

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**  
**Katedra technologií a měření**

## **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Přehled prostředků pro měření akustické intenzity**

**Vedoucí práce: Ing. Jan Klasna**  
**Autor: Viktor Levora**

**2012**

## **Zadání**

**Anotace**

Tato bakalářská práce se zabývá souhrnem prostředků a technologií pro měření akustické intenzity. V práci jsou shrnuty základní pojmy a veličiny týkající se této problematiky. Dále pak zařízení a technologie s tímto tématem spojené. V závěru práce je několik společností, které se distribucí těchto zařízení zabývají.

**Klíčová slova**

Akustika, akustická intenzita, sonda akustické intenzity, akustická kamera, mikrofonní pole, akustická holografie, NAH, Beamforming, SONAH

**Abstract**

This paper sums up device and technologies for measurement of acoustic intensity. At the beginning there is a summary of basic terms concerning this theme. Furthermore there are devices and technologies connected to this topic. Several companies are mentioned at the end of the paper.

**Key words**

Acoustics, sound intensity, sound intensity probe, acoustic camera, microphone array, acoustic holography, NAH, Beamforming, SONAH

## **Prohlášení**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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

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

V Plzni dne 8.6.2012

Jméno příjmení

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Klasnovi. Jeho cenné připomínky a rady mi pomohly ke zlepšení kvality mé práce.

## Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>7</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>9</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>1 AKUSTIKA</b> .....	<b>11</b>
1.1 ZVUK.....	11
1.2 AKUSTICKÝ TLAK.....	12
1.3 AKUSTICKÝ VÝKON .....	12
1.4 AKUSTICKÁ INTENZITA.....	12
1.4.1 <i>Hladina akustické intenzity</i> .....	13
<b>2 MĚŘENÍ AKUSTICKÉ INTENZITY</b> .....	<b>14</b>
2.1 DŮVODY MĚŘENÍ AKUSTICKÉ INTENZITY .....	14
2.2 NORMY.....	14
<b>3 ZPŮSOBY MĚŘENÍ AKUSTICKÉ INTENZITY</b> .....	<b>15</b>
3.1 KALIBRACE MIKROFONŮ .....	15
3.2 AKUSTICKÁ SONDA TYPU P-P.....	16
3.3 AKUSTICKÁ SONDA TYPU P-U .....	18
3.4 AKUSTICKÁ KAMERA.....	20
3.4.1 <i>Akustická holografie v blízkém poli (Nearfield Acoustic Holography)</i> .....	21
3.4.2 <i>Beamforming</i> .....	22
3.4.3 <i>SONAH</i> .....	23
3.5 SHRNUTÍ.....	24
3.5.1 <i>P-P vs. P-U akustické sondy</i> .....	24
3.5.2 <i>NAH vs. Beamforming</i> .....	24
<b>4 PRŮZKUM TRHU</b> .....	<b>25</b>
4.1 ACOUSTIC CAMERA .....	25
4.1.1 <i>Kruhové pole</i> .....	25
4.1.2 <i>Sférické pole</i> .....	26
4.1.3 <i>Univerzální pole</i> .....	27
4.1.4 <i>Hvězdicové pole</i> .....	28
4.1.5 <i>Ruční plošné pole Array Paddle 2x24</i> .....	29
4.2 NORSONIC .....	31
4.3 ISEMCON .....	32
4.4 BRÜEL & KJÆR .....	33
4.4.1 <i>Ruční P-P akustická sonda</i> .....	33
4.4.2 <i>Sférické pole</i> .....	34
4.4.3 <i>Wheel array a Half-wheel array – Beamforming</i> .....	35
4.4.4 <i>Slice wheel array – SONAH</i> .....	36
4.4.5 <i>Grid array a 2D Robot</i> .....	37

4.4.6	<i>Ruční akustické pole</i> .....	38
4.4.7	<i>Hvězdicové pole</i> .....	39
<b>ZÁVĚR</b>	.....	<b>40</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA</b>	.....	<b>41</b>
<b>INTERNETOVÉ ZDROJE</b>	.....	<b>41</b>



## Seznam symbolů a zkratek

T [s] – perioda [sekunda]

f [Hz] – frekvence [hertz]

p [Pa] – tlak [pascal]

$\omega$  [rad/s] – úhlová frekvence [radián za sekundu]

t [s] – čas [sekunda]

W [W] – akustický výkon [watt]

v [m/s] – rychlost [metr za sekundu]

S [cm<sup>2</sup>] – plocha [centimetr čtvereční]

I [W/m<sup>2</sup>] – akustická intenzita [watt na metr čtvereční]

L [B] – hladina akustické intenzity [bel]

p-p – označení akustických sond využívajících k měření dvou tlakových mikrofonů (tlak-tlak)

p-u - označení akustických sond využívajících k měření tlakového mikrofonu a akcelerometru (tlak-rychlost)

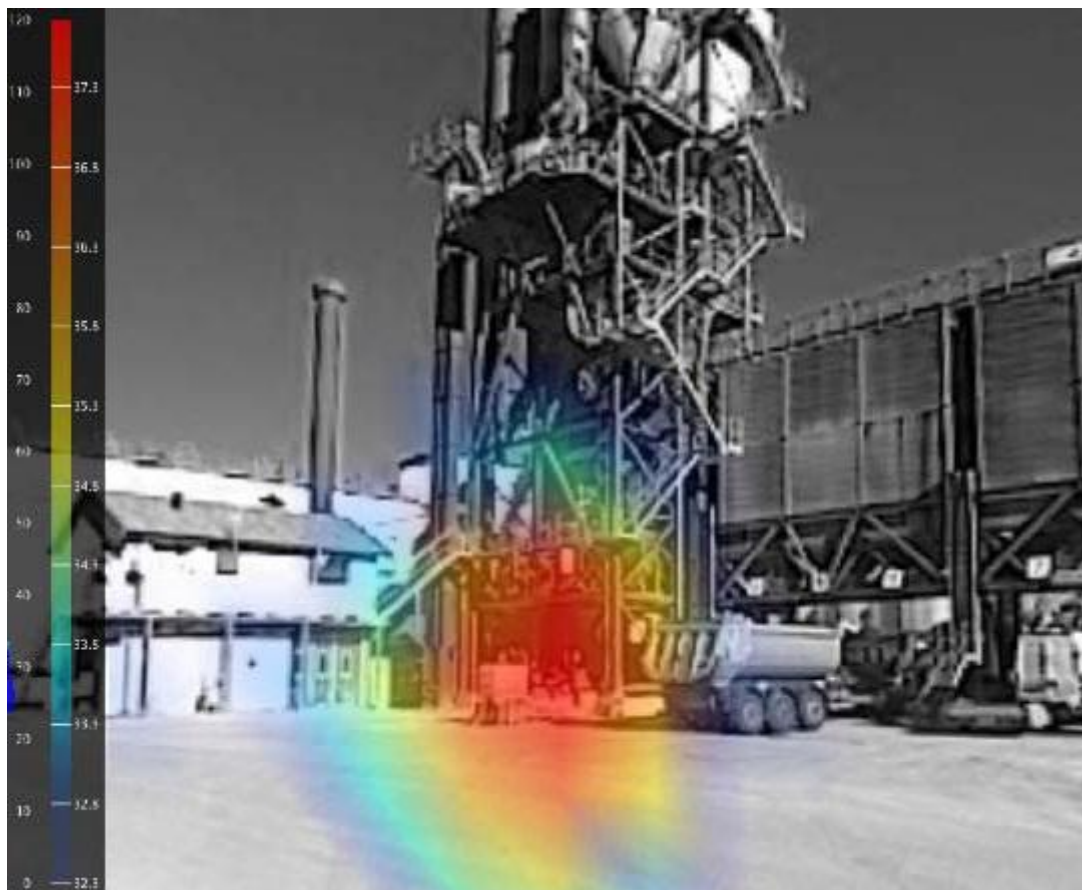
NAH – Nearfield acoustic holography (akustická holografie v blízkém poli)

