velmi širokém rozsahu variací, které se vzájemně spektrálně překrývají. Překrývání ve spektrální oblasti je s výhodou použito pro další zpracování výsledných parametrů (kap. 6.4).

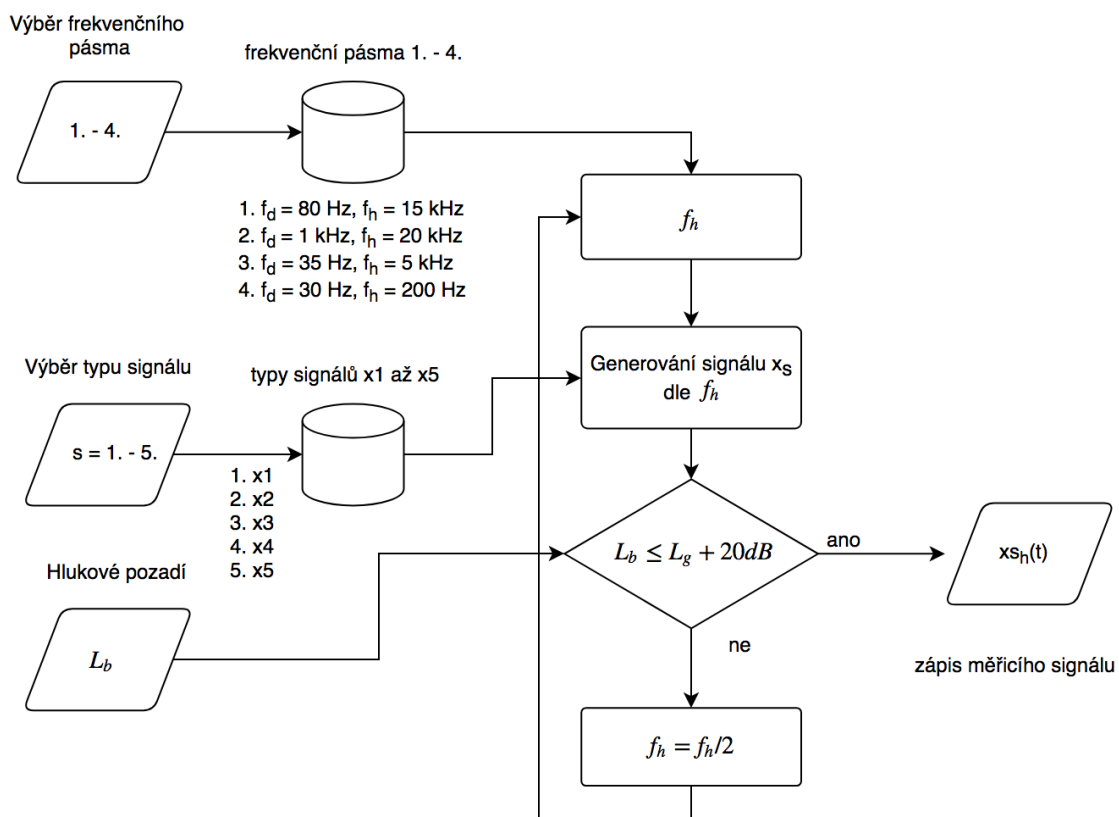
Vlastnosti vybraných signálů typu x4 a x5 jsou shrnuty v následující tabulce:

Tab. 6.3: Vlastnosti vybraných signálů typu x4 a x5.

X4				X5			
f (Hz)	frekvence poklesu o 3 dB f_{3dB} (Hz)	frekvence poklesu o 10 dB f_{10dB} (Hz)	úroveň signálu před poklesem A_g (dBFS)	f (Hz)	frekvence poklesu o 3 dB f_{3dB} (Hz)	frekvence poklesu o 10 dB f_{10dB} (Hz)	úroveň signálu před poklesem A_g (dBFS)
128	185	322	-48,2	128	237	422	-50,7
512	744	1 304	-60,3	512	959	1 706	-62,8
1 024	1 520	2 655	-66,5	1 024	1 956	3 488	-69,1
2 048	2 595	4 471	-70,7	2 048	4 037	7 173	-75,3
4 096	6 710	11 731	-79,4	4 096	8 621	15 362	-81,9
8 192	12 148	16 067	-86,8	8 192	16 393	26 068	-89,3

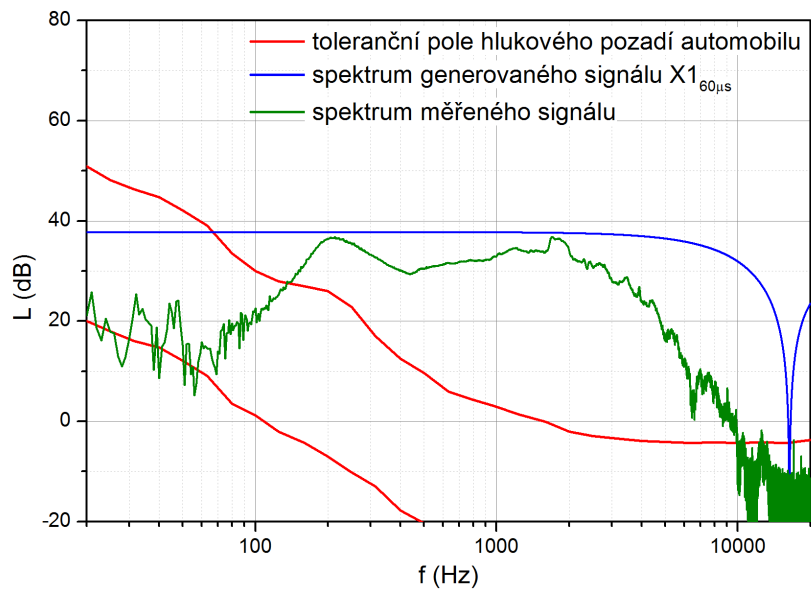
Jak je z uvedených parametrů vidět, je na jedné straně značný rozsah hladin signálu před poklesem o 3 dB. Pomocí generování impulzního signálu jen pro užší pásma dosáhneme zlepšení odstupu od hlukového pozadí o více než 40 dB. Uvedenou sadu signálů x4 a x5 lze považovat jako vhodnou kombinaci pro měření basových měničů. Při samotném měření je ale nutné stále se sadou signálů pracovat, protože v případě velkých propadů na amplitudově frekvenční charakteristice měřeného měniče nemusí být požadovaný odstup signálu alespoň 20 dB od hladiny hlukového pozadí dostatečný v celém měřeném frekvenčním pásmu. Celý proces generování vhodných signálů je naznačen ve vývojovém diagramu na obr. 6.6. f_d je dolní frekvence a f_h horní frekvence vybraného frekvenčního pásma. L_b je hladina hlukového pozadí v kabině automobilu a L_g hladina akustického tlaku generovaného impulzního signálu. x_{sh} je generovaný signál, kde s je typ signálu a h frekvence použitá pro generování.

Výsledná sada impulzních signálů pro měření jednoho frekvenčního pásma je vždy závislá na možnostech konkrétní měniče a dostupném výkonu zesilovačů pro jejich buzení (dynamickém rozsahu kanálu). Ukázka měření frekvenčního spektra hladiny akustického tlaku basového měniče pro vybranou skupinu signálů je uvedena na obr. 6.7, 6.8 a 6.9. V jednom grafu je vždy zobrazeno spektrum měřené hladiny akustického tlaku u měniče měřeného ve volném akustickém poli, spektrum budícího signálu a toleranční meze spektra hlukového pozadí z kabiny automobilu.



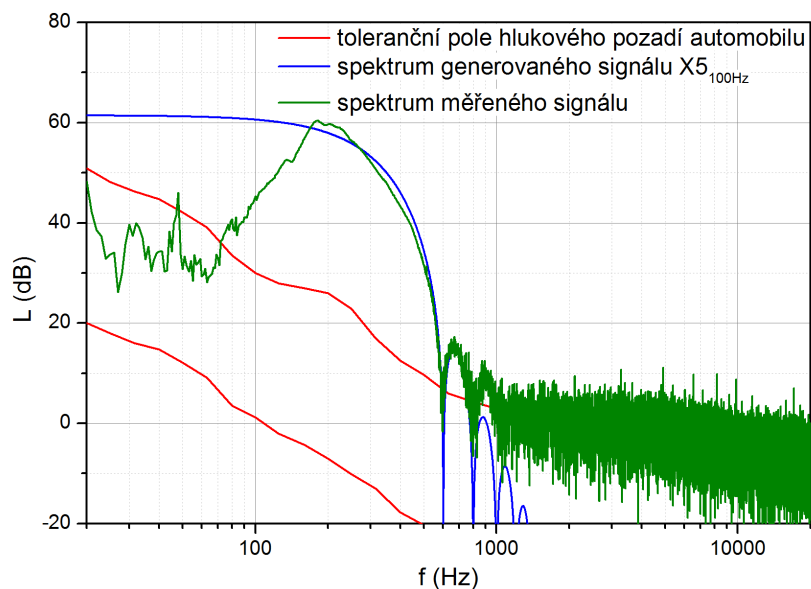
Obr. 6.6: Vývojový diagram generování impulzních signálů.

Na obrázku 6.7 je uvedeno měření pro signál $x_{1_{60\mu s}}$. Je patrné, že přibližně do frekvence 400 Hz je odstup měřené hladiny akustického tlaku od hlukového pozadí nedostatečný.



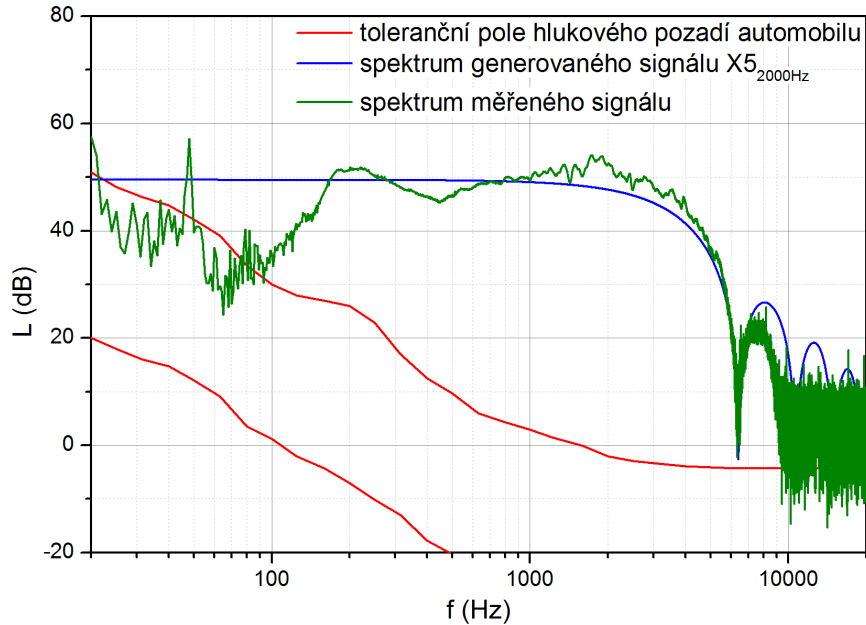
Obr. 6.7: Porovnání spektra impulzního signálu $X1_{60\mu s}$ a hlukového pozadí v kabině automobilu.

Pokud je zvolený signál $x_{5_{100\text{Hz}}}$, který je vhodný pro oblast nízkých frekvencí, vypadá odstup od hlukového pozadí výrazně lépe. Ovšem nad frekvencí 300 Hz již není v signálu dostatek energie a měření se musí opakovat s dalším impulzním signálem.



Obr. 6.8: Porovnání spektra impulzního signálu $X5_{100\text{Hz}}$ a hlukového pozadí v kabině automobilu.

Pro konec požadovaného frekvenčního pásma je vhodné u basových měničů využít signál $x_{52000\text{Hz}}$, který má dostatek energie až do frekvence 4 kHz. Porovnání spektra budicího signálu s měřenou hladinou akustického tlaku a spektrem hlukového pozadí je na obr. 6.9.



Obr. 6.9: Porovnání spektra impulzního signálu $X_{52000\text{Hz}}$ a hlukového pozadí v kabině automobilu.

6.3. Měření přenosové charakteristiky

V případě měření přenosové charakteristiky měniče (kanálu zvukového systému) pomocí impulzního signálu je nutné uvažovat, že budicí signál nemá vyrovnané frekvenční spektrum v celém požadovaném frekvenčním pásmu. Je tedy nutné přistoupit při určení přenosové charakteristiky k eliminaci vlivu frekvenčního spektra budicího signálu. Situaci si lze obecně představit jako odezvu lineární soustavy $y(t)$ na obecný signál $x(t)$ přivedený na vstup a tedy platí, že:

$$y(t) = h(t) * x(t) = \int_{t_0}^t h(t - \tau) dt, \quad (6.13)$$

kde $h(t)$ je impulzní charakteristika soustavy, tedy odezva na Diracovu distribuci. Jedná se o konvoluci impulzní charakteristiky soustavy a obecného signálu $x(t)$. Komplexní frekvenční charakteristiku soustavy $H(\omega)$ lze vyjádřit jako Fourierův komplexní obraz impulzní charakteristiky soustavy $h(t)$:

$$H(\omega) = F\{h(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) e^{-j\omega t} dt. \quad (6.14)$$

Protože impulzní charakteristika soustavy $h(t)$ je pro nás hledaným parametrem, je nutné provést dekonvoluci vstupního impulzního budicího signálu $x(t)$ a měřeného signálu $y(t)$ [23,31,34]. Dekonvoluci nejsnáze provedeme pomocí podílu Fourierových komplexních spekter signálů $x(t)$ a signálu $y(t)$. Výsledkem podílu je komplexní frekvenční charakteristika soustavy $H(\omega)$. Uvedenou operaci lze popsat vztahem:

$$H(\omega) = \frac{Y(\omega)}{X(\omega)} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} y(t)e^{-j\omega t} dt}{\int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt}. \quad (6.15)$$

Z komplexní kmitočtové charakteristiky soustavy $H(\omega)$ lze dále odvodit reálnou charakteristiku soustavy $R(\omega)$ a imaginární charakteristiku soustavy:

$$H(\omega) = R(\omega) + jI(\omega). \quad (6.16)$$

Pro získání amplitudové frekvenční charakteristiky $A(\omega)$ je nutné vypočítat modul komplexní charakteristiky soustavy, tedy

$$A(\omega) = \sqrt{R^2(\omega) + I^2(\omega)}. \quad (6.17)$$

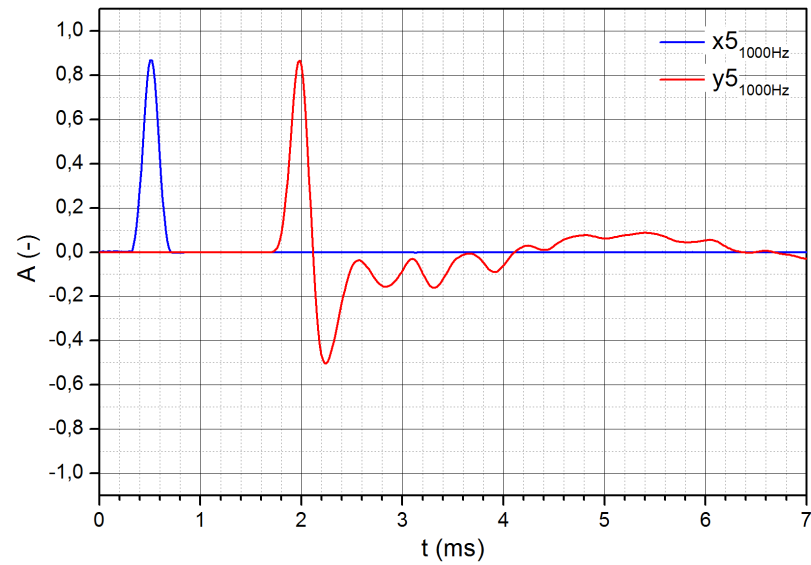
Amplitudová frekvenční charakteristika soustavy je zde v podstatě jedním z požadovaných a měřených parametrů (kap. 4.2). Pouze v důsledku praktického použití není tato frekvenční charakteristika udávána jako $A(\omega)$, ale jako závislost $A(f)$. Jako další parametr z komplexní frekvenční charakteristiky soustavy je fázová charakteristika soustavy $\varphi(\omega)$, která je jednou z klíčových vlastností zvukového systému, kterou potřebujeme znát a je možné ji z impulzního měření získat. Fázovou charakteristiku $\varphi(\omega)$ vypočteme z komplexní frekvenční charakteristiky $H(\omega)$ jako:

$$\varphi(\omega) = \tan^{-1} \left[\frac{I(\omega)}{R(\omega)} \right]. \quad (6.18)$$

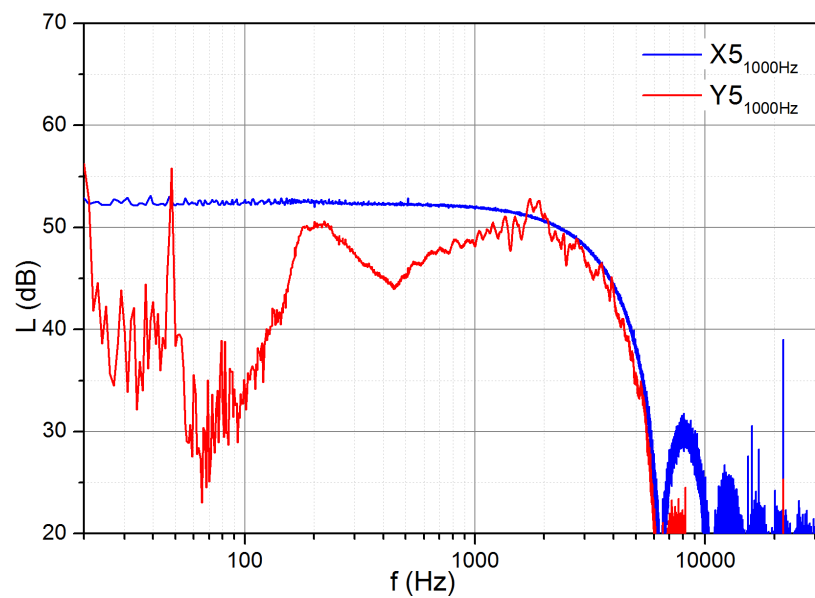
Na obr. 6.10 jsou zobrazeny časové průběhy signálů z modelového měření jednoho měniče ve volném akustickém poli. Signál $x_{51000\text{Hz}}(t)$ je snímán na výstupu výkonového zesilovače a signál $y_{51000\text{Hz}}(t)$ v definované vzdálenosti měřicího mikrofону od měřeného měniče.

