

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra vozidel a motorů



HODNOCENÍ DOBY DOZVUKU V ALFA KABINĚ

**EVALUATION OF REVERBATION TIME IN AN ALFA
CABIN**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Tomáš Hojný

Květen 2013

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra vozidel a motorů



Obor B 2341 Strojírenství

Zaměření 2302R022 stroje a zařízení

Dopravní stroje a zařízení

HODNOCENÍ DOBY DOZVUKU V ALFA KABINĚ

**EVALUATION OF REVERBATION TIME IN AN ALFA
CABIN**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

KVM – BP – 288

Tomáš Hojný

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jan Novák, Ph.D.

Konzultant bakalářské práce: doc. Dr. Ing. Pavel Němeček

Počet stran: 46

Počet obrázků: 31

Počet tabulek: 13

Květen 2013

Místo pro vložení zadání 1. strana

Místo pro vložení zadání 2. strana

Hodnocení doby dozvuku v Alfa kabině

Anotace

Cílem této bakalářské práce je změřit dozvuk v různých pozicích v Alfa kabině se vzorkem a bez vzorku. Následně je z dozvuku vypočítána akustická pohltivost vzorku a vyhodnocen vliv místa měření na výslednou akustickou pohltivost pomocí matematického vztahu.

Klíčová slova:

Dozvuk

Akustická pohltivost

Bílý šum

Alfa kabina

Evaluation of reverbation time in an Alfa cabin

Annotation

The objective of this thesis is to measure reverbation time with and without a Sample in various position in Alpha cabin. Thereafter calculate sound absorbtion from reverbation time and evaluate, what influence does have the spot to resulting sound absorbtion. This influence is described by mathematical equation.

Key words:

Reverbation time

Sound absorbtion

White noise

Alpha cabin

Desetinné třídění:

Zpracovatel:

TU v Liberci, Fakulta strojní, Katedra vozidel a motorů

Dokončeno:

2013

Archivní označení zprávy:

Prohlášení k využívání výsledků bakalářské práce

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. O právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom(a) povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

V dne.....

.....

Podpis

Seznam symbolů a jednotek

w_0	ustálená hustota akustické energie	[dB]
w	hustota akustické energie	[dB]
P	výkon akustického zdroje	[W]
c	rychlost zvuku	[m.s ⁻¹]
S	plocha celkového povrchu místnosti	[m ²]
α	akustická pohltivost	[-]
V	objem kabiny	[m ³]
I	intenzita zvuku v místnosti	[W.m ⁻²]
I_0	původní intenzita zvuku v místnosti	[W.m ⁻²]
L_I	hladina akustické intenzity zvuku	[dB]
A	celková absorpce prostoru	[m ²]
S_v	celková ohraničující plocha	[m ²]
T	doba dozvuku	[s]
T_S	doba dozvuku podle Sabina	[s]
T_E	doba dozvuku podle Eyringa	[s]
α_E	eyringův činitel zvukové pohltivosti	[-]
m	činitel útlumu zvuku	[m ⁻¹]

HODNOCENÍ DOBY DOZVUKU V ALFA KABINĚ

Obsah:

Úvod.....	9
1. Princip měření doby dozvuku.....	10
1.1 Doba dozvuku.....	10
1.2 Základní akustické vlastnosti.....	10
1.3 Výpočet dozvuku.....	12
1.4 Měření dozvuku.....	15
1.5 Měření dozvuku v Alfa kabině Rieter.....	17
1.5.1 Kontroly prováděné před měřením doby dozvuku.....	19
2. Měření akustické pohltivosti.....	20
3. Materiály používané ke snížení hluku.....	21
4. Budící signál.....	22
4.1 Růžový šum.....	23
4.2 Výchozí signál.....	25
5. Zdroj akustického buzení.....	27
6. Vyhodnocení měření dozvuku a akustické pohltivosti.....	28
6.1 Měření dozvuku za použití bílého šumu.....	28
6.2 Měření akustické pohltivosti za použití bílého šumu.....	33
7. Závislost mezi akustickými pohltivostmi.....	38
8. Omezení výsledků a jejich použití.....	43
Závěr.....	44
Seznam použité literatury.....	45

ÚVOD

V dnešní době je v oblastech nejen automobilového průmyslu kladen velký důraz na používané materiály. Jedná se o materiály používané jak v konstrukci, tak v interiéru vozu. Uvnitř automobilu je, na rozdíl od konstrukce, požadavek na estetičnost a funkčnost materiálů. Cílem je uspokojit zákazníka tak, aby nebyl za jízdy nijak rušen a cena pro něj nadále zůstala přijatelná. Hlavním zdrojem hluku je spalovací motor a zvuk vydávající kolo odvalované po podložce. Materiály v interiéru tak musí být schopny tento hluk co nejvíce absorbovat. Nicméně v dnešní době při existenci elektromotorů, jež žádný výrazný zvuk nevydávají, je snaha použít zvuku ze standardních spalovacích motorů i do automobilů poháněným elektromotorem. Jakýkoli nepříjemný hluk uvnitř automobilu má na řidiče neblahodárný vliv. Při výběru takových materiálů hraje významnou roli cena a jeho účinnost. Účinností je myšlena akustická pohltivost. Jedná se o schopnost materiálu absorbovat zvuk. Akustickou pohltivost má každý materiál jinou. K jejímu zjištění je tedy nutné provést praktické měření, při kterém je tato hodnota zjištěna. Pro měření akustické pohltivosti v automobilovém průmyslu byla zvláště vytvořena speciální dozvuková komora – Alfa kabina, kde měření probíhá. Cílem této bakalářské práce je stanovit vliv místa měření na výslednou akustickou pohltivost pomocí matematického vztahu. V práci jsou nejdříve ze změřených hodnot vypočítány doby dozvuků a z nich zjištěno, jak se bude měnit dozvuk v různých polohách uvnitř Alfa kabiny. Z těchto hodnot jsou následně spočítány jednotlivé akustické pohltivosti. Následně je stanoven vliv na výslednou akustickou pohltivost. Tento vliv je poté popsán matematickým vztahem.

1. PRINCIP MĚŘENÍ DOBY DOZVUKU

1.1 Doba dozvuku

Doba dozvuku je základní parametr charakterizující daný prostor z akustického hlediska. Je to doba, po které se sníží hladina intenzity zvuku v daném okolí o 60 dB, tedy intenzita zvuku klesne 10^6 krát. Závisí na celkové absorpci stěn prostoru (stěny, podlaha, strop), jež jsou vzhledem ke svému rezonančnímu charakteru závislé na frekvenci zvuku. Dále dozvuk závisí na objemu prostoru. Doba dozvuku nemusí být vždy pro danou místnost a danou činnost optimální. Bylo dokázáno, že pro hudbu je lepší delší doba dozvuku než pro řeč. Podobně pro velké sály je vhodnější delší doba dozvuku než pro malé místnosti.

K ustálení zvukového pole dojde po určité době od zapnutí zdroje zvuku v místnosti. Tato doba běžně trvá několik sekund, popřípadě zlomky sekund. V těchto případech je možné zvukové pole aproximovat pomocí modelu difúzního akustického pole, ve kterém je hustota akustické energie všude stejná, a všechny směry šíření zvuku stejně pravděpodobné. Ideální stav je takový stav, kde pokud bychom procházeli s mikrofonom a pořizovali zvukový záznam, žádný výkyv v intenzitě zvuku bychom nenalezli.

1.2 Základní akustické vlastnosti

Pro ideální difúzní akustické pole je zavedeno několik fyzikálních veličin, jež jej charakterizují z energetického hlediska. K takovým veličinám patří **ustálená hustota akustické energie** w_0 (ustálená akustická energie v jednotce objemu). Ustálená hustota akustické energie je dána vztahem:

$$w_0 = \frac{4 \cdot P}{\alpha \cdot c \cdot S} \quad (1)$$

Jestliže dojde k vypnutí zdroje zvuku v místnosti, zvuk ještě nějakou dobu doznívá, a po určité době zanikne. Takové doznívání je charakteristické pouze pro uzavřené prostory. Ve volném prostoru k ničemu takovému nedojde. Pro doznívání ideálního difúzního akustického pole v místnosti je zavedena tzv. **doba dozvuku**. Optimální doba dozvuku je důležitá z hlediska srozumitelnosti. Pokud bude příliš dlouhá, způsobí promítávání emitovaného zvuku odražením. Za předpokladu, že bude doba dozvuku příliš krátká, vysílaný zvuk bude vyznívat krátce a úsečně. Pro všechny body v místnosti je doba dozvuku ideálně difúzního akustického pole jednotná. Pokud je difúzní akustické pole porušeno nějakým dominantním typem stojatých vln o určité frekvenci, přestává být doba dozvuku jednotná pro celou místnost, a mění se s místem měření. Za předpokladu, že nastane taková situace, ztrácí doba dozvuku svůj význam obecného akustického parametru, který platí jednotně pro celý objem místnosti. Jestliže je při měření doby dozvuku v místnosti zjištěna její závislost na místě měření, jedná se o známku porušení difúzního akustického pole pravděpodobně vlivem stojatých vln určitých frekvencí.

Doba dozvuku difúzního akustického pole závisí na tom, jak rychle klesá hustota akustické energie w v místnosti. Tento pokles je v čase t exponenciální a je charakterizován časovou konstantou τ_0 . Pro hustotu akustické energie a časovou konstantu platí následující vztahy:

$$w = w_0 \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_0}\right) \quad , \quad \tau_0 = \frac{4V}{\alpha \cdot c \cdot S} \quad (2)$$

To znamená, že intenzita zvuku I klesá v místnosti exponenciálně:

$$w = w_0 \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_0}\right) \quad , \quad I = w \cdot c \quad , \quad I_0 = w_0 \cdot c \quad (3)$$

Místo intenzity I se v akustice používá veličina zvaná **hladina akustické intenzity** L_I , jež je udávána v decibelech.

$$L_I = 10 \cdot \log \left(\frac{I}{10^{-12}} \right) \quad (4)$$

Rovnice (3) tedy nabývá v hladinovém tvaru podoby

$$L_I = L_{I_0} - 10 \cdot \frac{\log e}{\tau} \cdot t \quad (5)$$

Cílem je, mít místnost s dozvukem frekvenčně nezávislou, což vyžaduje nějaké minimální dodatečné akustické úpravy.

Další akustickou vlastností je **akustická pohltivost**. Akustická pohltivost vyjadřuje schopnost materiálu pohltit část dopadajícího akustického výkonu. Je označována malým řeckým písmenem α . Závisí na frekvenci a její hodnoty se pohybují mezi 0 a 1. V praxi je možné se setkat s hodnotou akustické pohltivosti větší než 1. Důvodem je obvykle zvětšená plocha povrchu vzorku vzniklá různým tvarováním. Jestliže se hodnota akustické pohltivosti rovná právě 1, znamená to, že nedochází k žádnému odrazu zvuku, tedy součinitel odrazivosti je roven 0. V automobilovém průmyslu je snaha využívat materiály s co největším součinitelem akustické pohltivosti.