SONAH - statistically optimal nearfield acoustic holography (statisticky optimalizovaná akustická holografie v blízkém poli)

## Úvod

Zjišťování zdrojů hluku pomocí měření akustické intenzity dnes neodmyslitelně patří do několika průmyslových odvětví. Například do stavebního nebo automobilového průmyslu.

Pro měření akustické intenzity existuje několik rozdílných metod. Mezi tyto metody patří měření pomocí akustických sond nebo pomocí akustických kamer. Akustické kamery jsou složitější na konstrukci a zpracování dat, ale poskytují mnohem komplexnější výsledky měření, jejichž největší výhodou je grafické znázornění měřeného objektu. Z těchto výsledků je tedy zřejmé, odkud se hluk šíří, což napomáhá například konstruktérům motorů k odhlučnění potřebných částí, popřípadě jejich úpravám. Pro odlišná měření se používají různé technologie. Jako například NAH, Beamforming nebo SONAH.



Obrázek 1 - graficky znázorněný výsledek měření (převzato z [20])

# 1 Akustika

## 1.1 Zvuk

Zvukem nazýváme kmitavý pohyb molekul daného prostředí, ve kterém zvuk vzniká. Samotný kmitavý pohyb je vytvářen periodickým smršťováním a rozpínáním prostředí, v němž se zvuková vlna šíří. Kmitavým pohybem se rozumí pohyb hmotného bodu z rovnovážné polohy do místa, kde výchylka dosahuje největší hodnoty. Toto místo je nazýváno amplituda. Potom se hmotný bod pohybuje do druhé amplitudy a následně do rovnovážné polohy, případně pokračuje v kmitavém pohybu.

Dobu, za kterou hmotný bod projde oběma místy maximální výchylky (amplitudami) a dostane se zpět do rovnovážné polohy, se nazývá perioda. Perioda je značena  $T$ .

Převrácená hodnota periody je frekvence kmitavého pohybu (1).

$$f = \frac{1}{T} \text{ [Hz]} \quad (1)$$

Co se frekvence týče, rozsah normálního lidského sluchu je od 20 Hz do 20 kHz. Další rozdělení je následující (viz. Tabulka 1):

Frekvence	Označení
do 20 Hz	Infrazvuk
20 - 40 Hz	Nízkofrekvenční zvuk
8 - 16 kHz	Vysokofrekvenční zvuk
nad 20 kHz	Ultrazvuk

Zvuk lidským sluchem nezachytitelný
Zvuk slyšitelný lidským sluchem

*Tabulka 1 - Rozdělení zvuku*

## 1.2 Akustický tlak

Akustický tlak  $p$  [Pa] je skalární veličina. Akustický tlak odpovídá síle působící na element plochy v prostředí vlnivého děje. Jedná-li se o sinusovou vlnu, platí vztah (2).

$$p = p_{\max} \cdot \sin(\omega \cdot t) \text{ [Pa]} \quad (2)$$

*Akustický tlak, kde  $p_0$  je maximální akustický tlak v průběhu periody.*

Rozlišujeme dvě základní referenční hodnoty akustického tlaku. Práh citlivosti a práh bolestivosti. Rozsah těchto referenčních hodnot je  $2 \cdot 10^7$

$$p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ [Pa]}$$

*Práh citlivosti*

$$p_1 = 10^2 \text{ [Pa]}$$

*Práh bolestivosti*

[1]

## 1.3 Akustický výkon

Výkon jako takový je definován jako práce vykonaná za jednotku času, kde práce je součinem síly a dráhy. Pro diferenciálně malé časové úseky je okamžitý výkon dán součinem působící síly a rychlosti. Poněvadž je akustický tlak definován silou působící na jednotkovou plochu, můžeme vyjádřit akustický výkon vztahem (3)

$$W = p \cdot v \cdot S = I \cdot S \text{ [W]} \quad (3)$$

*Vztah pro akustický výkon, kde  $S$  je sledovaná plocha*

[1]

## 1.4 Akustická intenzita

Akustická intenzita je vektor a je definována jako tok akustické energie v daném směru a smyslu plochou kolmou k tomuto směru, vztažený na jednotku plochy. Z této definice je zřejmý vztah mezi akustickou intenzitou a akustickým výkonem (4).

$$W = \int_S I \cdot dS \text{ [W]} \quad (4)$$

Akustická intenzita je vektorovým součinem akustické rychlosti a akustického tlaku. Pro ustálený stav lze akustickou intenzitu zpětně odvodit (5).

$$I = \frac{W}{S} = p_{ef} \cdot v_{ef} \cdot \cos \varphi \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2}; \text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (5)$$

Stejně jako u tlaku rozlišujeme dvě referenční hodnoty akustické intenzity a to práh slyšení a práh bolesti.

