

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ
ELEKTRONIKY**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Realizace mikrofonního pole pro měření parametrů
ozvučovacích systémů v automobilech**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Luboš BĚHAL**
Osobní číslo: **E13B0446P**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Realizace mikrofonního pole pro měření parametrů ozvučovačích systémů v automobilech**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Prostudujte současné měření parametrů ozvučovacích systémů automobilů.
2. Navrhněte systém pro přesnější zjišťování parametrů ozvučovacích systémů s důrazem na odstranění neznámých částí měřicího řetězce.
3. Realizujte měřicí zařízení včetně mikrofonního pole.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **Eargles Microphone Book, Rayburn Ray, ISBN: 978-0-240-82075-0.**
2. **Acoustic measurements rev. 1988, Beranek Leo L., ISBN: 0-88318-590-3.**
3. **Sound Reproduction: The Acoustics and Psychoacoustics of Loudspeakers and Rooms, Floyd Toole, ISBN-13: 978-0240520094.**

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Ladislav Zuzjak

Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2015**

Termín odevzdání bakalářské práce: **2. června 2016**

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



Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry



V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Tato bakalářská se zabývá návrhem mikrofonního pole pro měření ozvučovacích systémů automobilu. Práce je členěna do tří hlavních částí. První část je čistě teoretická a popisuje se mikrofony, jejich typy a parametry. Druhá část slouží jako teoretický základ k praktické části a ukazuje důležité aspekty, které je třeba při návrhu zvážit a pomáhá pochopit souvislosti. Poslední část práce se zabývá konkrétním řešením návrhu mikrofonního pole, jeho konstrukcí a výrobou.

Klíčová slova

Mikrofon, mikrofonní pole

Abstract

Theme of this bachelor thesis is implementation of microphone array for acoustic parameters measuring of sound system in cars. This work is divided into three main parts. The first part is clearly theoretical, describes microphones, its types and parameters. The second part serves as a theoretical basis for practical part and shows important aspects that should be considered in final design of array. Second part also serves to understanding context of these aspects. The last part shows final solution of microphone array, its design and production.

Key words

Microphone, microphone array

Prohlášení

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

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

.....
podpis

V Plzni dne 2.6.2016

Luboš Běhal

Poděkování

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

Obsah

OBSAH	7
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	8
ÚVOD	9
1 MĚŘÍCÍ MIKROFONY	10
1.1 MIKROFONY	10
1.1.1 <i>Funkce, proměnné, účel</i>	10
1.1.2 <i>Typy mikrofonů</i>	10
1.2 TYPY MIKROFONŮ DLE ZVUKOVÉHO POLE	12
1.2.1 <i>Mikrofony pro volné pole – Free-field microphones</i>	12
1.2.2 <i>Tlakové mikrofony – Pressure microphones</i>	13
1.2.3 <i>Mikrofony pro měření náhodného výskytu – Random-incidence microphones</i>	13
1.3 PARAMETRY MĚŘÍCÍCH MIKROFONŮ	14
1.3.1 <i>Dynamický rozsah a citlivost</i>	14
1.3.2 <i>Frekvenční rozsah a polární křivky</i>	16
1.3.3 <i>Polarizace</i>	19
1.4 MIKROFONY PRO MĚŘENÍ V MIKROFONNÍM POLI	19
1.4.1 <i>G.R.A.S. 40PH CCP Free-field Array Microphone</i>	19
2 NÁVRH MIKROFONNÍHO POLE – TEORIE	20
2.1 PROČ MĚŘIT	20
2.2 JAK SE MĚŘÍ.....	22
2.2.1 <i>Technika využívaná v současnosti</i>	22
2.2.2 <i>Komerční řešení</i>	24
2.3 ČLOVĚK.....	25
2.3.1 <i>Hlava</i>	25
2.3.2 <i>Pohyb hlavy</i>	26
2.3.3 <i>Ucho a lidský sluch</i>	27
2.3.4 <i>Psychoakustika</i>	28
2.4 VELIKOST INTERIÉRU AUTOMOBILU	29
2.5 TECHNIKY NAHRÁVÁNÍ ZVUKU VÍCE MIKROFONY	30
2.5.1 <i>Stereofonní nahrávací techniky</i>	31
2.5.2 <i>Vícekanálové nahrávací techniky</i>	32
3 NÁVRH MIKROFONNÍHO POLE – TVORBA ŘEŠENÍ	33
3.1 UPEVNĚNÍ.....	33
3.2 PRVNÍ NÁVRH	34
3.3 FINÁLNÍ NÁVRH	36
4 REALIZACE	37
ZÁVĚR	39
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	40
PŘÍLOHY	1

Seznam symbolů a zkratek

<i>dB</i>	Decibel, logaritmická jednotka hladiny akustického tlaku
<i>dB(A)</i>	Decibel, váhový filtr A pro vnímání lidským uchem
<i>THD</i>	Celkové harmonické zkreslení
<i>Pa</i>	Pascal, jednotka akustického tlaku
<i>Hz</i>	Hertz, Jednotka frekvence
<i>cps</i>	Cyklů za sekundu, jednotka frekvence, 1 cps = 1 Hz
<i>CCP</i>	Typ předzesilovače v mikrofonech G.R.A.S.
<i>TEDS</i>	Čip v předzesilovači CCP
<i>DSP</i>	Digitální signálový procesor
<i>L_p</i>	Hladina akustického tlaku [dB]
<i>LMP</i>	Level & Polarity Mic
<i>HSM</i>	Hearing Simulation Mic
<i>CMU</i>	Central Measurement Unit
<i>PC</i>	Osobní počítač
λ	Vlnová délka [m]
<i>c</i>	Rychlost zvuku [m/s]
<i>f</i>	Frekvence [Hz]

Úvod

Cílem práce je zjistit, jakým způsobem se měří ozvučovací systémy v automobilech, tyto způsoby prostudovat a následně navrhnout a vyrobit měřící zařízení pro přesnější měření parametrů ozvučení v automobilech.

Aby bylo možné takové zařízení navrhnout, je třeba zohlednit, jakým způsobem jsme schopni měřit a také jak je zvuk vnímán a interpretován člověkem. Člověk zde hraje významnou roli, protože smyslem měřícího zařízení je především vyladit ozvučení automobilu tak, aby co nejlépe působilo na posluchače.

Práce má přinášet souhrnný obraz a vysvětlit principy mikrofonů, jejich parametry a popsat typy mikrofonů vhodných pro měření v mikrofonních polích. Tyto informace poslouží jako teoretický základ práce.

Další část práce vysvětlí důvody využití mikrofonního pole pro měření, popíše současnou techniku a to jak tu, která je momentálně využívána na elektrotechnické fakultě, tak dostupná komerční řešení. Tato část dále popíše to, jak je zvuk vnímán člověkem a seznámí s některými anatomickými proporcemi člověka, které je nutné brát v potaz při samotném návrhu. Seznámí s velikostmi interiéru měřených automobilů a nastíní techniky, které se využívají pro nahrávání zvuku pomocí několika mikrofonů. Celá tato část má komplexně popisovat všechny důležité aspekty, které je nutné zohlednit při tvorbě návrhu mikrofonního pole.

Poslední část se bude zabývat samotným návrhem a realizací měřícího zařízení, s ohledem na informace získané během tvorby druhé části.

Výsledkem práce tedy bude zařízení využitelné pro reálná měření ve vozidlech. Toto zařízení by mělo poskytnout lepší obraz o tom, jak se chová zvuk v určitém prostoru ve vozidle.

1 Měřicí mikrofony

1.1 Mikrofony

1.1.1 Funkce, proměnné, účel

Mikrofony jsou ve své podstatě zařízení převádějící nezkraslený obraz akustického tlaku zvuku na elektrický výstup, tedy převádějí energii akustickou na energii elektrickou. Tento převod je téměř vždy zajištěn membránou reagující na tlak nebo rychlost částic zvukových vln. V průběhu času se může měnit proporcionalita mezi elektrickým výstupem a akustickým vstupem. Vlivem stárnutí se ideální vlastnosti mikrofonů obvykle zhoršují v několika parametrech:

- šum nebo indukované signály – i v případě že není přítomen akustický signál
- nelineární zkreslení – generuje harmonické z čistého tónu
- frekvenční zkreslení – potlačení či zdůraznění určitých frekvencí
- fázová zkreslení – zpoždění odezvy mikrofonu při různých frekvencích
- zhoršená citlivost – vlivem stárnutí, teploty, vlhkosti vzduchu, změn okolního tlaku, nešetrného zacházení [1]

Mikrofony můžeme rozdělovat podle jejich využití. Každé využití vyžaduje rozdílný typ mikrofonu a také různé vlastnosti. Při výběru mikrofonu je potřeba zohlednit původ zvukového pole, charakteristiky měřeného zvuku a podmínky, za kterých bude mikrofon provozován [1].

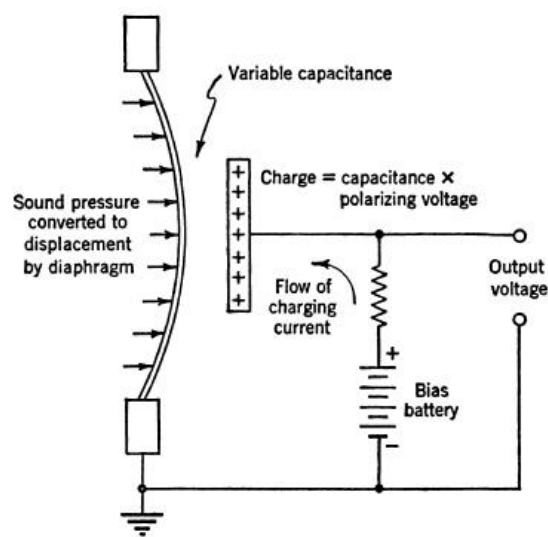
1.1.2 Typy mikrofonů

Existuje celá řada různých druhů a typů mikrofonů, které se liší provedením, využitím a parametry. Většina typů bude zmíněna jen okrajově, jelikož se nehodí pro účely měření. Hlavní využití pro měřicí účely mají mikrofony kondenzátorové a elektretové, elektretové mikrofony navíc budou využity pro následnou realizaci měřicího pole.

1.1.2.1 Kondenzátorový mikrofon

Kondenzátorový mikrofon vyniká nízkým vlastním šumem a plochou frekvenční charakteristikou, díky těmto vlastnostem je využíván v širokém spektru odvětví. Funguje na principu tenké napnuté membrány, která se chová jako jedna deska kondenzátoru, zadní stěna mikrofonu se chová jako druhá deska. Pokud akustický tlak vychýlí membránu dovnitř, zvýší se kapacita kondenzátoru. Kondenzátorový mikrofon využívá konstantního náboje přivedeného na elektrody (obr 1.1) [1, 2].