Na obr. 6.11 je uvedeno amplitudové frekvenční spektrum impulzního signálu $y_{51000\text{Hz}}(t)$ měřeného mikrofónem na výstupu měniče a spektrum signálu $x_{51000\text{Hz}}(t)$ za výkonovým zesilovačem.

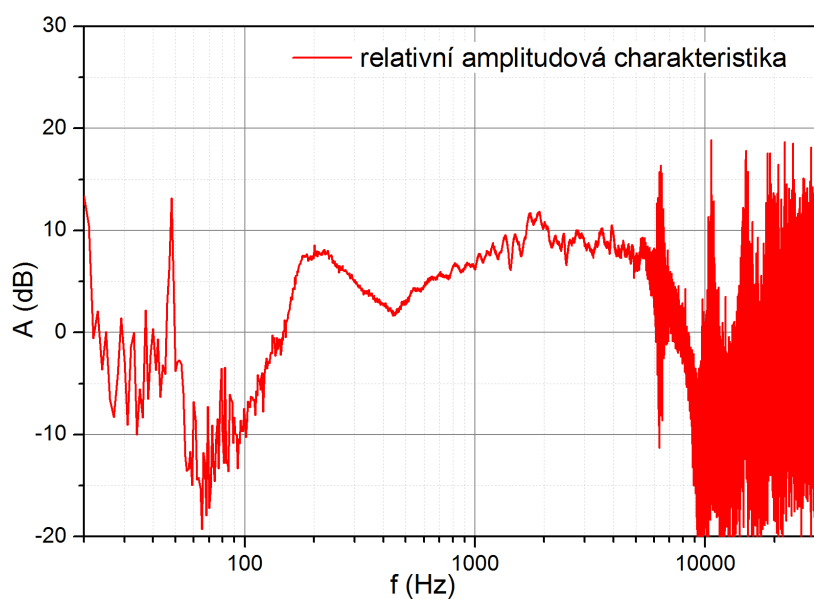
Na obr. 6.12 je uvedena amplitudová frekvenční charakteristika měniče $A(f)$, která byla vypočtena z komplexních spekter signálů $y_{51000\text{Hz}}(t)$ a $x_{51000\text{Hz}}(t)$. Zde vstupují do relativní frekvenční charakteristiky omezení daná typem impulzního signálu, který byl pro měření použit. Jako horní mez frekvenčního pásma lze pro daný signál $x_{51000\text{Hz}}(t)$ uvažovat hranici 4 kHz. Dolní mez frekvenčního pásma je omezena hladinou hlukového pozadí. Nedostatečný odstup hladiny hlukového pozadí se projeví jako zašumění měřené přenosové charakteristiky. Další parametr, který je možné získat z komplexní přenosové charakteristiky, je fázová frekvenční charakteristika. Její průběh je uvedený na obr. 6.13.



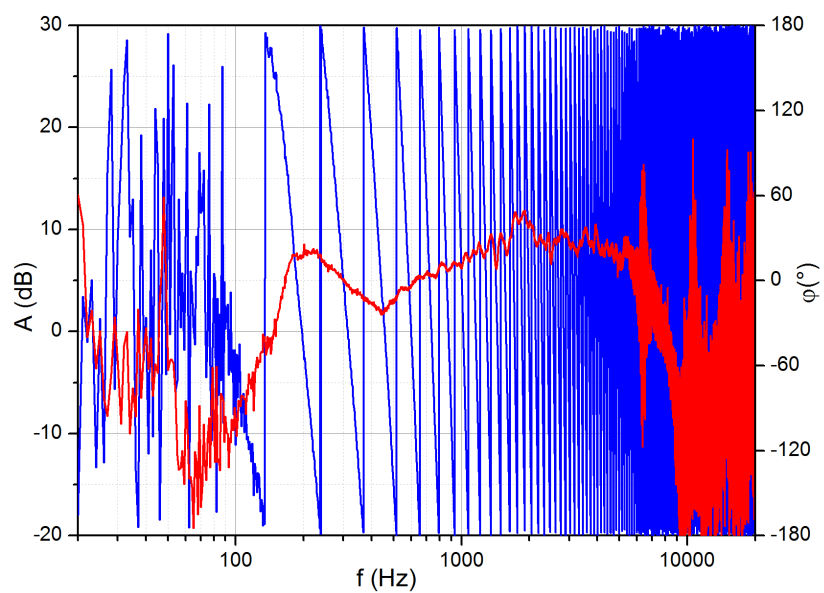
Obr. 6.10: Časový průběh signálu $x5_{1000\text{Hz}}$ a jeho změřená impulzní odezva.



Obr. 6.11: Amplitudové frekvenční spektrum signálů $x5_{1000\text{Hz}}(t)$ a $y5_{1000\text{Hz}}(t)$.

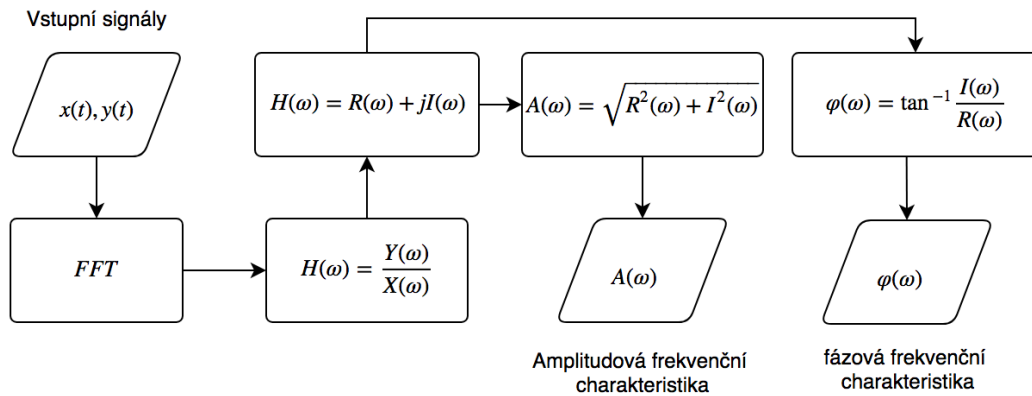


Obr. 6.12: Výsledek měření relativní amplitudové frekvenční charakteristiky měniče $A(f)$.



Obr. 6.13: Fázová frekvenční charakteristika měniče $\varphi(f)$.

Častá změna fáze o 360° je způsobena časovým zpožděním mezi měřeným signálem a signálem generovaným. Celý proces určení relativních přenosových charakteristik lze shrnout ve vývojovém diagramu na obr. 6.14. Všechna měření přenosových charakteristik jsou vždy frekvenčně omezena dle použitého impulzního signálu (kap. 6.2.1).



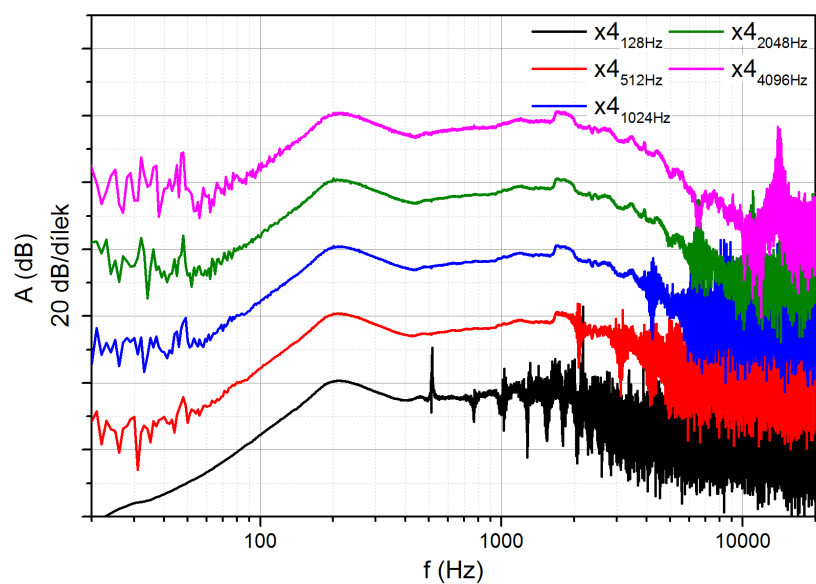
Obr. 6.14: Výpočet relativních přenosových charakteristik.

6.4. Skládání přenosových charakteristik získaných z impulzních odezev

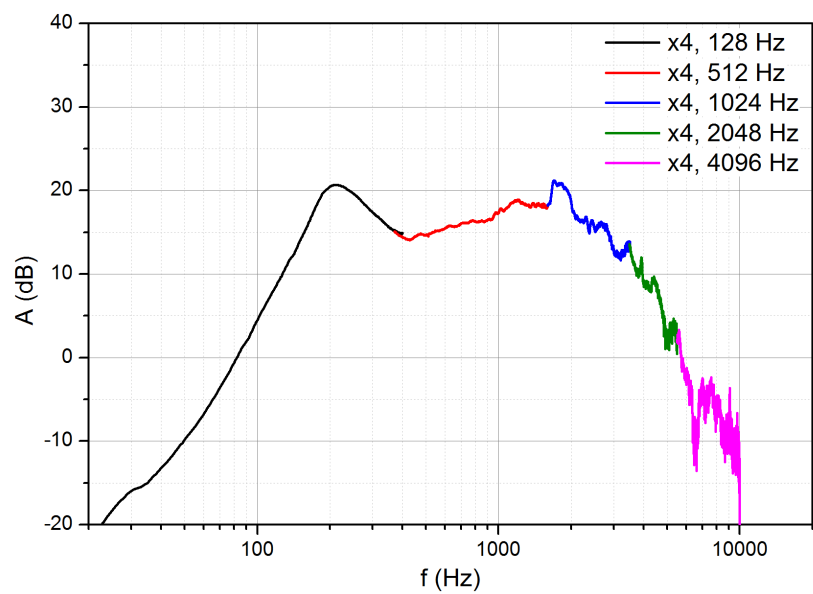
Po získání přenosových charakteristik pro jednotlivé impulzní signály je třeba provést jejich složení do výsledné přenosové charakteristiky, která reprezentuje relativní přenosovou charakteristiku měniče v celém požadovaném frekvenčním pásmu. Skládání relativních frekvenčních charakteristik je již jednoduchá úloha, která vychází ze znalosti vlastností impulzních signálů a znalosti hlukového pozadí.

Jak vypadají jednotlivé relativní amplitudově frekvenční charakteristiky pro více typů impulzních signálů je uvedeno na obr. 6.15, jednotlivé průběhy jsou z důvodu čitelnosti v grafu posunuty s krokem 20 dB.

Ukázka výsledné přenosové charakteristiky měniče z modelového měření ve volném akustickém poli, která vznikne složením dílčích přenosových charakteristik při použití výše uvedených signálů, je zobrazena na obr. 6.16. Charakteristiky jsou velmi jednoduše složeny tím způsobem, že je sledován rozdíl v překrývajících se částí frekvenčních spekter a pokud se začínou od sebe výrazně lišit, použije se spektrum z dalšího měření. Ukázka výsledných složených přenosových charakteristik změřených v kabině automobilu je v Příloze 3.



Obr. 6.15: Amplitudově frekvenční charakteristiky pro sadu impulzních signálů.



Obr. 6.16: Ukázka výsledné složené přenosové charakteristiky měniče.

7. Měření frekvenční závislosti zpoždění

Frekvenční závislost zpoždění $\tau_s(f)$ je klíčovým parametrem například pro určení skutečné geometrie rozmístění měničů v prostoru kabiny automobilu, které často neodpovídá například jednoduše změřené vzdálenosti měničů od posluchače. To je obvykle důsledkem směrového vyzařování měničů a především jejich zástavby do konstrukce automobilu (dveří, palubní desky, atd.).

Pro získání frekvenční závislosti zpoždění je možné prakticky použít dvě metody:

- zpoždění získané z fázové frekvenční charakteristiky,
- zpoždění získaná z korelační funkce.

Frekvenční závislost zpoždění získaná z fázové charakteristiky je v principu spojitá. Pokud jsou výsledky nejednoznačné, je možné použít měření pomocí impulzního signálu a korelační funkce v diskrétních frekvencích.

7.1. Frekvenční závislost zpoždění získaná z fázové přenosové charakteristiky

Z komplexní přenosové charakteristiky

$$H(\omega) = R(\omega) + jI(\omega) \quad (7.1)$$

je možné získat fázovou přenosovou charakteristiku $\varphi(\omega)$ jako

$$\varphi(\omega) = \tan^{-1} \left[\frac{I(\omega)}{R(\omega)} \right]. \quad (7.2)$$

Z definice skupinového zpoždění

$$\tau_s(\omega) = -\frac{d\varphi(\omega)}{d\omega} \quad (7.3)$$

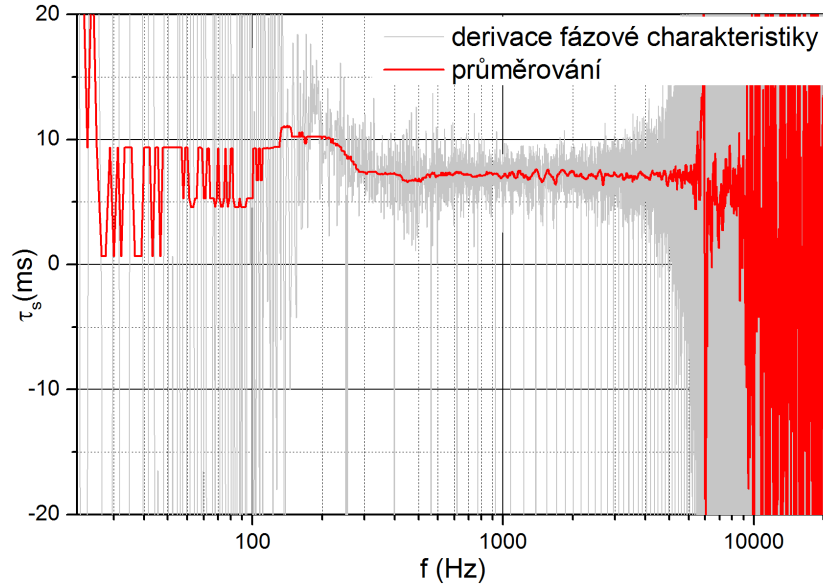
je možné získat přímo požadovanou frekvenční závislost zpoždění $\tau_s(f)$ [31].

Na obr. 7.1 je uvedena jako příklad derivace fázové charakteristiky z modelového měření měniče ve volném akustickém poli pro impulzní signál $x5_{1000\text{Hz}}$ (kap. 6.2.1). Vypočtená hodnota zpoždění je přibližně 7,1 ms a je prakticky konstantní ve frekvenčním pásmu 300 Hz až 5 kHz, což odpovídá frekvenčnímu rozsahu, ve kterém je daný reproduktor prakticky použitelný.

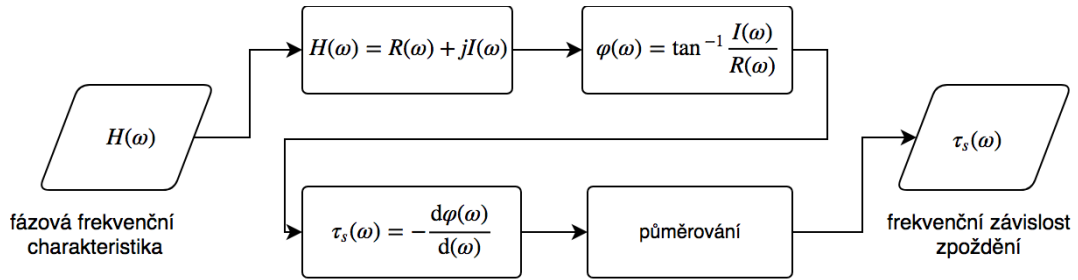
Protože obvykle nelze fázovou charakteristiku jednoduše analyticky popsat, je nutné provádět výpočet zpoždění vhodnou numerickou metodou derivace. Ve výsledné derivaci jsou velice výrazné špičky způsobené častou skokovou změnou ve fázové charakteristice

7 Měření frekvenční závislosti zpoždění

o 360° . Tyto záporné špičky je nutné z výsledku derivace odstranit například pomocí vhodného průměrování. Výsledná frekvenční závislost zpoždění po provedeném průměrování je zobrazená na obr. 7.1, schéma vyhodnocení pak v diagramu na obr. 7.2.



Obr. 7.1: Charakteristika frekvenční závislosti zpoždění $\tau_s(f)$ z modelového měření ve volném akustickém poli.



Obr. 7.2: Diagram výpočtu charakteristiky frekvenční závislosti zpoždění $\tau_s(f)$.

