

**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 ozvučovacích 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

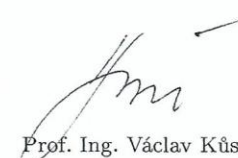
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: 24. června 2016

Termín odevzdání bakalářské práce: 22. srpna 2016


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 24. června 2016

Abstrakt

Tato bakalářská se zabývá návrhem mikrofonního pole pro měření ozvučovacích systémů automobilu. Práce je členěna do čtyř částí. První část teoreticky popisuje mikrofony, jejich typy a parametry. Druhá teoretická část slouží jako teoretický základ k praktické části, ukazuje aspekty měření a zabývá se kontextem lidského vnímání. Třetí část práce se zabývá návrhem mikrofonního pole, spojitostmi s velikostí a rozložením konstrukce. V poslední části je popsána samotná realizace a řešeny požadavky, které se vyskytly během realizace.

Klíčová slova

Mikrofon, mikrofonní pole, zvuk, měřící zařízení, interiér automobilu

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 four 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 shows human perception aspects. Third part deals with design of microphone array. Also shows suggestions of its size and the layout of microphones. The last part shows final solution of microphone array, its design and production.

Key words

Microphone, microphone array, sound, measuring unit, car interior

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 22.8.2016

Luboš Běhal

Poděkování

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

Obsah

OBSAH	7
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	10
1 MĚŘÍCÍ MIKROFONY	11
1.1 MIKROFONY	11
1.1.1 Funkce, proměnné, účel	11
1.1.2 Typy mikrofonů	11
1.2 TYPY MIKROFONŮ DLE ZVUKOVÉHO POLE	13
1.2.1 Mikrofony pro volné pole – Free-field microphones.....	13
1.2.2 Tlakové mikrofony – Pressure microphones	14
1.2.3 Mikrofony pro měření náhodného výskytu – Random-incidence microphones.....	14
1.3 PARAMETRY MĚŘÍCÍCH MIKROFONŮ	15
1.3.1 Dynamický rozsah a citlivost	15
1.3.2 Frekvenční rozsah a polární křivky.....	17
1.3.3 Polarizace	19
1.4 MIKROFONY PRO MĚŘENÍ V MIKROFONNÍM POLI	20
1.4.1 G.R.A.S. 40PH CCP Free-field Array Microphone	20
2 MIKROFONNÍ POLE, LIDSKÝ FAKTOR	22
2.1 PROČ MĚŘIT	22
2.2 JAK SE MĚŘÍ.....	24
2.2.1 Technika využívaná v současnosti.....	24
2.2.2 Komerční řešení.....	25
2.3 LIDSKÝ FAKTOR.....	26
2.3.1 Hlava.....	26
2.3.2 Ucho a lidský sluch.....	27
3 NÁVRH MIKROFONNÍHO POLE – TVORBA ŘEŠENÍ	30
3.1 NÁVRH VELIKOSTI POLE PODLE INTERIÉRU VOZIDLA	30
3.1.1 Měřené automobily	30
3.1.2 Metodika měření a měřené údaje.....	30
3.1.3 Pozice řidiče/pasažéra ve vozidle	32
3.1.4 Naměřené údaje	32
3.2 ROZMÍSTĚNÍ MIKROFONŮ.....	33
3.2.1 Pohyby hlavou.....	33
3.2.2 Návrh rozmístění.....	34
3.3 UPEVNĚNÍ.....	35
3.3.1 Požadavky a návrhy	35
3.3.2 Využití současného řešení	36
3.4 KONKRÉTNÍ ŘEŠENÍ MIKROFONNÍHO POLE	37
3.4.1 Volba materiálu	37
3.4.2 Velikost a tvar pole	38
3.4.3 Návrh „jednohlavého“ pole.....	39
3.4.4 Návrh „dvouhlavého“ pole.....	40
3.5 MĚŘÍCÍ ŘETĚZEC.....	41
4 REALIZACE A KONSTRUKČNÍ ÚPRAVY	43
4.1 KONSTRUKČNÍ ZMĚNY BĚHEM REALIZACE.....	43
4.2 FINÁLNÍ PODOBA	44

ZÁVĚR	49
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	50
PŘÍLOHY	1

Seznam symbolů a zkratek

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

Úvod

Se zvyšujícími se nároky uživatelů automobilů narůstají požadavky na komfort cestování. Neodmyslitelnou součástí pohodlné jízdy je v dnešní době co nejlepší zvukový zážitek. Výrobci se tedy snaží nabídnout zákazníkům automobily s kvalitními audio systémy. Proto je nutné řešit vhodné nastavení parametrů uvnitř kabiny a sledovat chování zvuku v tomto prostoru, tak aby impakt na lidské vnímání byl co nejlepší.

Cílem bakalářské práce je seznámit se se stávajícími metodami měření, konkrétními zjišťovanými parametry a neznámými částmi řetězce. Následně navrhnout a vyrobit měřící zařízení pro přesnější zjišťování těchto parametrů.

Pro nalezení správných výsledků je potřeba vytvořit souhrnný obraz o chování zvuku v kabině, vysvětlit principy mikrofonů a definovat typy vhodné pro měření v mikrofonních polích. Tyto informace jsou teoretickým základem bakalářské práce a budou dále využity k výběru vhodné techniky v průběhu realizace.

Součástí teorie je popis stávajících systémů měření, které jsou využívány na Fakultě elektrotechnické ZČU v Plzni, a které jsou komerčně dostupné.

Praktická část je zaměřena na návrh a realizaci měřícího zařízení s následujícími požadavky:

- možnost univerzálního použití,
- opakovatelnost měření,
- odstranění neznámých částí řetězce,
- snadná manipulace a transport.

V této části jsou aplikovány informace získané z teoretické rešerše a zároveň poznatky získané při realizaci vlastního návrhu.

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 – generování harmonických z čistého tónu,
- frekvenční zkreslení – potlačení či zdůraznění určitých frekvencí,
- fázová zkreslení – zpoždění odezvy mikrofonu při různých frekvencích,
- zhoršená citlivost – vliv stárání, teploty, vlhkosti vzduchu, změn okolního tlaku, nešetrného zacházení. [1]

Mikrofony lze rozdělit podle jejich využití. Každé využití vyžaduje odlišný typ mikrofonu s různými vlastnostmi. Při výběru mikrofonu je potřeba zohlednit původ zvukového pole, charakteristiku měřeného zvuku a podmínky, za kterých bude mikrofon provozován. [1]

1.1.2 Typy mikrofonů

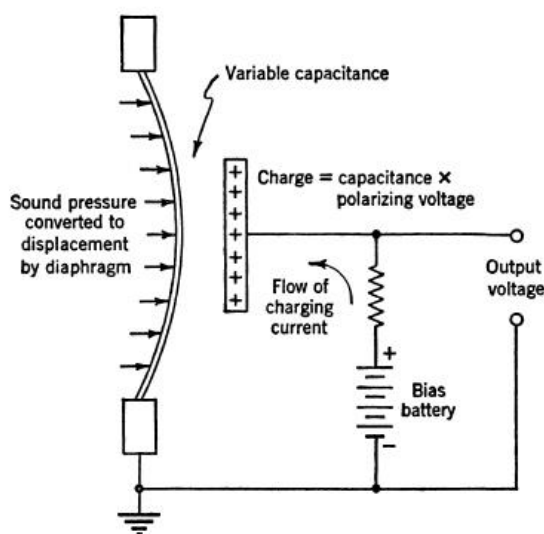
Různé druhy a typy mikrofonů se liší provedením, využitím a parametry. Pro měřicí účely mají hlavní využití mikrofony:

- kondenzátorové
- 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, která spočívá v potřebě přivést 100 až 200 V polarizačního napětí do obvodu. Konstrukce elektretového mikrofonu je tvořena tenkou polymerovou vrstvou – elektretovou fólií, ve které je elektrický náboj vázaný v molekulách. Vnější povrch pokrývá tenká kovová vrstva, která tvoří zemnicí část kondenzátoru. Dále je složen 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

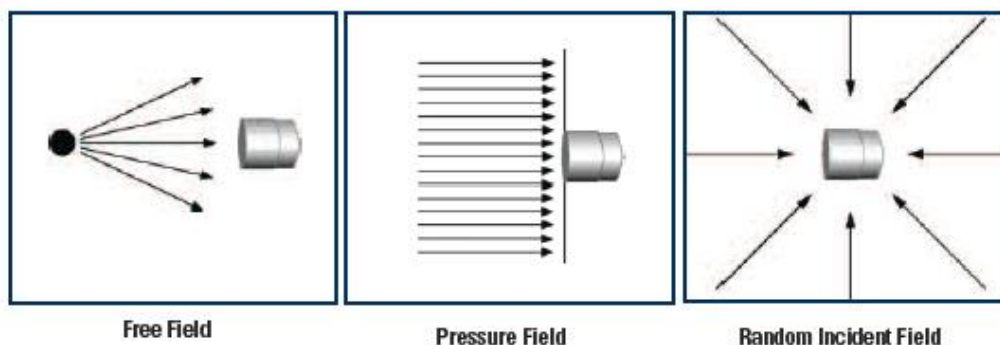
Mezi další typy mikrofonů se řadí uhlíkové mikrofony. Jedná se o mikrofony velmi jednoduché konstrukce, kde akustický tlak stlačuje uhlíkové granule v pouzdře a to zvyšuje povrch jejich kontaktu s pouzdrem. Tím dochází k nárůstu rezistivity, která souvisí na vyvolaném tlaku. K rozšíření těchto mikrofonů došlo zejména v telefonní technice, kde příliš nezáleží na jejich špatných parametrech. Těmi jsou zejména omezený dynamický rozsah a velké zkreslení zaznamenaného zvuku.

Dalšími typy mikrofonů jsou například dynamické, piezoelektrické nebo páskové. [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. Volba vhodného typu je stěžejní pro co nejpřesnější výsledky měření (obr. 1.2). 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]

Nejběžnější je měření ve volném poli. Mikrofony pro volné pole jsou nejpřesnější, pokud je zvuk měřen přímo proti jeho zdroji, tedy v nulovém úhlu. Jejich vhodné využití je pro měření v otevřených prostorech s větší vzdáleností od předmětů způsobujících odrazy a pro měření dobře odhlučněných vnitřních prostředí. Obvyklý průměr těchto mikrofonů je 0,25 palce až 1 palec. Pokud je mikrofon umístěn ve zvukovém poli přibližně stejně velký jako vlnová délka zvuku při vysoké frekvenci, dochází vlivem difrakce k určité rezonanci

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 jsou využívány zejména tehdy, kdy je měření prováděno v blízkosti tvrdých odrazných ploch, například zdí. 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. Jsou vhodné pro měření v uzavřených prostorách, kde se počítá s dozvukem, například v dozvukových komorách nebo v prostředí s vysokou mírou odrazivosti. 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 malé mikrofony s tuhou membránou mají citlivost nízkou. Proto jsou mikrofony s vysokou citlivostí schopny měřit nízké úrovně akustického tlaku. Naopak mikrofony s nízkou citlivostí měří vysoké úrovně. Opačné využití není vhodné. [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]

