



Mapování akustické intenzity

Bakalářská práce

Studijní program: B2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301R000 – Strojní inženýrství

Autor práce: **Karel Ungr**
Vedoucí práce: Ing. Jan Novák, Ph.D.





Mapping of sound intensity

Bachelor thesis

Study programme: B2301 – Mechanical Engineering
Study branch: 2301R000 – Mechanical Engineering

Author: **Karel Ungr**
Supervisor: Ing. Jan Novák, Ph.D.



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Karel Ungr**
Osobní číslo: **S12000379**
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojní inženýrství**
Název tématu: **Mapování akustické intenzity**
Zadávající 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. Proveďte experimentální měření mapováním akustické intenzity pístového spalovacího motoru.
4. Vyhodnoťte provedená měření.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy: 40 stran + CD

Forma zpracování bakalářské 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 bakalářské práce:

Ing. Jan Novák, Ph.D.


Katedra vozidel a motorů

Datum zadání bakalářské práce: 15. listopadu 2015

Termín odevzdání bakalářské práce: 15. února 2017


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




Ing. Robert Voženilek, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 15. listopadu 2015

Prohlášení

Byl jsem seznámen 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 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 samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

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

Datum: 12.2.2017

Podpis:



Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá mapováním akustické intenzity. Za tímto účelem byl proveden experiment v podobě měření akustické intenzity pomocí intenzitní sondy na spalovacím motoru. Měření bylo realizováno metodou měření v bodech s využitím mřížkové osnovy za účelem lokalizace hlavních zdrojů hluku.

Klíčová slova

Sonda akustické intenzity, akustická mapa, hladina akustické intenzity

Annotation

This bachelor thesis deals with mapping the sound intensity. The experiment for this purpose was accomplished by using intensity measuring probe on the combustion engine. The measurement was executed by the method of measuring in points with usage of grid warp in order to locate the main sources of noise.

Key words

Sound intensity probe, acoustic map, acoustic intensity level

Poděkování

V první řadě bych chtěl velice poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Janu Novákovi Ph.D. za odborné vedení a ochotu při tvorbě této práce. Dále bych chtěl poděkovat zaměstnancům Katedry vozidel a motorů za umožnění provedení experimentu ve zkušebně Powertrain a pracovníkům Katedry matematiky a didaktiky, zvláště paní RNDr. Daně Černé Ph.D. a RNDr. Jiřímu Hozmanovi Ph.D. za cenné rady a pomoc při zpracování výsledků do grafické podoby s využitím matematického softwaru.

V poslední řadě děkuji své rodině a přítelkyni za trpělivost a podporu nejen při tvorbě této práce, ale i po celou dobu studia.

Obsah

Úvod.....	11
1. Teoretická část.....	12
1.1 Základní pojmy	12
1.1.1 Definice zvuku a hluku	12
1.2 Akustické veličiny.....	13
1.2.1 Akustický tlak	13
1.2.2 Akustická rychlost	13
1.2.3 Akustická intenzita	14
1.2.4 Akustický výkon	14
1.3 Hladiny akustických veličin.....	15
1.3.1 Hladina akustického tlaku.....	16
1.3.2 Hladina akustické intenzity.....	17
1.3.3 Hladina akustického výkonu.....	17
1.4 Popis akustických polí.....	17
1.4.1 Volné pole.....	19
1.4.2 Difúzní pole	19
1.5 Mapování akustických polí	19
1.5.1 Beamforming	19
1.5.2 Akustická holografie v blízkém poli.....	20
1.5.3 Akustická holografie v časové oblasti	21
1.6 Měření pomocí sondy intenzity.....	21
1.6.1 Intenzitní sonda.....	21
1.6.2 Princip měření.....	23
1.6.3 Frekvenční omezení	24
1.6.4 Směrová citlivost sondy.....	26
1.6.5 Kalibrace intenzitní sondy	27
1.7 Metody měření pomocí sondy intenzity.....	28
1.7.1 Metoda měření v bodech.....	29
1.7.2 Metoda měření skenováním.....	30
2. Experimentální část	31
2.1 Testovaný objekt	31
2.2 Popis měřícího zařízení	33
2.3 Tvorba a popis mřížkové osnovy	34

2.4	Popis měření.....	34
2.5	Zpracování výsledků měření a konturové grafy.....	37
2.6	Vyhodnocení měření mapováním akustické intenzity	38
2.6.1	Varianta A – Distanční vložka 50 mm.....	40
2.6.2	Varianta A – Distanční vložka 12 mm.....	43
2.6.3	Varianta B – Distanční vložka 50 mm.....	46
2.6.4	Varianta B – Distanční vložka 12 mm.....	49
2.6.5	Varianta C – Distanční vložka 50 mm.....	52
2.6.6	Varianta C – Distanční vložka 12 mm.....	55
2.7	Zhodnocení měření a výsledků	58
2.7.1	Měření pomocí intenzitní sondy	58
2.7.2	Zhodnocení výsledků měření.....	59
	Závěr	61
	Seznam zdrojů.....	62

Seznam použitých symbolů a jednotek

f	Frekvence	[Hz]
p	Akustický tlak	[Pa]
p_a	Barometrický tlak	[Pa]
p_0	Referenční hodnota akustického tlaku	[Pa]
\vec{u}	Akustická rychlost	[m·s ⁻¹]
c	Rychlost šíření zvuku	[m·s ⁻¹]
\vec{I}	Akustická intenzita	[W·m ⁻²]
φ	Fázový posun	[-]
r	Vzdálenost	[m]
λ	Vlnová délka	[m]
W	Akustický výkon	[W]
\vec{dS}	Element plochy	[m ²]
L_p	Hladina akustického tlaku	[dB]
L_I	Hladina akustické intenzity	[dB]
I_0	Referenční hodnota akustické intenzity	[dB]
L_W	Hladina akustického výkonu	[dB]
W_0	Referenční hodnota akustického výkonu	[dB]
ρ	Hustota prostředí	[kg·m ⁻³]
v_r	Akustická rychlost ve směru r	[m·s ⁻¹]
M	Zatěžovací krouticí moment	[Nm]
n	Otáčky motoru	[min ⁻¹]
δ_{pI}	Index tlak-intenzita	[dB]
δ_{pI0}	Index zbytkové intenzity	[dB]

Úvod

Lokalizace hlavních zdrojů hluku patří v současné době k důležitým aspektům diagnostiky nejen ve strojírenství, ale i ostatních oborech lidské činnosti. Při vývoji a analýze různých produktů je ve většině případech výrobek podroben důkladnému měření akustických veličin a jejich hladin. Toto zkoumání slouží ke zjištění jakosti výrobku, či jeho vlivu na pracovní prostředí.

S vysokým nárůstem automobilové dopravy se neustále zvyšuje hlučnost v životním prostředí, což s sebou přináší negativní důsledky i na zdraví obyvatel. Hluk se šíří na velké vzdálenosti. Působí od jednoho, nebo více zdrojů a tím ovlivňuje velké množství obyvatel. Z tohoto důvodu vzniká nárok na jeho snižování a regulaci. Redukce hlučnosti probíhá různými způsoby, jak přímou redukcí hluku ve strojích, tak i izolačními metodami.

Tato bakalářská práce se věnuje problematice mapování akustické intenzity pomocí intenzitní sondy. Ta je významná díky její univerzálnosti, neboť dovoluje měření v běžných pracovních podmínkách. To znamená za přítomnosti stálého hluku na pozadí, i měření v blízkém poli. Kromě využití na tvorbu intenzitních map je také důležitá k lokalizaci hlavních zdrojů hluku, nebo ke stanovení celkového akustického výkonu.

Potřeba měření akustické intenzity je v technické oblasti velmi dobře známa a nachází proto široké spektrum uplatnění.

1. Teoretická část

V této části bakalářské práce je uceleným způsobem zpracována teorie týkající se měření zvuku a vymezení základních akustických veličin. Dále je zde shrnuta problematika akustických polí a metodika měření intenzitní sondou.

1.1 Základní pojmy

1.1.1 Definice zvuku a hluku

Zvuk definujeme jako mechanické vlnění pružného prostředí, které je schopno vyvolat sluchový vjem. Toto vlnění se nachází v kmitočtovém rozsahu normálního lidského sluchu. Frekvenční pásmo lidského sluchového orgánu je v intervalu mezi 20 Hz – 20 kHz. Frekvence zvukového vlnění, která je nižší než 20 Hz se nazývá infrazvuk, zatímco frekvence přesahující 20 kHz se nazývá ultrazvuk. Podrobněji můžeme zvukové vlnění popsat jako jakékoliv mechanické vlnění, které při šíření látkou vyvolá působení napětí mezi sousedními objemovými elementy za vzniku jejich pružných deformací. [1]

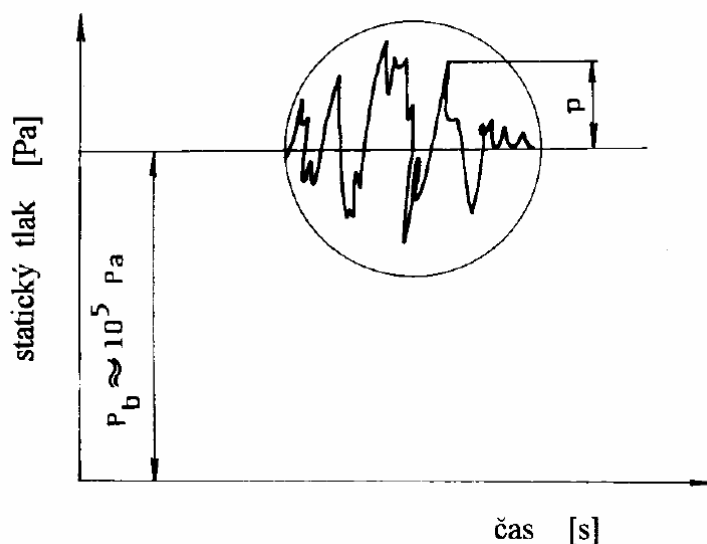
Hluk je označení každého nežádoucího zvuku ve frekvenčním pásmu, který dokáže vyvolat nepříjemný, nebo rušivý vjem, v nejhroším případě poškození lidského zdraví. Jeho účinky na člověka lze hodnotit dobou trvání, nebo intenzitou. [1]

Neexistuje jednoznačná definice hluku. Pojem nepříjemný, nebo rušivý vjem je velice subjektivní, jelikož každé lidské ucho vykazuje jinou citlivost vůči rozličným zdrojům hluku. Hluk, který vzniká v místech proudění kapaliny, nebo plynu nazýváme aerodynamický. Vytváření hluku pomocí kmitů pevných těles označujeme jako hluk mechanický. Hluk je složen z různých tónů v kmitočtech, které nejsou celočíselným násobkem původního. [2]

1.2 Akustické veličiny

1.2.1 Akustický tlak

Akustický tlak p [Pa] je skalární veličina, která má charakter vlnění. Jedná se o tlak, který je střídavý a superponovaný barometrickému tlaku. To znamená, že ho vnímáme jako odchylku od tlaku v klidovém stavu v daném prostředí. Časový průběh celkového statického tlaku ve vzduchu je uvedený na obr. č. 1, kde p_b značí hodnotu barometrického tlaku. Hodnota akustického tlaku, kterou je schopno lidské ucho postřehnout je $2 \cdot 10^{-5}$ Pa a nazýváme ji práh slyšitelnosti. Tato hodnota je brána jako vztážná hodnota akustického tlaku a označujeme ji p_0 . [1]



Obr. č. 1: Časový průběh celkového statického tlaku ve vzduchu [5]

1.2.2 Akustická rychlost

Akustická rychlost \vec{u} [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] je vektorová veličina, která má vlnový charakter. Jedná se o rychlost, kterou částice daného prostředí vlivem akustického tlaku kmitají kolem své rovnovážné polohy ve směru šíření zvukových vln. Tato veličina je fyzikálně rovnocenná akustickému tlaku. Proto je z důvodu složitých principů jejího měření používán k popisu vlastností zvukového pole právě akustický tlak.

Akustická rychlost nabývá hodnot v rozmezí $5 \cdot 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (práh slyšitelnosti) až $1,6 \cdot 10^{-1} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (práh bolestivosti). Nelze ji zaměnit s rychlostí šíření zvuku $c [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$, která vyznačuje, za jak dlouho zvuková vlna urazí v daném prostředí vzdálenost 1m. [1][3]

1.2.3 Akustická intenzita

Akustická intenzita $\vec{I} [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$ je vektorová veličina, kterou definujeme jako tok akustické energie, která prochází jednotkovou plochou kolmo na směr šíření zvukové vlny. Jedná se o energetickou veličinu, která má vlnový charakter. Je nepřímo měřitelná a určujeme ji pomocí akustického tlaku p a rychlosti \vec{u} .

$$\vec{I} = p \cdot \vec{u} \quad (1.1)$$

Akustická intenzita nabývá hodnot v rozmezí 10^{-12} - $10^3 [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$. Jelikož tlak i a rychlost u mají vlnový charakter, definujeme výslednou intenzitu v závislosti na jejich fázovém posunu φ . V tomto vzorci jsou tlak i a rychlost nahrazeny rotujícími fázory.

$$I = p \cdot u \cdot \cos \varphi \quad (1.2)$$

kde

$$\text{tg} \varphi = \frac{\lambda}{2\pi r} \quad (1.3)$$

r – vzdálenost od zdroje zvuku [m]

λ – vlnová délka zvukové vlny [m]

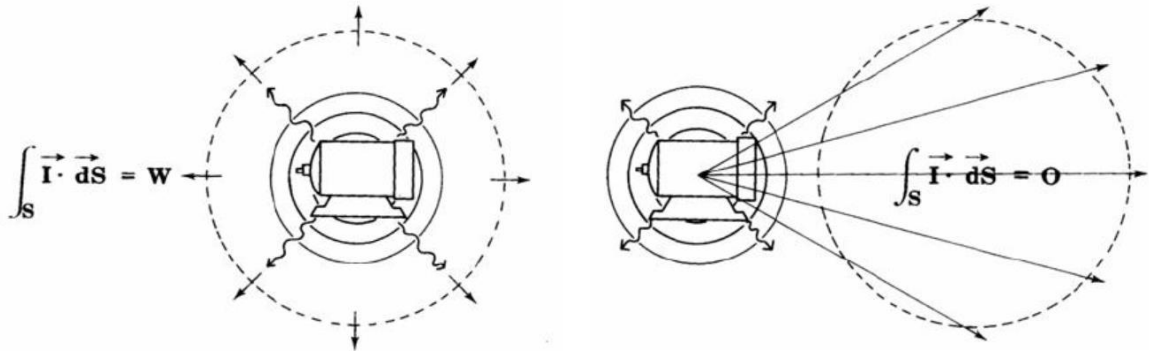
V praxi považujeme fázový úhel za nulový ve vzdálenosti větší, než je vlnová délka sledované zvukové vlny, tedy $r \geq \lambda$. [1][3]

1.2.4 Akustický výkon

Akustický výkon $W [W = \text{Watt}]$ je skalární veličina, která má vlnový charakter. Je měřítkem celkové akustické energie, která je vyzářena ze zdroje a projde myšlenou celkovou plochou za jednotku času. [4]

$$W = \int_{(S)} \vec{I} \cdot d\vec{S} \quad (1.4)$$

Akustický výkon podle vzorce (1.4) získáme integrací přes uzavřenou plochu, bez ohledu na to, jaké je uspořádání a typy zdrojů nacházejících se uvnitř této plochy. Jak je znázorněno na obr. č. 2, zdroje, které jsou vně této plochy, se do celkového akustického výkonu nezapočítávají.



Obr. č. 2: Akustický výkon uvnitř a vně měřené plochy [20]

1.3 Hladiny akustických veličin

Definice hladin akustických veličin plynou z Weber-Fechnerova zákona, ze kterého vyplývá, že akustický podnět, který se mění řadou geometrickou, je lidským sluchem vnímán řadou aritmetickou. To znamená, že násobky akustického signálu jsou uchem vnímány jako přírůstky. Tento převod geometrické řady na aritmetickou realizujeme pomocí funkce logaritmus. [1]

Platí:

$$L = \log \frac{X}{X_0} [B] \quad (1.5)$$

Kde L je hladina určité sledované akustické veličiny, X vyjadřuje měřenou akustickou veličinu a X_0 vyjadřuje vztažnou, neboli srovnávací hodnotu.

Vzhledem k tomu, že Bel [B] ve výsledném vztahu poskytuje velmi malý rozsah, pro praxi využíváme hodnotu 10krát menší – decibel [dB]. [3]

Definujeme takto:

$$L = 10 \cdot \log \frac{X}{X_0} [dB] \quad (1.6)$$

1.3.1 Hladina akustického tlaku

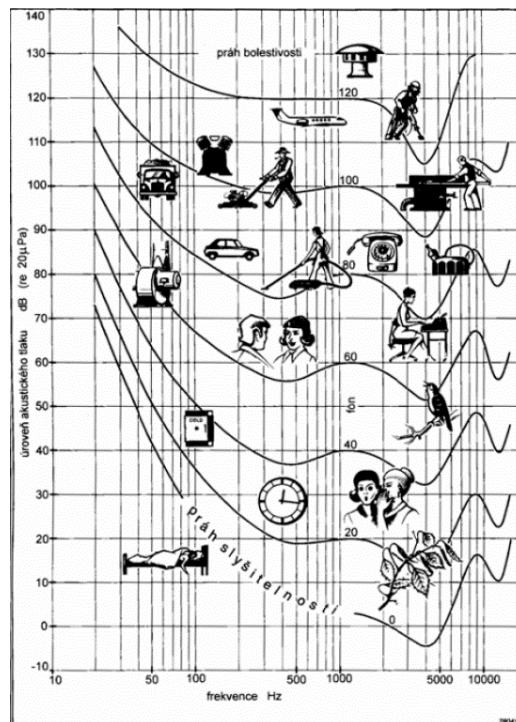
Hladina akustického tlaku je definována jako:

$$L_p = 10 \cdot \log \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \cdot \log \frac{p}{p_0} \text{ [dB]} \quad (1.7)$$

Referenční hodnota akustického tlaku je $p_0=2 \cdot 10^{-5}$ Pa. Příslušnou hodnotu akustického tlaku značíme jako p . Výsledná hladina akustického tlaku při této hodnotě je 0 dB. Při desetinásobném zvýšení akustického tlaku se jeho hladina zvýší o 20 dB.