1.3 Výpočet dozvuku

Před samotným měřením je možné přibližně zjistit očekávanou dobu dozvuku výpočtem celkové absorpce prostoru A a objemu V podle následujícího vztahu:

$$A = \alpha \cdot S_v \quad (6)$$

α Akustická pohltivost

S_vcelková ohraničující plocha

V následující tabulce jsou uvedeny přibližné hodnoty akustických pohltivostí určitého typu místností:

α	Druh místnosti
0,05	Téměř prázdná místnost s tvrdými stěnami z betonu, z cihel nebo dlaždic
0,01	Částečně prázdná místnost s tvrdými stěnami
0,15	Místnost zařízená nábytkem; pravoúhlá dílna; pravoúhlá průmyslová provozovna
0,2	Místnost nepravidelného tvaru zařízená nábytkem; dílna nebo průmyslová provozovna nepravidelného tvaru
0,25	Místnost zařízená čalouněným nábytkem; průmyslový provoz nebo dílna s dílčími akustickými úpravami na stropě nebo zdech (například částečně pohlcující strop)
0,35	Místnost s materiálem pohlcujícím zvuk na stěnách a stropu
0,5	Místnost s velkým množstvím materiálu pohlcujícím zvuk na stropu a stěnách

Viz zdroj č. 5

Poté lze odvodit vztah:

$$T = 0,161 \cdot \frac{V}{A} = 0,161 \cdot \frac{V}{\alpha \cdot S_v} \quad (7)$$

Tato závislost platí dobře pouze pro malé činitele pohltivosti α . Hodnota úměrnosti byla zjištěna experimentálně na hodnotu 0,164. Konstanta se nazývá doba dozvuku podle Sabina (Wallace Sabine):

$$T_S = 0,164 \cdot \frac{V}{A} = 0,164 \cdot \frac{V}{\alpha \cdot S_v} \quad (8)$$

Akustická pohltivost α zde charakterizuje průměrnou pohltivost všech ohraničujících ploch. Za předpokladu, že jednotlivé plochy S_i mají činitele pohltivosti α_i , je průměrná hodnota dána vztahem:

$$\alpha = \frac{\sum \alpha_i \cdot S_i}{S} \quad (9)$$

S..... celkový povrch stěn (součet všech S_i)

Vztah (8) pro dobu dozvuku podle Sabina neplatí vždy. Předpokládejme, že pohltivost stěn je nulová, tedy $\alpha = 0$ a všechna energie se odrazí. Poté by měla být doba dozvuku nekonečná. Vyřešení tohoto problému vyžaduje zahrnutí útlumu zvuku při jeho šíření. U dokonale pohltivé stěny $\alpha = 1$ nastává větší komplikace. Doba dozvuku je podle vztahu (8) evidentně nenulová, přestože by se měla rovnat nule. V předcházejícím odvození byl předpokládán spojitý (exponenciální) pokles hustoty zvukové energie, který již není dobrou aproximací dějů v akustickém poli pro velké pohltivosti. Paprsek zvuku o intenzitě I , jenž dopadne na povrch s činitelem akustické pohltivosti α , bude skokově zeslaben o $\alpha \cdot I$. Tuto skutečnost do svých výpočtů zahrnul Carl Eyring a odvodil pro dobu dozvuku vztah:

$$T_E = 0,164 \cdot \frac{V}{-S \cdot \ln(1-\alpha)} = 0,164 \cdot \frac{V}{\alpha_E \cdot S} \quad (10)$$

Substituce $\alpha_E = -\ln(1-\alpha)$ je někdy označována jako Eyringův činitel akustické pohltivosti. Následné vyjádření doby dozvuku z tohoto vztahu se nazývá doba dozvuku podle Eyringa. Pro $\alpha = 1$ platí $T_E = 0$. Eyringův vzorec vyhovuje i pro malé pohltivosti.

Pro prostory se středním činitelem pohltivosti $\alpha < 0,2$ a ne příliš velkými rozdíly mezi jednotlivými stěnami je možné použít i Sabinův vzorec, poněvadž ten je dostatečně přesný.

Při běžných měřeních se nejčastěji využívá Eyringův vzorec.

Všechny vzorce pro dobu dozvuku (8) a (10) nevyhovují pro $\alpha \rightarrow 0$. K tomu je třeba uvažovat útlum zvuku při šíření (způsobený disipací energie ve vzduchu), který se projeví exponenciálním úbytkem intenzity se vzdáleností:

$$I = I_0 \cdot e^{-ml} \quad (12)$$

I_0 intenzita na počátku

mčinitel útlumu zvuku

Při zahrnutí útlumu zvuku ve vzduchu např. do Sabinova vztahu poté dostaneme:

$$T_S = 0,164 \cdot \frac{V}{\alpha \cdot S + 4 \cdot m \cdot V} \quad (13)$$

Činitel útlumu m nabývá hodnot od $0,001 \text{ m}^{-1}$ do $0,06 \text{ m}^{-1}$ v závislosti na frekvenci a relativní vlhkosti vzduchu.

1.4 Měření dozvuku

Dozvuk je možné měřit několika metodami. Na následujících řádcích je popsán nejdříve obecný postup takového měření.

Do zkoušené místnosti je umístěn zdroj zvuku, nejlépe všesměrový. Ten je schopen zajistit ustálenou hladinu akustického tlaku ve všech bodech prostoru nejméně o 40 dB vyšší, než je hladina hluku pozadí. Počet měřicích poloh se volí tak, aby bylo dosaženo vhodného pokrytí místnosti. Umístění polohy je voleno tak, aby odpovídalo obvyklým polohám zdrojů zvuku, pro které je prostor tvořen. Do prostoru jsou umístěny snímací všesměrové mikrofony. Ty musí být od sebe vzdáleny alespoň na polovinu vlnové délky, tj. na minimální vzdálenost 2 m pro obvyklý kmitočtový rozsah. Mikrofon se nesmí nacházet v poli přímých vln zdroje zvuku, protože se předpokládá existence difúzního pole. Čtvrtina vlnové délky, běžně 1 m, je minimální vzdálenost jakékoli polohy mikrofonu k nejbližšímu odrazivému povrchu, včetně podlahy. Vliv silného přímého zvuku se eliminuje pomocí vhodného umístění mikrofonů.

Žádný z nich nesmí být příliš blízko zdroje zvuku. Minimální vzdálenost od zdroje zvuku je dána vztahem:

$$d_{\min} = 2 \cdot \sqrt{\frac{V}{c \cdot T}} \quad (14)$$

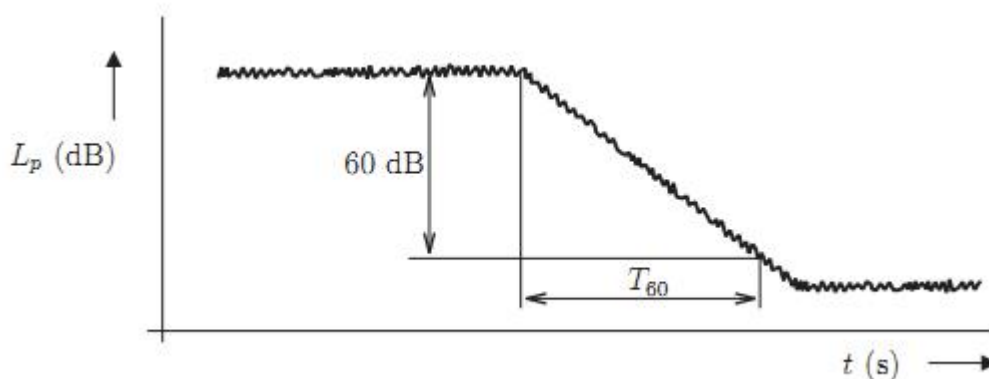
V.....objem prostoru

c.....rychlost šíření zvuku

T..... odhad očekávané doby dozvuku

Metoda přerušovaného šumu

Jedná se o metodu měření vycházející z definice dozvuku. Jako zdroj je použit reproduktor. Prostor je vybuzen šumem a po dosažení ustáleného stavu se vypne zdroj zvuku. Poté je naměřena poklesová přímka.



Obrázek 1.4: Průběh poklesové přímky při měření doby dozvuku – viz zdroj č. 6

Spektrum musí být dostatečně ploché. Zdroj zvuku by měl směřovat pokud možno do všech směrů. Doba buzení musí být dostatečně velká pro plné vybuzení měřeného prostoru. Počet zvolených poloh mikrofonů závisí na požadovaném pokrytí. Pro postihnutí frekvenční závislosti doby dozvuku se používají jako budicí signály třetinooktávové šумы v rozsahu 100 Hz až 5kHz nebo oktávové šумы v pásmech 125 Hz až 4 kHz. Mikrofonní signál se filtruje odpovídajícími třetinooktávovými, resp. oktávovými filtry za účelem zlepšení odstupu

signálu. V každé poloze mikrofону se měří několikrát pro každé kmitočtové pásmo. Po vypnutí stroje je vyhodnocován pokles hladiny akustického tlaku v úseku -5 dB až -35 dB vůči hladině před vypnutím. Poté se provede přepočítání na pokles o 60 dB a z jednotlivých měření se stanoví průměrná hodnota (v jednotlivých kmitočtových pásmech) a vypočte se nejistota výsledků.

Metoda integrované impulsové odezvy

Impulsovou odezvu je možné získat přímo pomocí zdroje impulsu (pistole) nebo jiným zdrojem, který sám o sobě nedoznívá za předpokladu, že je jeho spektrum dostatečně široké. Realizace dostatečně úzkého a zároveň vysokého impulsu je ovšem velmi složitá. Pro úspěšné vybudování prostoru akustickým impulsem se využívají tzv. MLS (Maximum Length Sequence) signály. Tyto signály jsou deterministické, ale mají dostatečně ploché spektrum, podobně jako bílý šum.

V případě existence ideálního difúzního zvukového pole by bylo dostačující jediné měření pro jednu polohu zdroje zvuku a jednu polohu mikrofónu. Ve skutečných prostorech mohou naměřené hodnoty doby dozvuku kolísat jak v závislosti na poloze zdroje, tak na poloze mikrofónu. Poloha zdroje je volena tak, aby co nejlépe pokrývala možné polohy budoucích zdrojů zvuku. Při určování poloh mikrofónů je postup obdobný. Zde je snaha postihnout hlavní rozdíly v době dozvuku. Mikrofóny by od sebe měly být vzdáleny alespoň polovinu maximální vlnové délky (cca 2 m). Vzdálenost mikrofónu od nejbližší odrazivé plochy nesmí být menší než čtvrtina vlnové délky (cca 1 m). Naměřené výsledky různých poloh mikrofónů pro jednotlivá pásma se průměrují buď pro celou místnost, nebo pro významné oblasti, které jsou od sebe nějak odděleny. K měření se poté přistupuje jako k opakování jednoho měření a kromě střední hodnoty se ještě určuje rozptyl, jenž určuje rovnoměrnost doby dozvuku ve zvukovém poli.

1.5 Měření dozvuku v Alfa kabině Rieter

Alfa kabina od společnosti Rieter je konstruována tak, aby v ní bylo možné měřit akustické vlastnosti materiálů a různé součásti vozidel. Kabina je zhruba o jednu třetinu (1:3,2) menší než dozvuková komora švýcarské zkušebny materiálů a testovací laboratoře EMPA v

Dübendorfu. To z ní dělá ideální měřicí pracoviště pro automobilový průmysl. Zvuková pohltivost kabiny jako takové je velmi malá. Konstrukce zajišťuje vysokou úroveň zvukové izolace. Rozdíl mezi měřeními v Alfa kabině a v dozvukové komoře spočívá podle normy ISO 354 v povrchových jevech vzorku. Pohltivá plocha, která odpovídá okrajům vzorku, se tedy jeví v poměru k jejímu povrchu třikrát větší. Vzorek umístěný v Alfa kabině je olemován z důvodu normou požadovaných 12 m² plochy. Při oktávové analýze je v kabině možné měřit frekvenční rozsah 500 Hz až 8 kHz. Při třetinooktávové analýze je v kabině možné měřit frekvenční rozsah 400 Hz až 10 kHz. Na podlaze kabiny se nachází kovový rám, do kterého se ukládá vzorek materiálu. Standardizovaný vzorek by měl mít redukované rozměry 1 x 1,2 m. Jedinou geometrickou veličinou, jež není redukována v poměru 1:3, je tloušťka vzorku. Mikrofon snímá dozvuk v pěti různých polohách. Je umístěn na stropu kabiny, na konci otáčivého ramene. Mikrofon se otáčí po kružnici rovnoběžně s podlahou a nachází se 92 cm nad podlahou. Posuv ramene je zajištěn elektromotorem, který je opatřen redukčním převodem. Ten zajišťuje rovnoměrné rozdělení kruhu na pět poloh. Změna jedné polohy do druhé je ovládána elektronickým měřicím zařízením. V jednotlivých rozích Alfa kabiny jsou umístěny tři reproduktory. Z reproduktorů vychází signál v oktávovém nebo třetinooktávovém pásmu. Výsledkem měření je poté doba dozvuku T.