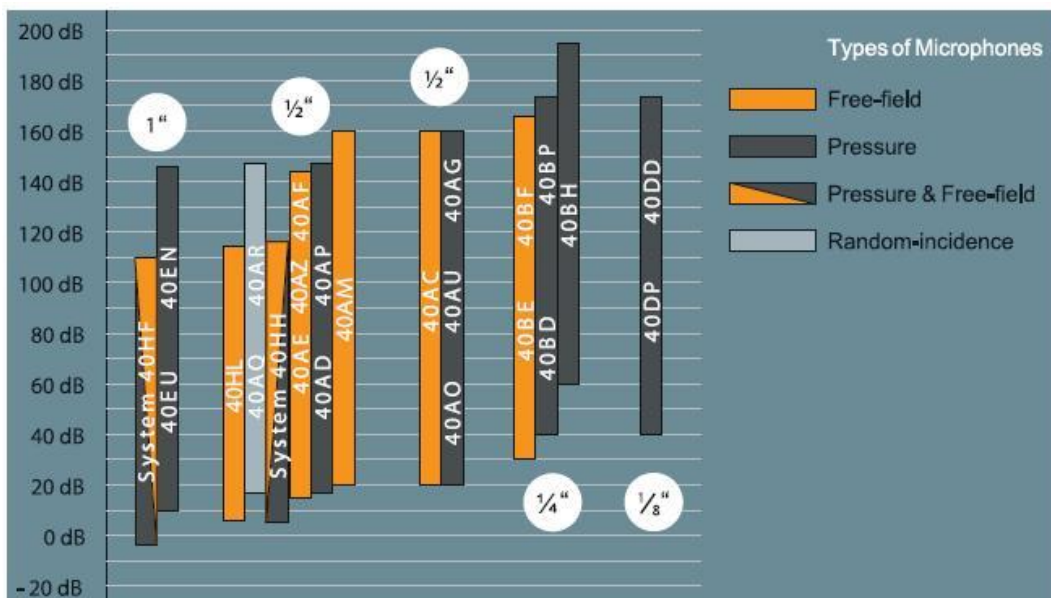
Spodní mez dynamického rozsahu souvisí s tepelným šumem, který generují molekuly vzduchu tepelným pohybem. Tím se i za zcela klidných podmínek vytváří velmi malý vstupní signál. Tento tepelný šum leží obvykle na hladině zhruba 5 μ V a překrývá jakýkoliv akusticky vybuzený signál. Z tohoto důvodu nelze měřit úrovně 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

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

Zdroj: vlastní zpracování, 2016, dle [3]

Obrázek 1.4 ukazuje, jak se liší dynamický rozsah 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]



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

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

Pokud je znám akustický tlak, může být převeden do škály v decibelech (*vzorec 1.1*). Jako referenční tlak se používá nejnižší uchem zaznamatelná hodnota tlaku, 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]

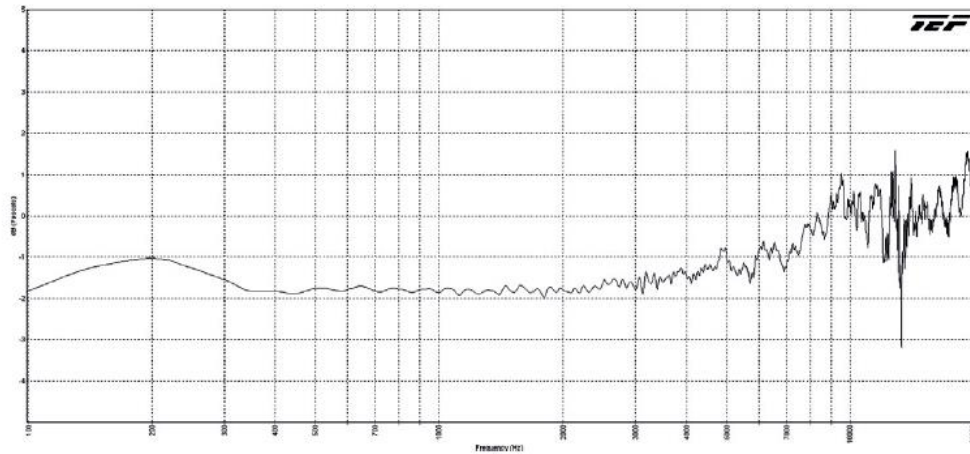
$$L_p = 20 \cdot \log \cdot \left(\frac{P_a}{P_0} \right) \quad (1.1)$$

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 má souvislost s velikostí mikrofonu, tzn. srovnání velikosti mikrofonu 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. [4]

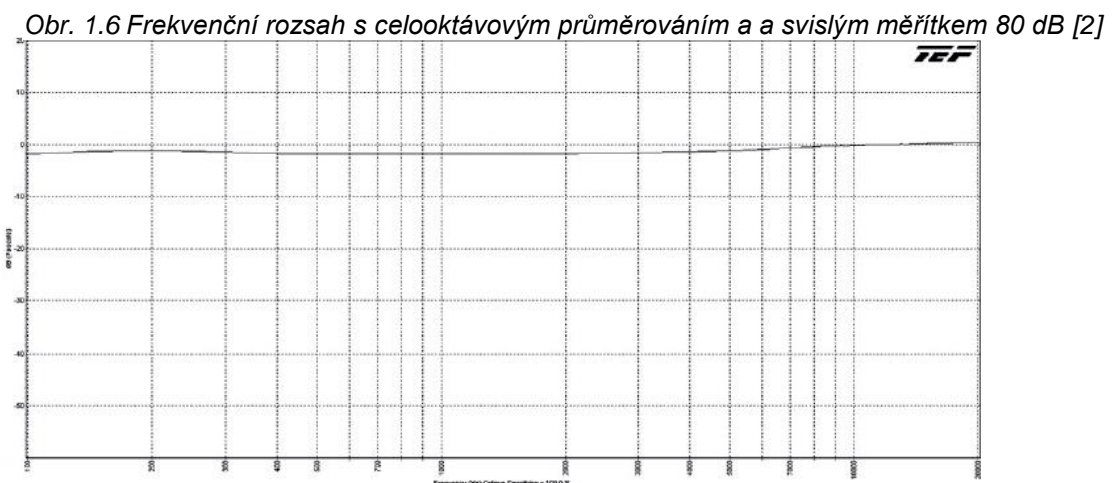
Spodní mezní kmitočet je v podstatě měření rozdílu mezi vnitřním tlakem mikrofonu a okolním tlakem. Pokud by tedy byl mikrofon vzduchotěsný, změny okolního tlaku by způsobovaly statické vychýlení membrány, což by mělo za následek změnu frekvenčního rozsahu a také citlivosti. Aby se tomuto jevu zabránilo, 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 (frekvenční odezvy). Obě zobrazují stejné naměřené hodnoty. Rozdíl je v měřítku svislé osy. U *obrázku 1.5* je použito měřítko 10 dB, u *obrázku 1.6* měřítko 80 dB s celooktávovým průměrováním frekvenčního pásma. Díky rozdílné interpretaci působí frekvenční odezva na *obrázku 1.6* s nepřiměřeně hrubým svislým rozlišením a aplikovaným průměrováním plošší a příznivější, než skutečná data měření. Toho mohou využít výrobci při marketingu ve svůj prospěch, proto je klíčové posuzovat při výběru nezprůměrované výsledky měření. [2]

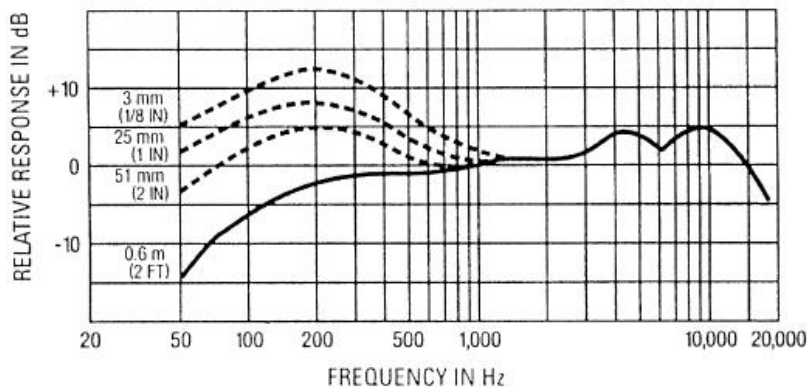


Údaje o frekvenční odezvě je potřeba uvádět pro určitou fyzickou měřicí vzdálenost, aby mohly být správně posouzeny efekty rozdílné vzdálenosti na směrové mikrofony (obr. 1.7). Pokud tato vzdálenost uvedena není, předpokládá se 1 metr. [2]

Obr. 1.5 Surová data frekvenčního rozsahu se svislým měřítkem 10 dB [2]

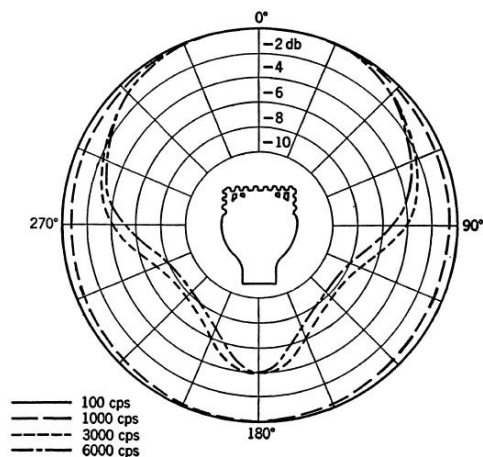


Obr. 1.6 Frekvenční rozsah s celooktávovým průměrováním a svislým měřítkem 80 dB [2]



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

Polární křivky mikrofonu ukazují, jak bude interpretován zvuk přicházející na mikrofon z různých úhlů. To záleží na konkrétním typu mikrofonu, na *obrázku 1.8* 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. 1.8 Směrová charakteristika sférického mikrofonu s ochrannou mřížkou [1]

1.3.3 Polarizace

Podle polarizace se mikrofony dělí na dva druhy:

- externě polarizovaný,

- 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. Externě polarizované mikrofony se používají při měření za vysokých teplot, pro laboratorní měření a také nabízejí širší škálu zařízení pro speciální druhy měření. Pre-polarizované mikrofony jsou využitelné ve vlhkém prostředí, pro přenosné měřiče a mikrofonní pole. [5]

1.4 Mikrofony pro měření v mikrofonním poli

Mikrofony pro měření v mikrofonních polích, anglicky *array microphones*, jsou mikrofony elektretového typu. Jejich dynamický a frekvenční rozsah není tak široký, jako u podobných mikrofonů kondenzátorového typu. Jejich hlavní přednosti 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]

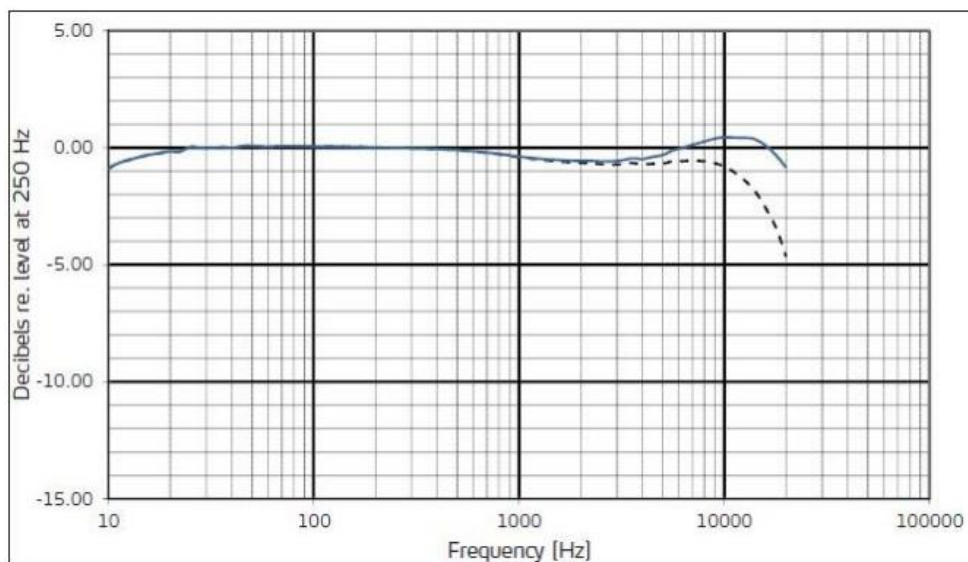
1.4.1 G.R.A.S. 40PH CCP Free-field Array Microphone

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 (obr 1.9). Při realizaci bakalářské práce byl použit tento typ mikrofonu. [6]



Obr. 1.9 Mikrofon G.R.A.S. 40PH [17]

Mikrofon má dynamický rozsah od 32 dB(A) do 135 dB (vztaženo 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 překalibrován pomocí jednotky G.R.A.S. 42AA. [6]