Práh slyšení:

Jedná se o nejmenší akustickou intenzitu, kterou je možné vnímat lidským sluchem.

$$I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$$

*Práh slyšení vyjádřený jako hodnota akustické intenzity*

Práh bolesti:

Akustická intenzita, při jejímž překročení je možné vyvolat bolestivý pocit.

$$I = 1 \text{ W/m}^2$$

*Práh bolesti vyjádřený jako hodnota akustické intenzity*

[1]

#### 1.4.1 Hladina akustické intenzity

Poměr nejmenší a největší intenzity zvuku, tedy poměr mezi prahem slyšení a prahem bolesti, je dvanáct dekad. Proto se pro vyjadřování intenzity zvuku volí logaritmické měřítko. Díky tomu stačí rozdělit měřítko „pouze“ na 120 dílků. Jednotkou hladiny akustické intenzity je 1 B (bel). V praxi se však používají jednotky vyšší, tedy dB, protože 1 dB je přibližně rozlišovací schopnost lidského ucha.

$$L_I = 10 \cdot \log\left(\frac{I}{I_0}\right) \text{ [dB]} \quad (6)$$

*Přepočítání mezi akustickou intenzitou  $I$  a hladinou akustické intenzity  $L$ , kde  $I_0$  je intenzita prahu slyšení*

$$L_p = 20 \cdot \log\left(\frac{p}{p_0}\right) \text{ [dB]} \quad (7)$$

*Přepočítání mezi akustickým tlakem  $p$  a hladinou akustické intenzity  $L$ , kde  $p_0$  je akustický tlak prahu slyšení*

[1][2][3][4]

## 2 Měření akustické intenzity

### 2.1 Důvody měření akustické intenzity

Hlavním důvodem měření akustické intenzity je změřit hodnoty akustické intenzity a následně z nich stanovit akustický výkon. Převáděno do praxe, měřením chceme zjistit, která část zařízení vydává největší akustický výkon, nebo výkon, který je za hranicí škodlivosti, nebezpečnosti pro samotné zařízení. Toho lze dosáhnout měřením akustického tlaku. Výhody proti tomuto měření má však měření akustické intenzity. Výhody vycházejí už ze samotné definice akustické intenzity. Tedy, že akustická intenzita je vektorová veličina vyjadřující akustickou energii vyzářenou přes plochu. Díky tomu, že akustická intenzita definována směrem je samotné měření méně náchylné na okolní zdroje zvuku.

### 2.2 Normy

Akustická měření jsou řízeny normou ČSN ISO 3740, která pomáhá určit pro kterou situaci je daná měřicí hodnota vhodná.

Veškeré měření akustické intenzity je řízeno normami ČSN ISO 9614-1, ČSN ISO 9614-2 a ČSN ISO 9614-3.

ČSN ISO 3740 – Akustika – Určení hladin akustického výkonu zdrojů hluku – Směrnice pro použití základních norem

ČSN ISO 9614-1 - Akustika - Určení hladin akustického výkonu zdrojů hluku s využitím akustické intenzity - Část 1: Měření v bodech

ČSN ISO 9614-2 - Akustika - Určení hladin akustického výkonu zdrojů hluku pomocí akustické intenzity - Část 2: Měření skenováním

ČSN ISO 9614-3 - Akustika - Určování hladin akustického výkonu zdrojů hluku pomocí akustické intenzity - Část 3: Přesná metoda měření skenováním

[12]

### 3 Způsoby měření akustické intenzity

Pro měření akustické intenzity se používají dva způsoby. První způsob, který je znám a je používán již od sedmdesátých až osmdesátých let dvacátého století, je měření p-p akustickou sondou (p-p acoustic probe). P-p akustická sonda využívá dvou tlakových mikrofonů. (mikrofon, který je proveden tak, aby akustická vlna dopadla na membránu pouze z jedné strany, ale zbytek systému je akusticky uzavřen [10]) Druhá metoda, využívající akustický tlak a akustickou rychlost, nemohla být využívána z důvodu absence přesného a spolehlivého převodníku rychlosti částic (particle velocity transducer). S příchodem tohoto převodníku bylo možné sestavit p-u akustickou sondu využívající právě toto zařízení a jeden tlakový mikrofon.

V současnosti „nejmladším“ způsobem měření akustické intenzity je akustická kamera (acoustic camera), nebo také mikrofonní pole (microphone array). Mikrofonní pole není nic jiného než několik mikrofonů upevněných do mřížky. Existuje několik způsobů jak mikrofony v mřížce rozmístit a liší se podle druhu měření. Dále je potřeba výpočetní zařízení, které informace z mikrofonů zpracovává a převádí je do vizuální podoby.

[4][7][8]

#### 3.1 Kalibrace mikrofonů

Mikrofony s ideální kmitočtovou charakteristikou (jako například kondenzátorové) je možné kalibrovat na jednom konkrétním kmitočtu. To je jejich velká výhoda. Pro kalibraci těchto mikrofonů je vhodné použít kalibrátory pistofonové nebo kalibrátory tónové.

Pistofonový kalibrátor je založen na principu pístu kmitajícího do definovaného objemu, který je uzavřen membránou mikrofonu. Tento kalibrátor pracuje s nižšími kmitočty, kolem 250 Hz. Tato vlastnost by se dala označit za jeho nevýhodu vzhledem k tomu, že kalibrace může být ovlivněna zařazeným váhovým filtrem.

Naproti tomu kalibrátory tónové, pracující na kmitočtu 1 kHz, obsahují generátory s výstupem na piezoelektrický reproduktor, který vyzařuje do měřicí komůrky. Při frekvenci 1kHz se neprojeví útlum váhových filtrů, protože je nulový.

Výhodnější jsou tónové kalibrátory i vzhledem k tomu, že jsou na rozdíl od pistofonových kalibrátorů nezávislé na atmosférickém tlaku. Teplotní závislost je u obou způsobů zanedbatelná.

Nutnou podmínkou pro přesnou kalibraci mikrofonu je správné usazení mikrofonu v kalibrátoru, protože špatná poloha způsobí nepřesnost v předávaném akustickém tlaku.

[1]

### 3.2 Akustická sonda typu p-p



Obrázek 2 - p-p akustická sonda s ovladačem (převzato z [9])

Tato sonda využívá dvou fázově shodných tlakových mikrofonů v přesně definované pozici vůči sobě. Nejčastěji využívaná konstrukce je umístění mikrofonů proti sobě na vzdálenost rozpěrky. Délka rozpěrky se volí podle frekvenčního rozsahu měření a pohybuje se v rozsahu od 6 do 50 mm. Čím nižší frekvenční rozsah měření, tím větší délka rozpěrky (obrázek 3).





*Obrázek 3 - detail rozpěrek různých velikostí (převzato z [4])*

Pro výpočet akustické intenzity potřebuje sonda hodnotu akustického tlaku a hodnotu akustické rychlosti. Akustický tlak je získáván zprůměrováním akustického tlaku na obou mikrofonech. Akustická rychlost je vypočítána z konečného rozdílu aproximací gradientu tlaku. Akustická intenzita je vektorovým součinem akustické rychlosti a akustického tlaku.