Akustická pohltivost α se vypočítá pomocí upraveného Sabinova vzorce:

$$\alpha_S = 0,92 \cdot \frac{0,163 \cdot V}{S} \cdot \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_0} \right) \quad (15)$$

α_S střední součinitel akustické pohltivosti

0,92..... korekční faktor okrajových efektů

V.....objem kabiny

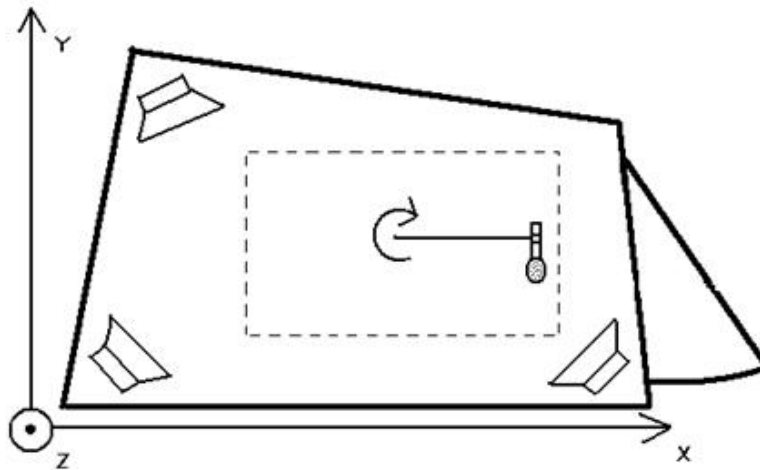
S..... plocha vzorku

T₁.....doba dozvuku v kabině se vzorkem

T₀..... doba dozvuku v kabině bez vzorku

1.5.1 Kontroly prováděné před měřením doby dozvuku

Mikrofon musí být nasměrován proti krytu kabiny. Ve svém držáku musí být upevněn tak, aby krytka přesahovala držák o 20 mm. Dále musí být délka otočného ramene nastavena tak, aby mikrofon působil na kružnici o průměru 1,2 m. Pokud jsou výše uvedené podmínky splněny, nachází se mikrofon ve výchozí poloze. Poté zjistíme teplotu a vlhkost v kabině. Po naměření hodnot zevnitř kabiny je nutné zajistit teplotu uvnitř kabiny v rozmezí hodnot 18 – 25°C. Relativní vlhkost musí být větší než 50 %. V kabině se nesmí nacházet žádné cizí těleso. Proto je nutné se před měřením ujistit, že tomu tak opravdu je. Lampa osvětlující kabinu musí být v průběhu měření zhasnuta. Dveře musí být uzamčené.



Obrázek 1.5.1: Pohled shora do Alfa kabiny

2. Měření akustické pohltivosti

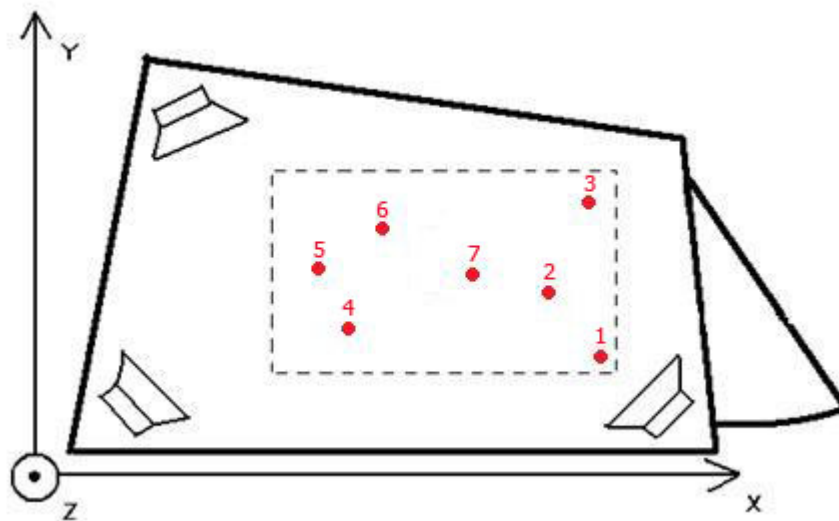
Akustickou pohltivost je možné měřit dvěma normovanými způsoby. Prvním způsobem je měření doby dozvuku v dozvukové komoře a následný výpočet akustické pohltivosti. Komoře je obložena materiálem a na něm se měří střední akustická pohltivost materiálu. Tato metoda má několik nevýhod. Tou první je montáž a upevnění vzorků na strop a stěny. Druhým nedostatkem je nutnost velkého množství zkoumaných vzorků, a tudíž velká pracnost měření. Druhým způsobem, jak zjistit hodnotu akustické pohltivosti, je pomocí impedanční trubice. Tím se eliminují výše zmíněné nevýhody u měření v dozvukové komoře. Zde není velký požadavek na velikost vzorku. Impedanční trubice je speciální kovová trubice s reproduktorem, která slouží jako zdroj zvukových vln. Na trubici jsou otvory, jež slouží k vkládání mikrofónů a otvor pro vkládání vzorku zkoušeného materiálu. Měření akustické pohltivosti je možné provádět pro jednotlivé frekvence samostatně, nebo širokopásmově při použití bílého šumu jako zdroje signálu pro zabudovaný reproduktor. Pomocí impedanční trubice je tedy možné měřit akustickou pohltivost, odrazivost a impedanci ve frekvenčním rozsahu 50 Hz až 6,4 kHz.

3. Materiály používané ke snížení hluku

V moderní době hluk představuje důležité měřítko spolehlivosti a kvality. Nadměrný hluk má na člověka obecně negativní účinky. Je příčinou únavy, stresu a dalších zdravotních potíží. Proto se výrobci automobilů snaží o to, aby uvnitř vozu byl co největší klid a řidiče tak hluk nerušil. Zdrojem hluku uvnitř automobilů je motor, prostředí a zvuk vznikající při valení kol po silnici. Materiály pro snížení hluku musí být schopny přeměnit akustickou energii v teplo. Hluk je možné snížit konstrukčními úpravami nebo například protihlukovými clonami. Dále se používají absorbéry zvuku. Jedná se o materiál, který pohlcuje zvuk. Obvykle se využívá struktury porézních materiálů, tedy materiálů s malými dutinami vyplněnými vzduchem – pěněné měkké umělé hmoty. Samostatnými materiály potom bývají minerální nebo organická vlákna, kokosová vlákna a drcený textil.

4. Budící signál

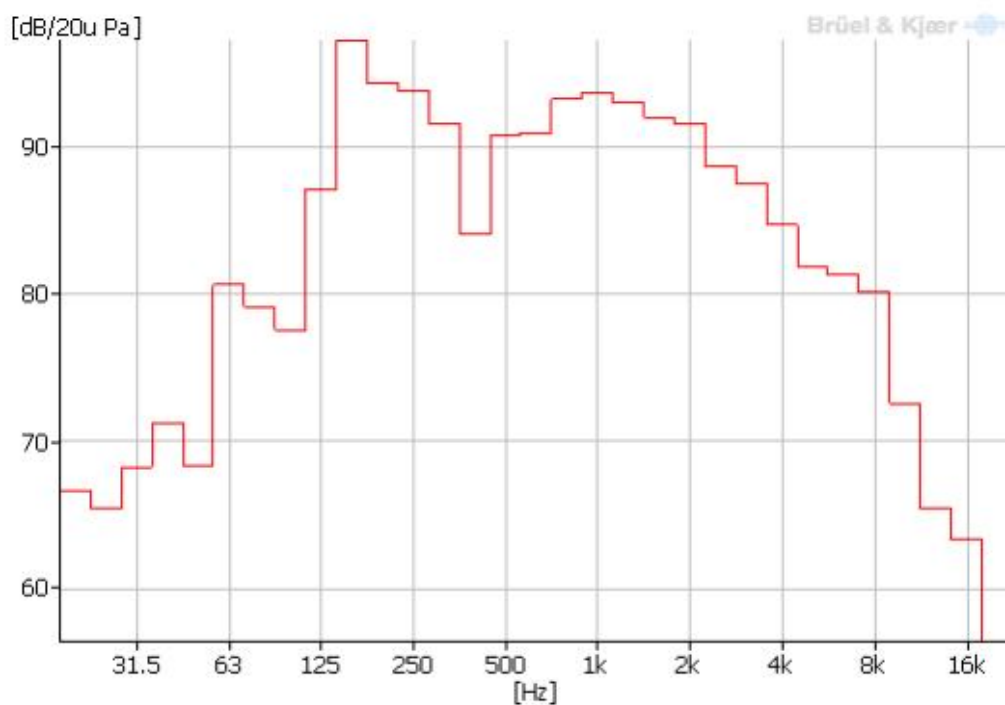
Budícím signálem jsem zvolil růžový šum, jenž je popsán v další kapitole. Vnitřní prostor alfa kabiny byl buzen z několika poloh (viz obrázek 4). Snažou bylo pokrýt požadovaný prostor co možná nejrovnoměrněji. Nicméně prostor uvnitř kabiny nebyl příliš velký pro manipulaci se stojanem držícím mikrofon, a tak do některých pozic nebylo možné mikrofon nastavit. Mikrofon byl dále umístěn v šesti různých výškách, a to 5, 15, 25, 35, 45 a 55 cm. Každá ze sedmi poloh tedy byla měřena v šesti výškách. Při prvním měření ve výšce mikrofonu 5 cm byla v kabině teplota 17,8°C. Vlivem mé přítomnosti v kabině při nastavování mikrofonu se teplota v průběhu měření mírně zvýšila. Konkrétně při pozici mikrofonu ve výšce 15 cm na 18,4°C a při pozici mikrofonu ve výšce 25 cm na 18,5°C. Během měření při dalších výškách mikrofonu se teplota v kabině ustálila na 18,5°C. Tyto hodnoty jsou zde uvedeny proto, že teplota mírně zkresluje výsledky měření.



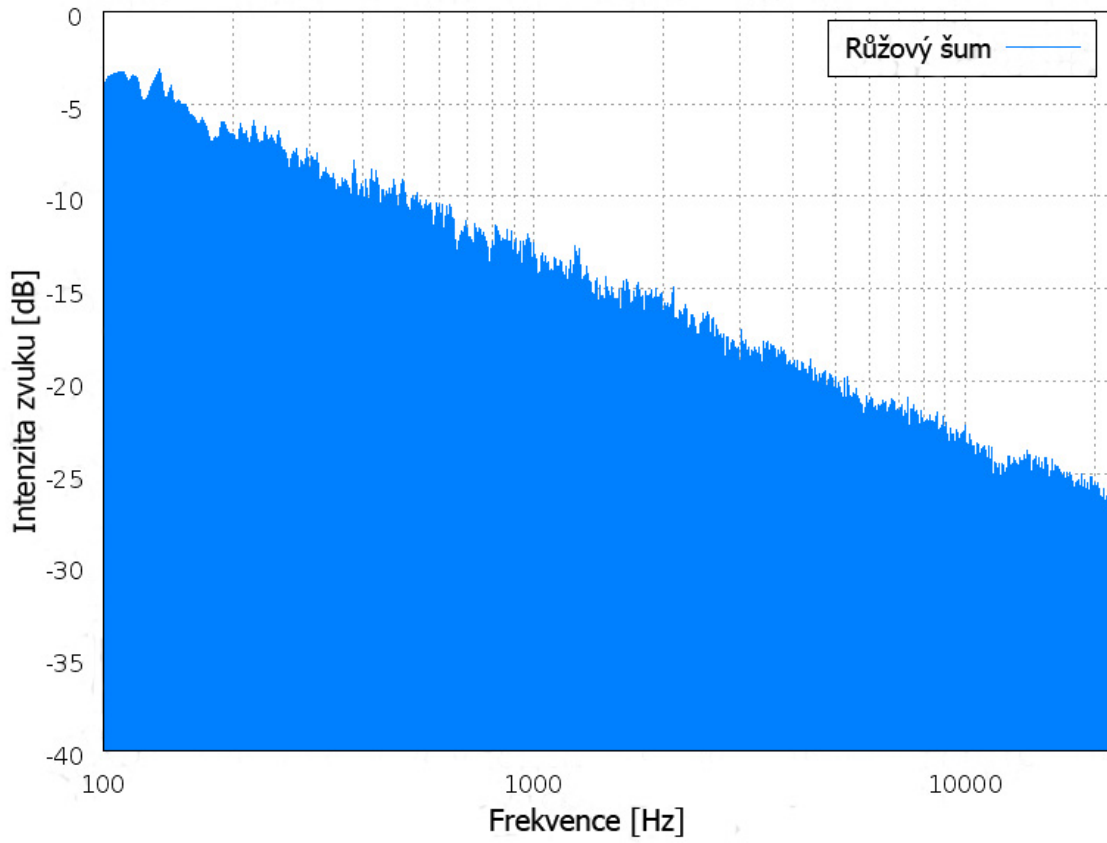
Obrázek 4: Umístění jednotlivých budících pozic

