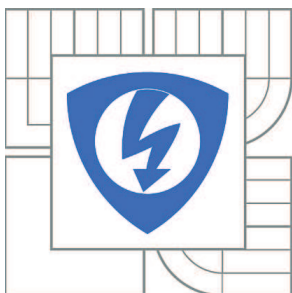


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

MĚŘENÍ AKUSTICKÉ INTENZITY

SOUND INTENSITY MEASUREMENT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

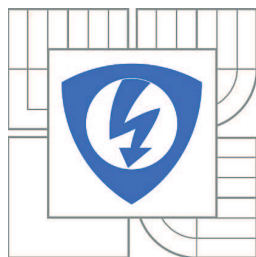
TOMÁŠ BÁRTA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ZDENĚK HAVRÁNEK, Ph.D.

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Automatizační a měřicí technika

Student: Tomáš Bárta

ID: 147415

Ročník: 3

Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Měření akustické intenzity

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je navrhnout a realizovat měřicí systém pro měření akustické intenzity a kalibraci intenzitní sondy. Zadání lze shrnout do následujících bodů:

- 1) Zpracujte rešerši metod měření akustické intenzity, detailněji se věnujte metodě využívající dva tlakové mikrofony. Definujte hlavní zdroje chyb a popište způsoby kalibrace intenzitní sondy.
- 2) Vypracujte přehled hardwarového vybavení dostupného v laboratoři pro měření akustické intenzity včetně kalibrátorů určených pro ověření dynamických parametrů intenzitní sondy.
- 3) Teoretickým výpočtem a experimentálně určete index zbytkové intenzity sondy G.R.A.S. 50AI a vliv fázové chyby dostupných měřicích karet od firmy National Instruments na hodnotu zbytkové intenzity.
- 4) Sestavte měřicí zařízení s vybranou měřicí kartou pro měření akustické intenzity a vytvořte aplikaci v prostředí LabVIEW pro kalibraci intenzitní sondy (ak. tlak, ak. intenzita, index zbytkové intenzity) a obecné měření akustické intenzity zdrojů zvuku.
- 5) Experimentálně ověřte správnost implementovaných algoritmů pro kalibraci sondy a demonstруйте funkčnost celého měřicího systému na vhodně zvoleném testovacím zdroji zvuku.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Škvor, Z. Elektroakustika a akustika. 1. vydání, 574 s. ČVUT Praha, 2012. ISBN 978-80-01-05034-7.
[2] Rossing, T. D. Springer Handbook of Acoustics. 1182 s. Springer New York, 2007. ISBN 978-0-387-30446-5.

Termín zadání: 10.2.2014

Termín odevzdání: 26.5.2014

Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Havránek, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato práce se zabývá teoretickým průzkumem metod měření akustické intenzity, zvláště pak metodou p-p, pro kterou bylo dostupné vybavení od firmy G.R.A.S. a National Instruments, porovnáním katalogových hodnot měřicích karet National Instruments a zjištěním jejich vhodnosti pro měření akustické intenzity. Dále je zde popsán postup pro kalibraci měřicí sondy.

Software pro měření parametrů sondy, měřicích karet a konečná aplikace pro měření akustické intenzity byla vyvíjena v prostředí LabVIEW.

Pro ověření použitých algoritmů byl proveden experiment s reproduktorem v uzavřené a otevřené ozvučnici, kdy se měřil vyzářený akustický výkon.

Klíčová slova

Akustická intenzita, kalibrace sondy, měření akustické intenzity, akustický tlak, p-p, p-u, akustická rychlost, akustický výkon

Abstract

This thesis deals with the theoretical exploration of sound intensity measurement methods, especially p-p method, for which was available equipment from G.R.A.S. and National Instruments, comparing the catalog values of measurement cards and determining their suitability for the measurement of sound intensity. Furthermore there is described the procedure of calibration sound intensity probe.