Obr. 1.1 Princip funkce kondenzátorového mikrofonu [1]



1.1.2.2 Elektretový mikrofon

Elektretové mikrofony odstraňují jednu z hlavních nevýhod kondenzátorových mikrofonů, potřebu přivést 100 až 200 V polarizačního napětí. Konstrukce elektretového mikrofonu spočívá v přítomnosti tenké polymerové vrstvy – elektretové fólie, ve které je elektrický náboj vázaný v molekulách, dále z vnějšího povrchu pokrytého tenkou kovovou vrstvou, která tvoří zemnicí část kondenzátoru, z děrované zadní desky a vzduchové dutiny. Oproti kondenzátorovým mikrofonům mají elektretové také nižší vnitřní šum při vysoké vzdušné vlhkosti a o 10 až 12 dB lepší citlivost, při stejném průměru [1].

1.1.2.3 Další typy mikrofonů

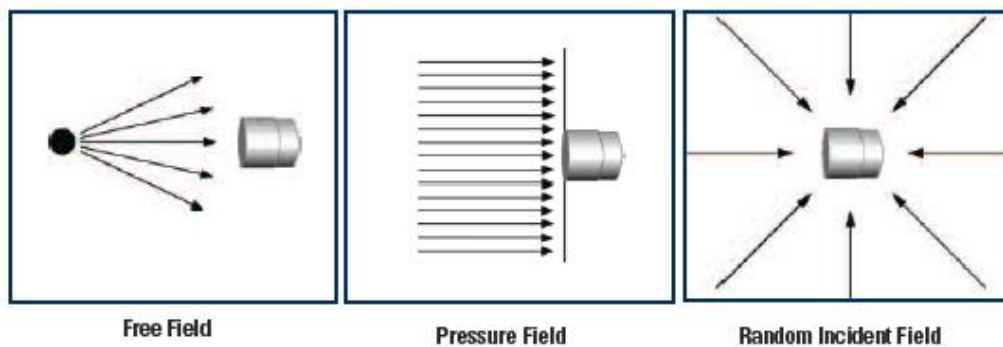
Mezi další typy mikrofonů řadíme uhlíkové mikrofony, velmi jednoduché mikrofony, kde akustický tlak stlačuje uhlíkové granule v pouzdře, což zvyšuje povrch jejich kontaktu s pouzdrem. Tím se zvyšuje rezistivita, která je zde závislá na vyvolaném tlaku. K rozšíření těchto mikrofonů došlo zejména v telefonní technice, kde příliš nezáleží na jeho špatných parametrech, zejména omezeném dynamickém rozsahu a velkým zkreslením. Z dalších typů mikrofonů stojí za zmínku dynamické, piezoelektrické nebo páskové mikrofony [1, 2].

1.2 Typy mikrofonů dle zvukového pole

1.2.1 Mikrofony pro volné pole – Free-field microphones

Výběr správného mikrofonu pro určitý typ zvukového pole je důležitý především při měření vyšších frekvencí, kde jen správný typ podává nejpřesnější výsledky (obr. 1.2). Následné označení mikrofonů se uvádí tím typem zvukového pole, ve kterém má mikrofon nejplošší frekvenční charakteristiku [1, 3, 4, 5].

Obr. 1.2 Mikrofon v různých typech polí [3]



Měření ve volném poli je nejběžnějším typem. Mikrofony pro volné pole jsou nejpřesnější, pokud měříme zvuk přímo proti jeho zdroji, tedy v nulovém úhlu. Jsou vhodné pro měření v otevřených prostorech, kde je větší vzdálenost od předmětů způsobujících odrazy a pro měření v dobře odhlučněných vnitřních prostředích. Obvyklý průměr těchto mikrofonů je 0,25 palce až 1 palec. Pokud je mikrofon umístěn ve zvukovém poli přibližně stejně velký, jako je vlnová délka zvuku při vysoké

frekvenci, dochází vlivem difrakce k určitému druhu rezonance a ke změně akustického tlaku na povrchu mikrofonu. Rozložení akustického tlaku na povrchu mikrofonu je potom kombinací odražené a dopadající vlny [1, 3, 4, 5].

1.2.2 Tlakové mikrofony – Pressure microphones

Tlakové mikrofony se používají zejména tehdy, když je měření prováděno v blízkosti tvrdých odrazných ploch, například zdi. Tímto způsobem se dá určit například akustický tlak na stěnu samotnou, nebo měření tlaku na různých místech křídla letadla. Pomocí těchto hodnot se dá následně stanovit úplný obraz o kolísání tlaku na povrchu křídla. Mikrofon je typicky montován do dutiny, nejběžněji ve zdi nebo v desce, jak je naznačeno na *obrázku 1.3*. Toto umístění umožňuje měření akustického tlaku působícího na membránu bez potřeby korekcí vlastní přítomnosti mikrofonu. Kryty tlakových mikrofonů jsou ve srovnání s vlnovou délkou malé. Tlakové pole je popisováno tak, že má stejnou fázi a rozsah v kterémkoliv bodě v poli [3, 4, 5].

Obr. 1.3 Příklad umístění tlakového mikrofonu v desce [4]



1.2.3 Mikrofony pro měření náhodného výskytu – Random-incidence microphones

Mikrofony pro měření náhodného výskytu jsou všesměrové a měří akustický tlak přicházející z několika úhlů, zdrojů a mnohonásobných odrazů. Tento typ je vhodný pro měření v uzavřených prostorech, kde se počítá s dozvukem, například v dozvukových komorách nebo v jiných vysoce odrážejících prostředích. Zvukové vlny nemají dobře definovaný směr šíření, ale dorazí na mikrofon současně z různých směrů. Na rozdíl od

mikrofonů pro volné pole, je reakce tohoto typu mikrofonu plošší a konstantní v celém rozsahu frekvencí [3, 4, 5].

1.3 Parametry měřících mikrofonů

1.3.1 Dynamický rozsah a citlivost

Dynamický rozsah mikrofonu je hodnota udávaná v dB, jedná se o rozsah mezi nejnižší a nejvyšší úrovní akustického tlaku, kterou mikrofon dokáže zachytit. Dynamický rozsah do značné míry souvisí s citlivostí mikrofonu a jeho hodnota nevypovídá pouze o mikrofonu samotném, ale také o jeho předzesilovači [4, 5].

Citlivost mikrofonu je dána zejména jeho velikostí a napětím na membráně. Obecně platí, že velké mikrofony s volnou membránou mají vysokou citlivost, naopak u malých mikrofonů s tuhou membránou lze očekávat nízkou citlivost. Mikrofony s nízkou citlivostí jsou schopné měřit vysoké úrovně a mikrofony s vysokou citlivostí nízké úrovně, opačně se však nehodí [4].

Horní mez dynamického rozsahu je dána možností pohybu membrány předtím, než se dostane do styku se zadní deskou. Se zvyšujícím se akustickým tlakem se zvětšuje i průhyb membrány a v určitém okamžiku se membrána dotkne zadní desky uvnitř těla mikrofonu. Tento moment udává nejvyšší úroveň, kterou je mikrofon schopen změřit. Ve skutečnosti je vztah mezi deformací membrány a změnou kapacity mikrofonu nelineární, což zapříčiňuje zkreslení vstupního signálu mikrofonu. Z tohoto důvodu se jako horní mez označuje úroveň, kde THD dosahuje typicky 3% (některé zdroje uvádějí 0,5%) [2, 4].

Spodní mez dynamického rozsahu souvisí s tepelným šumem, který generují molekuly vzduchu tepelným pohybem. Tím se i za zcela klidných podmínek vytváří velmi malý vstupní signál. Tento tepelný šum leží obvykle na hladině zhruba 5 μ V a překrývá jakýkoliv akusticky vybuzený signál. Z tohoto důvodu nelze měřit úroveň pod úrovní tepelného šumu. *Tabulka 1.1* ukazuje zdánlivou hladinu akustického tlaku, kterou je možno vypočítat z citlivosti mikrofonu [4].

Tab. 1.1 Příklady akustického tlaku, přepočtu na hladinu a ekvivalentní zdroj. Převzato z [3]

Akustický tlak [Pa]	Hladina akustického tlaku [dB]	Ekvivalentní zdroj
0,00002	0	Práh slyšení
0,02	60	Kancelář
0,2	80	Hluk v obchodě
1	94	Nákladní vozidlo
2	100	Sbíječka
20	120	Motorová pila
200	140	Vzlétající letadlo

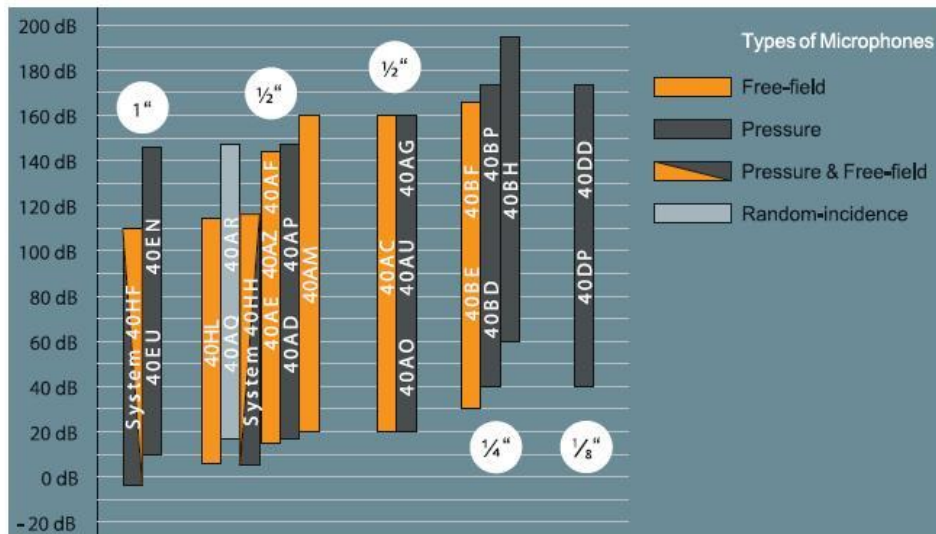
Obrázek 1.4 ukazuje, jak se liší dynamické rozsahy různých typů mikrofonů značky G.R.A.S. o různých průměrech. Mikrofony na obrázku jsou rozděleny do skupin podle průměru v palcích a barevně jsou rozlišeny mikrofony pro volné pole (oranžová), tlakové (tmavě šedá), mikrofony pro náhodný výskyt (světle šedá) a kombinované mikrofony tlakové/volné pole (oranžová/tmavě šedá) [4].

Nejnižší amplituda zvuku, kterou je schopno zdravé lidské ucho zaznamenat je 20 μPa . Jelikož jsou hodnoty akustického tlaku v Pascalech nízké (viz. tab. 1.1), jako měřítko se používá logaritmická stupnice v decibelech, nazývaná hladina akustického tlaku. Tato logaritmická stupnice lépe odpovídá reakci lidského ucha na kolísání tlaku [3].