4.1 Růžový šum

Růžový šum, nebo rovněž „kmitající šum“, známý také jako $1/f$ šum, je druh speciálního signálu. Růžový šum má takový frekvenční rozsah, že výkonová frekvenční hustota je přímo úměrná převrácené hodnotě frekvence, proto se někdy využívá pojmenování $1/f$ šum. To nastává v mnoha případech studie. Jedná se o přechod mezi bílým a červeným šumem. Signál je upraven pro akustická měření. Bílý šum má v celém svém frekvenčním rozsahu stejný výkon. Růžový šum má tedy narozdíl od šumu bílého výkonovou spektrální hustotu nepřímo úměrnou frekvenci, což znamená, že jeho výkon je přímo úměrný převrácené hodnotě frekvence. Na další oktávu se za daného výkonu intenzita zvuku snižuje o 3 dB. Při dostatečně vysoké frekvenci není nikdy růžový šum dominantní. Růžový šum má oproti bílému šumu v každé následující oktávě stejnou sílu hluku. Oktáva o frekvenci 2 – 4 kHz zní pro lidské ucho nejhlasitěji. Hlasitost jiných frekvencí přitom nadále klesá. Na obrázku 5.1 je znázorněna klesající výkonová spektrální hustota růžového šumu.



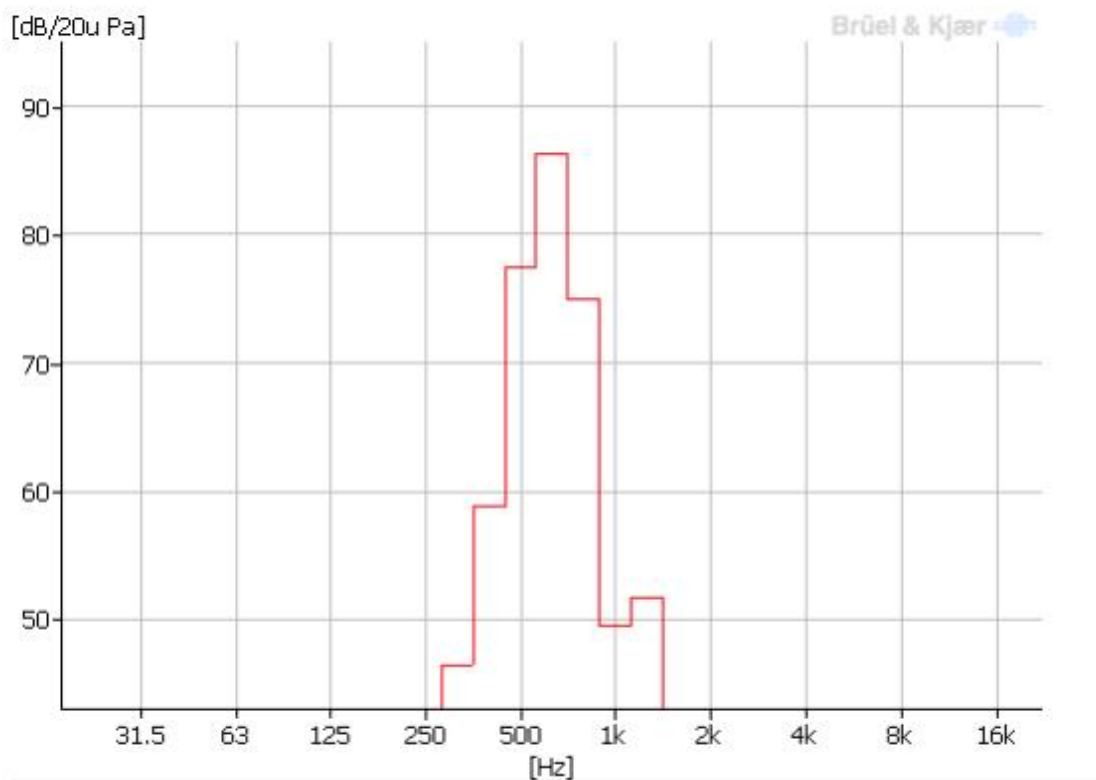
Obrázek 4.1a: Frekvenční spektrum růžového šumu realizovaného v Alfa kabině



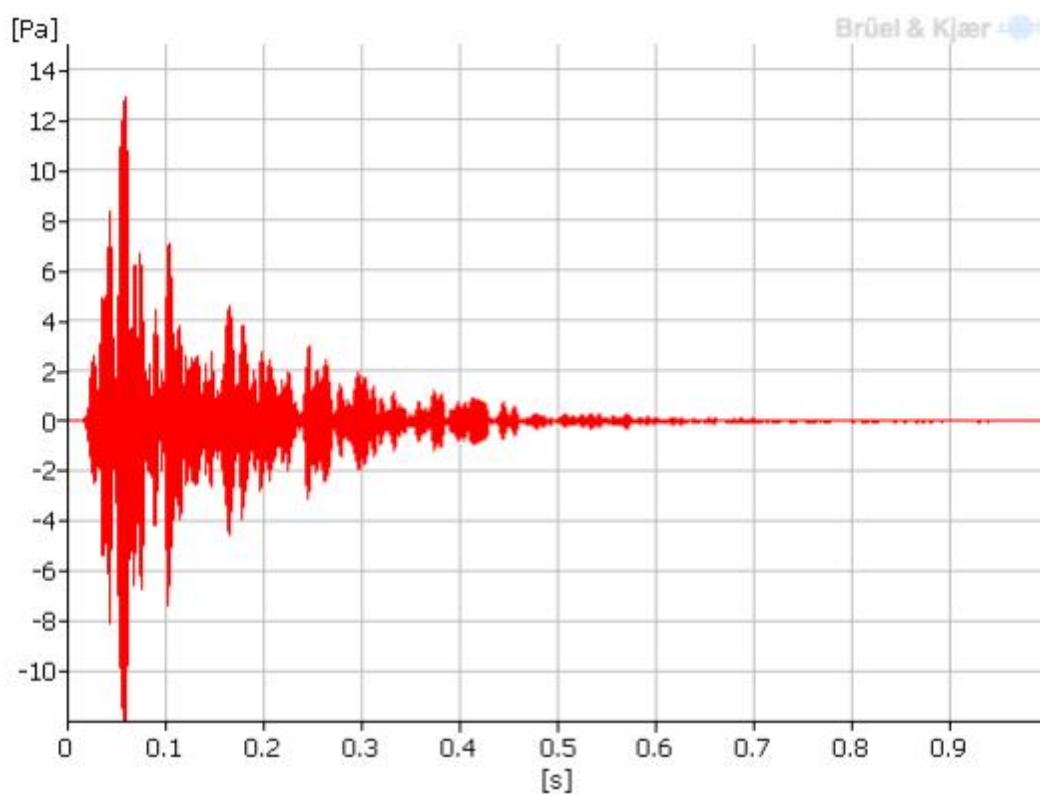
Obrázek 4.1b: Klesající spektrální hustota růžového šum – viz zdroj č. 10

4.2 Výchozí signál

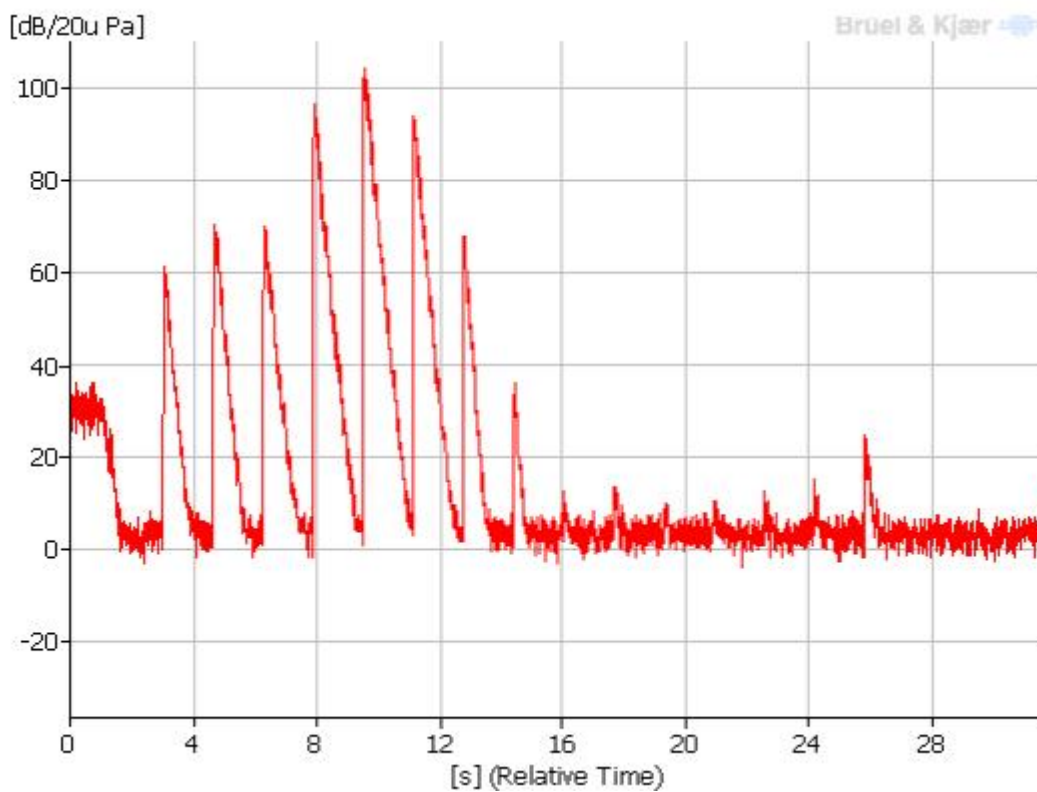
Výchozím signálem v Alfa kabině je rozmítaný sinus. Je pouštěn v patnácti intervalech a v každém z nich se mění jeho frekvence. Nejnižší frekvence je 400 Hz, nejvyšší potom 10 kHz. Níže jsou uvedeny obrázky frekvenčního spektra tohoto signálu, průběh dozvuku a průběh akustického tlaku.



Obrázek 4.2a: Frekvenční spektrum rozmítaného sinu



Obrázek 4.2b: Průběh dozvuku rozmítaného sinu



Obrázek 4.2c: Průběh akustického tlaku rozmítaného sinu

5. Zdroj akustického buzení

Pro buzení růžového šumu jsme byli nuceni použít externí zdroj. Jednalo se o generátor náhodných signálů (obrázek 5). Software od výrobce Alfa kabiny totiž obsahoval pouze záznam rozmítaného sinu. Generátor jsme zapojili k reproduktorům uvnitř kabiny a nastavili na něm růžový šum. Poté již bylo možné začít s měřením.



