



Parametry ovlivňující mapování akustické intenzity

Diplomová práce

Studijní program: N2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2302T010 – Konstrukce strojů a zařízení
Autor práce: **Bc. Jan Hübner**
Vedoucí práce: Ing. Jan Novák, Ph.D.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Mechanical Engineering ■

The parameters that affect acoustic intensity mapping

Diploma thesis

Study programme: N2301 – Mechanical Engineering
Study branch: 2302T010 – Machine and Equipment Systems
Author: **Bc. Jan Hübner**
Supervisor: Ing. Jan Novák, Ph.D.



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan Hübner**
Osobní číslo: **S12000439**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Konstrukce strojů a zařízení**
Název tématu: **Parametry ovlivňující mapování akustické intenzity**
Zadávací katedra: **Katedra vozidel a motorů**

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

1. Popište princip měření zvuku.
2. Popište měření zvuku s využitím sondy intenzity.
3. Popište možné metody mapování akustické emise.
4. Provedte experimentální měření mapováním akustické intenzity.
5. Opakujte provedené měření s možným vlivem prostředí.
6. Provedte experimentální měření mapováním akustické intenzity s využitím referenčního snímače.
7. Vyhodnoťte provedená měření.
8. Vyhodnoťte vliv parametrů na výsledná měření.



Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy: **50 stran + CD**

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

Seznam odborné literatury:

- [1.] FERENC, B. *Spalovací motory*. Computer press. 2009.
- [2.] NOVÝ, R. *Hluk a chvění*. Vydavatelství ČVUT. Praha 2000.
- [3.] NĚMEČEK, P. *Hluk v technické praxi I*. TUL 1998.
- [4.] TOMEH, E. *Hodnocení hlučnosti automobilových převodovek měřením vibrací*. In DIAGO 2003. ISBN 80-248-0210-4.
- [5.] RANDALL, R. B. *Frequency analysis*. Brüel a Kjaer, Naerum, 1987.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jan Novák, Ph.D.


Katedra vozidel a motorů

Datum zadání diplomové práce: **15. listopadu 2015**

Termín odevzdání diplomové práce: **15. února 2017**

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




Ing. Robert Voženílek, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 15. listopadu 2015

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou 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 diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom 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.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 27. 5. 2016

Podpis: 

Anotace

Diplomová práce spočívá v nalezení parametrů ovlivňující mapování akustické intenzity. Za tímto účelem je proveden experiment v podobě měření akustické intenzity sondou intenzity na spalovacím motoru. Způsob měření je modifikován a tím dochází k určení a popisu parametrů. Výsledkem práce je vyhodnocení objevených parametrů a vyvození doporučení pro další akustická měření.

Klíčová slova:

Sonda intenzity, akustická mapa, hladina akustické intenzity, akustický tlak

Annotation

This diploma thesis is based on discovering the parameters that affect acoustic intensity mapping. For this purpose has been made an experiment with intensity probe on combustion engine. Due to modifying of the measurement method the parameters are defined and described. The result of this thesis is evaluation of discovered parameters and deduction of recommendation for another acoustic measurement.

Key words:

Intensity probe, acoustic map, acoustic intensity level, acoustic pressure

Poděkování

Chtěl bych velice poděkovat panu Ing. Janu Novákovi Ph.D., vedoucímu práce, za podporu při experimentálním měření, za užitečné rady a trpělivost v průběhu celé tvorby. Dále bych chtěl poděkovat paní RNDr. Daně Černé Ph.D. za pomoc při vyhodnocování výsledků v grafickém softwaru a v neposlední řadě bych chtěl poděkovat své přítelkyni Anežce a rodině za svatou trpělivost a psychickou podporu v časech pro mě těžkých a zdánlivě zoufalých.

Parametry ovlivňující mapování akustické intenzity

OBSAH

Úvod	10
1 Princip měření zvuku	11
1.1 Akustický tlak a hladina akustického tlaku	11
1.1.1 Akustický tlak	11
1.1.2 Weberův - Fechnerův zákon	11
1.1.3 Hladina akustického tlaku	13
1.2 Akustická intenzita a hladina akustické intenzity	13
1.2.1 Akustická intenzita	13
1.2.2 Hladina akustické intenzity	14
1.3 Rozdíl mezi zvukem a hlukem	14
1.4 Měření zvuku	15
2 Měření pomocí sondy intenzity	16
2.1 Popis sondy intenzity	16
2.2 Měření sondou intenzity	17
3 Metody mapování akustické emise.....	19
3.1 Beamforming.....	19
3.2 Akustická holografie v blízkém poli (NAH)	20
3.3 Akustická kamera.....	21
4 Experimentální měření mapováním akustické intenzity.....	22
4.1 Popis měřeného objektu	22
4.2 Tvorba a popis sítí.....	23
4.3 Popis měření.....	26
5 Měření s možným vlivem prostředí.....	27
5.1 Tvorba a popis sítě.....	27
5.2 Popis měření.....	27
6 Experimentální měření mapováním akustické intenzity s využitím referenčního snímače	29
6.1 Popis měřeného objektu a referenčního snímače.....	29
6.2 Tvorba sítě a umístění čidla vibrací	30

6.3 Měření bez referenčního snímače	31
6.4 Měření s referenčním snímačem	31
7 Vyhodnocení provedeného měření.....	32
7.1 Zpracování výsledků a interpolace.....	32
7.2 Vyhodnocení měření z hlediska hustoty zvolené sítě	33
7.2.1 Rozpěrka 50 mm.....	33
7.2.2 Rozpěrka 12 mm.....	39
7.3 Vyhodnocení měření z hlediska možného ovlivnění prostředím	43
7.4 Vyhodnocení měření bez použití a s použitím referenčního snímače.....	49
8 Vyhodnocení vlivu parametrů na výsledná měření	52
8.1 Vyhodnocení parametrů.....	52
8.2 Doporučení pro měření a mapování akustické intenzity.....	53
Závěr	55
Seznam použité literatury a odkazů.....	56

Seznam symbolů a jednotek

f	Frekvence	[Hz]
p_b	Barometrický tlak	[Pa]
p_a	Akustický tlak	[Pa]
p_{aef}	Efektivní akustický tlak	[Pa]
p_{a0}	Vztažná hodnota akustického tlaku	[Pa]
p_{as}	Práh slyšitelnosti (akustického tlaku)	[Pa]
p_{ab}	Práh bolestivosti (akustického tlaku)	[Pa]
p_0	Amplituda akustického tlaku	[Pa]
I	Akustická intenzita	[W.m ⁻²]
I_0	Vztažná hodnota akustické intenzity	[W.m ⁻²]
u_a	Akustická rychlost	[m.s ⁻²]
L_p	Hladina akustického tlaku	[dB]
L_I	Hladina akustické intenzity	[dB]
n	Otáčky motoru	[min ⁻¹]
M_t	Zatěžující kroutící moment	[Nm]
V_z	Zdvihový objem	[dm ³]
α	Procento pootevření škrtecí klapky	[%]
W	Akustický výkon	[W]

Úvod

V souvislosti s rostoucí hustotou automobilové dopravy roste nejen emise výfukových plynů, ale též akustická emise. Stejně jako emise výfukových plynů však akustická emise negativně ovlivňuje nejen komfort jízdy, ale i vliv automobilové dopravy na životní prostředí. Proto i u akustické emise vzniká požadavek na její regulaci a snižování do přijatelných mezí. Pokud však budeme chtít snižovat akustickou emisi, musíme jí nejprve analyzovat. Analýza, respektive měření akustické emise probíhá jak přímo během vývoje samotných dopravních prostředků, tak později při běžném provozu. V této diplomové práci bych se rád zabýval právě měřeními akustické emise, respektive parametry, které toto měření ovlivňují.

Jednou z metod používaných k měření akustické emise je vytváření akustických map pomocí sondy intenzity, tedy mapování. Díky mapování lze na dané části měřeného objektu přesně určit místa, která jsou nejintenzivnějším zdrojem akustické emise. Při vyvíjení způsobů snižování akustické emise je pak mnohem efektivnější zaměřit se na tyto zdroje a tím účinněji snížit celkovou akustickou emisi. Přesnost a objektivnost vytvořených akustických map však závisí právě na parametrech, které toto měření ovlivňují. Provedením experimentálních měření v mnoha modifikacích a následnou tvorbou akustických map bych rád tyto parametry objasnil a vyhodnotil jejich vliv a důležitost. Mým cílem je, aby tato práce byla využitelná pro budoucí vývoj prostředků nutných k efektivnímu snížení akustické emise nejen v průmyslovém odvětví automotive, ale i v dalších oborech majících dopad na životní prostředí.

1 Princip měření zvuku

1.1 Akustický tlak a hladina akustického tlaku

1.1.1 Akustický tlak

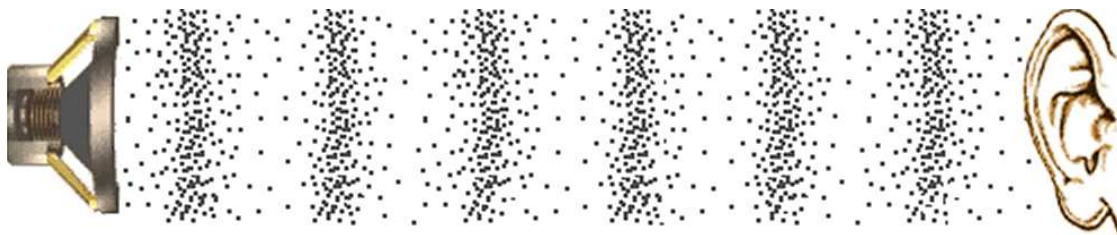
V porovnání s barometrickým tlakem, který má hodnotu $p_b = 1 \times 10^5$ Pa, je samotný akustický tlak zaznamenanelný lidským sluchem jen velmi malý. Osciluje však kolem hodnoty barometrického tlaku a tím dochází ke zhuštění či zředění prostředí viz obrázek č. 1. Ve frekvenci 1000 Hz nabývá hodnot od $p_{as} = 10^{-5}$ Pa, což je práh slyšitelnosti, neboli nejtišší zaznamenanelný zvuk lidským sluchem, až do hodnoty $p_{ab} = 10^2$ Pa, což je práh bolestivosti, neboli hlasitost zvuku, která již začíná být pro lidský sluch bolestivá a její další zvyšování jej může poškodit. Akustický tlak je skalární veličina a při měření a operacích s ní se uvádí jeho efektivní hodnota. Pro harmonický signál je efektivní hodnota akustického tlaku definována jako:

$$p_{ef} = \frac{p_0}{\sqrt{2}} [\text{Pa}] \quad (1)$$

p_{ef}efektivní hodnota akustického tlaku

p_0amplituda akustického tlaku

Tato veličina sice není nejvýhodnější, zato je nejsnadněji změřitelná a bývá základem pro odvození ostatních akustických veličin, jako je například akustická intenzita I [Wm^{-2}], či akustický výkon W [W]. ^{[1][2][3][4]}



Obr. č. 1 ^[A]

1.1.2 Weberův - Fechnerův zákon

Tento zákon popisuje vnímání zvuku lidským sluchem. Doslova říká: „Intenzita počítka je úměrná logaritmu podnětu“. V praxi to znamená, že v nízkých frekvencích vnímáme stejný přírůstek hlasitosti zvuku jinak, než ve vyšších frekvencích. Bude li

se tedy reálná hodnota akustického tlaku zvyšovat lineárně, pak pocitová hodnota bude stoupat logaritmičtí. Tento fakt popisuje tento vztah:

$$dH = k \cdot \frac{dP}{P} \quad (2)$$

který lze upravit do výsledné podoby:

$$H = k \cdot \ln \frac{P}{P_0} \quad (3)$$

H...hladina sledované veličiny

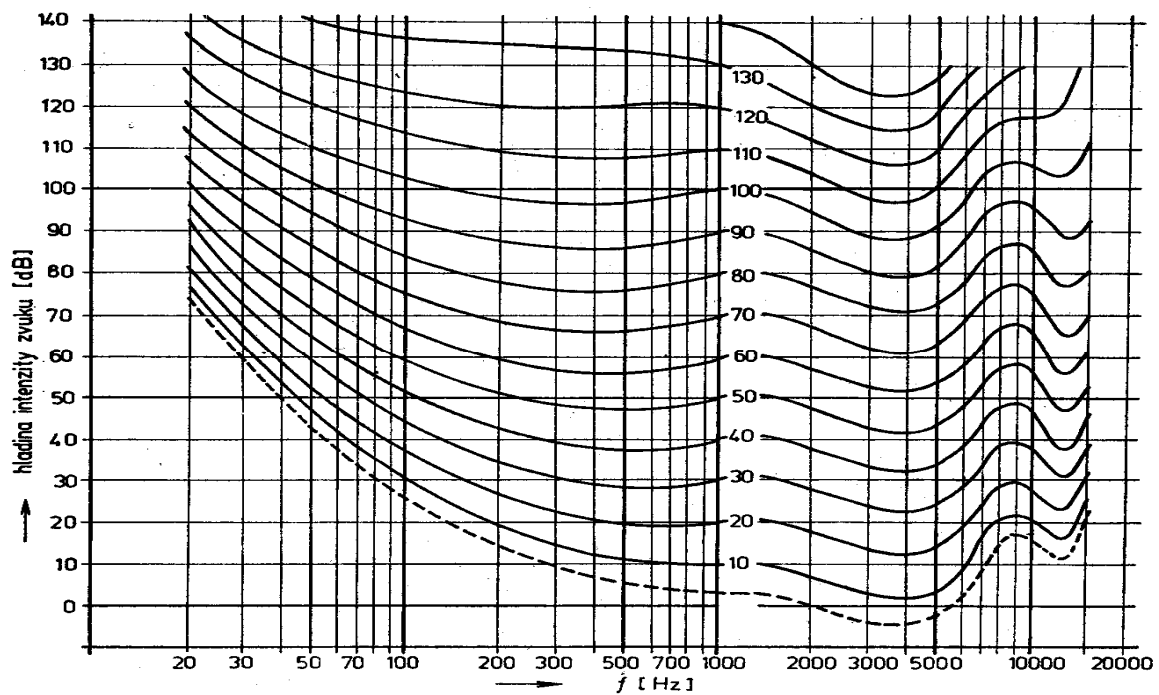
P...hodnota měřená

P₀...hodnota vztažná

k...libovolná konstanta

Obecné vyjádření vztahu (3) je potom:

$$H = \log \frac{P}{P_0} \quad (4)$$



Obr. č. 2 ^[B]

Vnímání zvuku a křivky hladin stejné hlasitosti jsou na obrázku č. 2. Dle průběhu křivek je vidět, že lidský sluch je nejcitlivější ve frekvenci od 3000 Hz do 5000 Hz. Tedy, že v tomto rozmezí frekvencí vnímáme zvuk intenzivněji i při nižší hlasitosti. ^[1]
^[4] ^[5] ^[6]

1.1.3 Hladina akustického tlaku

Jelikož lidské vnímání zvuku není lineární, ale řídí se podle Weberova - Fechnerova zákona, zavádí se termín *hladina akustického tlaku*. Je vyjádřena v logaritmických souřadnicích a popisuje ji vztah:

$$L_p = 10 \log \frac{p_a^2}{p_{a0}^2} \text{ [dB]} \quad (5)$$

L_phladina akustického tlaku

p_anaměřená hodnota akustického tlaku

p_{a0}vztažná hodnota akustického tlaku ($p_0 = 10^{-5}$ Pa)

Jelikož hodnoty hladin v akustice (hladina akustického tlaku, hladina akustické intenzity aj.) nabývají o řád nižších hodnot, používá se jednotka dB - decibell.

1.2 Akustická intenzita a hladina akustické intenzity

1.2.1 Akustická intenzita

Akustickou intenzitu definujeme jako energii, která prochází jednotkovou plochou kolmou ke směru, kterým tato energie proudí. Na rozdíl od akustického tlaku je akustická intenzita vektorovou veličinou. Velkou nevýhodou akustické intenzity je, že se nedá přímo změřit, ačkoliv existují měřicí přístroje, které "měří" akustickou intenzitu. Ve skutečnosti však měří jen akustickou rychlost a akustický tlak a intenzitu dopočítávají. Více v kapitole *Měření pomocí sondy intenzity*. Pokud tedy chceme určit akustickou intenzitu, musíme znát též akustickou rychlost u , což je rychlost, se kterou částice pružného prostředí kmitají kolem své rovnovážné polohy. Intenzitu potom můžeme vypočítat dle vztahu: ^[1] ^[2] ^[4]

$$\vec{I} = p_a \cdot \vec{u}_a \text{ [Wm}^{-2}\text{]} \quad (6)$$

Iakustická intenzita

p_aakustický tlak

u_aakustická rychlost

1.2.2 Hladina akustické intenzity

Ze stejných důvodů, jako hladina akustického tlaku se zavádí i hladina akustické intenzity. Je vyjádřena vztahem:

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \text{ [dB]} \quad (7)$$

L_I ... hladina akustické intenzity

I ... "naměřená" hodnota akustické intenzity

I_0 ... vztažná hodnota akustické intenzity ($I_0 = 10^{-12} \text{ Wm}^{-2}$)

Hladina akustické intenzity je obecně chápána jako hlasitost zvuku. Jak je patrné ze vzorce (4), je měřítko hladiny akustické intenzity logaritmické. Z hlediska citlivosti lidského sluchu je práh slyšitelnosti stanoven pro frekvenci 1000 Hz $L_I = 0 \text{ dB}$ a práh bolestivosti začíná na hranici $L_I = 120 \text{ dB}$, což odpovídá mezním hodnotám akustického tlaku p_{as} a p_{ab} uvedených v kapitole 1.1.1. S měnící se frekvencí se však tyto hodnoty mění dle křivek na obrázku č. 2 umístěném v kapitole 1.1.2. Například ve frekvenci 100 Hz je hladina prahu slyšitelnosti $L_{i100} = 25 \text{ dB}$ a naopak při frekvenci 4000 Hz, kdy je lidský sluch nejcitlivější je hladina bolestivosti již při $L_{i4000} = 110 \text{ dB}$.^[1]
[4] [6] [7]

1.3 Rozdíl mezi zvukem a hlukem

Zvuk je mechanické vlnění pružného prostředí (vzduchu) ve frekvenčním rozsahu 16 - 20 000 Hz, neboli rozsah frekvencí zaznamenaný lidským sluchem. Jak bylo popsáno v kapitole 1.1.1, jedná se o výchylky od atmosférického tlaku, tedy "zředění" a "zhuštění" prostředí, které k nám směřují od zdroje. Tyto tlakové změny rozechvějí membránu (bubínek) ve sluchovém aparátu člověka, která dále mění tlakové změny na vibrace a lidský mozek takto může zaznamenávat zvuk. S přibývajícím věkem se však schopnost zaznamenávání zvuku, zejména ve vyšších frekvencích, zhoršuje.^[1]