Pokud je známý akustický tlak, můžeme být převeden do škály v decibelech (vzorec 1.1). Jako referenční tlak se používá nejnižší hodnota tlaku, kterou je ucho schopno zaznamenat, tedy 20 μPa . Logaritmický vztah udává, že každé zvýšení akustického tlaku v Pascalech o jeden řád odpovídá zvýšení hladiny akustického tlaku o 20 dB na logaritmické stupnici. Tato závislost je opět patrná tabulce 1.1 [3].

$$L_p = 20 \cdot \log \cdot \left(\frac{P_a}{P_0} \right) \quad (1.1)$$

Obr. 1.4 Dynamické rozsahy mikrofonů značky G.R.A.S. [4]



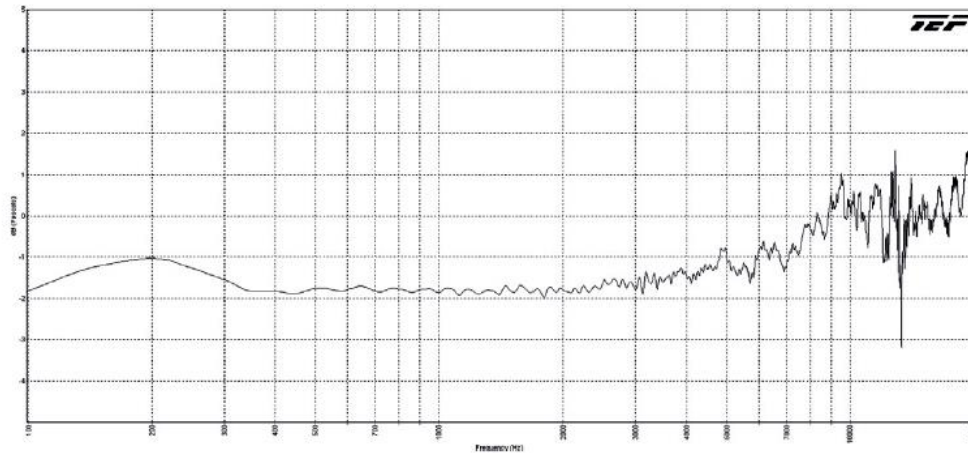
1.3.2 Frekvenční rozsah a polární křivky

Frekvenční rozsah mikrofonu je definován jako interval mezi jeho horním a dolním mezním kmitočtem. Horní mezní kmitočet je spojen s velikostí mikrofonu, přesněji řečeno velikostí mikrofonu ve srovnání s vlnovou délkou zvuku. Vlnová délka je nepřímo úměrná frekvenci a při vyšších frekvencích se výrazně zkracuje. Z toho vyplývá, že užší mikrofony jsou schopny měřit vyšší frekvence zvuku. Spodní mezní kmitočet je v podstatě měření rozdílu mezi vnitřním tlakem mikrofonu a okolním tlakem. Pokud by tedy byl mikrofon vzduchotěsný, změny okolního tlaku by způsobovaly statické vychýlení membrány, což by mělo za následek změnu frekvenčního rozsahu a také citlivosti. Aby se tomuto jevu zabránilo, má mikrofon zabudovaný vyrovnávací kanálek, který zajišťuje vyrovnávání vnitřního a okolního tlaku. Vyrovnávání tlaku však nesmí být příliš rychlé, aby se zabránilo ovlivňování měření dynamického signálu [4].

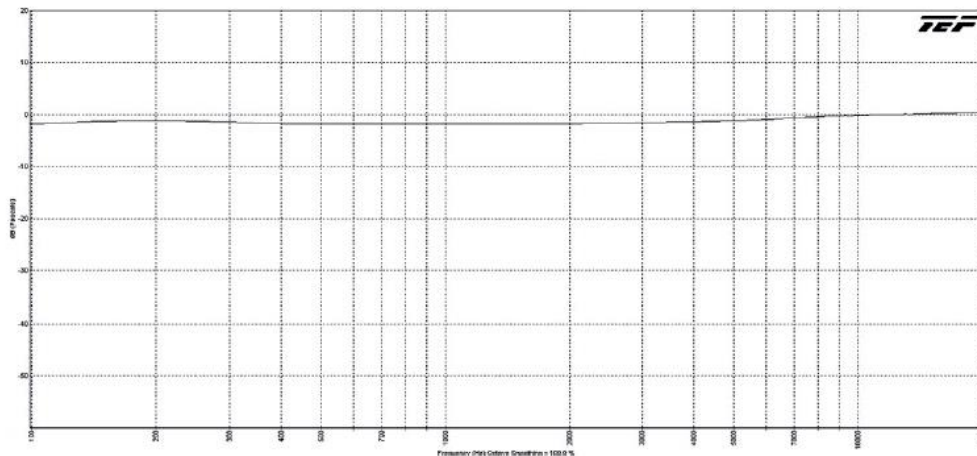
Na obrázku 1.5 a 1.6 jsou zobrazeny dvě různé interpretace frekvenčního rozsahu, obě ale zobrazují stejné naměřené hodnoty. Rozdíl je v měřítku svislé osy, obrázek 1.5 používá jako měřítko 10 dB, zatímco obrázek 1.6 používá měřítko 80 dB s celooktávovým průměrováním frekvenčního pásma. Možnost prezentace s nepřiměřeně hrubým svislým rozlišením a s využitím průměrování, může být využívána ve prospěch marketingu výrobců, je tedy potřeba se na tato data zaměřit

a posuzovat nezprůměrované výsledky, jelikož frekvenční odezva na *obrázku 1.6* díky rozdílné interpretaci vypadá plošší, než ve skutečnosti je [2].

Obr. 1.5 Surová data frekvenčního rozsahu se svislým měřítkem 10 dB

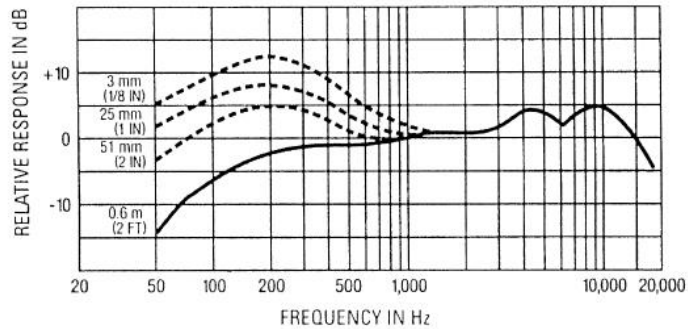


Obr. 1.6 Frekvenční rozsah s celooktávnovým průměrováním a svislým měřítkem 80 dB

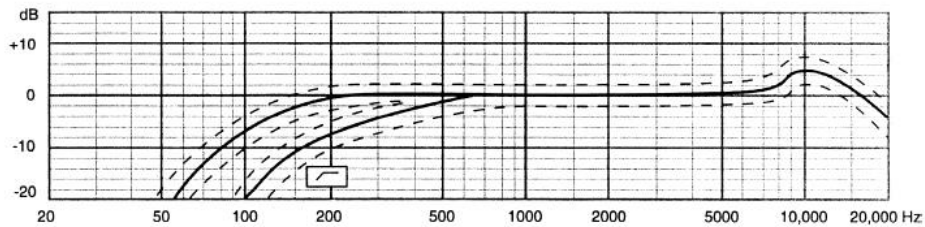


Údaje o frekvenční odezvě je potřeba uvádět pro určitou fyzickou měřící vzdálenost, aby mohly být správně posouzeny efekty rozdílné vzdálenosti na směrové mikrofony (*obr. 1.7*). Pokud tato vzdálenost uvedena není, předpokládá se 1 metr. Na *obrázku 1.8* jsou znázorněna data s mezní tolerancí 2 dB pro frekvence nad 200 Hz. Nicméně zde neexistuje údaj o skutečně naměřeném vzorku mikrofonu [2].

Obr. 1.7 Efekt rozdílné vzdálenosti na frekvenční charakteristiku dynamického mikrofonu [1]

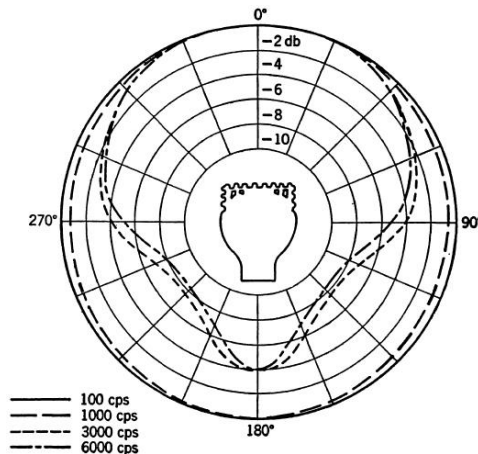


Obr. 1.8 Horní a spodní mezní tolerance frekvenční charakteristiky kondenzátorového mikrofonu [1]



Polární křivky mikrofonu ukazují, jak bude interpretován zvuk přicházející na mikrofon z různých úhlů. To záleží na konkrétním typu mikrofonu, na obrázku 1.9 je vidět směrová charakteristika dynamického mikrofonu se sférickým tvarem a ochrannou mřížkou. Z této charakteristiky je patrné, že se zvyšující se frekvencí se zvyšuje útlum zvuku, který přichází z jiného než přímého směru [1].

Obr. 1.9 Směrová charakteristika sférického mikrofonu s ochrannou mřížkou [1]



1.3.3 Polarizace

Mikrofony rozdělujeme podle typu polarizace na dva různé typy, externě polarizovaný a pre-polarizovaný. Externě polarizované mikrofony využívají externí zdroj napětí, který polarizuje zadní desku do vzduchové mezery membrány. Pre-polarizované mikrofony využívají elektretovou vrstvu na zadní desce mikrofonu. Obecně jsou ve specifikacích mezi těmito dvěma typy malé rozdíly, přesto jsou vhodné pro různé účely. Pre-polarizované mikrofony jsou vhodnější pro použití ve vlhkém prostředí, pro přenosné měřiče a mikrofonní pole. Externě polarizované mikrofony se využívají při měření za vysokých teplot, pro laboratorní měření a také nabízejí širší škálu zařízení pro speciální druhy měření [5].

1.4 Mikrofony pro měření v mikrofonním poli

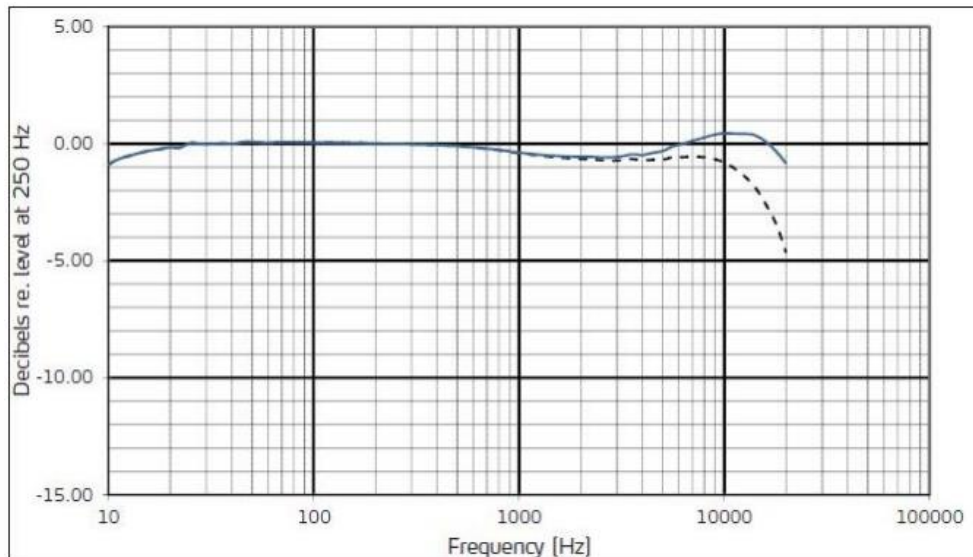
Mikrofony pro měření v mikrofonních polích, anglicky array microphones, jsou mikrofony elektretového typu. Jejich dynamický ani frekvenční rozsah není tak široký, jako u podobných mikrofonů kondenzátorového typu. Jejich hlavními přednostmi vychází z konstrukce, jedná se o pre-polarizované mikrofony s integrovaným předzesilovačem, není tedy nutné přivádět externí napětí. Další výhodou oproti kondenzátorovým mikrofonům je nižší cena. U mikrofonních polí je tento faktor také velmi důležitý, protože mikrofonní pole se často skládají z desítek i stovek mikrofonů. Jelikož se měření v polích obvykle provádí při rozsahu, které slyší lidské ucho, jsou parametry těchto elektretových mikrofonů zcela dostačující a mikrofony jsou pro toto užití vhodné [3].