Hladinu akustického tlaku je nutno vztahovat k určitému kmitočtu, nebo pásmu kmitočtů, jinak výsledná hladina nevypovídá nic o poloze signálu na kmitočtové ose. [5]

Jelikož lidské ucho vnímá při stejné hladině akustického tlaku odlišně různé kmitočty zvuku, definujeme proto různé křivky hladin stejné hlasitosti. Graf znázorňující běžné vybrané zdroje zvuku v závislosti na hladinách akustického tlaku a kmitočtu je znázorněn na obr. č. 3. Z grafu lze vyčíst to, že lidské ucho je nejcitlivější v rozmezí 2 kHz až 4 kHz, neboť v tomto spektru je vnímání lidského ucha intenzivnější i při nižších hodnotách hladin akustického tlaku.



Obr. č. 3: Křivky hladin stejné hlasitosti [20]

1.3.2 Hladina akustické intenzity

Hladina akustické intenzity je definována jako:

$$L_I = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0} \text{ [dB]} \quad (1.8)$$

Referenční hodnota akustické intenzity je $I_0=10^{-12} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Příslušnou hodnotu akustické intenzity značíme jako I . Tato hodnota odpovídá akustickému signálu o kmitočtu 1 kHz, což je nejmenší hodnota akustické intenzity, kterou je možné vnímat lidským sluchem. [6]

1.3.3 Hladina akustického výkonu

Hladina akustického výkonu je definována jako:

$$L_W = 10 \cdot \log \frac{W}{W_0} \text{ [dB]} \quad (1.9)$$

Referenční hodnota akustického výkonu je $W_0=10^{-12} \text{ W}$. Příslušná hodnotu akustického výkonu je značena jako W . Hodnota hladiny akustického výkonu je nezávislá na podmínkách ve kterých je určena a slouží především k popisu a srovnání hlučnosti akustického zdroje. [6]

1.4 Popis akustických polí

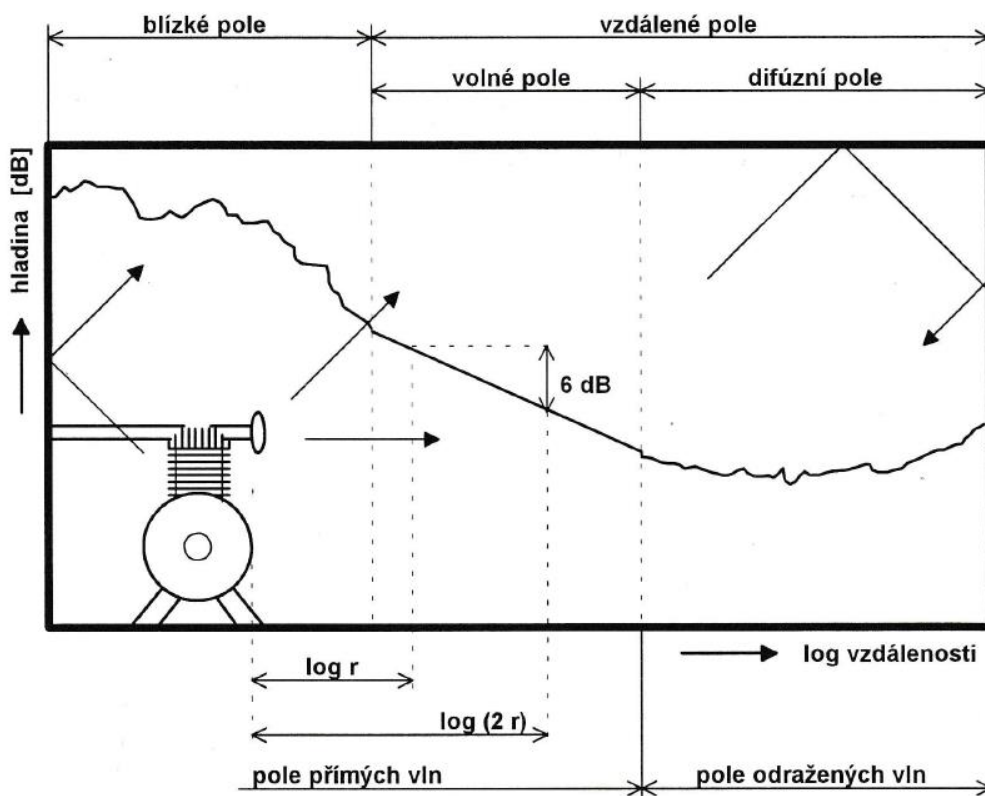
Pod pojmem akustické pole se rozumí prostor, ve kterém se šíří zvukové vlny. Popis reálného akustického prostředí je velice složitý. V reálném prostředí se vyskytuje velké množství překážek, zdrojů, nebo odrazivých, pohltivých a neprůzvučných ploch. Tyto prvky mají vliv na šíření zvukové vlny.

Pro účely praxe proto využíváme určitého zjednodušení, které reálné zvukové pole interpretuje jako kombinaci dvou extrémních poloh – *pole volného* a *pole difúzního*. Tyto pole se nachází dále od zdroje zvuku, proto je zařazujeme do pole vzdáleného. V těchto polích existuje jednoduchý vztah mezi akustickým tlakem a akustickou rychlostí a stačí zde měřit pouze jednu z těchto dvou veličin.

Ve velmi blízkém okolí zdroje zvuku, to znamená ve vzdálenosti, která se řádově rovná vlnové délce zvuku, neexistuje jednoduchá závislost mezi akustickým tlakem a akustickou rychlostí. U této oblasti hovoříme o blízkém poli zvuku. Pro měření v tomto poli je nutné zjišťovat akustický tlak i akustickou rychlost a jejich společným násobkem lze stanovit velikost akustické intenzity.

Další rozdělení akustických polí je na pole přímých vln, kde převažují vlny, které se šíří směrem od zdroje a pole odražených vln, kde se vlny šířící od zdroje kombinují s vlnami odraženými od stěny. Přehled zvukových polí se nachází na obr. č. 4.

Pro volbu správné metody měření je důležité, zda se nacházíme v poli přímých, nebo odražených vln, nebo je-li v tomto místě blízké, nebo vzdálené pole. U základních metod je vyžadováno měření ve vzdáleném poli a současně v poli přímých vln, to znamená, že musí být dodržena dostatečná vzdálenost od zdroje a zároveň malý podíl odraženého zvuku. [1][7]



Obr. č. 4: Akustická pole v uzavřené místnosti [1]

1.4.1 Volné pole

Jedná se o pole, kde se zvukové vlny šíří od bodového zdroje v kulových vlnoplochách. V tomto poli nedochází k odrazům a pohlcování, nebo deformaci zvukových vln. Vektor intenzity zvuku leží na přímce, která prostupuje zdrojem. Při zdvojnásobení vzdálenosti od zdroje poklesne hladina akustického tlaku o 6 dB. [1]

1.4.2 Difúzní pole

Jedná-li se o čistě difúzní pole, ve kterém se vyskytují mnohonásobné odrazy zvukových vln, nelze v tomto poli určit, jakým směrem se zvuková energie šíří. U neznámého zdroje zvuku není možná jeho lokalizace. Jestliže je zdroj známý, nelze najít cesty vyzařování zvuku. Směr šíření je náhodný a měnící se v čase. [1]

1.5 Mapování akustických polí

K získání podrobných informací o hluku vyzářeném testovaným objektem, lokalizaci hlavních, nebo vedlejších zdrojů hluku, získání jednotlivých akustických veličin využíváme metody mapování akustických polí. V následujících kapitolách je uveden detailní popis vybraných metod, které jsou použity k mapování.

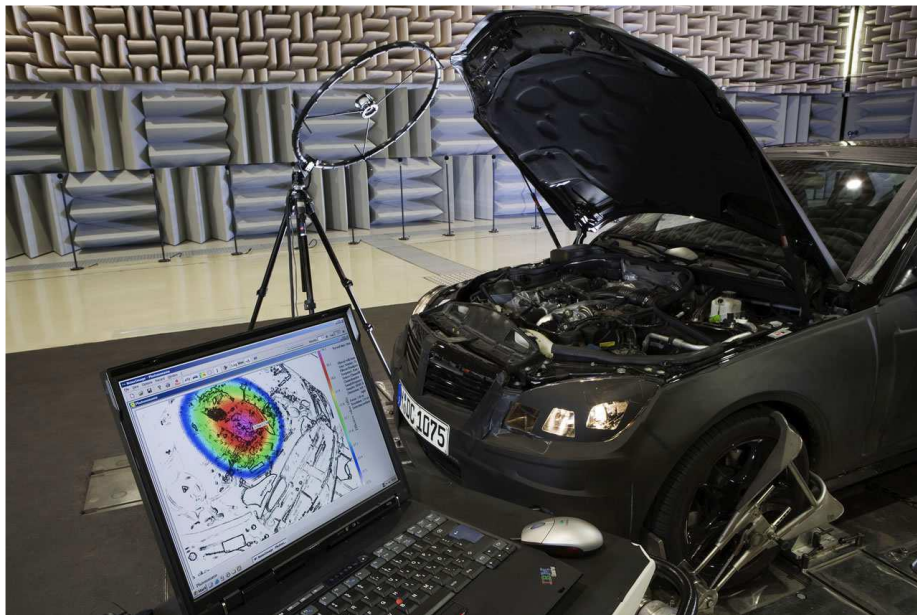
1.5.1 Beamforming

Jedná se o metodu, která se používá pro měření ve střední, nebo větší vzdálenosti od zdroje hluku. Metoda využívá zpracování akustických signálů z mikrofonního pole, které je uspořádáno do vhodně zvoleného geometrického tvaru. Beamforming je využíván k mapování bodového, či prostorového rozložení zdrojů hluku. Ukázka měření pomocí beamformingu se nachází na obr. č. 5.

Výhodou této metody je rychlost samotného měření, jelikož signály ze všech kanálů mikrofonního pole jsou zachyceny a uloženy najednou. Další výhodou je frekvenční rozsah měření, neboť je umožněno měřit frekvence, které jsou větší, než 20 kHz.

Metodu je možné využít k mapování velkých objektů, jelikož úhel záběru dosahuje hodnoty až 60° . K dalším výhodám patří dobré rozlišení, které poskytuje podobné informace o akustickém poli obklopující daný objekt.

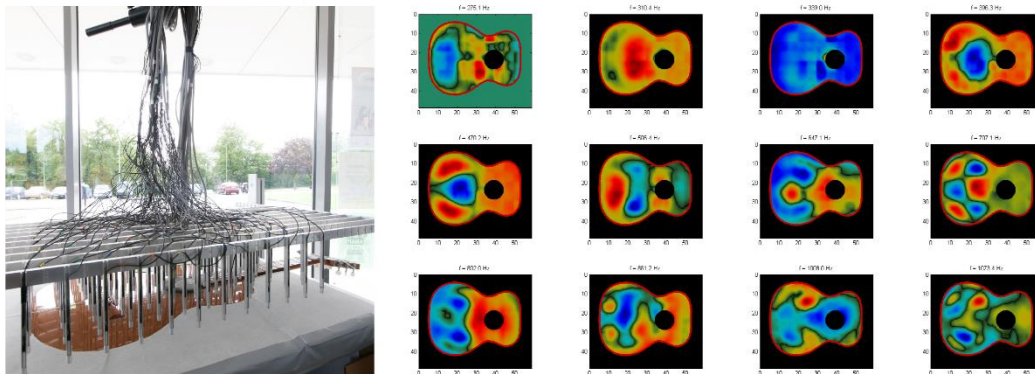
Nevýhodou metody je multikanálový systém a zpracování velkého objemu dat v reálném čase, což klade velké nároky na vyhodnocovací techniku. Další nevýhodou je dolní frekvenční omezení 1kHz. Pod touto frekvencí dochází ke ztrátě prostorového rozlišení. [10][21]



Obr. č. 5: Metoda mapování pomocí beamformingu [22]

1.5.2 Akustická holografie v blízkém poli

Akustická holografie v blízkém poli, neboli NAH (Nearfield Acoustic Holography) označuje metodu, která využívá měření v co nejmenší vzdálenosti vůči zdroji, nebo ploše, kterou analyzujeme. Metoda využívá výskytu tzv. evanescentních vln, které se vyskytují v těsné blízkosti povrchu testovaného objektu. Tyto vlny se nachází pouze v blízkém akustickém poli a jejich amplituda se vzdáleností od zdroje klesá. Metoda slouží k měření akustických veličin a je zde využito mikrofonních polí, které mají nejčastěji tvar čtverce, nebo obdélníku. Podle tvaru vlnoploch dělíme metodu NAH na planární, cylindrickou a sférickou. [10][21] Ukázka měření kytarové ozvučnice pomocí akustické holografie v blízkém poli je znázorněna na obr. č. 6.



Obr. č. 6: Metoda mapování pomocí akustické holografie [23]

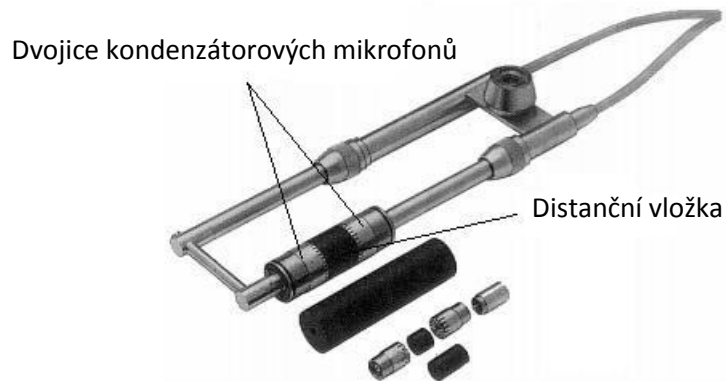
1.5.3 Akustická holografie v časové oblasti

Tato metoda využívá prostorové mapování akustického pole s časovým rozlišením. Je závislá na vzorkovací frekvenci použitého převodníku. Při tomto měření lze pomocí mikrofonního pole a snímače otáček provést různé analýzy testovaného objektu s časovým rozlišením. Během měření není kladen důraz na stacionární chod zdroje. [21]

1.6 Měření pomocí sondy intenzity

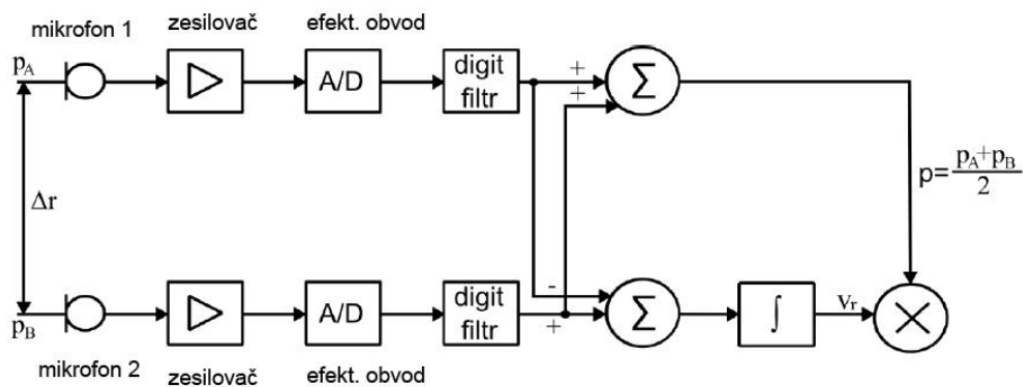
1.6.1 Intenzitní sonda

Intenzitní sonda je měřící zařízení složené ze dvou kondenzátorových mikrofonů, které jsou ve většině případů umístěny čely proti sobě. Při tomto umístění dochází ke zlepšení fázové charakteristiky a frekvenční odezvy. K dalším typům patří uspořádání vedle sebe, zády k sobě, nebo uspořádání za sebou. Mezi mikrofony je umístěna distanční vložka, která vymezuje vzdálenost mezi mikrofony na základě frekvenčního rozsahu měření. Délka distanční vložky se pohybuje mezi 6 až 50 mm. Větší velikost distanční vložky se uplatňuje pro nižší frekvenční rozsah a naopak. Z hlediska velikosti mikrofonů se používají půlpalcové pro měření nižších frekvencí a pro měření vyšších frekvencí se používají mikrofony čtvrtpalcové. [8] Na obr. č. 7 je znázorněna intenzitní sonda s různými velikostmi distančních vložek a mikrofonů.



Obr. č. 7: Intenzitní sonda [13]

Výsledek měření lze zaznamenat do map akustické intenzity, nebo pomocí změřené intenzity určit celkový akustický výkon zdroje. K výhodám metody patří možnost měření v provozních podmínkách a snadná přenositelnost zařízení. Jelikož intenzita patří mezi vektorové veličiny, je možné provádět měření v jakémkoliv zvukovém poli. Směrová citlivost sondy způsobuje, že největší citlivosti je dosahováno ve směru os mikrofonů. To znamená, že akustické signály přicházející kolmo na osu mikrofonů nebudou sondou zaznamenány, jelikož signály na obou mikrofonech budou shodné a výsledná intenzita bude nulová. K nevýhodám patří především značná časová náročnost měření. Dále frekvenční omezení, které je dáno vzdáleností mezi mikrofony a nakonec potřeba přesného měřicího vybavení se skutečností, že měření lze provést jen na zařízeních, které jsou ve stacionárním chodu. [9] Blokové schéma intenzitní sondy je znázorněno na obr. č. 8.



