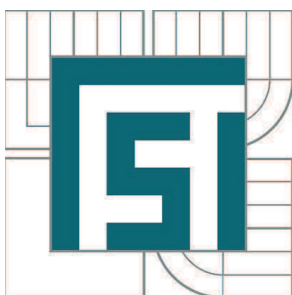


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

## AKUSTICKÁ DIAGNOSTIKA STROJŮ

ACOUSTIC DIAGNOSTICS OF MACHINES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. PETR GAJDOŠ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. IVAN MAZŮREK, CSc.

BRNO 2012



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování

Akademický rok: 2011/2012

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Petr Gajdoš

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Konstrukční inženýrství (2301T037)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### **Akustická diagnostika strojů**

v anglickém jazyce:

### **Acoustic diagnostics of machines**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem je vytvoření formálních i technických podmínek výukového pracoviště pro demonstraci metody mapování akustických polí SONAH na platformě B&K Pulse. Součástí projektu budou softwarové pomůcky a výsledky měření zkušebního akustického zdroje.

Cíle diplomové práce:

Diplomová práce musí obsahovat:

- 1.Úvod
- 2.Přehled současného stavu poznání
- 3.Formulaci řešeného problému a jeho analýzu
- 4.Vymezení cílů práce
- 5.Návrh metodického přístupu k řešení
- 6.Analýzu a interpretaci získaných údajů
- 7.Závěr

Forma diplomové práce:průvodní zpráva, měřící protokoly, postery

Typ práce:analytická

Účel práce:pro V-V a tvůrčí činnost ÚK

Výstup RIV:software

Seznam odborné literatury:

- 1) Williams, E., G.: THE NEARFIELD ACOUSTICAL HOLOGRAPHY (NAH) EXPERIMENTAL METHOD APPLIED TO VIBRATION AND RADIATION IN LIGHT AND HEAVY FLUIDS, Naval Research Laboratory, Washington, DC, U.S.A. (Received 21 August 1995)
- 2) Hald, J.: Time Domain Acoustical Holography and Its Applications, Brüel & Kj

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Ivan Mazůrek, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 18.11.2011

L.S.

---

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Cílem této diplomové práce je vypracovat srovnání a zhodnocení vybraných metod mapování akustických polí. Součástí projektu budou softwarové pomůcky a výsledky měření demonstračního měření na testovacím objektu pro všechny zkoumané metody.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Mapování akustických polí, akustická diagnostika, akustická holografie, beamforming, SONAH, STSF, NS-STSF, intenzitní sonda.

## **ABSTRACT**

The aim of this master's thesis is to work out a comparison and evaluation of selected methods used for sound field mapping. Thesis will include software tools and results of sample measurement on test object for each mapping method.

## **KEYWORDS**

Sound field mapping, acoustic diagnostics, acoustic holography, beamforming, SONAH, STSF, NS-STSF, intensity probe.

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

GAJDOŠ, P. Akustická diagnostika strojů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 68 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Ivan Mazůrek, CSc..

---



## **PROHLÁŠENÍ PŮVODNOSTI**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Akustická diagnostika strojů* vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Ivana Mazúrka, CSc. a použitou odbornou literaturu a prameny jsem uvedl v seznamu použitých zdrojů.

V Brně dne 22. 5. 2012

.....  
Bc. Petr Gajdoš



## PODĚKOVÁNÍ

Zde bych velice rád poděkoval doc. Ing. Ivanu Mazůrkovi, CSc a Ing. Milanu Klapkovi, Ph.D., za cenné informace a odborné vedení během vypracování mé diplomové práce.

---



<b>1</b>	<b>ÚVOD.....</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>DEFINICE ZÁKLADNÍCH POJMŮ .....</b>	<b>14</b>
2.1	Zvuk.....	14
2.1.1	Zvuk a hluk .....	14
2.1.2	Vznik hluku.....	14
2.1.3	Šíření hluku.....	14
2.1.4	Akustický tlak .....	15
2.1.5	Akustický výkon .....	15
2.1.6	Akustická intenzita .....	16
2.1.7	Hladiny akustických veličin.....	17
2.1.8	Typy akustických polí.....	18
2.2	Mapování akustických polí.....	19
2.3	Mikrofonní pole.....	19
2.4	Mapování pomocí intenzitní sondy .....	21
2.5	Beamforming .....	21
2.6	Akustická holografie v blízkém poli .....	22
2.6.1	Evanescenční vlna .....	25
2.6.2	STSF – Spatial Transformation of Sound Fields.....	26
2.7	Akustická holografie v časové oblasti.....	27
2.7.1	NS-STSF – Non Stationary Spatial Transformation of Sound Fileds ..29	
<b>3</b>	<b>FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU A JEHO ŘEŠENÍ.....</b>	<b>30</b>
3.1	Motivace diplomové práce .....	30
<b>4</b>	<b>VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE.....</b>	<b>31</b>
4.1	Cíle práce.....	31
<b>5</b>	<b>NÁVRH METODICKÉHO PŘÍSTUPU K ŘEŠENÍ .....</b>	<b>32</b>
5.1	Popis principu metod.....	32
5.1.1	Mapování pomocí intenzitní sondy.....	32
5.1.2	Beamforming .....	36
5.1.3	SONAH – STSF.....	40
5.1.4	SONAH – NS-STSF .....	41
5.2	Provedení demonstračního měření .....	43
5.2.1	Testovaný objekt.....	43
5.2.2	Mapování pomocí intenzitní sondy.....	44
5.2.3	Beamforming .....	46
5.2.4	SONAH – STSF.....	48
5.2.5	SONAH – NS-STSF .....	50
5.3	Zpracování naměřených dat.....	51
5.3.1	Mapování pomocí intenzitní sondy.....	51
5.3.2	Beamforming .....	52
5.3.3	SONAH – STSF.....	55
5.3.4	SONAH – NS-STSF .....	55
<b>6</b>	<b>ANALÝZA A INTERPRETACE ZÍSKANÝCH ÚDAJŮ .....</b>	<b>57</b>
6.1	Zhodnocení metod, měření a výsledků.....	57
6.1.1	Metoda intenzitní sondy.....	57
6.1.2	Beamforming .....	59
6.1.3	SONAH – STSF.....	60
6.1.4	SONAH – NS-STSF .....	62

7	ZÁVĚR.....	64
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	67
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK .....	68

## 1 ÚVOD

Akustická diagnostika spolu s měřením vibrací je velice důležitou oblastí technické diagnostiky. Umožňuje nejen lokalizaci a popis zdrojů hluku, ale dokáže vypovědět spoustu informací o technickém stavu zkoumaného objektu, jako jsou vadná ložiska či defekt na ozubeném soukolí.

Pro názornost a srozumitelnost výsledků při lokalizaci zdrojů hluku byly vyvinuty metody mapování akustických polí. Jedná se v základu o vytváření plošných či prostorových map, ze kterých lze snadno odečíst jednotlivé zdroje hluku sledované oblasti.

Tato práce bude zaměřena na nejběžněji využívané mapovací metody, kterými jsou metoda intenzitní sondy, tvarování svazku známé též jako beamforming a skupina metod rekonstrukce akustických veličin na povrchu zdroje hluku označována jako akustická holografie.

Mapování pomocí intenzitní sondy je již velice rozšířené. Oproti tomu s metodami využívající mikrofonní pole, tedy beamformingem, ale především skupinou metod rekonstrukce akustických veličin na povrchu zdroje označovanou jako akustická holografie se v praxi zatím setkáváme jen zřídka, přestože jejich matematický popis je znám již několik desítek let.

Využívání mikrofonních polí, tedy skupin mikrofonů uspořádaných do různých rovinných geometrických tvarů, značně přispělo ke zrychlení a zjednodušení měřících procesů, kterým je společně s popisem jejich principu tato práce věnována.

## 2 DEFINICE ZÁKLADNÍCH POJMŮ

### 2.1 Zvuk

#### 2.1.1 Zvuk a hluk

Zvuk je průvodní jev našeho okolí a nazýváme jím mechanické vlnění pružného okolí ve frekvenčním rozsahu lidské slyšitelnosti, což je 16 Hz – 20 kHz (s rostoucím věkem se pásmo slyšitelnosti zužuje).

Hlukem z pravidla nazýváme takový zvuk, který považujeme za nepříjemný, tedy nežádoucí. Obvykle je složen z dílčích tónů o kmitočtech, které nejsou celočíselnými násobky. Definice hluku ovšem neexistuje, pojem nepříjemný zvuk je totiž velice subjektivní. [1]

#### 2.1.2 Vznik hluku

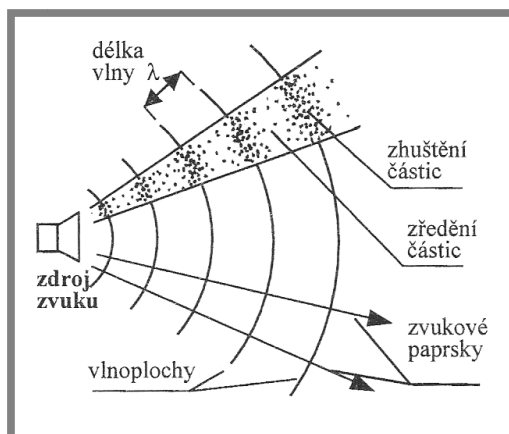
Hluk bychom z hlediska vzniku mohli rozdělit na dvě základní skupiny:

- aerodynamický hluk – Jedná se o hluk, který vzniká v místech neustálého proudění kapaliny či plynu, nebo v oblastech výrazných změn tlaku, způsobující vlnění média.
- mechanický hluk – Hluk vytvářený kmity pevných těles jako jsou stroje či budovy. Plynné nebo kapalně prostředí je rozkmitáno vibrací povrchu pevného tělesa. Akustická energie je závislá na tvaru povrchu a rozměrech kmitajícího tělesa.

#### 2.1.3 Šíření hluku

Hluk se šíří hmotným prostředím pomocí akustické vlny, pohybující se všemi směry od zdroje. Vlnění se pohybuje ve vlnoplochách, což jsou plochy v prostoru, které mají shodné hodnoty akustických veličin. Směr vlnění určuje, zda se jedná o:

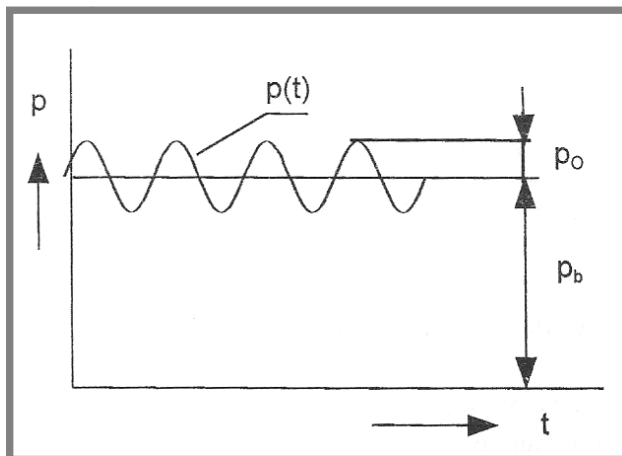
- podélné – ve směru akustického paprsku
- příčné – ve směru kolmém na směr akustického paprsku



Obr. 2-1 Vlnění v pružném prostředí [1]

### 2.1.4 Akustický tlak

Akustickým tlakem nazýváme změnu tlaku, způsobenou kmitáním částic prostředí. Nejnižší akustický tlak, který jsme schopní slyšet se pohybuje okolo  $20 \mu\text{Pa}$  a jde o práh slyšitelnosti.



Obr. 2-2 Průběh akustického tlaku [1]

Jako akustický tlak  $p$  [Pa] tedy chápeme odchylku celkového tlaku od tlaku v klidovém stavu při vlnění v daném prostředí. Akustický tlak je potom nesuperponován na barometrický tlak  $p_b$ . [1]

Při vlnění o frekvenci  $f$  a fázovém posunu  $\varphi$  má akustický tlak tvar harmonické funkce

$$p_c = p_b + p(t),$$

kde

$$p(t) = p_0 \cdot \cos(\omega t + \varphi) =$$

$$p_0 \cdot \cos(2\pi f t + \varphi)$$

kde:  $p_0$  – amplituda akustického tlaku

$\varphi$  – fázový posun.

Efektivní hodnota tlaku je

$$p = \frac{p_0}{\sqrt{2}} [\text{Pa}]$$

### 2.1.5 Akustický výkon

Akustickým výkonem  $P$  [W] nazýváme množství akustické energie, která projde myšlenou plochou za jednotku času. [1]

Akustický výkon je definován vztahem

$$P = \vec{F} \cdot \vec{v} = F \cdot v = p \cdot v \cdot S [\text{W}]$$

kde:  $p$  [Pa] – akustický tlak

$v$  [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ] – rychlost kmitání částic  
 $S$  [ $\text{m}^2$ ] – plocha.

### 2.1.6 Akustická intenzita

Akustická intenzita neboli intenzita zvuku, je vektorová veličina určující směr a množství toku akustické energie v daném místě prostředí. Tento vektor je časově průměrovaný součin okamžitého tlaku  $\mathbf{p}(\mathbf{t})$  a odpovídající okamžité rychlosti  $\mathbf{v}(\mathbf{t})$  kmitajících částic prostředí v témže místě. [1]

$$I = \overline{p(t) \cdot v(t)} [W \cdot m^{-2}]$$

Akustická intenzita je vektorovou veličinou, díky tomu určuje směr šíření akustického vlnění, na rozdíl od akustického tlaku, který je veličinou skalární. Akustická intenzita je tedy nulová kolmo na směr vlnění.

V technické akustice se z pravidla měří pouze akustický tlak a nikoliv akustická rychlost. S výhodou tedy využíváme konstantního poměru mezi akustickým tlakem a akustickou rychlostí. [1]

Zavádí se tedy měrný vlnový odpor známý jako impedance  $Z$  [ $\text{Ns}/\text{m}^3$ ]

$$Z = \rho \cdot c = \frac{p}{v} [Ns/m^3],$$

kde:  $c$  [ $\text{ms}^{-1}$ ] – rychlost zvuku.

Akustické zdroje mohou být uvažovány jako bodové zdroje v případě, že jejich rozměry jsou malé v porovnání s jejich vzdáleností od příjemce.

U bodového zdroje se akustická energie šíří rovnoměrně do všech směrů, tím se s rostoucí vzdáleností od zdroje rozprostírá do stále větší plochy. Výstupní výkon zdroje prochází sférickou plochou poloměru  $r$ . [1]

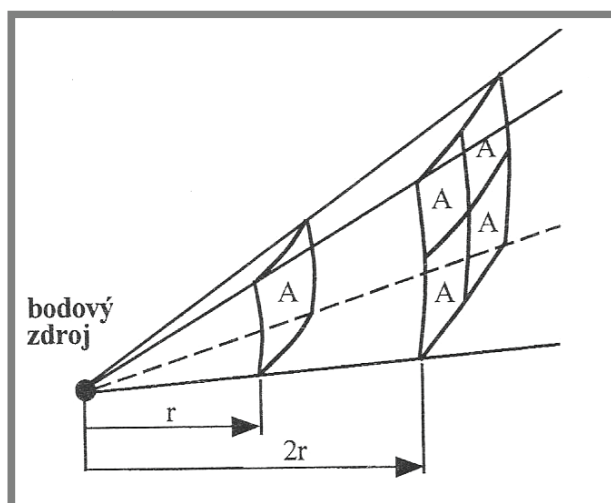
Akustická intenzita této plochy je

$$I_1 = \frac{P}{4\pi \cdot r^2}$$

při poloměru  $2r$  potom

$$I_2 = \frac{P}{4\pi \cdot (2r)^2} = \frac{I_1}{4}.$$

Akustická intenzita je tedy inverzně úměrná na čtverci vzdálenosti zdroje od příjemce. Platí-li podmínky volného akustického pole (kap. 2.1.8), zeslabí se o 6 dB při každém zdvojnásobení vzdálenosti.



Obr. 2-3 Šíření vlnění prostorem [1]

### 2.1.7 Hladiny akustických veličin

2.1.7

Člověk registruje akustický tlak ve velice širokém rozsahu hodnot. Akustický tlak prahu slyšitelnosti se pohybuje okolo  $2 \cdot 10^{-5}$  Pa. Tuto hodnotu bereme jako referenční hodnotu, od které byly odvozeny referenční hodnoty dalších akustických veličin. Hodnota akustického tlaku, při kterém začínáme pociťovat bolest, je okolo 100 Pa. [1]

Poměr těchto hodnot je potom značný, přibližně 1:1 000 000. Lidské ucho navíc nereaguje na zvukový podmět lineárně, ale jeho vnímání je úměrné logaritmu tohoto podnětu. Proto byla pro akustické veličiny zavedena logaritmická měřítka. Tato vyjádření akustických veličin nazýváme *hladiny akustických veličin* a jsou definovány vztahy

$$L = \log \frac{A}{A_0} = \text{hodnota porovnávané veličiny} / \text{hodnota referenční.}$$

Jeich jednotkou je **bel**. Vzhledem ke značné velikosti této jednotky se používá jednotka desetkrát menší, tedy **decibel** [dB]. [1]

Jednotlivé hladiny akustických veličin jsou definovány:

a) *Hladina akustického výkonu*  $L_w$

$$L_w = 10 \cdot \log \frac{W}{W_0} [dB],$$

kde:  $W$  [W] – hodnocený akustický výkon

$W_0 = 10^{-12}$  W – referenční výkon

$$L_w = 10 \cdot \log W + 120 [dB]$$

b) *Hladina akustické intenzity*  $L_I$

$$L_I = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0} [dB]$$

kde:  $I$  [ $W/m^2$ ] – měřená akustická intenzita  
 $I_0 = 10^{-12}$   $W/m^2$  – referenční výkon

$$L_I = 10 \cdot \log I + 120 [dB]$$

c) *Hladina akustického tlaku  $L_p$*

$$L_p = 10 \cdot \log \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \cdot \log \frac{p}{p_0} [dB],$$

kde:  $p$  [Pa] – akustický tlak v daném bodě akustického prostoru  
 $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$  Pa – referenční hodnota akustického tlaku

$$L_p = 20 \cdot \log p + 94 [dB]$$

Při každém 10 násobném zvýšení akustického tlaku se hladina akustického tlaku zvýší o 20 dB. [1]

### 2.1.8 Typy akustických polí

Zdroj zvuku ve svém okolí vytváří akustické pole. Toto pole je závislé na činitelích jako:

- umístění zdroje
- tvar vyzařovaných vlnoploch
- velikost a tvar prostoru
- okolní plochy, překážky
- pohltivost okolních stěn
- počet zdrojů a jejich rozmístění

Překážka vložená do cesty šířícím se akustickým vlnám ovlivní tvar zvukového pole a tvar jeho vlnoploch. Zvukové vlny se od překážek odrážejí v případě, kdy je délka vlny dopadajícího zvuku kratší, než jsou rozměry překážky. [1]

Podle charakteru šířících se vln lze rozdělit akustická pole na:

- *pole přímých vln* – akustická energie se do prostoru šíří postupnými přímými vlnami
- *pole odražených vln* – část energie se odráží zpět od ploch v prostoru

Jako základní typy akustických polí se uvádějí:

- volné akustické pole
- difúzní pole

a) *Volné akustické pole*

Ve volném akustickém poli se akustická energie šíří všemi směry od zdroje rovnoměrně, přitom předpokládáme, že se energie šíří neomezeně. [1]

Další vlastnosti volného akustického pole jsou:

- rychlost kmitání částic je ve směru šíření podélných vln
- při zdvojnásobení vzdálenosti od zdroje klesne hodnota akustického tlaku na polovinu a hladiny akustického tlaku a akustické intenzity se sníží o 6 dB

b) *Difúzní pole*

Difúzní akustické pole má tyto vlastnosti:

- tok energie má ve všech směrech v každém bodě prostoru stejnou intenzitu, která se nemění s pozicí příjemce
- díky mnohonásobnému odrazu je akustický tlak v prostoru rovnoměrně rozložen

Tato pole se však nikde v přírodě nevyskytují. Z tohoto důvodu se provádí výstavby akustických zkušebních komor, ve kterých je snaha o co největší přiblížení se k výše definovaným polím. [1]

## 2.2 Mapování akustických polí

---

2.2

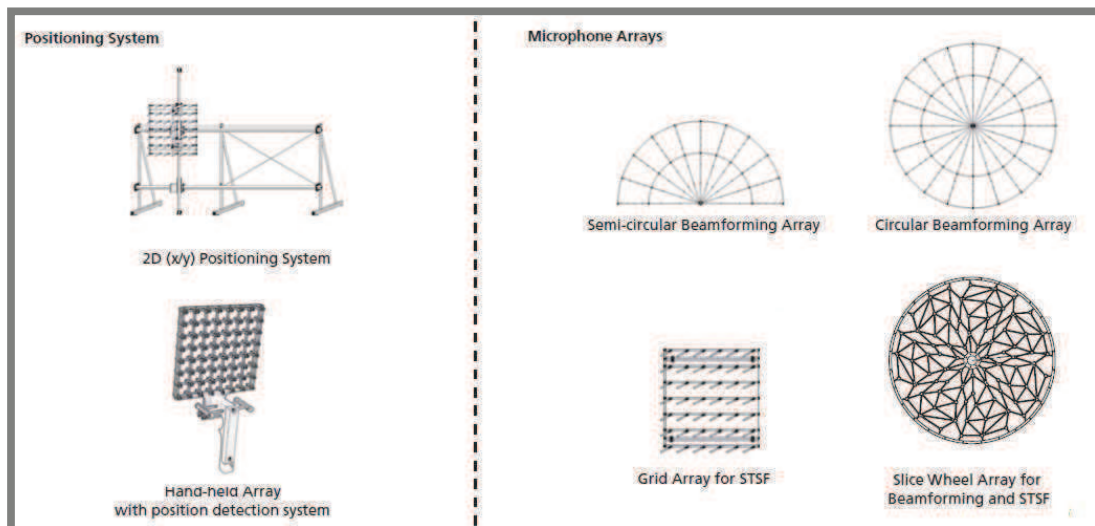
Pro detailní popsání zdroje hluku lze v technické diagnostice využít některou z metod mapování akustických polí. Pomocí mapování je možné získat podrobné informace o hluku vyzářeném zkoumaným objektem, jako je pozice hlavních či vedlejších zdrojů, šíření akustického tlaku či rychlost kmitání částic na povrchu zdroje. V následujících podkapitolách uvedu vybrané metody užívané k mapování, podrobnější popis principu jednotlivých metod bude uveden v kapitole 5.