1.4.1 G.R.A.S. 40PH CCP Free-field Array Microphone

Tento kontrétní typ mikrofonu bude blíže popsán, protože byl zvolen pro použití ve výsledném měřicím poli. Jedná se o nízkonákladový mikrofon, který je určen pro použití v měřicích polích a maticích. Dle výrobce je mikrofon vhodný pro vícekanálové měření, analýzu zvukového pole, měření zvukového výkonu a pro prostorové měření. Jedná se o mikrofon s průměrem $\frac{1}{4}$ palce. Mikrofon má dynamický rozsah od 32 dB(A) do 135 dB (vztaheno k prahu slyšení 20 μ Pa). Na *obrázku 1.10* je zobrazena frekvenční charakteristika, frekvenční rozsah od 10 Hz do 50 Hz má mezní toleranci

± 3 dB, od 50 Hz do 5 kHz ± 1 dB a od 5 kHz do 20 kHz ± 2 dB. Citlivost při 250 Hz s mezní tolerancí ± 2 dB je 50 mV/Pa. Zabudován je předzesilovač typu CCP obsahující programovatelný čip TEDS 27 v 1.0. Výrobce dále uvádí, že mikrofon je již z výroby kalibrován a může být uživatelsky překalibrovatelný pomocí jednotky G.R.A.S. 42AA [6].

Obr. 1.10 Typická frekvenční charakteristika mikrofonu G.R.A.S. 40PH [6]



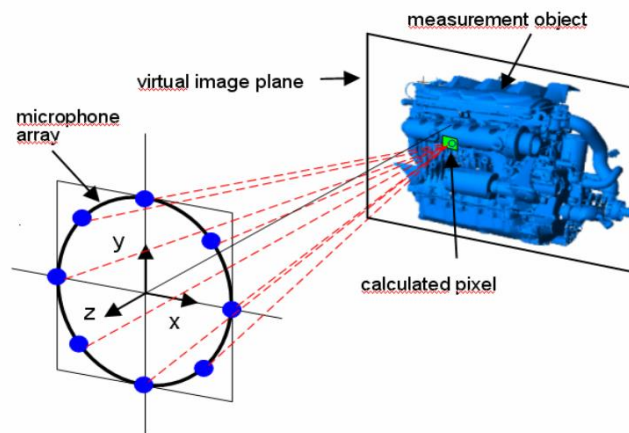
K připevnění mikrofonu poslouží držák mikrofonu G.R.A.S. RA0185. Na spodní straně držáku je 14 mm dlouhá drážka sloužící k upevnění na měřicí zařízení, upevnění se provádí pomocí šroubku.

2 Návrh mikrofonního pole – teorie

2.1 Proč měřit

Mikrofonní pole může mít různé účely využití. Existují pole, která se využívají k lokaci zvuku, takzvané zvukové kamery. U těchto typů polí se využívá složitějšího zpracování, kde se pracuje s časovým posunem zachycení zvuku, z čehož je možné vypočítat přesnou vzdálenost od zdroje a pomocí ostatních mikrofonů v poli určit směr odkud zvuk vychází (obr. 2.1). Tato pole mají často kulový (obr. 2.2) nebo kruhový tvar a obsahují vlastní kameru, takže se zdroj zvuku zakresluje přímo do obrazu prostoru (obr. 2.3) [13].

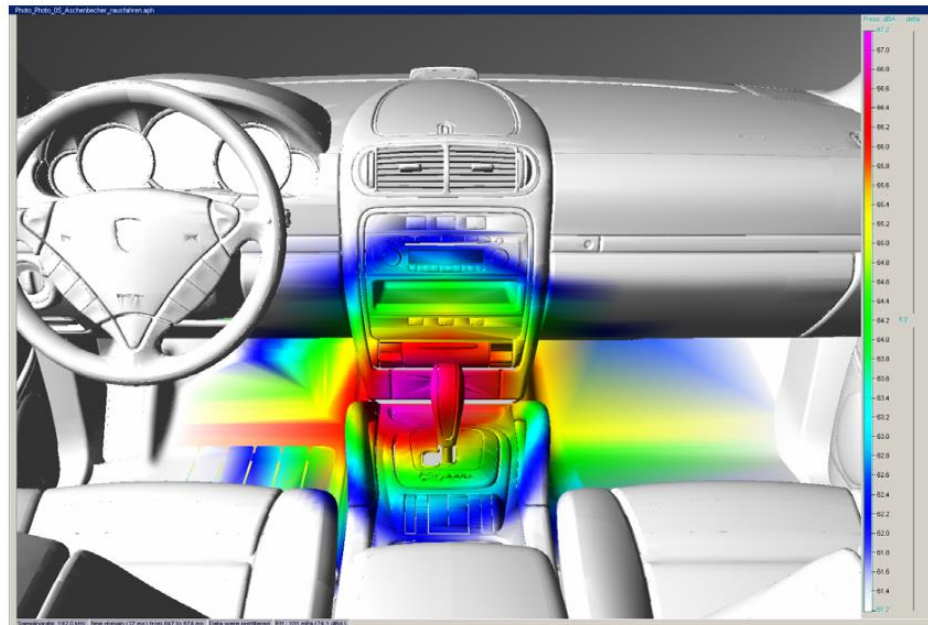
Obr. 2.1 Princip lokalizace zvuku pomocí mikrofonního pole [13]



Obr. 2.2 Sférické, akusticky transparentní pole s kamerou a 120 mikrofony [13]



Obr. 2.3 Ukázka obrazu ze zvukové kamery s diagramem lokalizace zvuku [13]



Cílem práce však není lokalizovat zdroje nežádoucího hluku, ale zkoumat parametry zvuku ve vozidle. Tyto parametry je důležité získat především v prostoru, kde se pohybuje hlava. Snahou je získat v tomto prostoru co možná nejkonzistentnější zvukové pole, aby posluchač při pohybu hlavy neslyšel zvuk zkreslený, podle místa ve kterém se zrovna hlava nachází. Informace získané měřením pomocí takového mikrofonního pole se také využívají pro korekce DSP v autorádiu, kdy se například při zvyšující se rychlosti vozidla automaticky zvýší hlasitost reprodukce ve vozidle a případně se aplikuje jiná korekce zvuku.

2.2 Jak se měří

2.2.1 Technika využívaná v současnosti

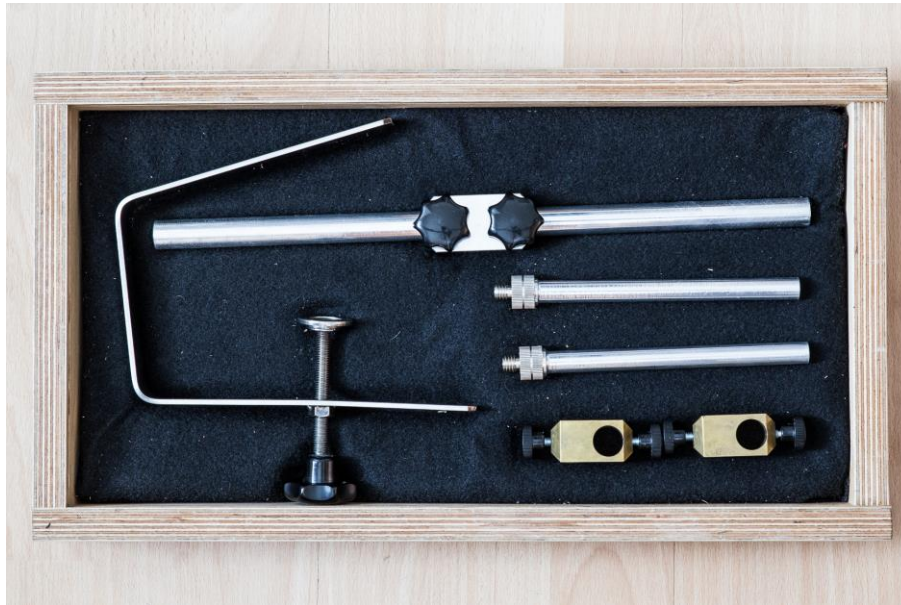
V současnosti se na elektrotechnické fakultě měří ozvučení v automobilech několika způsoby, které však nejsou ideální. Využívá se systému držáku, který se připevňuje k hlavové opěrce sedadla a je možné na něj upevnit dva mikrofony. Mikrofony na tomto držáku je možné posouvat do stran, ale pouze v poměrně omezeném rozsahu, který je dán konstrukcí. *Obrázky 2.4 a 2.5* ukazují složený držák připevněný v automobilu a rozložený držák v transportním boxu. Další využívanou možností je tyč z hliníkového profilu, na kterou je možné pomocí posuvných jezdců

umístit čtyři měřicí mikrofony. Nevýhodou je však to, že tyč nemá vlastní systém uchycení k sedadlu. To se řeší zkombinováním s předchozím držákem. Tento typ držáku rovněž umožňuje jen posun mikrofonů do stran, ale ve větším rozsahu než v případě předchozího řešení. Posledním využívaným řešením je možnost, kdy si do vozidla sedne osoba a provádí měření pomocí mikrofону drženého u ucha. Problémem této metody je nekonzistentnost měření, zejména v různých typech automobilů s různým nastavením sedadel. Dále je zde velká pravděpodobnost, že měření bude ovlivněné ruchy, které způsobí držení mikrofону v ruce a dalšími zvuky způsobenými přítomností člověka (např. dech, šustění oblečení apod.). Ani jedna z těchto technik měření nedává informaci o tom, jak se zvuk mění v určitém větším prostoru, ve kterém se hlava může pohybovat. Je zde sice možnost pokrýt větší prostor, například posunem sedadla, ale jedná se o poměrně zdlouhavé a také nepříliš konzistentní řešení.

Obr. 2.4 Současný držák dvou mikrofonů připevněný na sedadle



Obr. 2.5 Rozložený držák dvou mikrofonů uložený v boxu



2.2.2 Komerční řešení

Jelikož se jedná o velmi specifické zařízení, na trhu není mnoho možných řešení. Například firma Brüel & Kjaer nabízí několik možností mikrofonních polí jak pro vnitřní tak pro venkovní použití. Žádné z nich však není přímo určeno přímo pro měření ozvučení automobilu, nemají tedy rozmístění mikrofonů upravené pro tento účel ani nenabízí možnost jednoduchého upevnění uvnitř vozidla. Navíc se jedná o velmi drahá zařízení [7].