Hluk je typ zvuku, který není lidskému sluchu příjemný. Jedná se zejména o rázy (střelba, prudké údery kladivem, hřmění...), falešné kombinace tónů, zvuky způsobené aerodynamickým prouděním aj. Občas však může být označení zvuku hlukem zcela subjektivní a ne zcela jednoznačné. Často se setkáváme s termínem *měření hluku*. Je to proto, že je častěji snaha snížit hladinu hluku, tedy pro lidi tu

nepříjemnou část zvuku. Jelikož je tedy hluk pouze jakousi podmnožinou zvuku, budu používat častěji termín *měření zvuku* či *zvukoměr* apod. ^[1]

1.4 Měření zvuku

K měření zvuku můžeme přistupovat z mnoha pohledů. V této diplomové práci se budu zabývat především měřením technickým. Jak jsem již uvedl, zvuk je mechanické vlnění, které se šíří prostředím. Dochází k tlakovým změnám neboli kmitání okolo barometrického tlaku. Princip samotného měření spočívá v zachycování těchto tlakových změn měřicím zařízením. Jedním ze základních měřicích zařízení je zvukoměr. Nejčastěji je osazen kondenzátorovým mikrofonem, nebo mikrofonem s piezoelektrickým snímačem. Před každým měřením je potřeba nejprve provést kalibraci mikrofonu. To se provádí pomocí kalibrátoru. Mikrofon se vloží do kalibrátoru, který na něj působí zvukem o známých parametrech. Naměřené hodnoty se uloží jako etalon a mikrofon je tak připraven k měření. Příklad kalibrátoru od firmy Brüel&Kjaer je na obrázku č. 2a. S kalibrovaným mikrofonem lze již provádět měření. Měření se provádí buď venku na otevřeném prostranství, nebo v laboratorních podmínkách, tedy v uzavřených prostorách. Hladina akustického tlaku se dá měřit buď bodově v předem určených bodech a vzdálenostech od zdroje, nebo v rovinách pomocí předem vytvořených sítí. ^{[1][4]}



Obr. č. 2a ^[C]



Obr. č. 2b ^[D]

2 Měření pomocí sondy intenzity

2.1 Popis sondy intenzity

Pokud chceme měřit kromě hladiny akustického tlaku také hladinu akustické intenzity, nestačí nám k měření pouhý zvukoměr, ale je potřeba použít sofistikovanější měřicí zařízení, například sondu intenzity. Ukázka takové sondy je na obrázku č. 3 od firmy Brüel&Kjaer. Sonda intenzity kromě akustického tlaku dokáže měřit též akustickou rychlost u_a , což je potřebná veličina k výpočtu akustické intenzity, respektive hladiny akustické intenzity. Z tohoto důvodu jsou v sondě umístěny dva velmi kvalitní kondenzátorové mikrofony čelem k sobě (face to face). Další možné umístění mikrofonů může být pak vedle sebe, zády k sobě a za sebou (tandemově). Nejčastější uspořádání je však čelem k sobě právě tak, jak je na sondě od firmy Brüel&Kjaer. Mezi mikrofony je umístěna rozpěrka, jejíž délka se volí podle frekvenčního pásma, ve kterém chceme měřit. Jelikož při odvozování vztahu pro výpočet akustické intenzity muselo dojít ke zjednodušení, není možné obsáhnout celé slyšitelné pásmo (16 Hz - 20 kHz) jedinou rozpěrkou. Rozpěrka má tedy různé referenční délky. Pro vysoké frekvence, tedy zvukové vlnění s kratší vlnovou délkou λ , se používají kratší rozpěrky, pro nízké frekvence se naopak použije rozpěrka delší. Omezení však není pouze shora. Spodní hranici určuje fázová chyba, která se určuje při kalibraci přístroje a vychází z technických parametrů. Příklad rozpěrek tří různých velikostí je na obrázku č. 4. Kromě intenzity můžeme pomocí sondy lokalizovat též zdroj zvuku. Naměřené hodnoty akustické intenzity můžeme použít k dalšímu zpracování, například vytváření akustických map, respektive zvukových polí, stanovení šíření akustické energie či k určení akustického výkonu W . ^{[1] [4] [8]}



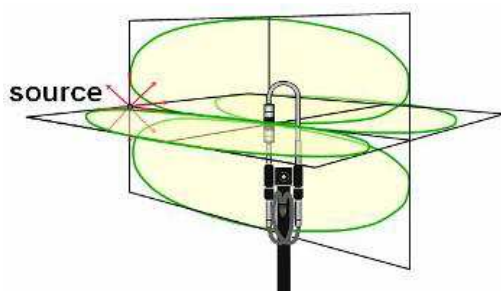
Obr. č. 3 ^[E]



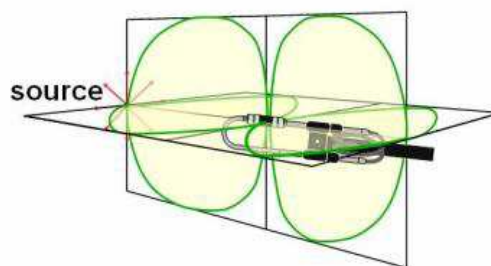
Obr. č. 4 ^[F]

2.2 Měření sondou intenzity

Každé měřicí zařízení musí být před měřením kalibrováno. Stejně jako je tomu u zvukoměru, i sondu intenzity je nutné před každým měřením kalibrovat. Kalibraci však nelze provést jednoduše vyjmutím mikrofonů a kalibrovat každý zvlášť, ale je potřeba provést kalibraci obou mikrofonů najednou a to v přesné pozici tak, jak jsou na sondě intenzity umístěny, tedy včetně pro dané měření zvolené rozpěrky. Ukázka kalibrace sondy a kalibračního přístroje je na obrázku č. 2b. Samotné měření by mělo probíhat pouze ve volném zvukovém poli. Volné zvukové pole je takové, kde se může zvuk od zdroje šířit volně v kulových vlnoplochách. Například při měření akustické intenzity na motoru vozidla je vhodné motor měřit mimo vozidlo na motorové brzdě v dostatečně velké místnosti laboratoře. Při měření je nutné dodržet správnou pozici sondy, respektive polohu mikrofonů. Pokud chceme použít sondu k lokalizaci zdroje, je její pozice při měření jiná, než při měření akustické intenzity. Při lokalizaci se sonda intenzity pozicuje tak, jak je na obrázku č. 5a, tedy aby osa mikrofonů byla kolmo na odhadovaný směr šíření zvuku od zdroje. Sondou potom pohybujeme ve směru osy mikrofonů. Při přibližování sondou ke zdroji bude sonda vyhodnocovat zachycovaný signál akustické intenzity jako kladný a pokud se budeme od zdroje vzdalovat, bude signál akustické intenzity záporný. Právě v místě zdroje potom bude signál roven nule. Pokud chceme použít sondu na měření intenzity, umístíme jí do pozice vyobrazené na obrázku č. 5b. Osa mikrofonů by tedy měla mířit ke zdroji akustického signálu. V této pozici je citlivost sondy nejvyšší. ^{[9][10]}



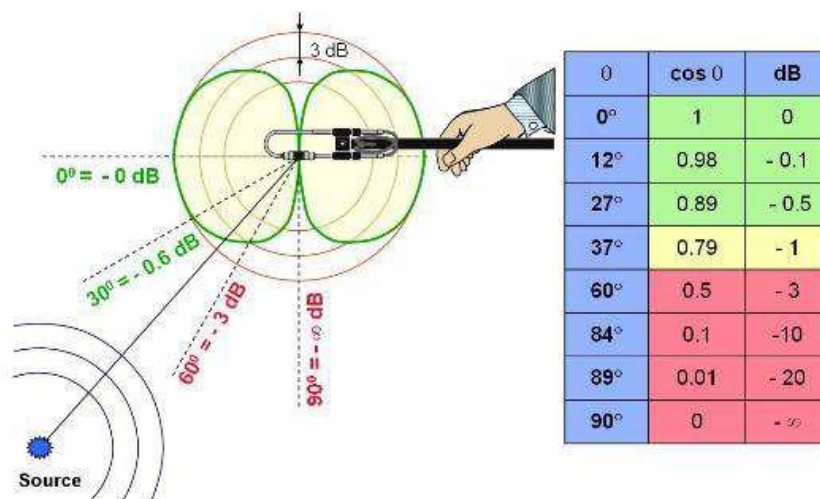
Obr. č. 5a ^[D]



Obr. č. 5b ^[D]

Bohužel s výhodami a všestranností tohoto přístroje souvisí i jisté komplikace, konkrétněji spíše fakta, která bychom si při měření a následném vyhodnocování měli

uvědomit. Jedním takovým faktem je právě schopnost sondy, kromě měření akustické intenzity, též schopnost lokalizace bodového zdroje. Pokud sondu použijeme osou mikrofónů kolmo ke zdroji v pozici tak, jak je popsáno výše, je možné lokalizovat zdroj. Pokud však měříme intenzitu skupiny zdrojů, mohou se okolní zdroje navzájem ovlivňovat. Pokud tedy budeme například měřit v jednom z mnoha měřících bodů nad motorem, jistě nám výsledky měření ovlivní i akustický signál vycházející z okolních zdrojů. Pro minimalizaci vlivu okolního prostředí je nutné měřit co nejbližší danému zdroji. Signál z okolních zdrojů tak bude na sondu dopadat pod větším úhlem, s menší intenzitou a nebude mít na výsledky měření daného zdroje takový vliv. Na obrázku č. 6 je potom znázorněn vliv citlivosti sondy na velikost úhlu měřeného signálu. Při měření akustické intenzity sondou intenzity v prostoru musíme brát v potaz, že sonda je schopna zachycovat i zvuk odražený. Proto se při každém měření vyhodnocuje kromě akustické intenzity též akustický tlak. Výsledky se poté porovnávají a tím se dají eliminovat zkreslené hodnoty odraženým zvukovým signálem. Mělo by přibližně platit $L_I = L_P$.^{[1][4][10][12]}



Obr. č. 6 ^[D]

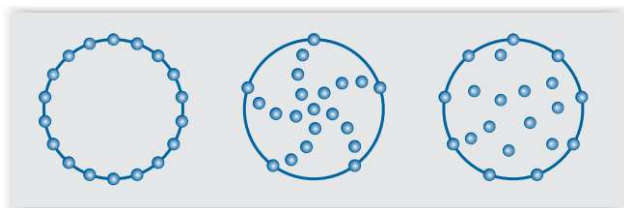
V předchozí kapitole jsem uvedl, že mezi mikrofony se vkládá rozpěrka různých délek podle toho, v jakém frekvenčním rozsahu bychom měření chtěli provést. Během měření sondou však proběhne automaticky měření ve frekvencích 25; 31,5; 40; 50; 63; 80; 100; 125; 160; 200; 250; 315; 400; 500; 630; 800; 1000; 1250; 1600; 2000; 2500; 3150; 4000; 5000; 6300; 8000; 10 000; 12 500 a 16 000 Hz

a až při vyhodnocování výsledků dochází k eliminaci měření ve frekvencích, které nejsou ve vybraném rozsahu dané rozpěrky. ^[10]

3 Metody mapování akustické emise

3.1 Beamforming

Tato metoda se nazývá též metoda prostorové filtrace a používá se jak k mapování a lokalizaci zdrojů hluku, které jsou vzdálenější, a není například možné se k nim dostat blíže, tak k bližšímu mapování skupiny bodových zdrojů (planární beamforming), či k prostorovému mapování prostředí (sférický beamforming). Jednoznačná výhoda je, rychlost samotného měření. Podmínkou pro tuto metodu je, aby vlny přicházející od zdroje již neměly tvar kulový, ale rovinný. Tato metoda má však mnoho komplikací. Jednou z nich může být přenos, ukládání a vizualizace velkého množství dat v reálném čase, což samo o sobě klade velké nároky na výkon vyhodnocovací techniky. Dalším problémem může být přenášení a umístování většího množství mikrofónů. Mikrofóny bývají většinou seskupeny do polí různých tvarů. Příklady těchto polí jsou na obrázku č. 7a a 7b. ^{[12][13]}



Obr. č. 7a ^[G]



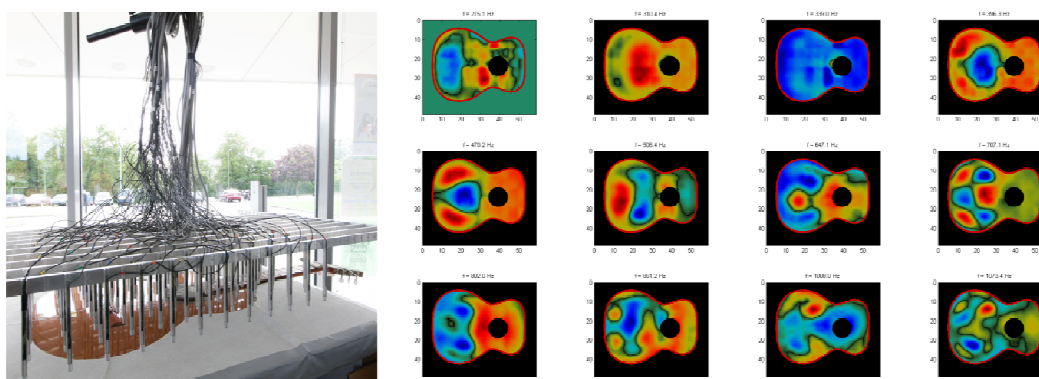
Obr. č. 7b ^[G]

Na rozdíl od akustické holografie, která je obsahem následující kapitoly, mají pole mikrofónů vždy kruhový či půlkruhový tvar. Liší se pouze uspořádáním mikrofónů vně kruhu. Speciální uspořádání mikrofónů pro měření například hladiny akustické intenzity uvnitř automobilu je uspořádání kulové. Nejvýhodnější, ale též zřejmě nejnákladnější formou uspořádání je uspořádání náhodné. Díky většímu množství mikrofónů se dosáhne většího dynamického rozsahu, který spolu s prostorovým rozlišením ovlivňuje kvalitu a přesnost měření. Prostorové rozlišení nám udává, jak

blízko k sobě mohou dva zdroje akustického signálu být, abychom je byli ještě schopni od sebe rozlišit. Klíčovými parametry u beamformingu jsou vzdálenost měřících mikrofonů od zdroje a především mikrofonového pole. Dynamický rozsah spíše vyjadřuje kvalitu samotného měřeného akustického signálu, respektive schopnost rozlišit měřený zvuk od zvuku okolí. Dynamický rozsah je závislý na počtu a citlivosti mikrofonů, na výkonnosti hardwaru a na kvalitě kabelů. Právě počet kvalitních mikrofonů bývá limitující pro přesnější měření, jelikož jejich cena je velmi vysoká. Poslední komplikací je problematické kalibrování. Při větším počtu mikrofonů by byla kalibrace měřících polí zdlouhavá a nákladná. Většinou se nekalibruje každý mikrofon zvlášť, nýbrž celé pole najednou. Při kalibraci se především využívá faktu, že není až tak důležitá přesnost každého samostatného mikrofonu, jako spíše schopnost celého pole správně lokalizovat polohu zdroje. Samotná kalibrace tohoto zařízení je však velmi náročná [12][13]

3.2 Akustická holografie v blízkém poli (NAH)

Pomocí metody akustické holografie (NAH - Nearfield Acoustic Holography) lze měřit, stejně jako při měření sondou intenzity a metodou beamforming, akustický tlak a akustickou intenzitu. Metoda je zdánlivě podobná beamformingu, zásadní rozdíl je však ve vzdálenosti od měřeného objektu. Akustická holografie funguje na principu snímání evanescentních vln, což jsou vlny, které se vyskytují pouze v těsné blízkosti povrchu akustického zdroje, a jejich intenzita s rostoucí vzdáleností exponenciálně klesá. Příklad takového měření, kde je zapotřebí být co nejbližší



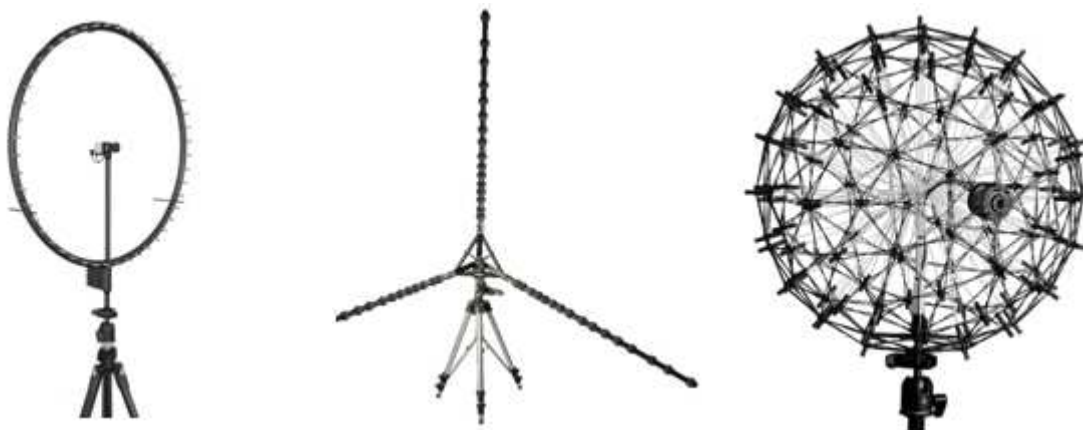
Obr. č. 8 [H]

měřenému objektu je na obrázku č. 8 kde je vidět jak probíhá měření ozvučnice akustické kytary. Vlevo je vidět, jak jsou mikrofony k měřenému objektu blízko a vpravo potom výsledky měření v různých frekvencích. Výsledky z měření metodou

akustické holografie NAH se nejčastěji zpracovávají ve formě akustických výkonů, či hladin akustických intenzit a ty se dále prezentují ve formě akustických map. Při měření se stejně jako u beamformingu používají mikrofonová pole, která mají tvar čtverce, či obdélníku. Velikostně se přizpůsobují měřenému objektu.^[14]