Obr. č. 8: Blokové schéma intenzitní sondy [10]

1.6.2 Princip měření

Měřením akustického tlaku získáme hodnotu akustické intenzity. Metoda měření pomocí intenzitní sondy je založena na měření akustického tlaku ve dvou blízkých bodech. Jedná se o měření tlakového gradientu, neboli tlakové difference, která je úměrná akustické rychlosti. [10]

Princip měření je vyjádřeno vzorcí, které plynou z Eulerovy rovnice pro šíření vlny ve směru r . Gradient akustického tlaku se v tomto případě nahrazuje diferencíálem (viz obr. č. 9).

Akustickou rychlost můžeme vyjádřit rovnicí:

$$v_r = \frac{1}{\rho} \int_0^T \frac{\partial p}{\partial r} dt \approx -\frac{1}{\rho} \int_0^T \frac{(p_B - p_A)}{\Delta r} dt \approx -\frac{1}{\rho \Delta r} \int_0^T (p_B - p_A) dt \quad (1.10)$$

Kde p_A a p_B vyjadřují okamžité hodnoty akustických tlaků, které jsou měřeny na mikrofonech ve vzdálenosti Δr jejich akustických středů. Symbol ρ vyjadřuje hustotu prostředí.

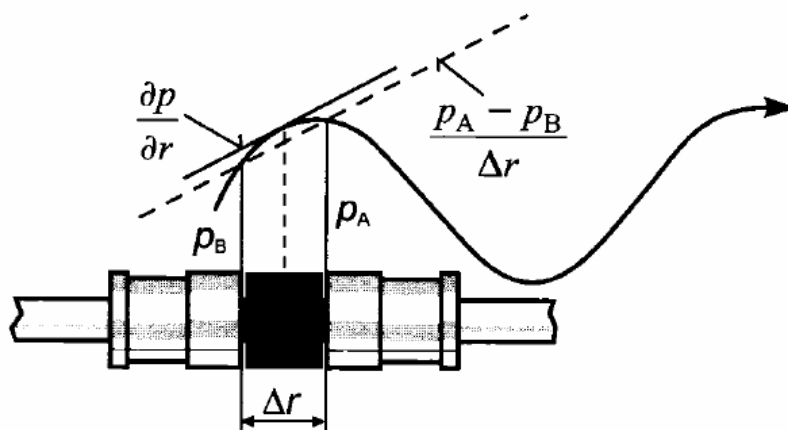
Akustický tlak uvažujeme jako aritmetický průměr z tlaků na obou mikrofonech, neboli v místě A a B:

$$p \approx \frac{p_A + p_B}{2} \quad (1.11)$$

Intenzita zvukového pole v reálném čase je vyjádřena jako:

$$I = \frac{(p_A + p_B)}{2\rho\Delta r} \int_0^T (p_A - p_B) dt \quad (1.12)$$

[11]

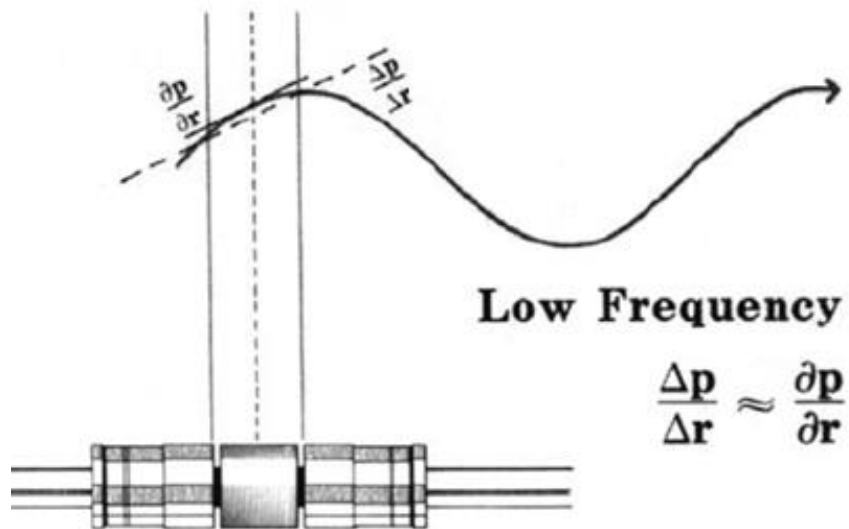


Obr. č. 9: Měření tlakového gradientu [11]

1.6.3 Frekvenční omezení

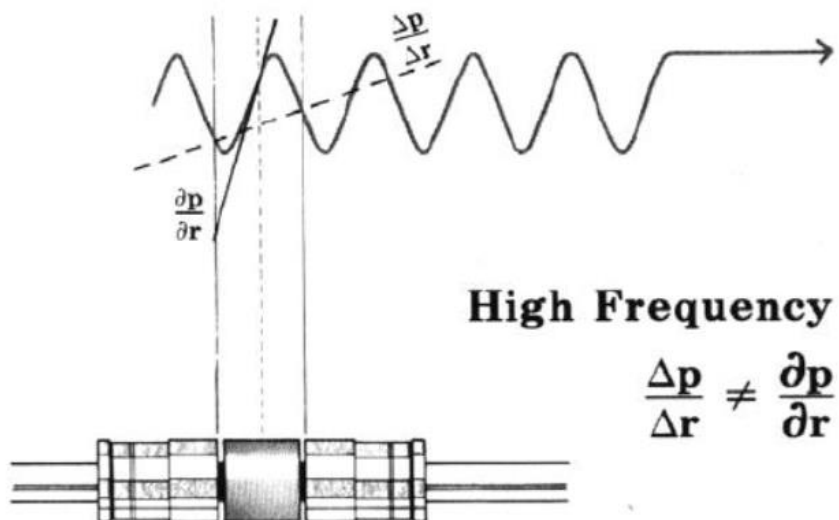
Z důvodu použití aproximací v odvozených vztazích, musíme pro intenzitní sondu zavést její frekvenční omezení. Toto omezení se týká jak nízkých, tak vysokých frekvencí.

Omezení na nízkých frekvencích se týká případu, kdy narůstá délka vlny se snižující se frekvencí (viz obr. č. 10). Dochází ke snížení fázového rozdílu tlaků, které jsou přijímány oběma měřícími mikrofony. Pro nízké frekvence tedy platí, že gradient akustického tlaku závisí pouze na přesnosti fázové shody mezi kanály.



Obr. č. 10: Frekvenční omezení na nízkých frekvencích [8]

Omezení na vysokých frekvencích platí pro situaci, kdy dochází k poklesu délky vlny, a zároveň se zvyšující se frekvencí (viz obr. č. 11). Z důvodu konstantní vzdálenosti mezi měřícími mikrofony, která je vymezena distanční vložkou, dochází k tomu, že spojnice obou mikrofónů, která vyjadřuje gradient akustického tlaku, nesouhlasí se směrnicí tečny a dochází k výrazné frekvenční chybě. Toto omezení lze korigovat vhodnou volbou distanční vložky. [11][12]



Obr. č. 11: Frekvenční omezení při vysokých frekvencích [8]

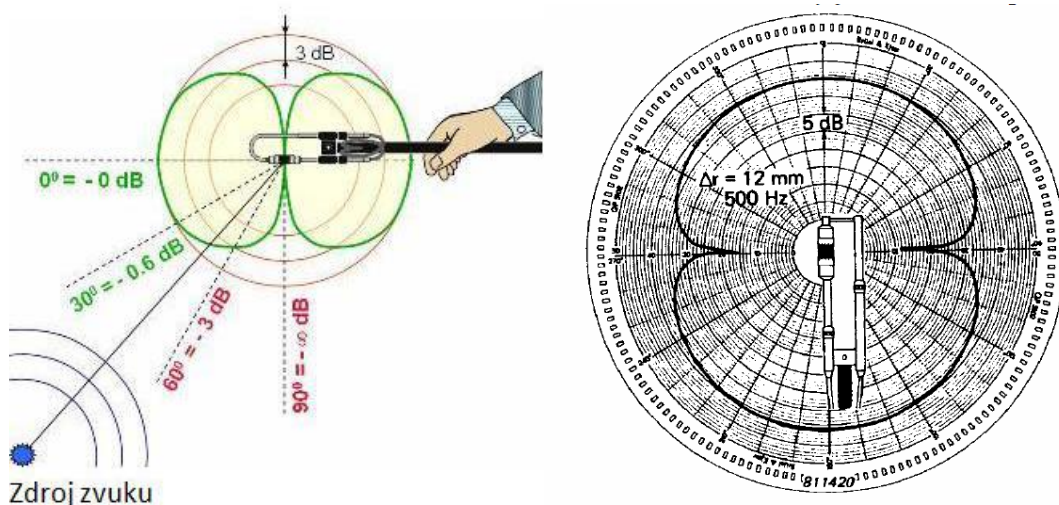
Pro efektivní využití intenzitní sondy bylo pro jednotlivé velikosti distančních vložek stanoven horní frekvenční limit. Nad tímto limitem dochází k výraznému nárůstu chyb. [1]

vzdálenost mikrofonů Δr [mm]	frekvence [Hz]
6	10k
8,5	8k
12	5k
50	1,25k

Obr. č. 12: Tabulka vysokofrekvenčního ohraničení pro jednotlivé velikosti distančních vložek [1]

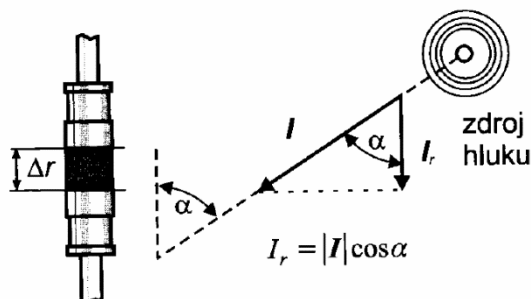
1.6.4 Směrová citlivost sondy

Na obr. č. 13 je znázorněna směrová citlivost sondy. Pro maximální citlivost intenzitní sondy je nutno nasměrovat sondu ve směru os mikrofonů přímo ke zdroji zvuku. Je-li sonda nasměrována kolmo ke zdroji zvuku, to znamená kolmo na směr os mikrofonů, nedochází k rozdílu vstupních akustických tlaků a výsledná intenzita tak bude nulová. [11]



Obr. č. 13: Směrová citlivost intenzitní sondy [10] [18]

Výsledná směrová charakteristika sondy má kosinusový charakter, kde α značí úhel mezi osou sondy a směrem vektoru intenzity zvukové vlny, která je vyslaná směrem od zdroje. [10]



Obr. č. 14: Měření intenzity při úhlu α od kolmého směru [10]

1.6.5 Kalibrace intenzitní sondy

Provedení přesného měření vyžaduje kalibraci zvukoměrné techniky před měřením a po jeho skončení. Při časově náročném měření je kalibrace v závislosti na podmínkách vhodná i v jeho samotném průběhu. Důvodem kalibrace je nastavení přesnosti výsledků měření. [3]

Při kalibraci intenzitní sondy je kladen důraz na maximální shodu mezi přenosovými a fázovými funkcemi obou mikrofonních kanálů. Je-li sonda umístěna v poli tvořeném rovinnou postupnou vlnou tak, že osa mikrofonů je rovnoběžná na směr šíření zvuku, poté předpokládáme, že hladina akustické intenzity L_I bude rovna hladině akustického tlaku L_p . Rozdíl mezi naměřenými hladinami, neboli rozdíl mezi jednotlivými kanály charakterizujeme pomocí *indexu tlak-intenzita*, zkráceně *p-I index*.

$$\delta_{pI} = L_p - L_I \text{ [dB]} \quad (1.14)$$

Umístění sondy v daném poli zvolíme tak, že směr osy mikrofonů bude kolmý na směr šíření zvuku. Tím pádem by složka intenzity měla nabývat v tomto směru nulové hodnoty a hladina intenzity hodnoty mínus nekonečno. V reálném případě nastává situace, kdy se naměřená hladina bude lišit o jednotky až desítky dB. Příčinou tohoto stavu je rozdíl mezi kanály, který je měřícím systémem vyhodnocen jako nenulový gradient tlaku a výsledkem je „zbytková intenzita“. Tento rozdíl mezi hladinami nazýváme indexem zbytkové intenzity a značíme ho δ_{pI0} . [15]

Kalibrace se provádí pomocí kalibrátoru, který má speciální tlakovou spojku, kterou je možné provést kalibraci obou snímacích mikrofonů současně pomocí shodného akustického signálu a odvodit tak index zbytkové intenzity. Jelikož zbytková intenzita značně ovlivňuje fázovou chybu, je její minimální hodnota pro měřící zařízení definována IEC normou.

V malém prostoru uvnitř kalibrátoru působí na mikrofony širokopásmový zdroj šumu, nebo pomocí tlakové spojky kalibrátoru simulujeme rovinnou akustickou vlnu ve volném poli, a v tomto případě směrová charakteristika musí odpovídat ideální kosinové větě v zadané toleranci. Nejdůležitějším parametrem při měření je fázová přesnost. Podle výsledku testu a zjištění indexu zbytkové intenzity, zajišťujeme nastavení citlivosti obou kanálů měřící karty podle daných parametrů dostupného zařízení. [14] [24] Na obr. č. 15 a obr. č. 16 jsou příklady kalibrační techniky od firmy Brüel & Kjær.



Obr. č. 15: Kalibrátor typu 3541-A [14]

Obr. č. 16: Kalibrátor typu 4297 [14]

1.7 Metody měření pomocí sondy intenzity

Při měření lze postupovat dvěma způsoby, a to měřením v bodech a metodou skenování. Tyto metody nám pomohou stanovit plošnou mapu akustické intenzity, nebo určení celkového akustického výkonu zdroje. Měřící plocha je obvykle ve tvaru kvádrů, krychle, či polokoule. Při využití jakékoliv měřící plochy je nutné dodržet umístění všech měřících bodů ve stejné vzdálenosti od zdroje.

Výhody měření akustické intenzity v měřících plochách plynou z její definice. Jelikož akustická intenzita je vektorovou veličinou a stanovuje tok akustické energie

přes danou plochu, je měření méně citlivé na okolní zdroje zvuku. Pro dosažení lepší přesnosti měření je potřeba zvýšit počet měřících bodů. [1] [15]

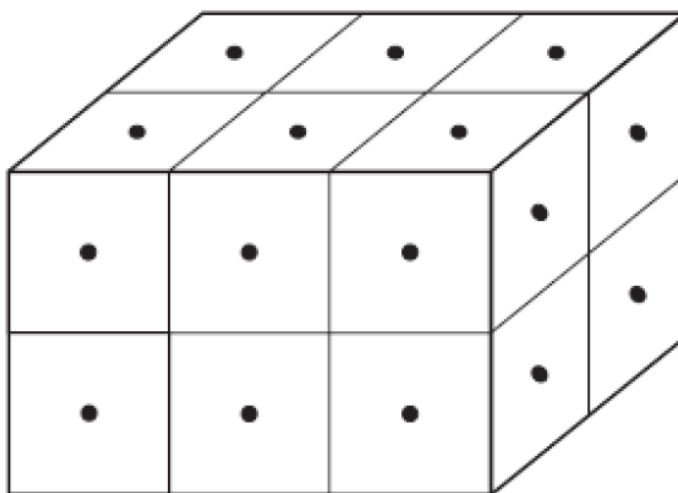
1.7.1 Metoda měření v bodech

U tohoto typu měření je měřící rovina rozdělená na systém menších, stejně velkých segmentů, na kterých je měřena hodnota akustické intenzity. Při měření je intenzitní sonda orientována kolmo na plochu. Sonda se umístí do daného segmentu a po přesně daný časový úsek se provede měření akustické intenzity. Takto se postupuje i u ostatních segmentů měřící roviny. Pro usnadnění měření lze využít pomocnou mřížkovou osnovu, která je vytvořena drátem, či provázkem.

Výhodou metody je její jednoduchost a opakovatelnost. Výsledky v daných měřících bodech lze snadno ukládat ve formě matice a následně dále zpracovávat. Použití bodové metody je vhodné pro získání komplexních informací o zkoumaném objektu a lokalizaci jeho hlavních zdrojů hluku.

Nevýhody metody plynou z výběru velikosti jednotlivých segmentů a vzdálenosti jednotlivých měřících bodů. Může dojít k situaci, kdy se budou významné zdroje hluku nacházet v prostoru mezi měřícími body a tím dojde k poklesu jejich vlivu na celkovou intenzitu hluku. Další nevýhodou je časová náročnost měření. [1][8][15]

Příklad měřících ploch je zobrazen na obr. č. 17.



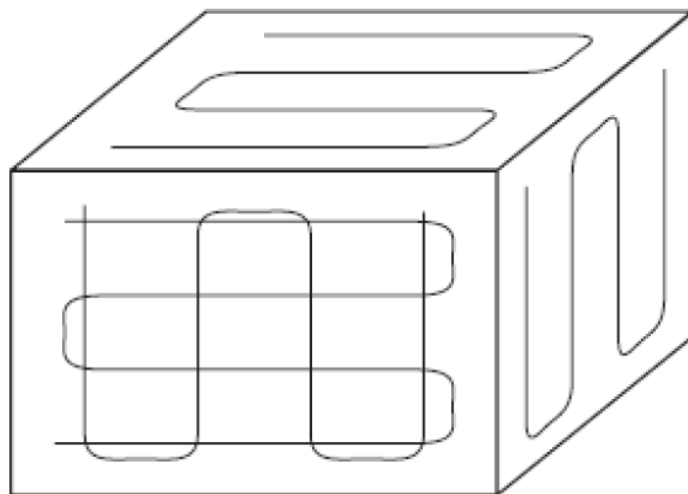
Obr. č. 17: Metoda měření v bodech [15]

1.7.2 Metoda měření skenováním

Měření vyžaduje rozdělení měřicí roviny na pás o konstantní šířce, v rámci něhož se bude pohybovat intenzitní sonda. Měřicí rovina bývá obvykle čtvercového, nebo obdélníkového charakteru, z důvodu rovnoměrného pokrytí měřicími drahami. Při měření je nutno udržovat stálou rychlost pohybu a kolmou orientaci sondy. Metoda je založená na principu lineárního průměrování kolmé složky intenzity, kde plynulý pohyb sondy je zajištěn pomocí přídavného zařízení. Skenování probíhá ve vodorovném, i svislém směru.