Z vypočteného zpoždění lze určit i vzdálenost měniče od posluchače jako

$$l_m = c_0 \cdot \tau_s, \quad (7.4)$$

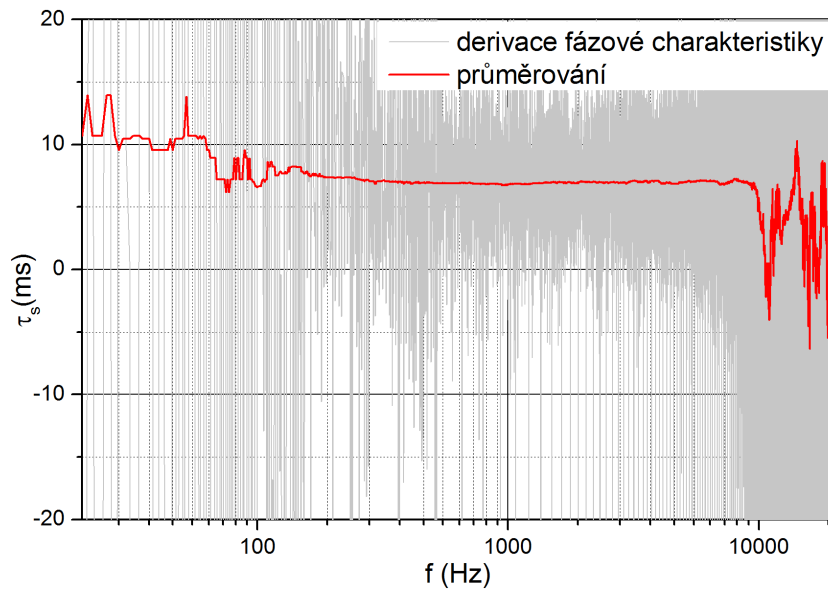
kde l_m odpovídá vzdálenosti měniče, c_0 je rychlost šíření ve vzduchu a τ_s je zpoždění na dané frekvenci nebo je konstantní v uvažovaném frekvenčním pásmu.

Pro ověření výpočtu zpoždění u modelového měření měniče ve volném akustickém poli (v bezdrazové komoře) byla ve frekvenčním pásmu 300 Hz – 5 kHz změřená hodnota zpoždění

7 Měření frekvenční závislosti zpoždění

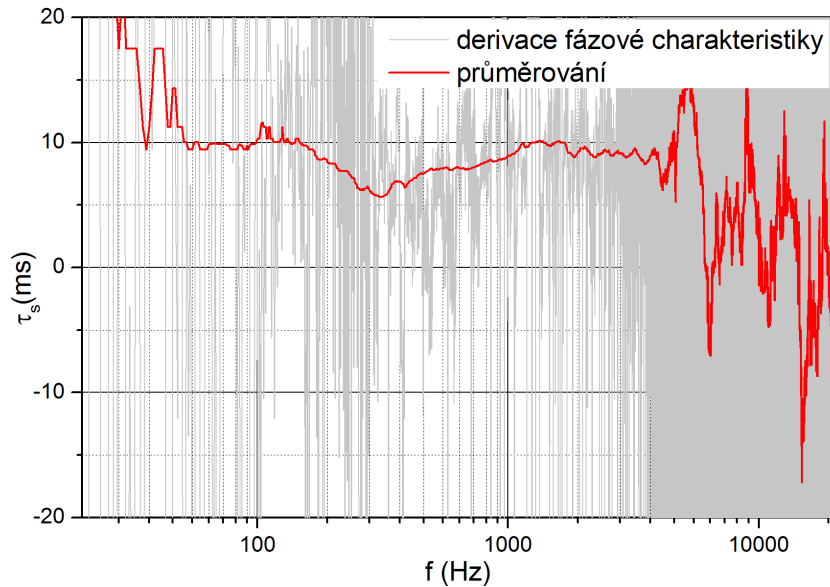
$\tau_s = 7,1$ ms, což odpovídá vzdálenost měniče 2,41 m. Reálná (změřená) vzdálenost měniče od měřicího mikrofону při daném modelovém měření byla 2,4 m. Měření vzdálenosti ze zpoždění signálu získaného z fázové charakteristiky tedy vykazuje dobrou shodu s modelem.

Na obrázku 7.3 je výsledek měření zpoždění ve volném akustickém poli stejné modelové situace pro signál $x_{58000\text{Hz}}$. I zde vychází výsledné zpoždění přibližně 7 ms v širším frekvenčním pásmu. Metoda tedy dosahuje konzistentních výsledků pro různé použité impulzní signály.



Obr. 7.3: Charakteristika frekvenční závislosti zpoždění $\tau_s(f)$ z modelového měření ve volném akustickém poli stejné modelové situace pro signál $x_{58000\text{Hz}}$.

Na obr. 7.4 je uvedený příklad měření zpoždění přímo v kabině osobního automobilu (konfigurace dle obr. 5.11). Měření bylo provedeno pro jeden měnič a signál $x_{512\text{Hz}}$, který zajišťuje v udávaném frekvenčním pásmu dostatečný odstup od hluku pozadí. Z tohoto příkladu je vidět reálný přínos měření frekvenční závislosti zpoždění. Změřená velikost zpoždění není konstantní ve frekvenčním pásmu, kde je měnič provozován, přestože vzdálenost měniče od posluchače je v tomto případě změřená jako 1,9 m. To je důsledek například vícecestného šíření signálu (a odpovídající amplitudové i fázové frekvenční charakteristiky). Obdobné změny ve zpoždění a jeho frekvenční závislosti budou důsledkem i zpracování signálu v DSP multimediální jednotky (například ekvalizací), což je nutné při nastavení zvukového systému akceptovat a korigovat.



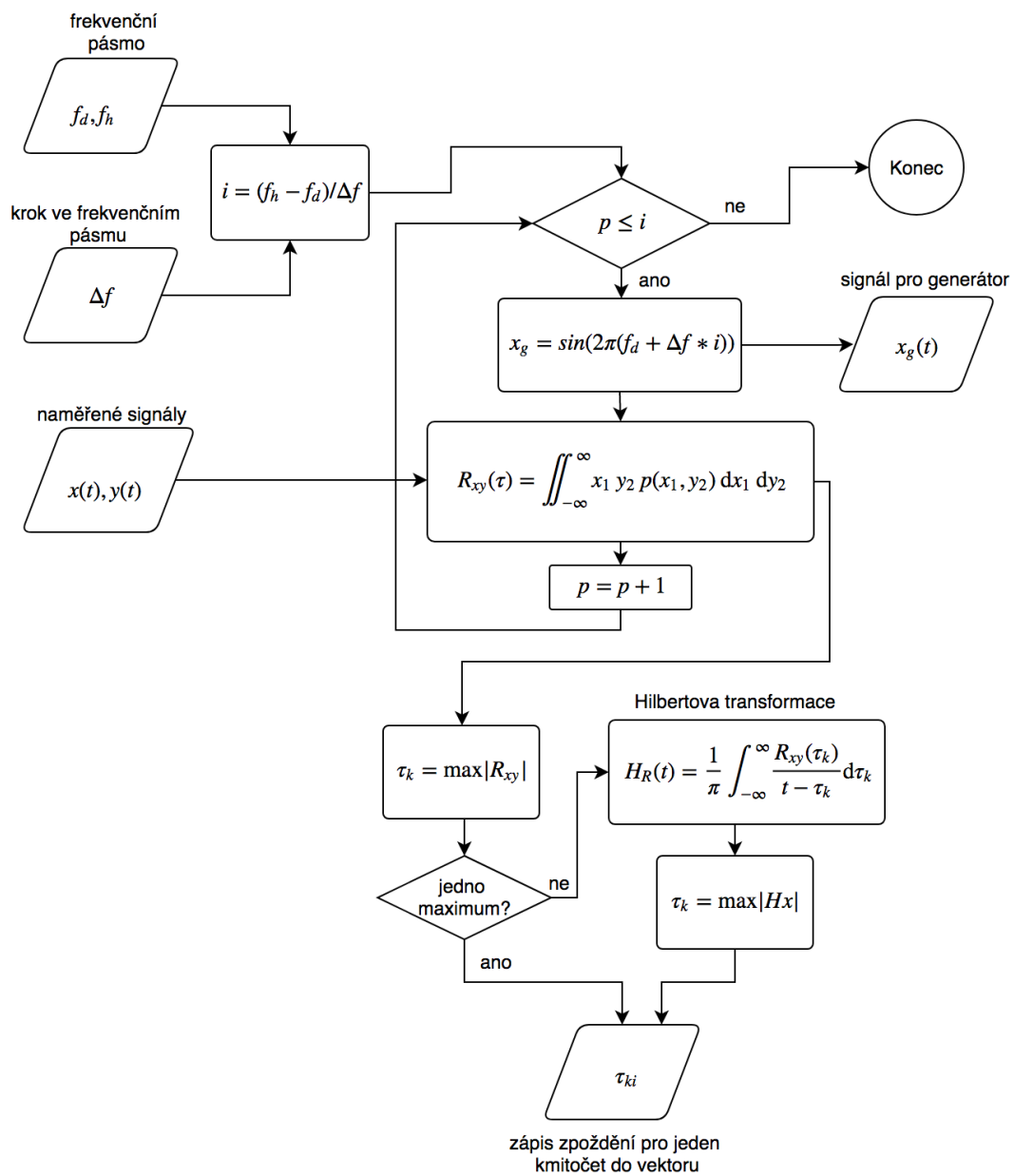
Obr. 7.4: Ukázka charakteristiky frekvenční závislosti zpoždění v kabině automobilu.

7.2. Frekvenční závislost zpoždění získaná z korelační funkce

Pro získání zpoždění pomocí korelační funkce je použito stejné skupiny impulzních signálů x_{3f} , jako v případě měření přenosových charakteristik (kap. 6.3). Základem této metody je výpočet vzájemné korelační funkce impulzních signálů a to signálu generovaného $x(t)$ a měřeného $y(t)$. Maximum korelační funkce odpovídá hledané hodnotě zpoždění na dané frekvenci, na kterém je generován měřicí signál. Vzájemnou korelační funkci lze vyjádřit jako:

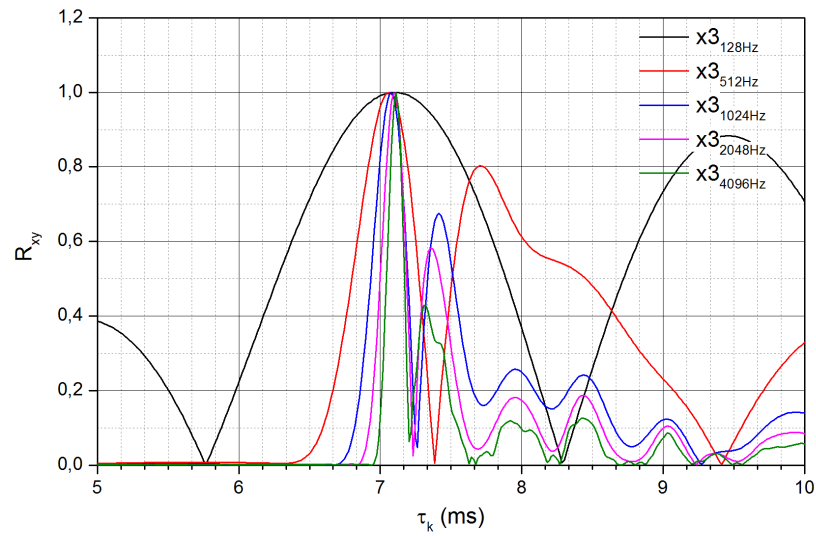
$$R_{xy}(\tau) = E[x_1 y_2] = \iint_{-\infty}^{\infty} x_1 y_2 p(x_1, y_2) dx_1 dy_2. \quad (7.5)$$

Takto získáme hodnotu zpoždění pro jednu frekvenci. Pro zjištění zpoždění na dalších frekvencích je nutné vygenerovat další impulzní signál na další frekvenci a měření opakovat. Celý postup měření v daném frekvenčním pásmu lze popsat pomocí diagramu na obr. 7.5.



Obr. 7.5: Diagram pro získání frekvenční závislosti zpoždění z korelační funkce.

Pro potvrzení správnosti měření zpoždění v bodech (pomocí korelační funkce) bylo provedeno modelové měření ve volném akustickém poli (v bezodrazové komoře). Pro stejnou konfiguraci měniče a měřicího mikrofону byly postupně generovány různé impulzní signály. Tím bylo sledováno, zda změna frekvence generovaného impulzního signálu neovlivní následný výpočet zpoždění. Výsledné hodnoty zpoždění pro jednotlivé signály jsou zobrazeny jako absolutní hodnoty maxim korelačních funkcí. Pro jednoduché porovnání byly výsledky normovány a jsou zobrazeny na obr. 7.6.



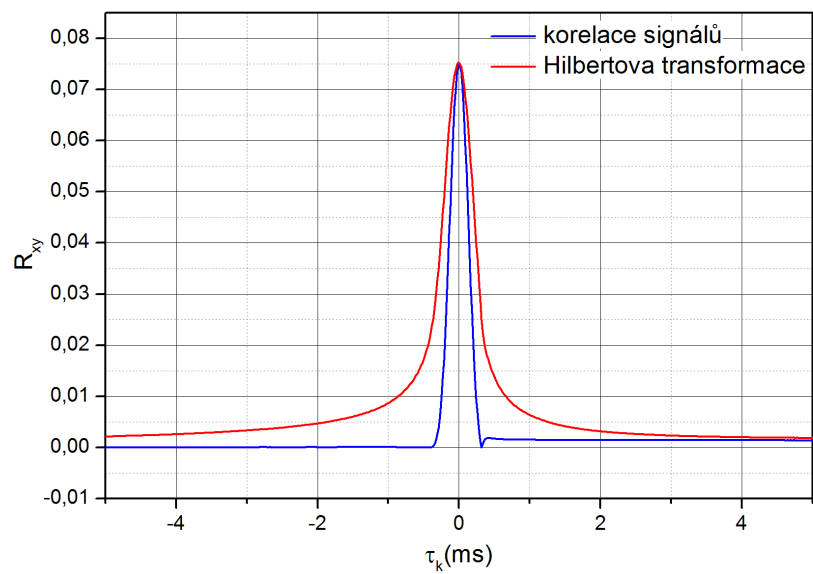
Obr. 7.6: Výsledné hodnoty zpoždění pro jednotlivé signály x_{3f} .

V kabině automobilu, kde bude probíhat reálné měření, je značně různorodý charakter akustického pole (volné, odrazové, odrazy vyšších řádů, více cest šíření zvuku, atd.). To může být příčinou, že výsledek korelace bude nejednoznačný, tedy může nastat situace, kdy se více hodnot blíží maximu funkce. Z toho důvodu je vhodné použít na výsledek korelační funkce Hilbertovu transformaci, která prakticky sleduje obálku korelační funkce a může výrazně zúžit oblast sledování právě jednoho maxima korelační funkce [31]. Výsledný vztah pak lze zapsat jako:

$$H_R(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{R_{xy}(\tau_k)}{t - \tau_k} d\tau_k. \quad (7.6)$$

7 Měření frekvenční závislosti zpoždění

Na obr. 7.7 je uvedený ilustrativní příklad z modelového měření situace, která byla popsána v kap. 5.7.1.



Obr. 7.7: Ilustrativní příklad použití Hilbertovy transformace při modelovém měření.

8. Možnosti identifikace vedlejších cesty šíření zvuku

Při nastavení zvukových systémů v automobilech se velice často setkáme s problematikou šíření zvuku jinými cestami, než je přímá cesta šíření od akustických měničů. Vedlejší cesty šíření zvuku lze rozdělit na dvě hlavní skupiny:

- vedlejší cesty šíření zvuku odrazy – odrazy zvuku prvního i vyšších řádů od jednotlivých odrazivých ploch v interiéru automobilu,
- vedlejší cesty šíření jako důsledek šíření vibrací konstrukce automobilu (karosérie a jiných konstrukčních celků).

Mechanické a geometrické uspořádání v kabině automobilu příliš nedovoluje odlišit tyto dvě hlavní skupiny od sebe, v řadě případů nelze nebo lze jen obtížně tyto cesty identifikovat od přímé cesty šíření. Lze ovšem vyslovit dva předpoklady:

- šíření zvuku odrazy je dominantní na středních a vysokých frekvencích od akusticky odrazivých povrchů. Frekvenční pásmo, kde jsou tyto druhy odrazu dominantní, leží v oblasti 500 Hz až 15 kHz. Dominantními odrazivými prvky v kabině automobilu jsou hlavně prosklené části a může nastávat i odraz od palubní desky s akusticky nevhodným povrchem, případně od plechových částí dveří,
- šíření zvuku vibracemi konstrukce je dominantní převážně v oblasti nízkých frekvencí, tedy v pásmu 20 Hz – 200 Hz. Vibrace konstrukce jsou vybudeny převážně u rovných a tenkých plechových dílů, často jsou tyto vibrace zjištělné u konstrukce dveří a dveřních výplní.

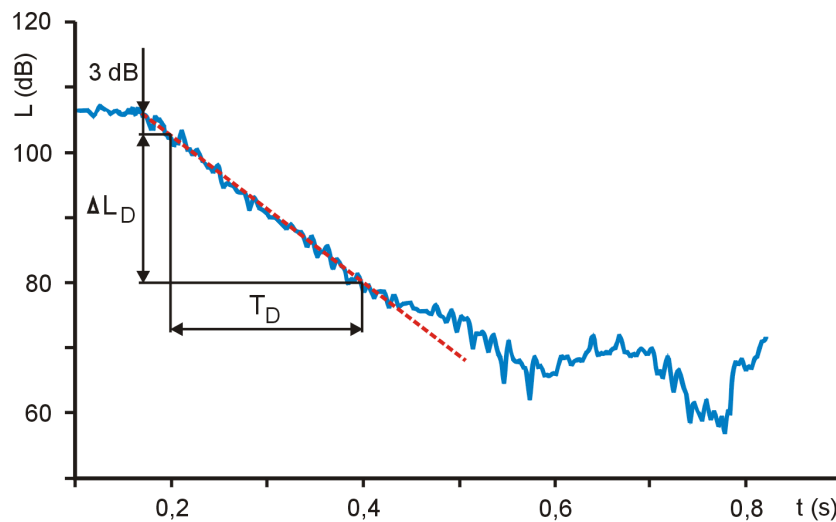
I když jsou uvedené oblasti frekvenčně vymezené pásmy, které se obvykle nepřekrývají, mohou nastat situace, kdy se jedno nebo druhé pásmo výrazně rozšíří a dojde k jejich překrytí a tím i ke kombinaci obou jevů ve vedlejších cestách šíření.