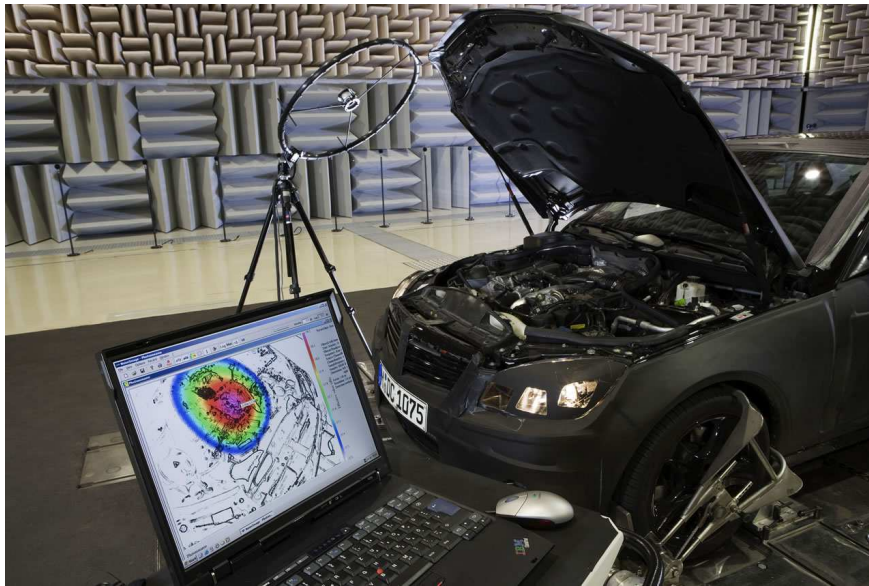
3.3 Akustická kamera

Pomocí akustické kamery je možné, řečeno s nadsázkou, "vidět" zvuk. Jedná se o kombinaci měřící metody beamforming a HD kamery, tedy kamery s vysokým rozlišením. Mikrofonové pole, které se používá u metody beamforming je vybaveno kamerou, která se umísťuje na střed pole. Pole však nemusí být jen kruhové, ale může být hvězdicové, či kulové (sférické) jako na obrázku č. 9a. Celý přístroj funguje velice podobně jako termokamera. Měřený objekt se zobrazuje na monitoru v



Obr. č. 9a ^[1]

reálném čase a barevně jsou vyznačena místa s detekcí akustického signálu. Barvy se mění dle zadaného spektra na stupnici hodnot. Nejčastěji se zobrazuje hladina akustické intenzity v decibelech. Díky akustické kameře se dá okamžitě odhalit dominantní či významný zdroj zvuku. Má široké uplatnění například v automobilovém průmyslu (měření hluku v interiéru) či ve stavebnictví (akusticky špatně odhlučněná místa domů či bytů) a v dalších odvětvích. Největší nevýhodou akustické kamery je její relativně vysoká pořizovací cena a vysoké nároky na výkon vyhodnocovacího hardwaru. Příklad měření akustickou kamerou a zjišťování největších zdrojů akustické emise v laboratořích automobilky je na obrázku č. 9b ^[15]



Obr. č. 9b [N]

4 Experimentální měření mapováním akustické intenzity

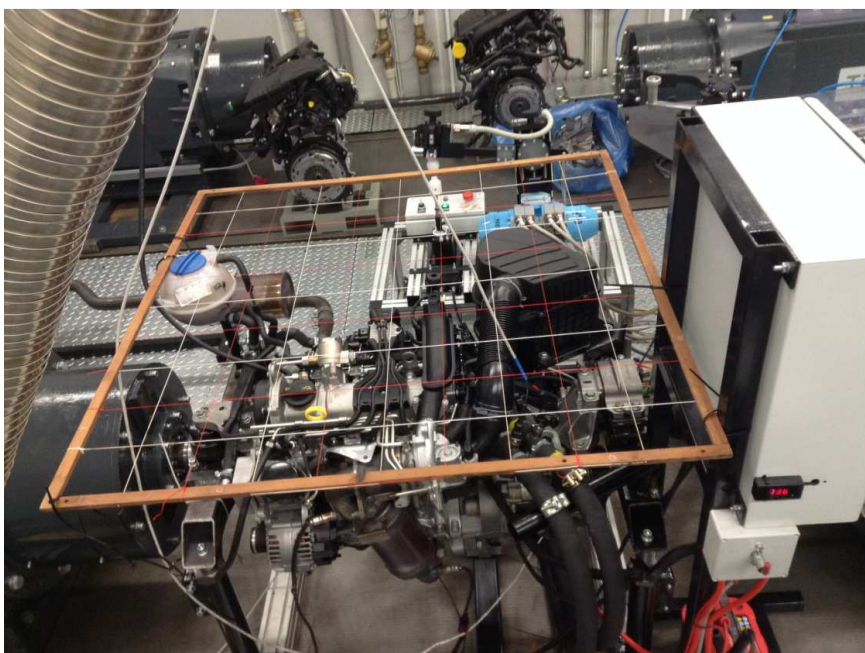
4.1 Popis měřeného objektu

Měření probíhalo na čtyřdobém čtyřválcovém zážehovém přeplňovaném motoru Škoda, respektive Volkswagen o zdvihovém objemu $V_z = 1,2 \text{ dm}^3$ s čtyřventilovou technikou na válec, přímým vstřikováním paliva a manuální pětistupňovou převodovkou. Přeplňování bylo realizováno formou turbodmychadla s mezichladičem stlačeného vzduchu, který byl chlazen chladicí kapalinou. Motor byl napojen na motorovou brzdu typu powertrain, tzn. že tok výkonu šel z motoru nejdříve přes převodovku a diferenciál na poloosy, z nichž každá byla brzděna stejně, ale nezávisle. Provozní otáčky motoru byly konstantní a to $n = 2500 \text{ min}^{-1}$, zatěžovací kroutící moment na motoru byl nastaven na hodnotu $M_t = 64,6 \text{ Nm}$ a byl zařazen třetí rychlostní stupeň. Škrťící klapka byla otevřena na $\alpha = 33\%$. Provozní podmínky byly nastaveny na průměrnou hodnotu. Motor nebyl nijak přetěžován, ale zároveň bylo nastaveno přiměřené zatížení, aby nebyl v chodu "na volno", tedy bez zatížení. Vyšší zatížení motoru nebylo výhodné, jelikož se zvýšeným zatížením roste též teplota nejen samotného agregátu, ale celé motorové soustavy. Vyšší teplota sálající z motoru by mohla poškodit sondu akustické intenzity. Další problém, který by mohl zvýšením provozního režimu nastat je postupné přehřívání turbodmychadla (při provozu ve vozidle je běžně turbodmychadlo chlazeno kromě chladicí kapaliny též

vzduchem obtékajícím motor). Muselo by se tedy zapnout přídavné chlazení, které je v bezprostřední blízkosti motoru a mohlo by tedy významně ovlivnit kvalitu měření. Prostor okolo motoru byl v rámci možností a těsné blízkosti motoru nezastavěný a nebyly na něm žádné plastové krycí panely, aby bylo možné provést měření bez následného významnějšího ovlivnění odražených akustických vln. Motor byl osazen veškerým příslušenstvím, tak jak je montován do vozidel a nebyly na něm prováděny žádné další speciální úpravy.

4.2 Tvorba a popis sítě

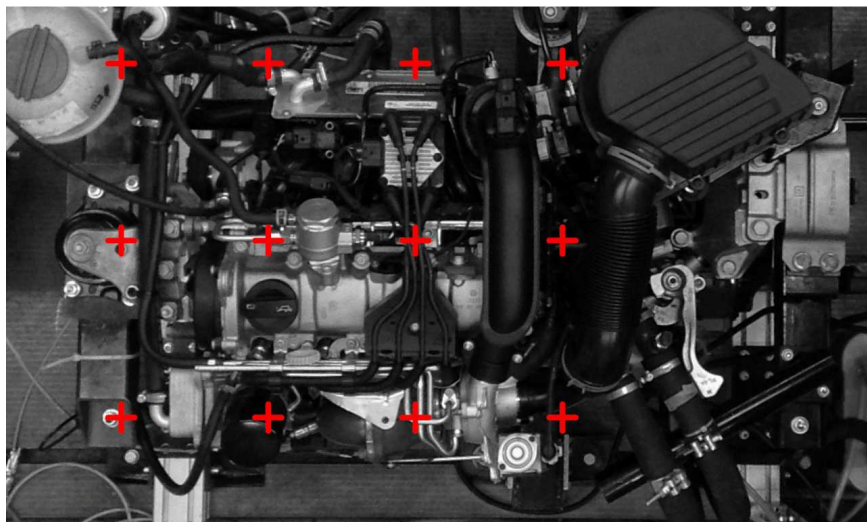
Před začátkem měření bylo potřeba stanovit, ve kterých bodech se bude měřit, respektive přesně určit pozice sondy akustické intenzity. Pro přesnější určování bodů, ve kterých bude měření probíhat, byla vyhotovena měřicí síť. Síť tvořily uzly, které znázorňovali jednotlivé měřicí body, ve kterých bude měření sondou intenzity prováděno. Prakticky se jednalo o dřevěný rám čtvercového tvaru, ve kterém byla vytvořena skutečná síť pomocí lanka napnutého ve stejných vzdálenostech (stejnou roztečí) tak, aby vytvořená síť měla čtvercový charakter. Jednoduše řečeno výsledné segmenty rozdělené sítě měly mít čtvercový tvar. Rám byl poté umístěn nad motor do co nejmenší možné výšky, aby měl měřený signál vždy dominantní intenzitu. Vše výše popsané včetně umístění motoru na měřicím stanovišti powertrain je zobrazeno na obrázku č. 10.



Obr. č. 10

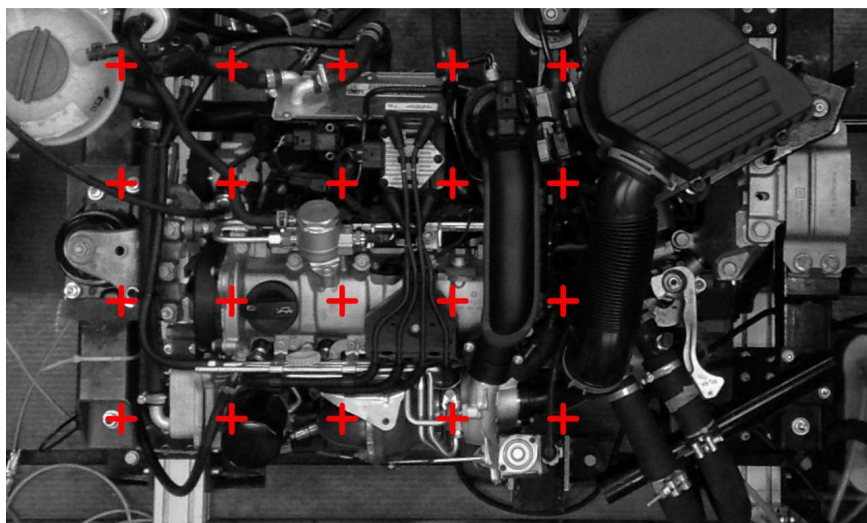
Samotné sítě byly rozvrženy v následujících čtyřech variantách. Jelikož kvalita akustické mapy závisí především na počtu naměřených bodů, lišily se varianty hustotou měřicí sítě.

První variantou je varianta A. Varianta A, neboli řídká síť, která obsahuje relativně malý počet bodů. To mělo značně urychlit dobu potřebnou pro naměření potřebných hodnot. Otázkou bylo, zda bude výsledná kvalita mapy akustické intenzity dostačující. Hustota bodů byla 4x3 viz obrázek č. 11a.



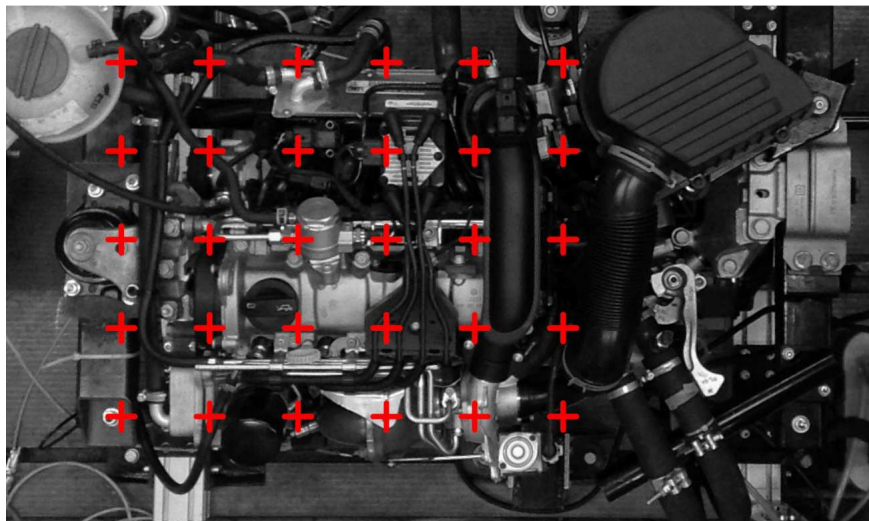
Obr. č. 11a - Varianta A

Druhou variantou je varianta B. Ta má síť s větším počtem měřících bodů. Zhušťováním sítě se očekávalo zkvalitnění akustické mapy a případné odhalení chybových míst v měření na řidší síti. Hustota bodů byla 5x4 viz obrázek č. 11b.



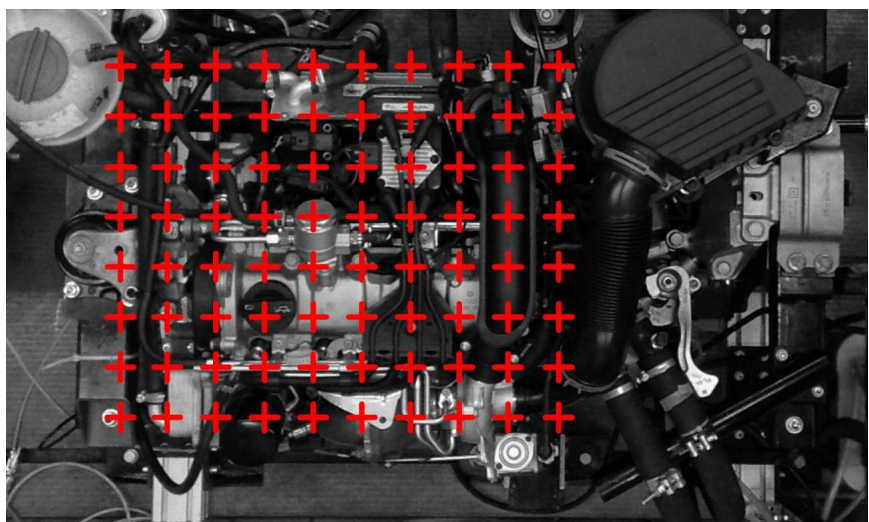
Obr. č. 11b - Varianta B

Třetí variantou byla varianta C, tedy síť hustá, která měla přinést již relativně přesné výsledky a následně vytvořená mapa akustické intenzity by měla být dostatečně kvalitní. Hustota měřících bodů v síti byla 6x5 viz obrázek č. 11c. Zvýšení časové náročnosti oproti první variantě bylo již poměrně znatelné.



Obr. č. 11c - Varianta C

Čtvrtá varianta D měla být opačný extrém oproti variantě A, tedy vysoce hustá měřící síť s velkým počtem měřících bodů. Tato varianta měla být velmi detailní a přesná, cílem bylo odhalit zdroje, které jsou tak blízko sobě, že v ostatních variantách splývají v jeden zdroj. Je však časově nejvíce náročná. Hustota měřících bodů byla 10x8 viz obrázek č. 11d.



Obr. č. 11d - Varianta D

4.3 Popis měření

V kapitole 2.2 jsem již zmiňoval postup při měření sondou akustické intenzity. Tedy i při našem měření byl první bod, hned po zapojení všech potřebných kabelů a instalace sítě, kalibrování mikrofونů. Kalibrace probíhala na obou mikrofonech současně a s vloženou rozpěrkou. Jako první byla mezi mikrofony vložena rozpěrka o délce 50 milimetrů. Tím se tedy zužil rozsah platných výsledků měření na frekvence mezi 31,5 Hz do 1,25 kHz. Měřicí zařízení, přesněji měřicí sonda, stejně jako zbytek měřících komponentů byl od firmy Brüel & Kjaer. Tento konkrétní typ je vybaven dálkovým ovládáním na rukojeti, takže je možné, aby celé měření prováděl jeden člověk. Z důvodu náročnosti a ztížených podmínek mi s měřením pomohl vedoucí diplomové práce. Před samotným měřením byl motor uveden do chodu a po potřebné době nutné k zahřátí a ustálení teplot provozních kapalin se nastavily výchozí hodnoty popsané v kapitole 4.1. Poté se přistoupilo k samotnému měření. V softwarovém programu dodanému k sondě akustické intenzity a který vlastně celé měření řídí, se nastavila předem zvolená síť pro dané měření a po najetí sondy na první bod v síti se měření spustilo. Měření se po určitém čase potřebném pro sběr dat ve všech frekvencích uvedených v kapitole 2.2 automaticky zastavilo a program v zadané síti sám ukázal, jaký bude následující měřený bod. Tímto způsobem se naměřila celá síť a poté se naměřená data uložila. Hodnoty získané při měření, akustická intenzita a akustický tlak, se dají zpracovat přímo v programu od firmy Brüel & Kjaer, který automaticky vytvoří akustické mapy a převede akustickou intenzitu na hladinu akustické intenzity anebo se dají naměřená data zpracovávat jinak, či v jiném programu, dle potřeby. Já jsem pro zpracování dat využil program Microsoft Excel a grafy vytvořil v programu Octave, který je velmi podobný programu Matlab. Výhodou je, že program Octave od společnosti GNU je freeware, neboli volně dostupný. V průběhu celého měření bylo potřeba sledovat hodnoty teplot chladicí kapaliny a motorového oleje, aby bez přídavného chlazení nedošlo k poškození motoru, či přehřátí sondy, která je, jak jsem se zmínil v kapitole 2.1, osazena velmi jemnými a citlivými mikrofony. Naštěstí se námi zvolené provozní parametry osvědčili jako přiměřené a ke spuštění přídavného chlazení nebyl důvod.