Výhodou této metody je její přesnost. Při měření je velká pravděpodobnost, že sonda zaznamená všechny významné zdroje hluku. Metoda skenování se využívá pro získání mapy akustického výkonu.

Nevýhodou metody je omezení z hlediska horší reprodukovatelnosti výsledků. [1][8][15] Příklad měřících ploch je zobrazen na obr. č. 18.



Obr. č. 18: Metoda měření skenováním [15]

2. Experimentální část

V této části bakalářské práce je detailním způsobem zpracován popis a výsledky měření pomocí intenzitní sondy. Získané výsledky jsou převedeny do podoby akustických map. Dále je zde stručný popis měřeného objektu, měřícího zařízení a metod přípravy měření.

2.1 Testovaný objekt

Měření bylo prováděno na motoru Škoda 1,2 TSI, který je součástí koncernu Volkswagen. Jedná se o čtyřválcový, osmiventilový zážehový motor, který je přeplňován pomocí turbodmyhadla. Motor byl umístěn ve zkušebně Powertrain, která se nachází v laboratořích Katedry vozidel a motorů Technické univerzity v Liberci. Zkušebna Powertrain je znázorněna na obr. č. 19. U zařízení typu Powertrain se jedná o napojení motoru na motorovou brzdu. V tomto případě je výkonnostní tok motoru odváděn přes převodovku a diferenciál na poloosy, u nichž je brzdění prováděno nezávisle na sobě.

Motor Škoda 1,2 TSI o výkonu 77 kW viz obr. č. 20, byl vyvinut původně pro menší vozy koncernu VW, ale je dosazován i do větších vozů, jako je například Škoda Octavia. Tento motor byl zkonstruován za účelem tzv. “downsizingu“, což znamená, že pomocí menšího zdvihového objemu se z motoru získává maximální výkon při minimální spotřebě paliva. Technické zdokonalení motoru spočívá v důkladné optimalizaci výkonu při odlehčení konstrukce. Litinové vložky válců jsou zalaty do hliníkového bloku motoru. Další částí je hlava válců, která je taktéž hliníková. Jedná se o motor s rozvodem typu OHC. To znamená, že kromě ventilů je v hlavě válců umístěna i vačková hřídel. Pohon vačkové hřídele je realizován pomocí rozvodového řetězu, který je zajištěn pomocí plastových vodících lišt. Přeplňování motoru probíhá pomocí turbodmyhadla s elektricky ovládaným obtokovým ventilem a mezichladičem plnicího vzduchu, který je ochlazován chladicí kapalinou a integrován do sacího potrubí. Vstřikování paliva probíhá pomocí elektromagneticky ovládané vstřikovací jednotky a vstřikovacích ventilů. Vstřikovací tlak je regulován v rozmezí 4 až 12,5 MPa. Sací kanál má šroubovitý tvar, který slouží pro lepší usměrnění nasávaného vzduchu. [17] Parametry motoru jsou uvedeny v tabulce č. 1.



Obr. č. 19: Zkušebna Powertrain [16]



Obr. č. 20: Motor Škoda 1,2 TSI [17]

Tabulka 1: Parametry motoru Škoda 1,2 TSI [17]

Objem válce	1197 cm ³
Vrtání x zdvih	71 x 75,6 mm
Kompresní poměr	10:1
Maximální výkon	77 kW při 5000 min ⁻¹
Maximální točivý moment	175 Nm při 1500 – 3500 min ⁻¹
Palivo	Bezolovnatý benzin okt. č. 95

Motor byl před začátkem měření uveden do provozu za konstantních otáček $n=2500 \text{ min}^{-1}$ a zatěžovacího kroučícího momentu $M = 47,9 \text{ Nm}$ při zařazení třetího rychlostního stupně.

Pro měření intenzitní sondou byl motor uveden do stacionárního stavu. Měření probíhalo při nižších otáčkách, jelikož při zvýšených otáčkách stoupá teplota motoru a mohlo by dojít k poškození intenzitní sondy. Místnost, ve které bylo měření prováděno, nebyla z akustického hlediska příliš vhodná, neboť byla složena z velkého množství stěn, které nepohlcují hluk. Nemohlo být tedy vyloučeno ovlivnění měření od odražených akustických vln. Měření bylo podřízeno těmto dispozicím. Motor byl usazen s veškerým příslušenstvím pro jeho bezproblémový chod.

2.2 Popis měřícího zařízení

Měření bylo prováděno pomocí intenzitní sondy typu Brüel & Kjær 3599, která obsahuje vyměnitelné kondenzátorové mikrofony otočeny čely proti sobě s volitelnou délkou distanční vložky. Použité distanční vložky při měření a jejich frekvenční rozsahy s ohledem na jejich frekvenční omezení jsou uvedeny v tabulce č. 2.

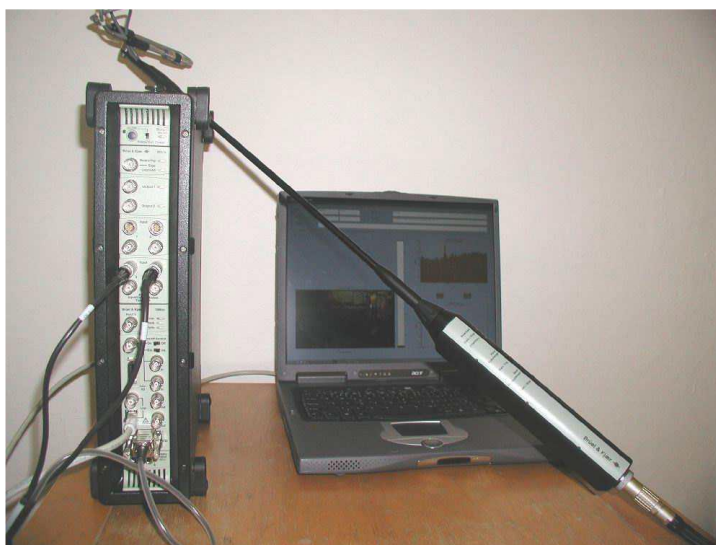
Tabulka 2: Velikost distanční vložky v závislosti na frekvenčním rozsahu měření [1]

Velikost distanční vložky	Frekvenční rozsah měření
12 mm	125 Hz – 5 kHz
50 mm	31,5 Hz – 1,25 kHz

K dalšímu příslušenství potřebnému při měření byl multianalyzátor Pulse, který umožňuje zpracovávat a sledovat výsledky měření v reálném čase. Zpracování výsledků probíhá několika způsoby analýzy současně, např. pomocí FFT analýzy, 1/n oktávovou analýzou (CPB analýzou), nebo analýzou celkových úrovní.

Výsledky byly zpracovány v softwarovém prostředí *Pulse Labshop*, který s předem nakonfigurovaným projektem umožnil export hodnot z měření.

Přehled měřícího zařízení je na obr. č. 21.

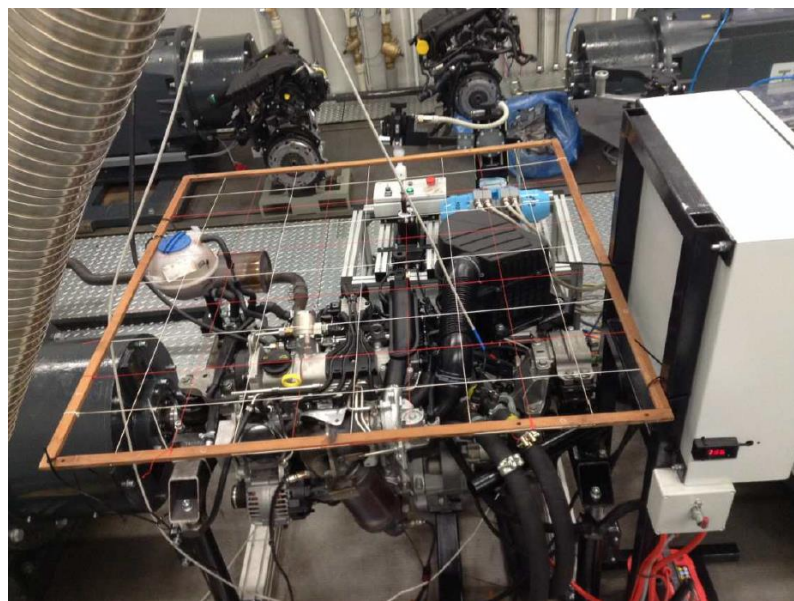


Obr. č. 21: Měřící zařízení pro měření akustické intenzity

2.3 Tvorba a popis mřížkové osnovy

Pro zjednodušení průběhu měření je dobré použít mřížkovou osnovu, pomocí které vymezíme segmenty, ve kterých bude probíhat měření. V daných segmentech se nachází body, ve kterých je umístěna intenzitní sonda. Mřížková osnovu byla vyrobena z dřevěného rámu čtvercového charakteru, ve kterém je vytvořena síť pomocí napnutých lanek s konstantními rozestupy, aby bylo zaručeno rovnoměrné rozložení jednotlivých segmentů osnovy. Pro dané měření akustické intenzity bylo vhodné využít metodu měření v bodech popsanou v kapitole 1.7.1.

Měření bylo prováděno ve třech rovinách kolem testovaného objektu s umístěnou mřížkovou osnovou v předem definované vzdálenosti. Umístění testovaného objektu s uchycenou mřížkovou osnovou je znázorněno na obr. č. 22.



Obr. č. 22: Testovaný objekt s uchycenou mřížkovou osnovou

2.4 Popis měření

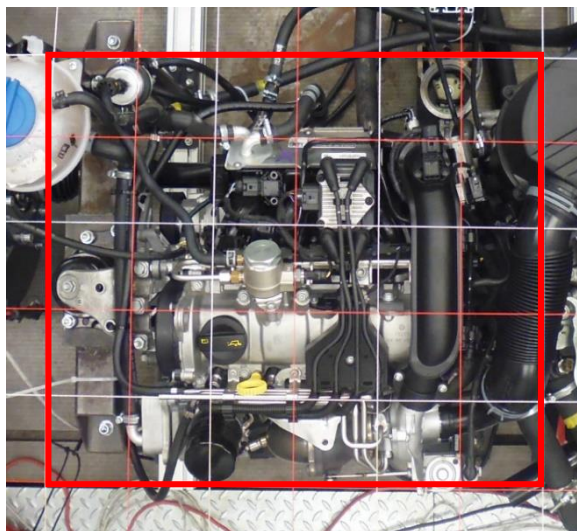
Měření bylo provedeno pod odborným dohledem Ing. Jana Nováka, Ph.D. z Katedry vozidel a motorů ve zkušebně Powertrain, která se nachází v budově L Technické univerzity v Liberci.

Počátečním krokem měření byla instalace měřícího zařízení. To znamená zapojení všech kabelů, umístění mřížkové osnova, kalibrace intenzitní sondy a definování všech měřících bodů v softwaru *Pulse Labshop*. Kalibrace mikrofonů intenzitní sondy probíhala pomocí předem daného kalibračního postupu.

Následoval start motoru, po kterém byl nastaven požadovaný provozní režim. Během měření byly obsluhou zkušebny Powertrain kontrolovány všechny provozní parametry motoru, zejména teploty jeho částí, aby nedošlo k přehřátí a poškození měřící techniky. Všechny parametry se během měření držely ve standartních mezích.

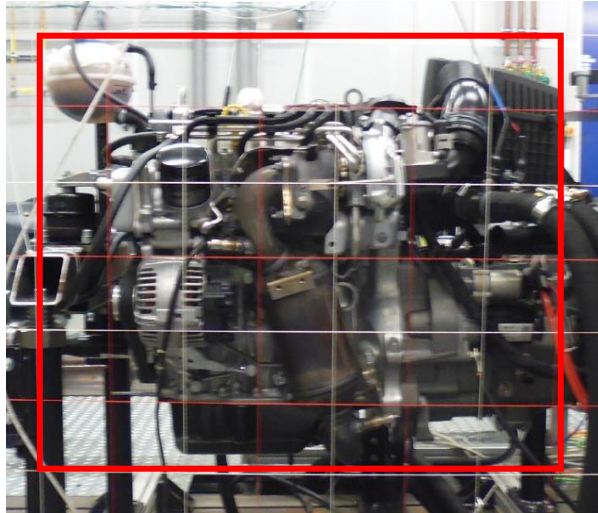
Samotné měření bylo provedeno ve třech variantách. Snahou bylo co nejvíce analyzovat testovaný objekt a všechny jeho významné zdroje hluku. Testovaný objekt byl rozdělen na tři roviny, do kterých se postupně umístila mřížková osnova. Osa mikrofonů intenzitní sondy byla umístěna kolmo na mřížkovou osnovu v optimální vzdálenosti nad testovaným objektem.

První variantou byla varianta A. Mřížková osnova se umístila do horní části testovaného objektu a byl definován počet měřících bodů (6x5) viz obr. č. 23.



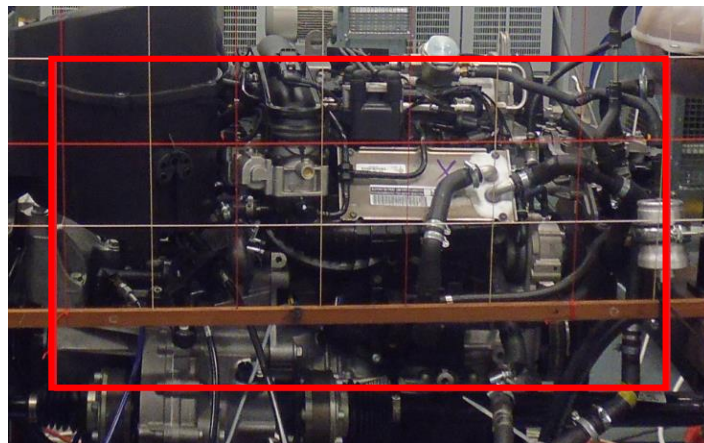
Obr. č. 23: Měřící varianta A

Druhou byla varianta B, kde bylo zvoleno umístění mřížkové osnovy do boční části testovaného objektu, neboli do oblasti, kde se nacházelo výfukové potrubí a turbodmychadlo. V dané rovině byl definován počet měřících bodů (7x6) viz obr. č. 24.



Obr. č. 24: Měřící varianta B

Ve třetí variantě C byla mřížková osnova umístěna do poslední měřitelné roviny, neboli do oblasti sání motoru. Byl definován počet měřících bodů (7x4) viz obr. č. 25.



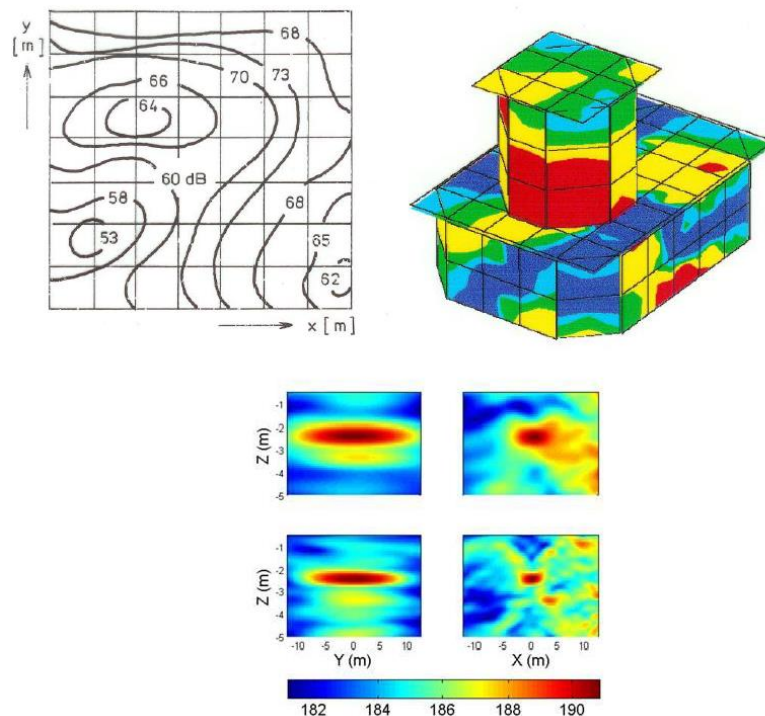
Obr. č. 25: Měřící varianta C

Po provedeném měření byly uloženy hodnoty akustického tlaku a akustické intenzity z programu *Pulse Labshop* exportovány a následně zpracovány pomocí *Microsoft Excel*, kde byly vypočítány příslušné hladiny akustických veličin. Získané hodnoty byly dále umístěny do maticového tvaru. Pro zpracování akustických map bylo využito

tvorby konturových grafů ve školní verzi programu *Matlab*. Dále byly plošné grafy upraveny v grafickém editoru *Adobe Photoshop* do podoby akustických map.

2.5 Zpracování výsledků měření a konturové grafy

Pro vyhodnocení průběhu měření a tvorbě konturových grafů bylo zapotřebí vy počítat jednotlivé hladiny akustické intenzity z naměřených hodnot. K výpočtu byl použit *Microsoft Excel*. Výsledné hladiny byly dále sestaveny do maticového tvaru podle skutečné polohy měřících bodů. Poté se hodnoty v maticovém tvaru dále zpracovávaly v programu *Matlab* podle naprogramovaného algoritmu. Výslednou intenzitní mapu, která vyjadřuje určitou měřenou plochu testovaného objektu, tvoří konturový graf, kde jednotlivé barevné odstíny vyjadřují příslušné hladiny akustické intenzity. Ukázky různých typů grafů se nacházejí na obr. č. 26. Dané zobrazení poskytuje informace o dílčích zdrojích hluku a zároveň slouží k jejich lokalizaci.