The software for measurement parameters of intensity probe, measurements cards and final application for measuring sound intensity was developed in LabVIEW.

To verify used algorithm was executed experiment with speaker in closed and open baffle, when the radiated sound power was measured.

Keywords

Sound intensity, probe calibration, sound intensity measurement, sound pressure, p-p, p-u, particle velocity, sound power

Bibliografická citace:

BÁRTA, T. *Měření akustické intenzity*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 52s. Vedoucí bakalářské práce byl Ing. Zdeněk Havránek, Ph.D.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Měření akustické intenzity jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **26. května 2014**

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Zdeňku Havránkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: **26.5.2014**

.....
podpis autora

OBSAH

1	Úvod.....	4
2	Metody měření akustické intenzity	5
2.1	Metoda p-p	5
2.1.1	Zdroje chyb v měření akustické intenzity p-p systémem.....	6
2.1.2	Chyba konečného rozdílu.....	7
2.1.3	Rozptyl a difrakce	8
2.1.4	Chyba fáze.....	8
2.1.5	Ostatní zdroje chyb	12
2.1.6	Kalibrace p-p měřicího systému.....	13
2.2	Metoda p-u	15
3	Dostupné hardwarové vybavení pro měření akustické intenzity.....	17
3.1	Intenzitní sonda G.R.A.S. Type 50AI - B.....	18
3.2	Mikrofonní pár G.R.A.S. pro měření akustické intenzity typ 40AK	19
3.3	Napájecí modul G.R.A.S. typ 12AB pro mikrofonní sondu	20
3.4	Kalibrátor akustické intenzity G.R.A.S. typ 51AB	21
3.5	Pistonfon G.R.A.S. typ 42AP.....	23
4	Postup při měření akustické intenzity.....	25
4.1	Teoretický výpočet zbytkové intenzity měřicí sondy	25
4.2	Experimentální zjištění zbytkové intenzity (indexu δ_{pl}).....	25
4.2.1	Zjištění δ_{pl} měřicí karty	25
4.2.2	Zjištění citlivosti mikrofonů.....	27
4.2.3	Zjištění δ_{pl} měřicí soustavy pomocí pistonfonu	28
4.2.4	Zjištění δ_{pl} pomocí kalibrátoru G.R.A.S. 51AB.....	29
4.2.5	Zjištění akustické intenzity	32
4.3	Opakovatelnost měření.....	34
5	Měření akustického výkonu reproduktoru v otevřené a uzavřené ozvučnici	36
6	Zhodnocení měření.....	43
7	Závěr.....	44
8	Literatura	45
9	Přílohy	46
9.1	Obrazová dokumentace z měření	46
9.2	Odevzdávané součásti práce na přiloženém CD:	48

1 ÚVOD

Měření akustické intenzity v nelaboratorních podmínkách je zatím vcelku mladá vědní disciplína, která se začala řádně vyvíjet až v roce 1980. Akustickou intenzitu měříme z několika důvodů. Jedním z nich je zjišťování zdrojů „hluku“. Měřením akustické intenzity bychom měli být schopni diagnostikovat např. opotřebení ložisek různých strojů a jiných mechanických částí.

Dalším důvodem, proč měříme akustickou intenzitu, je zjišťování vyzařování akustického výkonu strojů, případně možná vizualizace zvukových polí.

S údajem o akustické intenzitě se téměř každý setkává v běžném životě. Např. při koupi ledničky nás bude zajímat její vyzařovaný akustický výkon při běhu, aby nás nerušila v domácnosti. Dalším zbožím, kde se setkáváme s údajem o „hlučnosti“ jsou např. pneumatiky u automobilů, kde podle nových nařízení každý výrobce musí udávat hlučnost pneumatiky v dB za daných podmínek. Příkladů by se jistě našlo mnoho, ale nyní se přesuneme k možným metodám měření akustické intenzity.