Eliminace vedlejších cest šíření v reálné situaci při nastavování zvukového systému již většinou není možná, protože automobil je obvykle ve finálním stavu mechanické konstrukce, která je v této fázi vývoje neměnitelná. Je ale důležité mít znalost charakteru vedlejších cest šíření, které mohou pomoci vyvarovat se chybám v návrhu obdobných konstrukčních řešení v budoucnosti a především při návrhu zpracování signálu (filtraci), které vybudení například nežádoucích rezonancí mechanických konstrukcí eliminuje nebo alespoň co nejvíce omezí.

Pro zjištění charakteru vedlejších cest šíření zvuku se ukázala jako relativně vhodná metoda, která principiálně vychází z metody měření doby dozvuku používané v prostorové akustice [35], tedy hodnocení frekvenční závislosti doby poklesu akustické energie při vybudení zvukového pole v automobilu vhodným signálem s charakterem přechodového děje. Na rozdíl od vyhodnocení doby dozvuku, která je v prostorové akustice obvykle udávána pro 1/3-oktávová pásma, je v tomto případě vhodnější použít metodu krátkodobé Fourierovy transformace a výpočet poklesových křivek řešit s výrazně lepším frekvenčním rozlišením,

než jsou 1/3-oktávová pásma. Důvodem je řešení rezonancí mechanických částí konstrukce automobilu, které jsou vybuzené zvukovým systémem, v pásmu především nízkých frekvencí (obvykle do 200 Hz).

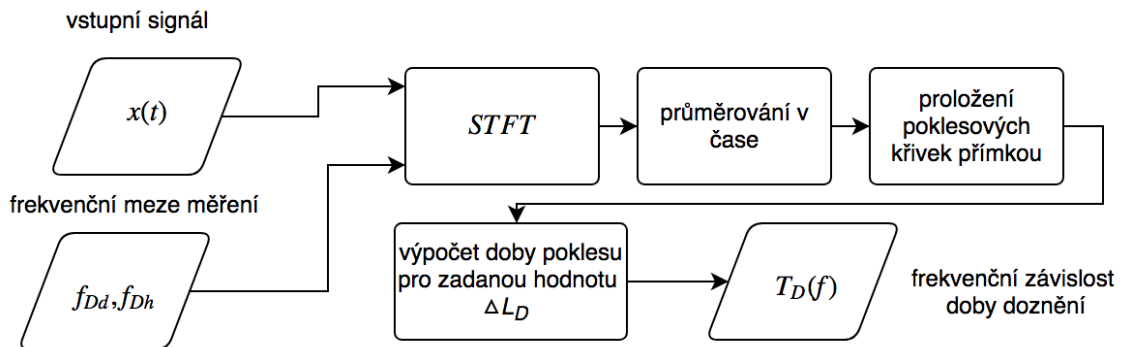
Pro zjištění oblastí rezonancí mechanických konstrukcí automobilu lze definovat parametr $T_D(f)$ jako frekvenční závislost doby poklesu hladiny akustického tlaku o zvolený interval ΔL_D po vybuzení prostoru akustickým signálem s charakterem přechodového děje, například po vypnutí šumového signálu ustáleného charakteru [27, 36]. Ukázka poklesu hladiny akustického tlaku na jedné spektrální čáře frekvenčního spektra určeného pomocí krátkodobé Fourierovy transformace (dále uváděno jako STFT) je na obr. 8.1.



Obr. 8.1: Pokles hladiny akustického tlaku po vypnutí šumového signálu na jedné spektrální čáře frekvenčního spektra určeného STFT analýzou.

Pokles hladiny akustického tlaku v intervalu 60 dB, případně 30 dB, jak je v prostorové akustice obvyklé pro parametry T_{60} nebo T_{30} , je v tomto případě prakticky nerealizovatelné a zbytečné měřit. Důvodem jsou obvykle velmi krátké časy poklesu, značné přetlumení interiéru automobilu a obvykle menší úrovně vybuzení akustickým signálem (s relativně vysokou úrovní hluku pozadí), než bývá obvyklé při měření doby dozvuku. Pro zjištění charakteru rezonance mechanické konstrukce stačí sledovat pokles akustické energie po vypnutí zdroje buzení o výrazně nižší hodnotu ΔL_D , například $\Delta L_D = 6$ dB, 12 dB, případně 18 dB. Pro zjištění rozvoje hladin akustického tlaku v čase je použita STFT analýza, kde se následně provede vyhodnocení doby poklesu hladiny akustického tlaku o zvolenou hodnotu ΔL_D .

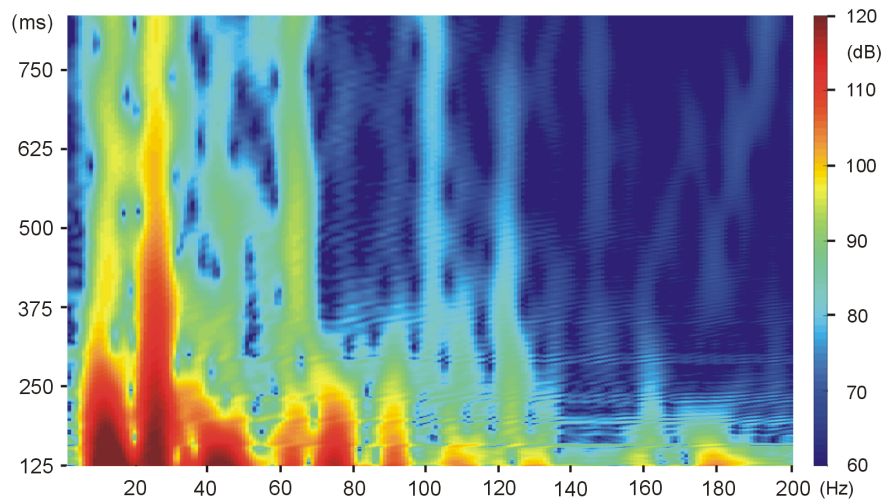
Celý proces lze naznačit pomocí následného vývojového diagramu:



Obr. 8.2: Vývojový diagram pro určení doby poklesu akustického tlaku o zvolenou hodnotu ΔL_D .

Pro nabuzení prostoru se využívá šumového generátoru, který je frekvenčně omezený pro sledované frekvenční pásmo. Provede se nabuzení prostoru šumovým signálem alespoň po dobu několika sekund a od okamžiku vypnutí buzení se provádí STFT analýza hladiny akustického tlaku.

Na obr. 8.3 je uveden výsledek STFT analýzy jako spektrogram poklesu hladiny akustického tlaku v kabině automobilu pro frekvenční pásmo do 200 Hz s frekvenčním rozlišením 1 Hz a časovým krokem přibližně 0,1 ms.

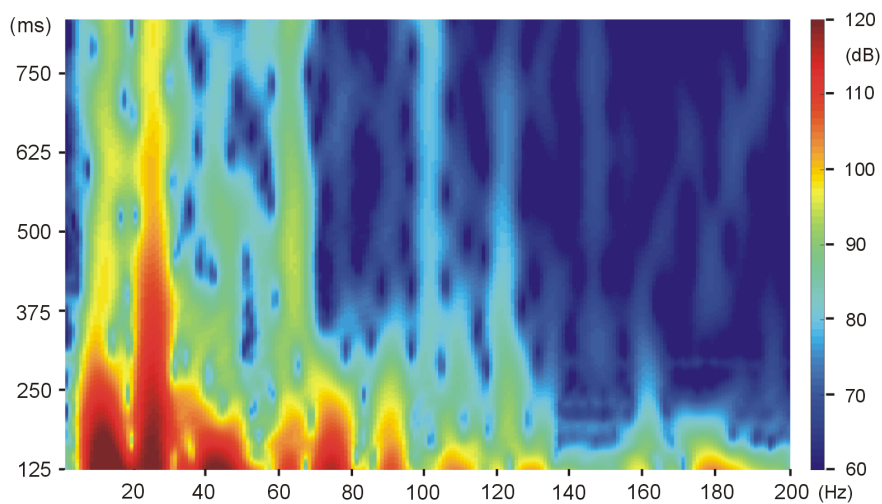


Obr. 8.3: Výsledek STFT analýzy jako spektrogram poklesu hladiny akustického tlaku v kabině automobilu.

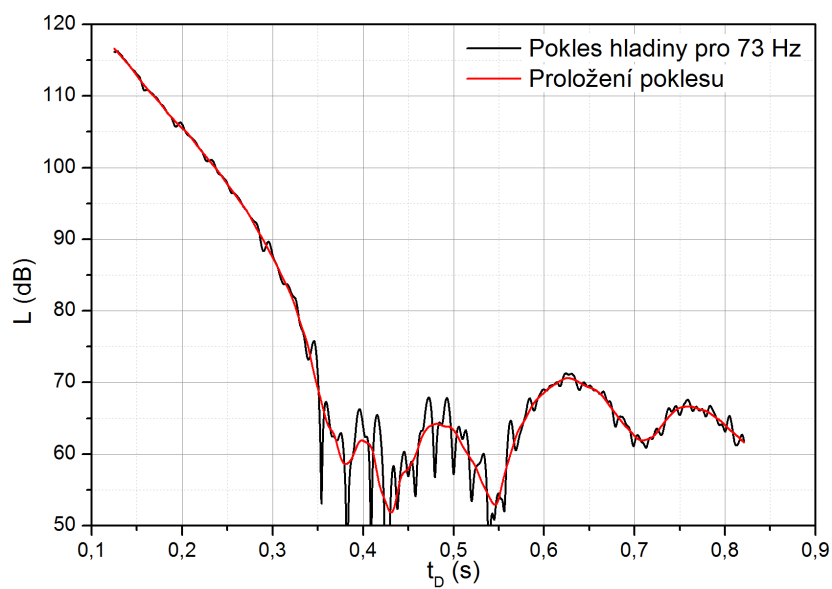
Již ze spektrogramu je viditelné, ve kterých frekvenčních oblastech dochází k menšímu tlumení akustické energie, tedy k delšímu času poklesu hladin akustického tlaku. Pro zjednodušení vyhodnocení je provedeno průměrování v čase pomocí lineární lokální regrese 1. stupně.

8 Možnosti identifikace vedlejších cesty šíření zvuku

Spektrogram průměrovaných poklesů hladin akustického tlaku je uveden na obr. 8.4. Jak uvedená situace vypadá pro konkrétní příklad jedné spektrální čáry pro frekvenci 73 Hz je uvedeno na obr. 8.5.

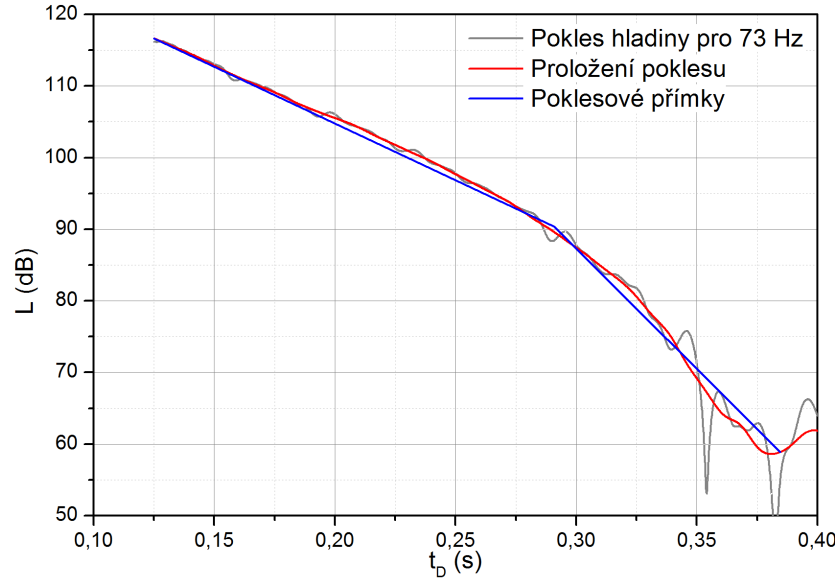


Obr. 8.4: Průměrovaný spektrogram pomocí lineární lokální regrese 1. stupně.



Obr. 8.5: Pokles hladiny akustického tlaku pro jednu spektrální čáru 73 Hz a jeho proložení.

Pro získání poklesových křivek pro jednotlivá frekvenční pásma je nutné použít průměrovanou hladinu akustického tlaku a proložit jí pomocí lineární regrese přímkou.

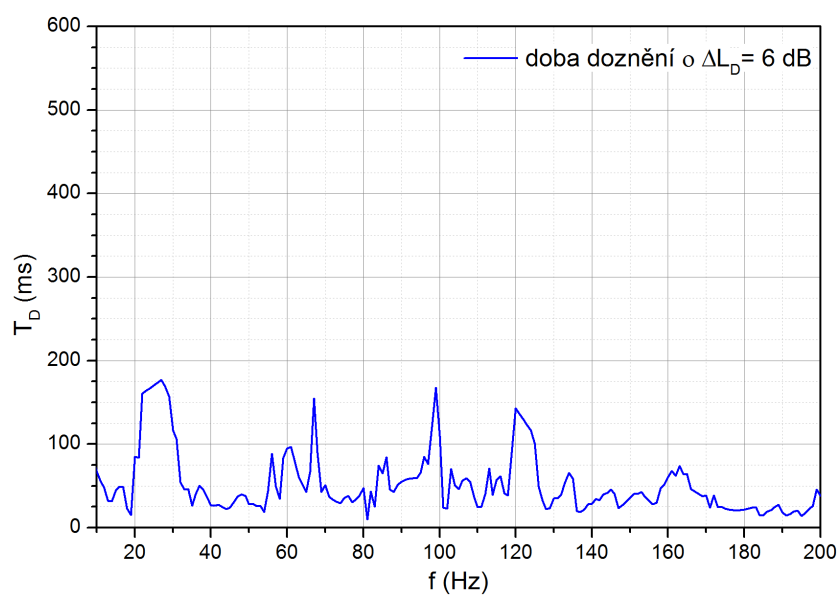


Obr. 8.6: Ukázka poklesových přímek pro frekvenci 73 Hz.

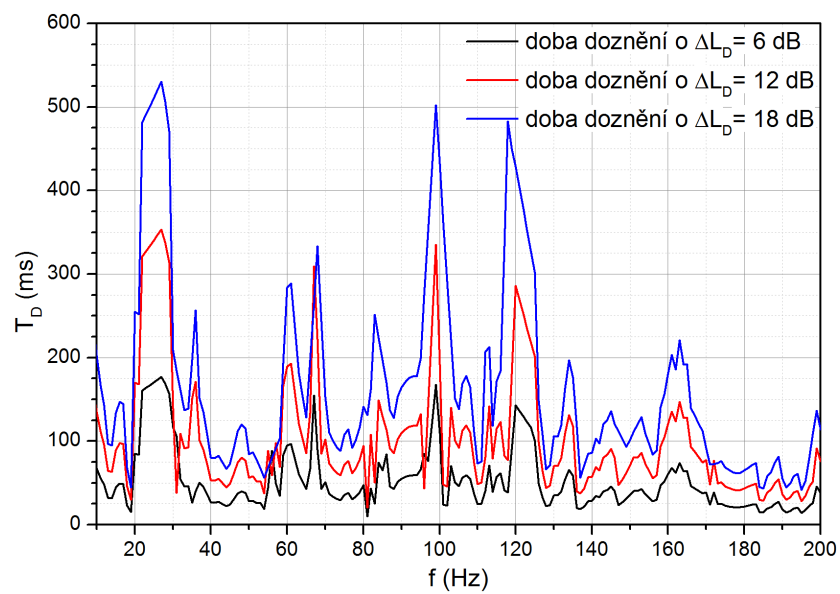
Přímky, které získáme lineární regresí, jsou poklesové přímky hladin akustického tlaku. Jak je z obrázku 8.6 vidět, pokles hladiny akustického tlaku v čase neobsahuje jen jeden zlom, tak jak by se dalo předpokládat, ale zlomů může být více. Pro potřeby dalšího zpracování použijeme poklesovou přímku první, což je obdobou vyhodnocení doby dozvuku v prostorové akustice [35]. Následně vypočteme jednoduše ze směrnice přímky čas, za který hladina poklesne o určenou hodnotu ΔL_D . To je pro danou frekvenci hledaná hodnota T_D , tedy doba doznění na jedné konkrétní spektrální čáře. Toto se opakuje pro všechny spektrální čáry v zadaném frekvenčním intervalu. Příklad měření parametru $T_D(f)$, v interiéru automobilu je uvedený v grafu na obr. 8.7. Parametr $T_D(f)$ se zdá být použitelným nástrojem pro identifikaci mechanických rezonancí a souvisejících problémů v konstrukci kabiny. V problémových frekvenčních pásmech (rezonancí) nastávají výrazně delší doby doznívání akustické energie, což se projevuje jako výrazné zvlnění frekvenční charakteristiky měničů, které jsou do mechanických konstrukcí zastavěné. To je obvykle nutné řešit při nastavování zvukových systémů jako jeden z prvních kroků.

Protože v kabině automobilu často nastávají dvojitě a vícenásobné zlomy v poklesových charakteristikách, je možné doby doznění vyhodnotit pro různé poklesy hladin. Jak takové vyhodnocení vypadá pro intervaly 6 dB, 12 dB a 18 dB je zobrazeno na obr. 8.8.