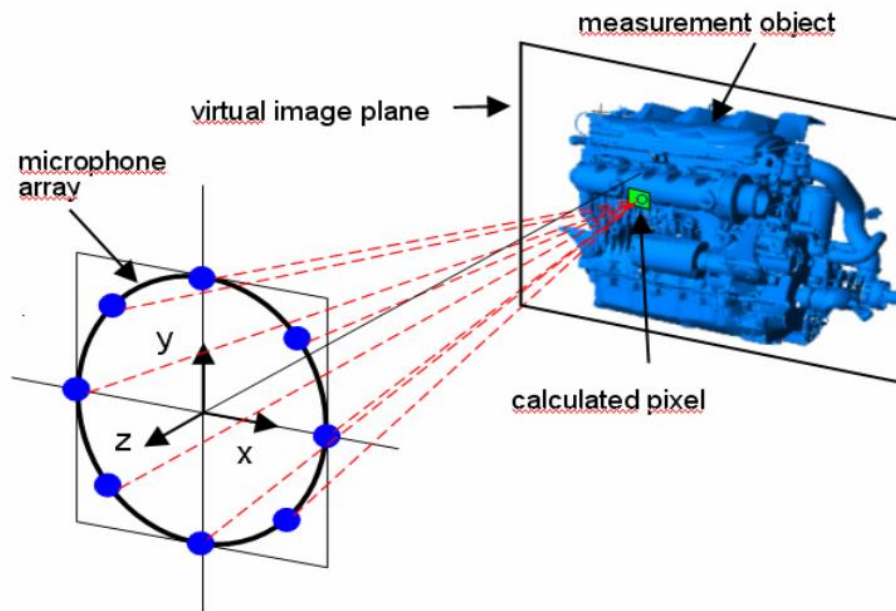


Obr. 1.10 Typická frekvenční charakteristika mikrofonu G.R.A.S. 40PH [6]

2 Mikrofonní pole, lidský faktor

2.1 Proč měřit

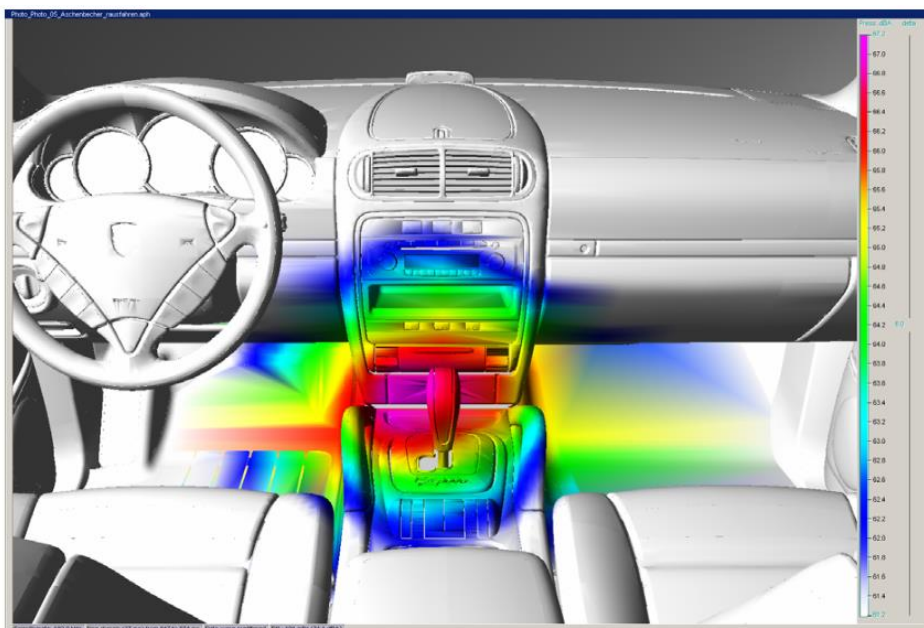
Mikrofonní pole může mít různé účely využití. Existují pole, která se využívají k lokaci zvuku, takzvané zvukové kamery. U těchto polí dochází ke složitému vyhodnocování zaznamenaných dat. Pracují s časovým posunem zachyceného zvuku, z čehož je možné vypočítat přesnou polohu zdroje zvuku (*obr. 2.1*). Pole mají často kulový 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]

Dalším důvodem měření je zkoumání parametrů zvuku ve vozidle, při kterém se zjišťují impulzní odezvy, rozložení akustického pole v kabině automobilu, parametry jednotlivých osazených reproduktorů a jejich frekvenční charakteristiky. Výsledky měření jsou například základem následných úprav ozvučení vozidla, které vede k nejvíce konzistentnímu zvukovému poli v prostoru kabiny. Takto upravený prostor netrpí z pohledu posluchače

zkreslením v jeho různých, v závislosti na fázovém posunu zvuku. Data získaná měřením lze dále aplikovat například jako korekce DSP v autorádiu.

2.2 Jak se měří

2.2.1 Technika využívaná v současnosti

Ozvučení v automobilech se měří na elektrotechnické fakultě ZČU několika způsoby. 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. Rozsah posuvu je dán velikostí konstrukce. *Obrázek 2.4* ukazuje složený držák připevněný v automobilu.

Jednou z následujících využívaných možností je tyč z hliníkového profilu, na kterou je možné pomocí posuvných jezdců umístit čtyři měřící mikrofony. Nevýhodou je, že tyč nemá vlastní systém uchycení k sedadlu. To je řešeno kombinací s předchozím držákem. Tento typ držáku rovněž umožňuje posun mikrofonů do stran, ale ve větším rozsahu než v případě předchozího řešení.

Často využívaným řešením je měření pomocí mikrofону drženého u ucha osoby sedící ve vozidle. Výhodou tohoto měření je poměrně jednoduchá proveditelnost a menší časová náročnost přípravy. Naopak nevýhodou je nekonzistentnost měření a nemožnost výsledky vzájemně porovnávat. Je zde také pravděpodobnost ovlivnění měření ruchy, které způsobí držení mikrofону v ruce a dalšími zvuky způsobenými přítomností člověka (např. dech, tření oblečení, pohyb apod.). Žádná ze současně využívaných metod však nemá známou přesně zaměřenou polohu v prostoru kabiny, právě to způsobuje nekonzistentnost měření.



Obr. 2.4 Současný držák dvou mikrofonů připevněný na sedadle

2.2.2 Komerční řešení

Vzhledem ke specifičnosti zařízení k měření ozvučení automobilů není na trhu mnoho možných řešení. Například firma *Brüel & Kjaer* nabízí několik druhů mikrofonních polí, jak pro vnitřní, tak pro venkovní použití. Žádné z nich však není přímo určeno přímo pro měření ozvučení automobilu. Nenabízí rozmístění mikrofonů upravené pro tento účel ani možnost jednoduchého upevnění uvnitř vozidla. Zároveň se jedná o velmi drahá zařízení. [7]

Firma *Audison* nabízí řešení určené k automatické kalibraci zvuku v automobilu *Audison bit Tune* (obr. 2.5). Skládá se 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. Zařízení je poměrně jednoúčelné, protože neslouží přímo k měření (přestože software pro PC má několik měřících možností), ale k ladění zvukových procesorů firmy *Audison*. Firma neuvádí informace o tom, jaké mikrofony zařízení obsahuje a jaké jsou jejich parametry. 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. 2.5 Audison bit Tune připevněný v kabině automobilu [8]

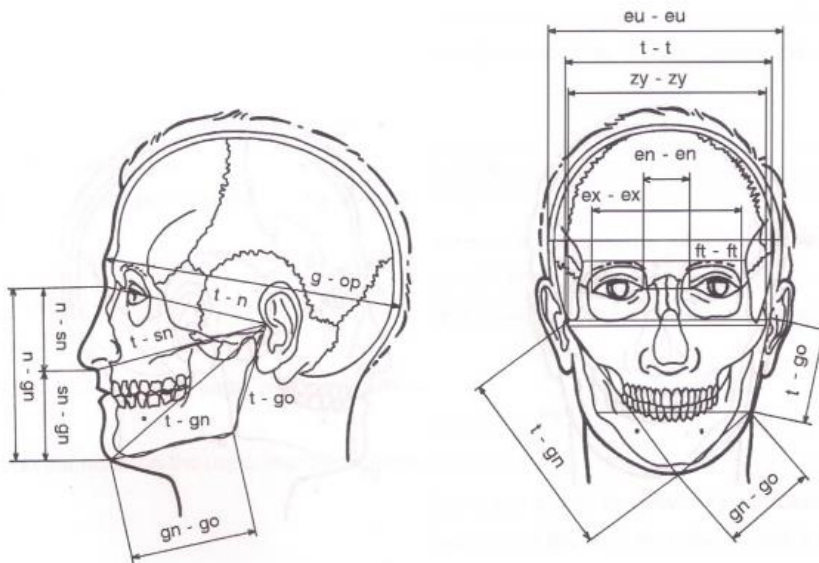
2.3 Lidský faktor

Záměrem návrhu mikrofonního pole v bakalářské práci je kromě opakovatelnosti měření také co nejvěrnější pokrytí prostoru, ve kterém se hlava člověka ve vozidle nachází. Je vhodné zvážit aspekty vycházející z anatomie člověka a z toho jak zvuk vnímá a interpretuje.

2.3.1 Hlava

K vytvoření modelu rozmístění mikrofonů tak, aby přibližně odpovídal poloze uší v prostoru, lze vyjít z některých somatometrických údajů. Z těchto údajů je možné se dozvědět velikost hlavy a získat představu o vzdálenosti uší. Na *obrázku 2.6* jsou naznačeny rozměry hlavy, dle měrných bodů na hlavě. V bakalářské práci jsou použity 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

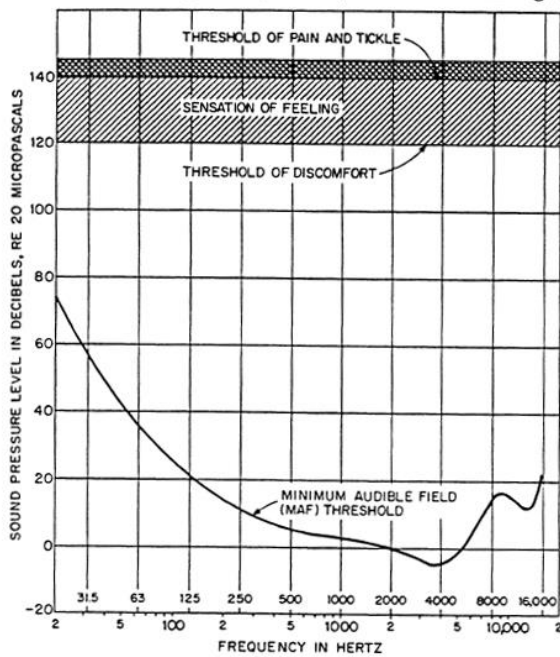
cm, u dospělých žen 13,4 – 15,8 cm. Vzdálenost g – op (Glabella a Opisthocranium) udává délku hlavy, Glabella leží nad kořenem nosu mezi obočím a Opisthocranium leží v týlní části, nejdále od bodu Glabella. Délka hlavy je mezi 16,9 – 19,4 cm u dospělých mužů a 16,1 - 18,5 cm u žen. Porovnáním těchto hodnot jsou rozdíly mezi mužskou a ženskou hlavou nepatrné, proto lze dále využít průměrné hodnoty. [10]



Obr. 2.6 Rozměry hlavy [10]

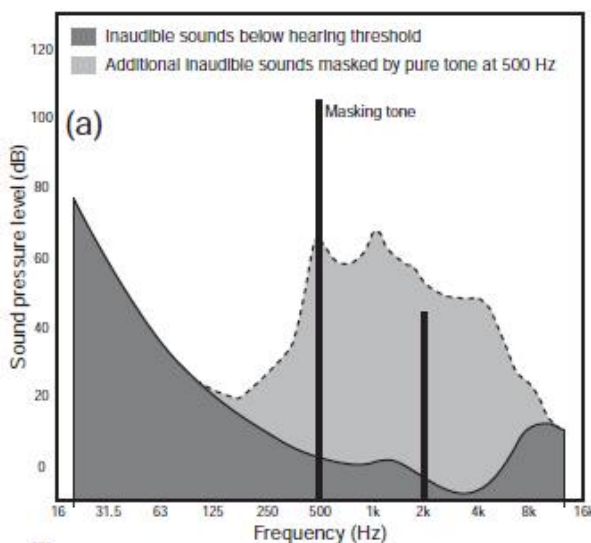
2.3.2 Ucho a lidský sluch

Mechanismus lidského sluchu je víc než pouhý mikrofon. Ucho je zároveň velmi přesný analyzátor frekvence, lokátor zvuku, indikátor hlasitosti, výšky tónu a barvy zvuku. Rozsah frekvencí vnímaných uchem 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 je nazýván prahem slyšení, který je do značné míry závislý na posluchači a jeho věku. Na obrázku 2.7 je zobrazen práh slyšení a jeho změna při různé frekvenci. Z obrázku vyplývá, že při nízkých frekvencích slyší lidské ucho až zvuky s vyšší úrovní akustického tlaku. Nejcitlivější je ucho v oblasti zhruba 1 – 5 kHz, za touto hranicí se citlivost na úroveň akustického tlaku opět snižuje. V obrázku 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. 2.7 Závislost prahu slyšení na frekvenci [1]

Polohu zdroje zvuku člověk rozeznává dvěma způsoby. V prvním případě vznikne vzhledem k poloze uší zhruba 17 cm od sebe malý časový posun, daný rozdílnou vzdáleností uší od zdroje zvuku. Druhým případem je vnímání rozdílu intenzity zvuku, který do ucha dopadne. Pokud zvuk přichází ze strany, přítomnost hlavy způsobí částečné zakrytí. Každý ze způsobů vnímání se projevuje při jiné frekvenci. Časového rozdílu využívá mozek při frekvencích nižších než 700 Hz, rozdílné intenzity zvuku potom při frekvencích nad 2,8 kHz. V pásmu mezi 700 Hz a 2,8 kHz se využívají oba způsoby zároveň [11].