Náplní této práce je seznámení se s metodami měření akustické intenzity. Hlavní zaměření bude na metodu p-p, kdy pomocí měřicího a kalibračního softwaru vytvořeného v prostředí LabVIEW, je uživatel schopen kalibrovat měřicí sondu a zjistit vhodnost použité měřicí karty pro měření akustické intenzity určením zbytkové intenzity měřicího systému. Uživatel je schopen pomocí vytvořené kalibrační aplikace a údajů z pistonfonu zjistit citlivost neznámých mikrofonů, které chce použít pro měření akustické intenzity, jejich zbytkový index a dle norem vyhodnotit, zda vyhoví k měření či ne.

2 METODY MĚŘENÍ AKUSTICKÉ INTENZITY

Měření akustické intenzity zahrnuje stanovení akustického tlaku a akustické rychlosti současně v daném bodě. V základním případě jsou zapotřebí buď dva tlakové mikrofony pro měření akustického tlaku, nebo dva snímače akustické rychlosti. Případně se akustická intenzita nechá zjistit i kombinací těchto dvou snímačů, tedy kombinací tlakového mikrofону a snímače akustické rychlosti. Snímači založenému na posledním zmiňovaném principu říkáme „Microflown“. Ke zjištění akustické intenzity můžeme dojít třemi způsoby: [1]

První způsob umožňuje zjištění akustické rychlosti z konečného rozdílu aproximace tlakového gradientu při použití dvou u sebe blízko umístěných tlakových mikrofónů. Použijeme průměrnou hodnotu signálů z mikrofónů jako akustický tlak. (p-p metoda)

Druhý způsob kombinuje způsob s použitím tlakového mikrofónu a snímače akustické rychlosti. (p-u metoda) [1]

Třetí způsob udává akustickou intenzitu z aproximace konečného rozdílu divergence akustické rychlosti. (u-u metoda) [1]

První z těchto metod je nejzavedenější. Druhá metoda byla omezena absencí dostatečně kvalitních snímačů akustické rychlosti, ale s příchodem Microflownu na trh je p-u metoda vhodná k podrobnějšímu zkoumání. Třetí metoda, která zahrnuje tři vybrané páry snímačů akustické rychlosti, nikdy nebyla použita na vzduchu a je zde zmíněná pouze pro úplnost. [1]

2.1 Metoda p-p

P-p metoda založená na použití dvou blízko uložených tlakových mikrofónů dominuje měření akustické intenzity již více než 25 let. Tato metoda založená na aproximaci konečným rozdílem závisí na gradientu akustického tlaku. Úspěch této metody je založen na faktu, že kondenzátorové mikrofony jsou mnohem stabilnější a spolehlivější než jakékoli jiné akustické snímače. [1]

Dva tlakové mikrofony jsou umístěné blízko sebe. Složka akustické rychlosti ve směru osy k mikrofónům ve vzdálenosti r je získána z Eulerova vztahu:

$$\frac{\partial p(t)}{\partial r} + \rho \frac{\partial u_r(t)}{\partial t} = 0 \quad (2.1.0)$$

Tlakový gradient je získán aproximací z konečného rozdílu, tudíž akustická rychlost je definována jako:

$$\hat{u}_r(t) = -\frac{1}{\rho} \int_{-\infty}^t \frac{p_2(\tau) - p_1(\tau)}{\Delta r} d\tau \quad (2.1.1)$$

p_1 a p_2 jsou signály z dvojice mikrofonů, Δr je vzdálenost mikrofonů a τ je fiktivní časová proměnná. Stříška označuje, že výsledek je aproximací skutečné akustické rychlosti.