Obr. č. 26: Ukázky různých typů akustických map [2]

Vyhodnocení průběhu měření v programu *Matlab* a tvorba konturových grafů probíhala pomocí vhodného systému propojení jednotlivých bodů v matici. Požadavek byl na vznik spojitě, nejlépe realitě odpovídající křivce. Pro zpracování bodů byla použita kubická interpolace, která pomocí kubického splinu definuje spojitou křivku a jednotlivé oblouky mezi dvěma body se interpolují zvlášť. U této křivky je zaručena spojitost první, i druhé derivace. [19] Společně s kubickým splinem byla v *Matlabu* využita funkce *pcolor()*, která je při správném použití identická s konturami. V konturovém grafu bylo zvoleno spektrum barev, které nejlépe mapuje přechody mezi hodnotami intenzitních hladin. Pro lepší přehlednost byla potlačena funkce černých zvýraznění obrysů jednotlivých hladin. Vpravo od grafu byl umístěn *colorbar*, který vyjadřuje barevnou stupnici grafu. Volba rozsahu barevné stupnice slouží ke zvýraznění maxim a minim grafu.

2.6 Vyhodnocení měření mapováním akustické intenzity

Pro měření bylo využito distanční vložky velikosti 50 mm a 12 mm postupně ve všech třech variantách. Výsledné hladiny akustické intenzity byly zpracovány do podoby akustických map.

U distanční vložky velikosti 50 mm došlo nejdříve k eliminaci naměřených údajů o frekvence, které nebyly ve frekvenčním rozsahu dané distanční vložky. Z hlediska frekvenčního omezení byl stanoven frekvenční rozsah distanční vložky o velikosti 50 mm na frekvence od 31,5 Hz do 1250 Hz. V souboru naměřených hodnot byly hodnoty mimo tento frekvenční rozsah považovány za neplatné. V daném frekvenčním rozsahu byly vybrány tři skupiny frekvencí, a to nízká – 80 Hz, střední – 500 Hz a vysoká – 1250 Hz. Co se týče nízké frekvence 80 Hz, tak pro dané provozní otáčky se jedná o 2. harmonickou frekvenci. V důsledku vibrací a budících sil vzniká při provozním stavu nežádoucí hluk, který se projevuje v jednotlivých harmonických frekvencích motoru.

Ve frekvenčním spektru se vyskytuje základní frekvence, pro kterou platí:

$$f_R = \frac{n}{60} \text{ [Hz]} \quad (2.1)$$

Pro harmonické frekvence platí:

$$f_k = k \cdot f_R \text{ [Hz]} \quad (2.2)$$

kde:

n – otáčky motoru [min^{-1}]

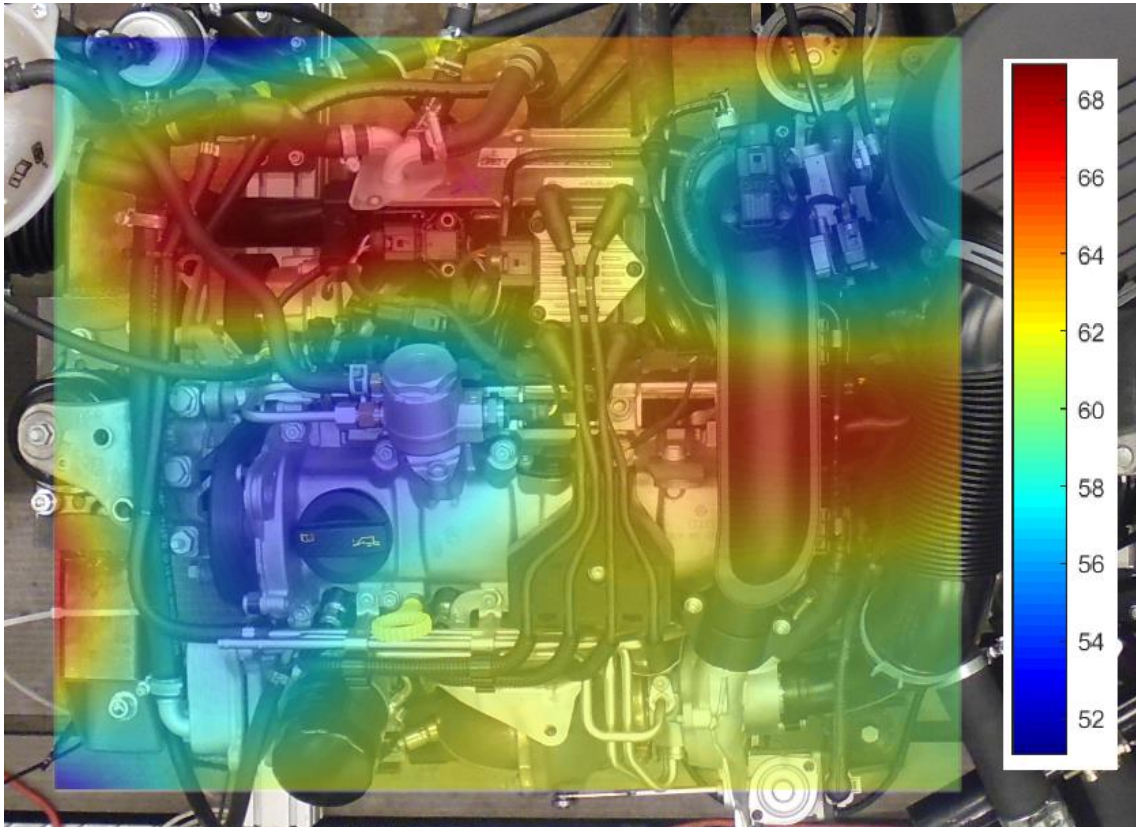
k – celé číslo (řád harmonické)

Byla vybrána nejbližší měřená frekvence ve frekvenčním spektru, která se nejvíce přibližuje vybrané harmonické frekvenci, to znamená $f_k=83,3 \approx 80$ Hz.

U distanční vložky velikosti 12 mm byla opět využita eliminace naměřených údajů o frekvence, které nebyly ve frekvenčním rozsahu dané distanční vložky. Z hlediska frekvenčního omezení byl stanoven frekvenční rozsah distanční vložky o velikosti 12 mm na frekvence od 125 Hz do 5000 Hz. Byly vybrány tři skupiny frekvencí, a to střední – 500 Hz, vysoké – 2500 Hz, a velmi vysoké – 5000 Hz. Skupina střední frekvence – 500 Hz byla vybrána z hlediska porovnání obou distančních vložek.

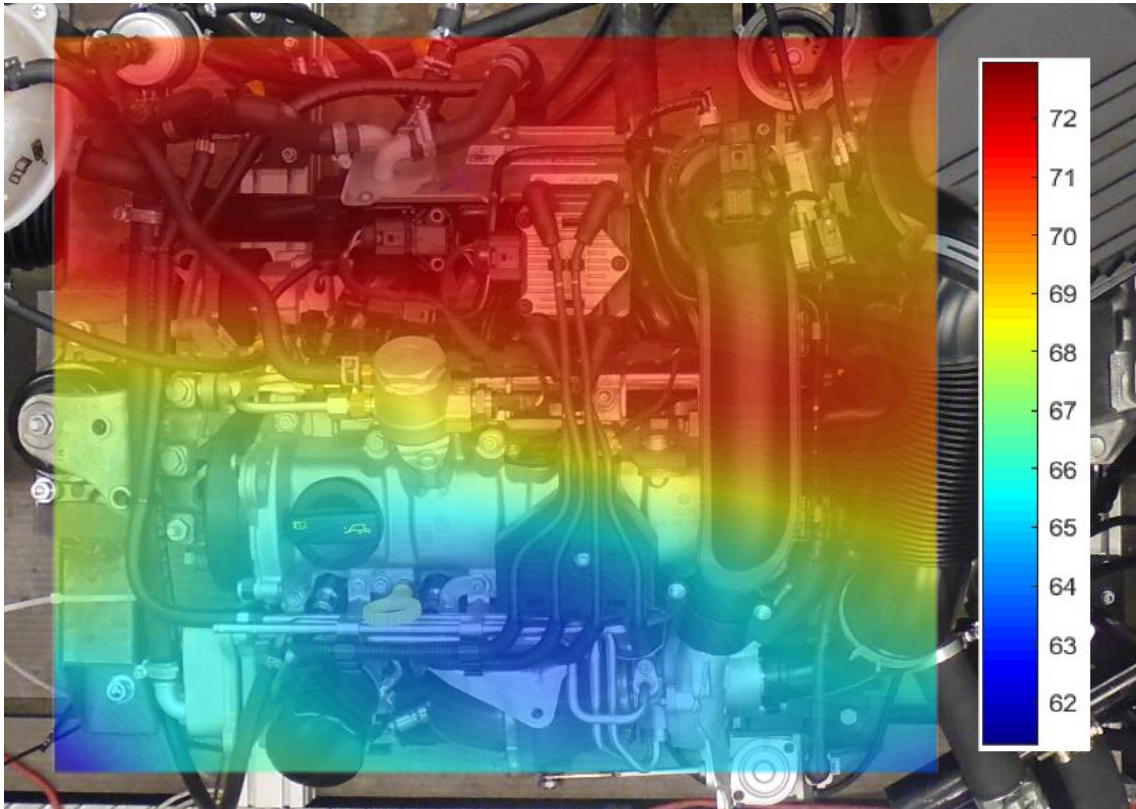
2.6.1 Varianta A – Distanční vložka 50 mm

Skupina nízké frekvence – 80 Hz



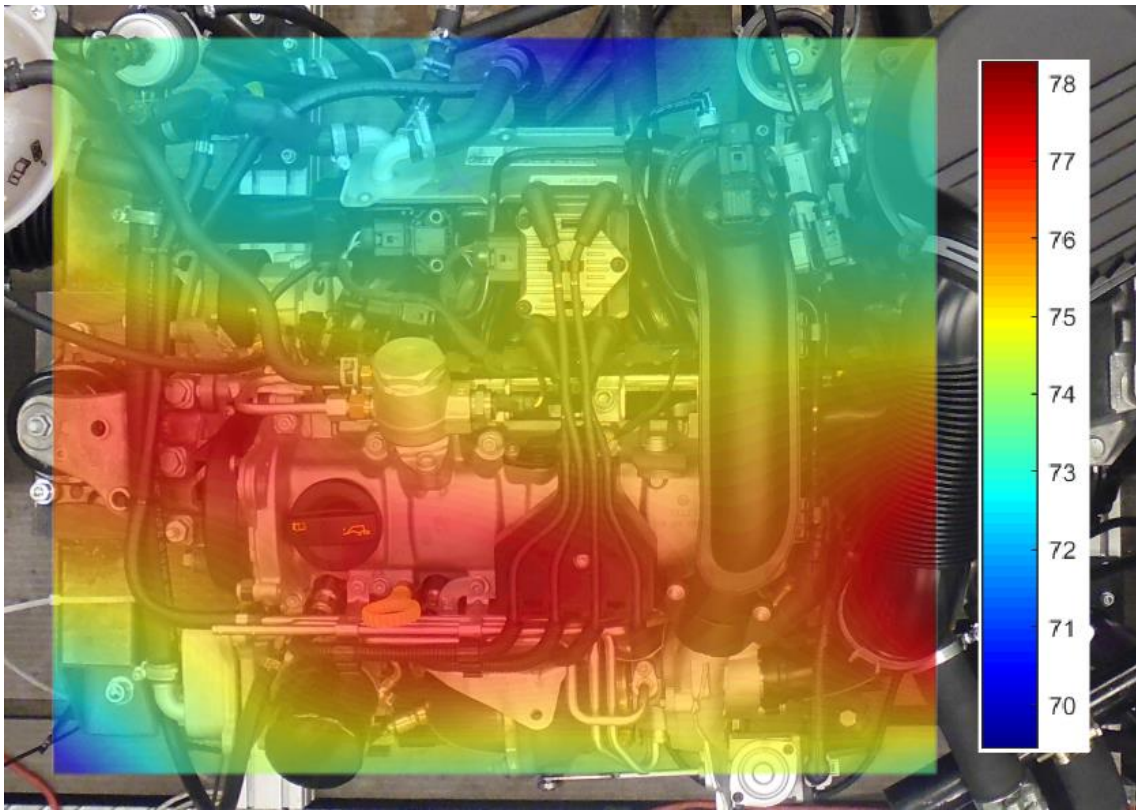
První měřenou skupinou byla skupina nízké frekvence, to znamená 80 Hz. U této skupiny plynou parametry z grafu křivek hladin stejné hlasitosti, který byl zmíněn v kapitole 1.3.1. To znamená, že u této frekvence je nutné, aby hladina akustické intenzity byla mnohem vyšší, než je hodnota prahu slyšitelnosti lidského ucha. Z výsledné akustické mapy plyne, že hladiny akustické intenzity jsou ve slyšitelném spektru, ale pro lidský sluch nejsou nijak nebezpečné. K největšímu nárůstu hodnot hladin akustické intenzity dochází v oblasti čerpadla chladicí kapaliny a v místě tlakové trubky vedení plnicího vzduchu z turbodmychadla. V obou případech jsou hodnoty hladin akustické intenzity v intervalu 66-68 dB.

Skupina střední frekvence – 500 Hz



Druhou měřenou skupinou byla skupina střední frekvence, to znamená 500 Hz. U této skupiny dochází k nárůstu hodnot hladin akustické intenzity. Z výsledné akustické mapy plyne, že se lokální maxima pohybují okolo hodnoty 72 dB. Tyto hodnoty jsou pro lidský sluch vnímány intenzivněji, než v předchozím případě. K maximálním hodnotám hladin akustické intenzity dochází v oblasti čerpadla chladicí kapaliny a rozvodů chladicí kapaliny, jako v předchozím případě. Je zde patrný vliv signálů vycházejících z mezichladiče. Dochází zde k možnému splynutí signálů, nebo zkreslení odrazy od stěn místnosti.

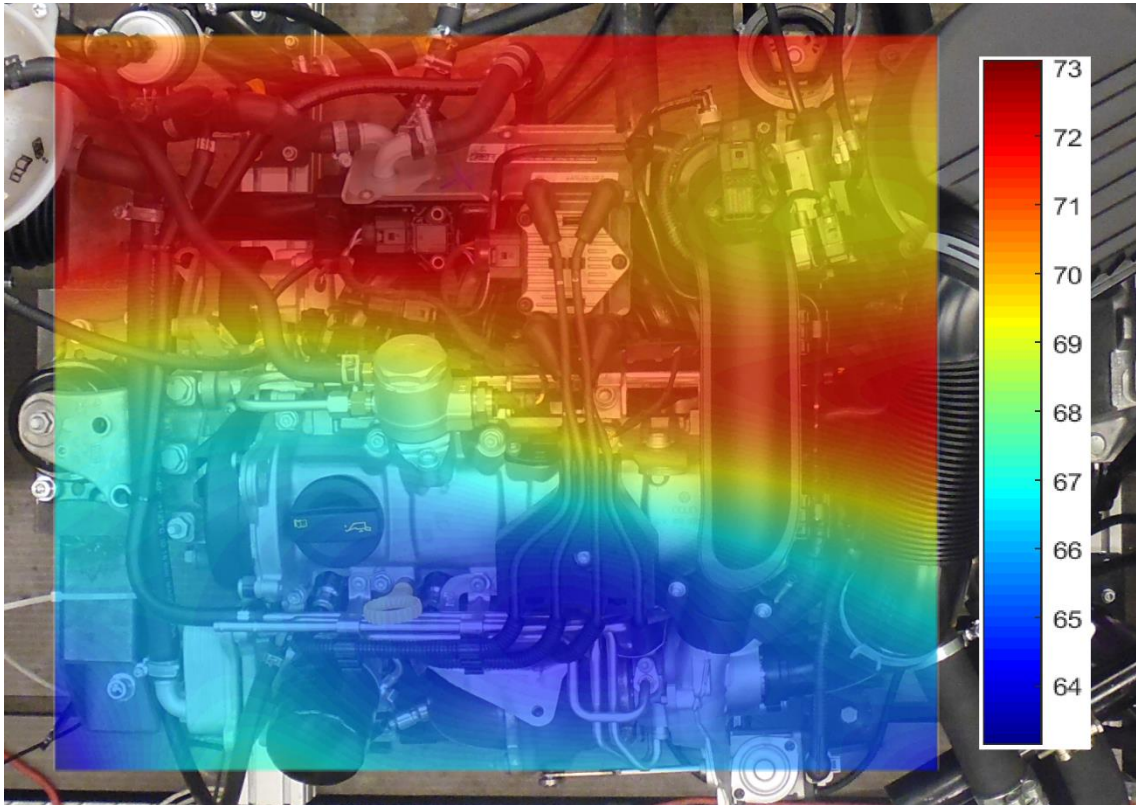
Skupina vysoké frekvence – 1250 Hz



Třetí měřenou skupinou byla skupina vysoké frekvence, to znamená 1250 Hz. Maximální hodnoty hladin akustické intenzity se pohybují okolo hodnoty 78 dB. Tyto hodnoty se nacházejí v oblasti víka hlavy válců a řemenového převodu. Ke zkreslení hodnot dochází v oblasti vedení plnicího vzduchu.