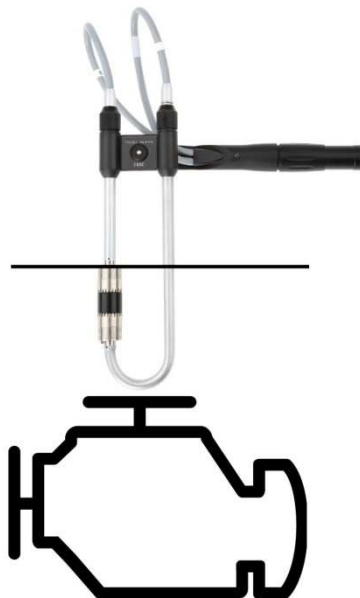
5 Měření s možným vlivem prostředí

5.1 Tvorba a popis sítě

Další z měření sondou akustické intenzity bylo provedeno ve třech různých výškových úrovních nad motorem. Pro toto měření byla opět použita měřicí síť z předchozího experimentu. Konkrétně byla využita třetí varianta, varianta C, tedy síť s hustotou 6x5 bodů, která by měla být z hlediska počtu měřících bodů a tedy následné kvality mapy akustické intenzity dostačující.

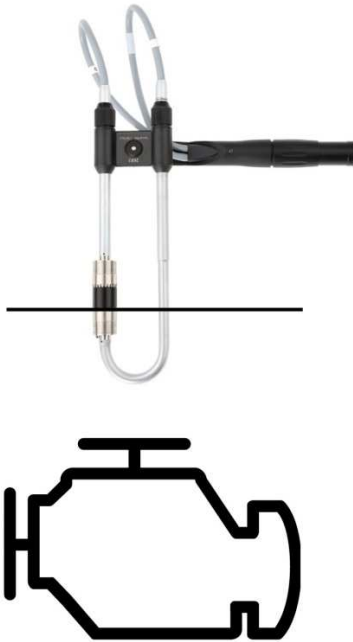
5.2 Popis měření

Sonda je velice všestranná a dá se s ní měřit ať už samotná akustická intenzita, či akustický tlak, tak i další parametry, jak je již zmíněno v kapitole 2.1. Celé měření pak probíhalo následovně. Nejprve se určily tři úrovně měření - nízká, střední a vysoká. V každé úrovni se sonda intenzity nacházela v jiné vzdálenosti od motoru. Poté se přistoupilo k samotnému měření. V první úrovni, tedy té, kde byla sonda jen těsně nad motorem, bylo zapotřebí velké opatrnosti, aby se sonda nepoškodila teplem od motoru a turbodmychadla.

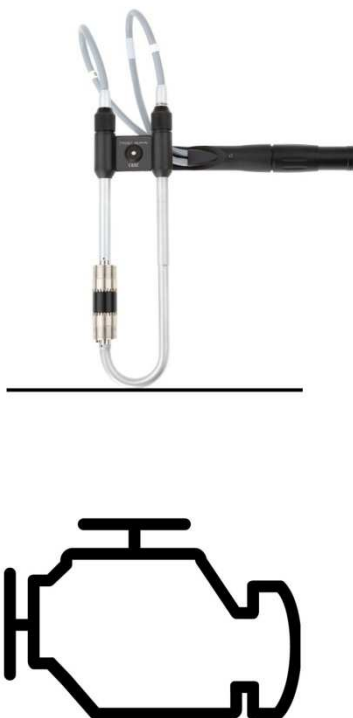


Obr. č. 11a

Na obrázku číslo 11a je zobrazena poloha sondy právě v nejmenší technicky možné vzdálenosti od motoru. Výsledky tohoto měření by měly být nejméně ovlivněny okolními vlivy a odraženým vlněním, jelikož měřený signál by měl být ve srovnání se signálem odraženým, či signálem z jiného zdroje, který nebyl předmětem měření, dominantní. A to zejména proto, že sonda bude jako nejsilnější signál zachycovat ten, který do ní bude vstupovat právě rovnoběžně s osou mikrofónů. Jelikož motor není shora ideální rovinná plocha, ale je vcelku členitý, byla snaha provést měření v jedné rovině. Jako



Obr. č. 11b



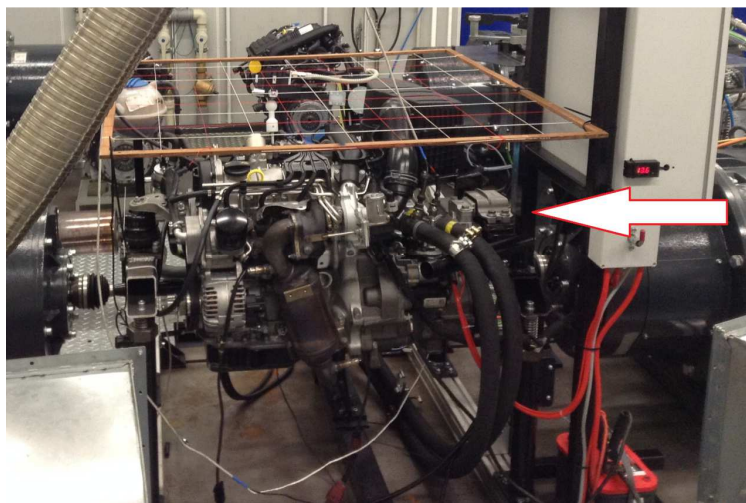
Obr. č. 11c

nejnižší možný bod se tedy zvolila nejnižší možná výška ze všech měřených bodů sítě 6x5 a v této rovině se poté odehrálo celé následující měření. Střední úroveň sondy intenzity je znázorněna na obrázku číslo 11b. Aby se docílilo opět měření v jedné rovině, byla snaha udržet sondu akustické intenzity ve výšce, kde se hranice mezi spodním mikrofonem a rozpěrkou pohybovala ve stejné výšce jako napnuté lanko měřicí sítě. Na obrázku číslo 11c je potom znázorněna vysoká úroveň nad motorem. Sonda se během měření pohybovala v rovině dotyku měřicí sítě a nejnižšího bodu sondy. Rozdělením měření do tří úrovní bylo předpokládáno, že se na akustických mapách budou postupně měnit oblasti maxim a minim hladiny akustické intenzity podle toho, zdali je daný měřicí bod nad zdrojem akustického signálu přímo, anebo je signál v daném bodě akorát kombinací vedlejších zdrojů a tím tedy dochází k ovlivnění měření prostředím.

6 Experimentální měření mapováním akustické intenzity s využitím referenčního snímače

6.1 Popis měřeného objektu a referenčního snímače

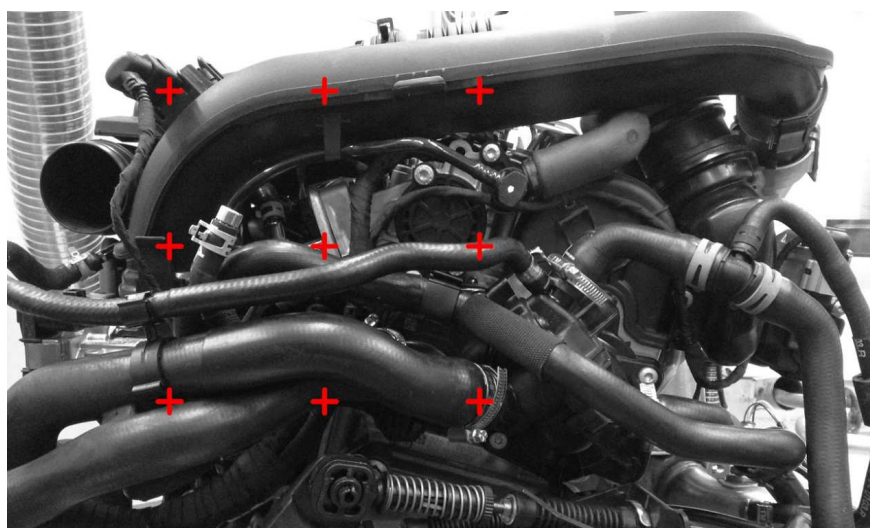
Při tomto experimentu byl jako měřený objekt opět zvolen čtyřdobý čtyřválcový zážehový přeplňovaný motor Volkswagen o zdvihovém objemu $V_z = 1,2 \text{ dm}^3$, stejně jako při předchozím měření. Konkrétně byla na něm snaha zaměřit se na vysokotlaké palivové čerpadlo, umístěné na pravém boku motoru, tj. strana převodovky (pro lepší názornost viz obrázek č. 12). Provozní podmínky se ovšem od předchozího experimentu lišily. Otáčky motoru sice byly nastaveny opět na stejnou hodnotu $n = 2500 \text{ min}^{-2}$, avšak zatížení motoru muselo být sníženo na hodnotu kroutícího momentu $M_t = 40 \text{ Nm}$. Hlavním důvodem snížení zatížení byla s rostoucím zatížením rostoucí teplota vysokotlakého palivového čerpadla, která se musela udržet v mezích s ohledem na maximální pracovní teplotu čidla vibrací, které na něm bylo připevněno. V převodovce byl stejně jako v předchozím případě zařazen třetí rychlostní stupeň. Vysokotlaké palivové čerpadlo stlačuje palivo až na hodnotu tlaku 12 MPa. Stlačení paliva vykonává píst, jehož zdvih zajišťuje vačka, respektive dvouvačka, kterou pohání vývod, respektive prodloužení ze sací vačkové hřídele. Stlačené palivo jde do tlakové větve vedoucí ke vstřikovačům. Množství stlačeného paliva kontroluje ventil, řízený přes elektromagnetickou cívku řídicí jednotkou. Pokud je v tlakové větvi přebytek paliva, palivo se v čerpadle nestlačuje, ale vrací se nízkotlakou větví zpět. Právě vzhledem k výše uvedeným dějům bylo zvoleno vysokotlaké palivové čerpadlo jako možný dominantní zdroj akustického signálu. ^[16]



Obr. č. 12

6.2 Tvorba sítě a umístění čidla vibrací

Jak bylo uvedeno v předchozí kapitole, je čerpadlo umístěno na pravém boku motoru. Měření tedy muselo probíhat v jiné rovině, než v předchozím případě a musela se tedy vyhotovit i jiná síť. Vzhledem k prostoru v této části a velikosti palivového čerpadla byla zvolena síť o velikosti 3x3 měřících bodů (varianta E) a byla vycentrována právě na palivové čerpadlo. Tedy tak, že prostřední bod čtverce ležel přímo na čerpadle, viz obrázek č. 13. Síť byla pro měření s čidlem vibrací (selektivní měření) i pro měření bez čidla použita stejná.



Obr. č. 13 - Varianta E

Pro selektivní měření bylo zvoleno čidlo vibrací typ 4507 B001 od firmy Brüel&Kjaer. Bylo upevněno přímo na skříň palivového čerpadla a to připevněním na adaptér. Ten byl na povrch skříně čerpadla přilepen lepidlem. Tato metoda připevnění byla vzhledem k povaze měření a eliminaci možných škod vzniklých měřením nejvhodnější. Umístění čidla viz obrázek č. 14.



Obr. č. 14

6.3 Měření bez referenčního snímače

Stejně jako před každým novým měřením, tak i nyní bylo zapotřebí provést nejdříve kalibraci. Kalibrace přístroje byla provedena ještě před samotným spuštěním motoru a uvedením do provozní teploty. Nejprve byla opět do programu zadána zvolená síť a poté se v jednotlivých měřících bodech provádělo měření dle pokynů programu. Pokud se měření v některém bodě z nějakého důvodu nezdařilo, program označil měření za neplatné a muselo se provést v daném bodě znovu. Jako první bylo provedeno měření s rozpěrkou o velikosti 12 mm a poté s rozpěrkou o velikosti 50 mm. Sonda intenzity tentokrát nebyla v pozici svislé, jako v předchozím případě, ale vodorovné tak, aby směřovala ke zdroji měřených akustických signálů, přesně dle pravidel měření akustické intenzity (přesněji akustického tlaku a akustické rychlosti) rozebrané v kapitole 2.2.

6.4 Měření s referenčním snímačem

Měření za pomoci čidla vibrací, neboli měření selektivní intenzity probíhalo podobně jako měření pouze se sondou akustické intenzity. Před samotným začátkem měření musel být pouze zapojen snímač a musel být zapnut aktuální měřící program, který do měřených hodnot započítával obě naměřené hodnoty. Softwarový program, stejně jako snímač byl opět od firmy Brüel & Kjaer. Rozdíl mezi předchozím a stávajícím měřením byl v použití vibračního čidla, přesněji akcelerometru, který byl umístěn, jak bylo detailněji popsáno v kapitole 6.2, na

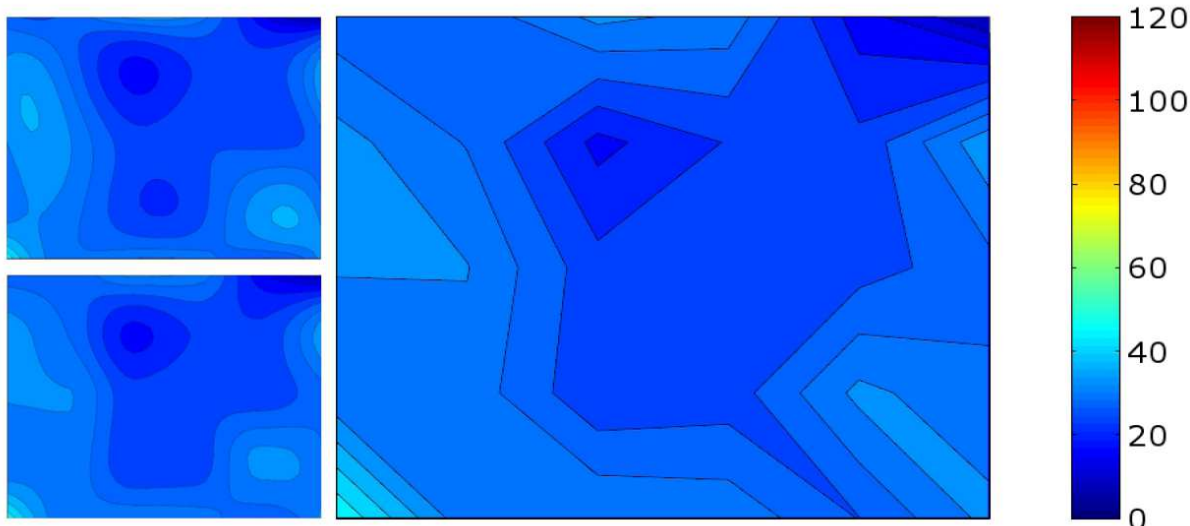
vysokotlakém palivovém čerpadle. Princip a základní myšlenka selektivního měření jsou takové, že se výsledky naměřené sondou a čidlem dávají do vzájemné korelace. Tím by se mělo docílit zesílení měřeného signálu na frekvencích a na konkrétních bodech, které jsou v zájmu měření. Kromě měření intenzity by tedy mělo dojít i k přesnější lokalizaci zdroje a vyhodnocení především toho akustického signálu, který produkuje právě zvolený měřený objekt. Mělo by dojít k odfiltrování okolních signálů a měření by tak mělo být méně zkreslené. ^[17]

7 Vyhodnocení provedeného měření

7.1 Zpracování výsledků a interpolace

Před samotným uvedením výsledků měření bych ještě rád zmínil pár informací ohledně zpracování akustického signálu (akustické intenzity), naměřeného sondou intenzity. Naměřená data jsem dle vzorce (7) uvedeného v kapitole 1.2.2 přepočítal na hodnoty hladin akustické intenzity v programu Microsoft Excel. Výsledné hodnoty jsem potom pomocí programu GNU Octave zpracoval do podoby akustických map. Při tvorbě akustických map v programu Octave jsem hledal nejvhodnější variantu zpracování dat a propojení naměřených bodů tak, aby vznikla spojitá a pokud možno nejvíce realitě odpovídající křivka. Volil jsem z následujících možností.

- Lineární interpolace (lineární spline) - spojitá křivka procházející přímo naměřenými body, není hladká - lomená čára, není zaručena spojitost první derivace
- Kvadratická interpolace (kvadratický spline) - křivka je též spojitá a její části jsou na sebe navzájem navazující části parabol, spojitost je zaručena v první derivaci
- Kubická interpolace (kubický spline) - jedná se opět o spojitou křivku, jejíž části na sebe navazují, každý oblouk mezi dvěma body se interpoluje zvlášť. Je zde zaručena spojitost první i druhé derivace.



Obr. č. 15

Z těchto tří možností jsem vybral metodu kubické interpolace, jelikož nejlépe vypovídá reálně naměřeným hodnotám. Na obrázku č. 15 jsou potom vlevo kvadratická a kubická interpolace a vpravo lineární interpolace. Hlavním důvodem pro výběr kubické interpolace byla větší shoda s naměřenými hodnotami. Při kvadratické interpolaci vznikala falešná místa znázorňující minima či maxima, což je při tvorbě mapy hladin akustické intenzity z reálně naměřených hodnot nežádoucí. [18][19]

7.2 Vyhodnocení měření z hlediska hustoty zvolené sítě

7.2.1 Rozpěrka 50 mm

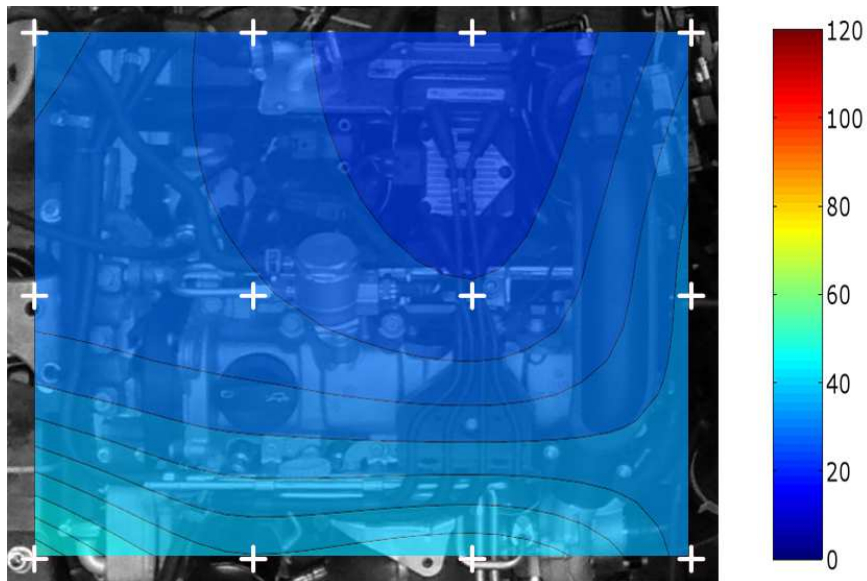
Výsledky měření sondou akustické intenzity s použitím rozpěrky o délce 50 mm bylo nejprve nutné upravit a eliminovat ty naměřené hodnoty, které byly mimo rozsah dosažitelné frekvence, tj. frekvence od 31,5 Hz do 1250 Hz a nemohly být považovány za platné. Z tohoto frekvenčního spektra jsem vybral 3 skupiny frekvencí (velmi nízká - 31,5 Hz; střední - 500 Hz; vysoká - 1250 Hz), na kterých bych rád demonstroval výsledky experimentu. Ve sloupci vpravo od grafů (akustických map) je vždy zobrazena stupnice hladiny akustické intenzity v decibelech.