Pokud se vynesené křivky pro různě dlouhé doby poklesu začnou k sobě blížit, je pravděpodobné, že dochází k dvojitému zlomu v přenosových charakteristikách. Tato situace může nastávat při výrazných vibracích mechanických konstrukcí.



Obr. 8.7: Frekvenčně závislá doba doznění o $\Delta L_D = 6$ dB v kabině automobilu.



Obr. 8.8: Porovnání frekvenčně závislé doby doznění o $\Delta L_D = 6, 12$ a 18 dB v kabině automobilu.

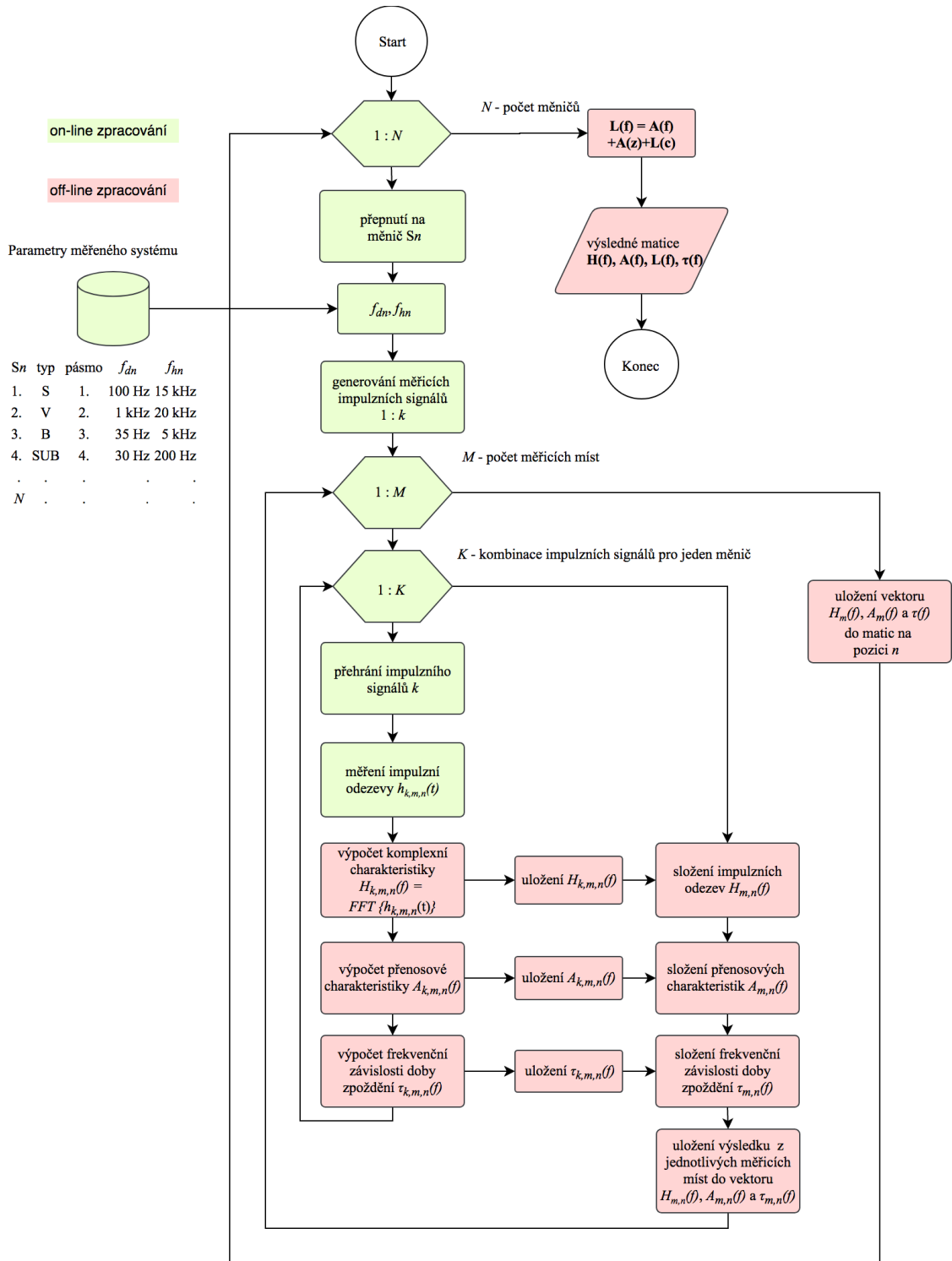
9. Celková konfigurace a řešení měřicí metody

Výsledná měřicí metoda je sestavena z dílčích částí jak vlastního měření v automobilu, tak vyhodnocení signálu, které jsou samostatně popsány v předešlých kapitolách. Zjednodušené schéma fungování měřicí metody jako celku je uvedeno na obr. 9.1. Jako vstupní údaje je nutné předem definovat počet měničů N , které jsou rozdělené do skupin S podle oblastí a frekvenčních pásem použití, například basové, středové, výškové, atd. Na základě těchto skupin (typů) jsou k jednotlivým měničům přiřazena příslušná frekvenční pásma (kap. 6.2.1), ve kterých budou generovány příslušné kombinace měřicích signálů k a následně skládány frekvenční závislosti požadovaných parametrů 6.4. Tato frekvenční pásma jsou určena pomocí dolních a horních mezních frekvencí f_{dn} a f_{hn} . Pro každý reproduktor $n \in \langle 1 \dots N \rangle$ je v každém měřicím místě $m \in \langle 1 \dots M \rangle$ provedeno měření impulzních odezev $h_{k,m,n}(t)$ kombinací signálů $k \in \langle 1 \dots K \rangle$. Z těchto impulzních odezev je vypočteno komplexní spektrum $H_{k,m,n}(f)$ metodou FFT a následně jsou provedeny výpočty přenosových charakteristik $A_{k,m,n}(f)$ a frekvenčních závislostí dob zpoždění $\tau_{k,m,n}(f)$. Z měření pro danou kombinaci signálu v konkrétním frekvenčním pásmu (oblasti použití reproduktoru) jsou pak složeny výsledné parametry $H_{m,n}(f)$, $A_{m,n}(f)$ a $\tau_{m,n}(f)$ pro daný reproduktor v příslušném měřicím místě.

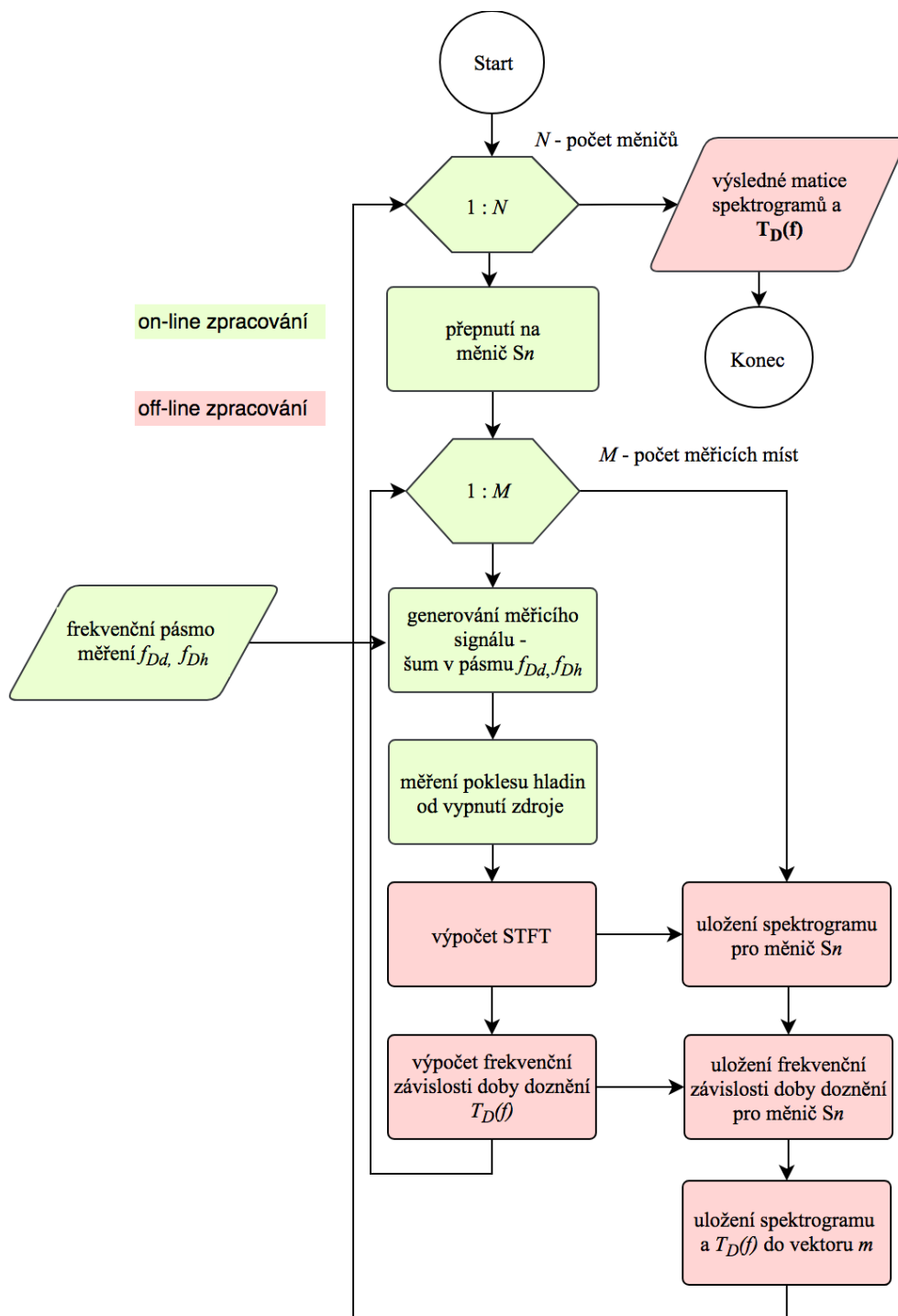
Výsledkem jsou 3 matice: matice komplexních impulzních obrazů $\mathbf{H}(\mathbf{f})$, matice přenosových charakteristik $\mathbf{A}(\mathbf{f})$ a matice frekvenčních závislostí zpoždění $\boldsymbol{\tau}_s(\mathbf{f})$. Každý prvek matice, který má pozici definovanou pomocí indexů m,n , jednoznačně určuje měnič v kombinaci s místem měření m .

$$H(f) = \begin{bmatrix} H_{1,1}(t) & \cdots & H_{1,N}(t) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{M,1}(t) & \cdots & H_{M,N}(t) \end{bmatrix} \quad (9.1)$$

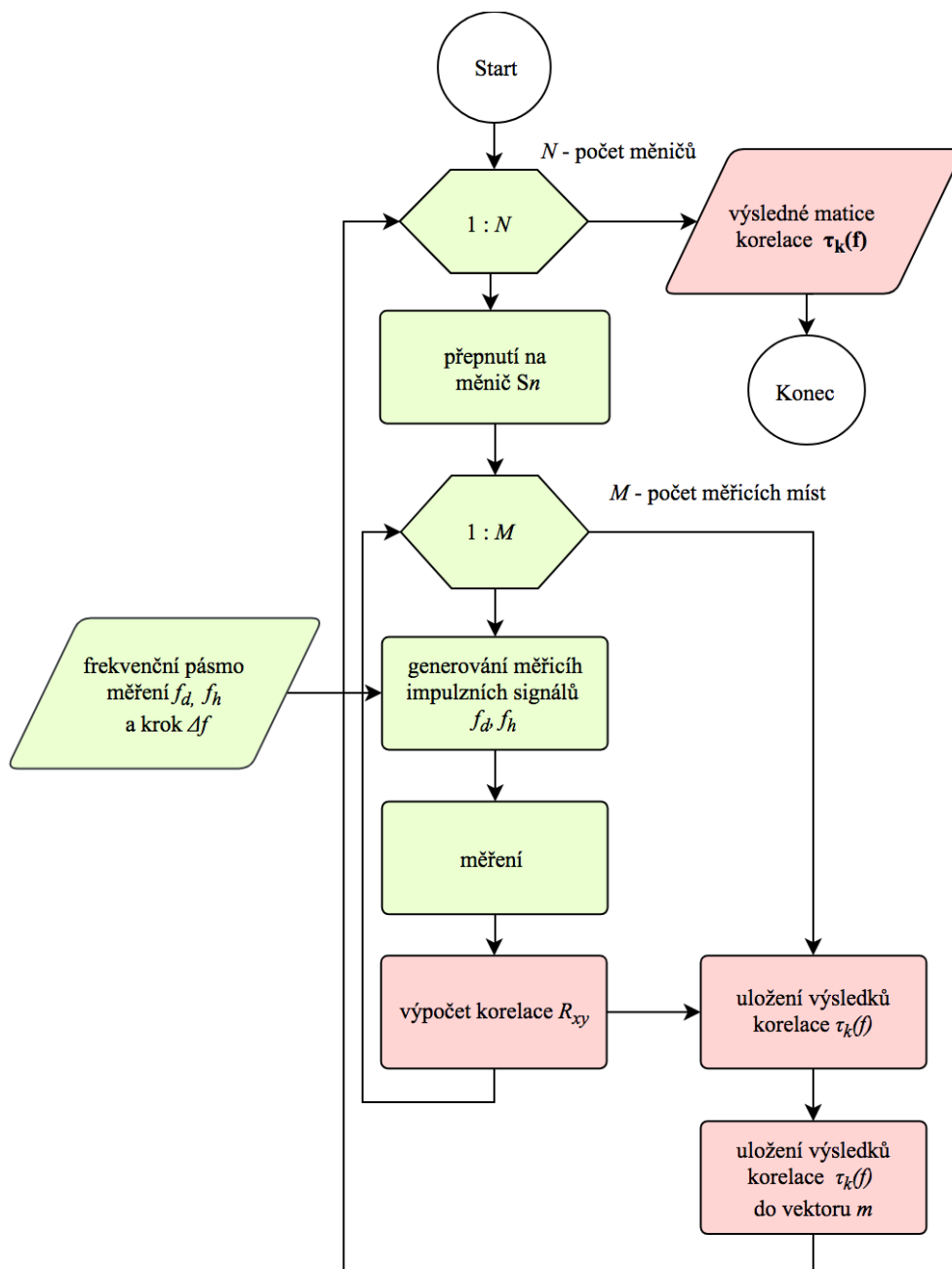
V této sekvenci kroků měření a vyhodnocení výsledků nejsou zahrnuty dvě části měřicí metody, které jsou schopny samostatně fungovat a je možné je použít na základě aktuálních požadavků. Jedná se o měření frekvenční závislosti doby poklesu hladiny akustického tlaku $T_D(f)$ (kap. 8, obr. 9.2) a alternativní způsob měření frekvenční závislosti zpoždění $\tau_k(f)$ pomocí korelační funkce (kap. 7.2, obr. 9.3).



Obr. 9.1: Zjednodušené schéma fungování měřicí metody jako celku.



Obr. 9.2: Schéma měření frekvenční závislosti doby poklesu hladiny akustického tlaku $T_D(f)$.



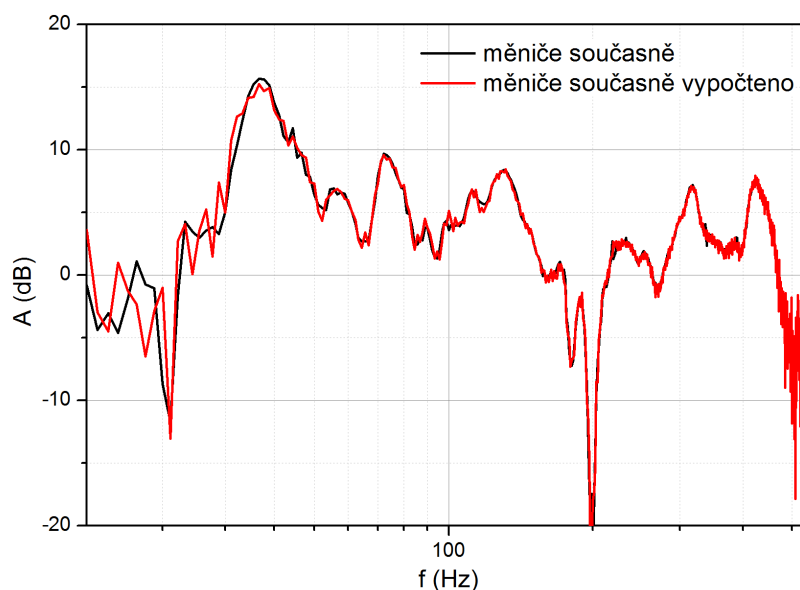
Obr. 9.3: Schéma alternativního způsobu měření frekvenční závislosti zpoždění $\tau_k(f)$ pomocí korelační funkce.

9.1. Ukázky použití měřicí metody

Výsledky měření vícekanálového zvukového systému automobilu navrženou měřicí metodou, které jsou tvořené maticí komplexních impulzních obrazů $\mathbf{H}(\mathbf{f})$, maticí přenosových charakteristik $\mathbf{A}(\mathbf{f})$ a maticí frekvenční závislosti doby zpoždění $\tau(\mathbf{f})$, slouží jako podklady pro získání informací o jednotlivých částech zvukového systému a pro nastavení jeho parametrů. Z jednotlivých prvků matic je dále možné provádět prostorové průměrování pro zvolená měřicí místa.

Zcela zásadní výhodou zvoleného formátu výsledků je možnost stanovit vliv jednotlivých měničů při jejich současně hrající kombinaci. Z jednotlivých prvků matice impulzních obrazů $\mathbf{H}(\mathbf{f})$ lze vypočítat jejich kombinací například přenosové funkce ve zvoleném měřicím místě (místě poslechu). Do výpočtu pak lze snadno doplnit a předem připravit i návrh případných signálových úprav (ekvalizace). Lze si tak předem alespoň částečně připravit výsledné signálové úpravy v jednotlivých kanálech zvukového systému bez složitého a časově náročného procesu postupného měření jednotlivých kroků signálových úprav v automobilu na zkušebně.