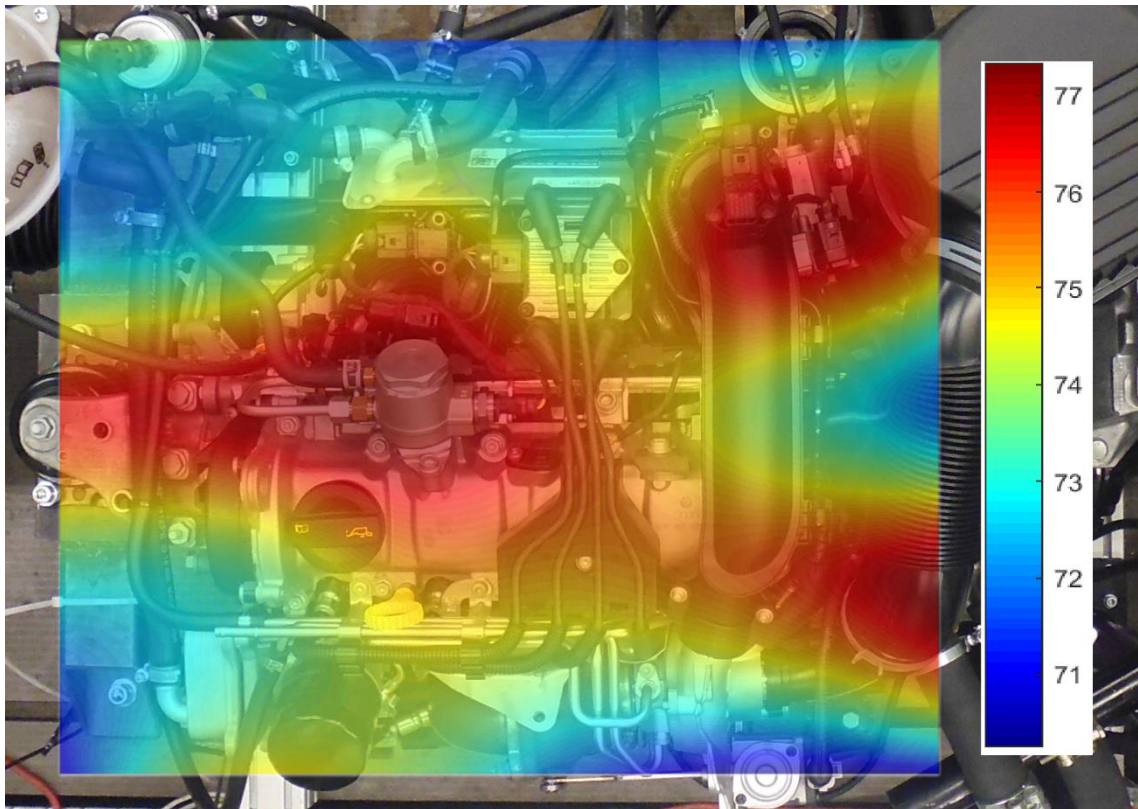
2.6.2 Varianta A – Distanční vložka 12 mm

Skupina střední frekvence – 500 Hz



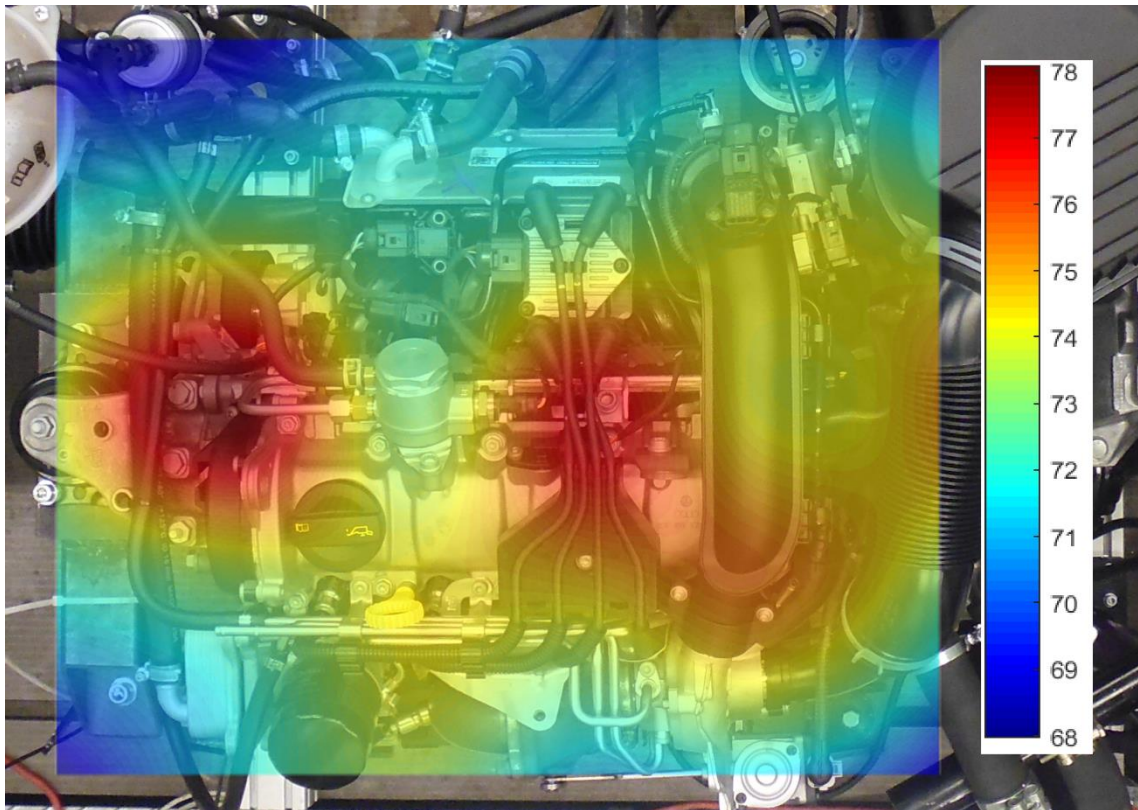
U této skupiny byla zvolena distanční vložka velikosti 12 mm a měřená frekvence 500 Hz. Tím došlo k porovnání měření s předchozím, kdy byla zvolena velikost distanční vložky 50 mm a stejná měřená frekvence. Výsledky měření jsou velmi podobné a v obou případech se maxima, i minima nalézají na stejných místech. Tvar akustické mapy je tedy skoro srovnatelný. Jako v předchozím případě dochází k lokalizaci maxima v oblasti čerpadla a rozvodů chladicí kapaliny. Došlo ke stejnému splynutí signálů, jako v předchozích případech. Hodnota maxima hladiny akustické intenzity se pohybuje v rozmezí 72-73 dB, což je velmi podobné předchozí situaci.

Skupina vysoké frekvence – 2000 Hz



Druhou měřenou skupinou s distanční vložkou velikosti 12 mm byla skupina vysoké frekvence – 2000 Hz. Signál o frekvenci 2000 Hz je vnímán člověkem velmi intenzivně a pro posluchače se jeví jako velmi hlasitý. V tomto případě došlo v grafu k výraznému zviditelnění lokálních maxim, a to v oblasti víka hlavy válců a řemenového převodu. Další maximum se nachází v oblasti vstupu plnicího vzduchu do mezichladiče. K možnému zkreslení, nebo odrazu mohlo dojít v oblasti trubky vedení nestlačeného vzduchu ze sání. Není tedy zřejmé, jestli se jedná o lokální maximum. Lokální maximum se v tomto bodě nachází již při hodnotě frekvence 1250 Hz. Hodnoty jednotlivých maxim hladiny akustické intenzity se pohybují okolo hodnoty 77 dB.

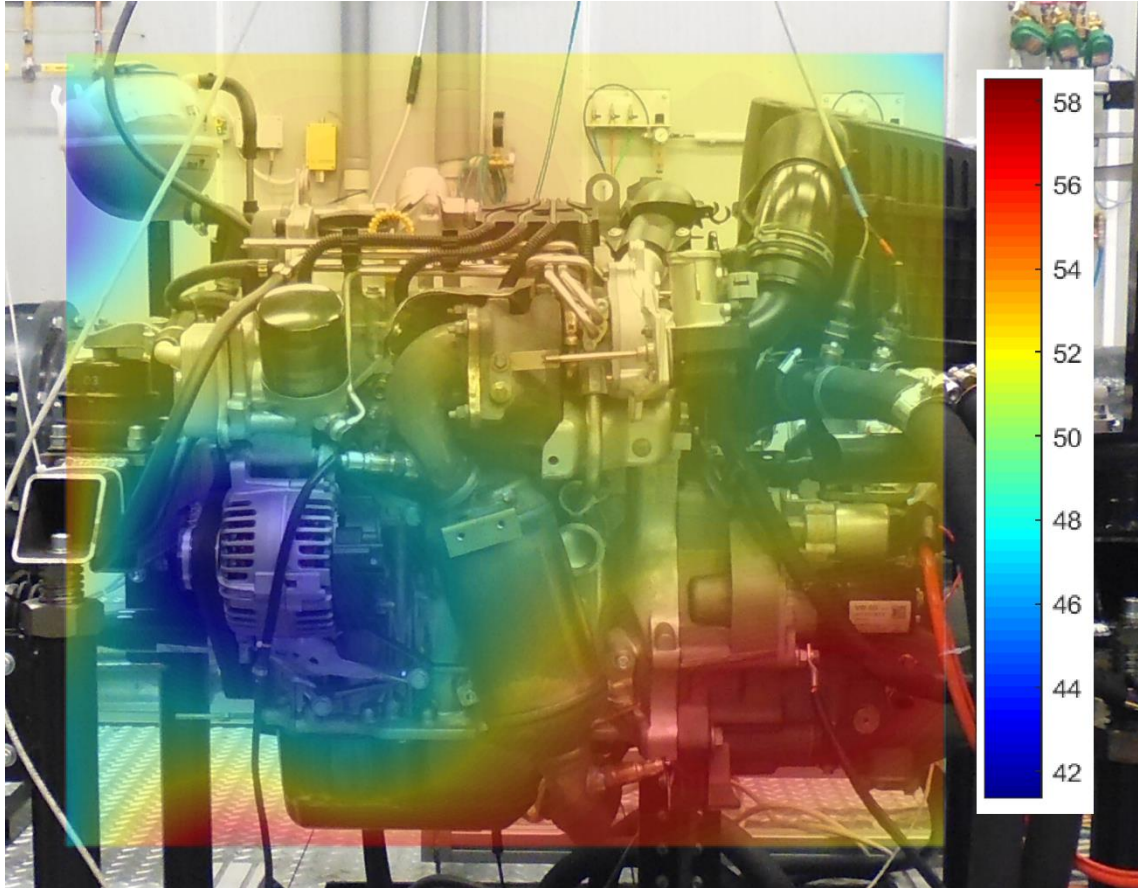
Skupina velmi vysoké frekvence – 5000 Hz



Třetí měřenou skupinou byla skupina velmi vysoké frekvence – 5000 Hz s distanční vložkou velikosti 12 mm. U této skupiny došlo k nalezení dvou lokálních maxim s hodnotou hladiny akustické intenzity okolo 78 dB. Tyto maxima se nachází v oblasti řemenového převodu a rozvodu zapalovacích kabelů, které jsou vedeny ze zapalovacího modulu v oblasti víka hlavy válců. V této oblasti se maxima nachází i při jiných měřených frekvencích, to značí, že jde o výrazné zdroje hluku.

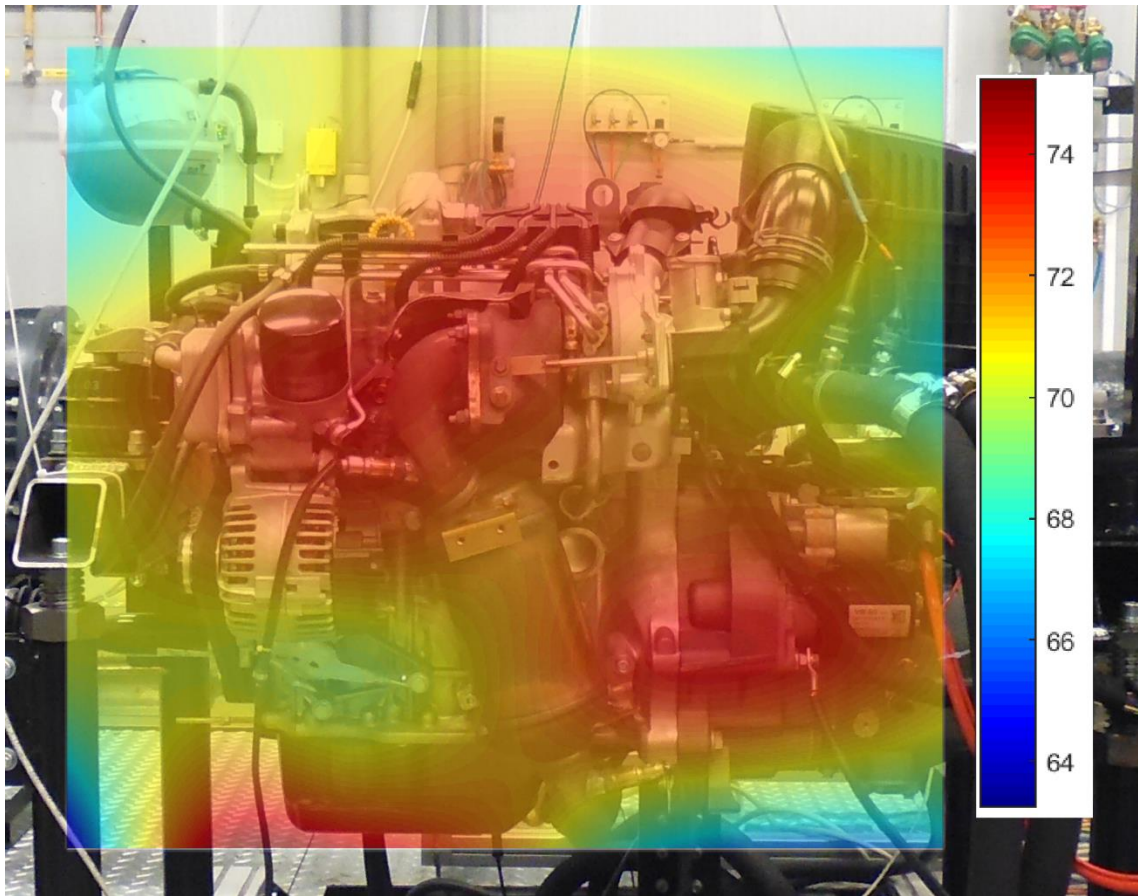
2.6.3 Varianta B – Distanční vložka 50 mm

Skupina nízké frekvence – 80 Hz



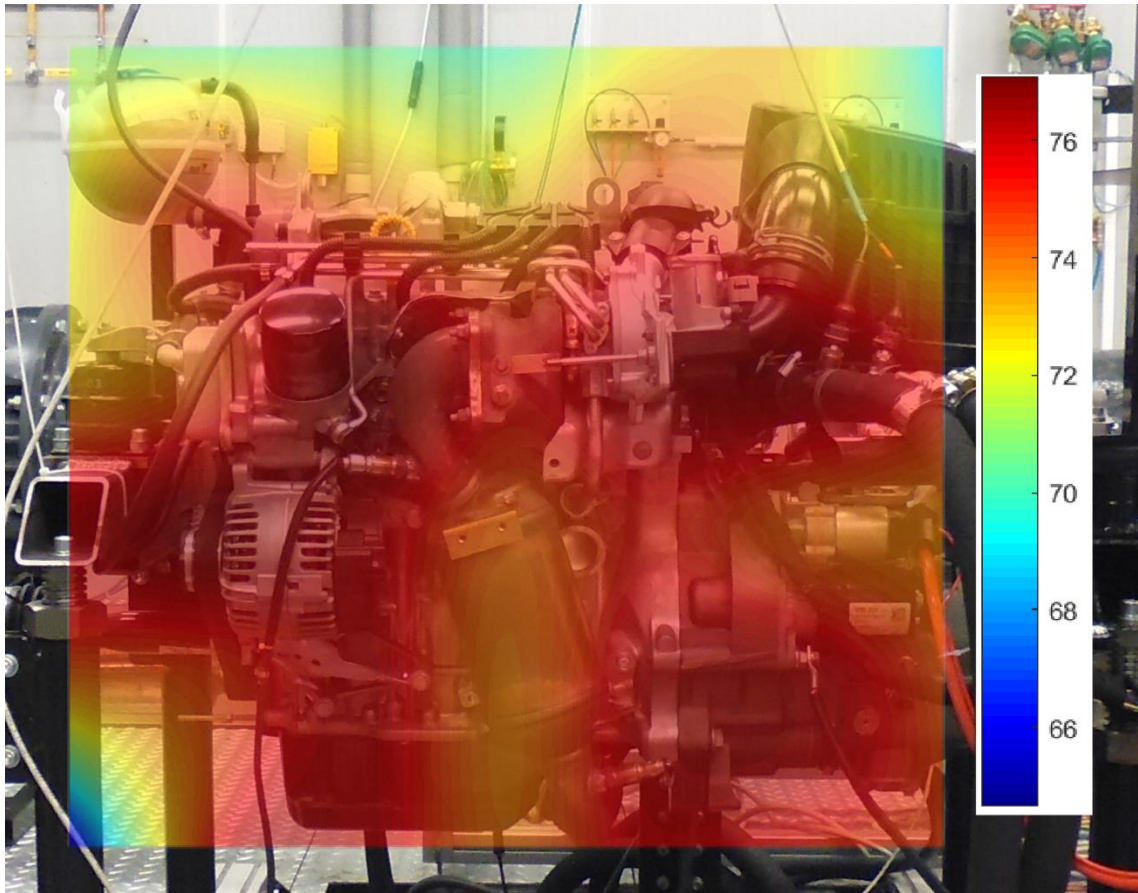
První měřenou skupinou u varianty B byla skupina nízké frekvence – 80 Hz s použitou distanční vložkou o velikosti 50 mm. U tohoto typu měření se nejvyšší hodnoty hladiny akustické intenzity pohybují okolo hodnoty 58 dB. K maximálním hodnotám dochází v pravé dolní části akustické mapy, což může způsobit vliv proudění horkých plynů z turbodmychadla, nebo zkreslení od možných odrazů z podlahy. V dané oblasti se jedná o splynutí akustických signálů a není možné proto z grafu určit významné zdroje hluku.

Skupina střední frekvence – 500 Hz



Druhou měřenou skupinou byla skupina střední frekvence – 500 Hz. U tohoto typu měření došlo k výraznější lokalizaci maxim, a to v oblasti olejového filtru a výstupu výfukových plynů z turbodmychadla a v oblasti jeho turbínové skříně. Další lokální maximum se nachází v oblasti setrvačníku a převodové skříně. Je zde také patrný vliv odrazů z podlahy v oblasti olejové vany, jako v předchozím případě. Maximální hodnoty hladiny akustické intenzity se pohybují okolo 74 dB.