Skupina velmi nízké frekvence

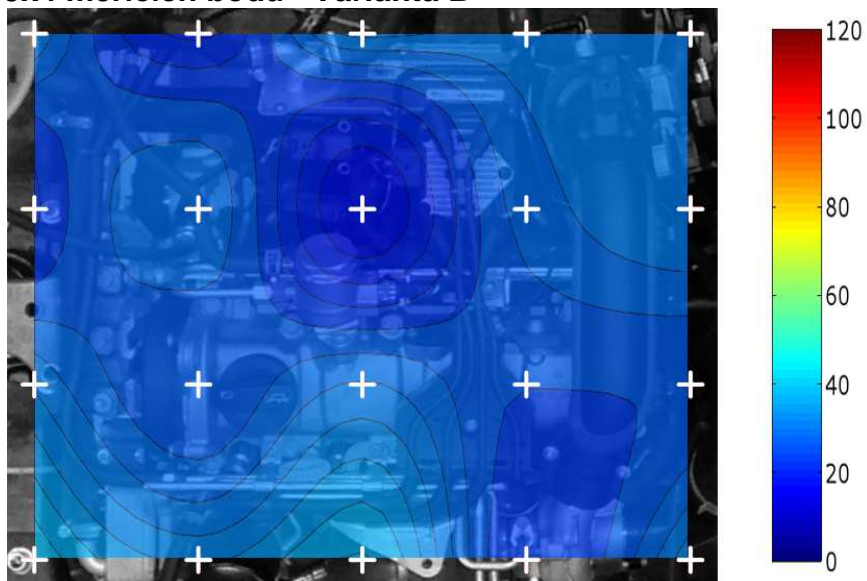
První skupinou jsou tedy hodnoty hladin akustické intenzity ve velmi nízké frekvenci (31,5 Hz). Tato frekvence je tak nízká, že aby byla pro lidský sluch zachytitelná, musí být hladina akustické intenzity mnohem vyšší, než například ve

frekvenci 1250 Hz (viz obrázek č. 2 - Křivky hladin stejné hlasitosti). Naměřené hodnoty jsou však velmi nízké, jak je vidět na následujících grafech. Lidský sluch není schopen v této frekvenci takto slabý zvuk vůbec zaregistrovat. Hodnota hladiny akustické intenzity na nich nepřekračuje 50 dB. Na následujících třech grafech jsou postupně zobrazeny mapy hladin akustické intenzity. Použil jsem rozdělení dle hustoty sítí, respektive měřících bodů popsané v kapitole 4.2.

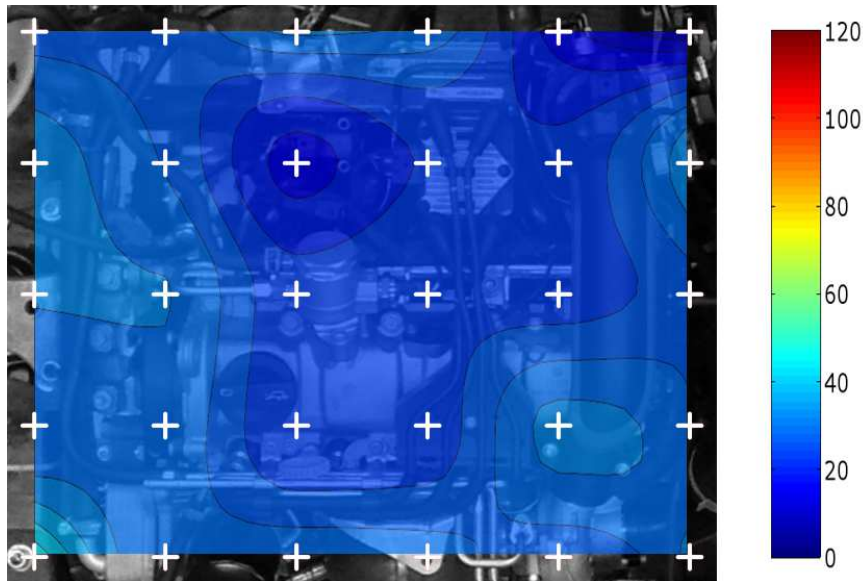
4x3 měřících bodů - Varianta A



5x4 měřících bodů - Varianta B



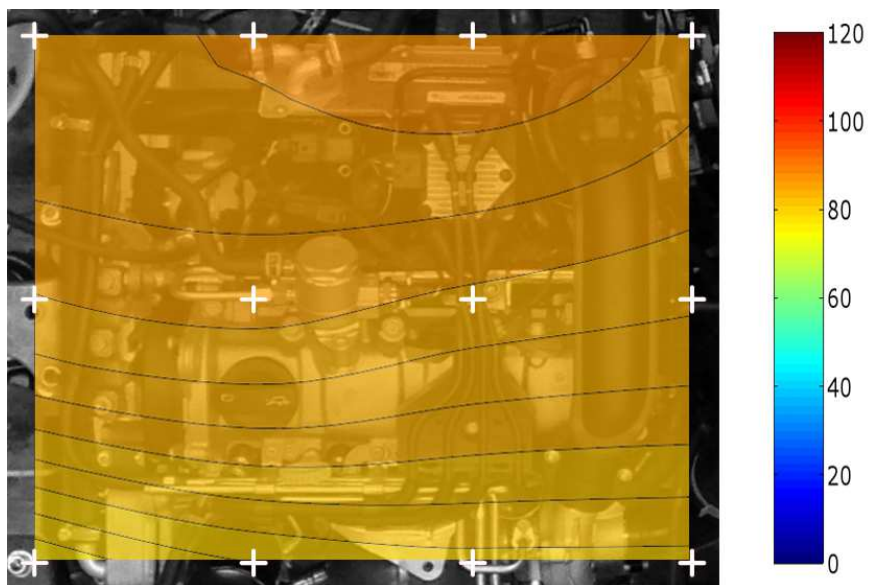
6x5 měřících bodů - Varianta C



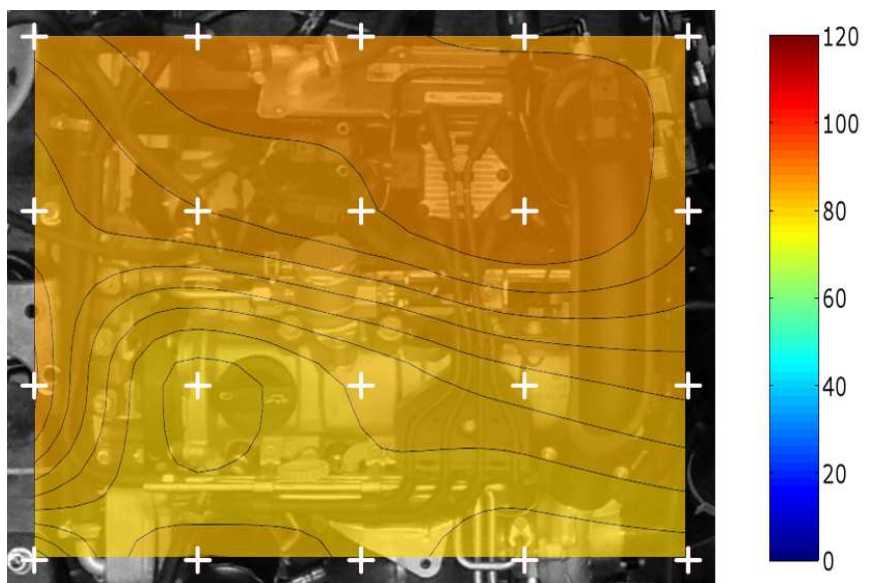
Skupina střední frekvence

Druhou skupinou jsou hodnoty o střední frekvenci, tedy 500 Hz. Při této frekvenci nabývá hladina intenzity signálu již větších hodnot než v předchozím případě. Jak je vidno z následujících grafů, osciluje okolo hodnoty 80 dB. Největší sílu má akustický signál vycházející z ústí přípojky chladící kapaliny vodního mezichladiče stlačeného vzduchu. Na akustické mapě varianty B se může zdát, že dominantní signál v této frekvenci vychází z celé oblasti mezichladiče. Následující mapa s hustější sítí varianty C však odhaluje, že došlo zřejmě ke zkreslení a splynutí signálu od jiného silnějšího zdroje, kterým je zřejmě přívod stlačeného vzduchu od turbodmychadla do mezichladiče. Dále je možné vypořadovat, že díky zhuštění měřící sítě přibyl bod v blízkosti víčka hrdla pro nálev motorového oleje (varianta B) a tím bylo odhaleno místo s nízkou hladinou akustické intenzity, neboli minimum, avšak jak je vidět dále ve variantě C, toto minimum se zřejmě nenachází pouze v místě víčka, nýbrž v širším okolí. Dalo by se tedy usoudit, že vhodné zhuštění sítě má již v této frekvenci své opodstatnění.

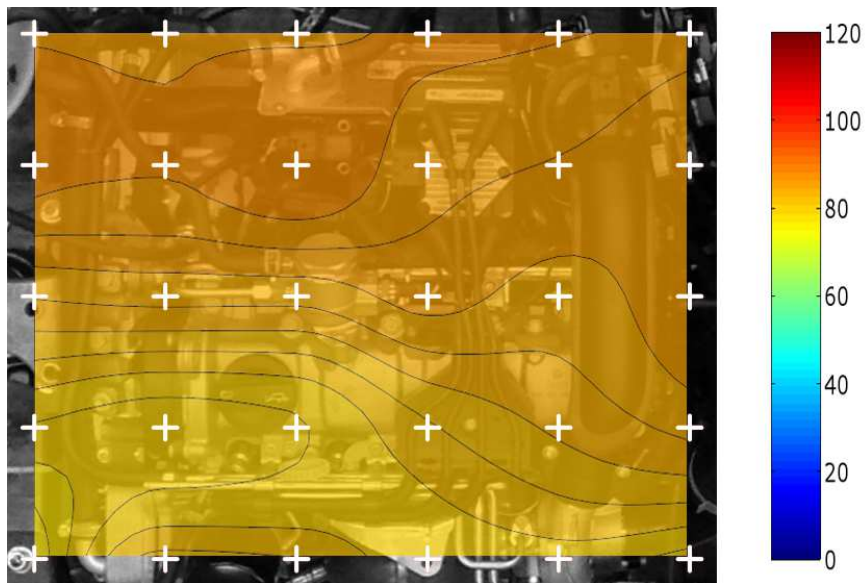
4x3 měřících bodů - Varianta A



5x4 měřících bodů - Varianta B



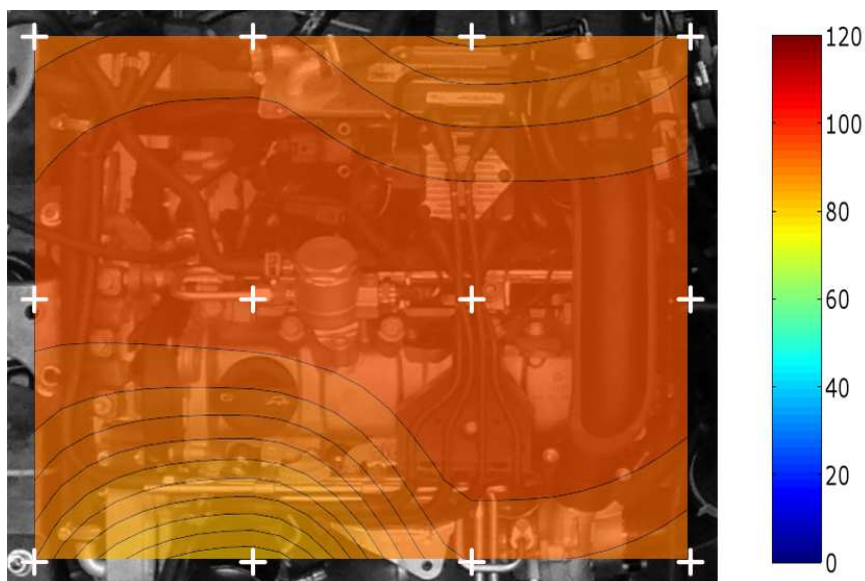
6x5 měřících bodů - Varianta C



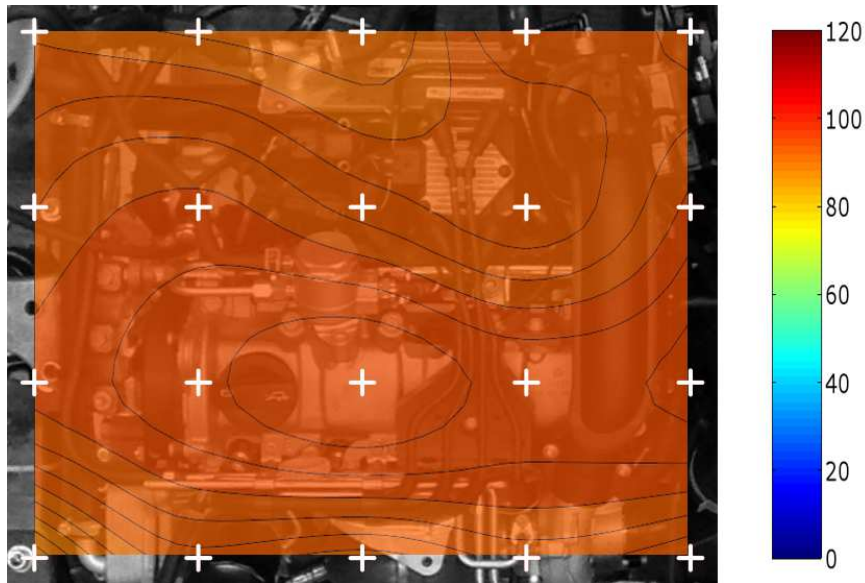
Skupina vyšší frekvence

Poslední skupinou jsou hodnoty hladiny akustické intenzity ve frekvenci 1250 Hz. V rámci zvolené rozpěrky mezi měřícími mikrofony na sondě intenzity (50 mm) se jedná o nejvyšší možnou měřitelnou frekvenci. Hladina akustické intenzity se místy blíží až k hranici 100 dB, což je již poměrně vysoká hodnota. Při této frekvenci je hustota měřící sítě již relativně zásadní a značně ovlivňuje kvalitu výsledné akustické mapy, zejména z hlediska lokalizace maxim a minim.

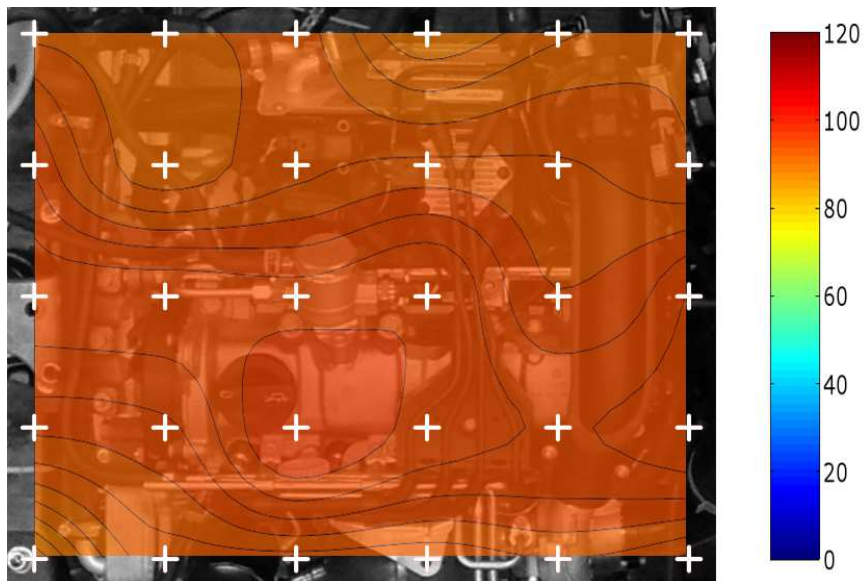
4x3 měřících bodů - Varianta A



5x4 měřících bodů - Varianta B



6x5 měřících bodů - Varianta C



Při srovnání všech tří frekvenčních skupin se dá kromě narůstající hladiny akustické intenzity též konstatovat, že při nízkých frekvencích není hustota sítě až tak důležitá. Jednotlivá minima a maxima hladin akustické intenzity se slévají v řídké síti stejně jako v husté. Naopak při mapování akustické intenzity ve vyšších frekvencích, je kvalita měřicí sítě co do počtu měřících bodů poměrně významná. Srovnáme-li například ve skupině vysoké frekvence akustické mapy varianty A a C, je jasně patrné, že pokud nevhodně zvolíme příliš řídkou síť, měření nepřinese téměř žádné

konkrétní výsledky. Oproti tomu ve variantě C je jasně vidět, kde se vyskytuje maximum v dané frekvenci.

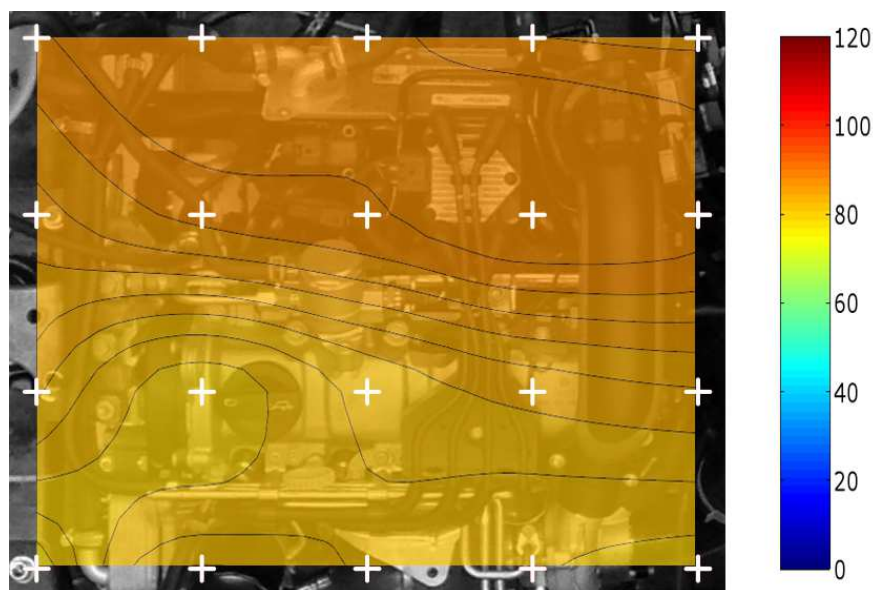
7.2.2 Rozpěrka 12 mm

Při použití rozpěrné vložky o délce 12 mm lze použít z naměřeného frekvenčního spektra hodnoty od 125 Hz do 5000 Hz. Z tohoto spektra jsem opět vybral tři skupiny. Skupinu střední frekvence s hodnotou 500 Hz, skupinu vysoké frekvence 2500 Hz a skupinu velmi vysoké frekvence 5000 Hz.