## 2.3 Mikrofonní pole

---

2.3

Metody akustické holografie a beamformingu, které budou popsány v následujících kapitolách, využívají pro měření specializovaných mikrofonních polí. V základu se jedná o skupinu mikrofونů uspořádaných do různých geometrických tvarů. Tvar pole se liší podle technologie měření, zkoumaného objektu, popřípadě vzdálenosti mezi měřicí soustavou a zdrojem hluku. Dále se pole rozlišují dle rozmístění mikrofонů, a to na pravidelné (např. uniform rectangular array, URA) a nepravidelné. Avšak ani nepravidelná pole nejsou zcela nahodilá. Vykazují určitou periodicitu, kruhové pole se může opakovat po 120°, jak je tomu u pole pro STSF a beamforming společnosti Brüel & Kjær.



Obr. 2-4 Typy akustických polí [2]

V době vypracování této práce byly na Fakultě strojního inženýrství k dispozici dvě kruhová pole určená pro beamforming a SONAH (36 a 18 kanálové) a jedno ruční 36 kanálové pole pro Comformal SONAH (metoda konformního mapování povrchů).

Kruhová pole jsou ve své ose osazeny USB kamerou, díky které je umožněno snadné a rychlé získání snímku měřeného objektu a následná automatická implementace snímku do vykreslené mapy zvolené akustické veličiny.



Obr. 2-5 36 kanálové kruhové pole

## 2.4 Mapování pomocí intenzitní sondy

Intenzitní sonda je zařízení složené ze dvou mikrofonů, které jsou nejčastěji otočené čely proti sobě, pomocí něhož je možné získat přes měření akustického tlaku hodnotu akustické intenzity.

Fakt, že intenzita je vektorovou veličinou, dodává sondě směrovou citlivost, kdy největší citlivosti je dosaženo pro hluk přicházející ze směru os mikrofonů. Vsruchy přicházející ze směru kolmého k osám mikrofonů nebudou zaznamenány.

Výstupem měření pomocí intenzitní sondy může být mapa akustické intenzity, nebo mapa celkového akustického výkonu vyzářeného zkoumaným objektem.

Jedná se o jednu z prvotních metod pro mapování akustických polí. Její relativní nenáročnost na množství měřicího vybavení je vykoupena poměrně dlouhou dobou potřebnou pro provedení jednotlivých měření.

Měření akustické intenzity se s výhodou využívá pro měření na objektech, které ať z důvodu rozměru či hmotnosti, nemáme možnost přemístit do zkušebních komor (bezdozvukových, dozvukových). Oproti akustickému tlaku je intenzita vektorová veličina a díky tomu je možné provádět měření v jakémkoliv zvukovém poli. To umožňuje provedení analýzy přímo na provozním místě testovaného objektu, jako je například výrobní hala, přičemž není zapotřebí odstavení okolních strojů z provozu.

### Výhody

- Díky faktu, že akustická intenzita je vektorová veličina, může být akustické pole zastoupeno amplitudou a vektorem.
- Možnost určení akustického výkonu z měření intenzity.
- Měření v provozních podmínkách (relativně tolerantní ke hluku pozadí).
- Snadno přenosná technologie (měření může být provedeno pomocí dvoukanálového hlukoměru).

### Omezení

- Frekvenční omezení způsobené tlakovým gradientem (určen vzdáleností mezi mikrofony); měření do 10 kHz při nejmenší vzdálenosti.
- Poměrně značná časová náročnost měření.
- Potřeba přesného měřicího vybavení (mikrofony s přesným fázovým sladěním).
- Měření lze provádět pouze na zdrojích hluku se stacionárním chodem.

## 2.5 Beamforming

Pojmem beamforming je označována skupina metod, užívaná ke zpracování signálu z polí senzorů (skupina senzorů stejné fyzikální veličiny, uspořádaných do vhodného geometrického tvaru) pro dosažení říditelné směrové citlivosti. Pro diagnostické účely se beamforming využívá např. pro mapování prostorového rozložení zdrojů hluku. Těto metody lze využívat nejen při snímání, ale též při vysílání polem snímačů. Vysílání i příjem je využíván např. v ultrazvukové defektoskopii.

Užitím beamformingu lze nasměrovat většinu energie signálu skupiny vysílačů (radiové antény, reproduktory) do zvoleného směru. Analogicky je možné nastavit

skupinu snímačů tak, aby bylo dosaženo maximálního útlumu pro všechny signály, které na pole nedopadají z požadovaného směru (prostorová filtrace). [7]

Při výběru optimální metody beamformingu je třeba dbát pozornost, jaké jsou předpokládány vzdálenosti zdrojů, zda je platný předpoklad o rovinnosti vlny, dopadající na senzorové pole a na typ signálu z hlediska šířky pásma. Pro širokopásmové signály jsou vhodné jiné metody, než pro signály úzkopásmové. [7]

### Výhody

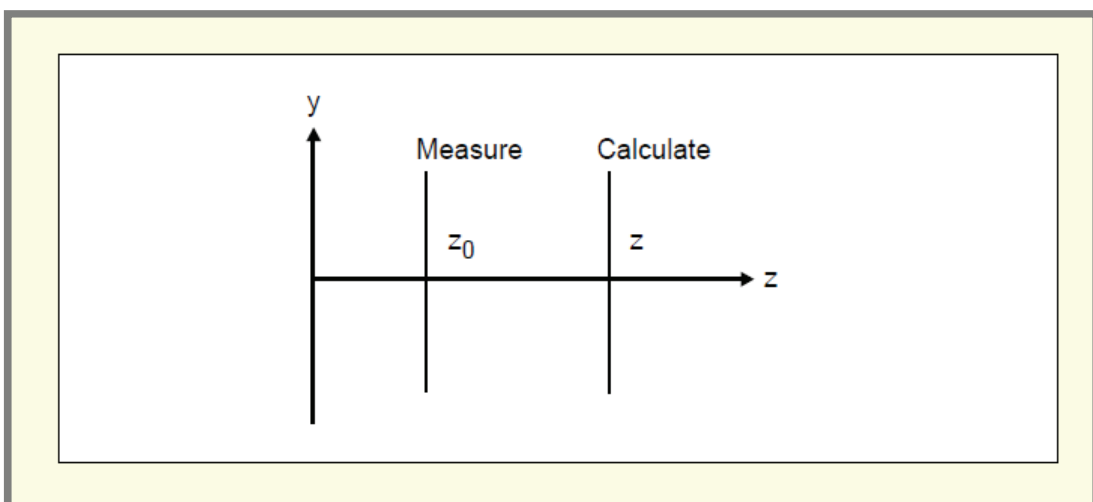
- Rychlá metoda, signály ze všech kanálů jsou zachyceny a uloženy najednou.
- Možnost měření velkých objektů (umožňuje úhel záběru až  $60^\circ$ ).
- Vysoký frekvenční rozsah ( $> 20$  kHz).
- Dobré rozlišení.
- Měření je prováděno ve vzdáleném poli (vynikající pro aplikace ve větrném tunelu).

### Omezení

- Mapy akustického tlaku nejsou kalibrovány (nejsou získávány žádné kalibrační hodnoty z blízkosti měřeného objektu, jako je tomu u NAH/SONAH metod), vykresluje pouze relativní přírůstky ve zvukovém poli v místě mikrofonního pole.
- Vyžaduje multi-kanálový snímací systém.

## 2.6 Akustická holografie v blízkém poli

Jako akustická holografie v blízkém poli (NAH, Nearfield Acoustic Holography) je označována skupina metod, realizující rekonstrukci akustických veličin, jakými jsou akustický tlak, výkon či intenzita v trojrozměrném prostoru, na základě měření akustického tlaku ve vhodně zvolené rovině.



Obr. 2-6 Konvence souřadného systému pro akustickou holografii [3]

Metody NAH předpokládají existenci dvou typů vln, evanescentních vln pro blízké a rovinných vln pro blízké i vzdálené akustické pole. Přechod mezi těmito vlnami, resp. poli, se nachází ve vzdálenosti  $\lambda/2$  (polovina vlnové délky akustické vlny, měřená od zdroje hluku). Předpokladem pro správnou interpretaci naměřených dat je, že měřicí rovina  $\mathbf{z}_0$  (viz obr. 2-6) je umístěna v co nejmenší vzdálenosti vůči zdroji zvuku nebo ploše, kterou chceme analyzovat. Tento předpoklad zajišťuje, že měřený signál bude obsahovat evanescentní vlny, protože jejich amplituda s rostoucí vzdáleností od zdroje exponenciálně klesá a bez jejich výskytu by nebylo možné přesně rekonstruovat akustické veličiny v blízkosti povrchu zdroje.

Mezi základní akustické veličiny, zkoumané pomocí algoritmů NAH, se řadí akustický tlak a rychlost kmitajících částic na povrchu, nebo velmi blízko rekonstruovaného povrchu. Z těchto veličin jsme poté schopni stanovit akustickou intenzitu a celkový vyzářený akustický výkon. [3]

Při zjišťování hladin akustických veličin v prostoru v blízkosti vibrujícího povrchu se využívá mikrofonní pole, které minimalizuje ovlivnění měřeného objektu měřicím systémem. Toto pole je umístěno v předem definované vzdálenosti od kmitajícího objektu. Hodnoty akustického tlaku naměřené v jednotlivých bodech mikrofonního pole jsou pomocí algoritmů NAH přepočítávány do roviny měření. Tento postup je obecně označován jako zpětná transformace akustických veličin, při které je využívána tzv. zpětná Greenova funkce. V případě potřeby popsání rozložení těchto veličin ve vzdálenosti větší než je vzdálenost zdroje hluku od měřicí soustavy, by byla využita transformace přímá (odpovídá směru šíření rovinných vln). [3]

Rovnice prostorové vlny je vyjádřena následovně:

$$\nabla^2 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0,$$

kde  $\mathbf{c}$  je rychlost zvuku v daném prostředí a  $\nabla^2$  je Laplaceův operátor, který určí rozdíl celkového akustického tlaku (parciální rozdíly vzhledem k souřadnicím  $x, y, z$ ). Tuto rovnici lze rovněž vyjádřit pro frekvenční oblast zahrnutím sinusové složky a zavedením vlnového čísla  $\mathbf{k}$

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0, \text{ kde } k = \frac{\omega}{c}.$$

Helmholtzův integrál může poté být derivován z rovnice vlny. Nejjobecnější tvar Kirchhoff-Helmholtzova integrálu je vyjádřen jako

$$p(\vec{r}) = -\frac{1}{4} \iint_S [G(\vec{r}|\vec{r}_0) \vec{\nabla} p(\vec{r}_0) \vec{\nabla} G(\vec{r}|\vec{r}_0)] \cdot \vec{n} dS,$$

kde  $\mathbf{G}$  je Greenova funkce definována jako

$$G(\vec{r}|\vec{r}_0) = \frac{e^{-jk|\vec{r}-\vec{r}_0|}}{4\pi|\vec{r}-\vec{r}_0|}.$$

NAH metody jsou založeny na prostorové Fourierově transformaci mající tvar

$$\begin{cases} \tilde{P}(k_x, k_y, z, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p(x, y, z, \omega) e^{j(k_x x + k_y y)} dx dy \\ p(x, y, z, \omega) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{P}(k_x, k_y, z, \omega) e^{-j(k_x x + k_y y)} dk_x dk_y \end{cases}.$$

Všechny tyto formulace využívají souřadný systém znázorněný na obrázku geometrie měření (obr. 2-6). [3]

Rovnice může být také vyjádřena ve tvaru

$$p(x, y, z - z_0, t) = h(x, y, z - z_0, t) * p(x, y, z_0, t)$$



Prostorová Fourierova transformace

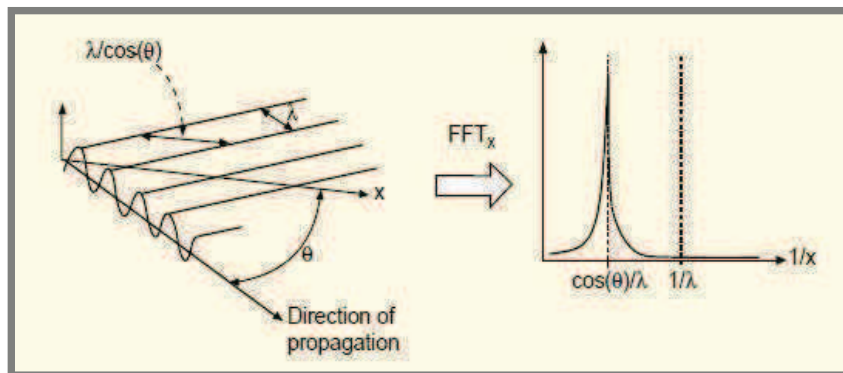


$$\tilde{P}(k_x, k_y, z, t) = \tilde{H}(k_x, k_y, z - z_0, t) \cdot \tilde{P}(k_x, k_y, z_0, t)$$

s vyjádřením přenosové funkce

$$\tilde{H}(k_x, k_y, z - z_0) = e^{-jk_z(z-z_0)}$$

Obrázek 2-7 vysvětluje vztah prostorových vln, směru šíření a vlnové délky při využití Fourierova rozkladu.



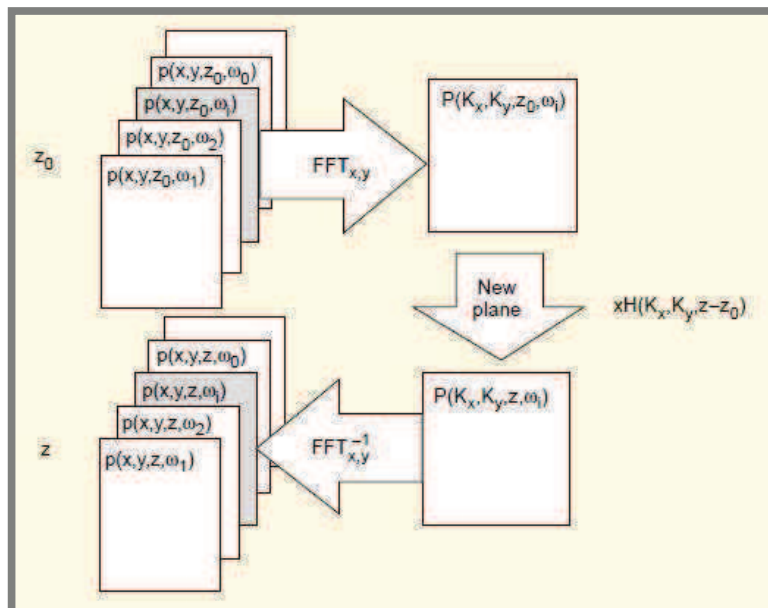
Obr. 2-7 Prostorová Fourierova transformace zvukového pole [3]

Na obrázku 2-8 je znázorněn proces FFT, kde je počítána nová rovina s využitím Helmholtzova integrálu. Jedná se o proces STSF při výpočtu akustického tlaku dále od zdroje. [3]

Vlnové číslo  $k_z$  je vyjádřeno ze tří dalších vlnových čísel

$$k_z^2 = k^2 - k_x^2 - k_y^2$$

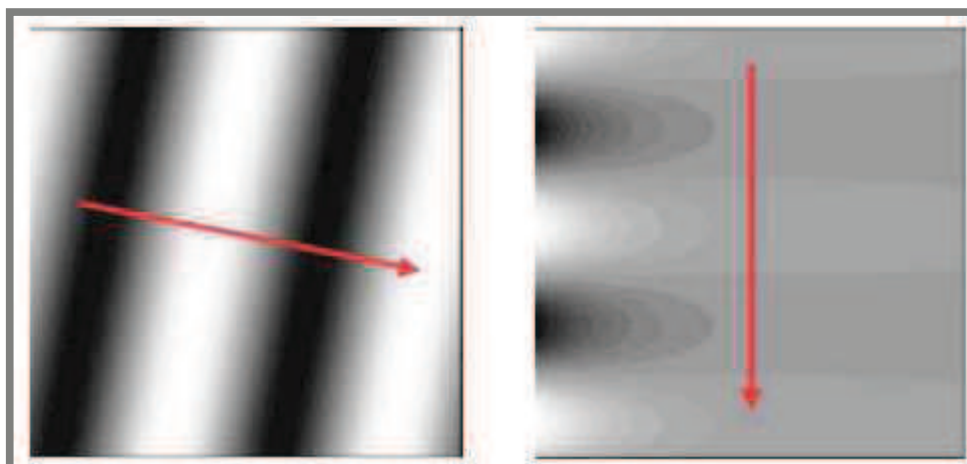
Podle velikosti vlnového čísla  $k_z$  mohou nastat dva tvary šířené vlny blíže popsané v kapitole evanescentní vlna.



Obr. 2-8 Princip výpočtu akustické holografie [3]

### 2.6.1 Evanescentní vlna

2.6.1



Obr. 2-9 Rovinná vlna (vlevo) a evanescentní vlna (vpravo). Červená šipka naznačuje směr šíření [4]

Tyto dva obrázky (obr. 2-9) znázorní rovinnou a evanescentní vlnu, přičemž červená šipka vyznačuje směr šíření vlny. Rovina zdroje  $z = -d$  (ve smyslu obr. 2-6) je na obou obrázcích na levém okraji, rovina měření je tedy vertikální a kousek napravo od roviny zdroje. Bílá barva představuje nejvyšší kladnou výchylku akustického tlaku, černá barva poté nejvyšší zápornou odchylku. Šedá barva uprostřed vyznačuje nulovou okamžitou výchylku. Úhlová frekvence  $\omega$  je na obou obrázcích stejná. U rovinné vlny je vzdálenost mezi sousedními maximy ve směru šíření hluku rovna vlnové délce  $\lambda$ . Prostorová úhlová frekvence  $\mathbf{k}$  rovinné vlny podél směru jejího šíření je proto

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c},$$

kde  $c$  je rychlost šíření zvuku v daném prostředí. Všimněme si, že prostorová změna rovinné vlny v rovině  $xy$  je vždy pomalejší než změna podél směru šíření. V matematickém zápisu je vektor prostorové úhlové frekvence  $(k_x, k_y)$  rovinné vlny v rovině  $xy$  vždy kratší než vektor prostorové úhlové frekvence  $k$  podél směru šíření hluku:

$$k_x^2 + k_y^2 \leq k^2 \quad (\text{rovinná vlna}).$$

Vyšší prostorové frekvence v rovině  $xy$  proto nemohou reprezentovat rovinné vlny, namísto toho zastupují vlny evanescentní. Příklad je uveden na pravé straně obrázku 2-9

$$k_x^2 + k_y^2 = (1,1k)^2 \quad (\text{evanescentní vlna}).$$

V jakékoliv rovině  $xy$  vypadá evanescentní vlna přesně jako vlna rovinná, ovšem ve směru  $z$  vykazuje exponenciální útlum, který se s rostoucí prostorovou frekvencí urychluje. [4]

### 2.6.2 STSF – Spatial Transformation of Sound Fields

Prostorová transformace zvukových polí (Spatial Transformation of Sound Fields, dále jen STSF) je cross-spektrálně založená metoda matematického popisování zvukových polí na základě souboru měření. Tento systém je jedinečný díky poskytování detailních informací o akustických veličinách jak v blízkosti zkoumaného objektu (blízké pole), tak i ve větších vzdálenostech od zdroje (vzdálené pole) z jediného měření. Jak název metody napovídá, STSF provádí měření v jediné rovině a využívá různých algoritmů (algoritmy NAH, nebo Helmholtzův integrál) pro provedení prostorové transformace, jejímž výsledkem je získání informací o akustických veličinách v rovině odlišné od roviny měření. To umožňuje vypočet celé řady veličin popisujících zvukové pole v jakémkoliv místě v blízkosti zkoumaného objektu, jako je rozložení tlaku, mapování a vektorování akustické intenzity pro blízké pole a provádění analýzy šíření hluku ve vzdáleném poli. Systém navíc uživateli umožňuje pomocí STSF přehrávat alternativní „co když“ scénáře, což umožňuje zkoumat vliv změn provedených na zdroji ze vzdáleného pole. Omezením metody STSF je však požadavek na stacionaritu signálu (stacionární chod zdroje hluku). [3]

#### Využití

- Lokalizace zdrojů hluku a jejich detailní popis.
- Mapování hluku na malých a středně velkých objektech jako jsou motory, části motorových vozidel, elektrické nářadí, spotřebiče apod.
- Určení akustického výkonu vedlejších zdrojů hluku a jeho šíření do prostoru.