Obrázek 5: Generátor náhodných signálů – viz zdroj č. 14

6. Vyhodnocení měření dozvuku a akustické pohltivosti

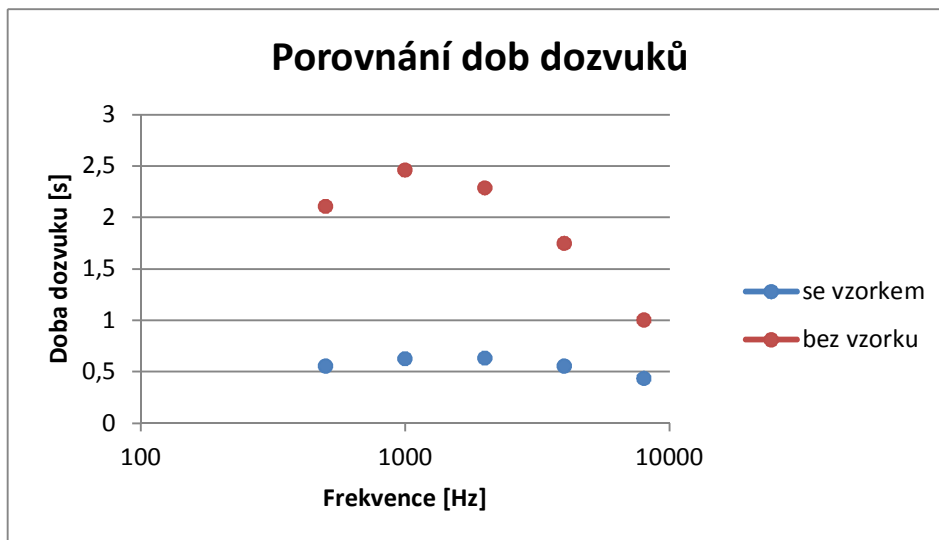
Měření byla provedena se vzorkem a bez vzorku. Cílem práce je porovnat výsledky měření akustické pohltivosti se vzorkem a bez vzorku a nalézt mezi nimi příslušnou matematickou závislost. Ve výsledcích jsou nejdříve uvedeny rozdíly dob dozvuků. Následně je porovnána akustická pohltivost vypočítaná na základě hodnot z měření s akustickou pohltivostí, kterou vypočítal software od Alfa kabiny.

6.1 Měření dozvuku za použití bílého šumu

Dobu dozvuku jsem měřil v sedmi různých polohách a šesti různých výškách (viz kapitola 4). Výsledky jsou prezentovány v tabulkách a grafech v následujícím textu. Od každé výšky je zde uvedena jedna poloha. Hodnoty frekvencí jsou od 500 do 8000 Hz. V grafech je názorně ukázán rozdíl dozvuku při měření se vzorkem a bez vzorku. Hodnoty dozvuků vypočítané při frekvencích 16 až 250 Hz jsem ignoroval. Při třetinooktávové analýze je totiž v kabině možné měřit frekvenční rozsah 400 až 10 000 Hz (viz kapitola 1.5). V grafech jsou na ose x hodnoty frekvence, na ose y potom hodnoty dozvuku. V názvu grafu je uvedena hodnota mikrofonu nad vzorkem. Ve všech případech je hodnota dozvuku se vzorkem nižší než hodnota dozvuku bez vzorku. Rozdíl se pohybuje v závislosti na budící frekvenci. Z grafů je také evidentní, že při frekvenci 8000 Hz je rozdíl mezi dobami dozvuku několik desetín, zatímco při nižších frekvencích je rozdíl i více než sekunda. Na konci kapitoly jsou ještě uvedeny tabulky, ve kterých jsou průměrné hodnoty dozvuků se vzorkem a bez vzorku z pozic 2, 6 a 7. Hodnota T je doba dozvuku se vzorkem a T_0 je doba dozvuku bez vzorku. Je patrné, že doba dozvuku bez vzorku lehce kolísá, zatímco průměrná doba dozvuku se vzorkem s vyšší polohou mikrofonu roste.

Tabulka 6.1a – hodnoty dob dozvuků v pozici 7

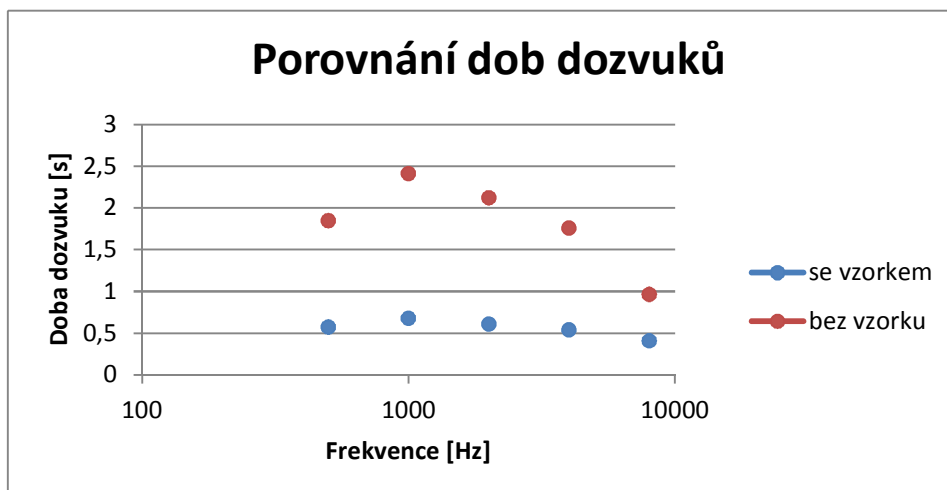
Pozice 7 ve výšce 5 cm			
frekvence [Hz]	se vzorkem [s]	bez vzorku [s]	rozdíl [s]
500	0,5552	2,1060	1,5508
1000	0,6263	2,4619	1,8356
2000	0,6323	2,2874	1,6551
4000	0,5526	1,7457	1,1930
8000	0,4336	1,0015	0,5679



Graf 6.1a – Porovnání dob dozvuků v pozici 7 ve výšce 5 cm

Tabulka 6.1b – Hodnoty dob dozvuků v pozici 6

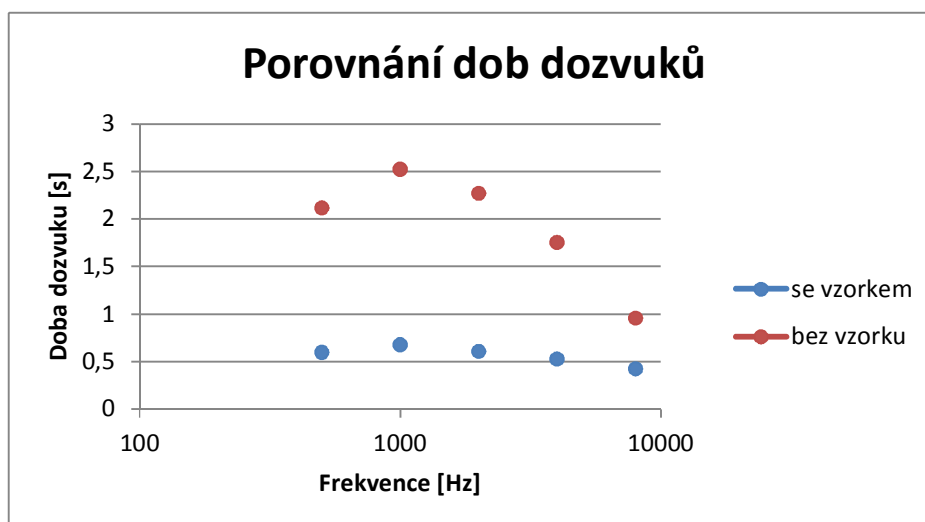
Pozice 6 ve výšce 15 cm			
frekvence [Hz]	se vzorkem [s]	bez vzorku [s]	rozdíl [s]
500	0,5731	1,8464	1,2733
1000	0,6774	2,4089	1,7314
2000	0,6076	2,1195	1,5119
4000	0,5404	1,7556	1,2152
8000	0,4085	0,9658	0,5573



Graf 6.1b - Porovnání dob dozvuků v pozici 6 ve výšce 15 cm

Tabulka 6.1c – Hodnoty dob dozvuků v pozici 7

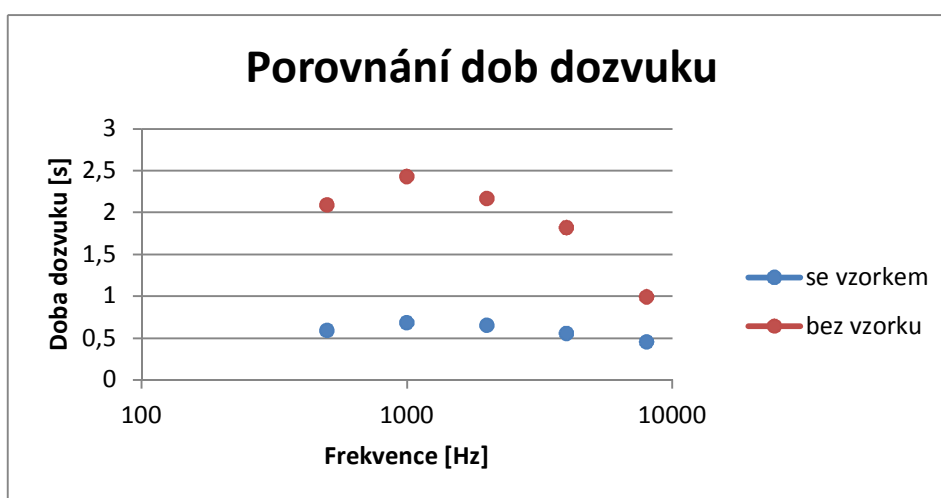
Pozice 7 ve výšce 25 cm			
frekvence [Hz]	se vzorkem [s]	bez vzorku [s]	rozdíl [s]
500	0,5990	2,1139	1,5149
1000	0,6769	2,5202	1,8433
2000	0,6068	2,2688	1,6619
4000	0,5279	1,7540	1,2262
8000	0,4249	0,9574	0,5325



Graf 6.1c - Porovnání dob dozvuků v pozici 7 ve výšce 25 cm

Tabulka 6.1d – Hodnoty dob dozvuků v pozici 2

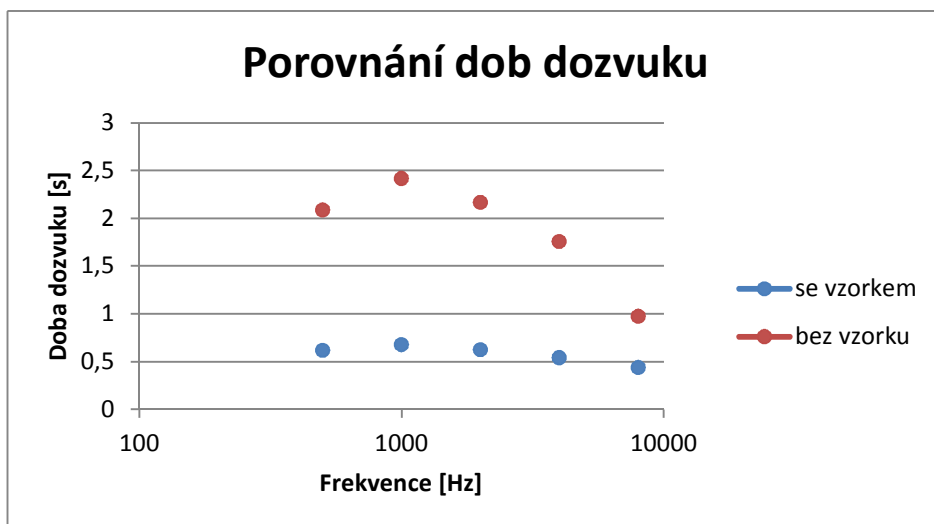
Pozice 2 ve výšce 35 cm			
frekvence [Hz]	se vzorkem [s]	bez vzorku [s]	rozdíl [s]
500	0,5912	2,0901	1,4989
1000	0,6828	2,4271	1,7443
2000	0,6502	2,1668	1,5166
4000	0,5560	1,8182	1,2622
8000	0,4553	0,9924	0,5371