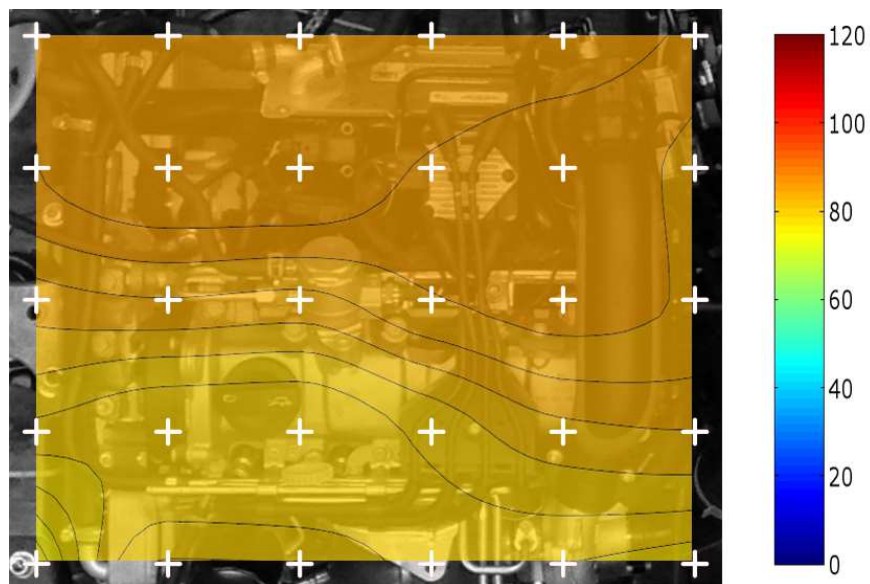
Skupina střední frekvence

Jelikož jsem zvolil stejné frekvenční pásmo jako v předchozím měření s rozpěrkou o velikosti 50 mm, výsledky měření by měli být a jsou velmi podobné. Pokud srovnáme varianty B a C, tak v obou případech se na mapách hladin akustických intenzit nacházejí minima i maxima ve stejných nebo velmi podobných pozicích a mapy mají i velmi podobný tvar. V této skupině je místo varianty A varianta D, což je opačný extrém, tedy velmi hustá síť měřících bodů. V této střední frekvenci mělo extrémní zhuštění sítě zejména efekt konkrétnějšího určení minima. V praxi však většinou jde o nalezení zdrojů a tedy lokalizace maxim. Ta se však ve variantě D od varianty B moc neliší. Maximum se tak jako tak nachází v oblasti mezichladiče stlačeného vzduchu a zhušťováním bodů se stejně k žádné konkrétnější lokalizaci daného maxima nedostaneme.

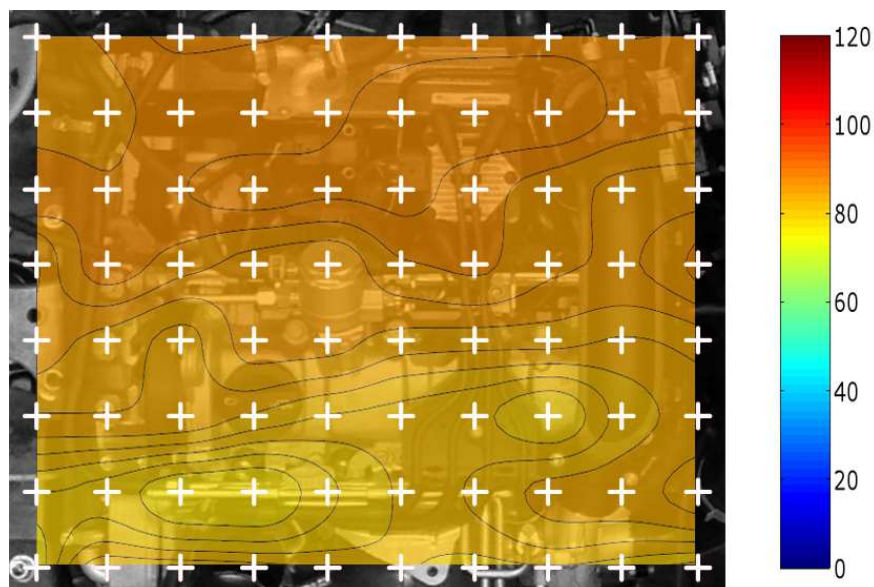
5x4 měřících bodů - Varianta B



6x5 měřících bodů - Varianta C



10x8 měřících bodů - Varianta D

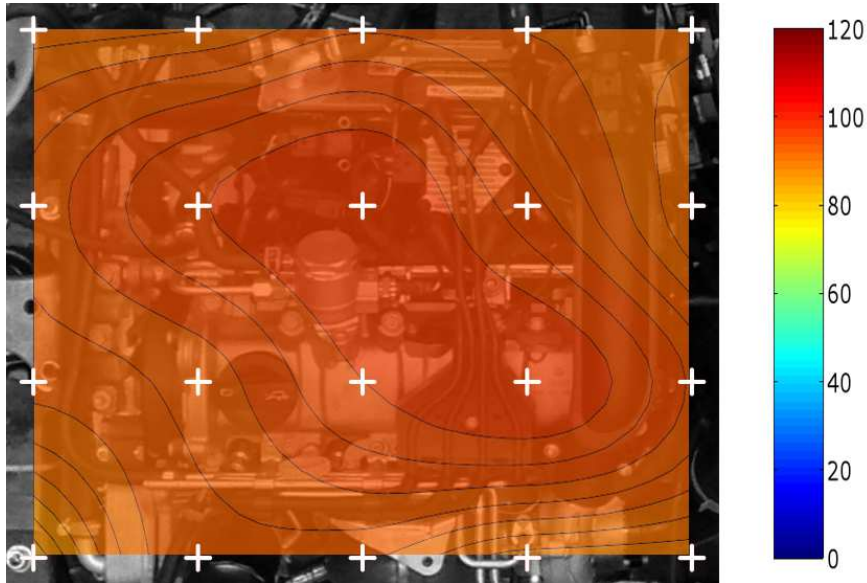


Skupina vysoké frekvence

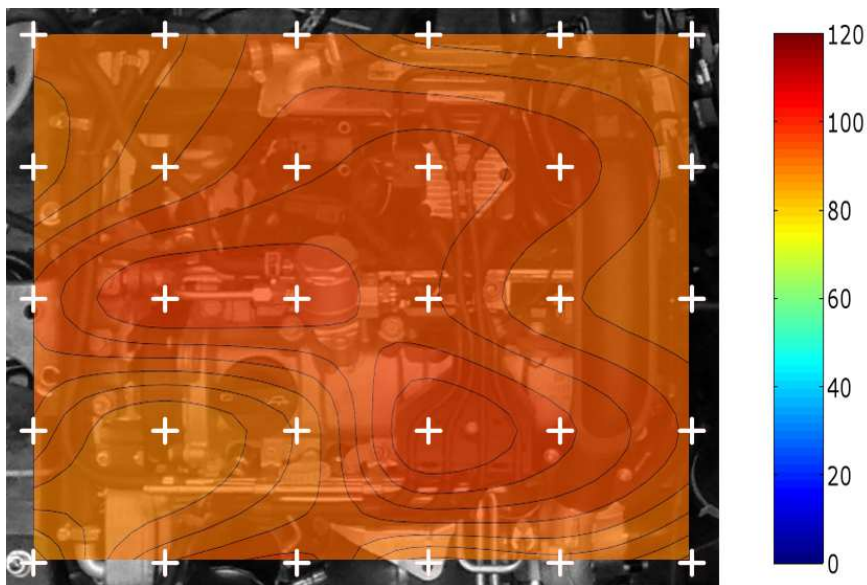
Akustický signál o frekvenci 2500 Hz je již poměrně vysoký. Lidský sluch je při této hodnotě velmi citlivý. Znamená to tedy, že hladina akustické intenzity nemusí být až tak vysoká, přesto bude posluchač tyto hodnoty považovat za velmi intenzivní, hlasité. Při takto vysoké frekvenci má hustota sítě už vliv na kvalitu akustické mapy. Zatímco hustota sítě ve variantě B postačila na odhalení jednoho maxima, které ale

není nijak konkrétní a ani přesněji nelze zdroj signálu nijak lokalizovat, ve variantě C již dochází ke konkrétnější lokalizaci daného signálu a odhalení dvou možných zdrojů. Varianta D, tedy extrémně hustá síť se vzhledem k vysoké frekvenci pak ukázala jako optimální volba. Potvrzuje se zde tedy poznatek z předchozího měření s kratší rozpěrkou a to, že s narůstající frekvencí též narůstá potřeba zahušťování sítě měřících bodů.

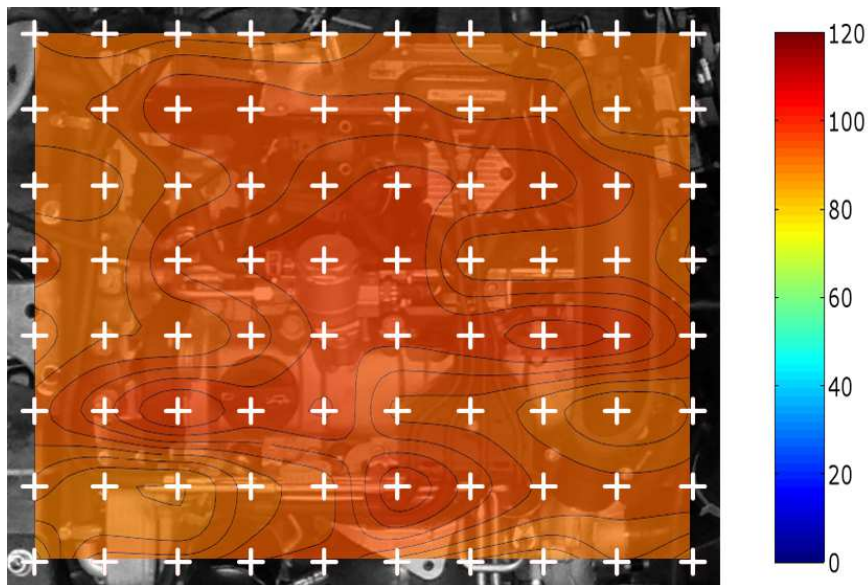
5x4 měřících bodů - Varianta B



6x5 měřících bodů - Varianta C



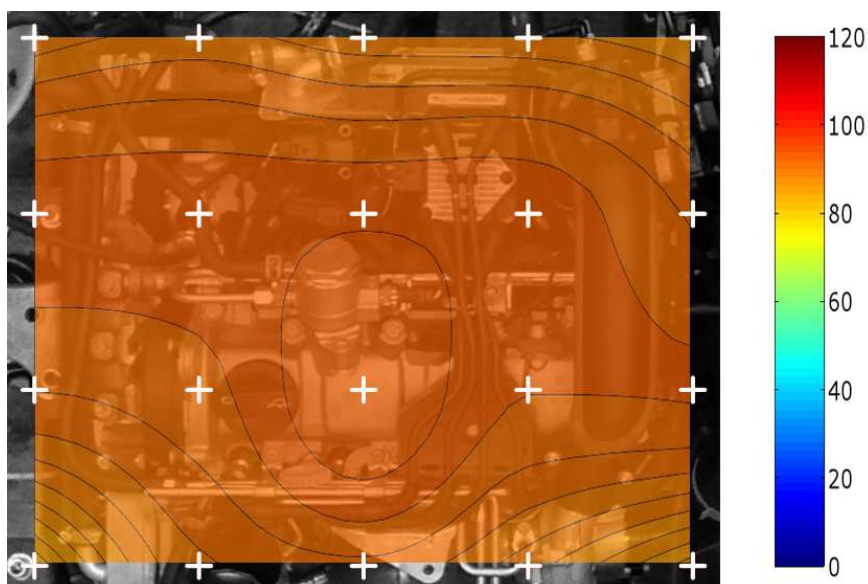
10x8 měřících bodů - Varianta D



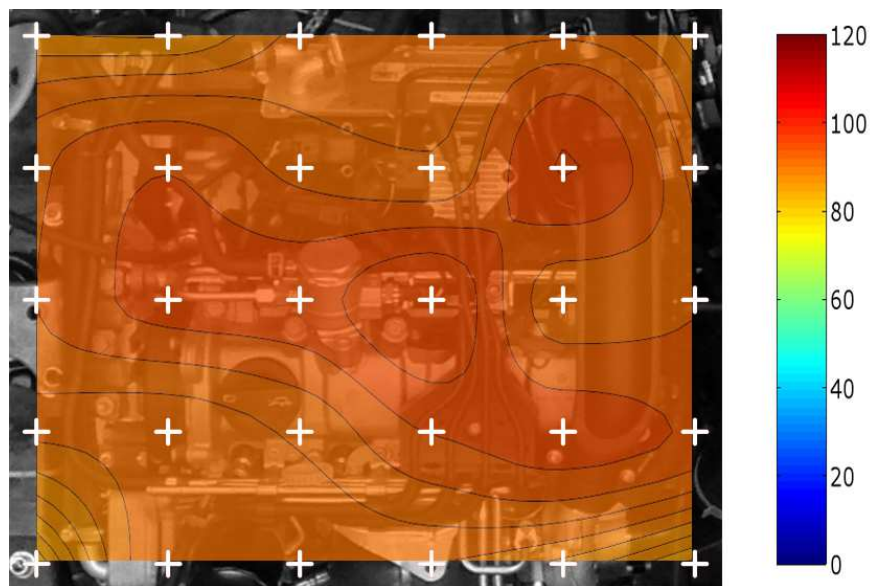
Skupina velmi vysoké frekvence

Tato skupina obsahuje hodnoty hladin akustické intenzity ve frekvenci 5000 Hz. Dle výsledků opět můžeme pozorovat nejprve hrubé nalezení maxima ve variantě B, poté konkrétnější určení a roztržení nekonkrétního a slitého pole do dvou konkrétnějších a náznak dalších oblastí výskytu možných maxim ve variantě C a nakonec konkrétní počet a lokalizace jednotlivých maxim ve variantě D. V poslední ze jmenovaných variant se vyskytuje též konkrétní bod, který jakoby poukazoval na možné lokální minimum. Jedná se však dle mého názoru o možné zkreslení odraženým signálem.

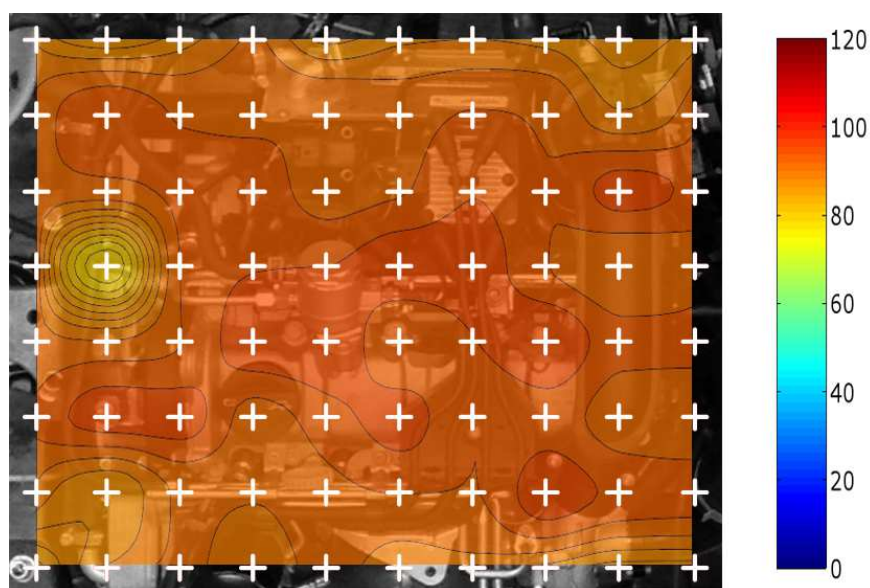
5x4 měřících bodů - Varianta B



6x5 měřících bodů - Varianta C



10x8 měřících bodů - Varianta D



7.3 Vyhodnocení měření z hlediska možného ovlivnění prostředím

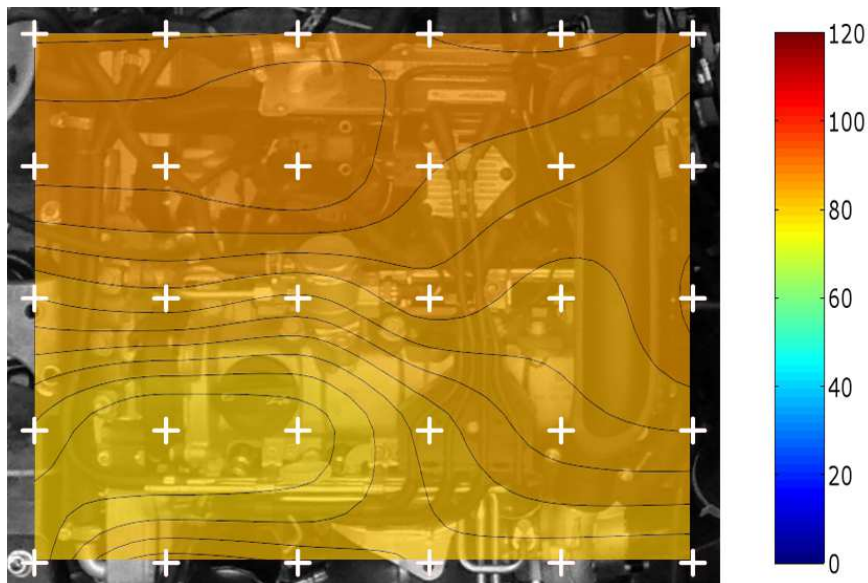
Stejně jako v předchozích kapitolách jsem vybral 3 skupiny frekvencí, na kterých bych chtěl výsledky měření prezentovat. Skupinu střední (500Hz), vyšší (1250 Hz) a velmi vysoké (5000 Hz) frekvence. V každé skupině budou 3 mapy hladin akustických intenzit seřazené dle úrovní popsanych v kapitole 5.2. První bude

z měření v úrovni vysoké tedy úrovně, ve které probíhalo celé předchozí měření. Druhá bude v úrovni střední a třetí v úrovni nízké. Měření probíhalo dle popisu v kapitole 5.2

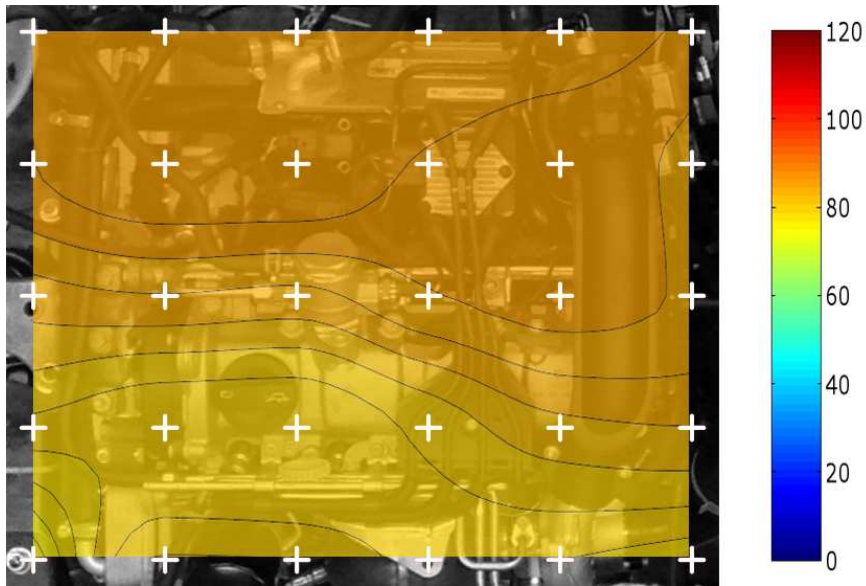
Skupina střední frekvence (rozpěrka 12 mm)

První skupina obsahuje tedy hodnoty frekvence 500 Hz. Při bližším studování grafů si můžeme všimnout postupného rozpouštění minim a maxim a přibývání širších nevyhraněných polí. Spíše než reálná minima a maxima zkoumaného signálu se totiž jedná o interferenci, neboli zesílení skupiny signálů vysílaných ze zdrojů v těsném okolí zkoumaného bodu. Na zbylých dvou mapách hladin akustické intenzity je patrné postupné vytrácení těchto "falešných" minim a maxim a zobrazení reálnějších tvarů akustické mapy.