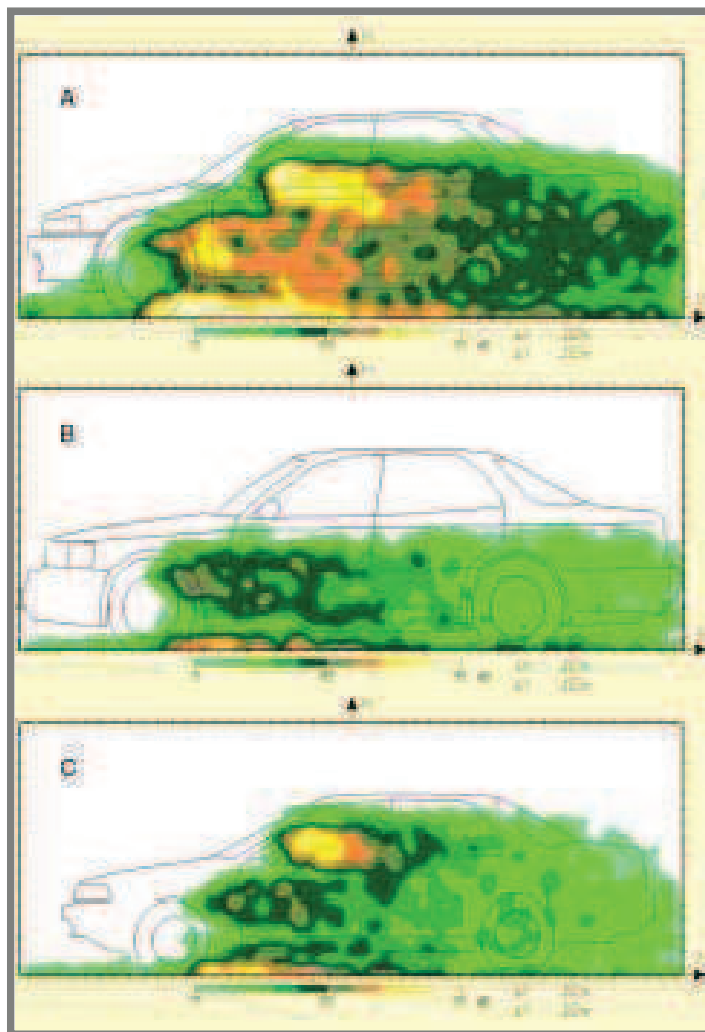
#### Rysy

- Mapování akustického tlaku, akustické intenzity a rychlosti kmitání částic.
- Intuitivní vytváření dokumentace, zahrnující animaci s použitím překrývání fotografie zdroje.

- Nízké až střední frekvence (100 Hz - 5kHz), dle užitého mikrofonního pole.
- Rozšířitelné pomocí beamformingu a konformního mapování povrchů.

#### Omezení

- Omezený frekvenční rozsah (silně závisí na vzdálenosti a rozmístění snímačů ve mřížce), běžně do 6,4kHz.
- Schopnost pracovat pouze ve stacionárním zvukovém poli.



Obr. 2-10 Měření ve větrném tunelu [3]

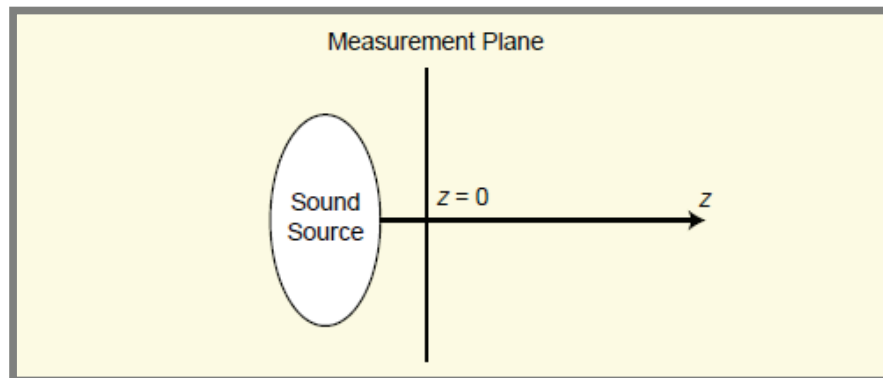
## 2.7 Akustická holografie v časové oblasti

2.7

Akustická holografie v časové oblasti (Time Domain Holography, dále jen TDH) v podstatě poskytuje prostorové mapování vyzařovaného zvukového pole s časovým rozlišením, které je ovlivněno pouze vzorkovací frekvencí A/D převodníku použitého při měření. Díky tomu lze provádět mnoho různých analýz s užitím mikrofonního pole a tacho sondy (sonda pro snímání otáček) z jediného rychlého měření se záznamem časové historie.

Na obrázku 2-11 je znázorněna geometrie problematiky měření. Akustický tlak  $p(\mathbf{r},t) = p(x,y,z,t)$  je měřen v rovině  $z = 0$  v oblasti blízkého pole popisovaného

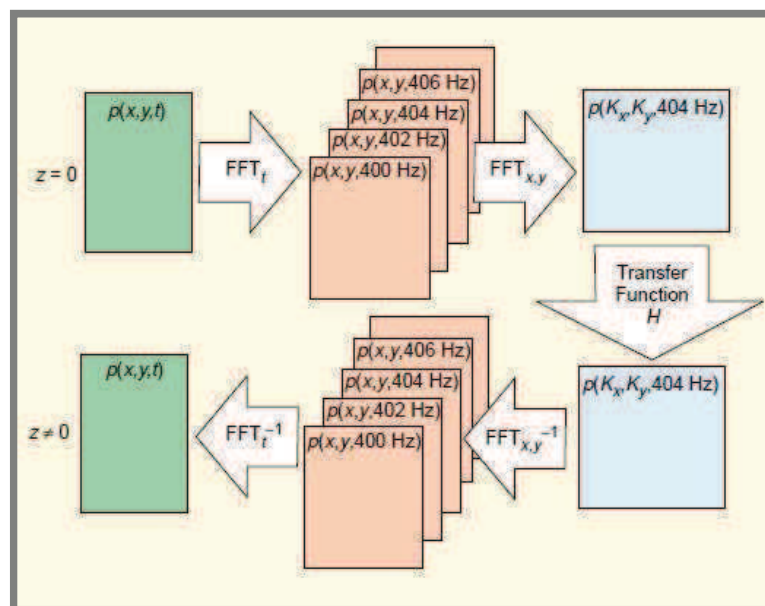
zdroje hluku, přičemž se předpokládá, že všechny části zdroje leží v poloprostoru  $z < -d$ , kde  $d$  je nejmenší vzdálenost mezi zdrojem hluku a měřicí rovinou. Poloprostor  $z < -d$  je považován za homogenní a bez zdroje hluku.



Obr. 2-11 Geometrie měření [5]

Základním úkolem TDH je výpočet akustického tlaku  $\mathbf{p}(\mathbf{r},t)$  v rovině  $z \neq 0$  rovnoběžné s rovinou měření. Tento výpočet může být proveden pomocí prostorové Fourierovy transformace v rozměrech  $x,y,t$ . Výstupem prostorové transformace je znázornění hodnot akustického tlaku v prostorové a časové úhlové frekvenci  $(\mathbf{k}_x, \mathbf{k}_y, \omega)$ . V této trojrozměrné frekvenční oblasti je tlak představován jako nekonečný součet šířících se rovinných (nízká prostorová frekvence) a evanescentních (vysoká prostorová frekvence) vln. Jak je zmíněno výše, evanescentní vlny ve směru  $z$  exponenciálně slábnou a pokud sečteme (superpozice) všechny tyto elementární vlny v rovině výpočtu, získáme tlak v této rovině. Tento součet má poté tvar zpětné Fourierovy transformace v rozměrech  $\mathbf{k}_x, \mathbf{k}_y, \omega$ .

Obrázek 2-12 znázorňuje schéma holografického výpočtu začínající s tlakem v rovině měření  $z = 0$  a končící s hodnotou akustického tlaku v rovině výpočtu  $z \neq 0$ .



Obr. 2-12 Tok dat při výpočtu pomocí TDH [4]

Jak je znázorněno ve schématu, přechod z roviny měřené do počítané je řešen pomocí násobení s přechodovou funkcí  $H$  v trojrozměrné oblasti  $(\mathbf{k}_x, \mathbf{k}_y, \omega)$ , která má tvar:

$$H = e^{-jk_z z}, \quad z \geq -d.$$

Zde nová prostorová frekvence  $k_z$  v rozměru  $z$  je funkce úhlových frekvencí  $(\mathbf{k}_x, \mathbf{k}_y, \omega)$  spojených s naměřenými daty:

$$k_z \equiv \begin{cases} \sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2} & \text{pro } k_x^2 + k_y^2 \leq k^2 \text{ (rovinné vlny)} \\ -j\sqrt{k_x^2 + k_y^2 - k^2} & \text{pro } k_x^2 + k_y^2 > k^2 \text{ (evanescentní vlny)} \end{cases} \quad k \equiv \frac{\omega}{c}.$$

Zde  $k \equiv \omega/c$  vyznačuje vlnové číslo. U rovinných vln dojde pouze k fázovému posunu, zatím co u evanescentních vln dochází ke zmíněnému exponenciálnímu útlumu.

### 2.7.1 NS-STSF – Non Stationary Spatial Transformation of Sound Fileds

2.7.1

Metoda NS-STSF (Non Stationary Spatial Transformation of Sound Fields) je implementací TDH zprostředkovávající popis akustických dějů současným zaznamenáváním časových dat a měřením akustického tlaku v rovině pokrývající zdroj hluku. Data jsou uložena jako funkce času, nebo RPM (Revolution per Minute). Pro provedení tohoto měření je zapotřebí užití plného mikrofonního pole. Není možné využít pouze dvou mikrofónů, kdy je jeden nastaven jako referenční. Tato metoda má oproti STSF tři nejvýznamnější výhody:

1. Není zapotřebí samostatného referenčního signálu.
2. Není kladen požadavek na stacionární chod zkoumaného objektu.
3. Během celého průběhu měření a výpočtu je zachováno plné časové rozlišení.

A tak zatímco metoda STSF poskytuje detailní přehled kde je hluk vyzařován, NS-STSF přiřadí k informaci o poloze také časový údaj.

#### Využití

- Lokalizace zdrojů hluku s časovou interakcí.
- Mapování hluku na malých a středně velkých objektech jako jsou motory, části motorových vozidel, elektrické nářadí, spotřebiče apod.
- Určení akustického výkonu vedlejších zdrojů hluku a jeho šíření.

#### Rysy

- Mapování akustického tlaku, akustické intensity a rychlosti kmitání částic.
- Intuitivní vytváření dokumentace, zahrnující animaci s použitím překrývání fotografie zdroje.
- Nízké až střední frekvence (100 Hz - 5kHz).
- Rozšířitelné pomocí beamformingu a konformního mapování povrchů.

#### Omezení

- Vyžaduje větší množství mikrofónů.
- Pracuje v plné přesnosti pouze ve volném poli (potřeba bezdozvukové komory).

## **3 FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU A JEHO ŘEŠENÍ**

### **3.1 Motivace diplomové práce**

Hlavní motivací této diplomové práce bylo pořízení nových měřících technologií pracujících na platformě PULSE společnosti Brüel & Kjær, která je již delší dobu využívána na Ústavu konstruování a Ústavu mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky pro provádění různých druhů analýz.

Tato diplomová práce má za úkol přinést zhodnocení a porovnání jednotlivých metod užívaných pro mapování akustických polí a lokalizaci zdrojů hluku a připravit podmínky k jejich komerčnímu a výukovému užívání. Pro splnění zadání bude zapotřebí provést pojednání o vhodnosti jednotlivých metod v závislosti na podmínkách měření, technologické a uživatelské náročnosti a poukázat na přednosti a úskalí užívání těchto metod.

Jedním z očekávaných výsledků bylo zrychlení, zpřesnění a zjednodušení provádění akustických testů a experimentů zavedením nových měřících postupů do běžné praxe. Jako největší očekávaný přínos by se však měla projevit schopnost měření transientních dějů.

V době nákupu těchto technologií bylo po světě vystaveno pouze sedm komerčních licencí pro jejich využívání, přičemž se jednalo o první licenci v České republice. Jejich pořízením se tedy Fakulta strojního inženýrství dostala na prestižní místo v oblasti akustické diagnostiky strojů a strojních součástí. Tato skutečnost přinesla značný potenciál komerčního využití měřících metod a polobezdozvukové zkušební komory Ústavu konstruování.

## 4 VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE

---

**4**

### 4.1 Cíle práce

---

**4.1**

---

Cílem je vytvoření formálních a technických podmínek výukového pracoviště pro demonstraci metod mapování akustických polí SONAH a beamforming na platformě Brüel & Kjær PULSE. Součástí projektu budou softwarové pomůcky a výsledky měření zkušebního akustického zdroje.

Předpoklady pro splnění tohoto cíle jsou:

- Vytvoření porovnání a zhodnocení metod pro mapování akustických polí (metoda intenzitní sondy, beamforming, stacionární a nestacionární variantu prostorové transformace zvukových polí).
- Pojednání o vhodnosti jednotlivých metod pro různé podmínky měření.
- Provedení demonstračního měření všemi metodami.
- Tvorba šablon v softwaru PULSE LabShop včetně výsledků demonstračních měření.

## 5 NÁVRH METODICKÉHO PŘÍSTUPU K ŘEŠENÍ

V této kapitole podrobněji popíši principy a provedu porovnání jednotlivých metod pro mapování akustických polí. Pro jejich porovnání byla provedena demonstrační měření na testovacím objektu. Pro každou z metod bylo provedeno více jak jedno měření, avšak protože cílem této práce je podat zhodnocení a srovnání metod a nikoliv provést analýzu tohoto objektu, bude vždy uvedeno měření pouze jedno. Veškerá měření byla provedena pomocí softwaru PULSE LabShop, dodávaném společností Brüel & Kjær společně s měřicí platformou PULSE.

### 5.1 Popis principu metod

#### 5.1.1 Mapování pomocí intenzitní sondy

Jak bylo popsáno v kapitole Definice základních pojmů, akustická intenzita je časově průměrovaný součin okamžitého tlaku a odpovídající okamžité rychlosti kmitajících částic prostředí v témže místě. Pomocí jednoho mikrofону lze provádět měření akustického tlaku, ale zjištění rychlosti částic není tak jednoduché. Tato rychlost však může být dána do vztahu s tlakovým gradientem (míra změny okamžitého tlaku při změně vzdálenosti od zdroje) v linearizovaném Eulerově vztahu. Pomocí takového výpočtu je možné změřit tlakový gradient pomocí dvou blízko u sebe umístěných mikrofónů.

Eulerova rovnice vychází z Newtonova druhého zákona implementovaného na tekutiny. Druhý zákon dává do vztahu zrychlení udělené hmotě a sílu na hmotu působící. Pokud známe působící sílu a hmotnost, získáme zrychlení a z něj pomocí integrace podle času i rychlost.

$$F = ma, \quad a = \frac{F}{m}, \quad v = \int \frac{F}{m} dt \quad (2. \text{Newtonův zákon})$$

V Eulerově výpočtu je to tlakový gradient, který uděluje tekutině dané hustoty zrychlení, a tak pokud známe tlakový gradient a hustotu tekutiny, můžeme vypočítat zrychlení kmitajících částic.

$$a = -\frac{1}{\rho} \text{grad } p, \quad \frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r}, \quad (\text{Eulerovy vztahy})$$

po integraci této rovnice platí

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

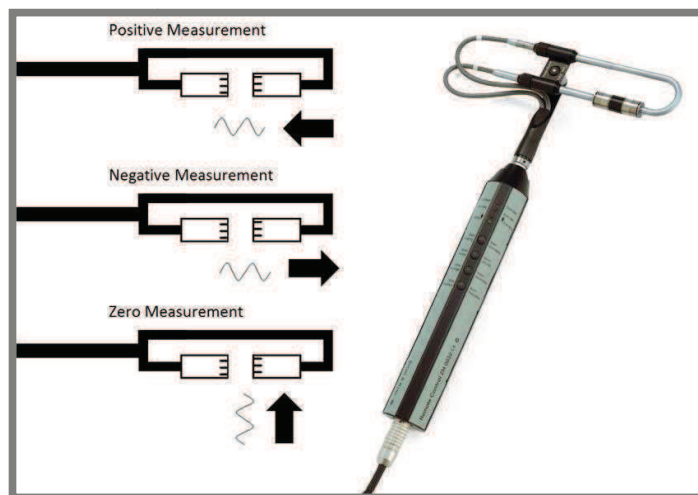
kde  $p_A$  a  $p_B$  jsou okamžité hodnoty akustického tlaku měřené souosými mikrofóny, mající mezi sebou mezeru o velikosti  $\Delta r$ .

Intenzita zvuku je poté určena vztahem

$$I_r = \frac{1}{T} \int_0^T p \cdot v_r dt,$$

kde  $I_r$  je kosinová složka vektoru intenzity zvuku ve směru  $r$ .

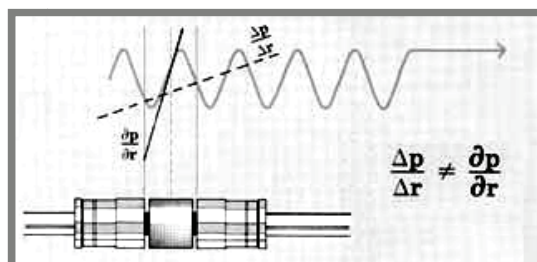
Pro měření pomocí intenzitní sondy se využívají velice kvalitní kondenzátorové mikrofony, nejčastěji otočené čely k sobě. Mezi ochranné mřížky těchto mikrofonů je vložena distanční vložka pro přesné vymezení jejich vzdálenosti. [8]



Obr. 5-1 Princip dvoumikrofonní intenzitní sondy [8]

Pro dvoumikrofonní sondu je důležitá maximální shoda mezi přenosovými funkcemi obou mikrofonních kanálů. Protože akustická intenzita je vektorová veličina, záleží na nasměrování sondy vzhledem ke směru šíření postupné vlny ve zvukovém poli. Pokud je sonda nasměrována tak, že její osa je rovnoběžná se směrem šíření vlny, bude hladina akustické intenzity rovna hladině akustického tlaku. Případný rozdíl těchto hodnot charakterizuje rozdíl mezi kanály jednotlivých mikrofonů. Při umístění sondy ve stejném zvukovém poli osou kolmo ke směru šíření, bude složka intenzity pro tento směr nulová, přičemž hladina akustické intenzity by měla být mínus nekonečno. V praxi však naměříme hladinu lišící se od hodnoty v rovnoběžném směru o jednotky až několik desítek dB. To je opět dáno rozdílem mezi kanály mikrofonů, který měřící systém vyhodnocuje jako nenulový tlakový gradient a výsledkem je „zbytková intenzita“. [8]

Frekvenční omezení dvoumikrofonní intenzitní sondy je dáno vzdáleností mezi oběma mikrofony. Při každém odečtení hodnot na mikrofonech je vyhodnocena lineární regrese tlakového gradientu. U vysokých frekvencí nastávají stavy, kdy se mezi oba mikrofony vleze celočíselný násobek zvukových vln, což má za následek vyhodnocení stejného okamžitého akustického tlaku na obou mikrofonech. Dojde tedy k mylnému stavu nulového gradientu. Druhým nepříznivým jevem vysokých frekvencí je rychlé kmitání lineární regrese, které způsobuje nepřesnosti dané malou vlnovou délkou.