Akustický tlak uprostřed sondy je dán vztahem:

$$\hat{p}(t) = \frac{p_1(t) + p_2(t)}{2} \quad (2.1.2)$$

Akustická intenzita ve vzdálenosti r je dána vztahem:

$$\hat{I}_r = \langle \hat{p}(t) \hat{u}_r(t) \rangle_t = \left\langle \frac{p_1(t) + p_2(t)}{2} \int_{-\infty}^t \frac{p_2(\tau) - p_1(\tau)}{\rho \Delta r} d\tau \right\rangle_t \quad (2.1.3)$$

Některé analyzátoři akustické intenzity používají k měření intenzity akustická pásma (obvykle 1/3 oktávová pásma). Jiné typy vypočítávají intenzitu z imaginární části vzájemných spekter dvou mikrofonních signálů.

$$\hat{I}_r(\omega) = -\frac{1}{\omega \rho \Delta r} \text{Im}[S_{12}(\omega)] \quad (2.1.4)$$

Vyjádření ve frekvenční oblasti je ekvivalentní k vyjádření v časové oblasti a dává stejný výsledek za předpokladu, že je spektrum intenzity integrováno přes uvažovaný kmitočtový rozsah.

Frekvenční vyjádření umožňuje vyjádřit akustickou intenzitu pomocí dvoukanálového FFT analyzátoru. [1]

Nejčastější umístění mikrofonů je čely k sobě, ale občas se též používá umístění vedle sebe. Poslední jmenované umístění má výhodu, že membrány mikrofonů mohou být umístěné velmi blízko zdroji vyzařování. Výhodou druhé varianty je, že membrány mikrofonů mohou být umístěné velmi blízko zdroji vyzařování. Nevýhodou je, že se mikrofony navzájem akusticky ruší mnohem víc, než v jakékoli jiné konfiguraci. Při měření na vysokých frekvencích je dokonalejší metoda s čely k sobě. [1]

2.1.1 Zdroje chyb v měření akustické intenzity p-p systémem

Je mnohem obtížnější měřit akustickou intenzitu než akustický tlak, a překvapivě velká část literatury o akustické intenzitě je spojena s identifikací a studiem zdrojů

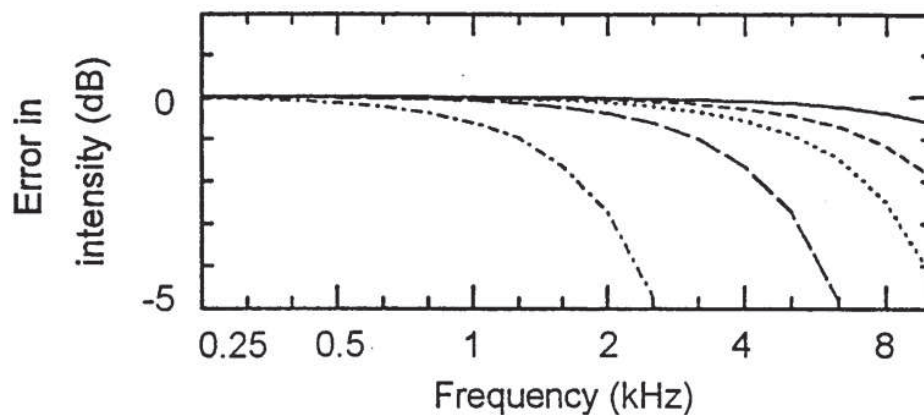
chyb. V měření akustické intenzity spatřujeme několik problému, mezi něž patří v první řadě studované zvukové pole. Někdy taková měření nejsou tolik obtížná, ale za určitých podmínek může i malá nepřesnost měřicího vybavení mít významný vliv na výsledky. Další komplikací je to, že malé lokální chyby mohou někdy narůst do velkých globálních chyb, když je intenzita integrována přes uzavřenou plochu. V neposlední řadě dochází k problému v rozložení akustické intenzity v blízkém poli zdroje zvuku. Často je rozložení akustické intenzity mnohem komplikovanější než rozložení akustického tlaku, což značí to, že zvuková pole mohou být mnohem složitější, než se původně myslelo. Problémy se promítají do poměrně komplikovaných mezinárodních a národních standardů pro určování akustického záření za použití akustické intenzity. ISO 9614-1, ISO 9614-2, ISO 9614-3 a ANSI S12.12.