Obr. 2.8 Maskování čistým tónem o frekvenci 2 kHz [12]

Posledním jevem, který vyjadřuje základní princip vnímání zvuku, se nazývá maskování. K maskování dochází, pokud přítomnost jednoho zvuku zamezuje přítomnosti dalšího. Často se zvuky nemusí zcela překrýt a dochází ke koexistenci těchto zvuků. Na *obrázku 2.8* 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. [12].

3 Návrh mikrofonního pole – tvorba řešení

3.1 Návrh velikosti pole podle interiéru vozidla

3.1.1 Měřené automobily

Základním parametrem při tvorbě vlastního mikrofonního pole bylo určení jeho fyzické velikosti. Záměrem byla použitelnost mikrofonního pole pro měření libovolných vozidel, jak městských automobilů třídy mini, tak i vozidel SUV vyšší třídy. Pro měření velikosti interiéru byla zvolena vozidla značky Volkswagen, jelikož tato značka má v nabídce automobily různých velikostí, včetně obou krajních tříd mini a SUV. Pro kontrolu získaných údajů byly zvoleny další dva automobily stejného koncernu, tentokrát značky Škoda. Byly vybrány obvyklé modely, jeden třídy malých automobilů, druhý byl zástupce nižší střední třídy. Konkrétní měřené automobily tedy byly: Volkswagen UP!, Volkswagen Touareg druhé generace, Škoda Fabia první generace ve variantě hatchback a Škoda Octavia druhé generace ve variantě kombi.

3.1.2 Metodika měření a měřené údaje

Při měření velikosti interiérů šlo o vytvoření komplexního obrazu vnitřního prostoru jednotlivých automobilů a zjištění, ve kterých důležitých rozměrech se tento prostor nejvíce liší. Naprostá přesnost naměřených údajů nebyla hlavním účelem měření interiérů. Porovnání zjištěných odlišností bylo použito k navržení vhodné velikosti pole s důrazem na univerzálnost jeho použití.

Pomocí měřidla byly v jednotlivých automobilech zjištěny čtyři vzdálenosti z prostoru předních sedadel v oblasti hlavové opěrky, ve středové ose sedadla, tj. v předpokládaném místě upnutí mikrofonního pole. Měřeny byly tyto vzdálenosti:

- *Od horní hrany volantu k hlavové opěrce sedadla (A)*. Tato vzdálenost byla měřena pro obě krajní polohy posuvu sedadla a také v nastavení pro malou a velkou osobu. Volant byl vždy nastaven tak, aby byl v poloze nejvýše a maximálně zasunutý.

- *Mezi osami sedadel řidiče a spolujezdce (B).* Tento rozměr poukazuje na šířku středového panelu vozidla.
- *Od osy sedadla k pevné části rámu vozu (C).* Zpravidla měřeno k vedení bezpečnostních pásů vyčnívajících ze středového sloupku, případně přímo ke středovému sloupku.



Obr. 3.1 Grafické znázornění měřených délek na voze Škoda Octavia II combi.
Vlastní zpracování, 2016, dle [19]

- *Od osy sedadla k bočnímu oknu (D).*

Pro názornost jsou měřené délky znázorněny v nákresu automobilu (*obr. 3.1*) a také v reálném automobilu v přílohách C, D, E.

3.1.3 Pozice řidiče/pasažéra ve vozidle

Pozice pasažéra v prostoru je také důležitým údajem. Z naměřených hodnot bylo zjištěno, jak vypadá prostor v jednotlivých vozidlech, následně bylo potřeba určit, v jakých místech v tomto prostoru se vyskytuje hlava pasažéra. Tato pozice se bude lišit pro různá nastavení sedadla s ohledem na výšku postavy. Pro účely pokrytí prostoru byly zjištěny polohy nastavení sedadla pro dva typy postav – vysokého a nízkého vzrůstu. Vysoký vzrůst představuje muž kolem 200 cm, nízký vzrůst žena 155 cm. V evropské oblasti lze předpokládat, že se většina populace pohybuje v tomto výškovém rozpětí.

Při nastavování sedadla figuranty byl kladen důraz na obvyklou, přirozenou polohu sedadla, zažitou z reálného provozu. Pozice hlavy byla určena z měření od hrany volantu k hlavové opěrce, díky které nemusel být řešen konkrétní úhel sklonu sedadla. Ze závěru zkoumání výškového nastavení sedadla vyplývá, že hlava je, co se výšky týče, u obou typů postav ve velmi podobné pozici.

3.1.4 Naměřené údaje

Rozměry naměřené v jednotlivých automobilech zobrazuje tabulka 3.I. Jednotlivé délky jsou označeny písmeny dle kapitoly 3.1.2 a znázorněny na *obr. 3.1*. Při porovnání údajů je patrné, že rozměry C a D se mezi jednotlivými automobily liší jen nevýznamně. Také posun sedadel (A) je u všech měřených vozů podobný, větší z měřených automobilů přesto nabídl o několik centimetrů delší možnost posunu směrem dozadu. Toto zjištění návrh podstatně usnadňuje, jelikož v hlavní části měřícího zařízení, kde budou osazeny mikrofony, není nutné dělat kompromisy pro zajištění univerzálního použití. Největší zaznamenaný rozdíl je v prostoru mezi sedadly (B) a podle předpokladů je tento rozměr odvislý od celkové velikosti automobilu. Mezi největším měřením Touaregem a nejmenším UP!em činí rozdíl v rozměru B 16 cm.

Přestože podle měření by mohly interiéry vypadat zdánlivě podobně velké, není tomu tak. Sledované parametry nevystihují celkovou vzdušnost interiéru, rozdíly jsou však zjevné při sezení ve vozidle. Rozdíl je například ve výšce stropu, kde vozy vyšších tříd logicky

nabídnou více prostoru a komfortu. Měření však bylo zaměřeno na poměrně úzký prostor v oblasti hlavové opěrky, kdy celková velikost interiéru není směrodatná.

Tab. 3.1 Tabulka naměřených velikostí interiéru

	A [cm]	B [cm]	C [cm]	D [cm]
ŠKODA Fabia I	64 - 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

Zdroj: vlastní zpracování, 2016

Při měření nastavení sedadel pro dvě předem vybrané osoby s velikostí definovanou a popsanou v kapitole 3.1.3 byla situace ohledně vzdálenosti překvapivě konzistentní. Ve všech čtyřech vozech byla pro jednotlivé postavy naměřena prakticky stejná vzdálenost A. U postavy 200 cm se hodnota pohybovala mezi 84 a 85 cm, pro postavu 155 cm byla hodnota 68 cm. Rozdíl v posunu je tedy zhruba 16 cm.

3.2 Rozmístění mikrofonů

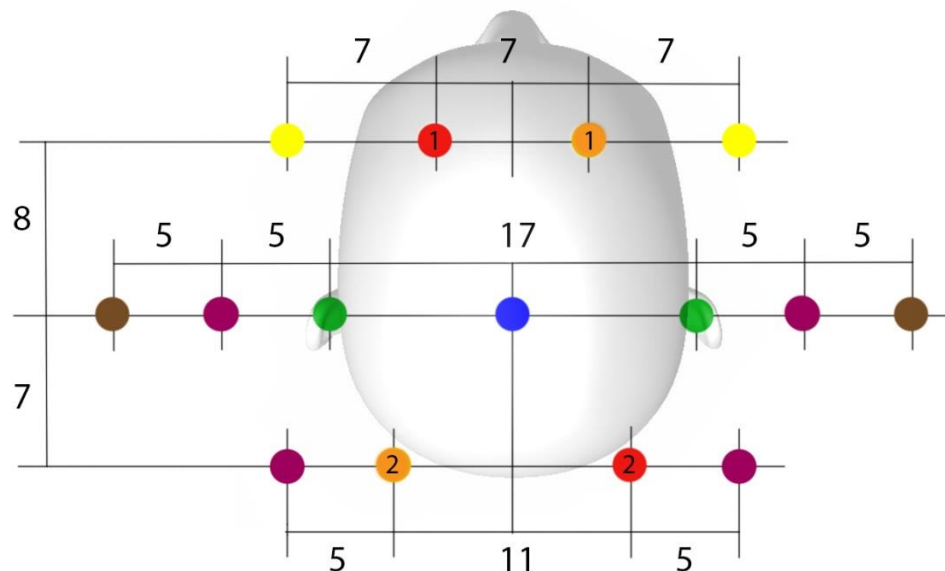
3.2.1 Pohyby hlavou

Při volbě rozmístění mikrofonů záleželo na určení pohybů, které hlava koná při řízení a v jakém prostoru se pohybuje. Podle toho bylo navrženo co nejvhodnější rozmístění mikrofonů v poli tak, aby se jejich pozice co možná nejvíce přibližovala pozici uší v případech, které ve vozidle obvykle nastávají.

Pro návrh hrály roli přirozené pohyby hlavy v různých obvyklých směrech, tj. o kolik se uši pohnou v případě otočení hlavy, naklonění, případně při pohybu celým trupem, např. v zatáčkách. Tyto pohyby byly proměřeny a na jejich základě navrženo rozložení mikrofonů, které s pohyby koresponduje. Pozice, které při běžném provozu nastávají zřídka, tj. otáčení hlavy při couvání nebo sklánění se k některému z příručních úložných prostorů, byly pro měření bezpředmětné.

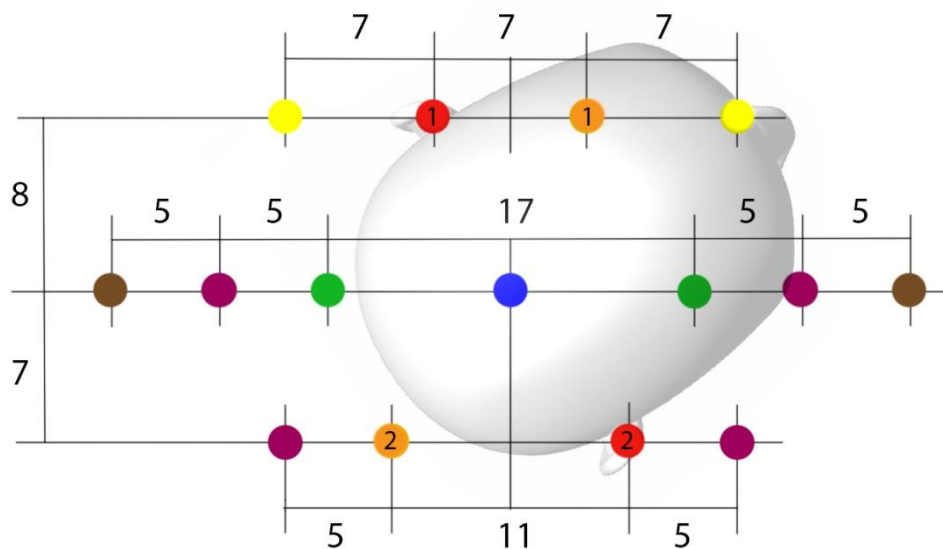
3.2.2 Návrh rozmístění

Základem je referenční mikrofon umístěný ve středu hlavy. Celé rozmístění je vyobrazeno na *obr. 3.2*, referenční mikrofon je vyobrazen modře. Od něj se dále odvíjí základní poloha uší (zeleně). Na obrázku je naznačena také základní pozice hlavy, směřující přímo dopředu. K nalezení vhodné vzdálenosti mezi mikrofony bylo využito somatometrických údajů (viz kapitola 2.3.1), konkrétně údaje o šířce hlavy. Na tomto základě byly mikrofony umístěny 17 cm od sebe. To je o něco více než je šířka hlavy, ta se však měří v oblasti spánků a nebere v potaz vyčnívající části (uši).