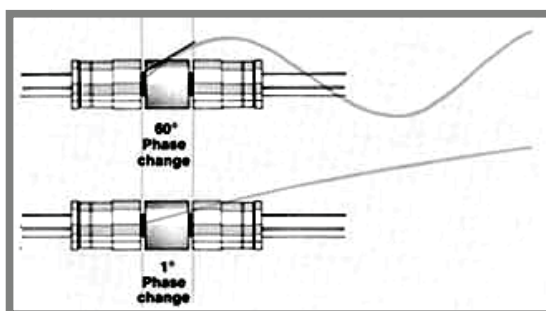


Obr. 5-2 Horní limit intenzitní sondy [8]

Pro efektivní využití intenzitní sondy je tedy stanoven horní frekvenční limit závislý na velikosti distanční vložky mezi mikrofony. Nad tímto limitem dochází ke značnému nárůstu chyb. Pro přesnost do 1 dB musí být měřená vlnová délka větší než šestinásobek vzdálenosti obou mikrofonů. To poté odpovídá následujícím frekvenčním limitům:

- 50 mm – do 1,25 kHz
- 12 mm – do 5 kHz
- 6 mm – do 10 kHz

Analogicky je tomu při měření nízkých frekvencí, kde dochází ke zvětšování vlnové délky. Vlnovou délku lze vyjádřit pomocí rotace jako  $360^\circ$ . Při dodržení předpisu šestinásobku rozchodu mikrofonů připadá na tuto vzdálenost šestina rotace, tedy  $60^\circ$ . Kvalitní měřící vybavení vykazuje přesnost přibližně  $\pm 0,3^\circ$ . Tato nepřesnost je pro fázovou změnu  $60^\circ$  zanedbatelná, avšak kupříkladu při 63 Hz je vlnová délka rovna přibližně 5,5 m. Změna fáze na 12 mm vzdálenosti mikrofonů je poté pouze  $0,8^\circ$ . Zde již hodnota  $0,3^\circ$  představuje značný podíl, měření je proto invalidní. Pro rozchod mikrofonů 50 mm (přibližně čtyřnásobek 12 mm) je změna fáze na dané vzdálenosti  $3,3^\circ$  (přibližně čtyřnásobek  $0,8^\circ$ ). Pro nízké frekvence je tedy zapotřebí větší vzdálenosti mikrofonů. [8]



Obr. 5-3 Dolní limit intenzitní sondy [8]

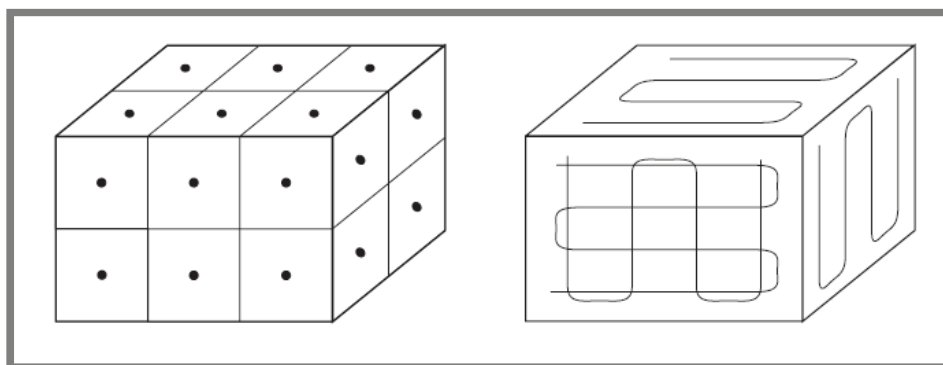
Při měření lze pro získání plošné mapy postupovat dvěma způsoby. Prvním je měření v bodech, kdy je rovina ležící u strany zkoumaného objektu rozdělena na menší stejně velké segmenty, na kterých je změřena hodnota intenzity. K tomuto účelu lze využít například mřížkovou osnovu vytvořenou drátkem či provázkem.



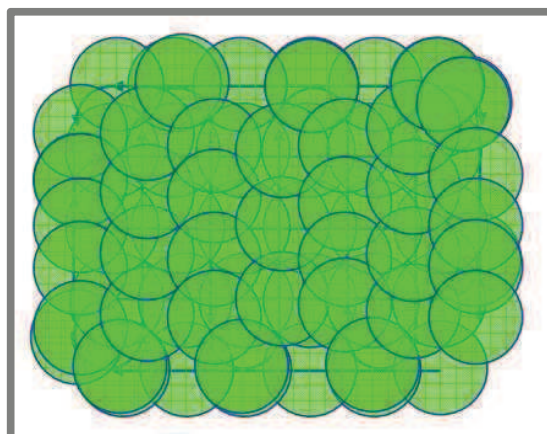
Obr. 5-4 Průběh měření nad osnovou [3]

Pro druhou metodu předpokládáme, že určujeme intenzitu pouze pro jednu čtvercovou, či obdélníkovou plochu. Tu rozdělíme na pás o konstantní šířce, jehož středem se bude pohybovat sonda. Je však třeba dodržet konstantní rychlost pohybu sondy. Metoda tzv. skenování se využívá pro získání mapy akustického výkonu, jak je znázorněno na obr. 5-7.

Oba možné postupy měření jsou znázorněny na obrázku 5-5.

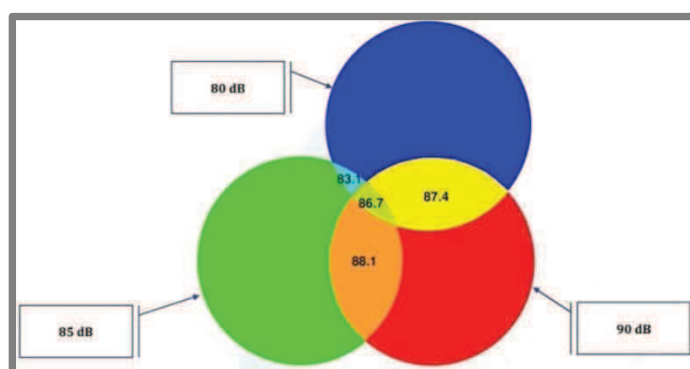


Obr. 5-5 Znárodnění metody měření v bodech (vlevo) a skenování (vpravo) [10]

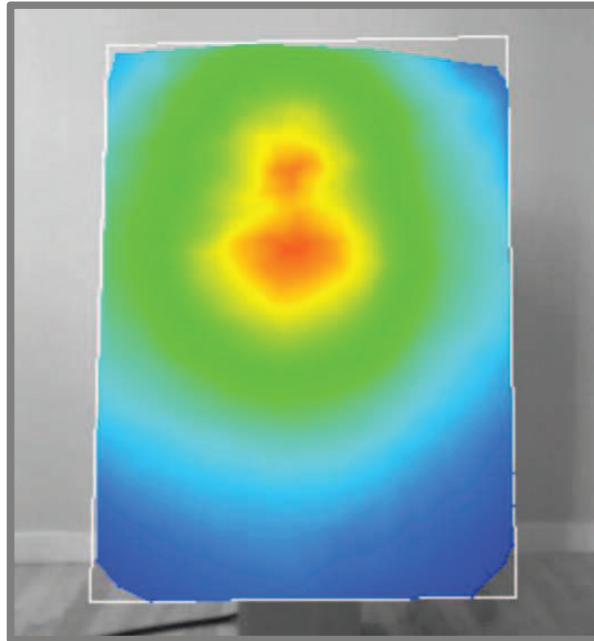


Obr. 5-6 Vzájemné překrytí jednotlivých měření [9]

Po dokončení měření je provedeno průměrování získaných hodnot a vynesení výsledků do plošných či prostorových diagramů. Princip průměrování je přiblížen obrázkem 5-8



Obr. 5-7 Princip plošného průměrování hodnot [9]



Obr. 5-8 Vykreslení mapy celkového akustického výkonu [9]

### 5.1.2 Beamforming

Princip beamformingu je nejlépe přiblížen skrze popsání základů algoritmu „Delay And Sum“, který byl využit i při výpočtu měření testovacího objektu. Jak je znázorněno na obrázku 5-9, předpokládáme mikrofonní pole s  $M$  mikrofony na pozicích  $\mathbf{r}_m$  ( $m=1, 2, 3, \dots, M$ ) v rovině  $xy$ . Pokud je takové pole použito pro „Delay And Sum“ algoritmus, měřené signály akustického tlaku  $\mathbf{p}_m$  jsou individuálně opožděny a poté sečteny:

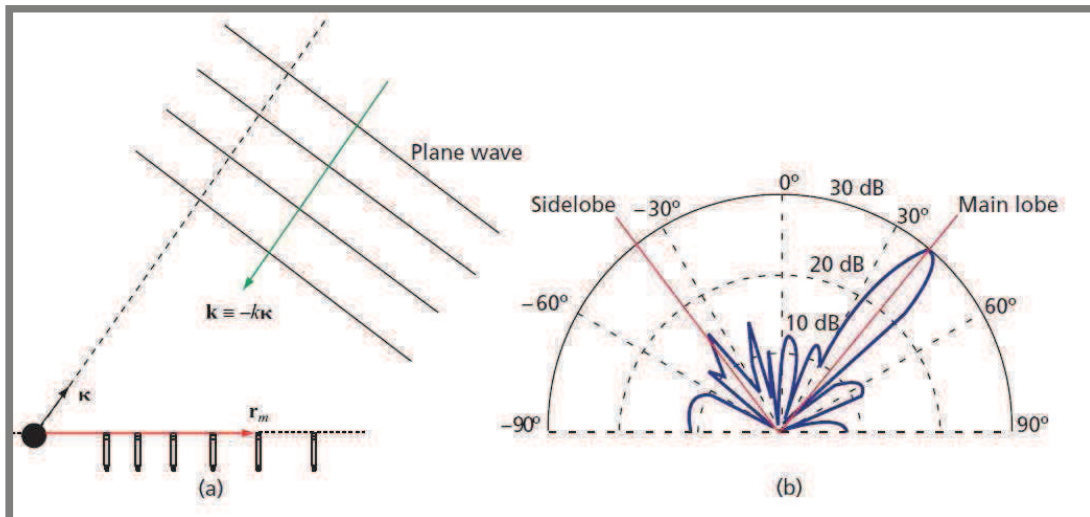
$$b(\boldsymbol{\kappa}, t) = \sum_{m=1}^M W_m p_m(t - \Delta_m(\boldsymbol{\kappa})),$$

kde  $\mathbf{w}_m$  je nastavení váhového filtru, nebo koeficient stínění pro jednotlivé mikrofony. Individuální časová zpoždění  $\Delta_m$  jsou zvolena s ohledem na dosažení požadované směrové citlivosti, dané vektorem  $\boldsymbol{\kappa}$ . Toho je docíleno tím, že časové prodlevy jsou nastaveny tak, aby signály spojené s rovinnou vlnou přicházející z požadovaného směru  $\boldsymbol{\kappa}$  byly seřazeny ještě před sumarizací. Seřazení lze provést pomocí volby:

$$\Delta_m = \frac{\boldsymbol{\kappa} \cdot \mathbf{r}_m}{c},$$

kde  $c$  je rychlost šíření zvuku v daném prostředí. Signály přicházející z jiných směrů nebudou před sečtením přiřazeny, a proto nebudou přičteny koherentně, čímž je získána směrová citlivost. [6]

Na obrázku 5-9(a) lze vidět mikrofonní pole, zaostřené na vzdálené zvukové pole ve směru  $\boldsymbol{\kappa}$  a rovinnou vlnu šířící se ze stejného směru. Na pravé straně stejného obrázku (b) je uveden typický diagram směrové citlivosti s hlavním lalokem (main lobe) ve směru zaostření mikrofonního pole a vedlejšími laloky (sidelobe) pro vlny přicházející z jiných směrů. [6]



Obr. 5-9 (a) Mikrofonní pole, směr zaostření pro vzdálené pole a rovinná vlna šířící se ze směru zaostření. (b) Typický diagram směrové citlivosti s hlavním lalokem (main lobe) ve směru zaostření a vedlejšími laloky (sidelobes) v jiných směrech [6]

Výstupem rovnice „Delay And Sum“ pro frekvenční oblast je

$$B(\boldsymbol{\kappa}, \omega) = \sum_{m=1}^M w_m P_m(\omega) e^{-j\omega \Delta_m(\boldsymbol{\kappa})} = \sum_{m=1}^M w_m P_m(\omega) e^{j\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}_m}.$$

Zde  $\omega$  je úhlová frekvence,  $\mathbf{k} \equiv -k\boldsymbol{\kappa}$  je vektor vlnového čísla rovinné vlny šířící se ve směru  $\boldsymbol{\kappa}$ , na které je pole zaostřeno a  $\mathbf{k} = \omega/c$  je vlnové číslo. [6]

Skrze volbu časových zpoždění  $\Delta_m(\boldsymbol{\kappa})$ , nebo ekvivalentně upřednostňováním vektoru určitého vlnového čísla  $\mathbf{k} \equiv -k\boldsymbol{\kappa}$ , je provedeno zaostření beamformeru na daný směr  $\boldsymbol{\kappa}$  vzdáleného pole. V ideálním případě by mělo být možné pro provedení lokalizace zdroje hluku, měřit pouze signály přicházející z daného směru. Pro zjištění stupně kontaminace způsobeného signály přicházejícími z jiných směrů budeme předpokládat rovinnou vlnu s vektorem vlnového čísla  $\mathbf{k}_0$  odlišného od upřednostňovaného vektoru  $\mathbf{k} \equiv -k\boldsymbol{\kappa}$ . Projev této vlny je znázorněn na obrázku 5-9(b) jako vedlejší lalok (sidelobe). Tlak změření mikrofony poté bude odpovídat:

$$P_m(\omega) = P_0 e^{-j\mathbf{k}_0 \cdot \mathbf{r}_m},$$

což vzhledem k rovnici „Delay And Sum“ dá následující výstup z beamformeru:

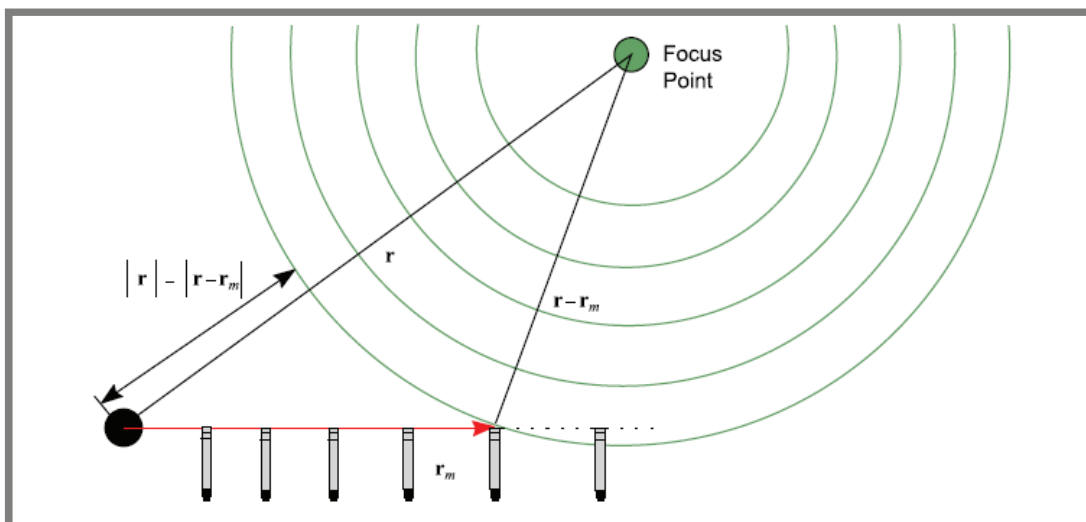
$$B(\boldsymbol{\kappa}, \omega) = P_0 \sum_{m=1}^M w_m e^{j(\mathbf{k} - \mathbf{k}_0) \cdot \mathbf{r}_m} \equiv P_0 W(\mathbf{k} - \mathbf{k}_0),$$

kde funkce  $W$

$$W(\mathbf{K}) \equiv \sum_{m=1}^M w_m e^{j\mathbf{K} \cdot \mathbf{r}_m}$$

je nazývána *array pattern* (šablona pole), mající tvar zobecněné prostorové diskrétní Fourierovy transformace váhové funkce  $\mathbf{w}$ , která je nulová mimo oblast pole. V případě  $w_m = 1$  je rovnice *array patternu* závislá pouze na geometrii pole. [6]





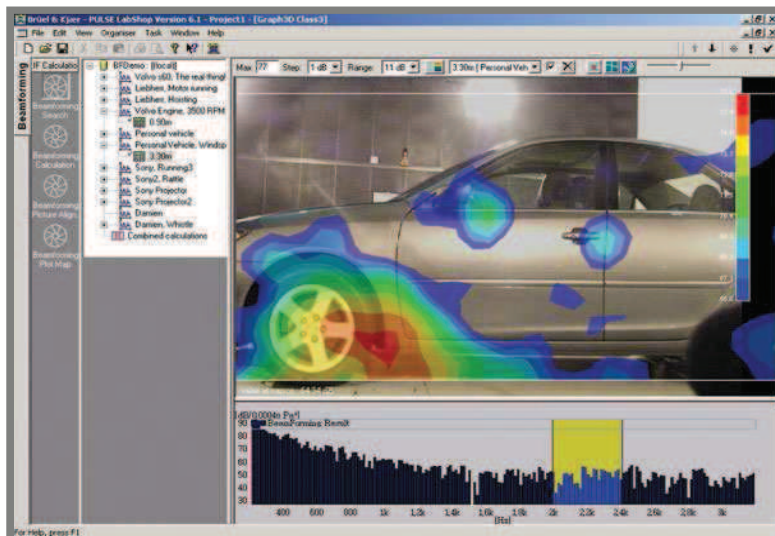
Obr. 5-11 Ostření v blízkém poli, sférické vlny vyzářeny monopólem zdroje ve směru zaostření  $r$  [6]

Po provedení různých testů a analýz, během kterých byla otestována široká škála pravidelných, nepravidelných, křížových, obdélníkových i kruhových polí, přišla společnost Brüel & Kjær na trh s optimalizovaným kruhovým mikrofonním polem určeným pro beamforming a STSF/NS-STSF. [6]



Obr. 5-12 Kruhové pole B&K pro beamforming a STSF/NS-STSF [2]

Beamforming se tedy vždy zaměřuje na rovinu zdroje rovnoběžnou s rovinou měření v konečné vzdálenosti. Stále tedy mapuje pouze relativní přírůstky a není možné získat kalibrovanou mapu akustických veličin pro rovinu v blízkosti povrchu zdroje hluku. Na druhou stranu jediným měřením, s použitím pole osazeným dostatečným počtem snímačů, můžeme mapovat prostor ve směru až do  $30^\circ$  od osy mikrofonního pole a pokrýt tak relativně velké oblasti. Běžně lze dosáhnout rozlišení okolo jedné délky zvukové vlny, což je téměř stejná přesnost jako u akustické holografie ve vyšších frekvencích. U velmi vysokých frekvencí dokonce metody holografie předčí, ovšem pro frekvence pod 1 kHz na akustickou holografii beamforming dosti ztrácí. [6]

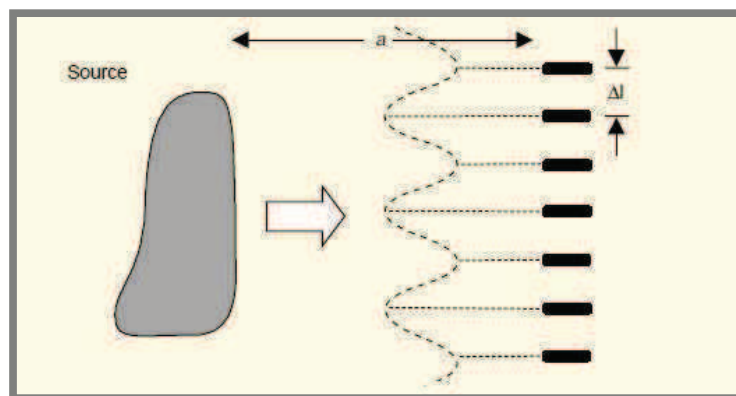


Obr. 5-13 Příklad vykreslení mapy v SW Pulse LabShop při měření metodou beamforming na automobilu [3]

### 5.1.3 SONAH – STSF

Metoda STSF vychází z principů akustické holografie v blízkém poli, které byly popsány v kapitole nesoucí stejnojmenný nadpis. Následující řádky jsou tedy spíše upřesněním obecných principů.

Vzhledem k charakteru měřicího procesu využívajícího dvourozměrné prostorové FFT, by mělo být dle teorie zapotřebí, aby rozmístění měřících bodů (rozložení mikrofonů v poli) tvořilo obdélníkový tvar.



Obr. 5-14 Rozestup mikrofonů pro měření metodou STSF [3]

Na obrázku 5-14 je vidět závislost mikrofonního pole na rozlišovací schopnosti metody STSF. Hlavním kritériem ovlivňující rozlišení je vlnová délka. Pokud  $\lambda_{min}$  je vlnová délka nejvyšší měřené frekvence, tak pro zamezení aliasingu je třeba rozestup mikrofonů

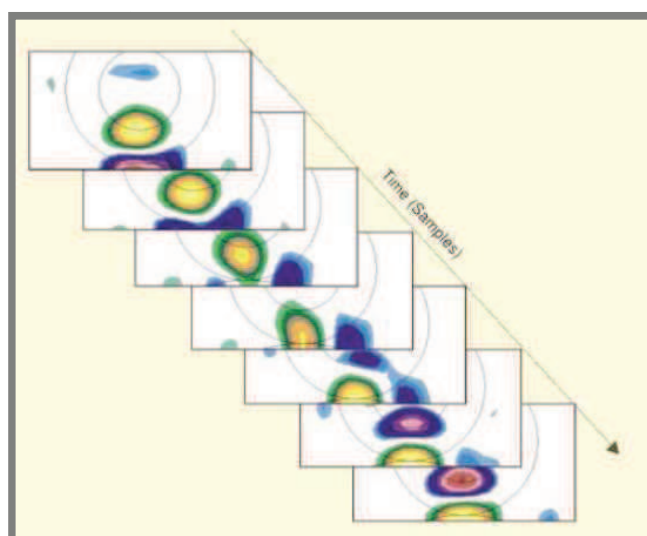
$$\Delta l \leq \frac{\lambda_{min}}{2} \quad \text{a} \quad \Delta l \leq a .$$

Avšak dle praktických zkušeností založených na řadě experimentů se pro metodu STSF využívá i kruhové pole s polonahodilým uspořádáním mikrofonů (pojem polonahodilé užívám z důvodu, který jsem již popsal v kapitole Mikrofonní pole, tedy že toto pole se po 120° opakuje).