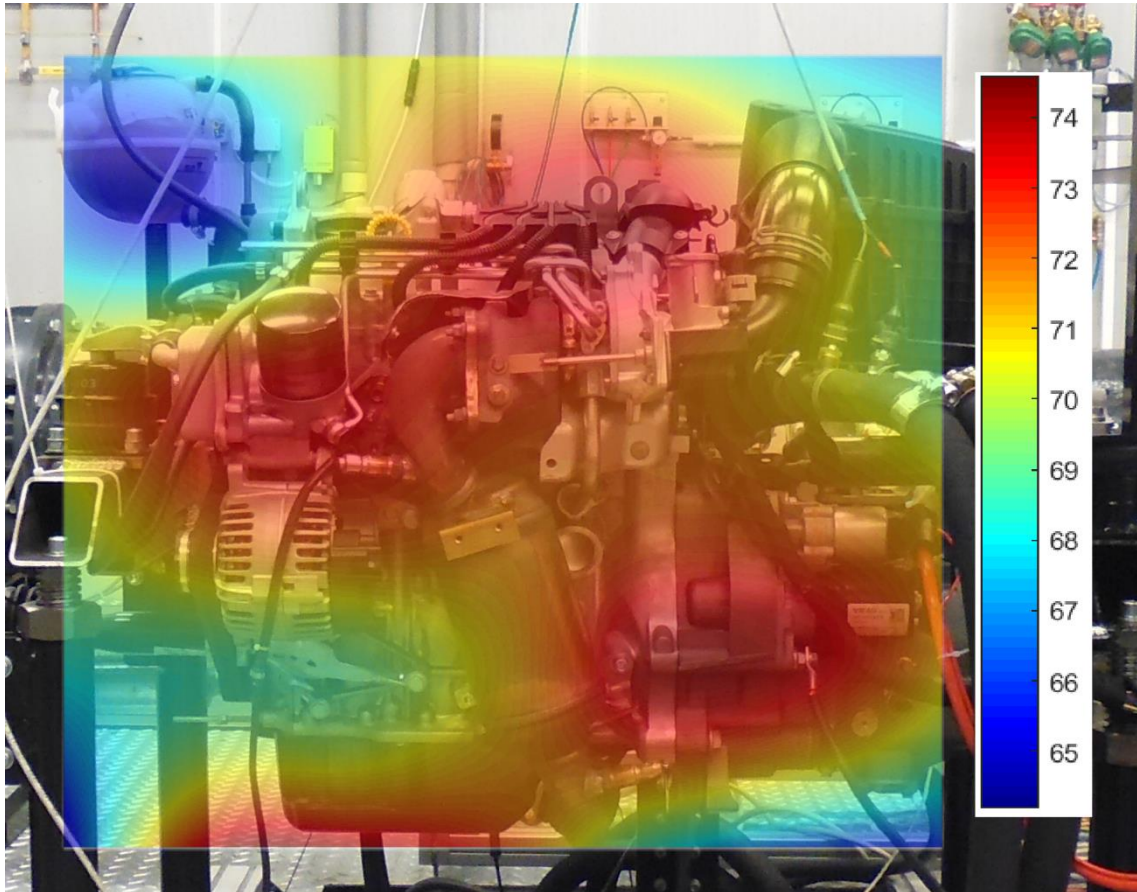
Skupina vysoké frekvence – 1250 Hz



Třetí skupinou byla skupina vysoké frekvence – 1250 Hz. U tohoto typu měření došlo k výraznému zviditelnění maxim. Hladina akustické intenzity se pohybuje okolo hodnoty 76 dB a je zde vidět možný vliv interference, neboli zesílení skupiny signálů ze zdrojů, které se vyskytují v těsném okolí zkoumaného bodu.

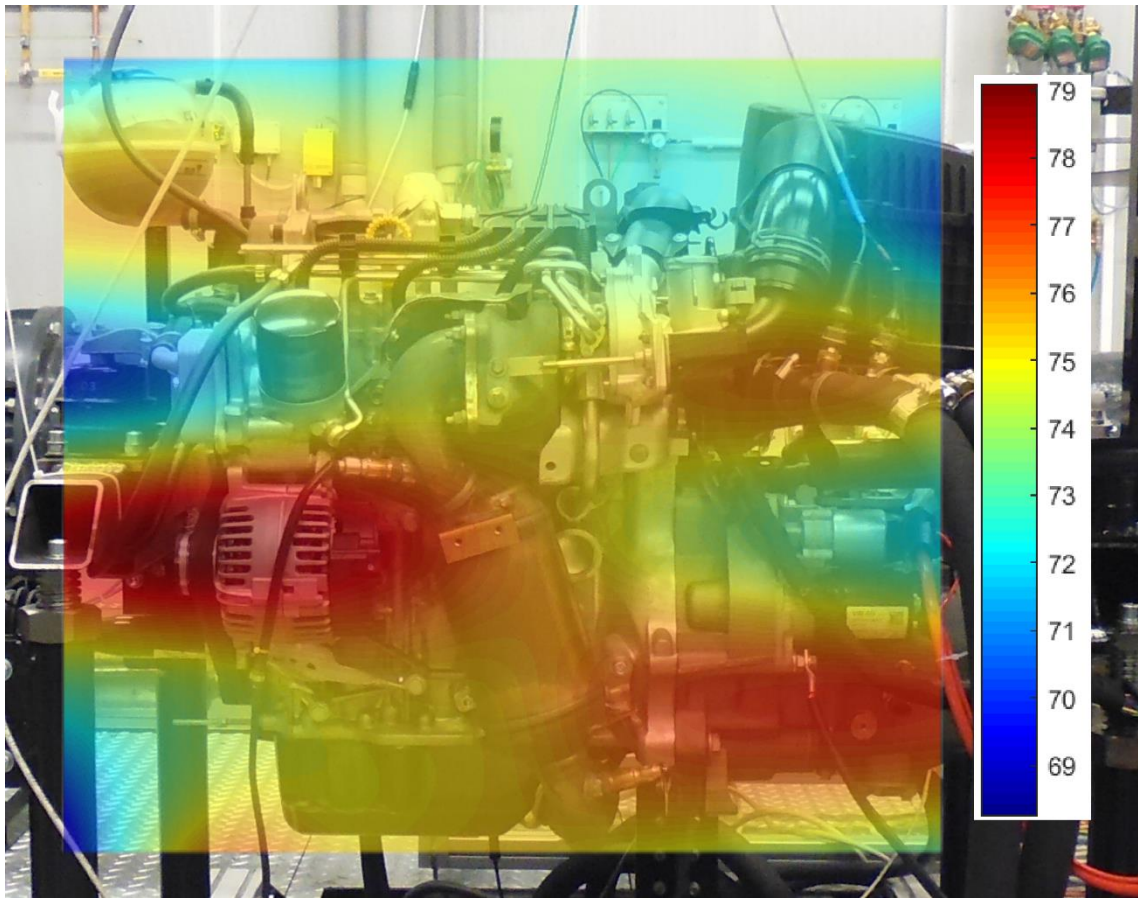
2.6.4 Varianta B – Distanční vložka 12 mm

Skupina střední frekvence – 500 Hz



U tohoto typu měření dochází k porovnání s předchozí skupinou střední frekvence – 500 Hz s použitou distanční vložkou o velikosti 50 mm. Výsledky měření jsou velmi podobné. Dochází zde ke zvýraznění lokálních maxim a jako v předchozím případě je maximum v oblasti turbodmychadla a převodové skříně. Je zde také patrné zkreslení od akustických signálů odražených od podlahy. Hodnoty hladin se pohybují okolo 74 dB, což je stejné jako v předchozím případě.

Skupina vysoké frekvence – 2000 Hz



Druhou měřenou skupinou byla skupina vysoké frekvence – 2000 Hz. U této skupiny došlo ke zvýraznění lokálního maxima v oblasti řemenového převodu a alternátoru. U daného maxima dochází k navýšení hladiny akustické intenzity na hodnotu 79 dB, což je relativně vysoká hodnota a lidský sluch je při této hodnotě velmi citlivý. Toto lokální maximum se velmi pravděpodobně interferuje s akustickými signály, které jsou vysílány od turbodmychadla. K dalšímu maximu v grafu dochází v oblasti převodové skříně, což je znázorněné i u ostatních měření a jedná se o výrazný zdroj hluku.

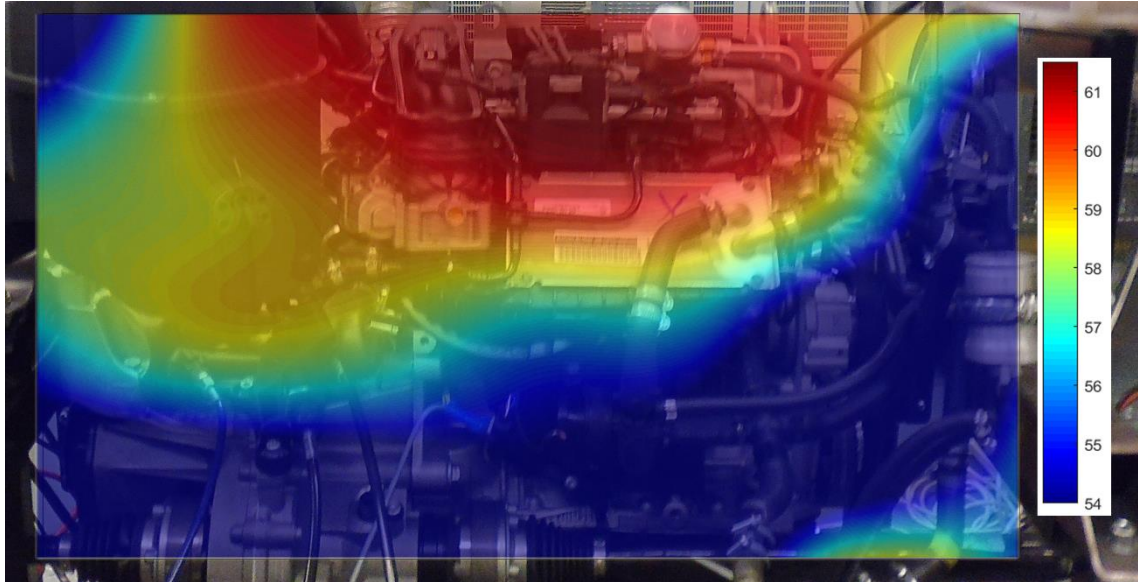
Skupina velmi vysoké frekvence – 5000 Hz



Třetí měřenou skupinou byla skupina velmi vysoké frekvence – 5000 Hz. Dochází zde ke splynutí signálů od lokálních maxim, které jsou viditelné i v předchozích případech. Nejvyšší hodnota hladin akustické intenzity se pohybuje okolo 72 dB a jsou zde viditelné výrazné zdroje hluku.

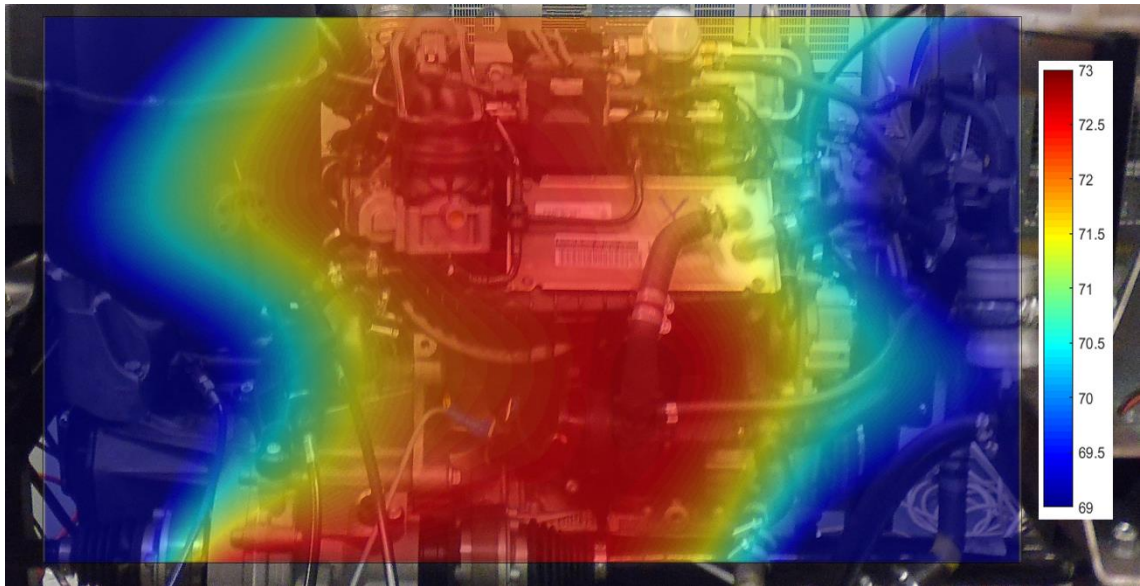
2.6.5 Varianta C – Distanční vložka 50 mm

Skupina nízké frekvence – 80 Hz



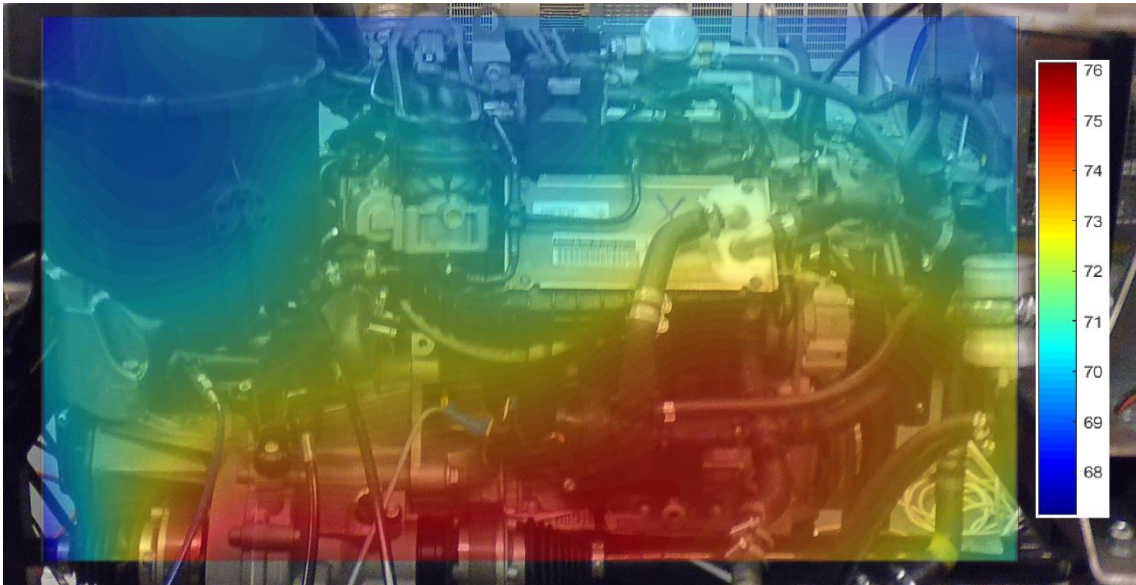
První měřenou skupinou u varianty C byla skupina nízké frekvence – 80 Hz s použitou distanční vložkou o velikosti 50 mm. U tohoto typu měření se nejvyšší hodnoty hladiny akustické intenzity pohybují okolo hodnoty 61 dB. K maximálním hodnotám dochází v horní části akustické mapy, což může způsobit hluk plynoucí z oblasti hlavy válců, nebo z oblasti mezichladiče plnicího vzduchu. Dalším výrazným zdrojem může být oblast vysokotlakého čerpadla s regulačním ventilem tlaku paliva, nebo víka hlavy válců, která je zřejmá i z měření v ostatních variantách. V této oblasti se jedná o výrazné lokální maximum.

Skupina střední frekvence – 500 Hz



Druhou měřenou skupinou byla skupina střední frekvence – 500 Hz. Nejvyšší hodnoty hladiny akustické intenzity se pohybují okolo hodnoty 73 dB. K výraznější lokalizaci maxim došlo v oblasti jednotky ovládání škrticí klapky a mezichladiče plicího vzduchu. Dochází zde k výrazné interferenci signálů z jednotlivých maxim, což znesnadňuje podrobnější lokalizaci. Další možností je zkreslení signálu z oblasti výstupní hnané hřídele v dolní části akustické mapy.

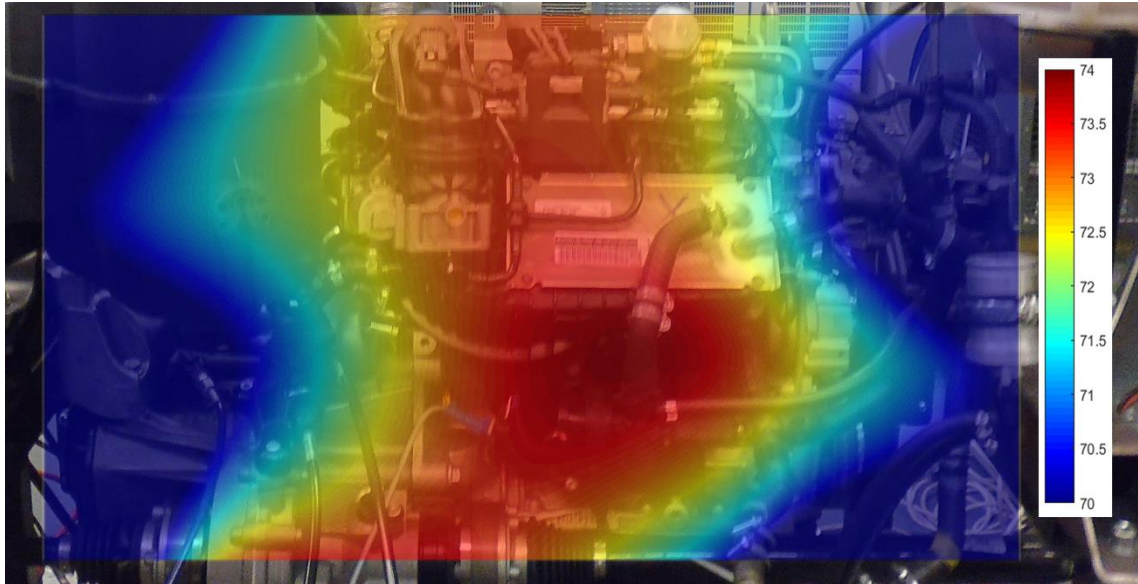
Skupina vysoké frekvence – 1250 Hz



Třetí skupinou byla skupina vysoké frekvence – 1250 Hz. U tohoto typu měření došlo k výraznému zviditelnění maxim. Hladina akustické intenzity se pohybuje okolo hodnoty 76 dB. Významné zviditelnění se vyskytuje v dolní části akustické mapy v oblasti diferenciálu a výstupní hřídele. Dochází zde k upřesnění daného maxima z předchozího měření.