Graf 6.1d - Porovnání dob dozvuků v pozici 2 ve výšce 35 cm

Tabulka 6.1e – Hodnoty dob dozvuků v pozici 2

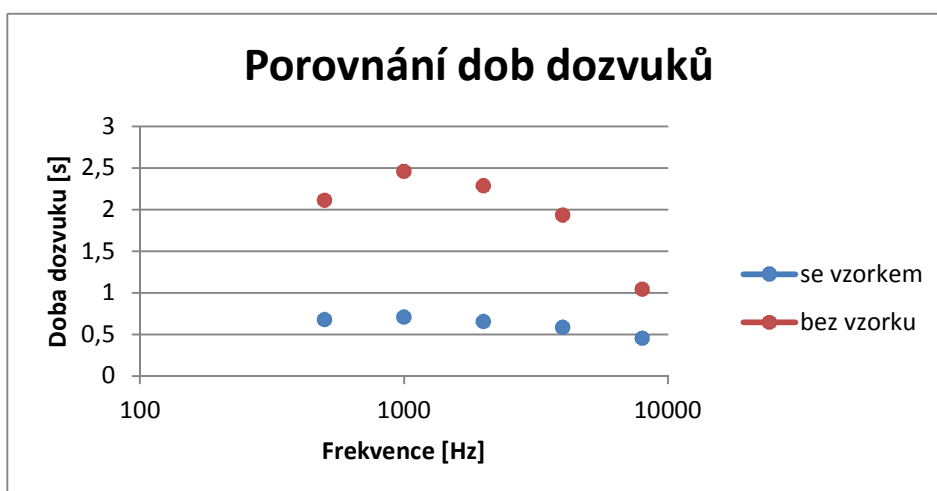
Pozice 2 ve výšce 45 cm			
frekvence [Hz]	se vzorkem [s]	bez vzorku [s]	rozdíl [s]
500	0,6158	2,0858	1,4700
1000	0,6774	2,4135	1,7361
2000	0,6247	2,1666	1,5418
4000	0,5406	1,7552	1,2146
8000	0,4364	0,9729	0,5365



Graf 6.1e - Porovnání dob dozvuků v pozici 2 ve výšce 45 cm

Tabulka 6.1f – Hodnoty dob dozvuků v pozici 7

Pozice 7 ve výšce 55 cm			
frekvence [Hz]	se vzorkem [s]	bez vzorku [s]	rozdíl [s]
500	0,6733	2,1128	1,4395
1000	0,7064	2,4613	1,7550
2000	0,6509	2,2874	1,6364
4000	0,5831	1,9360	1,3529
8000	0,4521	1,0410	0,5888



Graf 6.1f - Porovnání dob dozvuků v pozici 7 ve výšce 55 cm

Tabulka 6.1g – Porovnání průměrných dob dozvuků

Frekvence [Hz]	5 cm		15 cm		25 cm	
	se vzorkem [s]	bez vzorku [s]	se vzorkem [s]	bez vzorku [s]	se vzorkem [s]	bez vzorku [s]
500	0,5688	2,0786	0,5804	2,0309	0,6055	2,1494
1000	0,6602	2,4385	0,6724	2,3943	0,6780	2,4398
2000	0,6048	2,2402	0,6051	2,1678	0,6080	2,1907
4000	0,5388	1,7853	0,5356	1,7484	0,5393	1,7855
8000	0,4250	0,9916	0,4361	0,9728	0,4344	0,9856

Tabulka 6.1h – Porovnání dob dozvuků

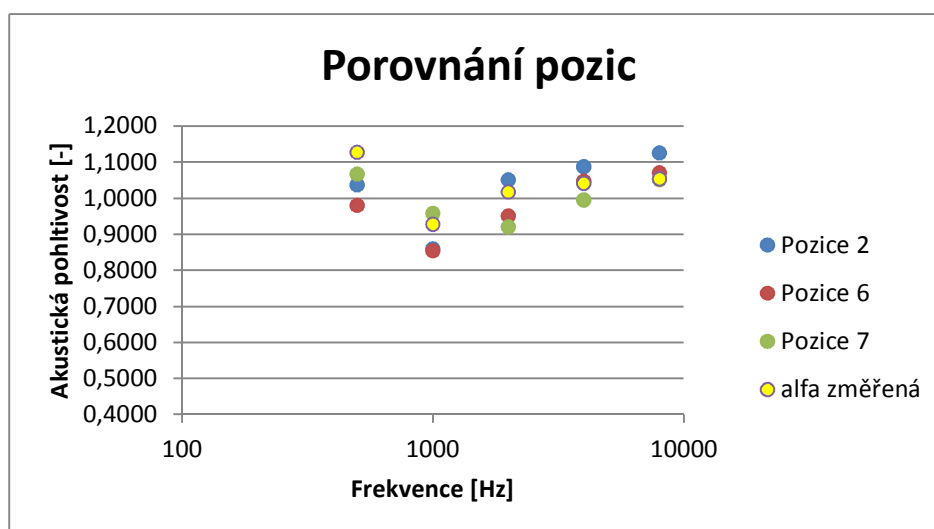
Frekvence	35 cm		45 cm		55 cm	
	T	T0	T	T0	T	T0
500	0,6012	2,0240	0,6094	2,1007	0,6199	2,1060
1000	0,6828	2,3939	0,6844	2,4016	0,6965	2,5040
2000	0,6200	2,1901	0,6250	2,2216	0,6275	2,2320
4000	0,5536	1,8251	0,5486	1,7555	0,5642	1,8483
8000	0,4379	0,9934	0,4377	0,9798	0,4428	0,9999

6.2 Měření akustické pohltivosti za použití bílého šumu

Níže jsou uvedeny tabulky s hodnotami akustických pohltivostí spolu s grafy, v nichž jsou porovnány jednotlivé pozice. Pro výpočet akustických pohltivostí jsem využil hodnoty dozvuků z pozic 2, 6 a 7 v šesti různých výškách (viz kapitola 4). Frekvenční rozsah jsem volil stejný jako v předcházející kapitole 6.1, tedy 500 až 8000 Hz. Z výsledků je patrné, že nejvyšší vliv na akustickou pohltivost má výška umístění mikrofonu a frekvence signálu. Čím níže je mikrofon umístěn, tím vyšší by akustická pohltivost měla být.

Tabulka 6.2a – Hodnoty akustických pohltivostí ve výšce 5 cm

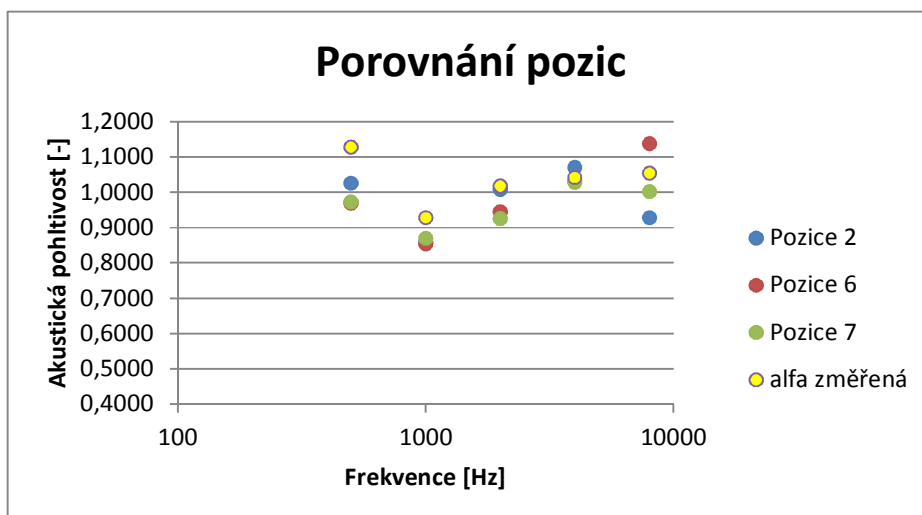
Akustická pohltivost ve výšce 5 cm					
frekvence [Hz]	Pozice 2	Pozice 6	Pozice 7	α změřená	α průměrná
500	1,0366	0,9802	1,0674	1,127	1,0281
1000	0,8594	0,8541	0,9582	0,928	0,8906
2000	1,0507	0,9507	0,9209	1,017	0,9741
4000	1,0875	1,0475	0,9952	1,041	1,0434
8000	1,1251	1,0708	1,0523	1,054	1,0828



Graf 6.2a – Porovnání akustických pohltivostí ve výšce 5 cm

Tabulka 6.2b – Hodnoty akustických pohltivostí ve výšce 15 cm

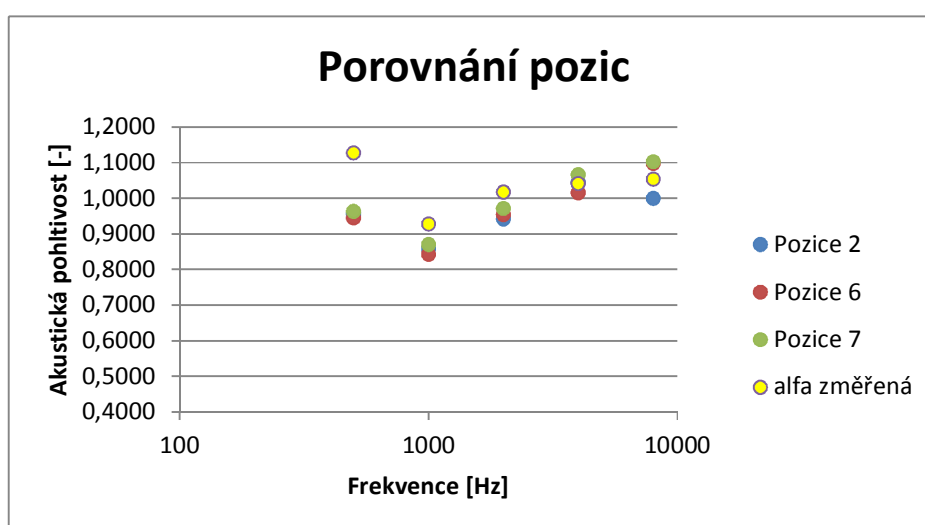
Akustická pohltivost ve výšce 15 cm					
frekvence [Hz]	Pozice 2	Pozice 6	Pozice 7	α změřená	α průměrná
500	1,0252	0,9683	0,9724	1,1270	0,9887
1000	0,8595	0,8539	0,8693	0,9280	0,8609
2000	1,0075	0,9448	0,9254	1,0170	0,9592
4000	1,0694	1,0309	1,0278	1,0410	1,0427
8000	0,9280	1,1370	1,0012	1,0540	1,0221



Graf 6.2c – Porovnání akustických pohltivostí ve výšce 15 cm

Tabulka 6.2c – Hodnoty akustických pohltivostí ve výšce 25 cm

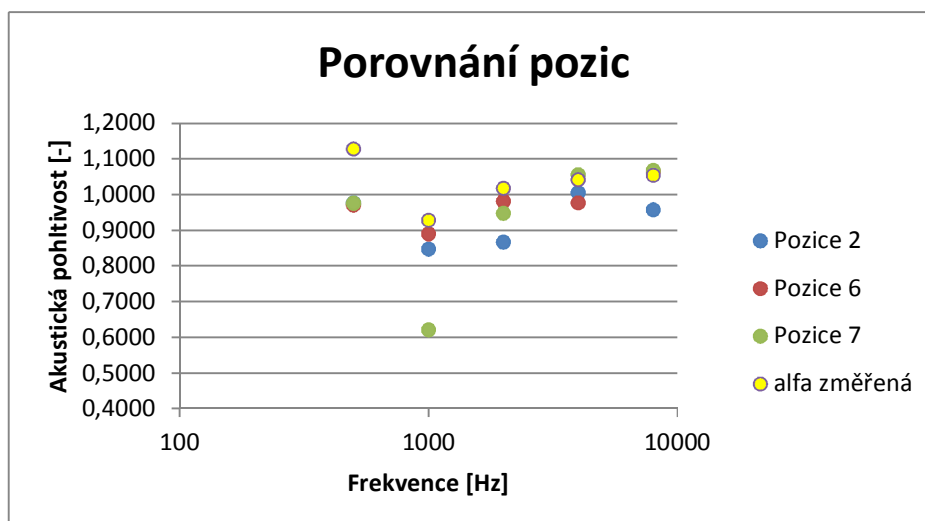
Akustická pohltivost ve výšce 25 cm					
frekvence [Hz]	Pozice 2	Pozice 6	Pozice 7	α změřená	α průměrná
500	0,9564	0,9446	0,9629	1,1270	0,9546
1000	0,8585	0,8420	0,8696	0,9280	0,8567
2000	0,9423	0,9544	0,9715	1,0170	0,9560
4000	1,0445	1,0152	1,0658	1,0410	1,0418
8000	0,9992	1,0980	1,1024	1,0540	1,0666