Velký vliv na měření má nesoulad fází mikrofonů. Pokud bude index tlak-intenzita měření vysoký, může i malý rozdíl mezi fázovou odezvou měřicích kanálů způsobit značné zkreslení. Při měření závisí přijatelná hodnota indexu tlak-intenzita na přesnosti fázové shody mikrofonů. Tedy na tzv. indexu zbytkové intenzity. Zbytková intenzita je hodnota akustické intenzity v dokonale difúzním poli, kde je akustická intenzita nulová. Na zbytkové intenzitě závisí kvalita měření. Index zbytkové intenzity  $\delta_{p10}$  [dB] je definován jako rozdíl akustického tlaku a akustické intenzity v dokonale difúzním poli. Je to veličina frekvenčně závislá. Se špičkovým vybavením se ve většině frekvenčního rozsahu považuje hodnota indexu tlak-intenzita 10 dB za vysokou. Pokud se pohybujeme ve frekvencích nižších než 200 Hz je i hodnota indexu tlak-intenzita 5 dB vysoká. Vysoké hodnoty indexu tlak-intenzita jsou zapříčiněny chybou mikrofону. Sonda využívající princip tlak-tlak (p-p) nemá problém s měřením ve zvukových polích s vysokou hodnotou reaktivity.

Frekvenční rozsahy, ve kterých mohou p-p akustické sondy měřit, se liší podle typů a podle výrobců a pohybují se mezi 100 Hz – 10 kHz.

**Kalibrace:**

Kalibrace se provádí tak, že je sonda upevněna do speciálního zařízení, kde jsou oba mikrofony, upevněné do tlakové spojky, vystaveny stejnému zvukovému signálu. Tato fáze kalibrace může být využita pro odvození indexu zbytkové intenzity.

[4][7][8][9]



Obrázek 4 - kalibrační zařízení pro p-p akustickou sondu (převzato z [9])

### 3.3 Akustická sonda typu p-u



Obrázek 5 - P-U akustická sonda (převzato z [7])

Velmi důležitým prvkem v p-u akustické sondě je převodník rychlosti částic (particle velocity transducer). Převodník rychlosti částic vychází z principu, který říká, že pokud jsou dva blízko sebe umístěné zahřáté dráty vystaveny proudu vzduchu, bude drát, umístěný proti proudu vzduchu ochlazován více, než drát umístěný po proudu. Rozdíl teplot má vliv na

elektrický odpor drátů a výsledný rozdíl elektrických odporů je měřen elektrickým obvodem, který zprostředkovává signál úměrný rychlosti částic.

Z toho plyne, že každý měřicí systém, fungující na tomto principu (tedy na principu tlakového mikrofónu a převodníku rychlosti částic), je náchylný v reaktivních zvukových polích. Pokud je reaktivita (poměr reaktivní intenzity na aktivní intenzitu v logaritmické formě) vysoká, jako například v blízkém akustickém poli, i pouze velmi malá fázová odchylka mezi dvěma měniči způsobuje velké zkreslení.

Při měření s p-u sondami závisí přípustná hladina reaktivity na přesnosti fázové kalibrace zařízení (viz následující text). Reaktivita více než 5 dB je považována za vysokou, ale mohou se objevit i hodnoty 25 dB. Tento jev souvisí s měřením v blízkém akustickém poli. Jediná možnost tedy je, přemístit měřicí přístroj dále od zdroje zvuku.

Šířka pásma pro p-u akustickou sondu je 20 Hz – 20 kHz.

### **Kalibrace**

Kalibrace p-u sondy je složitější než u p-p sondy. Dva převodníky použité v p-u sondě nemohou mít stejnou amplitudovou a fázovou odezvu, a proto je nezbytné určit korekci jednoho z nich ve vztahu k tomu druhému.

Akustická sonda se proto umísťuje do zvukového pole, které má pevně daný vztah mezi akustickou intenzitou a rychlostí částic. Těchto vztahů se dosahuje v bezodrazových komorách (obrázek 5) dále od zdroje zvuku nebo v tubě pro stojaté vlnění (obrázek6).



*Obrázek 6 - bezodrazová komora (převzato z [15])*



*Obrázek 7 - Tuba stojatého vlnění určená pro kalibraci (převzato z [7])  
[4][7][8][9]*

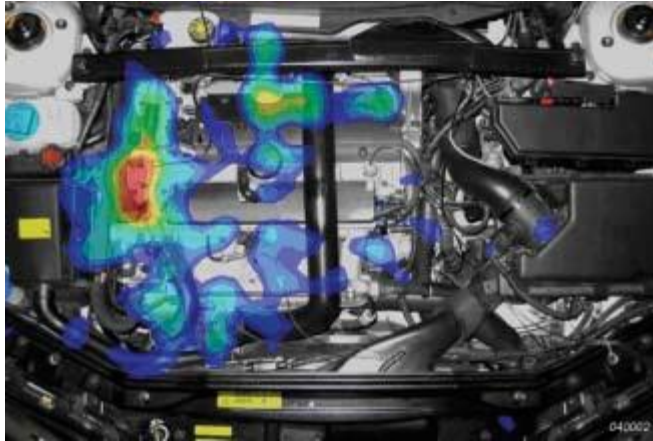
### 3.4 Akustická kamera

Nejnovějším a zároveň nejsložitějším způsobem měření akustické intenzity je akustická kamera nebo také akustické pole. Jedná se o větší počet mikrofonů upevněných do dané konstrukce. Tvar konstrukce a počet mikrofonů se liší podle typu měření. V některých případech je součástí konstrukce i optická kamera, která usnadňuje vizualizaci. Celá tato sestava je dále připojena k zařízení, které je pro tyto účely vytvořeno pro akustické kamery a je vhodné pro vysoké skenovací frekvence a velké množství kanálů. Posledním prvkem této sestavy je výpočetní zařízení (počítač) se softwarem, který je pro tyto účely vytvořený.



*Obrázek 8 - Kruhové mikrofonní pole (převzato z [14])*

Akustická kamera je schopna snímat více prvky zároveň. To je nespornou výhodou, protože vizualizace dat je rychlejší a přesnější.