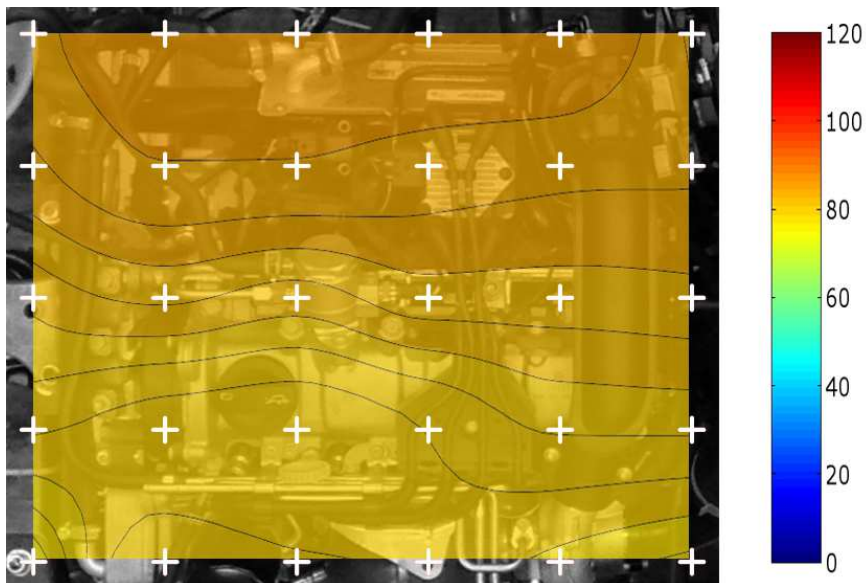
Měření ve vysoké úrovni nad objektem



Měření ve střední úrovni nad objektem



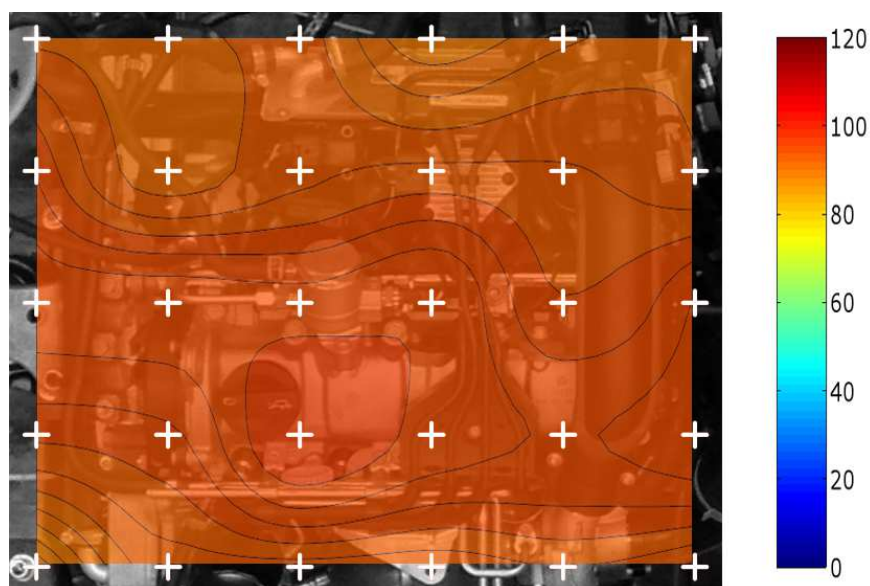
Měření v nízké úrovni nad objektem



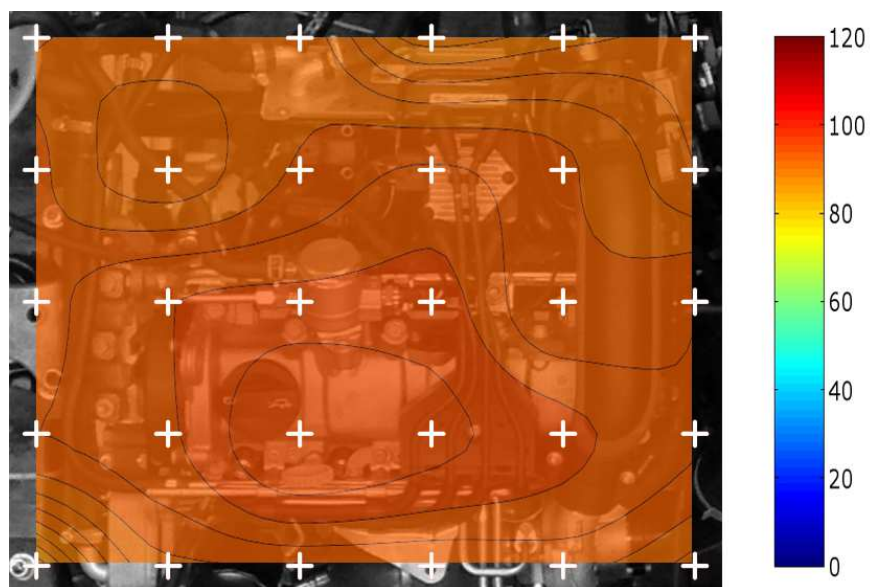
Skupina vyšší frekvence (rozpěrka 50 mm)

Zde je velice názorně předvedeno výše uvedené. Zdrojem dominantního akustického signálu je při této frekvenci zřejmě samotné motorové ústrojí. Ačkoliv lokalizace signálu v obou vzdálenějších úrovních není provedena zcela špatně, rozhodně se nejedná o vyloženě bodový zdroj, jak by se na první pohled mohlo zdát, nýbrž o širší oblast. Tak jak je znázorněno na poslední akustické mapě měření v těsné blízkosti zdroje.

Měření ve vysoké úrovni nad objektem

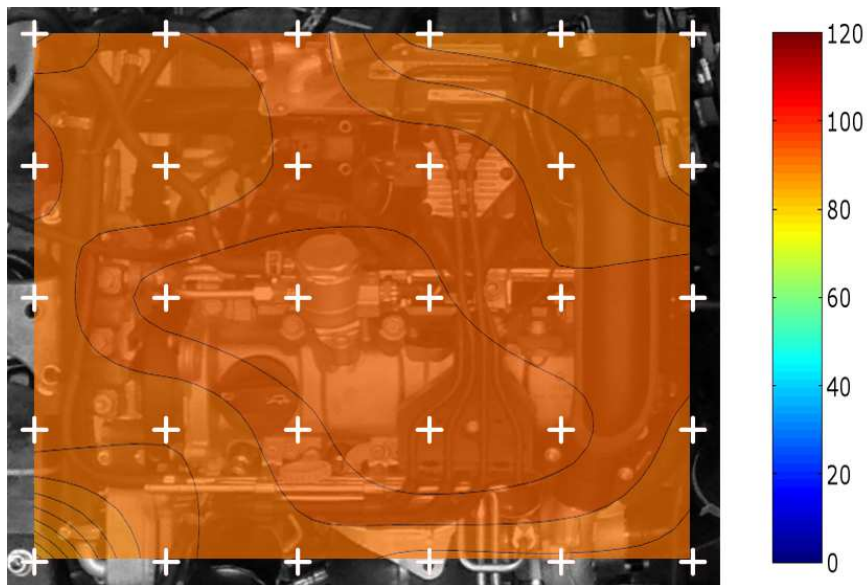


Měření ve střední úrovni nad objektem



Při pohledu na následující akustickou mapu je zřejmé, že došlo k určitému vyrušení okolních signálů, které vzájemně interferovaly a měly tak za následek zobrazení zavádějících maxim a minim. Za povšimnutí stojí též fakt, že ačkoliv se sonda přibližovala k měřenému objektu, maximální hodnota hladiny akustické intenzity klesá. To jen potvrzuje výše zmíněné.

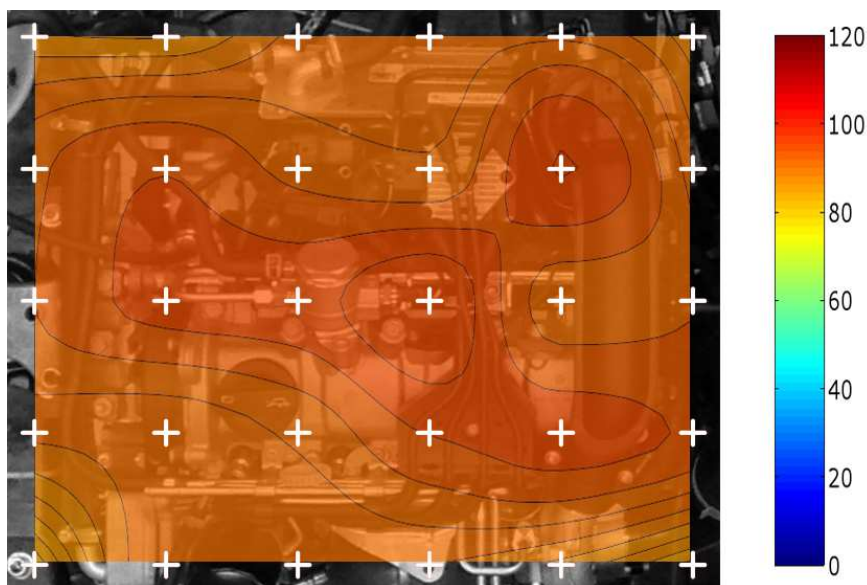
Měření v nízké úrovni nad objektem



Skupina velmi vysoké frekvence (rozpěrka 12 mm)

V této skupině je asi celý postup od největší vzdálenosti od objektu k nejnižší nejvíce zřetelný. Na prvním snímku je akustická mapa velmi členitá, obsahuje 2 téměř 3 maxima, která dosahují poměrně vysokých hodnot.

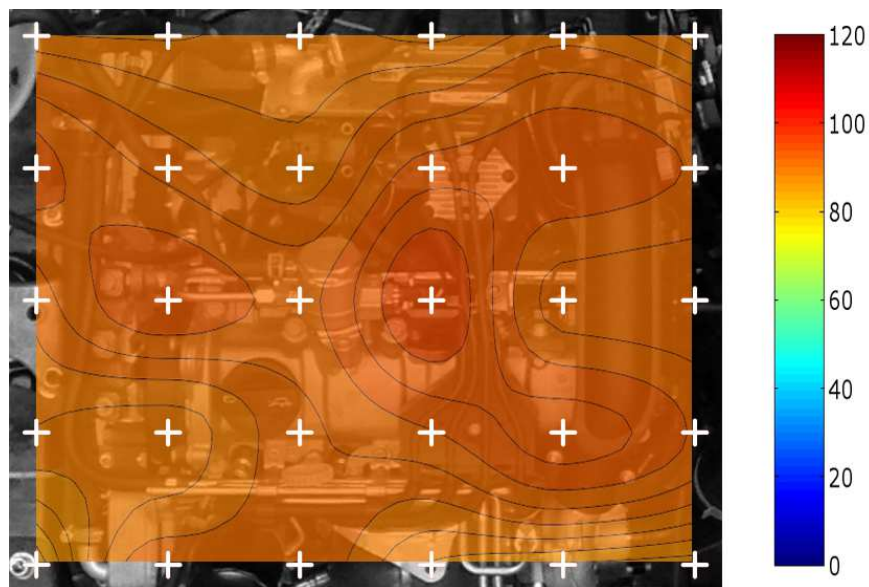
Měření ve vysoké úrovni nad objektem



Pokud se však sonda přiblíží do střední úrovně, maxima postupně mizí, intenzita se paradoxně snižuje a na třetím snímku je maximum jen jedno a hladina akustické intenzity poklesne téměř o řád. To vše je způsobeno právě interferujícími

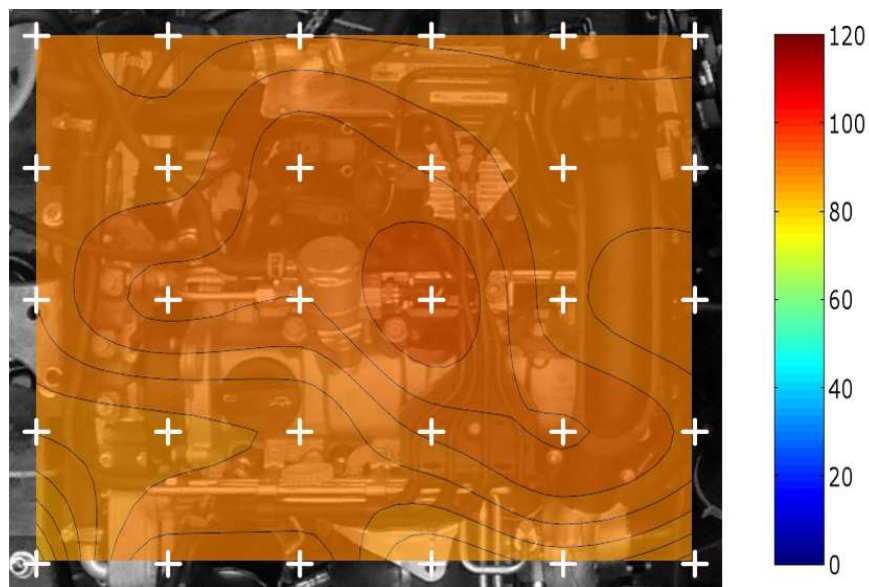
akustickými signály z okolních zdrojů, které jsou zachyceny a následně chybně zpracovávány, pokud sonda akustické intenzity není v dostatečné blízkosti nad měřeným objektem. Samozřejmě důležitým aspektem je též vzdálenost okolních rušivých zdrojů od toho, který je v daném bodě měřen.

Měření ve střední úrovni nad objektem



Na posledním snímku zobrazujícím mapu hladiny akustické intenzity frekvence 5000 Hz je již jen jedno maximum a je tedy ze všech třech snímků nejobektivnější.

Měření v nízké úrovni nad objektem



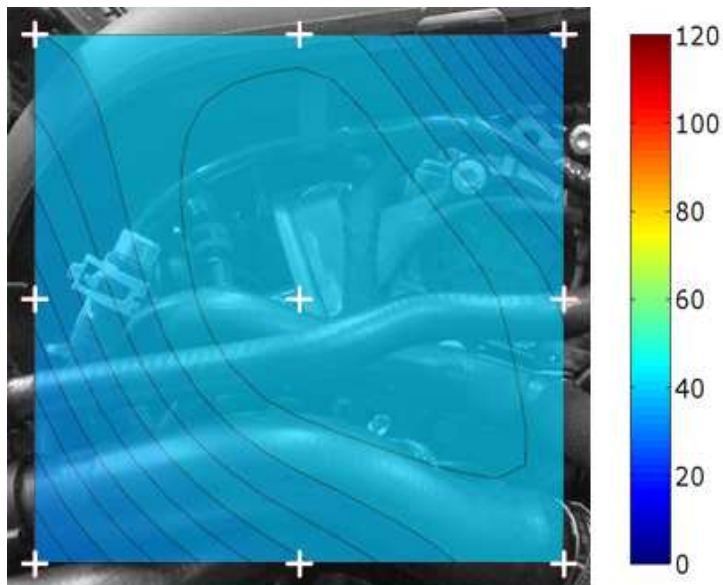
7.4 Vyhodnocení měření bez použití a s použitím referenčního snímače

V této kapitole bych rád porovnal výsledky naměřené bez použití a s použitím referenčního snímače. Výsledky jsem rozdělil do 3 skupin a to bez ohledu na to, jestli se měřilo s rozpěrkou o velikosti 12 mm či 50 mm. První skupinou jsou hodnoty ve frekvenci 160 Hz, druhou skupinou hodnoty ve frekvenci 315 Hz a třetí skupinou hodnoty ve frekvenci 800 Hz. Jelikož frekvenční rozdělení neodpovídá žádné z předchozích variant, označil jsem skupiny právě zvolenou frekvencí.