Na trhu však existuje i řešení přímo určené k automatické kalibraci zvuku v automobilu. Audison bit Tune (*obr. 2.6*) se skládá z jednotky HSM (Hearing Simulation Mic), LPM (Level & Polarity Mic) a měřící CMU jednotky (Central Measurement Unit). Jednotka HSM se upevňuje na hlavovou opěrku sedadla a její kruhový tvar má napodobovat hlavu v prostoru. Tato jednotka obsahuje pět kapslí s měřícími mikrofony. Další mikrofon obsahuje jednotka LPM, která je umístěná na popruhu mezi sedadly. Tento mikrofon slouží ke kontrole akustické fáze reproduktorů a k nastavení úrovně. O zpracování informací naměřených mikrofony se stará jednotka CMU. Ta pomocí počítačového softwaru vytváří data pro úpravu zvuku pro příslušné zvukové procesory od této firmy. Toto zařízení je poměrně jednoúčelné, protože neslouží přímo k měření (přestože software pro PC má několik měřících možností), ale

pouze k doladění zvukových procesorů firmy Audison. Firma neuvádí informace o tom, jaké mikrofony zařízení obsahuje a jaké jsou kvality. Lze však předpokládat, že vzhledem k ceně (několik desítek tisíc za kompletní řešení), nebudou dosahovat kvality mikrofonů G.R.A.S. 40PH, které budou použity pro vlastní návrh pole [9].

Obr. 2.6 Audison bit Tune připevněný na sedadlech [8]



2.3 Člověk

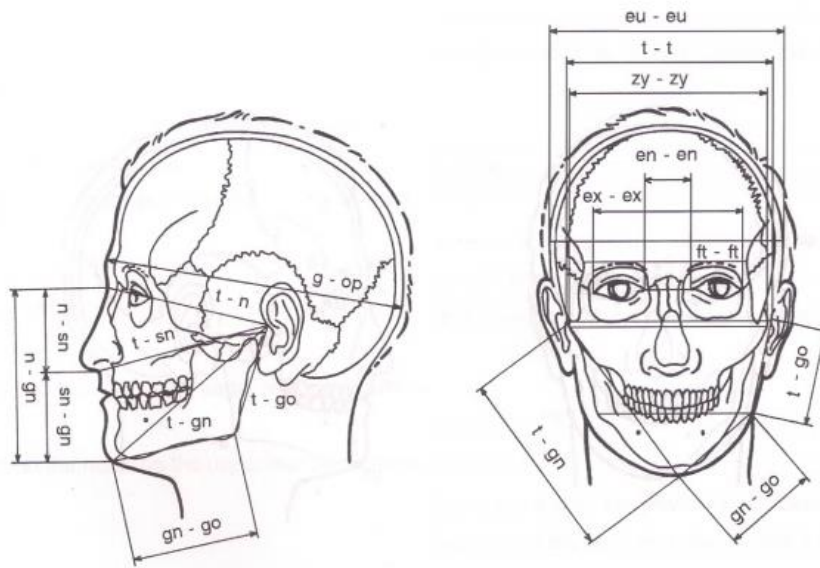
Snahou návrhu mikrofonního pole v této práci je co nejvěrnější pokrytí prostoru, ve kterém se hlava člověka ve vozidle nachází. Je třeba zvážit aspekty vycházející z anatomie člověka, jeho pohybu a psychoakustiky.

2.3.1 Hlava

Pokud je naším cílem vytvořit model rozmístění mikrofonů, tak aby přibližně odpovídal poloze uší a celkově hlavy v prostoru, je třeba nejprve zvážit určité somatometrické údaje, které nám řeknou více o poloze uší. Na *obrázku 2.7* jsou naznačeny rozměry hlavy, dle měrných bodů na hlavě. Pro účely práce si vystačíme s rozměry eu – eu a g – op. Vzdálenost eu – eu udává šířku hlavy, eu (Euryon) je bod v oblasti temenní nebo spánkové kosti a stanovuje největší šířku hlavy. Šířka hlavy u dospělých mužů je 13,9 – 16,4 cm, u dospělých žen 13,4 – 15,8 cm. Vzdálenost g – op

(Glabella a Opisthocranium) udává délku hlavy, Glabella leží nad kořenem nosu mezi obočím a Opisthocranium leží v týlní části, nejdále od bodu Glabella. Délka hlavy je mezi 16,9 – 19,4 cm u dospělých mužů a 16,1 - 18,5 cm u žen. Při porovnání těchto hodnot můžeme vidět, že rozdíly mezi mužskou a ženskou hlavou nejsou příliš výrazné, pro další užití můžeme brát v potaz průměrné hodnoty [10].

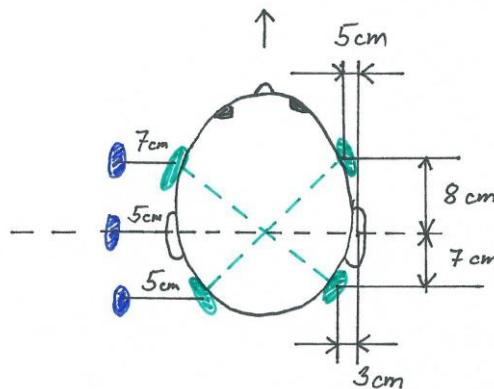
Obr. 2.7 Rozměry hlavy [10]



2.3.2 Pohyb hlavy

Zkoumání pohybu hlavy člověka nebylo prováděno žádným exaktním způsobem. Šlo nám spíše o zjištění, v jakých krajních polohách se mohou uši nacházet při otáčení a úklonu hlavy do stran, což jsou základní pohyby, které provádíme, například když se díváme do zpětných zrcátek, rozhlížíme se nebo nakláníme hlavu v zatáčkách. Tyto pohyby jsou naznačeny na obrázku 2.8, zeleně je označena poloha uší při otáčení hlavy, modře při úklonu hlavy, rozsahy pohybu jsou přibližné, ale pro daný účel dostačující.

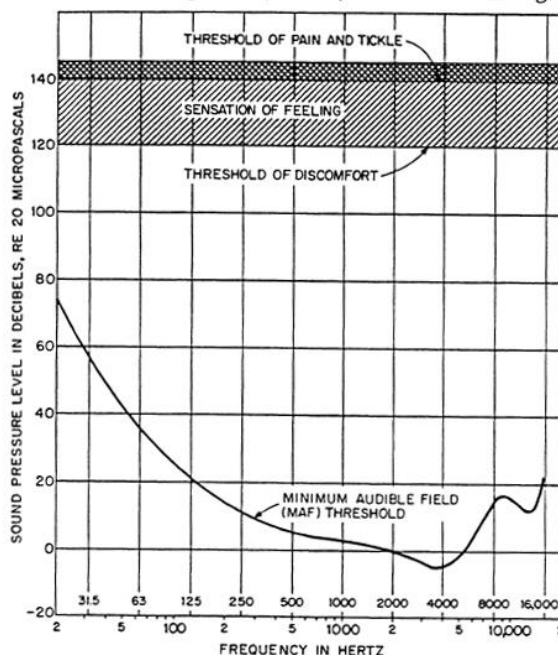
Obr. 2.8 Pohyby hlavy při jejím otáčení a naklání



2.3.3 Ucho a lidský sluch

Mechanismus lidského sluchu je víc než mikrofón. Ucho je zároveň velmi přesný analyzátor frekvence, lokátor zvuku, indikátor hlasitosti, výšky tónu a barvy zvuku. Rozsah frekvencí, které dokážeme uchem vnímat, pokrývá zhruba deset oktáv. Lidské ucho je schopno zachytit akustický tlak tak malý, že se při něm ušní bubínek pohne o méně než 10^{-9} cm, což odpovídá zhruba 1/10 velikosti nejmenšího atomu. Nejnižší zachytitelný akustický tlak nazýváme práh slyšení. Práh slyšení je do značné míry závislý na posluchači a jeho věku. Na obrázku 2.9 je zobrazen práh slyšení a to jak se s různou frekvencí mění. Z obrázku vyplývá, že při nízkých frekvencích slyšíme až zvuky s vyšší úrovní akustického tlaku, nejcitlivější je ucho v oblasti zhruba 1 – 5 kHz a za touto hranicí se citlivost na úroveň akustického tlaku opět snižuje. V grafu je také vyznačen práh způsobující pocit nepohodlí (120 dB), oblast kdy zvuk v uchu způsobuje pocitový vjem (mezi 120 a 140 dB) a práh bolesti (140 dB) [1].

Obr. 2.9 Závislost prahu slyšení na frekvenci [1]



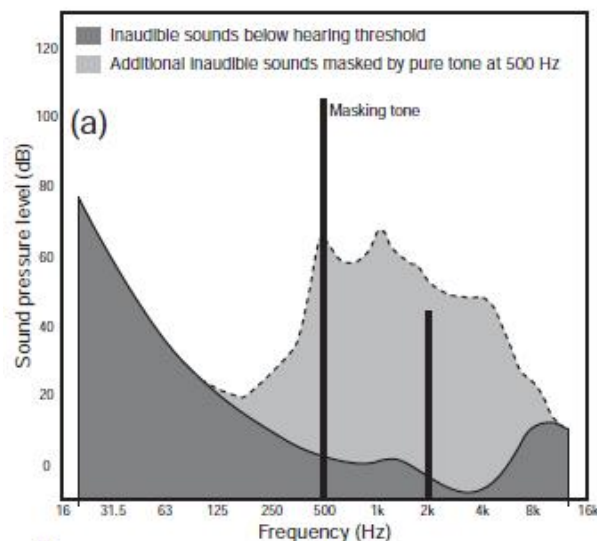
Rozpoznání polohy zvuku probíhá na tom principu, že vzhledem k poloze uší zhruba 18 cm od sebe vznikne malý časový posun, daný rozdílnou vzdáleností uší od zdroje zvuku. Časový posun je dále umocněn rozdílem v intenzitě, protože pokud zvuk přichází ze strany, přítomnost hlavy způsobí částečné zakrytí. Tyto dva způsoby vnímání polohy zdroje zvuku se projevují každý při různé frekvenci. Časového rozdílu využívá mozek při frekvencích nižších než 700 Hz, rozdílné intenzity zvuku potom při frekvencích nad 2,8 kHz, přičemž v pásmu mezi 700 Hz a 2,8 kHz se využívají oba způsoby zároveň [11].