Obrázek 9 - Vizuální zpracování dat pomocí mikrofonního pole [převzato z [14]]

### 3.4.1 Akustická holografie v blízkém poli (Nearfield Acoustic Holography)

Metoda měření Nearfield Acoustic Holography – NAH předpokládá existenci dvou typů vln. Jedná se o vlny evanescentní a vlny rovinné. Evanescentní vlny existují pouze v blízkém akustickém poli, protože jejich amplituda se vzdáleností od zdroje exponenciálně klesá. Je třeba, aby měřený signál obsahoval evanescentní vlnu, a proto je nutné, aby měřicí plocha byla co nejbližší ploše měřené.

Tři dimenzionální akustická pole (akustický tlak, rychlost částic a akustická intenzita) jsou počítána pomocí dvourozměrné Fourierovy transformace a teorie šíření vln v akustickém prostředí.

Existují zde i omezení, která se týkají samotného mikrofonního pole. Jedná se o minimální (8) a o maximální (9) možnou změřitelnou frekvenci signálu.

$$f_{min} = \frac{c}{8 \cdot D} \text{ [Hz]} \quad (8)$$

$$f_{max} = \frac{c}{2 \cdot d} \text{ [Hz]} \quad (9)$$

*Vztahy pro minimální a maximální měřitelnou frekvenci,  
kde  $d$  je rozteč mezi mikrofony,  $D$  je průměr pole a  $c$  je rychlost zvuku*

### 3.4.2 Beamforming

Metoda, která je používána pro měření akustického pole ve střední až větší vzdálenosti od zdroje zvuku. Dále pak se používá pro pohybující se zdroje zvuku nebo v aerodynamickém tunelu, (díky potlačení hluku pozadí).

Technika akustického Beamformingu byla poprvé vyvinuta pro ponorky. Ve vzdáleném akustickém poli jsou vlny, narážející na mikrofonní pole, rovinné. Všechny signály měřené mikrofonním polem se sčítají s přihlédnutím ke zpoždění, které odpovídá vzdálenosti šíření. Tlak může být vypočten v jakémkoli místě před akustickou kamerou, což umožňuje práci se všemi druhy povrchu. Akustický Beamforming je někdy nazýván "součet a zpoždění" (sum and delay), neboť posuzuje relativní zpoždění zvukových vln, dopadajících k různým měřicím bodům. Beamforming vyžaduje, aby všechny údaje byly měřeny současně. Typicky se jedná o systém o 40 kanálech nebo více.

U beamformingu jsme omezeni prostorovým rozlišením (10).

$$\text{prostorové rozlišení} = \frac{d}{D} \lambda \quad (10)$$

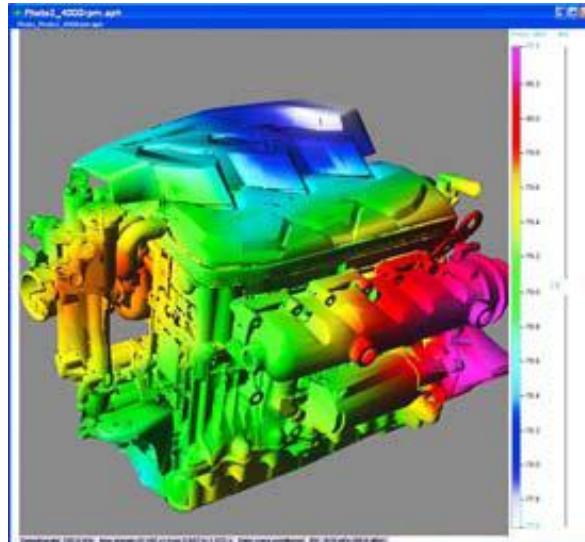
*Vztah pro prostorové rozlišení, kde  $d$  je vzdálenost mezi zdrojem zvuku a měřicím polem,  $D$  je průměr pole a  $\lambda$  je vlnová délka.*

Pokud je přijímač ve vzdálenosti  $D$  od zdroje, je rozlišení shodné s vlnovou délkou. Pokud je pole umístěno dále, rozlišení se zhorší.

Akustický beamforming je v zásadě použitelný při frekvenci 1000 Hz a výše.



*Obrázek 10 - měření automobilového motoru pomocí beamformingu (převzato z [14])*



Obrázek 11 – Výsledek (převzato z [14])

[14][17]

### 3.4.3 SONAH

Technologie SONAH (statistically optimal near-field acoustic holography) je obdobou měřicí metody NAH a stejně jako tato metoda je učena pro měření v blízkém akustickém poli.

Na rozdíl od metody NAH, kde se pro zpracování dat využívá Fourierovy transformace, používá SONAH přímého výpočtu. Díky tomu jsou eliminovány rušivé jevy pro NAH typické. Je-li k dispozici spektrum určitého vlnění, vychází SONAH z předpokladu, že charakter tohoto vlnění lze vyjádřit sadou elementárních vln. Tato sada je reprezentována převodními koeficienty. Díky nim je možno vyjádřit parametry vlnění na pozicích mikrofonů.

Metoda SONAH využívá v některých případech stejné rozložení mikrofonů v mikrofonním poli jako metoda Beamforming. Tedy náhodné resp. pseudonáhodné rozložení mikrofonů. To je také výhodou, protože akustické sondy s tímto rozložením mohou využívat výpočetní metody SONAH a beamforming.

[18]

### 3.5 Shrnutí

Každý z popisovaných systémů má své výhody a svá omezení.

Ať už hovoříme o p-p nebo p-u akustické sondě, o akustické kameře využívající technologii blízkého pole nebo kameře založené na beamformingu.

#### 3.5.1 P-P vs. P-U akustické sondy

Jak už bylo řečeno, použití jedné nebo druhé sondy záleží na akustickém poli, ve kterém bude měření prováděno. Metoda tlak-tlak je velmi citlivá na vysoké hodnoty indexu tlak-intenzita, metoda tlak-rychlost s tím nemá problémy. A naopak P-P akustické sondy dokážou měřit v polích s vysokou hodnotou reaktivity, kde sondy P-U zaostávají.

Velikost sond se velmi liší. Velikost P-P akustické sondy se pohybuje kolem 10 cm. P-U sondy mohou být pouze několik milimetrů velké.

Šířka pásma, ve kterém je možno operovat, se pro tyto dva druhy sond také liší. Frekvenční rozsah P-U sondy je větší (20Hz-20kHz), než u P-P akustické sondy (100Hz-10kHz).

[7][8][9]

#### 3.5.2 NAH vs. Beamforming

Není možné říci, která z těchto technologií je lepší. Každá z nich má své využití.