Ukázka výsledků vypočtené a reálně změřené amplitudové frekvenční charakteristiky kombinace současně hrajících basových měničů ve zvoleném místě poslechu je na obr. 9.4. Shodu obou charakteristik lze považovat za velmi dobrou.



Obr. 9.4: Vypočtené a reálně změřené amplitudové frekvenční charakteristiky kombinace současně hrajících basových měničů ve zvoleném místě poslechu.

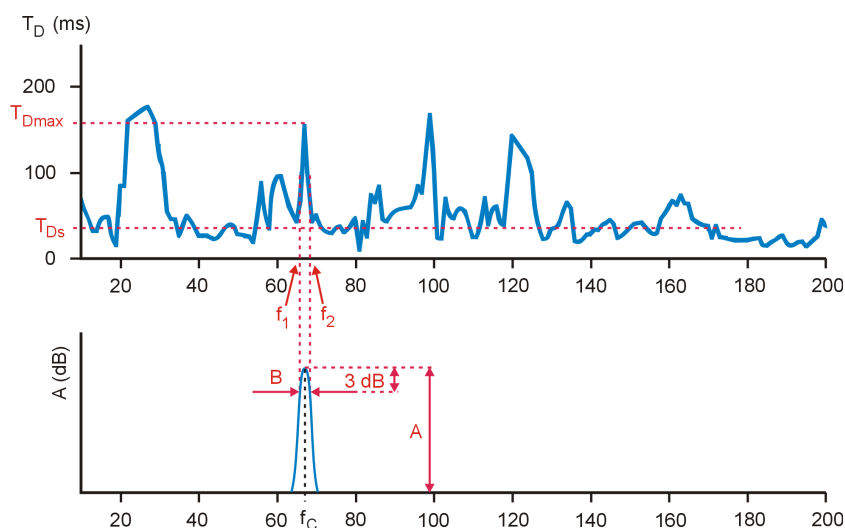
Další možností využití výsledků měření je návrh filtrů pro (alespoň částečnou) eliminaci nežádoucích vibrací mechanických konstrukcí, které jsou důsledkem zástavby reproduktorů do dveří automobilu. Z frekvenční závislosti doby poklesu hladiny akustického tlaku $T_D(f)$ (kap. 8) je možné pro identifikované frekvenční pásmo nežádoucích vibrací určit parametry filtru zařazeného do příslušného kanálu zvukového systému. Na obr. 9.5 je ukázka nežádoucích vibrací v oblasti nízkých frekvencí detekovaných pomocí parametru $T_D(f)$, kdy jako filtr omezující vybuzení vibrací bude zvolena pásmová zadrž realizovaná ve zvukovém systému například nastavením parametrického ekvalizéru s parametry:

šířka pásma: $B = f_2 - f_1$

střední frekvence: $f_C = f_1 + \frac{B}{2}$

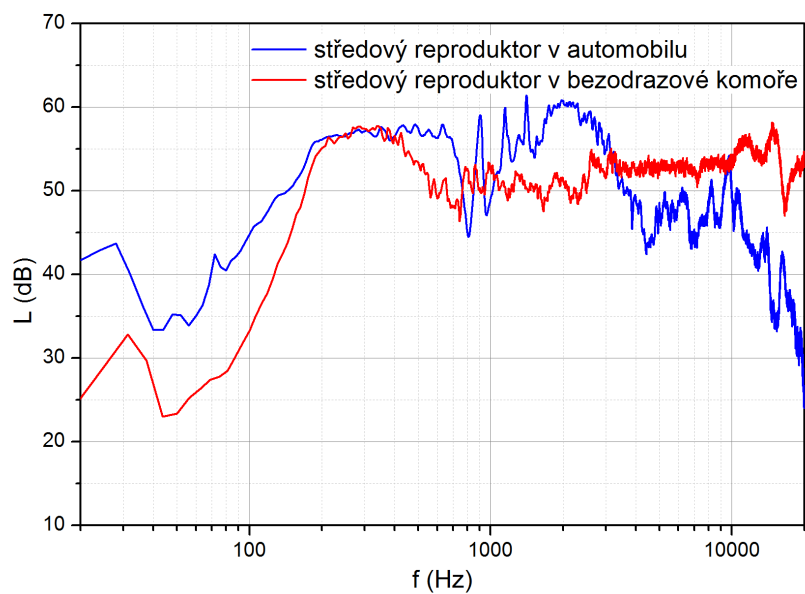
činitel jakosti: $Q = \frac{f_C}{B}$

zdvih: $-A$ (dB)

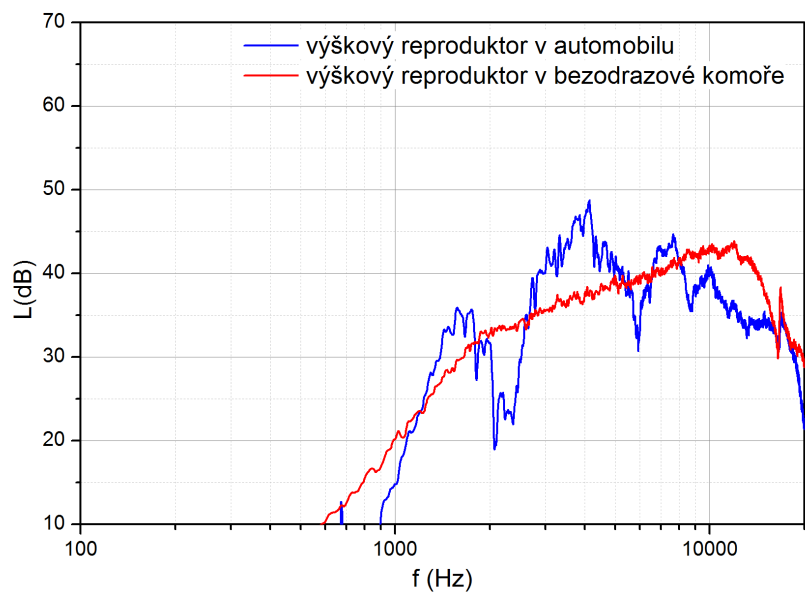


Obr. 9.5: Odstranění nežádoucích vibrací v oblasti nízkých frekvencí pomocí filtru omezujícího vybuzení vibrací.

Na obr. 9.6 a 9.7 je pak ukázka vlivu zástavby středového a výškového reproduktoru do dveří automobilu, která je reprezentovaná měřením frekvenční závislosti hladiny akustického tlaku (amplitudové charakteristiky) $L(f)$.



Obr. 9.6: Ukázka vlivu zástavby středového reproduktoru v kabině automobilu.



Obr. 9.7: Ukázka vlivu zástavby výškového reproduktoru v kabině automobilu.

10. Závěr

Ozvučovací systémy používané v automobilech různých cenových a kvalitativních tříd jsou velmi specifickými případy vícekanálových zvukových systémů. Často disponují poměrně velkým počtem kanálů, které jsou využity nejen pro vícepásmovou reprodukci, ale i jako různé efektové kanály (Surround), případně pro lepší lokalizaci zvuku ve stereobázi a v prostoru. Signálové zpracování bývá řešeno pomocí DSP procesoru a obvykle přináší značné možnosti jak ve frekvenčních, tak v dynamických úpravách zvuku v jednotlivých kanálech. To sice přináší značné možnosti ve zvyšování kvality zvuku v ozvučovaném prostoru, ale zároveň výrazně zvyšuje nároky na nastavování parametrů těchto zvukových systémů i na návrh vhodné koncepce celého (a obvykle značně variabilního) signálového zpracování. S rozvojem vícekanálových ozvučovacích systémů tak souvisí i rozvoj odpovídajících měřicích metod, které jsou využívány při relativně komplikovaném nastavování vícekanálových zvukových systémů. V rámci disertační práce byla navržena a realizována měřicí metoda, která je využitelná pro optimalizaci nastavení vícekanálových ozvučovacích systémů používaných v automobilech. Jedná se o specifické prostředí, které je charakteristické především relativně velkou ozvučovanou plochou vzhledem k celkovým rozměrům automobilu a ne zcela ideální zástavbou elektroakustických měničů vzhledem k pozicím posluchačů. Charakter zvukového pole v automobilu bývá ovlivněn i podílem vedlejších cest šíření zvuku, jak odrazy zvuku různého řádu, tak vibracemi konstrukcí, které jsou důsledkem zástavby reproduktorů. To vše přináší poměrně specifické nároky na způsob i možnosti nastavení vícekanálových zvukových systémů v automobilech.

Splnění stanovených cílů disertační práce:

- Byly posouzeny koncepce ozvučovacích systémů, které jsou součástí výbavy automobilů různých cenových kategorií. Jako základ každého ozvučovacího systému je uvažována multimedialní jednotka, která je vybavená přehrávačem hudebních signálů, což je využitelné pro přehrávání příslušných měřicích signálů používaných v navržené měřicí metodě. Na základě vlastních zkušeností s nastavováním těchto vícekanálových zvukových systémů byly stanoveny jejich klíčové parametry, které je nutné měřit – amplitudové frekvenční charakteristiky (relativní i absolutní) a frekvenční závislosti zpoždění signálu v jednotlivých kanálech. I když měřených parametrů může být výrazně více, pro nastavování zvukových systémů uvažované koncepce jsou zvolené parametry zcela dostačující.
- Pro měření vybraných parametrů byly posouzeny různé možné způsoby jejich měření. Zcela zásadními omezujícími faktory byly požadované frekvenční rozsahy jednotlivých kanálů zvukových systémů, které jsou v automobilech používány, jejich dynamický rozsah a především hlukové pozadí, při kterém musí být navržena měřicí metoda funkční. Předpokládá se použití měřicí metody jak v uzavřených prostorech vývojových

laboratoří, tak ve venkovních prostorech zkušeben, takže hluk pronikající z venkovního prostoru do interiéru automobilu nelze během měření zanedbat. Pro měření všech požadovaných parametrů je základem měřicí metody impulsní měření, kdy jsou využívány kombinace zvolených impulsních signálů a následný způsob vyhodnocení jednotlivých požadovaných parametrů. U frekvenční závislosti zpoždění signálu je kromě metody měření z fázové charakteristiky k dispozici i alternativní způsob měření využívající vzájemnou korelační funkci.

- Navržená impulsní měřicí metoda umožňuje měřit vybrané parametry – amplitudové frekvenční charakteristiky i frekvenční závislosti zpoždění jednotlivých kanálů zvukového systému automobilu ve stanovených frekvenčních pásmech. Kombinace použitých impulsních signálů zaručuje funkčnost měřicí metody ve specifickém prostředí automobilu s velmi rozdílnou vzdáleností elektroakustických měničů jak od posluchače, tak mezi sebou. Signály jsou zároveň koncipovány tak, aby vyhovovaly požadavkům na odstup od hlukového pozadí při měření v automobilech umístěných ve venkovním prostoru zkušebny. Specifickou vlastností navržené měřicí metody je způsob přehrávání měřicích signálů, kdy je využíván přehrávač dostupný v multimediální jednotce ozvučovacího systému (CD mechanika, paměťové SD karty). To vylučuje možnost synchronního měření vstupního signálu, ale naopak přináší výhodu měření parametrů testovaného zvukového systému včetně vlastností jednotlivých kanálů multimediální jednotky. To výrazně pomáhá včas zjistit případné problémy v signálovém zpracování v multimediální jednotce, což při vývoji zvukových systémů v automobilech nebývá nijak neobvyklé. Znalost parametrů jednotlivých kanálů multimediální jednotky v kombinaci s elektroakustickými měniči (reproduktory) je navíc zcela zásadní pro nastavování celého ozvučovacího systému. Součástí navržené měřicí metody je i identifikace případných nežádoucích mechanických vibrací částí konstrukce automobilu, které se v důsledku projevují jako vedlejší cesta (cesty) šíření zvuku při zástavbě reproduktorů v automobilu.
- Funkčnost měřicí metody jako celku i jejích jednotlivých dílčích algoritmů byla průběžně ověřována jak při modelových měřeních v bezodrazové akustické komoře, tak v reálné situaci na dvanáctikanálovém zvukovém systému vyšší cenové i kvalitativní kategorie v automobilu při jeho různých konfiguracích.

Předpokládá se, že další výzkum bude orientován na dosažení co nejlepší optimalizace a efektivity celého procesu nastavování i značně rozsáhlých vícekanálových zvukových systémů v automobilech. Cílem je co největší automatizace celého tohoto procesu. Navržená měřicí metoda tak tvoří efektivní základ pro budoucí automatizovaný systém, kdy zvolené parametry umožňují nastavovat vícekanálové systémy různých cenových i kvalitativních kategorií.

11. Citovaná literatura

- [1] ČSN EN 60268–3 ed. 2. *Elektroakustická zařízení – Část 3: Zesilovače*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [2] ČSN EN 60268–5. *Elektroakustická zařízení – Část 5: Reprodukory*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2004.
- [3] *Technical Guidelines for Dolby Stereo Theaters*, Dolby Laboratories, 1994.
- [4] Relative and Absolute Sound Pressure Levels for Motion-Picture Multichannel Sound Systems –Applicable for Analog Photographic Film Audio, Digital Photographic Film Audio and D-Cinema. *SMPTE RP 200:2012*, White Plains, NY. [SMPTE RECOMMENDED PRACTICE].
- [5] Dubbing Stages (Mixing Rooms), Screening Rooms and Indoor Theaters–B-Chain Electroacoustic Response. *SMPTE ST 202:2010*, White Plains, NY. [SMPTE STANDARD].
- [6] *Audison*, [online] [cit. 1. 9. 2018]. Dostupné z: <http://audisonbitdrive.eu>.
- [7] HEILMANN, G.; MAYER, S.; MEYER, A.; DÖBLER, D. Car interior measurements using 3D-microphone arrays. *INTER-NOISE 2007, August 28–31, 2007, Istanbul, Turkey*. [Conference paper].
- [8] BINELLI, M.; VENTURI, A.; AMENDOLA, A.; FARINA, A. Experimental Analysis of Spatial Properties of the Sound Field Inside a Car Employing a Spherical Microphone Array. *Audio Engineering Society Convention 130, May 13–16, 2011, London, UK*. [Convention Paper 8338].
- [9] CHOI, C.; KIM, L.-H.; DOO, S.; OH, Y.; SUNG, K.-M. Assessment of Sound Field in a CAR. *Audio Engineering Society Convention 113, October 6–8, 2002, Los Angeles, USA*. [Convention Paper 5701].
- [10] SVOBODNIK, A.J.; RUIZ, G. Virtual Development of Mercedes Premium Audio Systems. *Audio Engineering Society 36th International Conference, June 2–4, 2009, Dearborn, USA*. [Conference paper].
- [11] ARETZ, M.; VORLÄNDER, M. Combined wave and ray based room acoustic simulations of audio systems in car passenger compartments, Part II: Comparison of simulations and measurements. *Appl. Acoust.* 2014, **76**, 52–65.
- [12] BRIX, S.; SLADÉCZEK, C.; FRANCK, A.; ZHYKHAR, A.; CLAUSEN, C.; GLEIM, P. Wave Field Synthesis Based Concept Car for High-Quality Automotive Sound. *Audio Engineering Society 48th International Conference, September 21–23, 2012, Munich, Germany*. [Conference paper].

- [13] CHEER, J.; ELLIOTT, S.J.; GÁLVEZ, M.F.S. Design and Implementation of a Car Cabin Personal Audio System. *J. Audio Eng. Soc.* 2013, **61**, 412–424.
- [14] NOWAK, J.; STRAUSS, M. Sound field reproduction analysis in a car cabin based on microphone array measurements. *Audio Engineering Society 48th International Conference, September 21–23, 2012, Munich, Germany*. [Conference paper].
- [15] TERVO, S.; PÄTYNEN, J.; KAPLANIS, N.; LYDOLF, M.; BECH, S.; LOKKI, T. Spatial Analysis and Synthesis of Car Audio System and Car Cabin Acoustics with a Compact Microphone Array. *J. Audio Eng. Soc.* 2015, **63**, 914–925.
- [16] TÜRCKHEIM, F. von; MÜNCH, T. Automated Sound Optimization of Car Audio Systems using Binaural Measurements and Parametric IIR Filters. *Audio Engineering Society Convention 137, October 9–12, 2014, Los Angeles, USA*. [Convention Paper 9166].
- [17] CHRISTOPH, M.; KRONLACHNER, M. Improvement of Personal Sound Zones by Individual Delay Compensation. *Audio Engineering Society – Conference on Sound Field Control, July 18–20, 2016, Guildford, UK*. [Conference paper].
- [18] BĚHAL, L. *Realizace mikrofonního pole pro měření parametrů ozvučovacího systému v automobilech*. Plzeň, 2016. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická.
- [19] ITU–T P.57. *Artificial ears*. Geneva: International Telecommunication Union, 2013.
- [20] ITU–T P.58. *Head and torso simulator for telephonometry*. Geneva: International Telecommunication Union, 2013.
- [21] KUTTRUFF, H. *Acoustics: An introduction*. Taylor&Francis, 2007. ISBN 978-0-203-97089-8.
- [22] BOURGEOIS, J.; MINKER, W. *Time-Domain Beamforming and Blind Source Separation*. Springer, 2009. ISBN 978-0-387-68835-0.
- [23] JAN, J. *Číslíková filtrace, analýza a restaurace signálů*. Akademické nakladatelství, VUTIU, 2002. ISBN 8021429119.
- [24] ĎAĎO, S. *Syntéza měřicích přístrojů*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1994. ISBN 80-01-01102-X.
- [25] RAUSCHER, Ch. *Fundamentals of Spectrum Analysis*. Rohde & Schwarz, 2001. ISBN 978-3939837015.
- [26] *The Fundamentals of Signal Analysis: Application Note 243*, Hewlett Packard, 1994.
- [27] HARRIS, F.J. On the Use of Windows for Harmonic Analysis with the Discrete Fourier Transform. *Proceedings of the IEEE*. 1978, **66**, 51–83.