2.3.4 Psychoakustika

Jedním z hlavních úkolů psychoakustiky je hledání způsobů tvorby relevantnějších měření a zpracování dat, tak aby lépe vystihovaly vnímání sluchem. Základem je rozlišování hlasitosti a rozdílné vnímání hlasitosti zvuku o různých frekvencích, popsané v předešlé podkapitole. Psychoakustika zabývá například maskováním a sluchovým reflexem. Maskování je jev, ke kterému dochází, pokud přítomnost jednoho zvuku zamezuje přítomnosti dalšího. Často se zvuky nemusí zcela překrýt a dochází ke koexistenci těchto zvuků. Na obrázku 2.10 je zobrazeno maskování tónu

o frekvenci 2 kHz hlasitějším čistým tónem o frekvenci 500 Hz. Ten dále maskuje další tóny, které jsou obsaženy v šedých oblastech. Tmavě šedá oblast zobrazuje tóny pod prahem slyšení. Sluchový reflex je drobný sval ve středním uchu, který svým stažením snižuje slyšitelnost zvuků o nízkých frekvencích. Někdy se popisuje jako jev, který má chránit sluch, ve skutečnosti ho ale chrání jen málo, protože poškození uší hrozí mnohem více při vysokých frekvencích. Sluchový reflex však před vysokými frekvencemi téměř nechrání. Dalším důvodem proč se nedá říci, že se jedná o ochranu sluchu, je fakt, že reflex se spouští pomalu a přechodné hlasité zvuky tedy ponechává beze změny, případně při jeho dlouhodobější aktivaci ochabuje. Není tedy zcela jasné, k čemu přesně sluchový reflex slouží. Vzhledem k tomu, že se aktivuje při jídle a konverzaci, je pravděpodobné že se jedná o ochranné zařízení, které má člověku pomoci slyšet příchod nepřátel právě během jídla a konverzace. Psychoakustika zkoumá komplexně lidský sluch, vnímání šumu apod., čehož lze dále využívat při zkoumání rozdílů, například v Hi-Res audio reprodukci [12].

Obr. 2.10 Maskování čistým tónem o frekvenci 2 kHz [12]



2.4 Velikost interiéru automobilu

Dalším důležitým parametrem, který je potřeba znát před začátkem tvorby návrhu mikrofonního pole, je velikost interiéru automobilu. Základním požadavkem při tvorbě návrhu byla univerzálnost zařízení. Musí být tedy navrženo tak, aby bylo možné měřit jak v malých tak ve velkých vozech a to ve stejných polohách, aby se výsledky daly

případně porovnávat. Z toho důvodu bylo změřeno několik vozidel: Škoda Fabia I, Škoda Octavia II, Volkswagen UP! a Volkswagen Touareg. Vozidla byla přeměřována ve výšce hlavové opěrky a opět se nejedná o zcela přesná měření. Cílem měření bylo především zjistit, v jakých místech jsou největší rozdíly v rozměrech a ty opět zohlednit při samotném návrhu. Měřené rozměry jsou zobrazeny v *tabulce 2.1*. Rozměr A je vzdálenost od volantu k hlavové opěrce v krajních polohách sedadla, rozměr B je vzdálenost mezi sedadly, měřeno v ose sedadla, rozměr C je vzdálenost od středu sedadla ke středovému sloupku a rozměr D od osy sedadla k přednímu oknu. Pro lepší představitelnost jsou měřené vzdálenosti naznačeny v *přílohách A, B, C*. Z výsledků měření vyplývá, že vzdálenosti od hlavové opěrky směrem ke sloupku karoserie a k bočnímu oknu jsou bez ohledu na velikost auta přibližně stejné, stejně jako vzdálenost od horního okraje volantu k hlavové opěrce. Největší rozdíl jsme zaznamenali v prostoru mezi sedadly, u největšího Touaregu a nejmenšího UP!u byl rozdíl v této délce 16 cm. Prostor nad hlavou a celkovou „vzdušnost“ interiéru při porovnání nebereme v potaz, v tomto ohledu jsou mezi vozy samozřejmě výrazné rozdíly, návrh však neovlivňují. Měřicí systém bude zasahovat jen do oblasti ve výšce hlavové opěrky.

Tab. 2.1 Porovnání vnitřních rozměrů vozidel koncernu Volkswagen

	A [cm]	B [cm]	C [cm]	D [cm]
ŠKODA Fabia I	69 - 86	68	20	27
ŠKODA Octavia II	66 - 88	71	21	28
VW UP!	68 - 85	66	20	27
VW Touareg	66 - 90	82	22	29

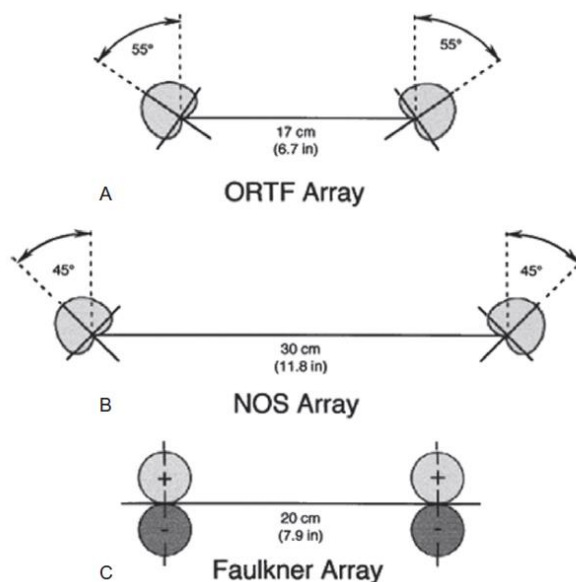
2.5 Techniky nahrávání zvuku více mikrofony

Techniky nahrávání zvuku více mikrofony se využívají především při nahrávání, je však dobré se s nimi alespoň okrajově seznámit, abychom pochopili souvislosti s používaným rozmístěním mikrofonů.

2.5.1 Stereofonní nahrávací techniky

Využívá se dvou směrových mikrofonů, umístěných v určité vzdálenosti od sebe a vychýlených směrem ven. Tím se docílí podobného efektu, který vnímá člověk pomocí sluchu, tedy časového a amplitudového posunu. Vzdálenost a vychýlení mikrofonů záleží na konkrétní technice. Jednotlivé techniky, jsou si podobné, například ORTF bylo vyvinuto francouzskou televizí, NOS nizozemskou televizí, Faulkner Array bylo vytvořeno pro nezávislá nahrávací studia. Ukázka těchto nahrávacích polí je na obrázku 2.11. Technika ORTF je upřednostňována mnohými inženýry a muzikanty. Mikrofony jsou od sebe vzdáleny 17 cm a vychýleny o 55° směrem ven. Vzdálenost mezi mikrofony je velmi podobná reálné vzdálenosti uší, obecně se uvádí 18 cm [2, 11].

Obr. 2.11 Vzdálenosti a úhly vychýlení v polích ORTF, NOS a Faulkner [2]

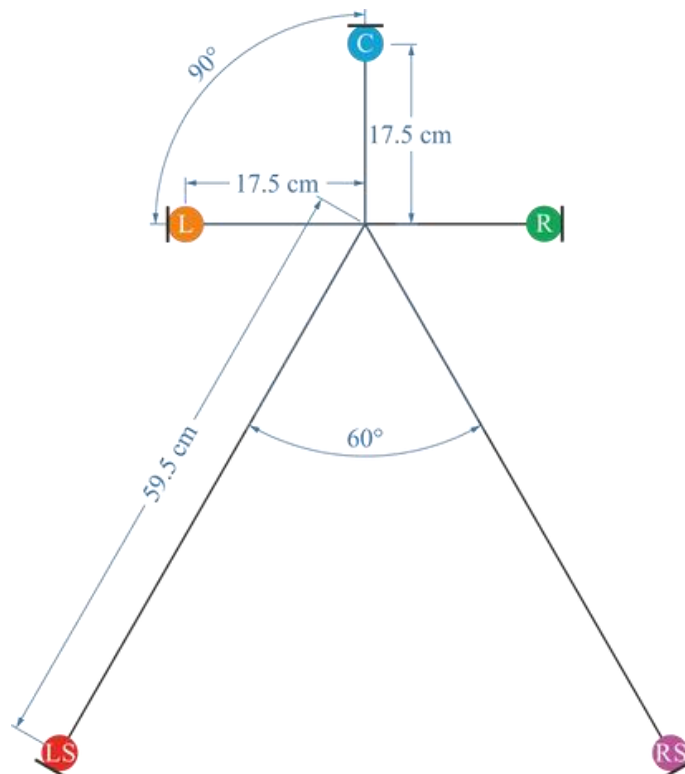


V souhrnu tedy stereofonní nahrávací techniky (anglicky označované jako near-coincident) poskytují obraz o prostorové poloze zvuku, který je dán specifickým rozmístěním mikrofonů. Volbou úhlu rozevření mikrofonů je možné ovlivnit perspektivu nahrávaného zvuku [2].

2.5.2 Vícekanálové nahrávací techniky

Pro nahrávání vícekanálového zvuku (Surround Sound –prostorový zvuk), se využívá složitějšího rozmístění několika mikrofonů. Na *obrázku 2.12* je zobrazen SPL pole mikrofonů (Sound Performance Lab array), používané k zachycení prostorového zvuku pro sestavy reproduktorů 5.1. Pole je rozděleno do dvou skupin, přední skupiny tří mikrofonů a zadní skupiny dvou mikrofonů. Mikrofony v přední části jsou umístěny do vrcholů rovnoramenného trojúhelníka. V polovině délky přepony tohoto pomyslného trojúhelníka leží střed celého nahrávacího systému, mikrofony z přední skupiny jsou od něj vzdáleny 17,5 cm. Zadní mikrofony jsou umístěny 59,5 cm od středu a svírají mezi sebou úhel 60° . Právě zadní mikrofony vytvářejí prostorový efekt. V závislosti na zvoleném mikrofonním poli se opět mohou vzdálenosti lišit [11].

Obr. 2.12 Schéma prostorového pole SPL [11]



3 Návrh mikrofonního pole – tvorba řešení

3.1 Upevnění

První věcí, kterou bylo potřeba při řešení zvážit, je upevnění měřícího pole k sedadlu. Jedna z možností, připevnění konstrukce k tyčkám hlavové opěrky, byla sice jedna z nejjednodušších, ale nesplňovala základní požadavek na univerzálnost a použitelnost v jakémkoliv automobilu. Některé nové vozy koncernu VW používají sedadla, která mají jednodílné opěradlo bez nastavitelné hlavové opěrky (*obr. 3.1*).

Obr. 3.1 Sedadla s jednodílným opěradlem ve Volkswagenu UP! [14]

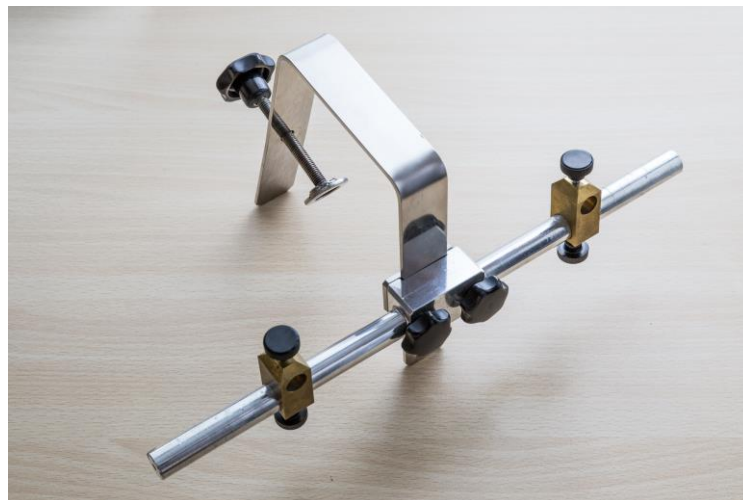


Další z nápadů byl inspirován již zmíněným Audision bit Tune. Mělo se jednat o desku, nahoře zahnutou do pravého úhlu, která by se přikládala na hlavovou opěrku (zahnutí nahoře zajišťovalo, že deska nesklouzne), ke které by se pevně připoutala popruhem. Tato možnost by se již dala považovat za univerzální, problémem by potenciálně mohla být zdlouhavost nasazování a také uchycení konstrukce měřícího pole.