2.6.6 Varianta C – Distanční vložka 12 mm

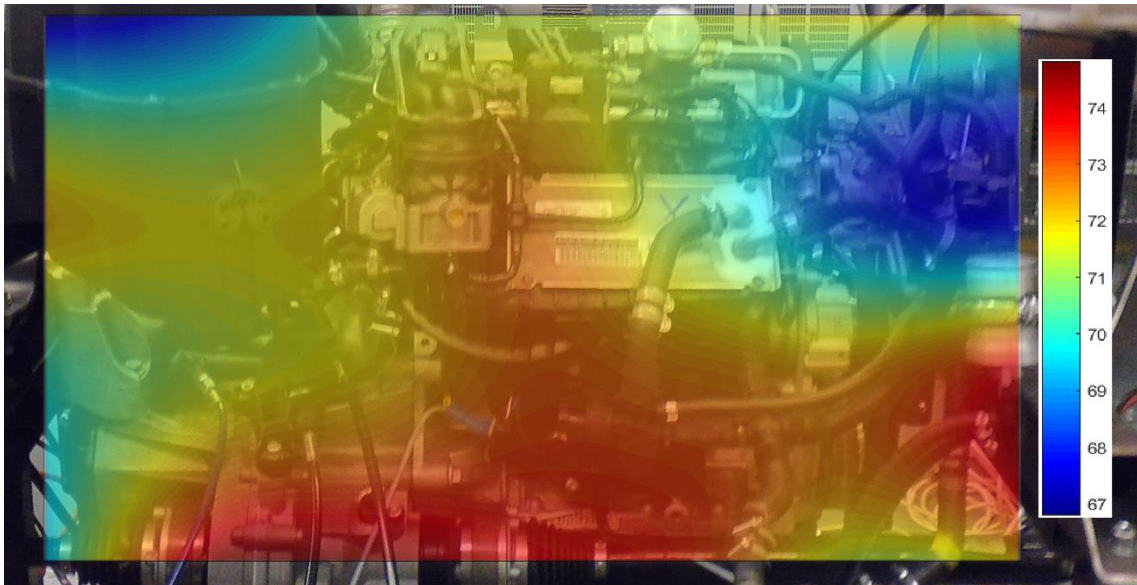
Skupina střední frekvence – 500 Hz



U tohoto typu měření dochází k porovnání s předchozí skupinou střední frekvence – 500 Hz s použitou distanční vložkou o velikosti 50 mm. Tento postup byl použit ve všech třech variantách z důvodu porovnání obou distančních vložek v závislosti na shodných frekvencích. Ve všech případech byly výsledné grafy velmi podobné a došlo ke stejné lokalizaci maxim a zdrojů hluku.

V tomto případě zde dochází ke zvýraznění lokálních maxim a jako v předchozím případě je maximum v oblasti jednotky ovládání škrticí klapky a mezichladiče plnicího vzduchu. Je zde také patrný vliv interference okolních akustických signálů. Z tohoto důvodu byla upravena barevná škála grafu, aby hodnoty maxim a minim byly v grafu více viditelné. Hodnoty hladin u daných maxim se pohybují okolo 74 dB, což je stejné jako v předchozím případě.

Skupina vysoké frekvence – 2000 Hz



Druhou měřenou skupinou byla skupina vysoké frekvence – 2000 Hz. U této skupiny došlo ke zvýraznění lokálního maxima, které se nachází v dolní části akustické mapy, neboli v oblasti diferenciálu a výstupní hřídele. U daného maxima se hladina akustické intenzity pohybuje okolo hodnoty 74 dB. Toto lokální maximum se vyskytuje i v předchozích měření, což značí významný zdroj hluku. Dané maximum může být posíleno signály, které se odrážely z podlahy. Je zde vidět zkreslení, které se nachází v pravé dolní části grafu, což může být způsobeno signály, které byly odraženy od konstrukce uložení motoru.

Skupina velmi vysoké frekvence – 5000 Hz



Třetí a poslední měřenou skupinou byla skupina velmi vysoké frekvence – 5000 Hz. Dochází zde k mírnému zkreslení jinými akustickými signály a posunutí maxima, které je zřejmé z předchozích grafů. U této skupiny se maximum nachází v oblasti výstupní hřídele a dochází k interferenci signálů z oblasti mezichladiče plnicího vzduchu. Tato oblast se považuje za významný zdroj hluku. Maximální hodnoty hladin akustické intenzity se pohybují okolo hodnoty 71 dB.

2.7 Zhodnocení měření a výsledků

2.7.1 Měření pomocí intenzitní sondy

Z hlediska dostupného vybavení bylo pro měření využito metody měření pomocí intenzitní sondy. Jedná se o jednu z nejstarších metod mapování akustických polí. Měření bylo prováděno na vybavení od firmy Brüel & Kjær, která patří mezi největší výrobce a dodavatele přístrojů pro akustickou a vibrační analýzu.

Dle teoretických podkladů má tato metoda své výhody i nevýhody. Mezi kladné vlastnosti této metody patří její nenáročnost, co se týče množství měřicího vybavení. Je to proto, že vyžaduje pouze dva kondenzátorové mikrofony, multianalyzátor a program na zpracování výsledků. K největším nárokům patří požadavek na maximální shodu obou mikrofonních kanálů, kterou provedeme pomocí kalibračního postupu. Dále mezi hlavní výhody této metody patří dle teorie její vektorový charakter, který má díky své směrové citlivosti eliminovat okolní akustické signály. U provedeného měření se tato vlastnost neprojevila, jelikož výsledky byly zkreslené odrazy od okolních objektů.

K záporům měření pomocí intenzitní sondy patří její časová náročnost. Ta nastává v případě, kdy je zapotřebí vytvoření měřicí osnovy, která na větších objektech dosahuje značných rozměrů a tak znesnadňuje její tvorbu a manipulaci. Tímto se značně prodlužuje čas potřebný pro provedení měření. K dalším úskalím metody je její manuální obsluha. V průběhu měřicího procesu by měla být sonda umístěna vždy ve středu měřeného segmentu osnovy. V případě ručního přesouvání sondy bez použití polohovacího zařízení, nebo stativu, je poměrně náročné udržet sondu ve správné pozici. Vzhledem k časové náročnosti měření nemohlo být tedy zabráněno rozkmitu sondy.

Co se týče tvorby akustických map, muselo být vynaloženo značné úsilí na jejich realizaci. Hodnoty z jednotlivých bodů byly upraveny do maticové podoby a dále zpracovány pomocí matematického softwaru k získání výsledného grafu, který byl dále zpracováván do grafické podoby akustických map. To zvyšovalo celkovou časovou náročnost.

2.7.2 Zhodnocení výsledků měření

Měření probíhalo ve třech variantách. Jednotlivé varianty představovaly tři nezávislé roviny, do kterých byla umístěna mřížková osnova. Pro měření byly využity dvě velikosti distančních vložek, tedy 12 mm a 50 mm. Ve frekvenčním pásmu 125 Hz – 1250 Hz, které je stejné pro obě distanční vložky, nebyl nalezen významný rozdíl mezi naměřenými výsledky. To znamená, že velikost distanční vložky nemá vliv na zkresení daného měření. Pro měření byly vybrány vždy tři skupiny frekvencí, z nichž jedna byla použita na srovnání obou distančních vložek.

V jednotlivých variantách byl definován přesný počet měřících bodů. Tyto varianty jsou znázorněny v kapitole 2.4. První měřenou variantou byla varianta A. Mřížková osnova se umístila do horní části testovaného objektu a byl definován počet měřících bodů (6x5). U této varianty došlo při daném provozním stavu testovaného objektu k lokalizaci maxim v oblasti čerpadla chladicí kapaliny, kde se hodnota akustické intenzity pohybovala v rozmezí 68 dB až 72 dB. Významná maxima se nacházela v oblasti víka hlavy válců a řemenového převodu. Zde se hodnota akustické intenzity pohybovala okolo 78 dB.

Druhou měřenou variantou byla varianta B. Mřížkové osnovy byly umístěny do boční části testovaného objektu, neboli do oblasti, kde se nacházelo výfukové potrubí a turbodmychadlo. V dané rovině byl definován počet měřících bodů (7x6). Významná lokální maxima se nacházela v oblasti turbínové skříně turbodmychadla a převodové skříně, kde se hodnota akustické intenzity pohybovala okolo hodnoty 74 dB. Výrazné maximum se nacházelo v oblasti řemenového převodu a alternátoru, kde se hodnota akustické intenzity blížila 79 dB.

Třetí měřenou variantou byla varianta C. Mřížková osnova se umístila do poslední měřitelné roviny, neboli do oblasti sání motoru. Byl definován počet měřících bodů (7x4). U této varianty došlo k lokalizaci maxim v oblasti víka hlavy válců, kde se hodnota pohybovala okolo 61 dB. Toto maximum se vyskytuje i u ostatních variant a jedná se o významný zdroj hluku. Další maximum dané varianty se nacházelo v oblasti mezichladiče stlačeného vzduchu, kde se nejvyšší hodnota akustické intenzity pohybovala okolo 74 dB.

V oblastech výrazných zdrojů hluku je vhodné použít případná protihluková opatření pomocí izolačních materiálů, především v oblastech nejbliže pasažérům vozidla.

Při výběru počtu měřících bodů plynou nevýhody z velikosti a vzdálenosti jednotlivých segmentů měřící osy. Pro zlepšení lokalizace jednotlivých maxim v grafech by mohlo být použito zvýšení počtu měřících bodů, neboli zhuštění měřící sítě. Zhuštěním měřící sítě lze najít významné zdroje hluku, které se mohou nacházet v prostoru mezi měřícími body. Vhodným výběrem měřících bodů lze lépe lokalizovat zdroje, které by při menším počtu bodů nemusely mít vliv na celkovou intenzitu hluku.

Pro zvýšení přesnosti lokalizace zdrojů hluku je možné využít spolu s intenzitní sondou i vibrační čidlo, které při umístění do zkoumané oblasti dokáže eliminovat signály z jiných zdrojů.

K dalšímu ovlivnění výsledků mohlo dojít z důvodu ruční obsluhy intenzitní sondy. Proto by bylo vhodnější využít při měření polohovací zařízení, nebo stativ.

Dalším parametrem, který se podílí na výsledné podobě akustické mapy, je prostředí ve kterém měření probíhá. Snahou je, aby bylo zamezeno velkému množství odraženého vlnění v blízkosti testovaného objektu. Jedná se především o závislost na objemu místnosti, ploše stěn, tvaru povrchu, či koeficientu odrazivosti. Jelikož měření probíhalo v laboratorních prostorách, nemohlo být zamezeno možnému zkreslení výsledků.

Závěr

Tato bakalářská práce pojednává o problematice mapování akustické intenzity pomocí intenzitní sondy. Práce splnila všechny body zadání, tak jak byly specifikovány v zásadách pro vypracování.

V teoretické části práce jsou popsány a vysvětleny základní akustické veličiny a jejich vzorce. Následně byla rozebrána teorie týkající se akustických polí a jednotlivé metody jejich mapování. Dále byl popsán princip měření pomocí intenzitní sondy a zpracována teorie týkající se jednotlivých metod měření. V experimentální části této práce byla konkrétně využita metoda měření v bodech.

Po zpracování teorie týkající se intenzitních měření a osvojení základních principů měření na použitých zařízeních (intenzitní sondě B&K 3599 ve spojení s multianalýzátorem PULSE), bylo provedeno měření v laboratoři Powertrain na spalovacím motoru Škoda 1.2 TSI. Pro měření byla sestrojena pomocná mřížková osnova, která byla umístěna vždy do dané roviny měření. Podle rovin bylo měření rozděleno do tří variant. Výsledky měření byly zpracovány do podoby konturových grafů pomocí naprogramovaného algoritmu a následně upraveny v grafickém editoru do podoby akustických map. Následným vyhodnocením byly lokalizovány významné zdroje hluku.

Závěrečná část práce se věnuje zhodnocení výsledků a metody měření pomocí intenzitní sondy. Metoda měření intenzitní sondou vychází v celkovém výsledku jako metoda nenáročná na množství měřícího vybavení. Klade však značné nároky na stacionární chod testovaného objektu. Hlavní nevýhodou je časová náročnost měření a následného zpracování naměřených dat.

Uceleným způsobem zpracované výsledky měření a lokalizace hlavních zdrojů hluku přispěly k nalezení důležitých parametrů pro měření intenzitní sondou, a dále k doporučení protihlukového opatření v dané oblasti hlavních zdrojů hluku.

Jelikož hluk u spalovacích motorů bude vždy při procesu spalování přítomen, je kladen požadavek na snižování hluku motoru, i celého vozidla. Hlukové vlastnosti jsou jedním z rozhodujících faktorů, které mají vliv na konkurenceschopnost vozidla na trhu.

Seznam zdrojů

- [1] NĚMEČEK, Pavel. *Hluk v technické praxi I.*, Liberec: Technická univerzita v Liberci, 1998, ISBN 80-7083-285-1.
- [2] MIŠUN, V. *Vibrace a hluk*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2005, ISBN 80-214-3060.
- [3] SMETANA, Ctirad. *Měření hluku a chvění*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1974, ISBN 04-526-74.
- [4] Ronald J. Baken, Robert F. Orlikoff (2000). *Clinical Measurement of Speech and Voice*. Cengage Learning. p. 94. ISBN 9781565938694
- [5] NOVÝ, R. *Hluk a chvění*. Praha: ČVUT, 2000, ISBN 80-01-02243-3.
- [6] NĚMEC, J.; RANSDORF, J.; ŠNĚDRLE, M.. *Hluk a jeho snižování v technické praxi*. Praha: SNTL, 1970, ISBN 04-222-70.
- [7] VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. *Obor termomechaniky a techniky prostředí* [online]. Dostupný na WWW: <http://ottp.fme.vutbr.cz/skripta/vlab/mereni/Ka05-02.htm>
- [8] BRÜEL & KJÆR, DENMARK. *Sound Intensity* [online]. Dostupný na WWW: <http://www.engr.sjsu.edu/bjfurman/courses/ME120/me120pdf/SoundIntensity>
- [9] NĚMEČEK, Pavel. *Studenti/Skripta a texty on-line/Akustická diagnostika - In – TECH* [online]. Dostupný na WWW: <http://www.kvm.tul.cz/>
- [10] KREIDL, Marcel; ŠMÍD, Radislav. *Technická diagnostika: senzory, metody, analýza signálu*. Praha: BEN - Technická literatura, 2006, ISBN 80-7300-158-6.
- [11] STODOLA, Martin. *Experimentální analýza hluku* [online]. Dostupný na WWW: <http://biomechanika.fme.vutbr.cz/>
- [12] BERAN, Vlastimil. *Chvění a hluk*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2010, ISBN 978-80-7043-916-6.

- [13] SIANO, D.; AIELLO, R.; VISCARDI, M.. *Sensitivity Analysis and Correlation Experimental/Numerical FEM-BEM for Noise Reduction Assessment of an Engine Beauty Cover* [online]. Dostupný na WWW: https://www.researchgate.net/publication/291014628_Sensitivity_Analysis_and_Correlation_ExperimentalNumerical_FEM-BEM_for_Noise_Reduction_Assessment_of_an_Engine_Beauty_Cover
- [14] BRÜEL & KJÆR. *Sound intensity calibrators* [online]. Dostupný na WWW: <https://www.bksv.com/en/products/transducers/acoustic/calibrators>
- [15] JIŘÍČEK, Ondřej. *Úvod do akustiky*. Praha: ČVUT, 2002, ISBN 80-01-02460-1.
- [16] *Laboratoř pohonných jednotek – Zkušebna Powertrain* [online]. Dostupný na WWW: <https://cxi.tul.cz/strojirenstvi/oddeleni-vozidel-a-motoru/laborator-pohonných-jednotek>
- [17] ŠKODA AUTO. *Dílenská učební pomůcka - Zážehový motor 1,2 l/77 kW TSI* [online]. Dostupný na WWW: <https://portal.skoda-auto.com>
- [18] BRÜEL & KJÆR. *Sound Intensity Measurements* [online]. Dostupný na WWW: <http://www.bksv.com/applications/noisesourceidentification/soundintensitymapping/soundintensitymeasurements>
- [19] OLIVÍK, Stanislav. *Ukázka možností interpolace dat v softwaru Matlab* [online]. Dostupný na WWW: <https://mat.fsv.cvut.cz/komisevstev/13/prispevky/olivik.pdf>
- [20] JAKSCH, Ivan. *Technická diagnostika - Základy akustiky a hlukové diagnostiky* [online]. Dostupný na WWW: <http://www.fm.tul.cz/>
- [21] BATEL, Mehdi; MARROQUIN, Marc; HALD, Jørgen a kol. *BRÜEL & KJÆR NORTH AMERICA, Inc., Norcross, Georgia and Brüel & Kjær, Denmark. Noise Source Location Techniques: Simple to Advanced Applications. 2003.* [online]. Dostupný na WWW: www.sandv.com/downloads/0303bate.pdf
- [22] WARMBOLD, Rob. *Acoustic Camera Webinar- Intro to Beamforming and Phased Array Technology in Sound Source Localization* [online]. Dostupný na WWW: <https://www.linkedin.com/pulse/acoustic-camera-webinar-intro-beamforming-phased-array-rob-warmbold>
- [23] ARNALDI, B. *Reproducible compressive nearfield acoustic holography* [online]. Dostupný na WWW: <http://echange.inria.fr/nah>
- [24] ROSSING, Thomas D. *Springer Handbook of Acoustics*. New York: Springer Science, 2007, ISBN 978-0-387-30446-5.