Graf 6.2e – Porovnání akustických pohltivostí ve výšce 25 cm

Tabulka 6.2d – Hodnoty akustických pohltivostí ve výšce 35 cm

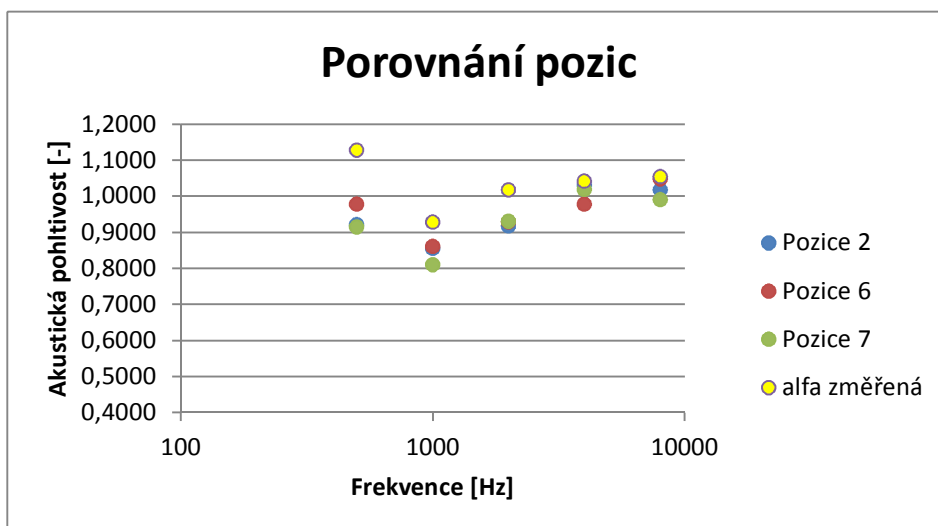
Akustická pohltivost ve výšce 35 cm					
frekvence [Hz]	Pozice 2	Pozice 6	Pozice 7	α změřená	α průměrná
500	0,9762	0,9704	0,9756	1,1270	0,9740
1000	0,8470	0,8891	0,6209	0,9280	0,7857
2000	0,8663	0,9813	0,9470	1,0170	0,9315
4000	1,0048	0,9767	1,0557	1,0410	1,0124
8000	0,9566	1,0643	1,0666	1,0540	1,0292



Graf 6.2g – Porovnání akustických pohltivostí ve výšce 35 cm

Tabulka 6.2e – Hodnoty akustických pohltivostí ve výšce 45 cm

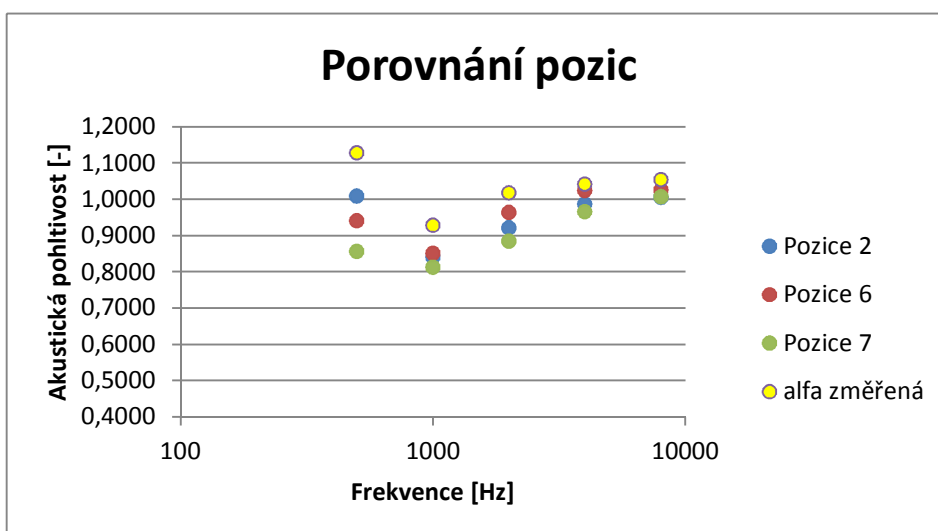
Akustická pohltivost ve výšce 45 cm					
frekvence [Hz]	Pozice 2	Pozice 6	Pozice 7	α změřená	α průměrná
500	0,9210	0,9771	0,9147	1,1270	0,9376
1000	0,8546	0,8601	0,8093	0,9280	0,8414
2000	0,9168	0,9284	0,9303	1,0170	0,9252
4000	1,0302	0,9771	1,0180	1,0410	1,0084
8000	1,0169	1,0472	0,9899	1,0540	1,0180



Graf 6.2i – Porovnání akustických pohltivostí ve výšce 45 cm

Tabulka 6.2f – Hodnoty akustických pohltivostí ve výšce 55 cm

Akustická pohltivost ve výšce 55 cm					
frekvence [Hz]	Pozice 2	Pozice 6	Pozice 7	α změřená	α průměrná
500	1,0082	0,9401	0,8558	1,1270	0,9347
1000	0,8399	0,8502	0,8123	0,9280	0,8342
2000	0,9203	0,9634	0,8845	1,0170	0,9227
4000	0,9861	1,0238	0,9646	1,0410	0,9915
8000	1,0048	1,0250	1,0068	1,0540	1,0122



Graf 6.2k – Porovnání akustických pohltivostí ve výšce 55 cm

7. Závislost mezi akustickými pohltivostmi

Ve vztahu (16) je uvedena závislost akustické pohltivosti α_p vypočítané z hodnot dozvuků na frekvenci budícího signálu, objemu prostoru, ve kterém se akustická pohltivost měří, a na poloze mikrofonu. Výraz je možné použít pouze pro hodnoty frekvencí 1000 a více Hz. Dále se ve výrazu nachází konstanta, jež se v závislosti na výšce polohy mikrofonu mění. Pro každou výšku je nutné ji vypočítat.

$$\alpha_p = k \cdot \frac{\log f}{z^2 \cdot V} \quad (20)$$

α_p vypočítaná akustická pohltivost

k konstanta

f frekvence budícího signálu

V objem Alfa kabiny

z výška mikrofonu nad vzorkem

Hodnoty koeficientu k : pro $z = 5$ cm, $k = 0,004665$

pro $z = 15$ cm, $k = 0,040894$

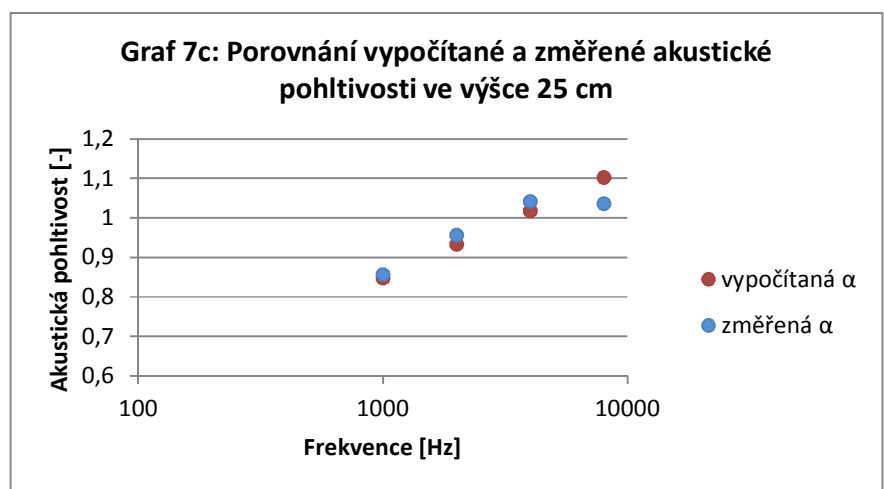
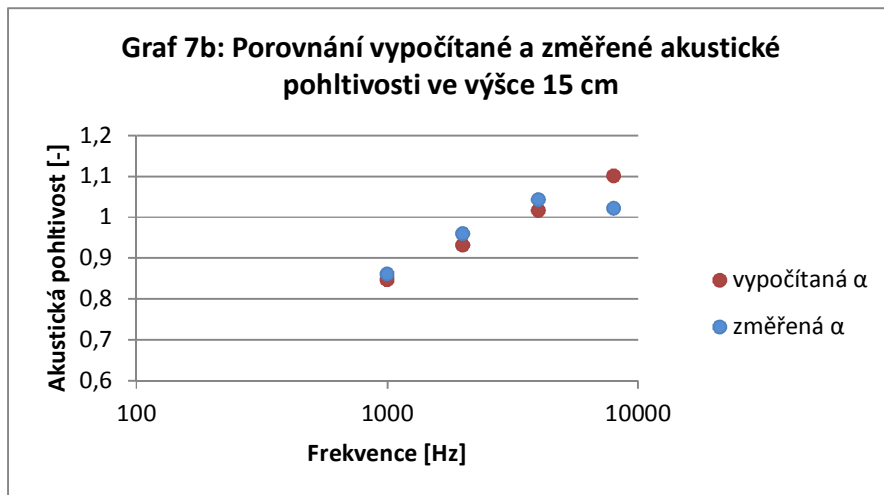
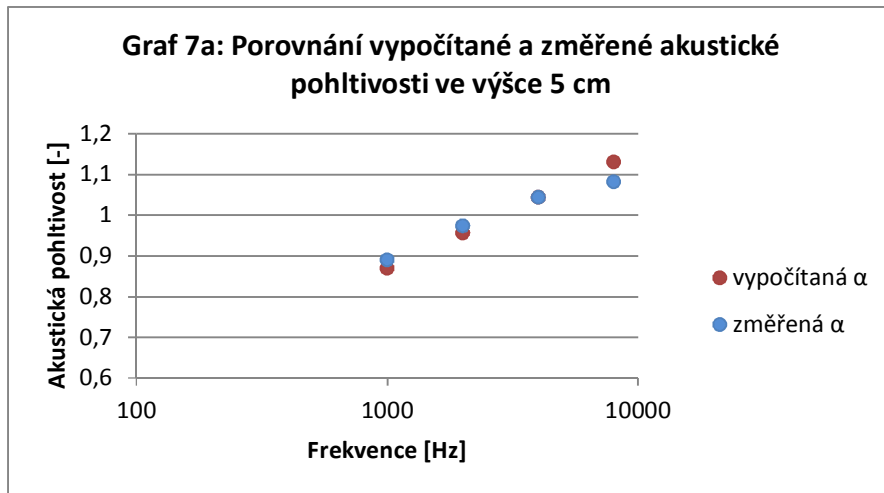
pro $z = 25$ cm, $k = 0,113691$

pro $z = 35$ cm, $k = 0,218561$

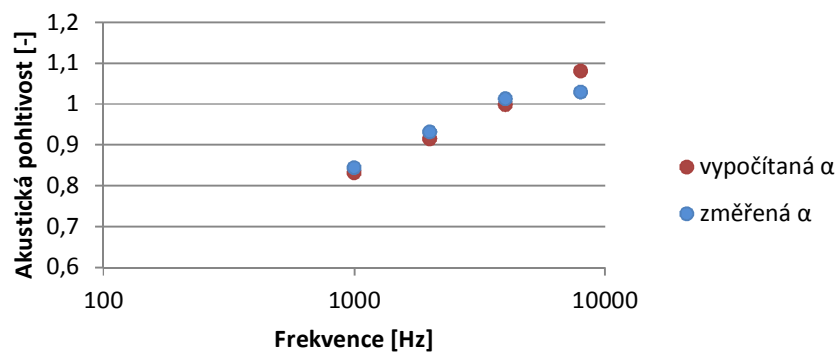
pro $z = 45$ cm, $k = 0,359111$

pro $z = 55$ cm, $k = 0,531914$

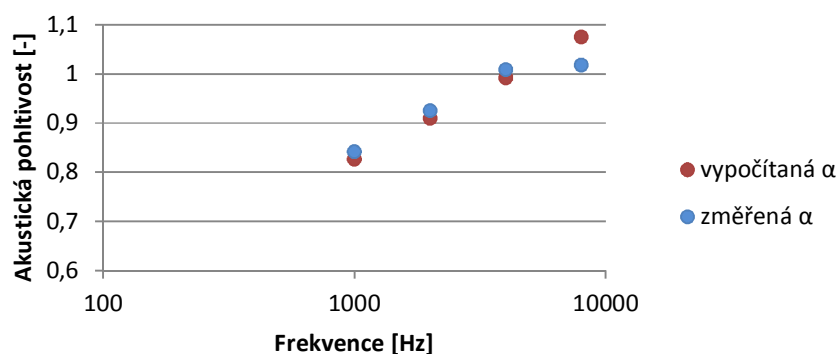
Pro vyšší přehlednost výsledků jsou níže uvedené grafy znázorňující závislost vypočítané akustické pohltivosti z dozvuků a akustické pohltivosti vypočítané pomocí výše uvedeného vzorce na frekvenci a výšce polohy mikrofonu.