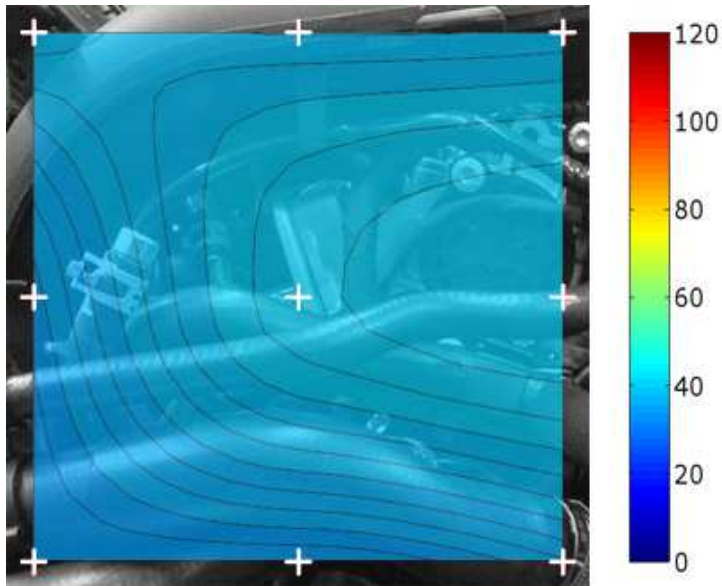
Skupina 160 Hz (rozpěrka 12 mm)

Zatímco měření pouhou sondou akustické intenzity na tomto členitém povrchu jasně ukazuje na maximum v místě vysokotlakého benzínového čerpadla, při použití čidla vibrací a selektivní techniky měření se ukazuje, že hlavním zdroje není samotné čerpadlo, ale sací vačka anebo vačka čerpadla. Tyto dva snímky mají dokázat, že kromě určení lokalizace zdroje, na kterém je čidlo umístěno dokáže tato metoda vyrušit signál z jiných zdrojů a tím tak odstranit zkreslující výsledky. Výsledky z měření čidlem vibrací po vzájemné korelaci tak vyloučily možný signál vycházející z čerpadla.

Měření bez čidla 3x3



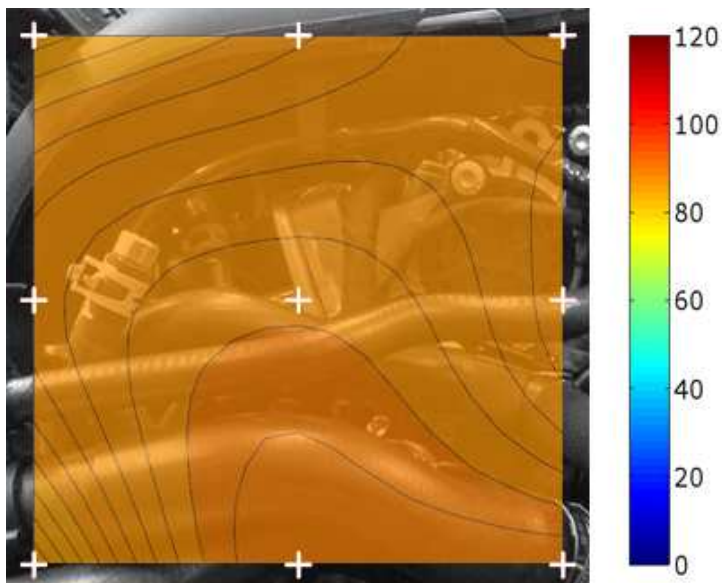
Měření s čidlem vibrací 3x3



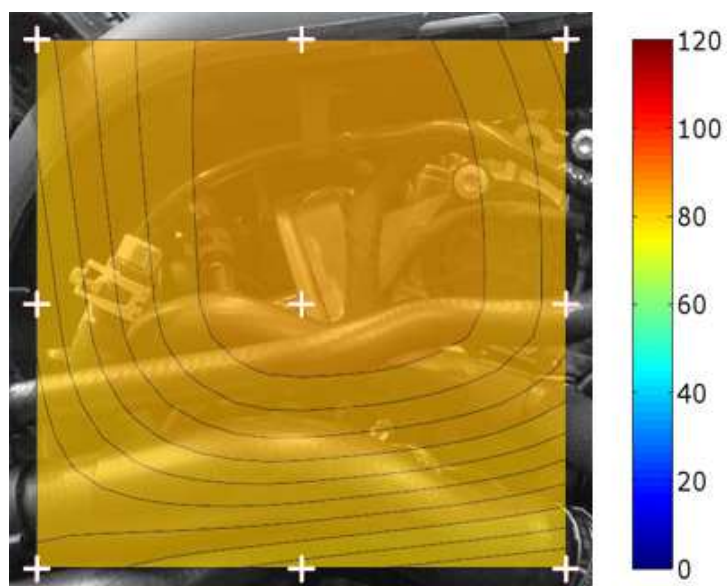
Skupina 315 Hz (rozpěrka 50 mm)

Výsledky měření na této středně nízké frekvenci již slouží k lokalizaci hledaného zdroje, na kterém bylo čidlo vibrací umístěno. Při měření bez selekce (bez čidla) vychází maximum z prostoru mimo měřenou oblast a nelze určit, jak silný je čerpadlo zdroj akustického signálu. Pokud ovšem provedeme za stejných podmínek měření se selekcí (s čidlem), je možné určit hladinu akustické intenzity signálu o frekvenci 315 Hz vydávané palivovým čerpadlem a zjistit tak možnost ovlivnění zkoumané oblasti (dané akustické mapy) právě signálem vydávaným palivovým čerpadlem.

Měření bez čidla 3x3



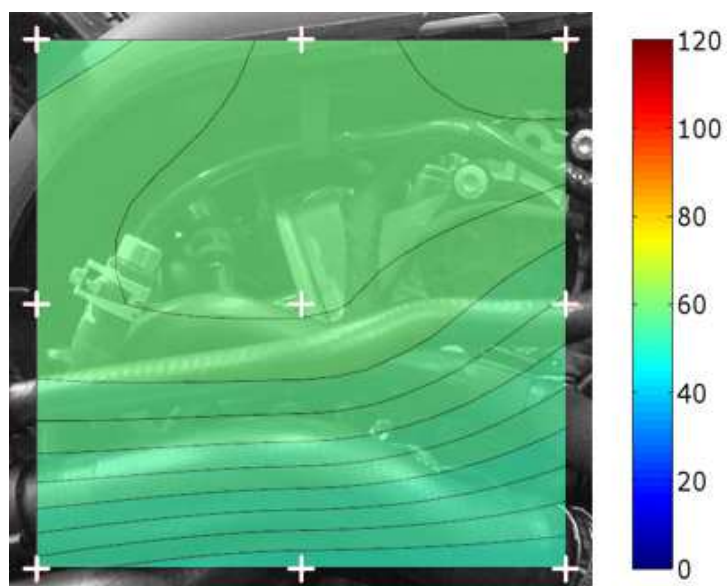
Měření s čidlem vibrací 3x3



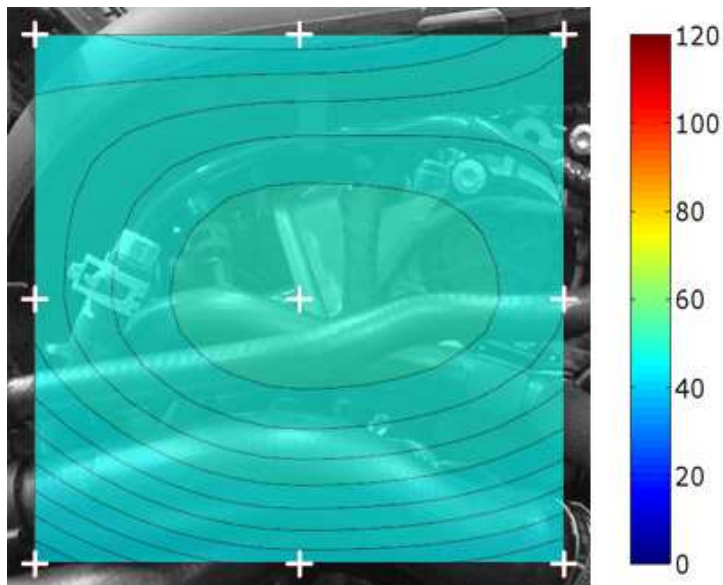
Skupina 800Hz (rozpěrka 12 mm)

Poslední skupinou jsou hodnoty hladin akustické intenzity ve frekvenci 800 Hz. Na prvním snímku opět jen náznak lokalizace nejintenzivnějšího zdroje a možné zkreslení vlivem prostředí a na druhém snímku je zobrazeno stejné měření, ale za použití čidla a výsledky jasně ukazují na palivové čerpadlo. Rozdíl mezi měřením bez čidla vibrací a s čidlem vibrací je tedy velký a na první pohled rozeznatelný.

Měření bez čidla vibrací 3x3



Měření s čidlem vibrací 3x3



8 Vyhodnocení vlivu parametrů na výsledná měření

8.1 Vyhodnocení parametrů

Při vyhodnocování měření jsem se snažil rozdělit výsledky do skupin. Nejprve jsem vytvořil skupinu dle šířky rozpěrky, tedy 12 mm a 50 mm a každou z nich jsem ještě rozdělil dle hustoty sítě. Při porovnání výsledků naměřených rozpěrkou 12 a 50 mm se nevyskytuje mezi naměřenými hodnotami v pásmu frekvencí, které se překrývají (tedy 125 Hz - 1250 Hz) žádný rozdíl. Z toho lze vyvodit, že šířka rozpěrky na konečné měření nemá vliv ve smyslu zkreslení výsledků. Prioritní je samozřejmě při volbě rozpěrky frekvenční pásmo, které je předmětem měření. Co však má bez pochyby značný vliv na výsledky, je hustota sítě, avšak ne ve všech frekvencích. Ve velmi nízkých frekvencích nemusí být na hustotu sítě až tak velký nárok, jak je vidět v kapitole 7.2.1. S rostoucí frekvencí však rostou požadavky na zhušťování sítě. Ve vysokých a velmi vysokých frekvencích může nedostatečné zahuštění sítě přinést nepřesné výsledky a tím ovlivnit výsledný tvar akustické mapy. Prvním významným parametrem ovlivňujícím mapování akustické intenzity je tedy odpovídající kvalita hustoty měřících bodů v měřené oblasti.

Dalším významným parametrem při mapování akustické intenzity je vzdálenost měřicího zařízení od měřeného objektu. Tento parametr významně ovlivňuje měření a kvalitu naměřených dat zejména při měření sondou intenzity. Tento fakt potvrzují výsledky měření v kapitole 7.3. Jak již bylo v této kapitole uvedeno, signály z okolních zdrojů, hlavně ty v těsné blízkosti měřicího bodu, mohou také významně ovlivnit tvar výsledné akustické mapy. Mohou zde vznikat falešná maxima, která jsou vytvořena interferencí signálů z různých zdrojů.

Třetím parametrem, který se podílí na kvalitě akustické mapy, je množství odraženého vlnění. Tento parametr je také velmi významný zejména při měření akustické intenzity sondou intenzity. Pokud se měření provádí v laboratoři, je nutné eliminovat předměty či plochy v blízkosti měřeného objektu, od kterých by se mohl měřený signál odrazit. Příklad ovlivnění mapy akustické intenzity je v kapitole 7.2.2 ve *Skupině velmi vysoké frekvence* ve variantě D s hustotou sítě 10x8. Bod s velice malou hladinou akustické intenzity vzniklý v této mapě byl ovlivněn právě odraženým signálem.

Čtvrtým významným parametrem, kterým lze velmi výrazně zvýšit kvalitu akustické mapy, je volba selektivní metody, tedy metody s využitím čidla, respektive skupiny čidel vibrací. Umístěním čidla nebo čidel vibrací na konkrétní místa měřeného objektu lze eliminovat právě signály okolních zdrojů. Rozdíl mezi měřením s čidlem vibrací a měřením bez čidla vibrací je patrný v kapitole 7.4. Zatímco bez čidla vibrací je měření ovlivněno okolními zdroji akustického signálu, výsledné hodnoty získané z měření s čidlem vibrací jsou již bez zkreslení a dávají tak mnohem přesnější informaci o akustické emisi.

8.2 Doporučení pro měření a mapování akustické intenzity

V předchozí kapitole jsem uvedl čtyři základní parametry ovlivňující mapování akustické intenzity. Při vhodném nastavení těchto parametrů lze docílit mnohem přesnějších výsledků a vyvarovat se tak výsledkům, které by byly neúplné či zavádějící. Posledním z výše uvedených parametrů, tedy využitím selektivním měřením za pomoci čidla vibrací se dá významně ovlivnit kvalita měření i přes nevhodně zvolené zbylé tři parametry. Na některých složitějších objektech

obsahujících více zdrojů akustických signálů, jako je například spalovací motor, však může nastat s umístěním čidla problém ať z hlediska příliš vysoké teploty povrchu, či jeho příliš obtížným umístěním. Jedním z takových míst může být například turbodmychadlo. V tomto případě lze použít speciální laserový snímač vibrací, který pracuje na principu Dopplerova jevu. Ne vždy lze však tento snímač použít.

Doporučení lze zformulovat v následujících bodech:

- **Zvolit vhodnou hustotu měřicí sítě v závislosti na frekvenci**
- **Volit vždy vhodnou vzdálenost od měřeného objektu v závislosti na hustotě zdrojů akustických signálů**
- **Odstranit či odizolovat všechny možné odrazivé plochy v blízkosti měřeného objektu**
- **Pro maximální přesnost měření využít a vhodně umístit jedno či více čidel vibrací**

Závěr

Jelikož je problematika týkající se akustické emise, její analýza a měření velmi rozsáhlá, nechtěl jsem v teoretické části zacházet příliš do podrobností. Záměrem spíše bylo jen shrnout nejpodstatnější informace týkající se základního principu šíření zvuku, vnímání zvuku lidským sluchem, vysvětlit jakým způsobem probíhá měření zvuku a uvést možné metody měření akustické emise. Větší část této práce jsem věnoval právě experimentálnímu měření a studování parametrů ovlivňujících mapování akustické intenzity. Pod pojmem parametry, kterými je ovlivňováno měření, jsem vnímal děje, které se odehrávají při samotném měření, a mají na něj a tím pádem na jeho výsledky zásadní vliv. S tímto přístupem jsem též provedl celé měření a následné vyhodnocení.

Experimentální měření jsem prováděl v rané fázi celé práce. Na samotném začátku jsem měl jen kusé informace o dané problematice a cíl, kterého chci dosáhnout. Nyní již mohu vyhodnotit celou situaci zpětně. Již při samotném měření jsem nasbíral cenné zkušenosti, které jsem mohl použít při tvorbě této práce a v průběhu dalšího měření. Během zpracovávání a doplňování teoretické části jsem nasbíral dostatečné množství informací potřebných k vyhodnocení celého experimentálního měření. Právě díky těmto novým poznatkům bych si dovoлил konstatovat, že nejvhodnější metodou pro mapování akustické intenzity v případě spalovacího motoru umístěného v uzavřené laboratoři by nejspíše byla metoda beamforming. Volbou metody mapování akustické intenzity pomocí sondy intenzity a zároveň využitím čidla vibrací, neboli metody selektivního měření však lze metodu beamforming v tomto případě nahradit a docílit taktéž velmi přesných výsledků. Zároveň samotná metoda mapování akustické intenzity sondou intenzity je všestrannější, kompaktnější a má řadu dalších výhod.

Na závěr bych rád uvedl, že předmětem této diplomové práce nebylo samotné měření na spalovacím motoru, nýbrž výzkum parametrů ovlivňujících mapování hladiny akustické intenzity ať už ve fázi vyhodnocování výsledků, či při samotném měření. Jelikož hlavním předmětem bylo mapování akustické intenzity pomocí sondy intenzity, platí i uvedená doporučení zejména při měření právě touto sondou.

Seznam použité literatury a odkazů

- [1] Němeček, Pavel - Hluk v technické praxi I, Liberec 1998
ISBN 80-7083-285-1
- [2] Nový, Richard - Hluk a chvění, Praha 1995
ISBN 978-80-01-04847-9
- [3] Jiří Bajer - Akustika <http://muj.optol.cz>
- [4] Pavel Němeček - Akustická diagnostika <http://www.kvm.tul.cz>
- [5] Akustika staveb - Akustická Intenzita <http://stavba.tzb-info.cz>
- [6] Akustika, vznik a šíření zvuku, frekvenční analýza a syntéza, sluchový vjem
zvukového signálu <http://homen.vsb.cz>
- [7] Hlasitost a intenzita zvuku - základní definice
<http://fyzika.jreichl.com>
- [8] Měření akustického výkonu zdrojů hluků <http://www.fs.vsb.cz>
- [9] Akustická staveb - Šíření zvuku ve volném prostoru
<http://stavba.tzb-info.cz>
- [10] Sound Intensity <http://www.bksv.com>
- [11] Sound Intensity Measurements with LAN-XI <http://www.bksv.com>
- [12] Katalogový list <http://spectris.cz>
- [13] Using Acoustic Beamforming for Pass-By Noise Source Detection
<http://www.ni.com>
- [14] Akustická holografie <http://www.elektrorevue.cz>
- [15] Akustická kamera <http://www.ekolagroup.cz>
- [16] Palivové soustavy zážehových motorů <http://net-auto.cz>

- [17] Noise Source Identification - an innovative approach of the Selective Intensity method <http://openarchive.univpm.it>
- [18] Tomáš Vaníček - křivky kix.fsv.cvut.cz
- [19] Stanislav Daniš - Lineární a polynomická regrese, interpolace, hledání v tabulce <http://kfes-16.karlov.mff.cuni.cz>
-
- [A] What is sound <http://chimera.labs.oreilly.com>
- [B] Úvod do elektroakustiky a akustiky <http://nf.duseknet.com>
- [C] Sound level calibrator <http://www.helmut-singer.de>
- [D] Intensity probe, Calibrator www.bksv.com
- [E] Acoustic particle velocity measurement systems <http://laum-vld.univ-lemans.fr>
- [F] Intensity probe spacer <http://promarchive.com>
- [D] Sound Intensity Measurements with LAN-XI www.bksv.com
- [G] Using Acoustic Beamforming for Pass-By Noise Source Detection www.ni.com
- [H] Compressed Sensing for Near Field Acoustic Holography <http://exchange.inria.fr>
- [I] Akustická kamera <http://www.ekolagroup.cz>
- [J] Measuring idling noises with the acoustic camera <http://emercedesbenz.com>