Obr. 3.2 Rozmístění mikrofonů s vyznačenou hlavou v základní poloze.
Vlastní zpracování, 2016, dle [15]

Při otáčení hlavy dochází k drobné nesymetrii v pohybu. Ucho, které je při otočení hlavou vpředu se od původní polohy (zelená, *obr. 3.2*) posune zhruba o 8 cm dopředu a o 5 cm do strany směrem k ose hlavy, zatímco zadní ucho se posune z původní polohy o 7 cm dozadu a o 3 cm do strany. Aby byl pohyb lépe ilustrován, na *obr. 3.3* je znázorněno otočení hlavy doprava. Na pozicích uší v obrázku jsou nyní červené tečky. Různě barevné tečky vždy označují pozice uší v krajní pozici pohybu. Pro pohyb hlavy vlevo jsou tečky znázorněny oranžově.



Obr. 3.3 Rozmístění mikrofonů s vyznačenou hlavou otočenou doprava.
Vlastní zpracování, 2016, dle [15]

Následujícími sledovanými pohyby byly náklony hlavy do stran. Byly posuzovány jak náklony hlavy ze základní polohy, tak náklony natočené hlavy. Zamýšleným zobrazením těchto pohybů jsou body fialové a žluté. Posledním sledovaným pohybem je posun hlavy při posunu celého trupu. Pozice vnějších uší při tomto pohybu je na obrázku interpretována hnědými body, jako pozice vnitřních uší slouží středový referenční mikrofon. Hodnoty posunu mezi jednotlivými polohami jsou na obrázcích uvedeny v centimetrech.

3.3 Upevnění

3.3.1 Požadavky a návrhy

Důležitým aspektem při řešení návrhu mikrofonního pole bylo jeho samotné upevnění v automobilu. Jedna ze zvažovaných možností připevnění konstrukce k tyčkám hlavové opěrky, byla jednou z nejjednodušších, nespĺňovala však základní požadavek na univerzálnost a použitelnost v jakémkoliv automobilu. V některých vozech se v současnosti objevují sedadla s jednodílným opěradlem, tedy bez nastavitelné hlavové opěrky (obr. 3.4). Například

v současně produkovaných automobilech značky Škoda se tento typ sedadel objevuje velmi často.



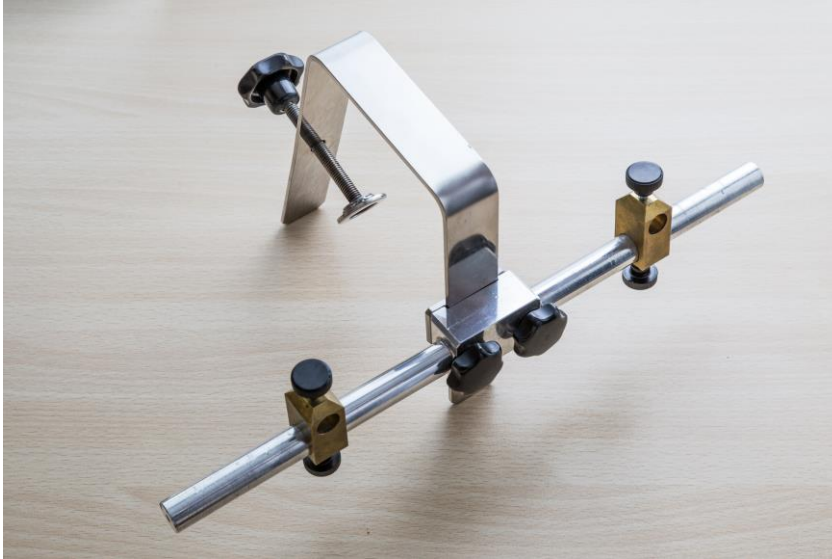
Obr. 3.4 Sedadla s jednodílným opěradlem ve Volkswagenu UP! [14]

Jeden z návrhů na upevňovací systém byl inspirován již zmíněným *Audison bit Tune*. Mělo se jednat o desku, nahoře zahnutou do pravého úhlu, která by se přikládala na hlavovou opěrku (zahnutí nahoře mělo zajišťovat, že deska nesklouzne). K hlavové opěrce by se systém pevně připoutal popruhem (viz obr. 2.5). Tato možnost by se již dala považovat za univerzální, ale vzhledem k použití popruhu méně praktickou. V současnosti je dostupné uchycení (viz kapitola 2.2.1), které splňuje nároky na univerzálnost a po dlouhodobém používání se osvědčilo jako praktické. Proto bylo využito pro potřeby připevnění řešeného mikrofonního pole ve vozidle, namísto vytváření nového systému uchycení. Díky využití hotového systému se předešlo technickým komplikacím, které by mohly provázet návrh a konstrukci nového upevnění.

3.3.2 Využití současného řešení

Při využití upevnění ze současného systému, který je primárně určen pro dva mikrofony (viz kapitola 2.2.1) bude konstrukce mikrofonního pole uchycena pomocí dvou čepů, které se nasunou do otvorů původně určených k uchycení nástavců mikrofonů. Díly současného systému, které budou využity, ukazuje obrázek 3.5. Detail uchycení ve vozidle je na obrázku v příloze F. Princip uchycení je jednoduchý. Jedná se o pás z nerezového plechu, ohnutý do

tvaru podkovy, který se shora nasadí na hlavovou opěrku a zezadu utáhne šroubem. Upevnění lze použít na jakékoliv sedadlo, užší než je šířka samotného držáku. Samotné namontování na sedadlo je dostatečně pevné a nedojde k problémům s pákou, kterou mikrofonního pole vyvine.



Obr. 3.5 Díly z původního měřáku, využité pro upevnění mikrofonního pole

3.4 Konkrétní řešení mikrofonního pole

3.4.1 Volba materiálu

Materiál pro výrobu navrhovaného pole byl zvolen s ohledem na co nejnižší hmotnost, dostatečnou pevnost a možnost materiál svářet. Do materiálu by také měly jít snadno upevnit držáky mikrofonů. Držáky jsou duralové, na spodní straně mají 15 mm dlouhý žlab. Tyto podmínky splňuje použití hliníkových profilů čtvercového průřezu o rozměrech 10×10 mm. Použití tohoto profilu má také své opodstatnění. Šířka profilu musí být menší než vlnová délka měřeného zvuku, aby nedocházelo k odrazům a difrakci. Difrakcí se rozumí zkreslení zvukové vlny způsobené přítomností překážky ve zvukovém poli. S difrakcí dále souvisí rozptyl, což je odchýlení zvukové vlny při setkání s překážkou. Vlnová délka se počítá pomocí jednoduchého vztahu 3.1, kdy je za f dosazena nejvyšší měřená frekvence, tedy 20 kHz. Aby k těmto jevům nedocházelo, musí být šířka profilů menší než 1,72 cm.

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

3.4.2 Velikost a tvar pole

V předchozích kapitolách byly měřeními zjištěny rozměry automobilů. Dále pomocí sledování a úvah určeny pohyby hlavy v prostoru. Z toho lze určit prostorové dispoziční pro umístění mikrofonního pole a přibližné rozmístění mikrofonů.

Na obr. 3.6 je zobrazena jednoduchá vizualizace prostoru, který bude pokryt mikrofony. Jedná se o poměrně úzký prostor v oblasti sedadla, návrh bude kalkulovat s oválným tvarem (vzhledem k použitému materiálu ve tvaru mnohoúhelníku). K tomuto prostoru je třeba dále uvážit potřebu referenčního mikrofonu ve středu auta mezi sedadly. Tomu je nutné buď přizpůsobit velikost oválu, nebo vyvést část profilu mimo hlavní konstrukci mikrofonního pole. Na této části bude mikrofon následně umístěn. Z důvodu využitelnosti ve vozidlech různých velikostí, je nutné, aby tento mikrofon byl posuvný. Díky tomu ho bude možné vždy vycentrovat na střed automobilu.



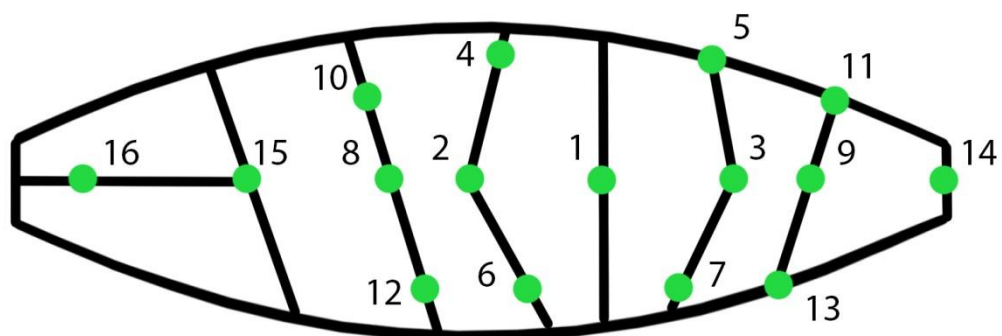
Obr. 3.6 Prostor pokrytý mikrofony. Vlastní zpracování, 2016, dle [19]

Vyznačený prostor je možné pokrýt dvěma způsoby, jimiž se budou zabývat následující dvě podkapitoly. Dva základní návrhy jsou pracovně nazvány *jednohlavý* a *dvojhlavý* model. Pojmenování vychází z principu, kterým se bude při měření postupovat. V případě jednohlavého modelu je pole užší, s menším počtem mikrofonů. Pro měření velké a malé postavy je potřeba posunout sedadlem. Dvojhlavý model je oproti tomu větší, s více

mikrofony a pokrývá celý prostor, ve kterém se předpokládá pohyb hlavy jak malé, tak velké osoby. U dvojhlavého modelu je zjednodušeno a více zesymetrizováno navržené rozložení mikrofonů.

3.4.3 Návrh „jednohlavého“ pole

Prvním návrhem byl již zmíněný jednohlavý model. Pole mělo tvar „ploutve“, přední a zadní hrana byly zaoblené. Předběžný návrh držáku je zobrazen na *obrázku 3.7*, číslovanými body jsou v obrázku vyznačeny držáky s mikrofony. Celý návrh měl být dlouhý zhruba 60 cm a široký 20 cm. V základu byl navržen tak, aby pojmul 16 mikrofonů. Rozmístění mikrofonů bylo navrženo tak, jak bylo popsáno v kapitole 3.2.2. Mikrofony 1 a 16 jsou referenční, 1 určuje střed hlavy a 16 se pomocí posunu nastaví na střed vozidla. Mikrofony 2 a 3 jsou normální poloha uší, vzdálenost mikrofonů od sebe je 17 cm. Návrh nepočítá 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 stejným směrem, a to dopředu. Mikrofony 4 – 7 jsou v polohách otáčení hlavy, 8 – 13 potom v polohách náklonu hlavy, 14 a 15 jsou krajní polohy při náklonu celého těla.