#### 5.1.4 SONAH – NS-STSF

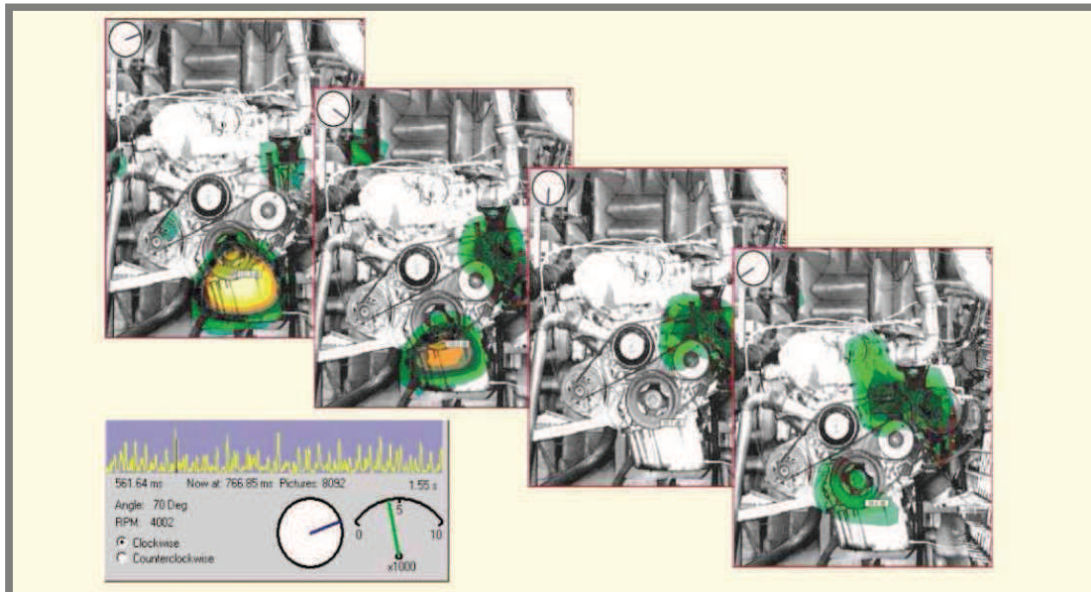
5.1.4

Jak již bylo popsáno, NS-STSF je implementací akustické holografie v časové oblasti. Pro tuto metodu tedy platí principy popsané ve stejné pojmenované kapitole. Výstupem měření je sekvence snímků mapující zvolenou akustickou veličinu v rovině rovnoběžné s rovinou měření. Na obrázku 5-15 je pro názornost uveden příklad vykreslení okamžitého vychýlení částic vzduchu v rovině boční strany pneumatiky nákladního vozidla.



Obr. 5-15 Sekvence snímků – princip NS-STSF [4]

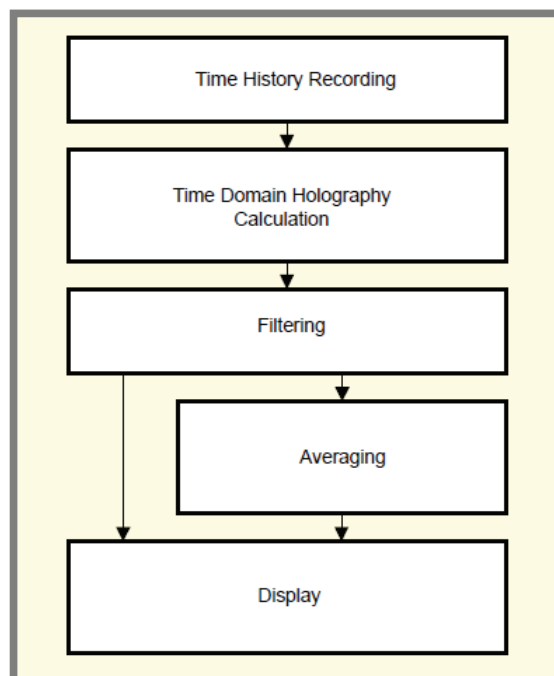
Při využití NS-STSF pro analýzu spalovacích motorů (obr. 5-16) jsou v optimálním případě nahrávány dva tacho signály z klikového hřídele (dva tacho signály však nejsou podmínkou provedení měření). Jeden signál mající vysoké rozlišení je určen pro přesné měření natočení klikového hřídele a druhý snímající jednou za cyklus referenční úhel natočení. Tyto dva signály umožňují identifikaci natočení kliky a otáček motoru na jednotlivých snímcích. S užitím systému NS-STSF je proto možné přiřadit vyzářený hluk k různým dějům probíhajících během pracovního cyklu motoru, jak je znázorněno na obrázku 5-16.



Obr. 5-16 Schéma datového toku pro NS-STSF [3]

Na obr. 5-17 je znázorněn datový tok NS-STSF ve schematické podobě. Jak je ze schématu patrné, průměrování hodnot není nezbytným krokem, uživatel má možnost zobrazení naměřených dat s rozlišením užité vzorkovací frekvence.

Pokud není nastaveno žádné průměrování a výstup má tvar jednotlivých vzorků, mohou být tato surová data exportována pro provedení jakéhokoliv post-procesorového zpracování.



Obr. 5-17 Schéma datového toku pro NS-STSF [3]

Stejně jako software pro STSF dokáže i NS-STSF software provádět úpravy zdroje pomocí snížení rychlosti částic u vybraných podoblastí roviny ležící

u povrchu zdroje hluku. Zvukové pole takto upraveného zdroje může být poté vypočítáno a podrobena analýze. Kupříkladu signál tlaku v určité vzdálenosti může být exportován pro subjektivní vyhodnocení hluku. Tím může být předpovězen hluk po provedení změn na zdroji. Pravděpodobně největší praktickou výhodou systému NS-STSF je schopnost získání jakékoliv informace o tom, kde a kdy byl hluk vyzářen pomocí jediného rychlého měření. [3]

## 5.2 Provedení demonstračního měření

5.2

### 5.2.1 Testovaný objekt

5.2.1

Testovaným objektem byl čtyřdobý vzduchem chlazený jednoválcový motor ROBIN EH34, umístěný v laboratoři 114 Ústavu konstruování, nacházející se v přízemí budovy A3. Jeho parametry jsou uvedeny v tabulce 1. Motor, sloužící jako výuková pomůcka, je připojen na motorovou brzdou s řídicím panelem, díky čemuž je možné podrobně sledovat režim chodu motoru a docílit opakovatelného nastavení požadovaného chodu. Pomocí ovládacího panelu jsou nastaveny elektronicky ovládané otáčky motorové brzdy a plynovou páčkou je možné docílit požadovaného zatížení motoru. Zatížení je uváděno na displeji ovládacího panelu hodnotou v Nm. Pokud se hodnota pohybuje v záporných číslech, je motor brzděn a tedy zatěžován. Je-li hodnota krouticího momentu kladná, motor je brzdou poháněn a jeho zatížení je minimální.

Místnost, ve které se motor nachází, není z akustického hlediska příliš vhodný prostor pro provádění měření pomocí metod SONAH či beamforming. Tuto skutečnost způsobuje především přítomnost mnoha rovných ploch s neabsorpčním povrchem (nepohlcují hluk), jako jsou stěny v bezprostřední blízkosti motoru, okna nacházející se za motorovým stanovištěm v ose měření a plechové kryty ovládacích prvků. Nutnost provádění měření v těchto prostorách byla zapříčiněna pevným uchycením celého zařízení k betonové podlaze.

Charakter laboratoře 114 však umožnil ověřit, do jaké míry je skutečně intenzitní sonda schopna provádět měření v provozních podmínkách jako jsou výrobní haly.



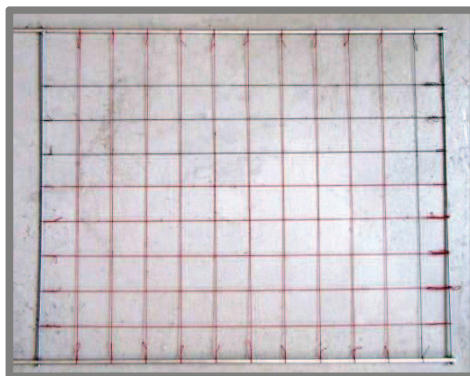
Obr. 5-18 Motor ROBIN EH34 s ovládacím panelem

Tab. 1 Parametry motoru ROBIN EH 34

objem válce	[cm <sup>3</sup> ]	338
vrtání x zdvih	[mm]	84 x 61
rozvod		OHV
kompresní poměr		8,3:1
max. výkon	[kW/RPM]	8,2/3600
souvislý výkon	[kW/RPM]	8,0/3600
max. kroutící moment	[Nm]	23,6
suchá hmotnost	[kg]	30
rozměry d x š x v	[mm]	377 x 421 x 485
olej		SEA 10W-40
objem olejové náplně	[cm <sup>3</sup> ]	1200
palivo		natural 95

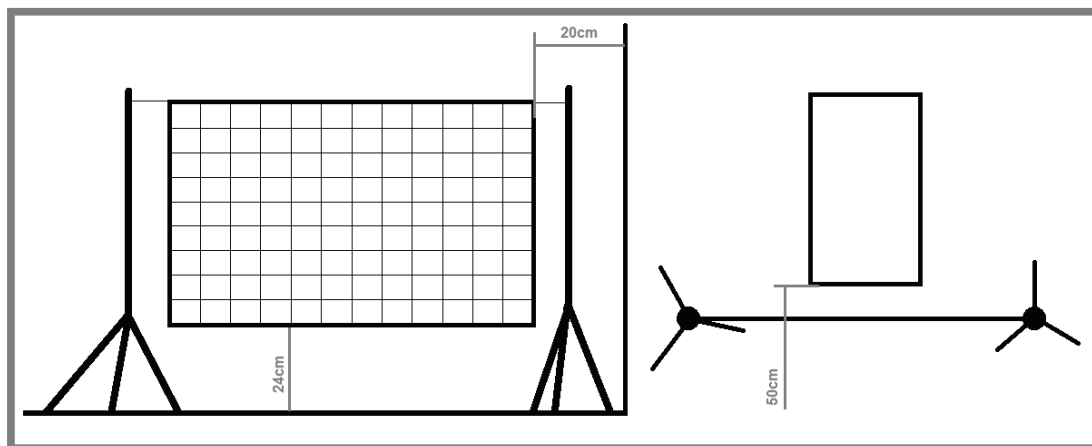
### 5.2.2 Mapování pomocí intenzitní sondy

Měření jsem provedl dne 19. 12. 2011 pod odborným vedením Ing. Lubomíra Houfka, Ph.D. z Ústavu mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, který mi pomohl sestavit měřící aparaturu a nastavit šablonu v softwaru PULSE Labshop.



Obr. 5-19 Měřící osnova použita při měření intenzitní sondou

Měření bylo provedeno pomocí intenzitní sondy Brüel & Kjær 3599 (obr. 5-1), pro které si bylo zapotřebí připravit osnovu. Tu jsem vytvořil pomocí dvou duralových trubek, závitových tyčí M5 a kloboukových gumiček. Výsledkem bylo vytvoření 108 polí (12 x 9) o velikosti 10 x 10 cm. Tato osnova byla uchycena ke dvěma fotografickým stativům a umístěna 50 cm před povrch měřeného objektu, jak je znázorněno na obrázku geometrie měření (obr. 5-20).



Obr. 5-20 Geometrie měření metodou intenzitní sondy

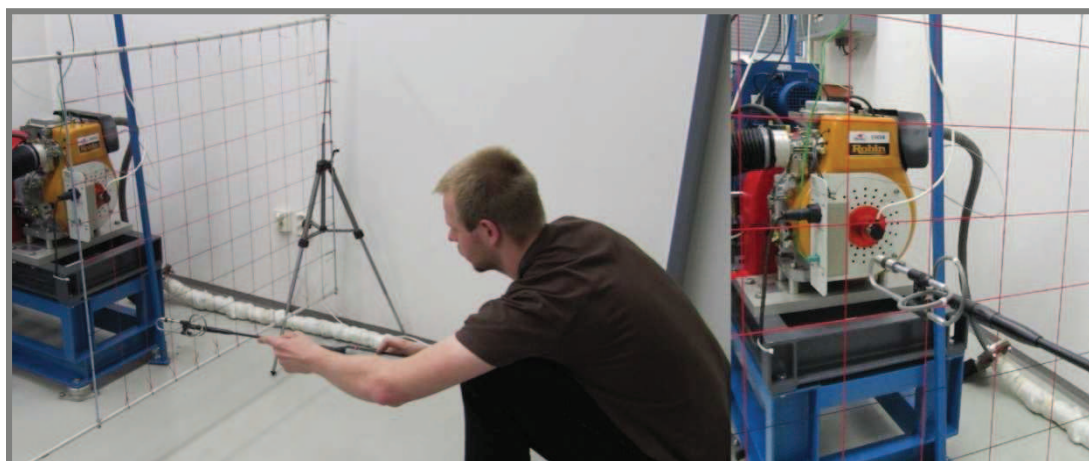
Dalším krokem bylo vytvoření šablony měření v softwaru PULSE LabShop, kde byly zadány informace popisující měřicí osnovu (počet polí a jejich rozměry) a byla zvolena 1/3 oktávová analýza (CPB analysis).

Následoval start motoru, po kterém jsem nastavil požadovaný pracovní režim, který odpovídal hodnotám v tabulce 2.

Tab. 2 Pracovní režim motoru

otáčky	$n = 2000 \text{ 1/min}$
kroučící moment	$M = -4,3 \text{ Nm}$
teplota motoru na začátku měření	$t_{\text{start}} = 220 \text{ }^\circ\text{C}$
teplota motoru na konci měření	$t_{\text{stop}} = 280 \text{ }^\circ\text{C}$

Dále bylo na řadě samotné měření na zmiňovaných 108 polích. V každém poli byla sonda umístěna doprostřed tak, aby rovina osnovy protínala prostor mezi oběma mikrofony. Avšak vzhledem k faktu, že sonda nebyla během měření pevně přichycena, ale pouze držena operátorem, nebyla zajištěna přesná poloha po celou dobu měření a mohlo snadno dojít k vychýlení sondy z požadované pozice. Proto každé z těchto 108 měření trvalo 10 sekund, čímž byl zajištěn dostatečný objem dat pro provedení lokálního zprůměrování a bylo tak možné získat validní hodnotu akustické intenzity pro dané pole.

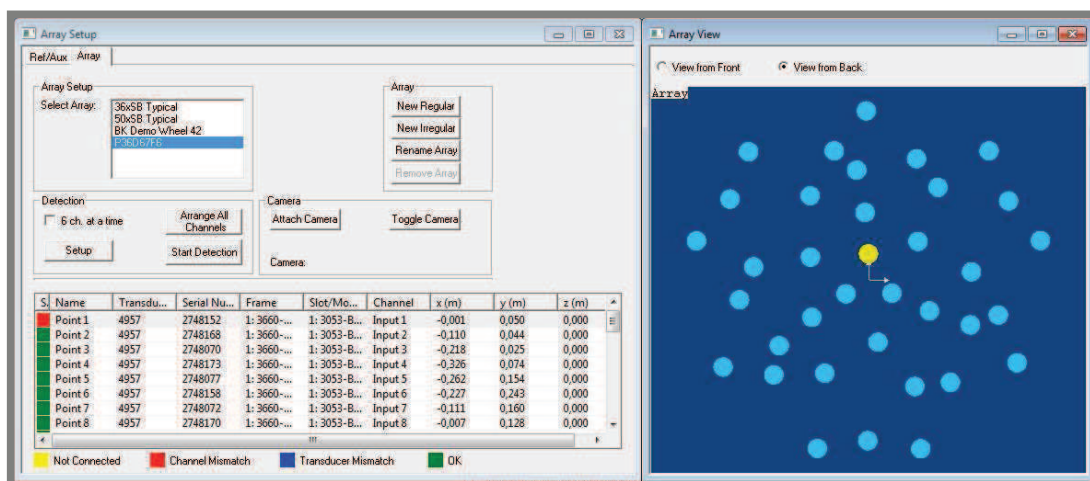


Obr. 5-21 Průběh měření pomocí intenzitní sondy

### 5.2.3 Beamforming

Měření proběhlo 28. 2. 2012, při kterém mi asistoval Ing. Milan Klapka, Ph.D. Příprava měření se skládala ze dvou částí, přičemž jednou bylo nastavení hardwaru a druhou nastavení softwaru. Jednou ze základních myšlenek platformy PULSE je připravení měřicí šablony před samotným měřením, avšak protože se jednalo o první využití nové technologie, musel jsem šablonu vytvořit.

Pro měření metodami beamforming a SONAH bylo využito 36 kanálové kruhové pole osazené mikrofony Brüel & Kjær typ 4957, určené pro frekvenční rozsah 50 – 10 000 Hz a dynamický rozsah 32 – 134 dB. Prvním krokem byla tedy příprava tohoto mikrofonního pole a platformy PULSE. Ta spočívala v upevnění pole do stativu, instalaci mikrofonů do patič, připojení kabeláže a propojení modulu k PC se spuštěným PULSE LabShop. Po vložení mikrofonů do patič bylo potřeba provést jejich inicializaci v softwaru a přiřadit jejich sériová čísla k jednotlivým kanálům v příslušném dialogovém okně (obr. 5-22).



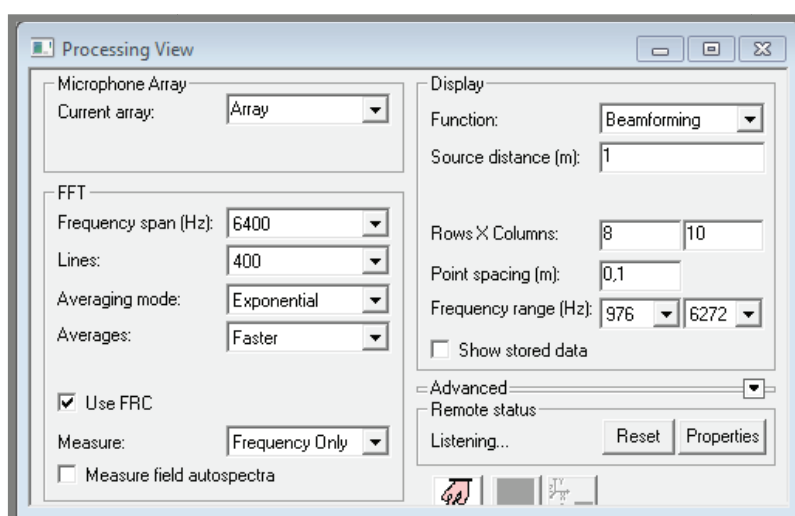
Obr. 5-22 Dialogové okno inicializace mikrofonů

Inicializaci jsem prováděl pistonphonem Brüel & Kjær typ 4228, postupným přidáváním gumové koncovky na mikrofony. Patice mikrofonů jsou očíslované, stejně jako



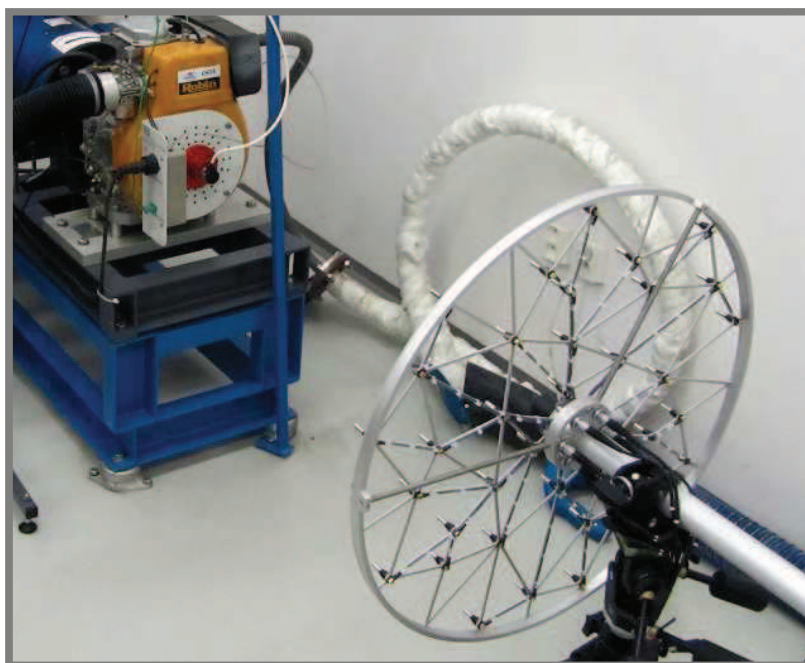
Obr. 5-23 Pistonphone Brüel & Kjær typ 4228 [2]

kabely k propojení pole a modulu. Vloží-li se tedy vždy stejné mikrofony na stejné pozice a uživatel má k dispozici dříve vytvořenou šablonu, není zapotřebí provádět proces inicializace před každým měřením. Defaultně dojde k přiřazení prvního kanálu jako referenčního signálu mikrofonního pole.



Obr. 5-24 Nastavení FFT analyzáru

Následujícím krokem bylo nastavení FFT analyzáru v uživatelském prostředí LabShop. Zde bylo zapotřebí upřesnit vzdálenost pole od povrchu zkoumaného objektu (od hlavy mikrofónů), zvolit vzorkovací frekvenci (ta závisí pouze na výpočetní síle užívaného počítače, defaultně je nastavena na maximum), přiřadit snímek z USB kamery a vyplnit metadata, podle kterých bylo možné jejich zpětné dohledání v databázi.