U akustické holografie v blízkém poli jsme omezeni především vzdáleností od zdroje šíření zvuku, která musí být co nejmenší. Zároveň musí mikrofonní pole pokrýt větší část měřené plochy. A je nutné, aby vzdálenost mezi mikrofony byla menší než polovina vlnové délky. Pokud je zdroj zvuku větší než vlnová délka (čím vyšší frekvence, tím pravděpodobnější), je pro správné měření potřeba velké množství měřicích bodů. To však není nutně nevýhoda, protože tím je možno pořizovat výsledky s velkým rozlišením.

Jedním z rozdílů mezi technologií NAH a Beamformingem je, že Beamforming nemá tak velké nároky na provedení mikrofonního pole co se týče umístění mikrofonů, ty na rozdíl od NAH mikrofonního pole nemusí být pravidelně rozmístěny. Na druhou stranu pokud je metodou Beamforming měřeno na větší vzdálenost, je třeba měřit pomocí většího akustického pole, aby bylo udrženo dobré prostorové rozlišení.



Obrovskou výhodou Beamformingu je, že dokáže měřit pohybuující se zdroje zvuku. Na druhou stranu by měla být měřicí vzdálenost co nejmenší, protože se vzdáleností klesá rozlišovací schopnost.

[14][15][17]

## 4 Průzkum trhu

### 4.1 Acoustic camera

Společnost Acoustic camera nabízí celou řadu mikrofonních polí a měřicího příslušenství.

#### 4.1.1 Kruhové pole

Kruhové pole je pole, ve kterém jsou mikrofony uspořádány do prstence okolo samotné kamery v dané vzdálenosti. Pole se mohou lišit počtem mikrofonů nebo průměrem. (obrázek 7)

	Array-Ring48-75	Array-Ring32-75	Array-Ring36-35	Array-Ring72-140
Doporučená měřicí vzdálenost	0,5 - 5 m	0,7 - 3 m	0,35 - 2 m	2 - 20 m
Doporučený frekvenční rozsah	400 Hz - 20 kHz	400 Hz - 20 kHz	400 Hz - 20 kHz	250 Hz - 20 kHz
Počet mikrofonů	48	32	32	72
Dynamický rozsah mikrofonů	35 - 130 dB	35 - 130 dB	35 - 130 dB	35 - 130 dB
Průměr	75 cm	75 cm	35 cm	140 cm

*Tabulka 2 - Nabídka kruhových polí*

### 4.1.2 Sférické pole

Na obrázku 11 je ukázka sférického mikrofonního pole. Mikrofony tedy u tohoto typu směřují všemi směry.



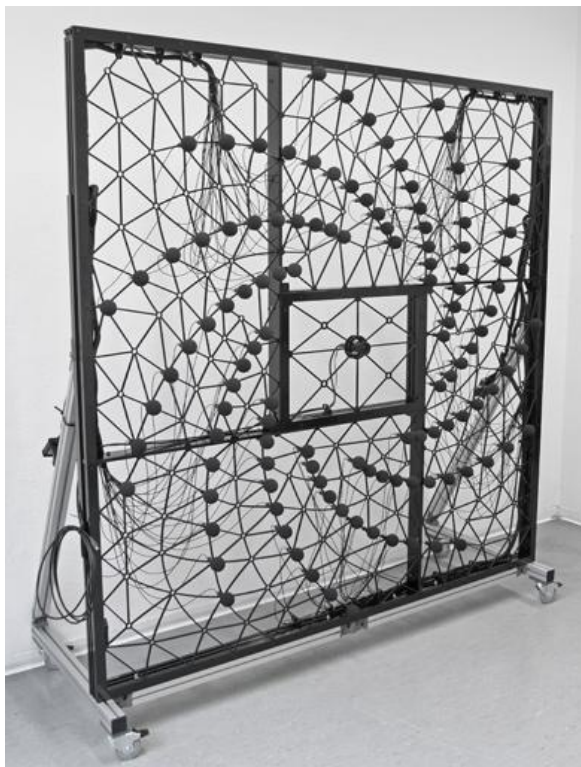
Obrázek 12 - Sférické pole (převzato z [19])

	Array-Sphere 32	Array-Sphere 48	Array-Sphere 120
Doporučená měřicí vzdálenost	0,35 - 1,5 m	0,3 - 1,5 m	0,5 - 3,5 m
Frekvenční rozsah	1 kHz - 10 kHz	1 kHz - 10 kHz	600 Hz - 10 kHz
Počet mikrofonů	32	48	120
Dynamický rozsah mikrofonů	35 - 130 dB	35 - 130 dB	35 - 130 dB
Průměr	35 cm	35 cm	60 cm

Tabulka 3 - Nabídka sférických polí

### 4.1.3 Univerzální pole

Mikrofony v univerzálním poli od firmy Acoustic camera je možno rozmístit libovolně díky mřížce. Na obrázku 12 je možno vidět spirálovité uspořádání.



Obrázek 13 – Ukázka univerzálního pole (převzato z [19])

Doporučená měřicí vzdálenost	podle rozestavení
Frekvenční rozsah	100 Hz - 20 kHz
Počet mikrofonů	libovolný
Dynamický rozsah mikrofonů	35 - 130 dB

Tabulka 4 - Univerzální pole

#### 4.1.4 Hvězdicové pole

Hvězdicová pole jsou určena pro měření, kde je třeba měřit z větší vzdálenosti. Ramena tohoto pole se dají složit a jsou dlouhá 2 m.



*Obrázek 14 - Hvězdicové pole (převzato z [19])*

	Array-Star 36	Array-Star 48
Doporučená měřicí vzdálenost	3 - 300 m	3 - 300 m
Frekvenční rozsah	100 Hz - 7 kHz	100 Hz - 7 kHz
Počet mikrofonů	36	48
Dynamický rozsah mikrofonů	35 - 130 dB	35 - 130 dB

*Tabulka 5 - Nabídka hvězdicových polí*

#### 4.1.5 Ruční plošné pole Array Paddle 2x24

Novinkou od společnosti Acoustic Camera je toto ruční akustické pole určené pro blízká akustická pole. Označení 2x24 vychází z dvou vrstev mikrofonů po 24.