Nejdůležitějším omezením systému měření akustické intenzity založeného na metodě p-p jsou chyby způsobené aproximací konečného rozdílu, rozptylem a ohybem a přístrojovým fázovým rozdílem. [1]

2.1.2 Chyba konečného rozdílu

Přesnost aproximace konečného rozdílu obvykle závisí na vzdálenosti měřících mikrofonů a vlnové délce.

$$\hat{I}_r/I_r = \frac{\sin k\Delta r}{k\Delta r} \quad (2.1.2.0)$$

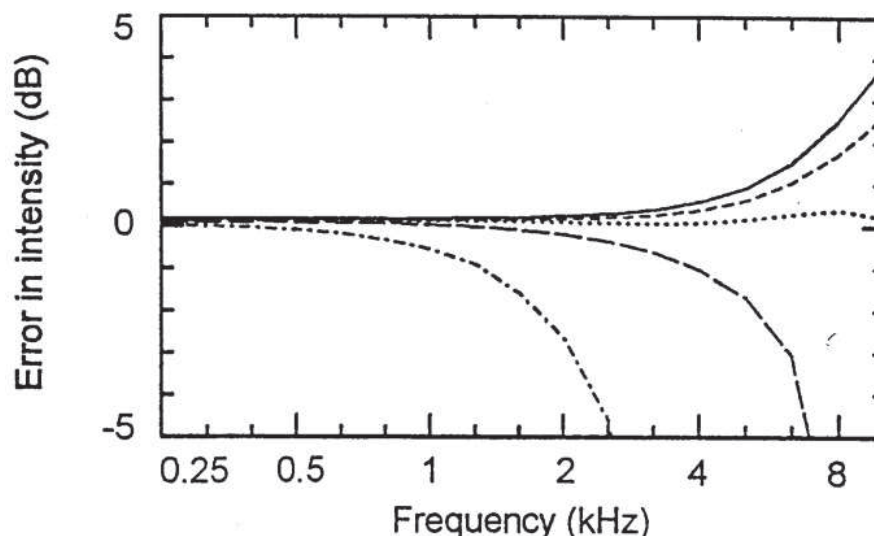


Graf 1: Chyba konečného rozdílu pro různé vzdálenosti mikrofonů měřicí sondy (5mm, 8.5mm, 12mm, 20mm, 50mm)[2]

Vztah (2.1.2.0) je zobrazen v Graf 1, který zobrazuje akustickou intenzitu pro různé vzdálenosti měřících mikrofonů. Horní mezní kmitočet pro p-p měřicí sondu uvažujeme takový, kdy je chyba konečného rozdílu přijatelně malá. Pro vzdálenost mikrofonů $r = 12\text{mm}$ je například horní mezní kmitočet 5kHz. [1]

2.1.3 Rozptyl a difrakce

Je evidentní, že rozptyl a difrakce závisí na rozmístění měřicích mikrofonů. Jsou možná různá rozmístění mikrofonů, ale v 80. letech bylo experimentálně dokázáno, že použití konfigurace s čely k sobě s pevnou distanční vložkou je částečně nejvýhodnější. O 15 let později bylo objeveno, že efekt rozptylu a difrakce v kombinaci s rezonancí v malé dutině mezi distanční vložkou a membránou samotného mikrofonu nejenže zmenšuje chybu konečného rozdílu, ale skutečně pro určitou délku distanční vložky tento efekt téměř dokonale zruší. Viz Graf 2. Praktická zkušenost je tedy taková, že při uspořádání 1/2“ mikrofonů s čely k sobě je horní mezní kmitočet při použití 12mm distanční vložky o oktávu vyšší (je tedy 10kHz), než jsme určili z chyby aproximace konečného rozdílu. Kombinace 1/2“ mikrofonů a 12mm vložky se nyní pokládá za optimální. Při zaměření na nižší kmitočty lze používat i delší distanční vložky. Avšak při použití delší vložky nastane rezonance mezi 1/2“ mikrofony dříve, čímž se nám velmi omezí horní mezní kmitočet. Např. při použití 50mm vložky se nám horní mezní kmitočet posune na cca 1,2kHz. [1]