Obr. 5-25 Průběh měření pomocí metody beamforming

Po provedení výše uvedených kroků byl systém připravený na provedení měření. Následoval tedy start motoru a nastavení požadovaných provozních podmínek dle tabulky 3.

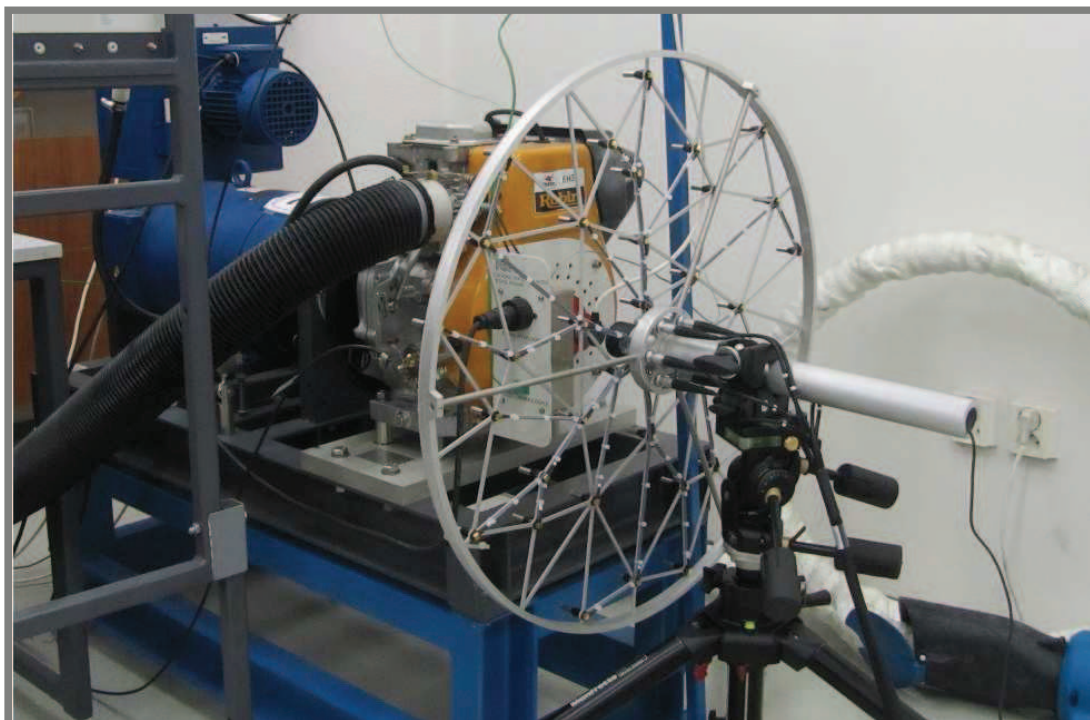
Po zahřátí motoru a ustálení jeho chodu bylo provedeno 5 sekundové měření, během kterého byl automaticky pořízen snímek z USB kamery. Po ukončení měřícího procesu byla data automaticky uložena do databáze a systém byl okamžitě připraven pro další beamforming měření, avšak pro dané účely postačovalo měření jedno. Snímek byl později využit i pro post-processing měření metodou SONAH, protože při metodách holografie je mikrofonní pole v blízkosti zdroje hluku a takto pořízený snímek zabere pouze malou část testovaného objektu.

Tab. 3 Pracovní režim motoru při měření metodou beamforming

otáčky	$n = 2006 \text{ 1/min}$
krouticí moment	$M = -4,2 \text{ Nm}$
teplota motoru na začátku měření	$t_{\text{start}} = 198 \text{ }^\circ\text{C}$
teplota motoru na konci měření	$t_{\text{stop}} = 262 \text{ }^\circ\text{C}$

#### 5.2.4 SONAH – STSF

Měření testovaného objektu, motoru ROBIN EH34, bylo provedeno bezprostředně po dokončení měření metodou beamforming (28. 2. 2012 za asistence Ing. Milana Klapky, Ph.D.). Celá měřící soustava byla tedy připravena z předešlého měření a jediné co bylo zapotřebí provést, bylo přiblížení mikrofonního pole co nejbližší povrchu zdroje hluku (potřebné kvůli zachycení evanescentních vln) tak, aby USB kamera v ose mikrofonního pole byla zaostřena na stejné místo, jako tomu bylo při měření metodou beamforming. Zachování záměrného bodu je nezbytné pro možnost využití snímku pořízeného z metrové vzdálenosti při měření beamforming. Jako nejmenší vzdálenosti jsem dosáhnul 10 cm, blíže jsem se nebyl schopný dostat z důvodu kolize konstrukce rámu motorového stendu a stativu držícího mikrofonní pole.



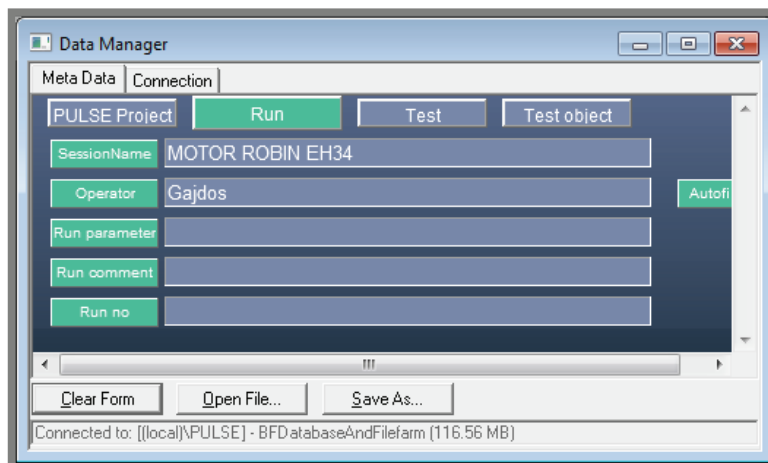
Obr. 5-26 Průběh měření STST / NS-STSF

Tab. 4 Pracovní režim motoru při měření STSF

otáčky	$n = 2012 \text{ 1/min}$
kroučící moment	$M = -4,2 \text{ Nm}$
teplota motoru na začátku měření	$t_{\text{start}} = 239 \text{ }^\circ\text{C}$
teplota motoru na konci měření	$t_{\text{stop}} = 239 \text{ }^\circ\text{C}$

Následně jsem provedl nastavení chodu motoru pomocí ovládacího panelu dle tabulky 4.

Samotný proces měření probíhal obdobně jako u metody beamforming. Skládal se tedy z vyplnění metadat (popis měření, dle kterého jsou data vyhledány v databázi), nastavení vzorkovací frekvence, popřípadě filtrů či vážení a spuštění měření.



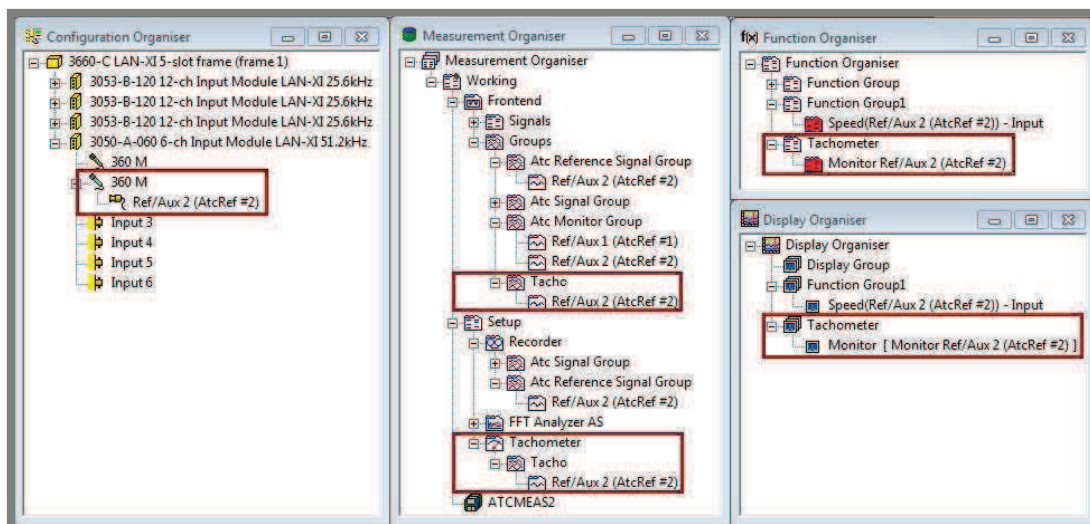
Obr. 5-27 Zadaní metadat

### 5.2.5 SONAH – NS-STSF

Nestacionární měření v základu probíhá identicky s měřením STSF. Pokud je však vyžadováno zobrazení akustické mapy v závislosti kromě času i na jiném stavu měřeného objektu, jako je třeba natočení libovolné rotační součásti či její otáčky za minutu, je zapotřebí přiřadit referenční signál poskytující informace o tomto stavu. Při demonstračním měření bylo zjišťováno natočení klikového hřídele pomocí tacho sondy 360M od společnosti Brüel & Kjær přes setrvačnick, který je s klikovým hřídelem napřímo pevně spojen. Tak jako většina vybavení společnosti Brüel & Kjær je tato sonda vybavena čipem TEDS (Transducer Electronic Data Sheet), což velice usnadňuje inicializaci zařízení. Přesto je však nutné provést nastavení referenčního signálu v softwaru PULSE LabShop.

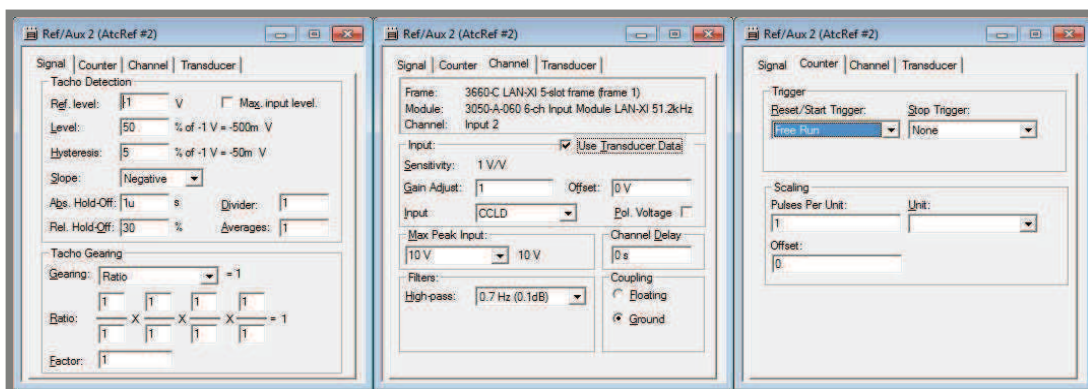
Nejdříve je zapotřebí vytvořit nový signál a přiřadit tacho sondu v *Configuration Organizer*. Následně je nutné přidat tento signál v *Measurement Organizer* do skupiny *Signals* a vytvořit novou *Group* pro tento tacho signal, *Tacho Group*. Dále je třeba do podsložky *Setup* přidat modul *Tachometer* a umístit do něj vytvořenou *Tacho Group*. V okně *Function Organizer* je potřeba obdobně připojit *Tachometer* a to stejné pro *Display Organizer*.

Takto vytvořený signál je poté nutné nastavit jako referenční (measure and monitor) v dialogovém okně *Array Setup*.



Obr. 5-28 Postup přiřazení sondy poskytující tacho signál [3]

Pro správnou funkci tacho sondy je nutné provést její nastavení, ke kterému je zajištěn přístup prostřednictvím *Measurement Organiseru*, kliknutím pravého tlačítka myši na *Tacho* a otevřením *Properties*. Zde je nutné věnovat pozornost především kolonkám *Level* (určuje výkmit tacho signálu), *Slope* (volí se dle smyslu kmitání signálu), *Ratio* (zadáva se poměr mezi základními otáčkami stroje a otáčkami na sledované součásti) a *Pulses Per Unit* (počet impulsů za jednu otočku).



Obr. 5-29 Dialogová okna nastavení tachó signálů

### 5.3 Zpracování naměřených dat

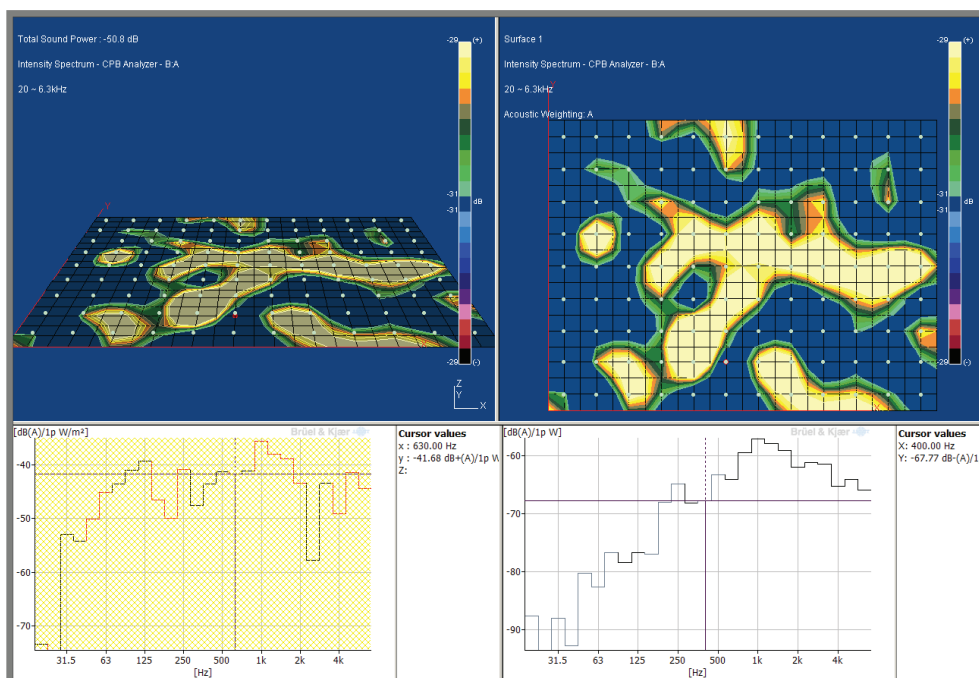
5.3

V následujících podkapitolách bude uveden postup, jakým jsem provedl zpracování a vyhodnocení dat z měření jednotlivými metodami. Post-processing pro metody využívající mikrofonní pole (beamforming a SONAH) byl proveden ve speciálním softwaru *Array Acoustics Post-processing*, dodaném Brüel & Kjær společně s nově zakoupeným systémem PULSE.

#### 5.3.1 Mapování pomocí intenzitní sondy

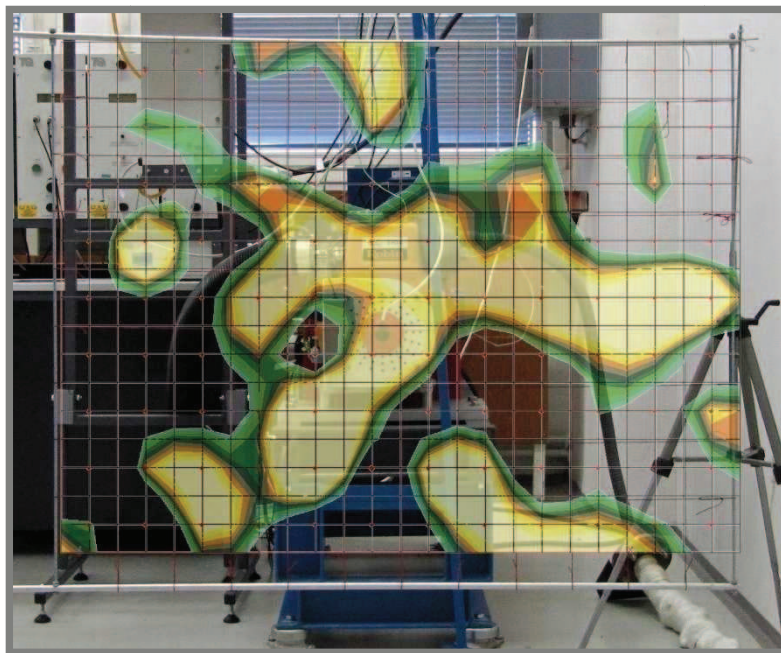
5.3.1

Po provedení měření ve všech bodech osnova následovalo provedení výpočtu a vykreslení mapy akustické intenzity. S výpočtem mi pomohl Ing. Lubomír Houfek, Ph.D. Výstupem softwaru PULSE LabShop je prostředí prohlížeče, kde si může operátor nechat vykreslit mapy intenzity pro požadovaná frekvenční pásma v libovolných bodech měřící osnova.



Obr. 5-30 Prostředí prohlížeče výsledků PULSE LabShop

Jak je však z obrázku 5-30 patrné, uživatel z programu LabShop získá pouze slepou akustickou mapu. Bylo tedy zapotřebí, abych provedl další úpravy pro získání mapy aplikované na snímek měřeného objektu. V tomto případě toho bylo docíleno úpravou slepé mapy v programu MS Paint, kde jsem pomocí funkce „Vyplnit barvou“ změnil modré pozadí na bílé, a následně jsem v programu Adobe Photoshop 7.0 CE takto upravenou mapou transparentně překryl fotku motoru ROBIN EH34 s měřicí osnovou, pořízenou během měření. Výsledek této úpravy je uveden na obrázku 5-31. Bohužel celý tento proces aplikování mapy na snímek je pouze jednorázový a je tedy třeba provést celý postup pro každou vykreslenou mapu zvlášť.



Obr. 5-31 Výsledná mapa akustické intenzity testovaného objektu

### 5.3.2 Beamforming

Pro provedení výpočtu a získání přístupu k výsledkům měření bylo potřebné spuštění programu *Array Acoustics Post-processing*. Práce v programu je rozdělena do tří částí. Těmi jsou vyhledání dat, provedení výpočtu a prohlížení výsledků. Přepínání mezi těmito částmi je prováděno pomocí panelu viz obr 5-32.

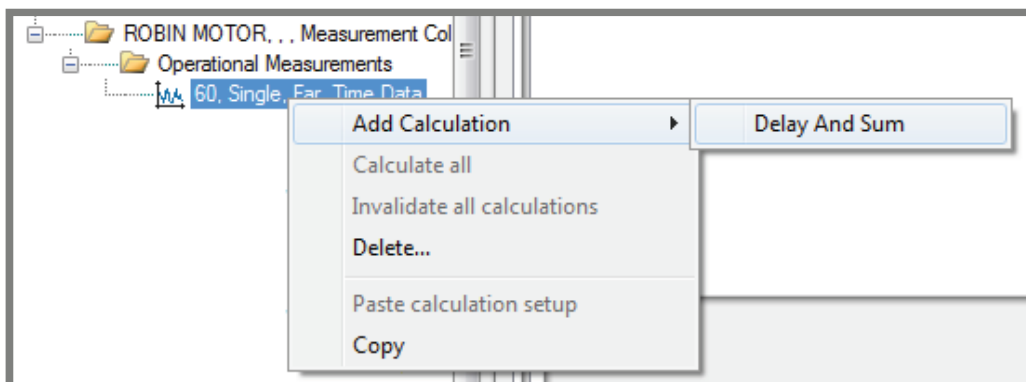


Obr. 5-32 Přepínání mezi hlavními sekcemi programu

Field Name	Value
Test Date	
Run Type	
Recording	
Session Name	
Operator	Gajdos
Run parameter	
Run comment	
Run no	

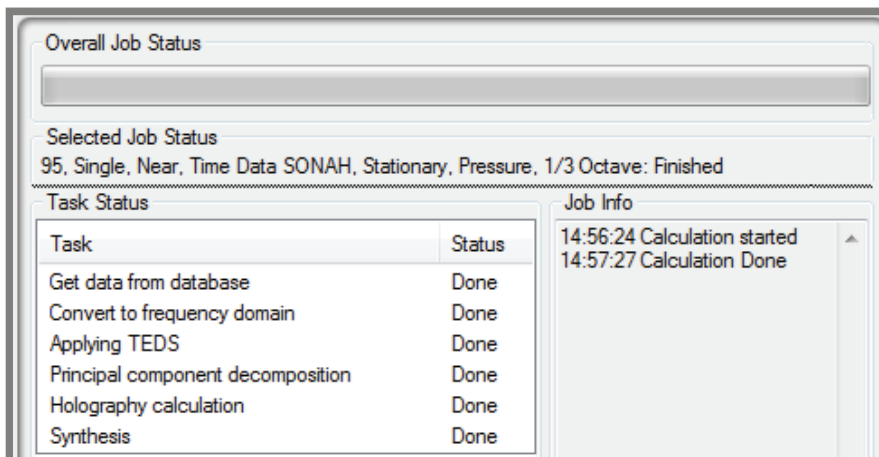
Obr. 5-33 Dialogové okno pro vyhledávání pomocí metadat

Pomocí zadaných popisných informací je třeba vyhledat provedené měření (*Search*). Poté musí uživatel v levém sloupci přiřadit požadovaný druh výpočtového algoritmu. Pro beamforming je jím algoritmus „Delay And Sum“ jehož princip jsem popsal v kapitole 5.3.1.