Obrázek 15 – Ruční plošné pole (Převzato z [22])

	Array Paddle2x24
Doporučená měřicí vzdálenost	0,1-0,15 m
Doporučený frekvenční rozsah	10 Hz - 6 kHz
Počet mikrofonů	48
Dynamický rozsah mikrofonů	35 - 130 dB
Vzdálenost mezi mikrofony	7 cm

Tabulka 6 – Array Paddle 2x24

Pomocí vzorců (8) a (9) je možné dopočítat frekvenční rozsah pro technologii NAH. Pro příklad použijeme výpočet pro akustické pole Array Paddle 2x24:

$$f_{min} = \frac{c}{8 \cdot D} = \frac{343}{8 \cdot 0,03} = 142 \text{ Hz} \quad (8)$$

$$f_{max} = \frac{c}{2 \cdot d} = \frac{343}{2 \cdot 0,07} = 2450 \text{ Hz} \quad (9)$$

Do vzorců (8) a (9) byly dosazeny parametry pole, rychlost zvuku  $c$  je brána při teplotě 20°C

	Array Paddle2x24
$f_{min}$ [Hz]	143
$f_{max}$ [Hz]	2450

Tabulka 7 – Frekvenční omezení pro metodu NAH pro pole Array Paddle 2x24

## 4.2 Norsonic

Další společností zabývající se distribucí akustických kamer je společnost Norsonic, jejichž vlajkovou lodí je mikrofonní pole Nor848 (obrázek 14).



Obrázek 16 - Akustická kamera Nor848 (převzato z [20])

Doporučená měřicí vzdálenost	min 0,5 m
Frekvenční rozsah	100 Hz - 7 kHz
Počet mikrofonů	225
Dynamický rozsah mikrofonů	10 dB - 110 dB
Poloměr	105 cm

Tabulka 8 - Nor848

### 4.3 iSEMcon

ISEMcon je společnost nabízející mikrofonní pole, do kterého si může zákazník vybrat mikrofony z jejich vlastní nabídky a zároveň uspořádat mikrofony do předpřipravené konstrukce podle potřeby.



*Obrázek 17 - Ukázka pole*



*Obrázek 18 - Jeden z nabízených mikrofonů pro toto pole (převzato z [21])*



## 4.4 Brüel & Kjær

Pravděpodobně největším výrobcem a zároveň obchodníkem na trhu s akustickými měřicími prostředky je dánská společnost Brüel & Kjær. Společnost nabízí široký sortiment akustických sond a kamer, ale také služby spojené přímo s měřením.

### 4.4.1 Ruční P-P akustická sonda

Tento set sestává ze samotné P-P akustické sondy a výpočetního zařízení, které okamžitě zobrazuje naměřené hodnoty. Snadná manipulace s ruční sondou je její nespornou výhodou.

Frekvenční rozsah sondy je udáván 50 Hz – 10 kHz.



Obrázek 19 – Kompletní sestava P-P akustické sondy (převzato z [22])

#### 4.4.2 Sférické pole

Toto kulové pole je využíváno pro měření interiérů pomocí metody Beamforming při které vykazuje lepší rozlišení.

Sestava může obsahovat 36 nebo 50 mikrofonů.



Obrázek 20 – Sférické pole při samotném měření interiéru vozidla (převzato z [23])

	Spherical array 36	Spherical array 50
Frekvenční rozsah	200 Hz - 5 kHz	200 Hz - 8 kHz
Počet mikrofonů	36	50
Průměr [cm]	19,5	19,5

Tabulka 9 – Nabídka sférických polí

#### 4.4.3 Wheel array a Half-wheel array – Beamforming

Tato pole používající metodu beamforming se využívají převážně k měření pohybujících se objektů.



Obrázek 21 a 22 – Ukázka kolového (vlevo) a půl-kolového pole (vpravo) (převzato z [24])

	Wheel array	Half-wheel array
Počet mikrofonů	42 a více	42 a více
Poloměr [m]	0,65 - 4	1,5 - 4
Maximální frekvence	20 kHz	10 kHz

Tabulka 10 – Nabídka kolových a půl-kolových polí

#### 4.4.4 Slice wheel array – SONAH

Toto kolové pole splňuje na rozdíl od předchozích polí (viz 4.3.4) podmínku pro měření metodou SONAH. Tedy přesně definovaná pozice měřicích prvků. Proto je možné jej použít pro obě měřicí metody, SONAH i Beamforming.

I toto pole je vyráběno v několika verzích. A to buď s 18, 36, 60 nebo 84 mikrofony. Nejčastěji jsou využívány verze 36 a 60 prvků.



Obrázek 23 – Kolové pole s pseudonáhodným uspořádáním mikrofonů (převzato z [24])

	Slice Wheel Array 36	Slice Wheel Array 60
Poloměr [m]	0,35 - 2	
Maximální frekvence - Beamforming	6 kHz	8 kHz
Maximální frekvence - SONAH	1,5 kHz	1,2 kHz

Tabulka 11 – Frekvenční omezení kolového pole pro různé metody

#### 4.4.5 Grid array a 2D Robot

Grid array je konstrukčně provedeno pro měření pomocí metod NAH a SONAH, kde je třeba splnit podmínku stejné vzdálenosti měřicích prvků. Tato vzdálenost se dá měnit pomocí konstrukčních prvků různé velikosti.

Toto pole je využíváno pro měření statických objektů.

Obdobou mřížkového pole je 2D robot, kde je samotná akustická kamera upevněna na konstrukci podobné plotteru. Měřicí soustava se pohybuje a zaznamenává data.



Obrázek 24 a 25 – Mřížkové pole (vlevo) a 2D robot (vpravo (převzato z [24]))

	Grid array	2D Robot
Rozměry	12,5x12,5 cm a více	1x1m - 10 x 3 m
Počet mikrofonů	6 a více	6.96
Maximální měřicí frekvence	6 kHz	5 kHz

Tabulka 12 – Parametry polí

#### 4.4.6 Ruční akustické pole

Jedná se o akustickou kameru konstrukčně podobnou mřížkové Viz. 4.4.5, avšak určenou pro ruční držení a manipulaci.

Společnost Brüel&Kjær nabízí dvě varianty tohoto produktu a to jednovrstvou a dvouvrstvou.

Nespornou výhodou dvouvrstvé varianty je tak jako u ruční akustické kamery od společnosti Acoustic Camera Viz. 4.1.5 schopnost potlačení signálů z jiného než zamýšleného směru.

Sonda využívá měřicí metodu NAH a SONAH.



Obrázek 26 – Ruční akustické pole (převzato z [24])

	Hand-Held Array
Počet mikrofónů	6x6x1 - 8x8x2
Vzdálenost mezi měřicími prvky [mm]	25, 30, 35, 40, 50 podle počtu mikrofónů
Maximální frekvence	6 kHz

Tabulka 13 – Hand-Held Array

#### 4.4.7 Hvězdicové pole

S tímto polem je možné měřit na větší vzdálenosti, proto se hodí na venkovní použití s možností měřit pohybující se objekty.

Hvězdicové pole využívá měřicí metodu Beamforming.