- [28] PREIS, D. A Catalog of Frequency and Transient Responses. *J. Audio Eng. Soc.* 1977, **25**, 99–1007.
- [29] KAPLANIS, N.; BECH, S.; TERVO, S.; PÄTYNEN, J.; LOKKI, T.; van WATER-SCHOOT, T.; JENSEN, S.H. A Method for Perceptual Assessment of Automotive Audio Systems and Cabin Acoustics. *Audio Engineering Society Conference: 60th International Conference: DREAMS, February 3–5, 2016, Leuven, Belgium*. [Conference paper].
- [30] ŠKVOR, Z. *Elektroakustika – měření II*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1990. ISBN 978-8001012581.
- [31] KADLEC, F. *Zpracování akustických signálů*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-01-02588-8.
- [32] VAVŘÍN, P.; JURA, P. *Systémy, procesy a signály II*. Brno: PC-DIR, 1996. ISBN 978-8021407275.
- [33] OPPENHEIM, A.V.; SCHAFER, R.W.; BUCK, J.R. *Discrete-Time Signal Processing* Prentice-Hall, Inc., 1998. ISBN 0-13-754920-2.
- [34] PESQUET, J.-C.; BENAZZA-BENYAHIA, A.; CHAUX, C. A SURE Approach for Digital Signal/Image Deconvolution Problems. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2009, **57**, 4616-4632.
- [35] KUTTRUFF, H. *Room acoustics*. Spon Press, 2009. ISBN 978-0-203-87637-4.
- [36] GUNNESS, D.W.; HOY, W.R. A Spectrogram Display for Loudspeaker Transient Response. *Audio Engineering Society Convention 119, October 7–10, 2005, New York, USA*. [Convention Paper 6568].

12. Práce disertanta

Seznam publikací

- [I] **ZUZJAK, L.** Konstrukce vícekanálového mikrofonního předzesilovače. V *Elektrotechnika a informatika 2012. Část 2., Elektronika*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2012. 147–150. ISBN: 978-80-261-0119-2
- [II] KOUDELA, L.; KARBAN, P., TUREČEK, O., **ZUZJAK, L.** Modeling of loudspeaker using hp-adaptive methods. *COMPUTING*, 2013, roč. 95, č. 1, 473–485. ISSN: 0010-485X
- [III] TUREČEK, O.; **ZUZJAK, L.** Focal: SM9. *Muzikus*, 2013, roč. 23, č. 3, 68-70. ISSN: 1210-1443
- [IV] **ZUZJAK, L.** Measurement of loudspeakers in a standard box with modifying mount. Souhrná výzkumná zpráva, 2013.
- [V] **ZUZJAK, L.**; TUREČEK, O. Výběr mikrofonů pro metodu měření difuzity. V *Setkání uživatelů PULSE 2013: 11. ročník: CD sborník*. Praha: Spectris Praha spol. s r.o., 2013. 82–87. ISBN: 978-80-904648-3-4
- [VI] **ZUZJAK, L.** RME: MADiface XT. *Muzikus*, 2014, roč. 24, č. 6, 66–69. ISSN: 1210-1443.
- [VII] **ZUZJAK, L.**; TUREČEK, O. Optimalizace měřicího řetězce pro měření difuzity odrazivých akustických prvků. V *Elektrotechnika a informatika 2014. Část 1., Elektrotechnika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2014. 163–166. ISBN: 978-80-261-0367-7
- [VIII] TUREČEK, O.; **ZUZJAK, L.**; TUČEK, J.; SCHLOSSER, M. Měřicí systém pro měření akustických parametrů difuzorů. Západočeská univerzita v Plzni, 2014.
- [IX] **ZUZJAK, L.** RME ADI-8: DS Mk III. *Muzikus*, 2014, roč. 24, č. 1, 78–81. ISSN: 1210-1443
- [X] **ZUZJAK, L.**; TUREČEK, O. SPL Crimson: audio interface + monitor controller. *Muzikus*, 2014, roč. 24, č. 7, 76–77. ISSN: 1210-1443
- [XI] **ZUZJAK, L.**; KAREL, J.; TUREČEK, O. Optimization of the measurement system for determination of the diffusion and reflection coefficients. V *10th European Congress and Exposition on Noise Control Engineering (EuroNoise 2015) – Proceedings. Maastricht: The European Acoustics Association*, 2015. 1445–1448. ISSN: 2226-5147

- [XII] KAREL, J., **ZUZJAK, L.**; TUREČEK, O. Selection of microphones for diffusion measurement method. V *10th European Congress and Exposition on Noise Control Engineering (EuroNoise 2015) – Proceedings. Maastricht: The European Acoustics Association*, 2015. 1461–1466. ISSN: 2226-5147
- [XIII] TUREČEK, O.; KAREL, J., **ZUZJAK, L.** Speaker parameters analysis. KOSTAL CR, spol. s. r. o., 2015.
- [XIV] **ZUZJAK, L.**; TUREČEK, O. Measurement and possible solutions of the non-uniform sound field in the automotive industry. In *Proceedings of the INTER-NOISE 2016, 45th International congress and exposition on noise control engineering*. Berlín: German Acoustical Society (DEGA), 2016. 399-401. ISBN: 978-3-939296-11-9, ISSN: 0105-175x
- [XV] PETRÁŠOVÁ, I. ; KARBAN, P.; TUREČEK, O.; BOUZEK, S., **ZUZJAK, L.**, SCHLOSSER, M., KROFT, R., Numerical modeling of acoustic field of loudspeaker, V *Proceedings of 2017 18th International Conference Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*. Kutná Hora, Czech Republic, 2017. ISBN: 978-1-5386-1040-4.
- [XVI] **ZUZJAK, L.**; TUREČEK, O. Advanced Method for Measurement of Parameters of Multi-channel Sound Systems. V *The Euronoise2018 Proceedings*, 2018, 777–780. ISSN: 2226-5147

Príspevky na konferenciách

- [XVII] **L. Zuzjak**, J. Karel, O. Tureček, *Optimization of the Measurement System for Determination of the Diffusion and Reflection Coefficients*, 10th European Congress and Exposition on Noise Control Engineering (Euronoise 2015), 31. května – 3. června 2015, Maastricht, Nizozemsko. (prezentace ve formě posteru)
- [XVIII] J. Karel, O. Tureček, **L. Zuzjak** *The Selection of the Microphones for Diffusion Measurement Method*, 10th European Congress and Exposition on Noise Control Engineering (Euronoise 2015), 31. května – 3. června 2015, Maastricht, Nizozemsko. (spoluautor posteru)
- [XIX] **L. Zuzjak**, O. Tureček, *Measurement and Possible Solutions of the Non-uniform Sound Field in the Automotive Industry*, 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering (INTER-NOISE 2016), 21. – 24. srpna 2016, Hamburg, Německo. (prezentace ve formě posteru)
- [XX] **L. Zuzjak**, O. Tureček, *Advanced Method for Measurement of Parameters of Multi-channel Sound System*, 11th European Congress and Exposition on Noise Control Engineering (Euronoise 2018), 27. – 31. května 2018, Heraklion, Řecko. (prezentace ve formě posteru)

Seznam použitých symbolů a zkratek

Seznam použitých symbolů

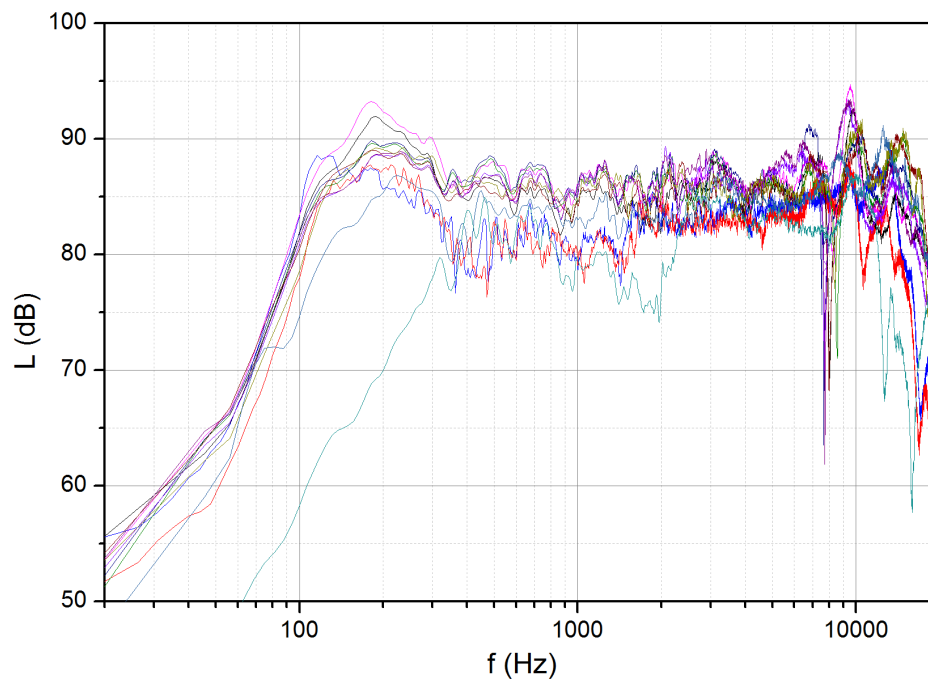
$A(f)$	relativní amplitudová frekvenční charakteristika
$L(f)$	frekvenční závislost hladiny akustického tlaku
$\tau_s(f)$	frekvenční závislost zpoždění získaná z přenosové funkce
$\tau_k(f)$	frekvenční závislost zpoždění získaná z korelační funkce
$m(t)$	měřená odezva systému
$h(t)$	impulzní odezva systému
$s(t)$	generovaný měřicí signál
S_N	N -tý zdroj signálu
M_M	M -té místo poslechu
$h_r(t)$	impulzní odezva vedlejší cesty šíření
$x(t)$	obecný signál
f_S	vzorkovací frekvence
T_r	doba záznamu
N_S	počet vzorků posloupnosti v záznamu
$x[n]$	diskrétní signál
t	čas
ω	úhlová frekvence
f	frekvence
A_z	hodnota zesílení zesilovače
L_c	citlivost měniče
A_g	úroveň signálu před poklesem
L_b	hladina hlukového pozadí
L_g	hladina generovaného impulzního signálu
xs_h	generovaný signál
f_d	dolní frekvence
f_h	horní frekvence
$H(\omega)$	komplexní frekvenční charakteristika soustavy
$R(\omega)$	reálná část komplexní frekvenční charakteristiky
$I(\omega)$	imaginární část komplexní frekvenční charakteristiky
$\varphi(\omega)$	fázová přenosová charakteristika
c_0	rychlost šíření zvuku ve vzduchu
l_m	vzdálenost měniče
$R_{xy}(\tau)$	vzájemná korelační funkce
$T_D(f)$	doba poklesu hladiny akustického tlaku
B	šířka pásma
f_C	střední frekvence
Q	činitel jakosti

Seznam použitých zkratk

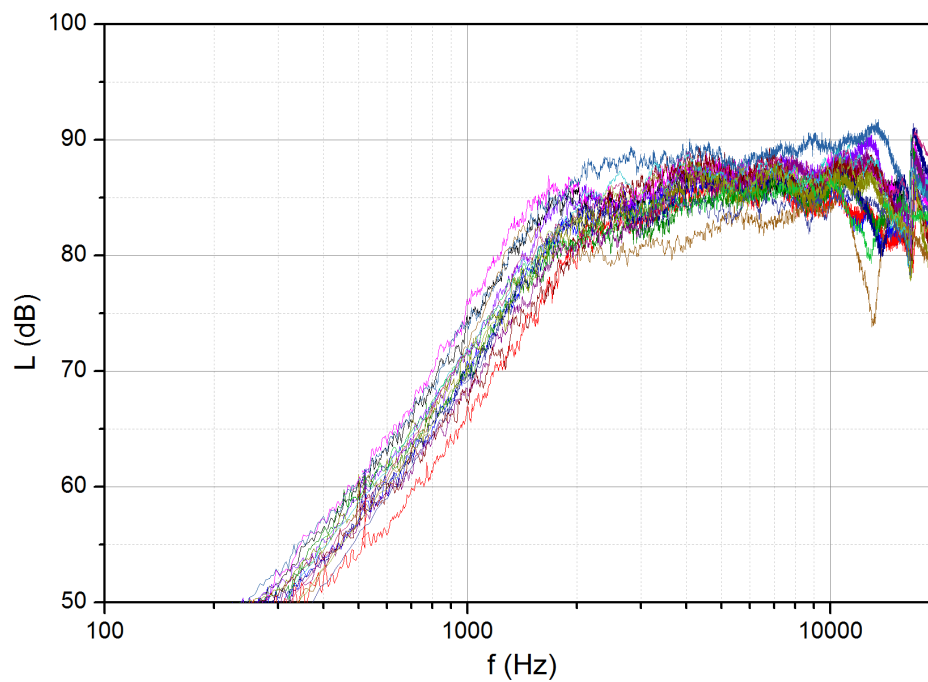
DSP	digitální signálový procesor	<i>Digital Signal Processor</i>
TDOA	–	<i>Time Direct of Arrival</i>
HATS	umělá hlava	<i>Head and Torso Simulator</i>
ITU	mezinárodní komunikační unie	<i>International Telecommunication Union</i>
ERP	–	<i>Ear Reference Point</i>
FFT	rychlá Fourierova transformace	<i>Fast Fourier transform</i>
STFT	krátkodobá Fourierova transformace	<i>Short-time Fourier Transform</i>

Příloha 1

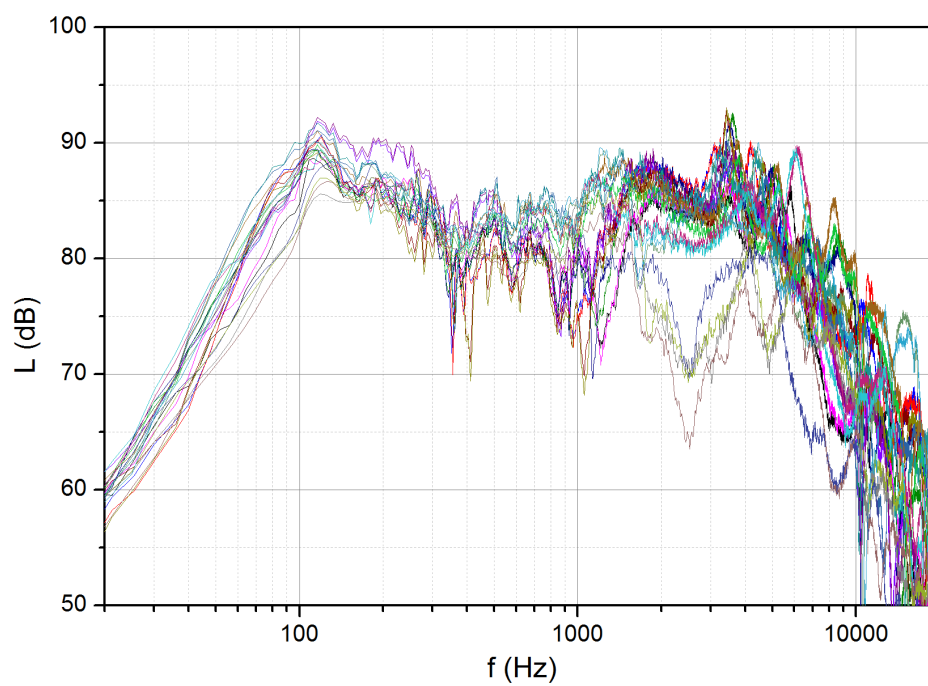
P1 – Frekvenční závislosti citlivosti některých středových reproduktorů.



P1 – Frekvenční závislosti citlivosti některých výškových reproduktorů.

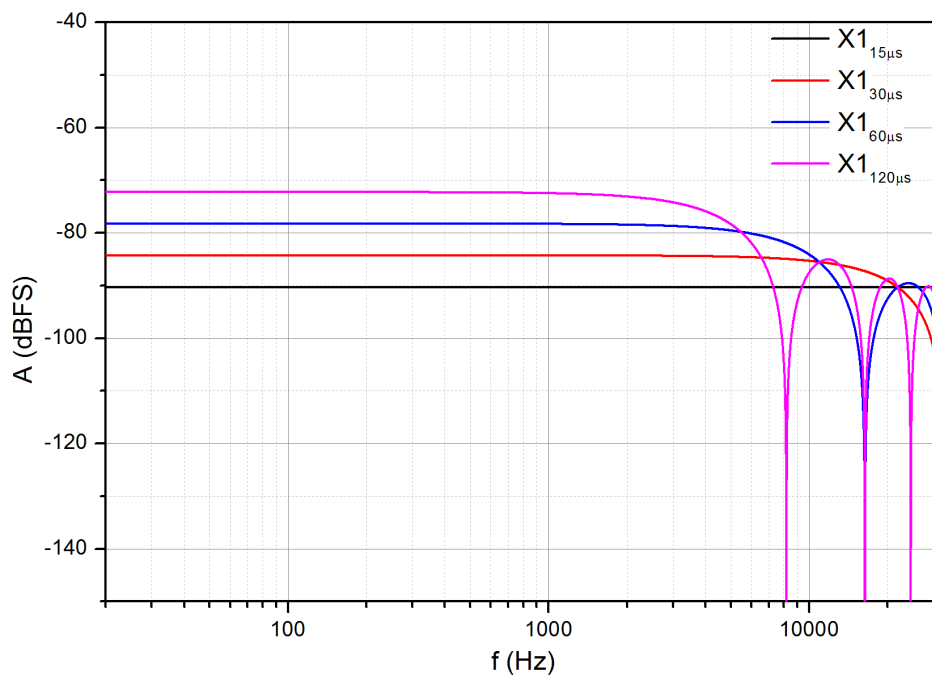


P1 – Frekvenční závislosti citlivosti některých basových reproduktorů.