Obr. 3.7 Náčrtek jednohlavého mikrofonního pole

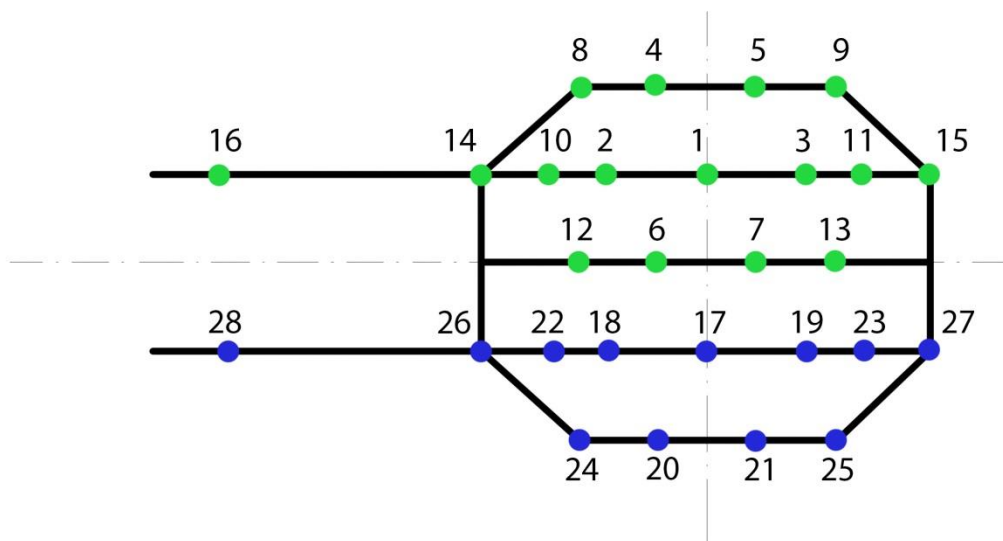
Tento návrh měl však několik nevýhod, které bylo potřeba dořešit. První nevýhodou bylo, že měřák by byl obtížně použitelný na jiném místě, než na sedadle řidiče, kvůli jeho nesouměrnosti. S drobnými změnami v poloze mikrofonů a upínáním na obou oblých hranách by bylo možné držák na sedadle spolujezdce použít tak, že by se otočil. Mikrofony by

ale musely být umístěny směrem nahoru, s čímž se původně nepočítalo. Mikrofony směřující nahoru sebou nesou nutnost kalibrace pro měření vysokých frekvencí nad 10 kHz, kdy mikrofon již není všesměrový a poloha nahoru způsobuje útlum až 5 dB. 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 středního bodu mezi sedadly, který je však pro referenční hodnotu velmi důležitý, jelikož se jedná o bod nutný k porovnávání výsledků mezi vozidly. Zvětšení držáku by nebylo praktické, měřák by se zbytečně zvětšoval a tím by se s ním i hůře manipulovalo, případně by se hůře přenášel. Třetí problém souvisí s komfortem a snadností měření. Již bylo zmíněno, že při měření je potřeba počítat nejméně se dvěma typy postav. Z provedeného měření vyplývá, že poloha hlavy se liší, v případě našich figurantů o 16 cm. Měřák je však navržen, aby simuloval pohyby jen jedné osoby. Pro změření obou poloh by tedy bylo nutné sedadlo ručně posunout o danou hodnotu, což je zdoluhavé a poměrně nepraktické. Změna nastavení sedadla by mohla také znamenat, že měření v různých typech vozidel nebude probíhat za stejných podmínek a měření tak nebudou srovnatelná. Právě srovnatelnost měření je však jedním z hlavních důvodů tvorby tohoto měřicího zařízení.

3.4.4 Návrh „dvouhlavého“ pole

Další návrh byl vytvořen tak, aby pokud možno odstranil nevýhody předešlého řešení. Co se týče tvaru, je tento držák oproti předchozímu zjednodušený, zesymetrizovaný a osově souměrný. To nese výhodu v možnosti umístění na jakémkoliv místě ve vozidle. Držák 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 mikrofony referenční, umístěné ve středu vozu mezi sedadly. Zde jsou však použity mikrofony dva. Referenční mikrofon ve středu vozu je umístěn v jedné ose s referenčním mikrofonem ve středu hlavy. Tento návrh je „dvojhlavý“, tj. simuluje pozici dvou osob najednou, bez nutnosti úpravy posunu sedadla a z toho důvodu obsahuje 4 referenční mikrofony. V předběžném návrhu na *obr. 3.8* jsou mikrofony simulující pohyby hlavy vyšší postavy označeny zelenými body, hlavy malé postavy potom modrými. Mikrofony č. 6, 7, 12 a 13 jsou z důvodu úspory společné. Rozložení všech mikrofonů má stejnou logiku jako v předchozím případě, proběhly jen malé úpravy poloh, aby se dosáhlo symetrického rozložení. Referenční mikrofony pro středy hlav č. 1 a 17 jsou na spojnicí se středovými referenčními mikrofony č. 16 a 28. 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. V této fázi je stále počítáno s upevněním mikrofonů směrem dopředu. Možnost odmontování tyčí také zmenšuje transportní velikost celého zařízení.



Obr. 3.8 Náčrtek dvouhlavého mikrofonního pole

Nevýhodou tohoto řešení je velký počet mikrofonů, v plně osazeném stavu 28. Navýšení je logické, vzhledem k měření dvojnásobně široké oblasti. Tento fakt bohužel výrazně zvyšuje finanční nároky na celé zařízení.

3.5 Měřicí řetězec

Kromě mikrofonu budou v mikrofonním poli figurovat i další prvky. K připevnění mikrofonu poslouží držák mikrofonu G.R.A.S. RA0185 (obr. 3.9). Držák je vysoustružen a vyvrtán z jednoho dílu duralu a jeho tvar je navržen tak, aby co nejméně ovlivňoval výsledky měření. Na spodní straně držáku je 15 mm dlouhá drážka sloužící k upevnění na měřicí zařízení, upevnění se provádí pomocí zápusťného šroubu M3.



Obr. 3.9 Držák mikrofonu G.R.A.S. RA0185 [18]



Obr. 3.10 Měřicí karta NI 9234 [20]

Signál zachycený mikrofony bude zpracováván měřicími kartami od firmy National Instruments, NI 9234 (obr. 3.10). Karty jsou provedeny ve formě modulu, které lze osadit do platform CompactRIO nebo CompactDAQ od stejné společnosti. Ke každému modulu je možné připojit čtyři mikrofony pomocí kabelu s koncovkou BNC. Modul také zajišťuje napájení mikrofonů a podporuje komunikaci s čipy TEDS obsaženými v mikrofonech. Moduly jsou dále připojeny k počítači.



Obr. 3.11 Kabel pro připojení mikrofonu G.R.A.S. AA0027 [19]

K modulům budou mikrofony připojeny pomocí kabelů G.R.A.S. AA0027 (obr. 3.11). Jedná se o 3 metry dlouhé koaxiální kabely typu RG-174, na jedné straně vybavené konektorem BNC pro připojení do měřícího modulu a na druhé straně konektorem SMB pro připojení do mikrofonu.

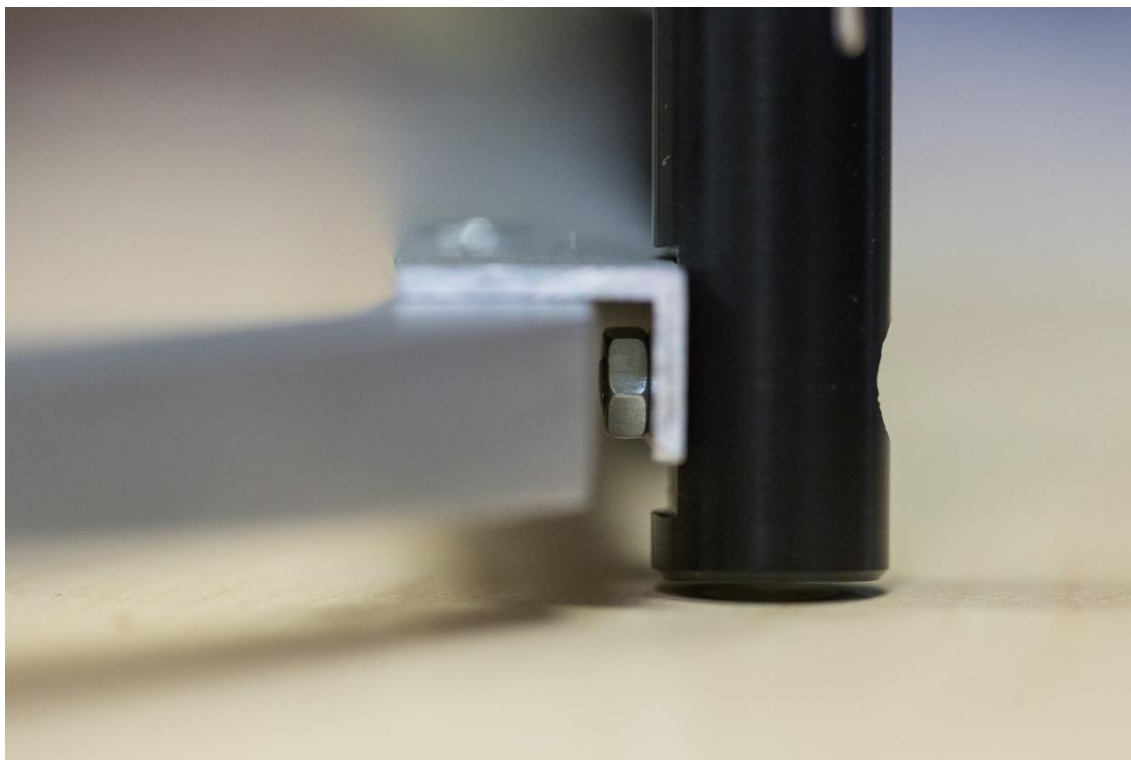
4 Realizace a konstrukční úpravy

4.1 Konstrukční změny během realizace

Během realizace měřicího zařízení nastalo několik problémů, které si vyžádaly některé konstrukční změny. Konstrukční nedostatky byly odhaleny až po svaření konstrukce pole, vyvrtání příslušných otvorů a zkušební osazením držáku s mikrofonem a kabelem. Bylo zjištěno, že rozteče mezi jednotlivými příčkami nejsou dostatečné, pokud jsou mikrofony směřovány dopředu. Přestože příčky do mikrofonů přímo nezasahují ani se jich fyzicky nedotýkají, byly by příčinou znehodnocení měření z akustického hlediska. Před mikrofonem by mělo být volné místo, což zaručí, že nebude docházet k odrazům a k difrakci.

Vzhledem k tomuto zjištění byly mikrofony, původně směřující přímo dopředu, otočeny do vertikální polohy tak, aby nově směřovaly nahoru. To s sebou sice přináší útlum plynoucí ze směrové charakteristiky při měření vysokých frekvencí (*obr. 1.10*), tento útlum se však dá vyřešit dodatečnou korekcí. Výsledky měření nebudou negativně ovlivněny, pokud bude útlum změřen v akustické komoře se známým zdrojem signálu a následně provedena korekce. Bylo nutné konstrukčně upravit svařený hliníkový rám.

Otočení mikrofonů bylo realizováno namontováním hliníkových L profilů o rozměrech 10×15 mm a tloušťce 1,5 mm, tak aby překrývaly celou délku příček a nasedaly na ně širší plochou. Nově namontovaný profil má menší tloušťku, do které by bylo možné vyřezat závit jen asi se dvěma stoupáními. Navíc s přihlédnutím ke skutečnosti, že hliník je poměrně měkký materiál, by se takový závit mohl snadno strhnout a znehodnotit ideální pozice mikrofonů. Proto bylo zvoleno řešení, kdy se do vzniklých mezer umístily matky (*obr. 4.1*) a profil byl pouze provrtán. Uchycení pomocí matek zajišťuje pevnější dotažení a nehrozí poškození závitů ani při opakovaném odšroubovávání mikrofonů od konstrukce. Nevýhodou výše uvedeného řešení je navýšení hmotnosti konstrukce. Vzhledem ke zvětšení plochy přidáním profilů může být pole náchylnější k difrakci a kvůli přišroubování profilů k sobě může snadněji dojít k rezonanci.