Obrázek 27 – Hvězdicové pole s ukázkou venkovního použití (převzato z [24])

	Pentangular Array
Počet mikrofonů	30
Rozměr [m]	3,5
Maximální frekvence	5 kHz

Tabulka 14 – Hvězdicové pole

## Závěr

Práce seznamuje se základními pojmy a veličinami týkající se tématu měření akustické intenzity. Popisuje druhy sond, které se k tomuto měření používají, popisuje jejich principy a srovnává je. Není však možné s určitostí říct která metoda je lepší. Každá sonda pracuje jinak, a proto je její využitelnost jiná, co se týče měřených frekvencí atd. U nejnovějšího typu sond (akustická kamera) se používá několik technologií, které jsou také popsány v práci. Součástí práce je průzkum trhu. Popis výrobků a jejich parametrů několika společností, zabývajících se poskytováním služeb nebo výrobou a distribucí samotných produktů.



## Použitá literatura

[1] SMETANA, Ctirad, et al. Hluk a vibrace : Měření a hodnocení. Vyd. 1. Praha : Sdělovací technika, 1998. 188 s. ISBN 80-901936-2-5.

## Internetové zdroje

- [2] HAVRDOVÁ, Nela. Veličiny pro hodnocení zvuku. In Veliciny.ppt [cit. 2011-04-30]. <konvav.czweb.org/prezentace/teorie/Veliciny.ppt>
- [3] KOPEČEK, Ivan. Co je to zvuk?. In Ds2p.ppt [cit. 2011-04-30]. <www.fi.muni.cz/~kopecek/ds2p.ppt>
- [4] Akustika : Měření hluku. In Mereni\_hluku.pdf [cit. 2011-04-30]. <http://www.337.vsb.cz/materialy/experimentalni\_mechanika/MERENI\_HLUKU.pdf>
- [5] JANDÁK, Zdeněk. Hluk v pracovním prostředí. In Hluk v pracovním prostředí, 2007 [cit. 2011-05-07]. <http://www.szu.cz/tema/pracovni-prostredi/hluk-v-pracovnim-prostredi>
- [6] STONECYPHER, Lamar. Bright Hub [online]. 2008 [cit. 2011-05-07]. Sound Measurements. <http://www.brighthub.com/engineering/mechanical/articles/9251.aspx>
- [7] JACOBSEN, F. Measurement of sound intensity: p-u probes versus p-p probes. In Paper\_NOVEM\_45.pdf [online] [cit. 2011-05-20]. <http://www.fem.unicamp.br/~lva/Finn\_Jacobsen/Paper\_NOVEM\_45.pdf>
- [8] Microflown Technologies [online]. 200? [cit. 2011-05-20]. Sound Intensity. <http://www.microflown.com >
- [9] RODUCT DATA : Sound Intensity Probe Kit — Type 3599 Sound Intensity Microphone Pair — Type 4197 Dual Preamplifier — Type 2683. In Bp1880.pdf [online] [cit. 2011-05-20]. <http://www.bksv.com/admin/login.aspx?document=/doc/bp1880.pdf>
- [10] Akustické řešení mikrofonů. In Akustické řešení mikrofonů [online]. 2007 [cit. 2011-05-20]. <http://www.haaf.cz/view.php?cisloclanku=2007060305>
- [11] Akustické centrum [online]. 200? [cit. 2011-05-24]. Akustické centrum. <http://www.akustickecentrum.cz/index.php?leftodkaz=1&upodkaz=0>
- [12] NORMY.biz [online]. 200? [cit. 2011-05-24]. NORMY.biz. <http://seznam.normy.biz/>
- [13] HALODOVÁ, Jana. Akustická kamera : Akustická kamera. In Halodova\_Jana\_CL.pdf [online]. 2008 [cit. 2011-05-29]. <http://www.fce.vutbr.cz/veda/juniorstav2008\_sekce/pdf/2\_3/Halodova\_Jana\_CL.pdf>
- [14] Acoustic camera. In Acoustic\_camera.pdf [online] [cit. 2011-05-30]. <http://www.sagetechnologies.com>
- [15] Knowledgegerush [cit. 2011-05-30]. Anechoic chamber. <http://www.knowledgegerush.com/kr/encyclopedia/Anechoic\_chamber/>
- [16] GRUNTORÁD, Radomír. Microphone arrays in acoustic holography. In 01-xgrunt00.pdf [cit. 2011-05-31]. <http://www.feec.vutbr.cz/EEICT/2006/sbornik/02-Magisterske\_projekty/03-Kybernetika\_a\_automatizace/01-xgrunt00.pdf>
- [17] Acoustic beamforming. In Acoustic beamforming 200? [cit. 2011-05-31]. <http://www.lmsintl.com/acoustic-beamforming>
- [18] NEVOLE, Tomáš. IDENTIFIKACE ZDROJŮ HLUKU POMOCÍ AKUSTICKÉ HOLOGRAFIE V BLÍZKÉM POLI. In Zav\_prace\_soubor\_verejne.php, 2011 [cit. 2011-06-24]. <http://www.vutbr.cz/www\_base/zav\_prace\_soubor\_verejne.php?file\_id=39291>
- [19] Acoustic camera, 200? [cit. 2011-06-24]. <http://www.acoustic-camera.com/en/product-ac-pro/microphone-arrays>
- [20] Norsonic. 200? [cit. 2011-06-24]. Nor848 Acoustic Camera. <http://www.norsonic.com/index.php?sideID=7980&ledd2=8033&ledd1=7984&link>
- [21] ISEMcon. 200? [cit. 2011-06-24]. Microphone array. <http://www.content.ibf-acoustic.com/catalog/product\_info.php?cPath=39&products\_id=79>
- [22] BRÜEL&KJÆR. Hand-held Sound Intensity System [online]. [cit. 2012-06-05]. Dostupné z: <http://www.bksv.com/Products/handheld-instruments/sound-level-meters/sound-level-meter-kits/sound-intensity-2270-g.aspx?tab=overview>
- [23] Product Information: Spherical Beamforming Systems. BRÜEL&KJÆR [online]. [cit. 2012-06-05]. Dostupné z: <http://www.bksv.com/doc/bn0690.pdf>
- [24] Product DATA: PULSE Array-based Noise Source Identification Solutions. BRÜEL&KJÆR. [online]. [cit. 2012-06-05]. Dostupné z: Product DATA: Spherical Beamforming Systems. BRÜEL&KJÆR [online]. [cit. 2012-06-05]. Dostupné z: <http://www.bksv.com/doc/bp2144.pdf>