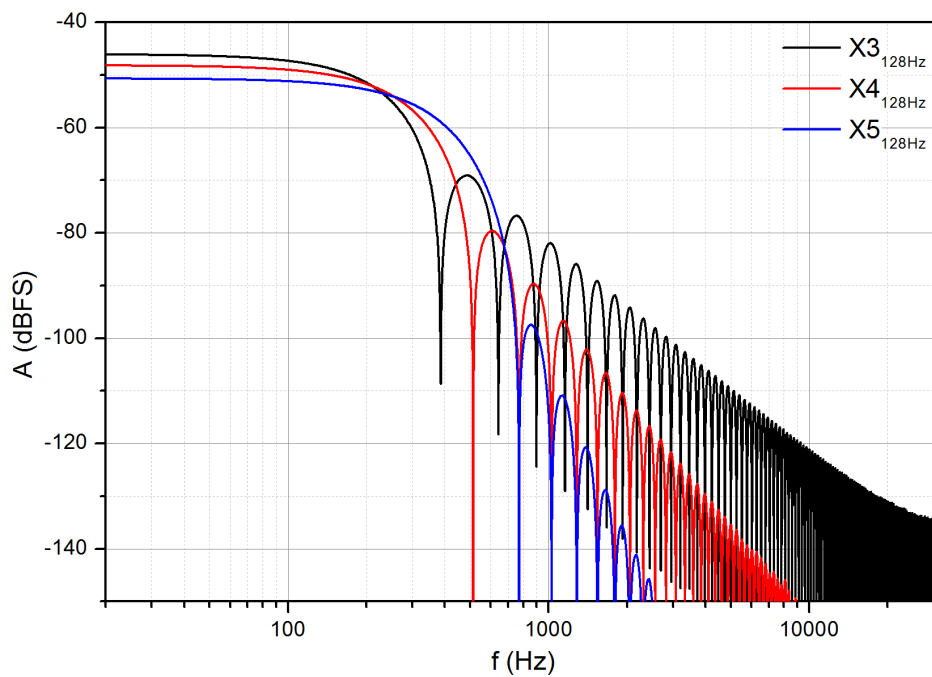


Příloha 2

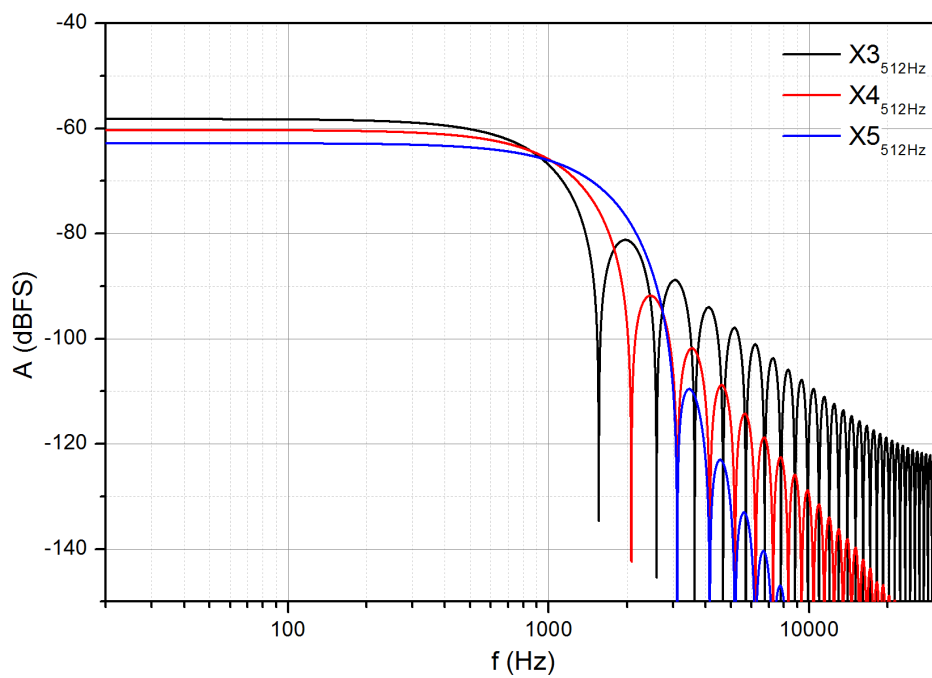
P2 – Amplitudová frekvenční spektra signálů $X1_{15\mu s}$, $X1_{30\mu s}$, $X1_{60\mu s}$ a $X1_{120\mu s}$.



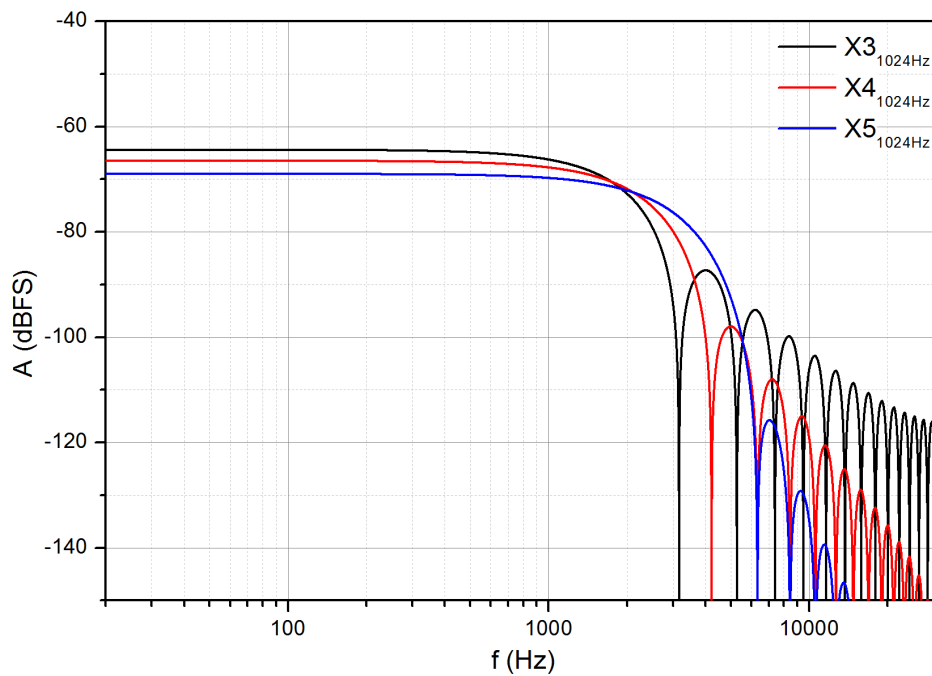
P2 – Amplitudová frekvenční spektra $X3_{128Hz}$, $X4_{128Hz}$ a $X5_{128Hz}$.



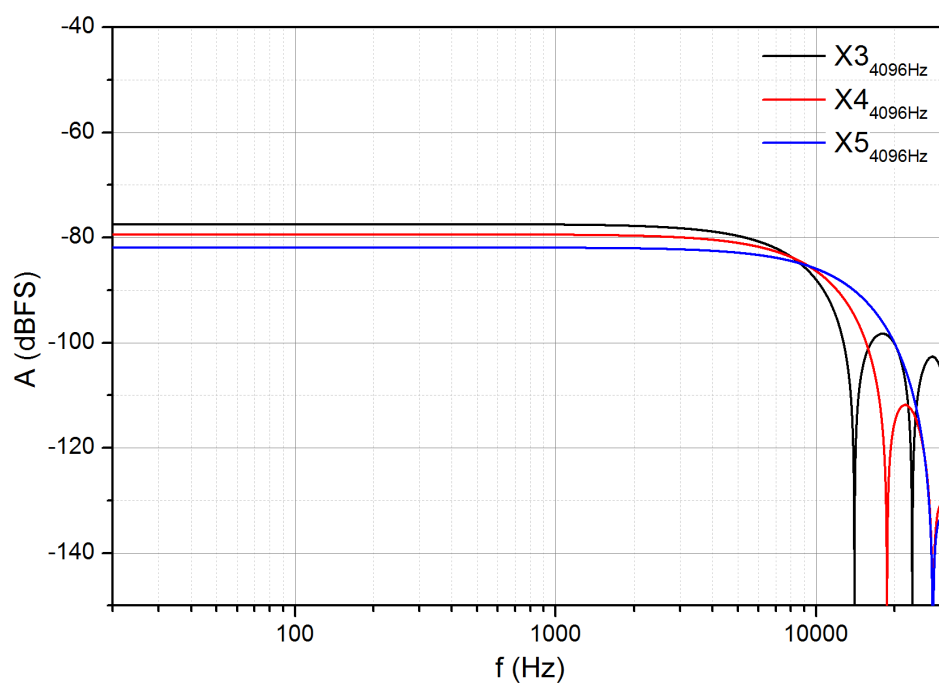
P2 – Amplitudová frekvenční spektra $X3_{512\text{Hz}}$, $X4_{512\text{Hz}}$ a $X5_{512\text{Hz}}$.



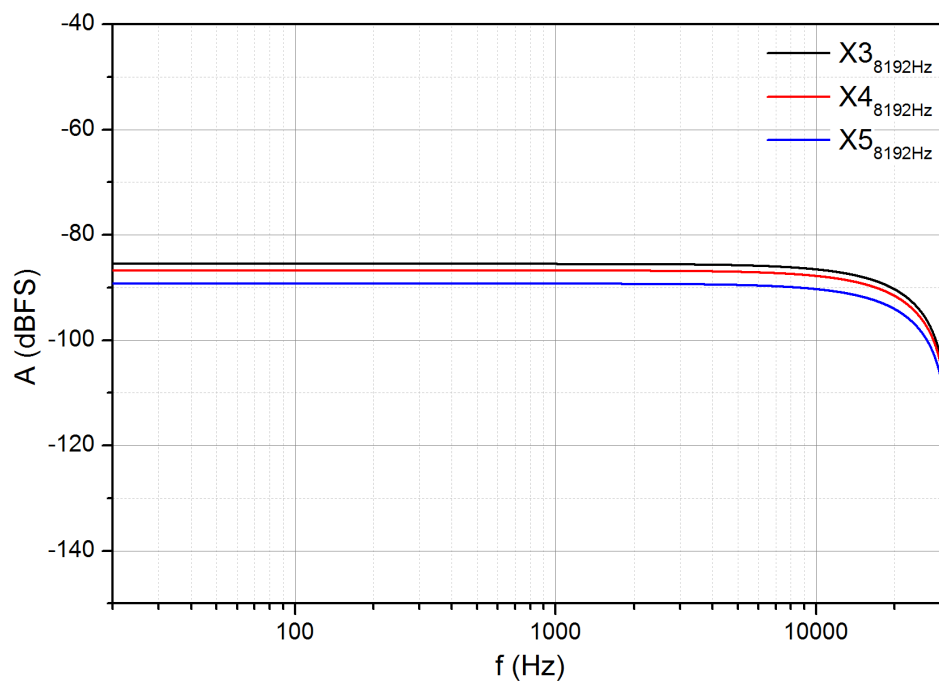
P2 – Amplitudová frekvenční spektra $X3_{1024\text{Hz}}$, $X4_{1024\text{Hz}}$ a $X5_{1024\text{Hz}}$.



P2 – Amplitudová frekvenční spektra $X3_{4096\text{Hz}}$, $X4_{4096\text{Hz}}$ a $X5_{4096\text{Hz}}$.

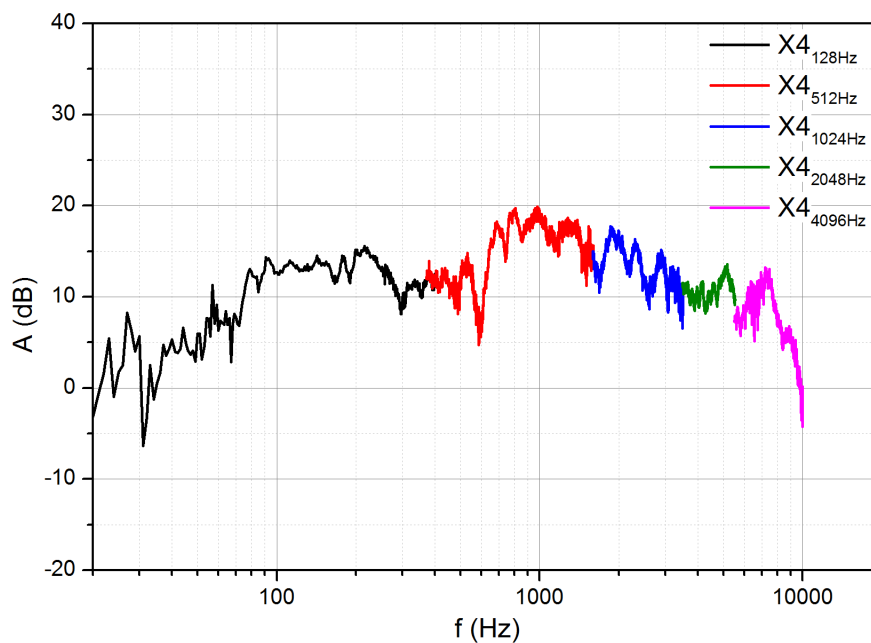


P2 – Amplitudová frekvenční spektra $X3_{8192\text{Hz}}$, $X4_{8192\text{Hz}}$ a $X5_{8192\text{Hz}}$.

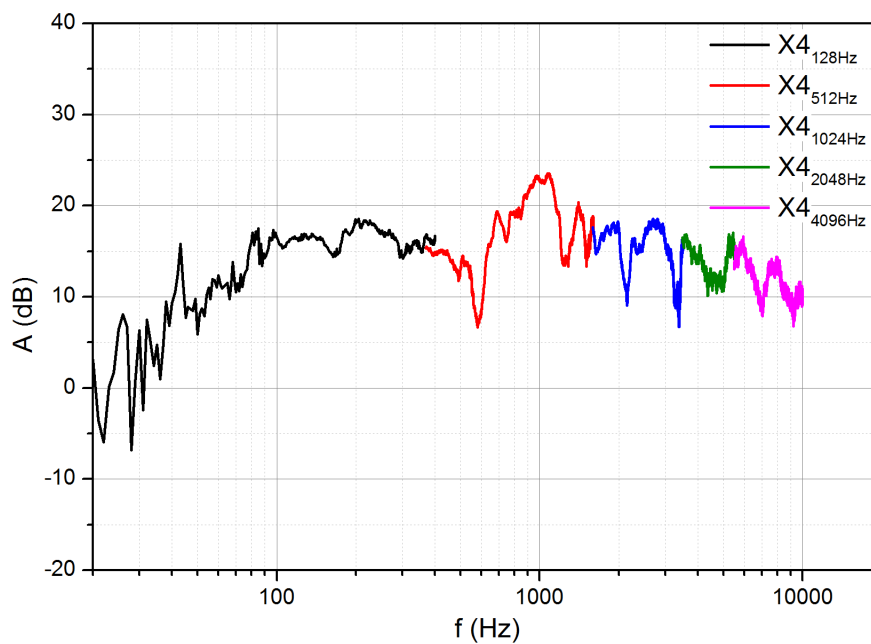


Příloha 3

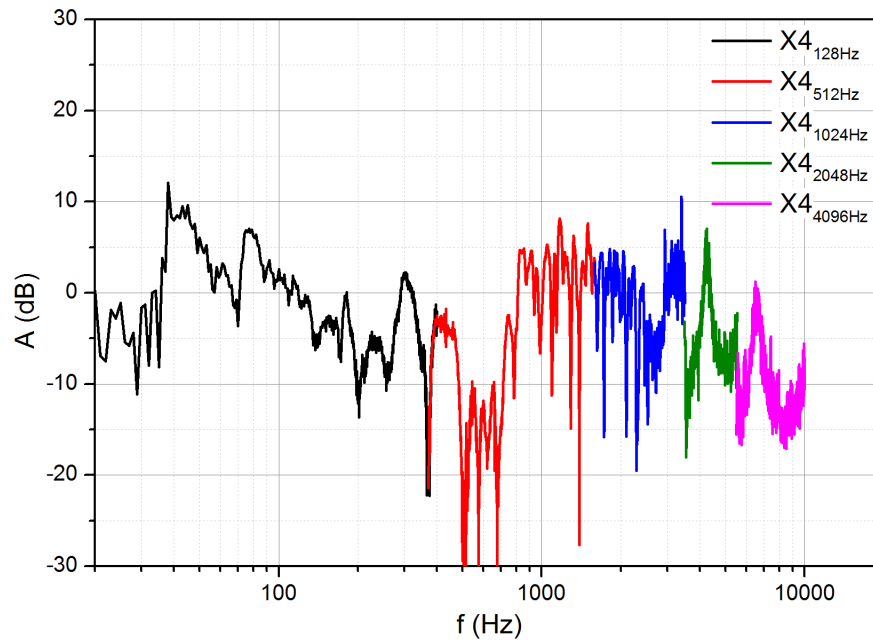
P3 – Výsledná složená přenosová charakteristika změřené v kabině automobilu pro basový reproduktor na levé straně vpředu ve vzdálenosti 10 cm od reproduktoru.



P3 – Výsledná složená přenosová charakteristika změřené v kabině automobilu pro basový reproduktor na pravé straně vpředu ve vzdálenosti 10 cm od reproduktoru.



P3 – Výsledná složená přenosová charakteristika změřené v kabině automobilu pro basový reproduktor na levé straně vpředu v místě poslechu.



P3 – Výsledná složená přenosová charakteristika změřené v kabině automobilu pro basový reproduktor na pravé straně vpředu v místě poslechu.