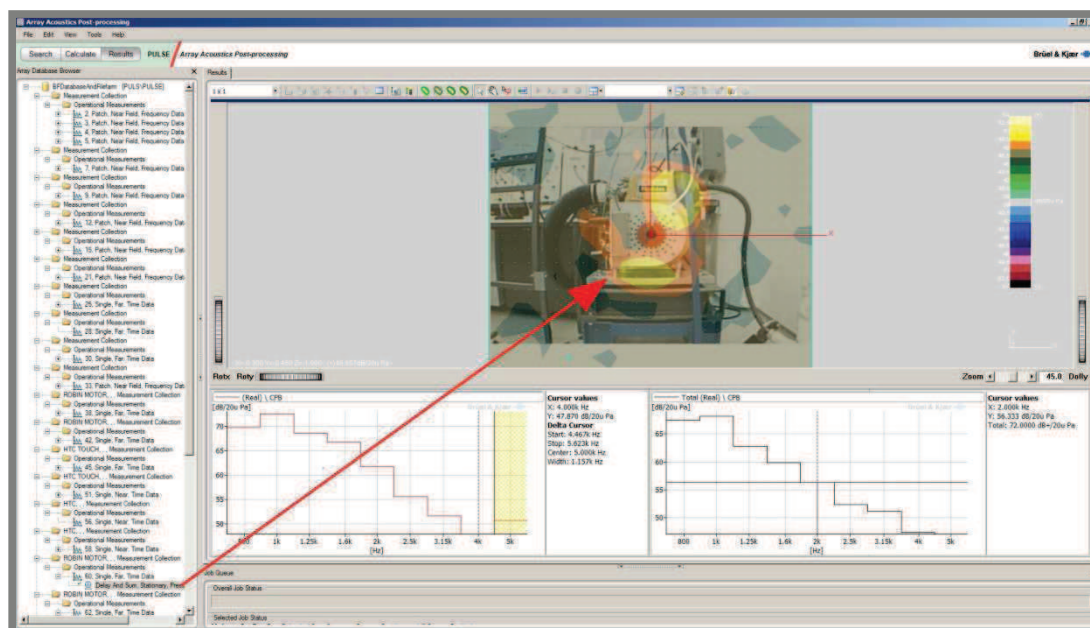
Obr. 5-34 Přiřazení algoritmu výpočtu při měření pomocí metody beamforming

Záložka *calculation setup* (*Calculate*) je určena pro provedení podrobného nastavení výpočtu. Uživatel postupně provede nastavení parametrů jako je druh analýzy (FFT, 1/n oktávová), horní a dolní frekvenční limit, šířka pásma, průměrování hodnot a vzdálenost mikrofonního pole od povrchu měřeného objektu. Po projití všech těchto parametrů nastává čas pro spuštění výpočtu, který je ukončen zprávou „calculaion done“ ve *Overall JobStatus Window*. Po obdržení této informace následuje přepnutí do prohlížeče výsledků (*Results*).



Obr. 5-35 Status window

Jako první je zapotřebí vybrat provedený výpočet a pomocí myši jej přetáhnout na střed okna v pravé části uživatelského prostředí, pro načtení hodnot do prohlížeče, a provést úpravu průhlednosti vykreslené mapy (funkce *transparency* v dialogovém okně *properties*).



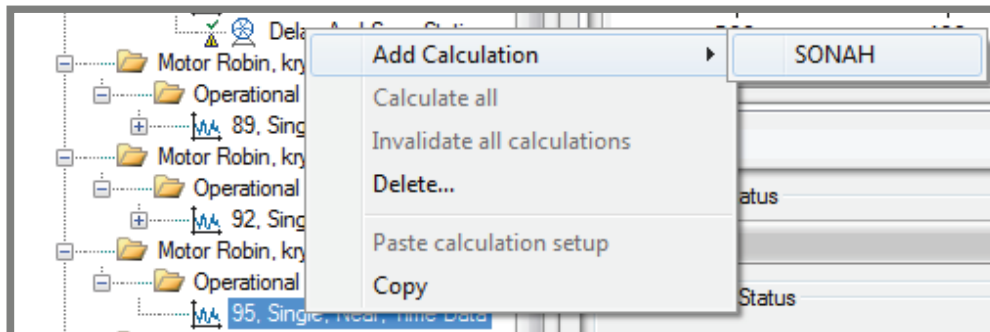
Obr. 5-36 Načtení naměřených dat do prohlížeče

Provedením tohoto úkonu se zpřístupní grafy spekter, jak je patrné na obrázku 5-36, kde pravý graf odpovídá spektru přes celou plochu měření, zatímco levý připadá oblasti zvolené pomocí volby bodu na snímku (červený bod).

Graf nalevo slouží také pro volbu frekvenčního pásma, které má být vykresleno. Je možná volba buď jednoho frekvenčního pásma, jehož šířka vychází z nastavení v *calculation setup*, nebo si může uživatel tažením myši označit širší pásmo (i celý rozsah měření), které je označeno žlutým sloupcem, jak lze vidět na obrázku 5-36.

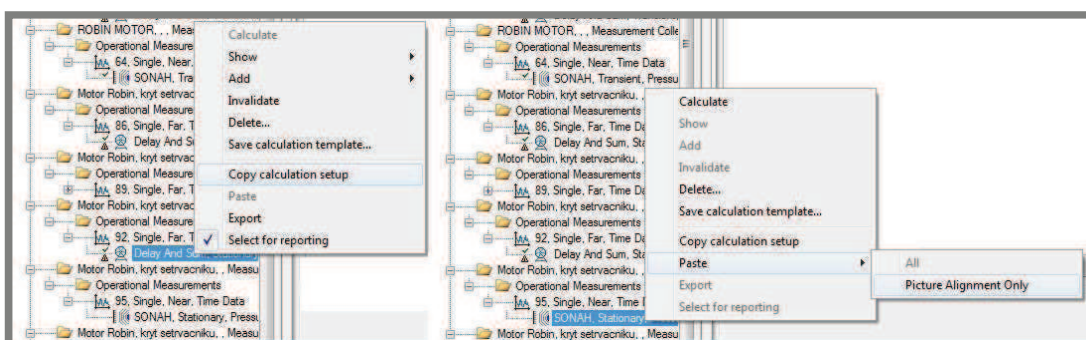
### 5.3.3 SONAH – STSF

Celý proces zpracování dat probíhal obdobně, jako jsem popsal pro metodu beamforming. Začínal tedy vyhledáním dat v databázi podle popisných informací (metadata) a přidělením algoritmu SONAH.



Obr. 5-37 Přiřazení algoritmu výpočtu při měření pomocí metody STSF/NS-STSF

Krokem navíc oproti zpracování dat beamformingu byla nutnost přiřadit snímek motoru z USB kamery od předchozího měření. To se běžně provádí kliknutím pravého tlačítka myši na „Delay And Sum“ měření (pokud toto měření bylo na stejném objektu provedeno) a výběrem funkce „Copy calculation setup“. Poté je třeba pravým tlačítkem myši rozbalit nabídku pro měření SONAH a zvolit v sekci Paste „Picture Allignment Only“ jak je znázorněno na obrázku 5-38.



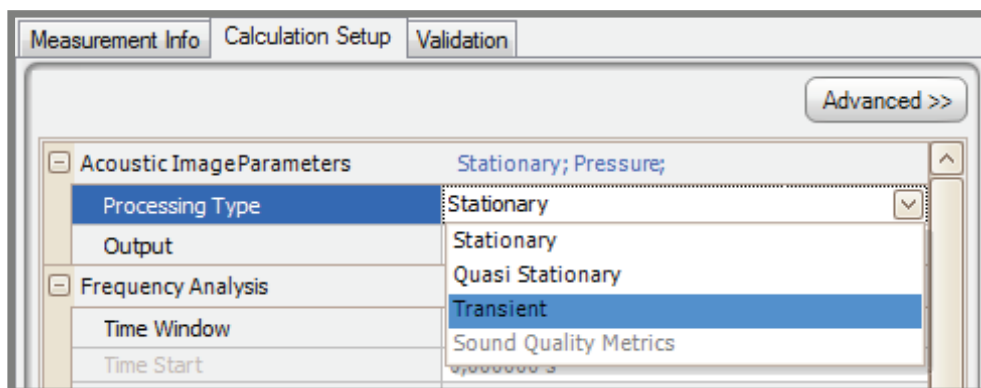
Obr. 5-38 Přiřazení snímku pro STSF/NS-STSF z jiného měření

Následuje provedení *calculation setup* jehož nastavení je obdobné jako pro beamforming a prošel jsem ho v kapitole 5.3.2. Po provedení výpočtu a jeho načtení do prohlížeče v sekci *Results* je umožněno analyzování výsledků dle vykreslených akustických map a spektrogramů.

### 5.3.4 SONAH – NS-STSF

Post-processing dat pro transienční děje probíhá velice podobně jako u beamformingu či prostorové transformace zvukových polí. Surová data jsou po vyhledání načtena z databáze a následuje nastavení výpočtu. Zde je důležité zvolit typ analýzy jako *transient* (obr. 5-39) a nastavit požadované průměrování. Pomocí hodnoty průměrování je ovládána synchronní filtrace. Uživatel má na výběr, zda si chce naměřený děj nechat vykreslit v závislosti na čase, RPM, či jiné referenční hodnotě. V případě měření motoru ROBIN bylo referenčním signálem natočení klikového hřídele, veličina pro průměrování poté byla hodnota ve stupních natočení.

V případě našeho měření jsme měli k dispozici pouze jeden tacho signál, proto jsme z něj získali pouze relativní natočení z výchozí pozice, nikoliv však absolutní polohu klikového hřídele. Poněvadž u motoru ROBIN EN34 se jedná o čtyřdobý jednoválec, jeden pracovní cyklus zahrnuje dvě otáčky klikového hřídele. Proto bylo zapotřebí vzít tento fakt v potaz a nastavit pro tacho signál odpovídající převodový poměr, tedy 2:1. Ostatní kolony pro nastavení jsou shodné s beamformingem a SFST a jejich význam byl tedy již popsán v předešlých kapitolách.



Obr. 5-39 Volba výpočtu transientního děje (přepnutí STSF na NS-STSF)

Nepříjemná skutečnost na uživatele čeká po spuštění výpočtu. Zjistí totiž, že oproti výpočtu statického měření trvá výpočet transientního děje mnohonásobně déle. Například pro výpočet našeho 5 vteřinového stacionárního děje se doba výpočtu pohybovala v řádu sekund, pro výpočet stejně dlouhého transientního děje s průměrováním nastaveným na úhel  $10^\circ$  se potřebný čas vyšplhal až k 5 hodinám.

Po přepnutí do sekce *Results* a „natažení“ měření do prohlížeče si může uživatel nechat přehrát sekvenci snímků ve smyčce, nebo si prohlížet jednotlivé snímky v interakci s frekvencí, prostorem či referenční veličinou (čas, úhel natočení atd.).

## 6 ANALÝZA A INTERPRETACE ZÍSKANÝCH ÚDAJŮ

**6**

---

### 6.1 Zhodnocení metod, měření a výsledků

6.1

---

#### 6.1.1 Metoda intenzitní sondy

6.1.1

---

Jak bylo popsáno v kapitole 2 v příslušné podkapitole, jedná se o jednu z nejstarších metod mapování akustických polí. Přičemž dle teoretických podkladů by měla mít jak své klady, tak i úskalí.

##### 6.1.1.1 Potřebné vybavení

6.1.1.1

---

Co se týče množství měřicího vybavení, je tato metoda poměrně nenáročná. Nezbytným vybavením se stávají pouze dva mikrofony, dvoukanálový A/D převodník a záznamové zařízení. Největší nároky jsou však kladeny na mikrofony, které musí být pro kvalitní výsledky vhodně spárovány. Pro tato měření bylo použito vybavení Brüel & Kjær, a to intenzitní sonda a starší verze platformy PULSE.

##### 6.1.1.2 Osnova měření

6.1.1.2

---

Jedním z významnějších záporů metody intenzitní sondy je nutnost vytvoření měřicí osnovy. Ta může pro měření na větších objektech dosahovat značných rozměrů, čímž se znemožní její přeprava ve funkčním stavu a je zapotřebí její montáž na místě, což poněkud prodlužuje čas potřebný pro provedení měření.

##### 6.1.1.3 Manuální obsluha

6.1.1.3

---

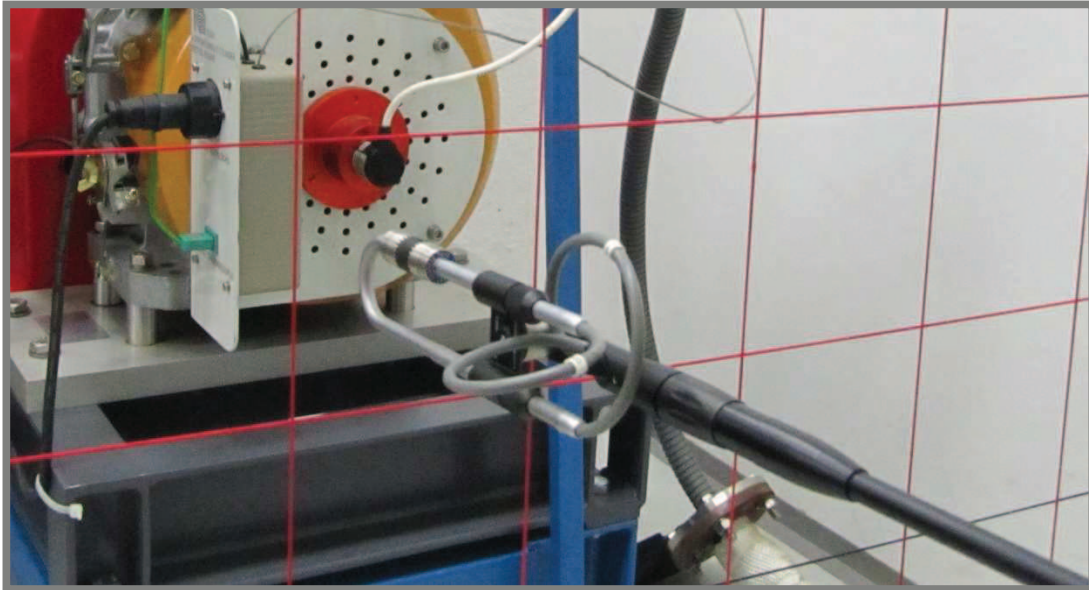
Vzhledem k faktu, že celá sonda je v průběhu měřicího procesu fixována ve středu měřeného segmentu osnovy a přesouvána pouze operátorem bez užití stativu, je poměrně náročné udržet zařízení ve správné pozici. Pro představu jedno měření na motoru ROBIN EH34 zabralo přibližně 20 minut. Při třetím měření byly již na operátorovi (autor práce) patrné známky únavy a rozkmit sondy dosahoval jednotek centimetrů jak v rovině osnovy, tak i ve směru kolmém na ni. Z toho důvodu bylo potřebné, aby měření na jednotlivých segmentech osnovy byla dostatečně dlouhá a tím byl získán potřebný objem dat pro provedení průměrování a získání validní hodnoty. Délka měření na jednom poli byla nastavena na 10 sekund.

##### 6.1.1.4 Zpracování výsledků

6.1.1.4

---

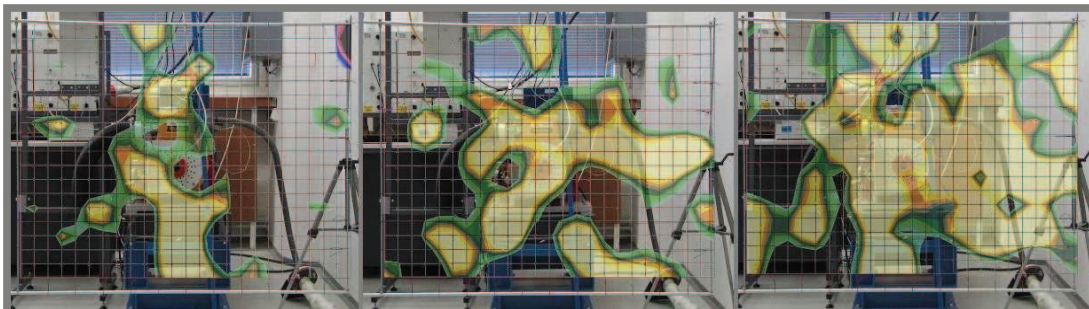
Přestože vykreslení mapy akustické intenzity je prováděno automaticky a uživateli je umožněno rychlé přepínání mezi body osnovy a frekvencemi, je zobrazena vždy pouze slepá mapa a pro překrytí přes snímek objektu musí být vynaloženo ještě značné úsilí. Proces této úpravy je popsán v kapitole 5.3.1.



Obr. 6-1 Pozice intenzitní sondy během měření

#### 6.1.1.5 Zhodnocení metody

Hlavní výhodou metody mapování pomocí intenzitní sondy má být dle teorie její vektorový charakter, díky němuž by měla být schopna díky své směrové citlivosti eliminovat vzruchy okolí. Tato vlastnost se však během měření na testovaném objektu neprojevila a do výsledků všech tří provedených měření vstupovaly značné odrazy od okolních objektů.



Obr. 6-2 Mapy akustické intenzity získané během tří měření

Na obrázku 6-2 jsou uvedeny výsledky tří provedených měření, kdy první dvě mapy byly naměřeny při velice podobném zatížení motoru (ve skutečnosti se však jednalo o první a třetí měření, zde jsou pouze přehozeny pro názornost) a třetí odpovídá chodu motoru pod trojnásobným zatížením.

Jako druhé hlavní mínus by se dal označit čas potřebný pro provedení jednoho měření. Ten se pro uvedené modelové měření pohyboval okolo 20 minut, během kterých se nesměl výrazněji změnit charakter zdroje hluku. Metoda tedy klade značné nároky na stacionární chod testovaného objektu.

V závěru tedy vychází metoda intenzitní sondy jako těžkopádná, dlouhotrvající metoda, jejíž jedinou výhodou je menší náročnost na množství potřebného měřicího vybavení.

## 6.1.2 Beamforming

6.1.2

---

V literatuře popisující teorii této metody se čtenář často setkává s názorem, že u beamformingu se jedná pouze o metodu užívanou pro rychlé zjištění hlavních zdrojů hluku a určení míst, kterým je radno se nadále blíže věnovat, přičemž není plnohodnotnou měřicí metodou. Během provedených testů byl však tento názor vyvrácen a bylo pozorováno, že pro frekvence vyšší jak 1 kHz jde o značně přesnou metodu, poskytující podrobné informace o akustickém poli obklopující zkoumaný objekt. Přesnost této metody je závislá na vzdálenosti mikrofonního pole od zdroje hluku. S rostoucí vzdáleností klesá rozlišení algoritmu, avšak pro měření provedená do vzdálenosti 1 m se dá s nadsázkou hovořit o rozšíření metod akustické holografie do frekvenčních pásem, ve kterých holografie ztrácí svou přesnost.

### 6.1.2.1 Potřebné vybavení

6.1.2.1

---

Poněvadž se jedná o metodu využívající k mapování mikrofonní pole, je zřejmé, že oproti metodě intenzitní sondy bude beamforming vyžadovat větší množství vybavení. Pro provedené měření bylo použito kruhové 36 kanálové pole. Z toho vyplývá, že bylo zapotřebí 36 mikrofónů (Brüel & Kjaer 4957 array microphone) společně s 36 kanály na frontendu platformy PULSE (byly využity 3 Lan XI moduly, každý s 12 kanály), který se propojuje s PC s patřičným softwarem. Ačkoliv je vybavení relativně hodně, jeho příprava k měření nezabere mnoho času a není ani uživatelsky náročná.

### 6.1.2.2 Průběh měření

6.1.2.2

---

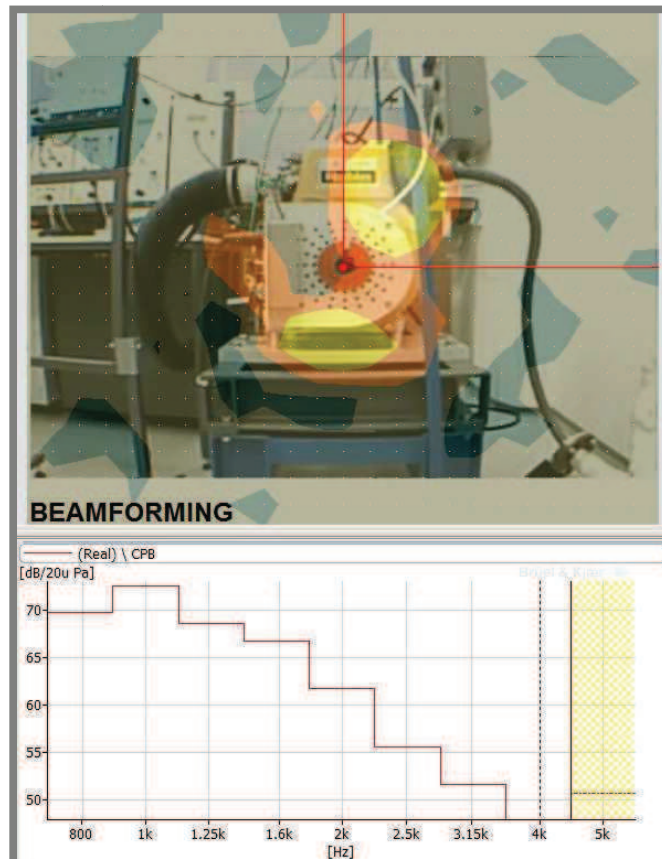
Samotný průběh měření je velice rychlý. Nejvíce času uživateli zabere inicializace mikrofónů v poli pomocí pistonphonu (pokud nepoužívá předem vytvořenou šablonu a nedošlo k zaměnění mikrofónů na jednotlivých pozicích). Tento proces byl popsán v kapitole 5.3.2. Po inicializaci probíhá pouze připojení USB kamery (je-li jí pole osazeno) a základní nastavení. Po této krátké proceduře je již systém plně připraven k provedení měření.