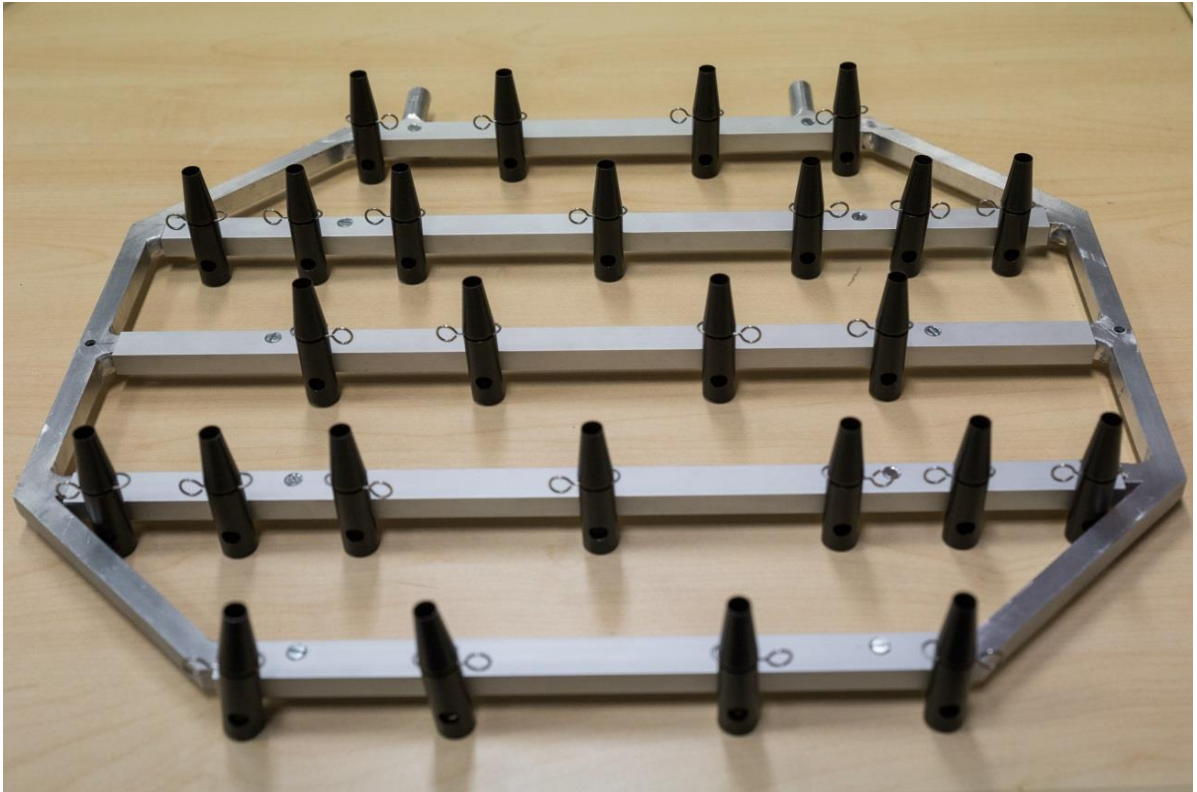
Obr. 4.1

Nedostatečný prostor, který vycházel z původního záměru směřovat mikrofony dopředu, bylo potřeba vyřešit vhodným přemístěním mikrofonů číslo 26 a 27 dle *obr. 3.8*. Pro zachování symetrické konstrukce byly zároveň přemístěny mikrofony 10, 11, 14, 15, 22 a 23 (*obr. 3.8*) tak, aby byla zachována zamýšlená geometrie návrhu. Vzdálenost mezi těmito mikrofony se zmenšila z původních 50 mm na 43 mm. Tímto přesunem nedojde k ovlivnění následného měření, rozmístění mikrofonů v závislosti na pohybech hlavy nebylo určeno exaktní metodou, určitá tolerance je tedy přijatelná. Při měření je jen potřeba znát přesnou vzdálenost mezi mikrofony, aby bylo možné vypočítat fázové posuny. Nové vzdálenosti známe a model pohybů popsaný v kapitole 3.2 zůstane zachován.

4.2 Finální podoba

Po konstrukčních úpravách má měřící zařízení podobu, kterou ukazují *obr. 4.2 a 4.3*. Spojení s upevňovacím systémem je realizováno pomocí krátkých čepů kruhového průřezu,

taktěž z hliníku. Průměr těchto čepů je 11,5 mm, průměr děr v upevňovacím systému je 12 mm, pole jde tedy nasadit volně, ale bez zbytečné vůle.



Obr. 4.2 Hlavní konstrukce mikrofonního pole s osazenými držáky mikrofonů, pohled shora



Obr. 4.3 Hlavní konstrukce mikrofonního pole s osazenými držáky mikrofonů, pohled zdola

Hlavní a boční konstrukce je složena celkem ze 17 dílů nařezaných na požadované rozměry. Jelikož měly profily poměrně tenké stěny (2 mm), nebylo možné použití běžné svařovací technologie, protože docházelo k přílišnému tavení a změně tvaru materiálu. Svařování tedy zajistila firma specializující se na svařování hliníkových dílů. Z estetických důvodů byly všechny sváry následně zabroušeny. Následovalo vyvrtání děr se závity M3, do kterých měly být směrem dopředu osazeny držáky mikrofonů. Jak bylo již popsáno v kapitole 4.1, tento záměr se ukázal jako nevhodný a byl upraven. Umístění držáků se tedy vyřešilo za pomoci L profilů, které byly nařezány na vhodné rozměry tak, aby překrývaly celou příčku a nekolidovaly se sváry. Po upravení pozic mikrofonů v nich byly 2,5 mm od spodního okraje vyvrtány otvory o průměru 3 mm a pomocí šroubů M3 s matkami se připevnily držáky mikrofonů. Detail držáku osazeného mikrofonem je v příloze G. Šrouby sloužící k připevnění mají délku 5mm, aby se nedotýkaly hlavní konstrukce (viz. obr. 4.1 a příloha H). Na hlavní konstrukci je připevněno celkem 26 těchto držáků. Všech 5 kusů profilů s osazenými držáky bylo pomocí zápusťných šroubů M3 připevněno k hlavní konstrukci.

Odnímatelná boční konstrukce, na které jsou připevněny referenční mikrofony, je k hlavní konstrukci upevňována pomocí tří šroubů M4 s křídlovými matkami. Boční konstrukce se upevňuje ze spodní strany konstrukce hlavní. Díry vyvrtané pro šrouby jsou průchozí oběma díly. Mezi oba díly je vhodné umístit gumové podložky. Tím se předejde přenosu vibrací a rezonance v místech kde na sebe konstrukce doléhají.

Technický výkres hliníkové konstrukce tvoří přílohy A a B, které jsou součástí bakalářské práce. Výkres již obsahuje výše zmíněné konstrukční úpravy. Otvory pro připevnění držáků mikrofonů jsou umístěny tak, aby mikrofony směřovaly nahoru. Tabulka 4.I zobrazuje vzdálenosti mezi jednotlivými mikrofony. Uvedené hodnoty jsou v milimetrech, číslování mikrofonů vychází z *obr. 3.8*.

Tab. 4.1 Souřadnice rozmístění mikrofonů v hotovém mikrofonním poli, od vztažného bodu A

Číslo mikrofonu	Souřadnice X [mm]	Souřadnice Y [mm]	Číslo mikrofonu	Souřadnice X [mm]	Souřadnice Y [mm]
1	198	240	15	369	240
2	113	240	16	458 - 748	240
3	283	240	17	198	80
4	153	320	18	113	80
5	243	320	19	283	80
6	153	160	20	153	0
7	243	160	21	243	0
8	88	320	22	70	80
9	308	320	23	326	80
10	70	240	24	88	0
11	326	240	25	308	0
12	88	160	26	27	80
13	308	160	27	369	80
14	27	240	28	458 - 748	80

Zdroj: vlastní zpracování, 2016

Hodnoty jsou vztaženy k pravému přednímu rohu konstrukce, z pohledu ve směru jízdy vozidla. Souřadnice jsou taktéž platné pro finální stav po úpravě popsané v kapitole 4.1. Ve výkresu (příloha A) je tento vztažný bod označen jako A.

Závěr

Bakalářská práce si kladla za cíl navržení a realizaci systému pro zjišťování parametrů ozvučení vnitřního prostoru automobilu s důrazem na zefektivnění měřicího procesu. Součástí práce bylo získání teoretických poznatků v oblasti techniky měření zvuku, včetně prostudování současných možností a jejich využití při návrhu a realizaci vlastního měřicího zařízení.

V úvodu teoretické části jsou vysvětleny principy funkce mikrofonů, jejich účel a rozdělení, například dle typu nebo zvukového pole, ve kterém jsou využívány. Další část je věnována důležitým parametrům a požadavkům na tyto parametry u měřicích mikrofonů. Konkrétněji jsou popsány mikrofony pro měření v mikrofonních polích a je zde uveden mikrofon G.R.A.S. 40PH, který je použit pro realizaci praktické části této práce.

Následuje definování parametrů a opodstatnění měření zvuku. Mezi parametry zkoumané při měření ozvučení patří impulzní odezva, rozložení akustického pole v kabině a charakteristiky osazených reproduktorů. K lepší interpretaci měření je zapotřebí posoudit také fyziologickou stavbu lidského těla a vnímání zvuku lidským uchem, což bylo do práce zahrnuto, jak v teoretické, tak v praktické části. K porovnání vlastního návrhu realizace měřicího zařízení jsou uvedeny současné možnosti měření.

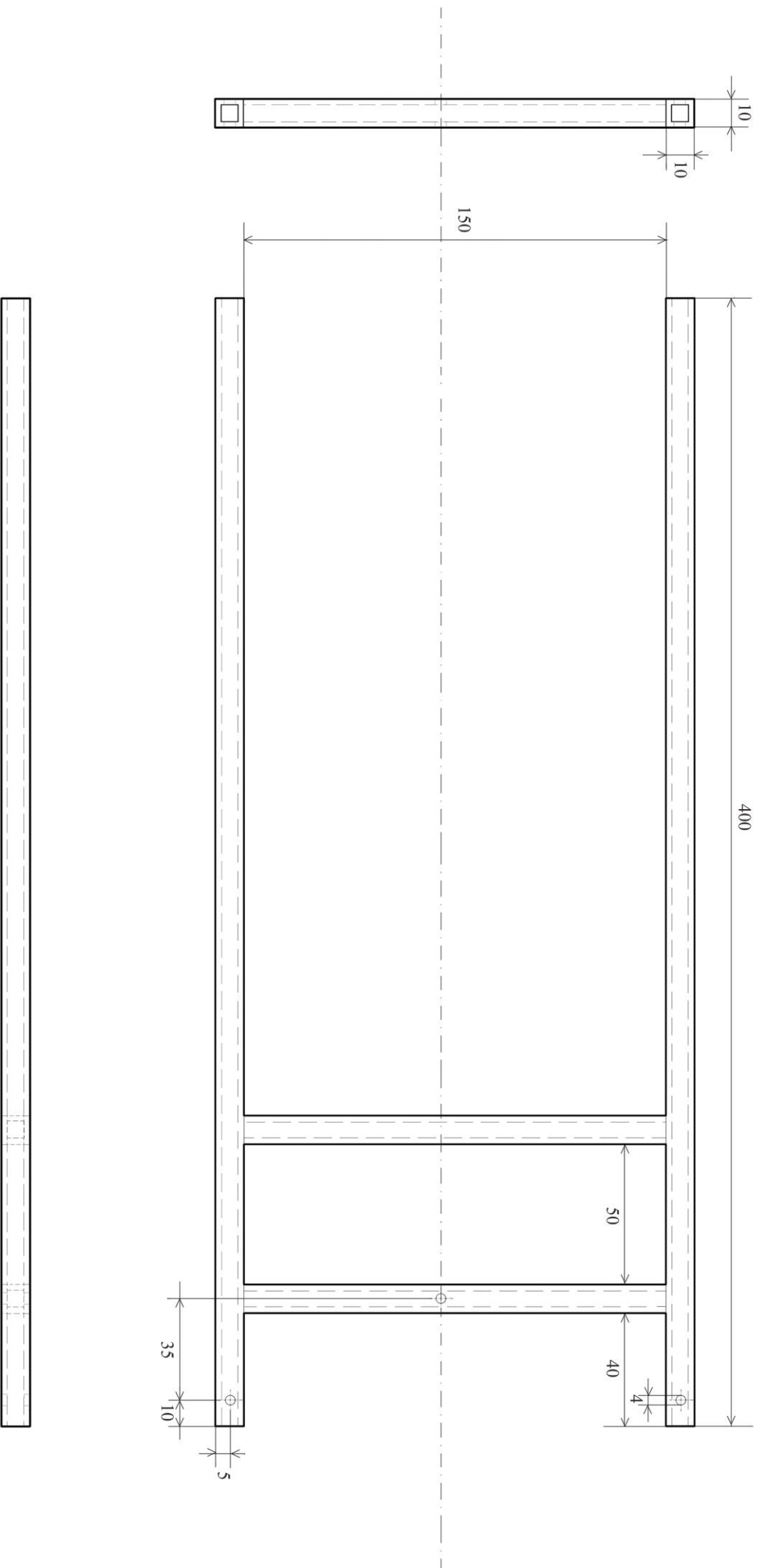
Praktická část formuluje velikost interiéru vybraných automobilů, pozice pasažérů a vzdálenosti mezi objekty v prostoru kabiny. Naměřené hodnoty slouží pro určení vhodné velikosti mikrofonního pole. Na základě pozorování pohybů hlavy v prostoru kabiny je navrženo optimální rozložení mikrofonů v poli. Vytvořeny byly dva návrhy mikrofonních polí, z nichž jeden byl následně realizován.