Graf 2: Chyba sondy akustické intenzity pro různé velikosti distanční vložky. Tečkovaný průběh je pro 12mm vložku, která je nejpoužívanější.[2]

2.1.4 Chyba fáze

Dokud není měření fázově vykompenzované, tak nelze dosáhnout kvalitního výsledku měření. Nejmodernější mikrofony mají fázový posun do frekvence 250Hz maximálně 0,05°. Fázový posun pak proporcionálně roste, tedy při 1kHz je 0,2°. Úměrnost chyby fáze na frekvenci je způsobená tím, že měřicí mikrofony mají různou rezonanční frekvenci a dále také tlumením mezi mikrofony. [1]

Chyba fáze mezi dvěma měřicími kanály je mnohem závažnější chybou, se kterou se při měření p-p metodou setkáváme. I s nejmodernějšími prostředky je tato chyba

nezanedbatelná. Můžeme dokázat, že i malá chyba fáze může velmi zvýšit chybu měření. Viz vztah:

$$\hat{I}_r \cong I_r - \frac{\varphi_{PE}}{k\Delta r} * \frac{p_{rms}^2}{\rho c} = I_r \left(1 - \frac{\varphi_{PE}}{k\Delta r} * \frac{p_{rms}^2 / \rho c}{I_r} \right) \quad (2.1.4.0)$$

kde I_r je skutečná hodnota akustické intenzity nezatížená chybou fáze. Tento vztah zobrazuje, že efekt chyby fáze je inverzně závislý na frekvenci a vzdálenosti mikrofonů. Chyba fáze je závislá na poměru měřeného tlaku p^2 ke skutečné intenzitě. Jestliže tento poměr, který je v logaritmickém měřítku znám jako intenzitní index, je velký, řekněme více než 10dB, tak skutečný fázový rozdíl mezi dvěma tlaky ve zvukovém poli je malý a i malá chyba fáze, zmíněná výše, zvýší velikost chyby měření. [1]

Graf 3 zobrazuje pozitivní chybu fáze $0,3^\circ$ rovinné vlny axiálního působení, vypočítané pro různé velikosti distančních vložek. Je zřejmé, že velké podcenění chyb se projeví na nízkých kmitočtech. [1]

Avšak stále největší chyby nastávají tehdy, když je poměr mezi kvadrátem akustického tlaku a akustickou intenzitou větší než 1, což je velmi pravděpodobné při měření v bezodrazové komoře. Je třeba také poznamenat, že je velmi nepravděpodobné, aby fázová chyba byla frekvenčně nezávislá.

V neposlední řadě stojí za zmínku, že nejmodernější mikrofonní dvojice jsou mnohem lépe sfázované než $0,3^\circ$. [1]

Zaměříme se na vztah (2.1.4.0) o chybě fáze. Tento vztah zobrazuje, že jednoduchou reverzací p-p měřicí sondy je možné eliminovat vliv fázového posunu. Intenzita změní znaménko, ale chyba zůstane stejná. Bohužel většina měřicích sond není symetrická, a proto nejsou vhodné pro měření s reverzací sondy. [1]