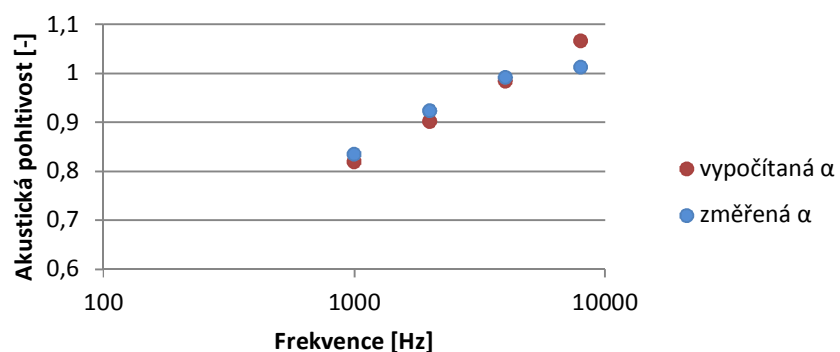
Graf 7d: Porovnání vypočítané a změřené akustické pohltivosti ve výšce 35 cm

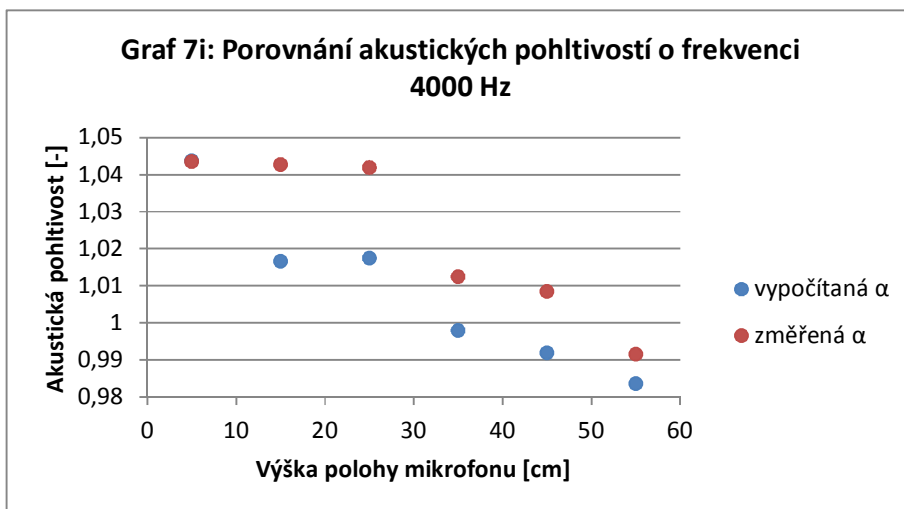
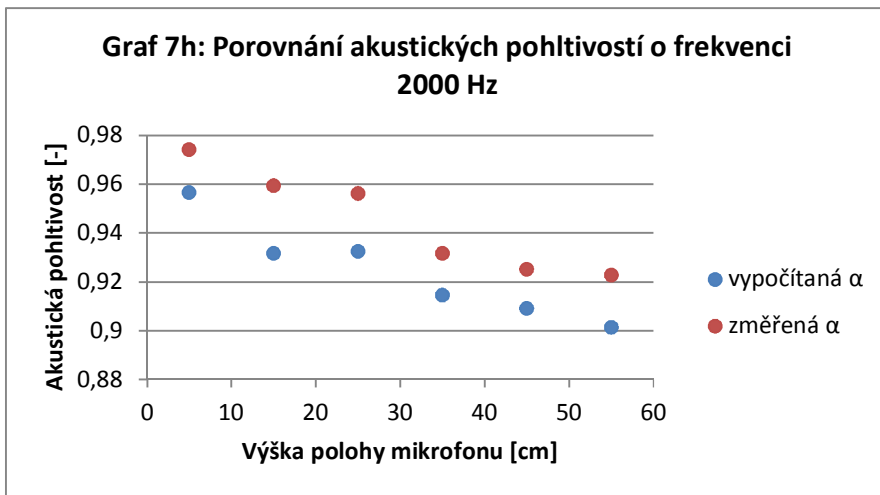
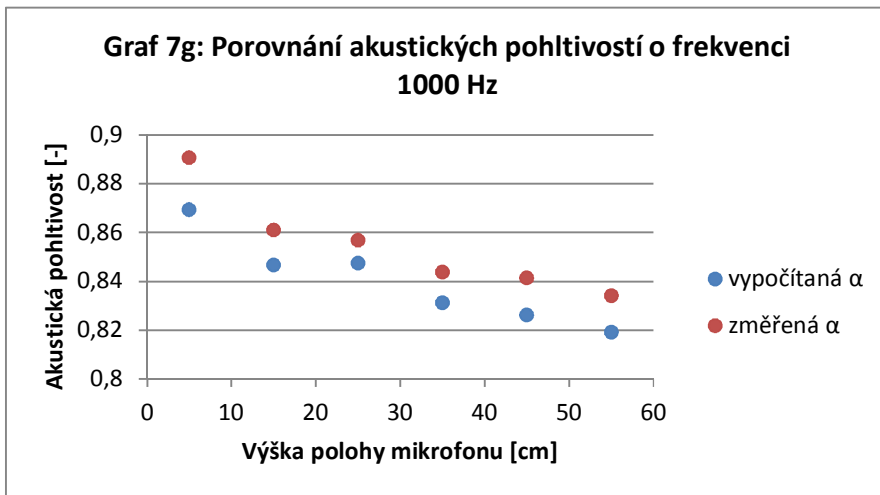


Graf 7e: Porovnání vypočítané a změřené akustické pohltivosti ve výšce 45 cm

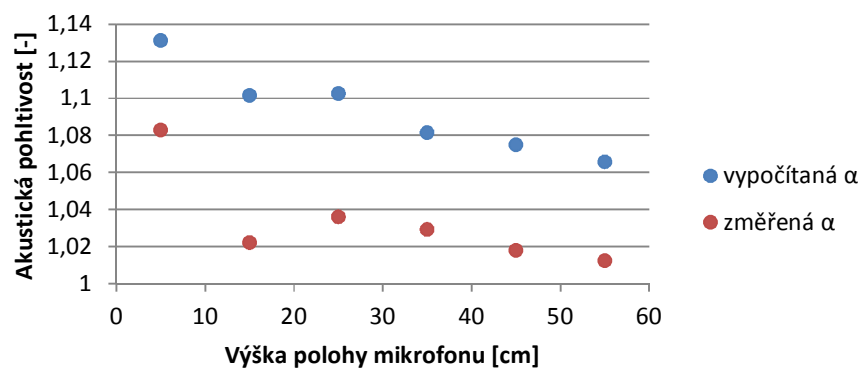


Graf 7f: Porovnání vypočítané a změřené akustické pohltivosti ve výšce 55 cm





Graf 7j: Porovnání akustických pohltivostí o frekvenci 8000 Hz



8. Omezení výsledků a jejich použití

Použití bílého šumu podle mého názoru mé výsledky nijak neovlivňuje. Větší část hluku, který se vyskytuje v automobilech, se podobá šumu, tedy je v určitém rozsahu frekvencí. Zmíněná větší část hluku vzniká při nekonstantní rychlosti jízdy – jízda po městě či mimo obec. Při jízdě po dálnici konstantní rychlostí vzniká jedna konkrétní frekvence hluku. Za této situace by se pro změření dozvuku a následný výpočet akustické pohltivosti bílý, nebo jakýkoli jiný šum nehodil. Zde bych pro měření volil původní signál – rozmítaný sinus.

Cílem této bakalářské práce bylo stanovit vliv místa měření v Alfa kabině na výslednou akustickou pohltivost. Vliv je popsán matematickým vztahem, z něhož je možné vypočítat hodnotu akustické pohltivosti v různých výškách polohy. Vzorec tedy může ušetřit práci s měřením, a tím samozřejmě sníží čas a cenu pro potencionální zákazníky. Zároveň jsme nuceni pro každou výšku vypočítat hodnotu konstanty, která je závislá na výšce mikrofону. Dále je možné vztah použít pouze pro hodnoty frekvencí od 1000 Hz a výše.

Závěr

Měření dozvuku a následný výpočet akustické pohltivosti je časově velmi náročný. Právě proto bylo cílem zjistit patřičnou závislost akustické pohltivosti na poloze mikrofonu uvnitř Alfa kabiny a tím celý proces urychlit. V teoretické části práce jsou popsány základní akustické vlastnosti materiálů spolu s matematickými vztahy charakterizujícími tyto veličiny. Dále jsou zde uvedeny postupy pro měření dozvuku obecně a pro měření v Alfa kabině. Materiály pro snižování hluku jsou zde uvedeny rovněž. Praktická část práce se zabývá již samotným měřením dozvuku se vzorkem a bez vzorku a poté následným výpočtem akustické pohltivosti. Jednotlivá porovnání jak dob dozvuků, tak hodnot akustických pohltivostí, jsou uvedena v příslušných tabulkách. Pro větší názornost jsou ze stejných hodnot sestrojeny také grafy. Experimentální měření byla provedena s bílým šumem jako budícím signálem. Pro měření bylo nutno zvolit několik pozic v různých výškách mikrofonu, ve kterých bylo měření prováděno. Nejprve bylo provedeno měření se vzorkem. Pro porovnání změřených hodnot byl použit výchozí signál, podle kterého software spočítal hodnoty dozvuků a akustických pohltivostí. S nimi jsou vypočítané akustické pohltivosti porovnány. Výsledkem bakalářské práce je potom vztah popisující závislost vypočítané akustické pohltivosti na frekvenci, objemu prostoru a výšce, ve které byl umístěn mikrofon. Podle mého názoru byl cíl bakalářské práce splněn a věřím, že výsledky z ní vyplývající by mohly být pro automobilový průmysl přínosem.

Seznam použité literatury

1. Richard Nový: Hluk a chvění, Vydavatelství ČVUT, Praha 2000
2. Jiří Čechura: Stavební fyzika 10, Akustika stavebních konstrukcí, Vydavatelství ČVUT, Praha 1999
3. Rieter: Příručka uživatele Alfa kabina
4. Rieter: Návod k používání Alfa kabiny
5. Vsb: Dozvuk a jeho měření,
http://www.337.vsb.cz/materialy/experimentalni_mechanika/AKU_DOZVUK.pdf
6. Feld: Měření doby dozvuku, http://acs.feld.cvut.cz/teach/uak_files/uloha6.pdf
7. Fphil: Prostorová akustika,
http://www.fphil.uniba.sk/uploads/media/07_Priestorova_akustika.pdf
8. Indiamart: Alpha cabin, <http://www.indiamart.com/rieter-automotive/products.html>
9. KVM: Odborné setkání při příležitosti zahájení měření zvukové pohltivosti pomocí α -kabiny,
http://www.kvm.tul.cz/skolici_pracoviste/alfa%20kabina%20zah%C3%A1jen%C3%AD.pdf
10. Wikipedia: Bílý šum, http://en.wikipedia.org/wiki/Pink_noise
11. Jan Novák, Klára Kalinová: Akustické pohltivosti materiálů,
<http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12241-BOZEK/publikace/2004/KOKA-04-Akusticka%20pohltivost-No-Ka.pdf>
12. Richard Nový, Miroslav Kučera: Snižování hluku a vybrací,
http://www.ib.cvut.cz/sites/default/files/Studijni_materialy/SHV/Novy_Kucera_Snizovani_hluku_a_vibraci.pdf
13. Valuetronics: Random signal generator, <https://www.valuetronics.com/detail/Used-bruel-and-kjaer-1405.cfm#.UYTtvErcdkW>