Během samotné realizace byly průběžně upravovány některé postupy, které vyplynuly z řešení technických aspektů. Vytvořené měřicí zařízení lze využít například k porovnání vlivů různého rozmístění reproduktorů v automobilu.

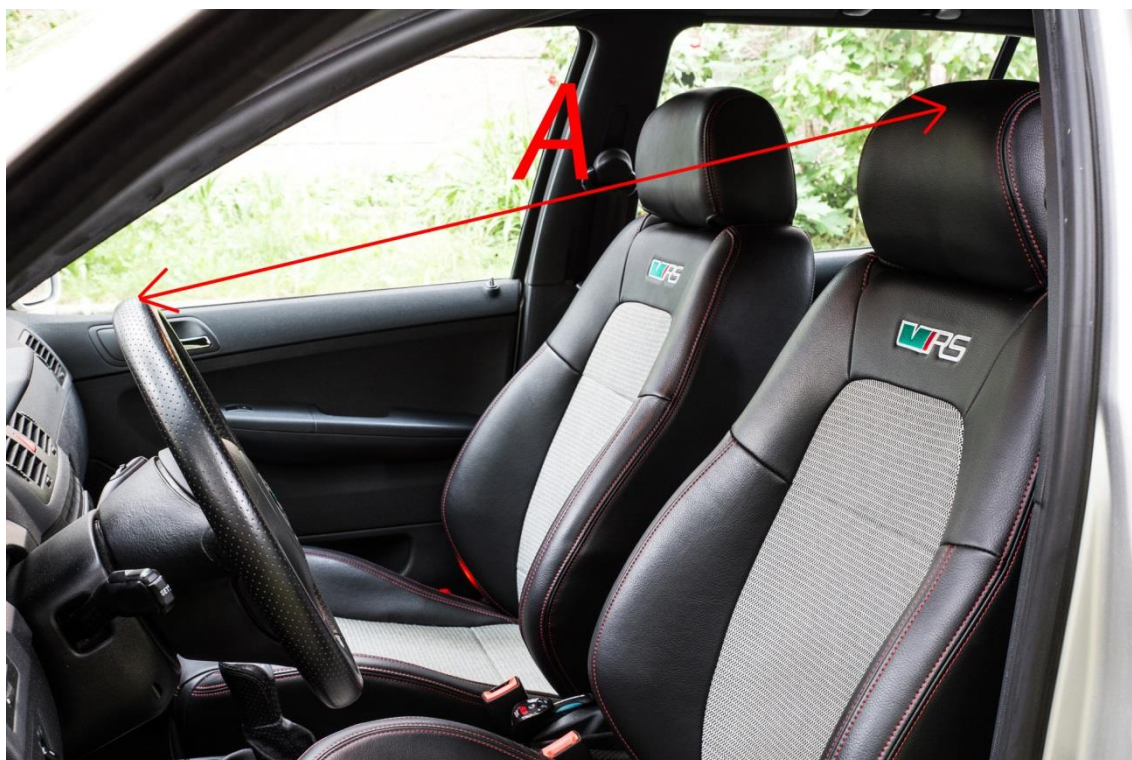
Seznam literatury a informačních zdrojů

- [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

- [15] Zdroj obrázku. [online]. Srpen 2016. [Cit. srpen 2016]. Dostupné z: <http://sillord.free.fr/wip/3d/syd/topview02.jpg>, upraveno
- [16] Datasheet NI 9234. [online]. Srpen 2016. [Cit. srpen 2016]. Dostupné z: http://www.ni.com/pdf/manuals/374238a_02.pdf
- [17] Stránky výrobce G.R.A.S. [online]. Srpen 2016. [Cit. srpen 2016]. Dostupné z: <http://www.gras.dk/ra0185.html>
- [18] Stránky výrobce G.R.A.S. [online]. Srpen 2016. [Cit. srpen 2016]. Dostupné z: <http://www.gras.dk/40ph.html>
- [19] Stránky výrobce G.R.A.S. [online]. Srpen 2016. [Cit. srpen 2016]. Dostupné z: <http://www.gras.dk/aa0027-extension-cable-for-array-microphones-smb-female-to-bnc.html>
- [20] Zdroj obrázku National Instruments. [online]. Srpen 2016. [Cit. srpen 2016]. Dostupné z: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/cs/nid/208802>

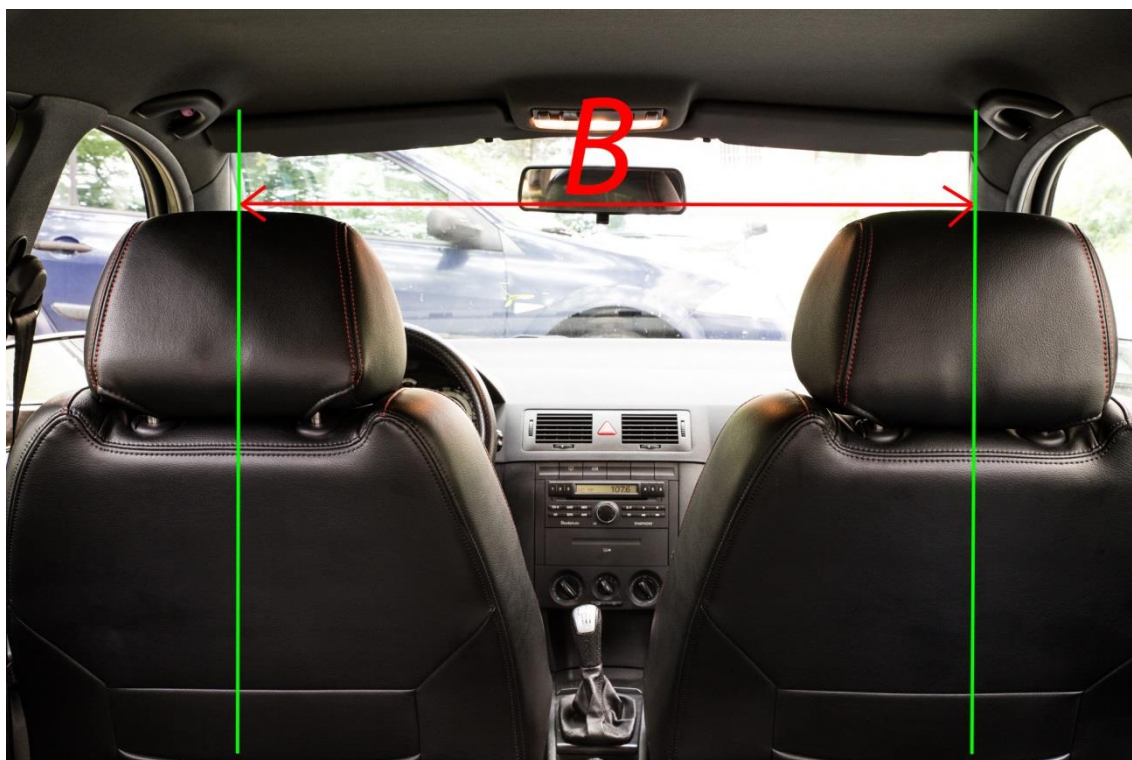


Příloha C – Vizualizace rozměru A ve vozidle Škoda Fabia 1. generace.



Zdroj: vlastní zpracování, 2016

Příloha D – Vizualizace rozměru B ve vozidle Škoda Fabia 1. generace.



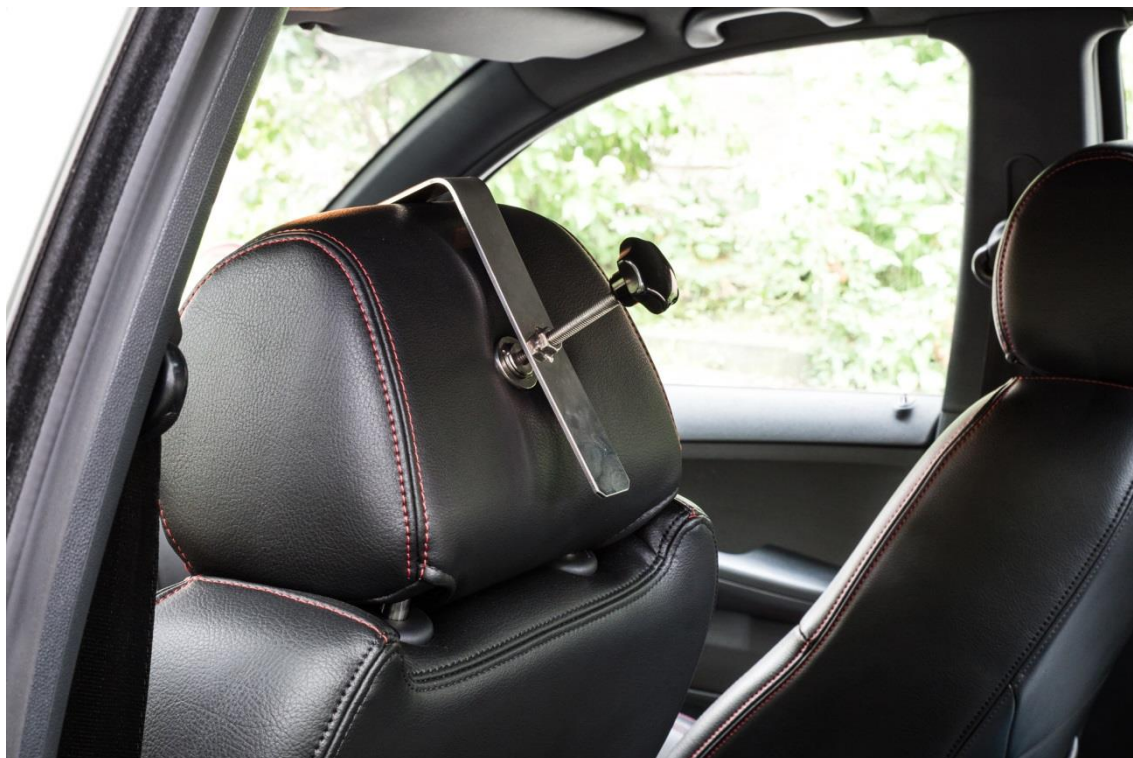
Zdroj: vlastní zpracování, 2016

Příloha E – Vizualizace rozměrů C a D ve vozidle Škoda Fabia 1. generace.



Zdroj: vlastní zpracování, 2016

Příloha F – Detail upevnění na sedadlo.



Zdroj: vlastní zpracování, 2016

Příloha G – Detail mikrofonu G.R.A.S. 40PH osazený v hotovém mikrofonním poli.



Zdroj: vlastní zpracování, 2016