### 6.1.2.3 Zpracování výsledků

6.1.2.3

---

Díky softwaru určeného přímo pro post-processing dat naměřených pomocí mikrofonních polí na platformě PULSE, je ovládání výpočtu a vykreslení akustických map oproti intenzitní sondě výrazně snadnější. Hlavní výhodou je automatické překrývání mapy na vystředěný snímek testovaného objektu. Tím odpadá potřeba využití grafických programů, které často musí být licencovány.



Obr. 6-3 Vykreslení mapy hladiny akustického tlaku v pásmu 4kHz pomocí metody beamformig

#### 6.1.2.4 Zhodnocení metody

Beamforming se během testovacích měření projevil jako velice účinná metoda pro lokalizaci a popis zdrojů hluku v pozorovaném akustickém poli. Jeho vhodnost je omezena dolní hraniční frekvencí 1 kHz, pod kterou razantně ztrácí prostorové rozlišení a dochází k překrývání celé pozorované oblasti. Jako metoda využívající mikrofonního pole se dostává beamforming do skupiny technologií s vysokou pořizovací cenou, což se však jeví spolu s frekvenčním limitem jako jediné mínus. Za tuto cenu ovšem uživatel získá možnost provádět rychlá, jednoduchá a hlavně přesná měření a schopnost monitorovat jak stacionární tak transientní děje ze vzdáleného pole.

#### 6.1.3 SONAH – STSF

Metoda prostorové transformace zvukových polí je využívána pro lokalizaci zdrojů hluku a jejich zkoumání v blízkém poli. Je určena pro měření malých a středně velkých objektů se stacionárním chodem. Její výhodou by měla být rychlost měření a dobré rozlišení.

##### 6.1.3.1 Průběh měření

Pokud má operátor dopředu přichystanou šablonu měření, skládá se celý proces přípravy snímání pouze ze složení hardwaru (mikrofonní pole, stativ, kabeláž, analyzátor a počítač) a jeho inicializace v patřičném softwaru, což nevyžaduje nijak

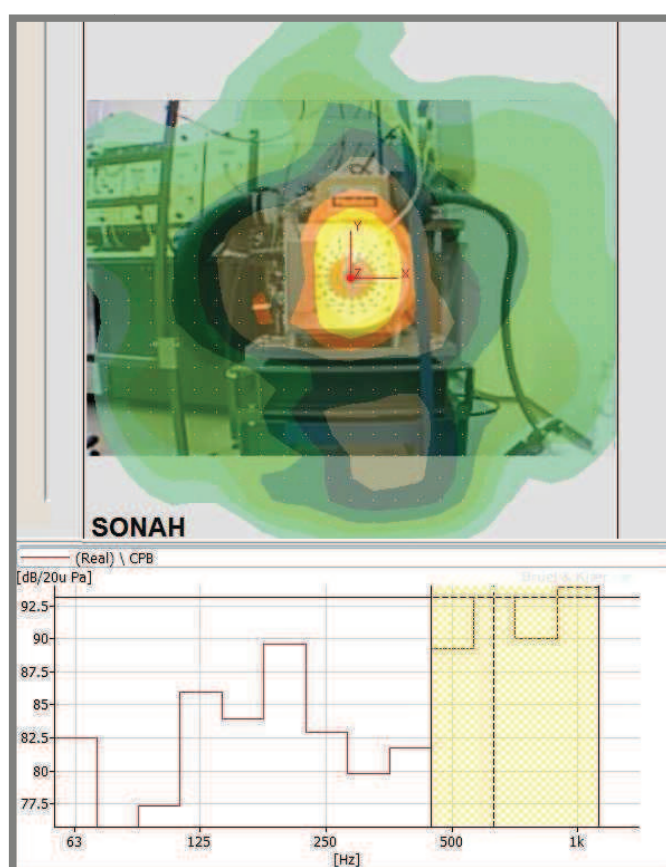
mnoho času. V případě, že šablona připravena není, přibývá nutnost přiřazení jednotlivých mikrofonů v poli ke kanálům analyzáru. Mikrofonní pole musí být během analýzy touto metodou co nejbližší povrchu zkoumaného objektu, aby byly zaznamenány evanescentní vlny. To může znemožnit provedení testů na špatně přístupných dílech některých strojů bez jejich demontáže.

Měření jako takové probíhá velice rychle a je uživatelsky pohodlné. Pro měření je třeba zajistit stacionární chod zdroje hluku.

### 6.1.3.2 Zpracování výsledků

6.1.3.2

Jelikož se jedná o metodu využívající mikrofonní pole je zpracování dat prováděno v softwaru *Array Acoustic Post-processing*, což usnadňuje a urychluje jak výpočet, tak i prohlížení a analýzu výsledků, kde si uživatel může lehce volit frekvenční pásma a oblasti zájmu.



Obr. 6-4 Vykreslení mapy hladiny akustického tlaku v pásmu 0,5 - 1kHz pomocí metody STSF

### 6.1.3.3 Zhodnocení metody

6.1.3.3

Měření pomocí prostorové transformace zvukových polí je uživatelsky velice příjemná metoda kvůli rychlosti jak nastavení, tak i samotného měření. Přesnost a rozlišení STSF závisí na rozestupu mikrofonů v poli, tvaru mikrofonního pole a na jeho vzdálenosti od povrchu zdroje. S rostoucí vzdáleností klesá přesnost a od určité vzdálenosti již zaniká realizovatelnost měření kvůli slabé hladině či úplnému vymizení evanescentních vln.

Nutnost využití mikrofonního pole značně zvyšuje pořizovací cenu této metody, avšak protože se využívá stejné mikrofonní pole pro metody beamforming, STSF i NS-STSF, je mezi ně tato cena rozdělena.

#### 6.1.4 SONAH – NS-STSF

Od metody pro měření nestacionárních dějů jsme očekávali největší přínos jak pro rozšíření možností provádění akustických analýz, tak pro zvýšení konkurenceschopnosti bezdozvukové komory na trhu, poněvadž nákupem této technologie se Fakulta strojního inženýrství stala jejím prvním a jediným majitelem v České republice.

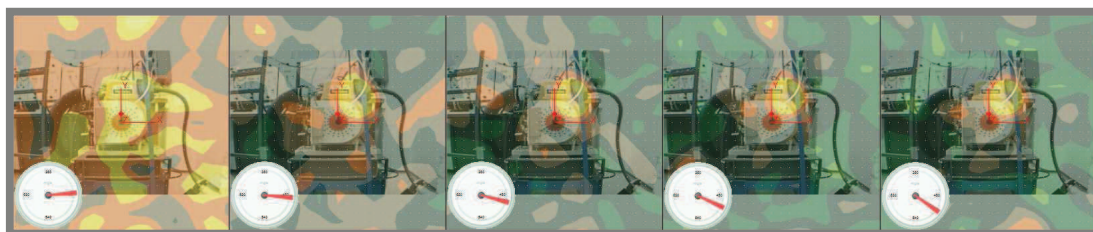
##### 6.1.4.1 Průběh měření

Průběhem měření se od metody STSF liší pouze nutností užití snímače, který poskytuje informace o okamžitém stavu zdroje hluku, při zachování svižnosti měřícího procesu. Pro demonstrační měření byla využita tachosonda pro zjištění relativního natočení klikového hřídele. Relativního proto, že tento signál nám nezajistil, že natočení  $0^\circ$  odpovídá horní úvratí, ale udával pouze přírůstek hodnoty natočení. Nastavení tachosondy je potřeba manuálně provést v programu LabShop, což vyžaduje podrobnější znalost tohoto softwaru. Popis nastavení je uveden v kapitole 5.2.5.

##### 6.1.4.2 Zpracování výsledků

Post-processing dat probíhá obdobně, jako pro ostatní metody využívající mikrofonní pole, které jsem popsal v předešlých kapitolách. Drobné rozdíly jsou v nastavení kritéria průměrování, ale v čem se tato metoda zásadně odlišuje je čas potřebný pro provedení výpočtu akustické mapy. Ten se pro naše 5 sekundové měření vyšplhal na 5 hodin, přičemž nejvíce času zabírá flipping dat na pevném disku. Během tohoto procesu se celý systém chová, jako by došlo k chybě a nereaguje na pokyny. Uživatel tento fakt musí brát v potaz a projevit trpělivost.

Po dokončení výpočtu a jeho načtení do prohlížeče si může uživatel prohlížet výsledky v závislosti na frekvenci, pozici v rovině rovnoběžné s rovinou pole (rovinu na povrchu zdroje v zadané vzdálenosti o roviny zdroje) a v závislosti na referenčním signálu, kterým pro nás byl zmiňovaný úhel natočení kliky a který je zastoupen ukazatelem na jednotlivých snímcích na obr. 6-5. Celou sekvenci si lze nechat přehrát ve smyčce.



Obr. 6-5 Sekvence snímků NS-STSF zachycující výfuk motoru

### 6.1.4.3 Zhodnocení metody

Metoda NS-STSF vnáší do akustické diagnostiky zcela nový rozměr, a tím je možnost mapování nestacionárních dějů. Díky tomu lze zaznamenat i rychle a krátce probíhající děje, které by jinak mohli být ztraceny během průměrování. A tak oproti metodám stacionárním k informaci „kde“ přiřadí také informaci „kdy“.

Nastavení šablony měření je zde poněkud náročnější oproti STSF či metodě beamforming. To je dáno užitím tachy sondy jako zdroje referenčního signálu, pro jejíž správné nastavení je zapotřebí hlubší znalost struktury programu PULSE LabShop.

Rozlišení, frekvenční rozsah a použitelnost si tato metoda přebírá od prostorové transformace zvukových polí, tedy STSF.

Nevýhodou NS-STSF je doba potřebná pro provedení výpočtu. Ta dosahovala při testech i pro krátká měření několika hodin. Tento výpočetní čas závisí na zvolené hodnotě průměrování a šířce jednoho frekvenčního pásma. Avšak lze věřit, že se strmě stoupajícím trendem stále levnější výpočetní síly, za krátký čas odpadne tento nedostatek, a tím metoda NS-STSF ztratí své nejvýraznější mínus.

## 7 ZÁVĚR

Pro splnění cílů této práce bylo zapotřebí získat potřebné teoretické znalosti principů jednotlivých měřících metod a naučit se samostatně pracovat s nově nabytým vybavením pro tyto technologie. Teorii jsem čerpal z internetových i psaných zdrojů, nejvíce užitečné však bylo odborné školení provedené zástupcem společnosti Brüel & Kjær Frankem Rasmussenem ve dnech 21. – 23. února 2012, který nám celý systém oživil a provedl vysvětlení funkce a zacházení s vybavením na demonstračních měřeních na dvoustupňovém kompresoru pro plnění tlakových lahví.

Po tomto školení jsme se spolu s Ing. Milanem Klapkou, PhD. stali prvními proškolenými jedinci v České republice, schopni nové technologie na platformě PULSE ovládat. S takto nabytými zkušenostmi jsem se mohl pustit do provádění demonstračních měření na motoru ROBIN EH34, popsanych v této práci a provést srovnání jednotlivých metod, vypracovat pojednání o jejich vhodnosti v závislosti na podmínkách měření a vytvořit podmínky pro začlenění metod mapování mikrofonních polí do běžné praxe.

Mapování akustických polí intenzitní sondou je jednou z nejstarších mapovacích metod a jako taková je již delší dobu využívána i na Fakultě strojního inženýrství. Její výhody spočívají v poměrně malé náročnosti na množství měřícího vybavení a vektorové charakteristice měřené akustické veličiny. Díky této vlastnosti by dle teoretických podkladů mělo využití akustické intenzity do značné míry zamezit kontaminaci měřeného objektu vzruchy od okolí a umožnit měření na strojích v jejich běžných pracovních podmínkách, aniž by muselo dojít k odstavení okolních strojů z provozu.

Tato vynikající vlastnost se však během provádění měření testovaného objektu plně neprojevila a do výsledné mapy akustické intenzity proniklo značné množství kontaminace způsobené odrazy od okolí, jako stěny, okna či plechových krytů. K potlačení těchto nechtěných vzruchů jsem musel snížit amplitudový rozsah vykreslené mapy.

Značnou nevýhodou mapování intenzitní sondou je poměrně velká časová náročnost, dána nutností měření pomocí předem vytvořené osnovy. Obzvláště pak, je-li se sondou operováno manuálně jako při našem měření a dochází k výraznému rozkmitu sondy z ideální polohy během měření. Pro snížení nepřesnosti je poté důležité nastavit delší měřící čas pro každé pole osnovy, pro získání dostatečného objemu dat a kvalitní zprůměrované hodnoty.

Také zpracování naměřených dat si žádá jistou dávku trpělivosti, neboť z programu PULSE LabShop získá uživatel slepou mapu, kterou musí manuálně upravit v libovolném grafickém softwaru a následně ji transparentně nanést na snímek měřeného objektu, aby dosáhl patřičné názornosti výsledků.

Ve shrnutí vyšla intenzitní sonda jako relativně levná metoda, která však klade značné nároky na stacionární chod zkoumaného objektu a čas jak měření, tak i zpracování dat.

Oproti tomu metody využívající mikrofonní pole (beamforming, STSF a NS-STSF) plně prokázaly očekávaný přínos, kterým bylo zrychlení a zjednodušení prováděných měření přičemž díky specializovanému post-processingovému softwaru došlo ke zjednodušení i pro zpracování dat.

Úkonem, který při práci s mikrofonními poli zabral nejvíce času, byla inicializace mikrofonů a jejich přiřazení k jednotlivým kanálům analyzáru. Avšak

pokud je inicializace jednou provedena a nedojde k prohození mikrofonů lze nastavení uložit jako šablonu pro další měření a uživatel je procesu přiřazení ušetřen. To značně zkrátí čas potřebný pro přípravu měření.

Pro demonstraci popsaných metod byla provedena měření na motoru ROBIN EH34, během nichž bylo využito kruhové 36 kanálové mikrofonní pole společnosti Brüel & Kjær, které je ve své ose osazeno USB kamerou propojenou s měřícím softwarem. Díky této kameře je samočinně pořizován snímek měření, na který je automaticky překreslována akustická mapa definovaná polohou či frekvencí.

V literatuře jsem se během rešeršní činnosti vícekrát dočetl, že beamforming není plnohodnotnou měřicí metodou a je vhodný spíše k rychlé lokalizaci hlavních zdrojů hluku a určení míst, kterým je důležité věnovat pozornost. Během demonstračního měření jsme však zjistili, že tato metoda, měříme-li z dostatečně malé vzdálenosti (méně než 1 metr), dokáže poskytnout informace o zdroji s detailem, který bychom očekávali spíše u metod holografie.

Pokud rozlišení metody závisí na vzdálenosti mikrofonního pole od zdroje hluku, frekvenční rozsah poté na rozestavení mikrofonů v poli. Pro užití pole byla dolním frekvenčním limitem hodnota 1 kHz.

Velkým přikvapením bylo odhalení schopnosti beamformingu měření nejen dějů stacionárních, ale i transientních. Tato vlastnost nebyla v literatuře nikde zmíněna, ale přináší širokou řadu možných uplatnění.

Práce s metodou STSF byla stejně jako beamforming uživatelsky velice příjemná. Jediný rozdíl mezi přípravou těchto dvou metod byla pozice mikrofonního pole, kdy z důvodu zachycení evanescentních vln musí být pro holografii pole dostatečně blízko zdroje hluku (řádově jednotky centimetrů). Tento požadavek na pozici může vést k nutnosti demontáže při měření špatně dostupných částech větších strojů. Je-li však měření provedeno, výsledkem je akustická mapa ve vysokém rozlišení. To je stejně jako u beamformingu závislé na tvaru mikrofonního pole a rozestupu mikrofonů. Obdobné je také frekvenční omezení metody. S 36 kanálovým polem byla horní limitní frekvence přibližně 1 kHz.

Zcela nejvíce očekávaným přínosem byla možnost měření transientních dějů pomocí aplikované TDH, neboli NS-STSF. Tato metoda umožňuje detailní popis zkoumaného zvukového pole v interakci nejen s polohou a frekvencí ale i s časem, a tím lze zaznamenat i krátce trvající děje, které by mohli být u stacionárních metod ztraceny během průměrování.

Pro tuto metodu je zapotřebí referenčního signálu, který bude poskytovat informaci o stavu zkoumaného objektu. Během našeho měření jsme použili tachometru pro zjištění natočení klikového hřídele. Nastavení sondy vyžaduje hlubší znalost struktury programu PULSE LabShop, a je tedy vhodné uložit si nastavení jako šablonu pro příští měření.

Rozlišení, frekvenční rozsah a použitelnost metody NS-STSF je shodné s podmínkami pro prostorovou transformaci zvukových polí.

Značnou pomocí při zpracování dat je program určen speciálně pro post-processing dat naměřených pomocí mikrofonních polí. Díky tomuto softwaru si uživatel s lehkostí nechá vykreslit libovolnou akustickou mapu dle polohy a frekvence, aniž by byl nucen snímek jakkoliv manuálně upravovat.

Během vypracovávání této diplomové práce byly splněny všechny stanovené cíle. Bylo sepsáno porovnání všech zkoumaných metod a provedeno pojednání o jejich vhodnosti, respektive podmínkách využití.

Pro každou z metod bylo provedeno několik demonstračních měření na stejném zdroji hluku, přičemž v diplomové práci je vždy uvedeno pouze jedno měření, jelikož cílem bylo hodnocení metod a nikoliv provedení analýzy motoru ROBIN EH34. Výsledkem prováděných demonstračních měření jsou nejen naměřená data, ale též vytvořené šablony, které usnadní spolu s touto průvodní zprávou nadcházející měření. Šablony budou uvedeny na CD jako příloha diplomové práce.

**8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**

- [1] MIŠUN, V. *Vibrace a hluk*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2005. 177 s. ISBN: 80-214-3060-5
- [2] PULSE Analyzers & Solutions: Product Catalogue, Version 19a. BRÜEL & KJÆR. Spectris Praha: PULSE - přehled [online]. 19a. 2009 [cit. 2011-12-08]. Dostupné z: <http://www.e-pages.dk/bruel/80/>
- [3] BATEL, Mehdi, Marc MARROQUIN, Jørgen HALD, Jacob J. CHRISTENSEN, Andreas P. SCHUHMACHER a Torben G. NIELSEN. BRÜEL & KJÆR NORTH AMERICA, Inc., Norcross, Georgia and Brüel & Kjær, Denmark. Noise Source Location Techniques: Simple to Advanced Applications. 2003. Dostupné z: [www.sandv.com/downloads/0303bate.pdf](http://www.sandv.com/downloads/0303bate.pdf)
- [4] HALD, Jørgen. BRÜEL & KJÆR SOUND & VIBRATION MEASUREMENT A/S, Nærum, Denmark. Time Domain Acoustical Holography and Its Applications. 2001.
- [5] BRÜEL & KJÆR. PULSE Array-based Noise Source Identification Solutions: Beamforming — Type 8608, Acoustic Holography — Type 8607, and Spherical Beamforming — Type 8606. 2011. Dostupné z: <http://www.bksv.com/doc/bp2144.pdf>
- [6] BRÜEL & KJÆR. TECHNICAL REVIEW: Beamforming. 2004. Dostupné z: <http://www.bksv.com/doc/bv0056.pdf>
- [7] KREIDL, Marcel. Technická diagnostika: senzory, metody, analýza signálu. 1. vyd. Praha: BEN, 2006, 406 s. ISBN 80-730-0158-6.
- [8] BRÜEL & KJÆR, Denmark. Sound Intensity. 2850 Nærum, Denmark, 1993. Dostupné z: <http://www.engr.sjsu.edu/bjfurman/courses/ME120/me120pdf/SoundIntensity.pdf>
- [9] I-Track: I-Track-Sound-Intensity-Mapping. Soft dB [online]. 2010-10-13 [cit. 2012-04-22]. Dostupné z: [http://www.softdb.com/\\_files/\\_acoustic-division/I-Track/I-Track-Sound-Intensity-Mapping.pdf](http://www.softdb.com/_files/_acoustic-division/I-Track/I-Track-Sound-Intensity-Mapping.pdf)
- [10] BROTHANEK, M. a kol.. Měření akustického výkonu pomocí akustické intensity. . FEL-ČVUT. Otevřená věda [online]. 2008 [cit. 2012-01-10]. Dostupné z: [http://archiv.otevrena-veda.cz/users/Image/default/C1Kurzy/Fyzika/22\\_brothanekc.pdf](http://archiv.otevrena-veda.cz/users/Image/default/C1Kurzy/Fyzika/22_brothanekc.pdf)

## 9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

---

NAH	–	Near-field Acoustic Holography
SONAH	–	Statistically Optimal Near-field Acoustic Holography
TDH	–	Time Domain Holography
STSF	–	Spatial Transformation of Sound Fileds
NS-STSF	–	Non Stationary Spatial Transformation of Sound Fileds
FFT	–	Fast Fourier Transformation
RPM	–	Revolution Per Minute
CPB	–	Constant Percentage Bandwidth
USB	–	Universal Seríál Bus
TEDS	–	Transducer Electronic Data Sheet