Po zvážení výhod a nevýhod předchozí možnosti, jsme se rozhodli využít upevnění ze současného systému pro dva mikrofony (viz. kapitola 2.2.1). Připevnění konstrukce

s mikrofony bude zajištěna pomocí dvou čepů, které se nasunou do otvorů původně určených k uchycení nástavců mikrofonů. Díly, které budou využity, ukazuje *obrázek 3.2* a *příloha D*. Princip uchycení je jednodušší než v předchozím případě. Jedná se o pás z nerezového plechu, ohnutý do tvaru podkovy, který se shora nasadí na hlavovou opěrku a zezadu utáhne šroubem (*příloha E*). Upevnění lze použít na jakékoliv sedadlo, užší než je šířka samotného držáku. Upevnění namontované na sedadle je dostatečně pevné, nebude tedy problém s větší pákou, kterou vyvine připevnění mikrofonního pole.

Obr. 3.2 Díly z původního měřáku, využité pro upevnění mikrofonního pole



3.2 První návrh

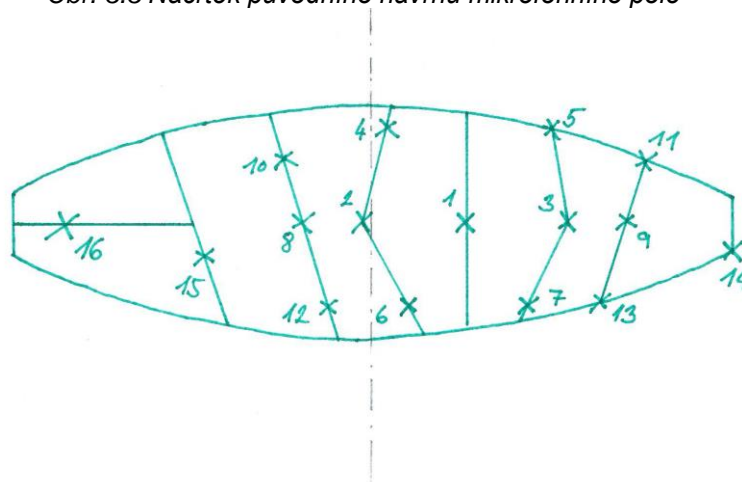
Nyní již k samotné tvorbě návrhu měřícího zařízení. Materiál byl zvolen s ohledem na co nejnižší hmotnost, dostatečnou pevnost, možnost materiál svařet. Materiál také musel být takový, aby se snadno daly upevnit držáky mikrofonů. Držáky jsou plastové a na spodní straně mají 14 mm dlouhý žlab. Tyto podmínky splňuje použití hliníkových profilů čtvercového průřezu o rozměrech 10×10 mm. Jak se později ukázalo, svařování hliníkových profilů vyžaduje speciální technologii a pokud jsou profily příliš tenkostěnné, snadno se propálí nebo tvarově zbotí. Z toho důvodu byly použity profily se stěnou širokou 2 mm, které již lze bez obtíží svařovat. Použití profilu 10×10 mm má také své opodstatnění, šířka profilu musí být menší než vlnová délka měřeného zvuku, aby nedocházelo k zakrývání zvukové vlny. Vlnovou délku spočteme pomocí jednoduchého *vztahu 3.1*, za frekvenci dosazujeme nejvyšší frekvenci, kterou budeme

měřit, tedy 20 kHz. Aby nedocházelo k blokování vlny, musí být šířka profilů menší než 1,72 cm.

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{344}{20\,000} = 0,0172\text{ m} \quad (3.1)$$

Dalším krokem byl samotný tvar držáku a následné rozmístění mikrofonů. Měřák měl tvar „ploutve“, přední a zadní hrana byly zaoblené. Náčrtek držáku je zobrazen na obrázku 3.3, křížky v náčrtku jsou místa připevnění držáků s mikrofony, čísla u křížků znázorňují číslo mikrofonu. Celý držák měl být dlouhý zhruba 60 cm a široký 20 cm a byl navržen tak, aby pojmul nejméně 16 mikrofonů. Rozmístění mikrofonů bylo navrženo podle pohybů hlavy (popsáno v kapitole 2.3.1) tak, že mikrofon byl umístěn v krajních polohách pohybu. Mikrofony 1 a 16 jsou důležité, protože 1 určuje střed hlavy a 16 se pomocí posunu nastaví na střed vozidla, pomocí těchto mikrofonů se potom získávají referenční hodnoty. Mikrofony 2 a 3 jsou normální poloha uší, vzdálenost mikrofonů od sebe je 17 cm. Jako vzor této vzdálenosti posloužilo pole ORTF, zde se však nepracuje s natočením mikrofonů, protože použité mikrofony jsou všesměrové (do zhruba 10 kHz). Natočení některých mikrofonů v poli by také mohlo způsobovat zkreslení naměřených údajů, proto v návrhu směřují všechny mikrofony dopředu. Mikrofony 4 – 7 jsou v polohách otáčení hlavy, 8 – 13 potom v polohách náklonu hlavy.

Obr. 3.3 Náčrtek původního návrhu mikrofonního pole



Tento návrh měl však celou řadu nevýhod, které bylo potřeba odstranit. První nevýhoda byla ta, že měřák by byl obtížně použitelný na jiném místě než na sedadle

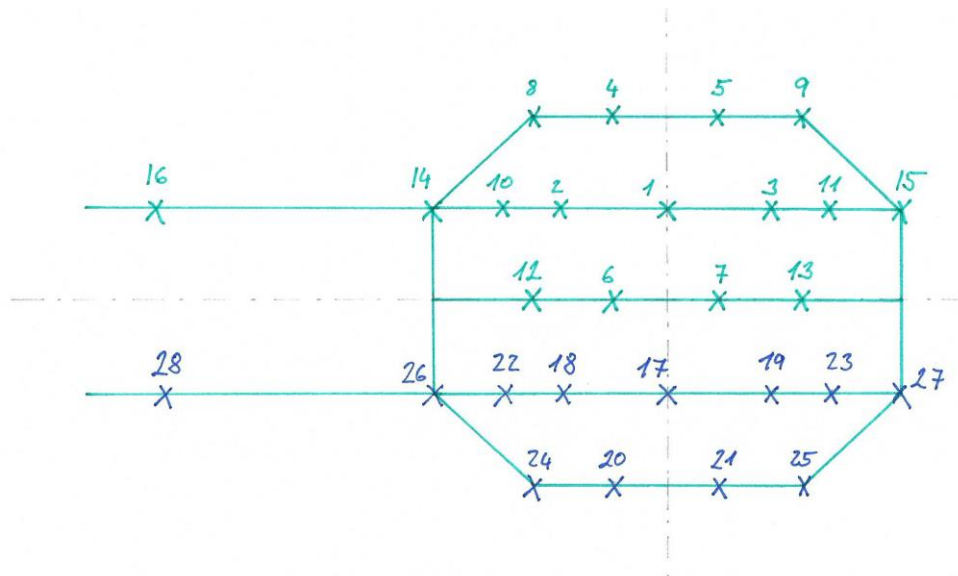
řidiče, kvůli jeho nesouměrnosti. S drobnými změnami v poloze mikrofonů a upínáním na obou oblých hranách, by bylo možné držák na sedadle spolujezdce použít tím způsobem, že by se jednoduše otočil. Mikrofony by ale musely být umístěny směrem nahoru. To by znamenalo nutnost kalibrace pro měření vysokých frekvencí nad 10 kHz, kdy mikrofon již není všesměrový a poloha nahoru by způsobovala útlum. Druhým nedostatkem byla jeho malá velikost. U velkých aut typu Audi Q7 nebo Mercedes-Benz třídy S, by se mohlo stát, že mikrofon č. 16 nedosáhne až do středu mezi sedadly. Zvětšení držáku by však nebylo praktické. Třetí problém také souvisí s praktičností, tentokrát přímo při měření. Při měření bychom měli počítat s tím, že v automobilu budou sedět dva typy postav. Menší „europostava“, typicky žena, s výškou zhruba 160 cm a větší „europostava“, muž, s výškou zhruba 190 cm. Hlavy obou postav se budou kvůli různému nastavení sedadla nacházet na jiném místě a pomocí úzkého držáku neproměříme dostatečně velké pole, aniž bychom museli měnit nastavení sedadla, což by měření zbytečně zdržovalo. Změna nastavení sedadla by mohla také znamenat, že měření v různých typech vozidel nebude probíhat za stejných podmínek a měření tak nebudou srovnatelná. Právě konzistentnost měření je jedním z důvodů tvorby tohoto měřicího zařízení.

3.3 Finální návrh

Finální návrh je vytvořen tak, aby odstraňoval nevýhody předešlého návrhu. Co se týče tvaru, je tento držák oproti předchozímu zjednodušený, čímž se podařilo dosáhnout osově souměrnosti. To nese výhodu v možnosti umístění na jakékoliv místo ve vozidle. Držák (*obr. 3.4*) má rozměry zhruba 40×32 cm, z boku vedou dvě tyče o délce zhruba 30 cm, na kterých jsou umístěny mikrofony č. 16 a 28 s možností posunu. Jedná se o obdobu mikrofonu č. 16 z předchozího návrhu, tedy o referenční mikrofony umístěné ve středu mezi sedadly. Zde jsou však použity dva mikrofony, důvodem toho je, že se jedná o „dvouhlavý model“, tedy na jednom držáku jsou rozmístěny mikrofony, tak aby simulovaly polohu hlavy velké i malé europostavy naráz, odpadá tedy nutnost posouvat sedadlo. V náčrtku jsou mikrofony měřící hlavu velké postavy označeny zelenými křížky, hlavu malé postavy modrými. Mikrofony č. 6, 7, 12 a 13 jsou společné. Referenční mikrofony pro středy hlav č. 1 a 17 jsou na spojnicí s mikrofony č. 16 a 28 ve středu vozidla. Tyče nesoucí mikrofony 16 a 28 jsou odnímatelné a dají se na držák nasadit z obou stran. Při měření na druhé straně vozidla se tedy nemusí otáčet celým

měřákem a není tak nutné řešit změnu směru mikrofonů, otočí se pouze mikrofony na posuvných jezdcích. Možnost sundání tyčí je také vhodná pro transport.

Obr. 3.4 Náčrtek finálního návrhu mikrofonního pole



Tento návrh má však také jednu nevýhodu a tou je velký počet mikrofonů, v plně osazeném stavu 28. Navýšení je logické, vzhledem k měření v širší oblasti, která naráz pokrývá prostor, ve kterém se pohybuje hlava při dvou různých nastaveních sedadla. Tento fakt celé zařízení podstatně prodražuje, řešení tedy bude prozatím fungovat pouze s částí mikrofonů, zbylé se případně namontují později.

4 Realizace

Přípevnění k současnému systému upevnění je realizováno pomocí čepů z hliníkového profilu o kruhovém průřezu a průměru 11,5 mm. Odnímatelné postranní tyče jsou spojeny přepážkami do jednoho kusu, ke zbytku měřáku se připevňují pomocí tří šroubů. Zde je vhodné použít gumové podložky, aby se předešlo rezonanci při vysokých kmitočtech a velké hlasitosti.

Z hliníkových profilů bylo nařezáno celkem 17 dílů požadovaných rozměrů, ty byly dále předány specializované firmě, zabývající se svařováním hliníku. Sváry na hotové konstrukci byly následně zabroušeny, aby hotový měřák byl co nejestetičtější. Následně byly vyvrtány otvory pro připevnění držáků mikrofonů, ve vyvrtaných otvorech bylo potřeba vytvořit závit pro šrouby M2. Vyvrtány byly také otvory pro šrouby sloužící k připevnění druhé části měřáku. Posuvné jezdce mikrofonů byly vyrobeny také z hliníkového profilu, tentokrát se jedná o profil 15×15 mm, který bylo možné nasunout na menší profil, ze kterého je měřicí zařízení svařeno. Na zařízení zbývá provést povrchovou úpravu kvůli estetickému dojmu, pravděpodobně se bude jednat o eloxování, případně nalakování kvalitním lakem. Výhoda eloxování je v lepší odolnosti vůči nešetrnému zacházení. Po osazení mikrofony bude také vytvořen kufr, ve kterém bude možné zařízení přenášet i s nasazenými mikrofony a kabely.

Závěr

Výsledkem práce jsou získané teoretické znalosti, zejména z oblasti měřících mikrofonů. Zjistili jsme, jaké typy mikrofonů jsou pro měření vhodné, z jakého důvodu a jaké mají tyto mikrofony parametry. Jedná se o mikrofony elektretové a kondenzátorové, přičemž pro použití v mikrofonních polích se hodí zejména mikrofony elektretové. Důvodem je především jejich nižší cena. Oproti kondenzátorovým mikrofonům mají sice horší parametry, pro měření v rozsahu lidského sluchu jsou však tyto parametry stále dostačující. Při tvorbě práce se nám dále podařilo zjistit více o tom, jak funguje vnímání zvuku lidským sluchem a jak je zvuk mozkiem interpretován.

Hmatatelným výsledkem práce je potom samotné mikrofonní pole. Vzhledem k velmi specifickému účelu tohoto měřícího zařízení, se jedná o jedinečné řešení, které nemá přímý ekvivalent v oblasti komerčních řešení. Zařízení v budoucnu poslouží například k porovnání vlivů různého rozmístění reproduktorů v automobilech.

Seznam literatury a informačních zdrojů

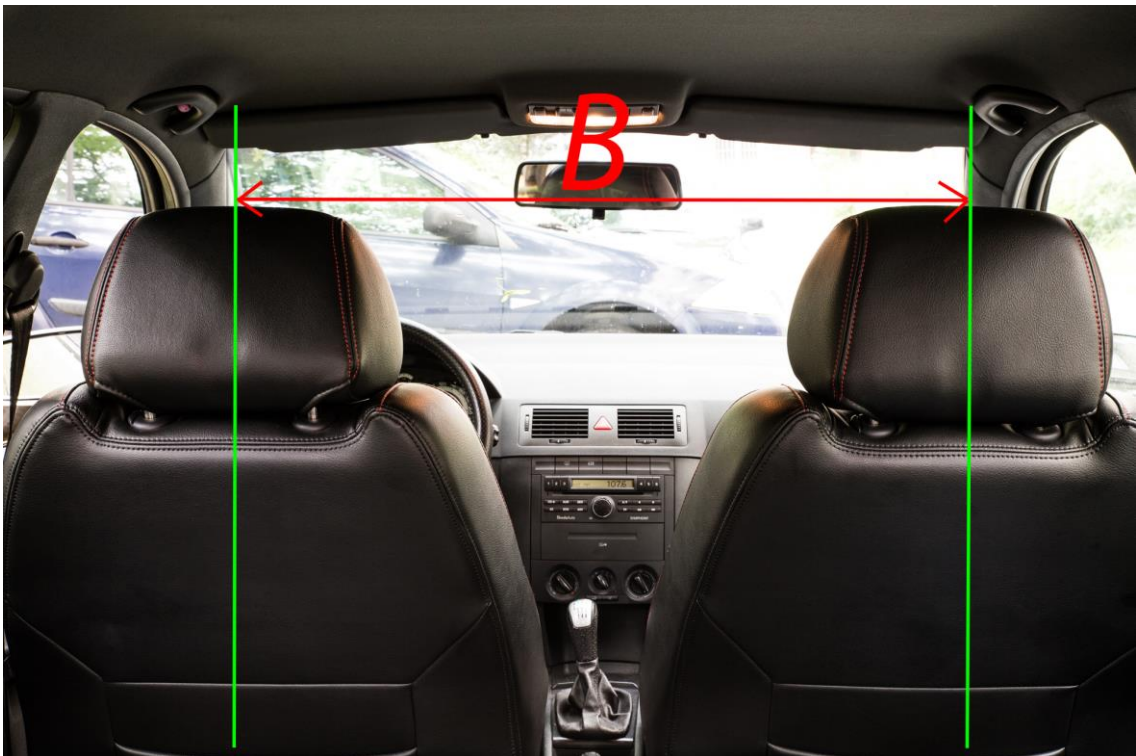
- [1] BERANEK, Leo L. *Acoustical measurements*. Revised edition. USA, 1993. 841s. ISBN: 0-88318-590-3
- [2] RAYBURN, Ray A. *Eargle's Microphone Book*. 3rd ed. USA: Focal Press. 2012. 463 s. ISBN: 978-0-240-82075-0
- [3] Microphone Handbook, PCB Piezotronics. [online]. Květen 2016. [Cit. květen 2016]. Dostupné z: http://www.pcb.com/microphonehandbookfiles/microphone_handbook_lowres.pdf
- [4] G.R.A.S. Selection Guide for Microphones and Preamplifiers. [online]. Květen 2016. [Cit. květen 2016]. Dostupné z: <http://www.ni.com/white-paper/14044/en/>
- [5] Brüel & Kjaer Microphone parameters explained. [online]. Květen 2016. [Cit. květen 2016]. Dostupné z: <http://www.bksv.com/Products/transducers/acoustic/microphones/MicrophoneParametersExplained>
- [6] G.R.A.S. 40PH Manual. [online]. Květen 2016. [Cit. Květen 2016]. Dostupné z: http://www.ni.com/pdf/manuals/G.R.A.S._40PH.pdf
- [7] Brüel & Kjaer products. [online]. Květen 2016. [Cit. květen 2016]. Dostupné z: <http://www.bksv.com/Products/transducers/acoustic/acoustical-arrays>
- [8] Magazín a eshop, zdroj obrázku. [online]. Květen 2016. [Cit. květen 2016]. Dostupné z: <http://www.vzdy.cz/audison-bit-tune>
- [9] Stránky výrobce Audision. [online]. Květen 2016. [Cit. květen 2016]. Dostupné z: <http://audisonbitdrive.eu/>
- [10] Somatometrie a klinická ortopedie, MUNI, praktická cvičení. [online]. Květen 2016. [Cit. květen 2016]. Dostupné z: http://is.muni.cz/el/1441/jaro2013/BI2MP_PKAL/um/Somatometrie_protokol.pdf
- [11] Rob Kelly sound engineering. [online]. Květen 2016. [Cit. květen 2016]. Dostupné z: <https://robkellysound.com/2014/05/17/introduction/>
- [12] TOOLE, Floyd E. *Sound reproduction*. USA: Focal Press. 2008. 550s. ISBN: 978-0-240-52009-4.
- [13] Car interior measurement using 3D – microphone arrays. [online]. Květen 2016. [Cit. květen 2016]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/235957654_Car_interior_measurements_using_3D-microphone_arrays
- [14] Autoevolution, zdroj obrázku. [online]. Květen 2016. [Cit. květen 2016]. Dostupné z: http://www.autoevolution.com/reviews/volkswagen-up-test-drive-2012.html#agal_25

Přílohy

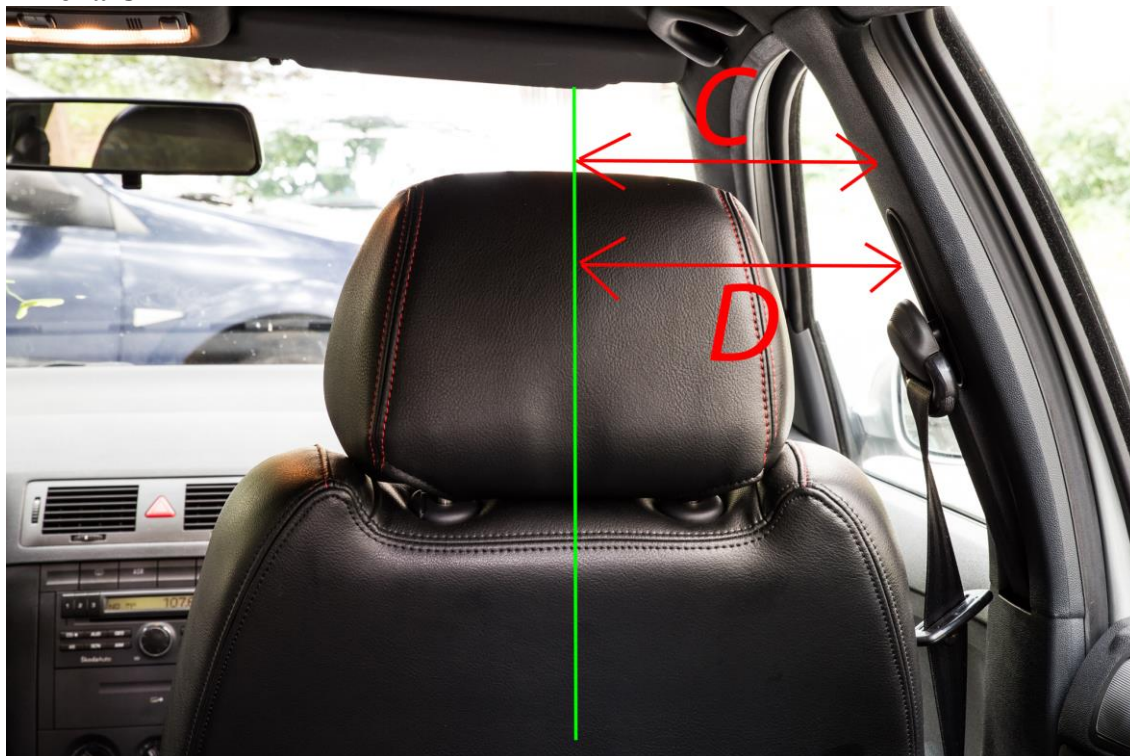
Příloha A



Příloha B



Příloha C



Příloha D



Příloha E