Poměr mezi chybou fáze a součinem frekvence a vzdálenosti mikrofonů můžeme změřit vystavením mikrofonů stejnému tlaku. Tento zjištěný parametr nazýváme tzv. P-I zbytkovým indexem. Zbytková intenzita je falešná intenzita, která vzniká v měřicí soustavě, když jsou mikrofony vystaveny stejnému tlaku p_0 , např. v malé komoře s řízeným širokopásmovým zdrojem tlaku. Když tedy působíme na dva mikrofony stejným tlakem (co do velikosti amplitudy i fáze), skutečná intenzita je nulová. Zbytkovou intenzitu pak vypočítáme ze vztahu:

$$I_0 = - \frac{\varphi_{PE}}{k\Delta r} * \frac{p_0^2}{\rho c} \quad (2.1.4.1)$$

Zbytková intenzita by měla být pokud možno co nejmenší. Za těchto podmínek pak dostáváme vztah:

$$\hat{I}_r = I_r + \left(\frac{I_0}{p_0^2}\right) p_{rms}^2 = I_r \left(1 + \frac{I_0}{p_0^2/\rho c} \frac{p_{rms}^2/\rho c}{I_r}\right) \quad (2.1.4.2)$$

Následující vztah plynoucí z předchozího vztahu má výhodu ve vyjádření chyby z dostupné odhadované intenzity. [1]

$$\hat{I}_r = I_r \left(1 - \frac{I_0}{p_0^2/\rho c} \frac{p_{rms}^2/\rho c}{\hat{I}_r}\right)^{-1} \quad (2.1.4.3)$$

Index zbytkové intenzity měřicího systému můžeme změřit jednou a pak ho příležitostně kontrolovat. Jeho kombinací s p - I indexem aktuálního měření můžeme odhadnout vzniklou chybu měření. Některé analyzátory jsou schopné generovat upozornění, pokud je fázová chyba větší než specifikovaná hodnota. Závislost chyby zmíněné ve vztahu (2.1.4.3) je menší než $\pm 10 \log(1 \pm 10^{-K/10})$ dB, jestliže p - I index měření δ_{pI} je menší než index zbytkové intenzity δ_{pI0} zmenšený o korekci K . Pak nám vyjde tento vztah:

$$\delta_{pI} = 10 \log\left(\frac{p_{rms}^2/\rho c}{|I_r|}\right) < \delta_{pI0} - K \quad (2.1.4.4)$$

$$\delta_{pI} = 10 \log\left(\frac{p_0^2/\rho c}{|I_0|}\right) - K \quad (2.1.4.5)$$

Se zvětšující se hodnotou korekce K roste požadavek na menší maximální chybu (způsobenou fázovou odchylkou) a vyšší a omezenější měřicí rozsah. Záporná zbytková intenzita, která vede k podhodnocení kladné složky intenzity, způsobuje větší chyby (vyjádřeno v decibelech) než kladná zbytková intenzita, která vede k nadhodnocení kladné složky intenzity, za předpokladu, že chyba není malá.

Korekce o hodnotě 7 dB odpovídá chybě měření, způsobené fázovou odchylkou, menší než 1 dB (obvyklá přesnost) a korekce o velikosti 10 dB odpovídá chybě měření menší než 0,5 dB (inženýrská přesnost). Tyto hodnoty odpovídají fázové chybě zařízení, která je 5-10 krát menší než aktuální fázový úhel ve zvukovém poli. Velikost $\delta_{pI0} - K$ je známá jako dynamická kapacita měřicího systému. [1]

Mnoho aplikací měření akustické intenzity vyžaduje integraci normálových složek přes plochu. Celkové tvary rovnic (2.1.4.2) a (2.1.4.3) je možné získat integrací normálové složky intenzity přes plochu, která obklopuje zdroj. Výsledkem je vztah:

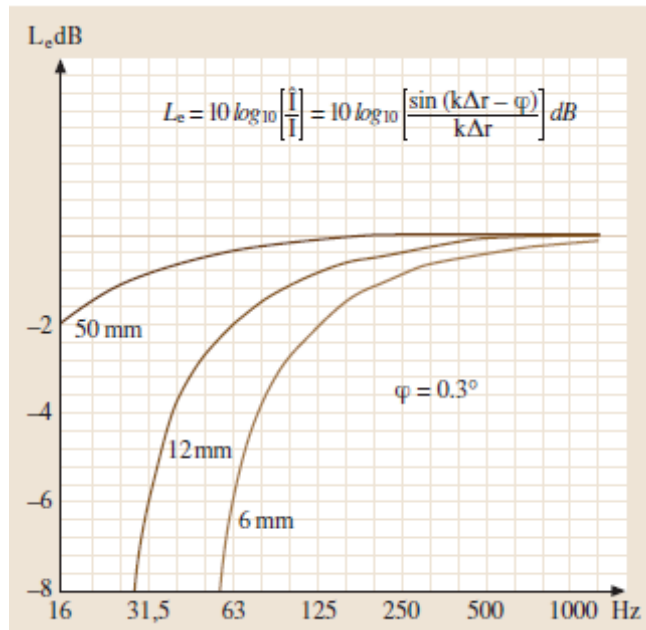
$$\hat{P}_a = \int_S \hat{I} dS$$

$$\begin{aligned}
\hat{P}_a &\cong P_a \left(1 - \frac{\varphi_{PE} \int_S (p_{rms}^2 / \rho c) dS}{k \Delta r \int_S I dS} \right) \\
&= P_a \left(1 + \frac{I_0 \rho c \int_S (p_{rms}^2 / \rho c) dS}{p_0^2 \int_S I dS} \right) \\
&= P_a \left(1 - \frac{I_0 \rho c \int_S (p_{rms}^2 / \rho c) dS}{p_0^2 \int_S I dS} \right)^{-1}
\end{aligned} \tag{2.1.4.6}$$

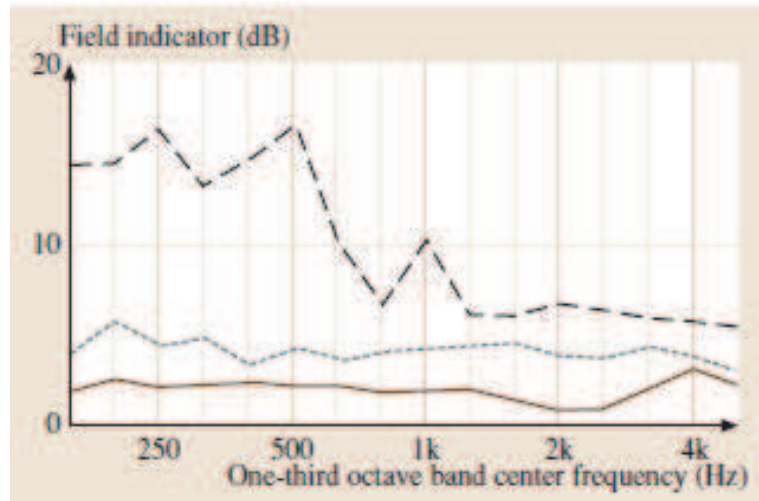
Kde P_a je skutečný akustický výkon zdroje zvuku uvnitř plochy.

Podmínka vyjádřená vztahem (2.1.4.4) je stále platná, ačkoli p-I index nyní v sobě zahrnuje průměrování přes měřenou plochu.[1]

Zdroje vně měřicí plochy nepřispívají k hodnotě plošného integrálu skutečné intenzity (jmenovatel druhého členu na pravé straně rovnice (2.1.4.6)), ale neproměnně zvyšují hodnotu plošného integrálu středního kvadratického tlaku (čitatel druhého členu), jak je ukázáno v grafu 4. Z toho vyplývá, že každá, i velmi malá chyba fáze klade požadavky na množství vnějšího hluku, které může být tolerováno při měření akustického výkonu pomocí p-p měřicích systémů akustické intenzity.[1]



Graf 3: Chyba způsobená fázovou odchylkou 0.3° pro různé velikosti vzdálených vložek [1]



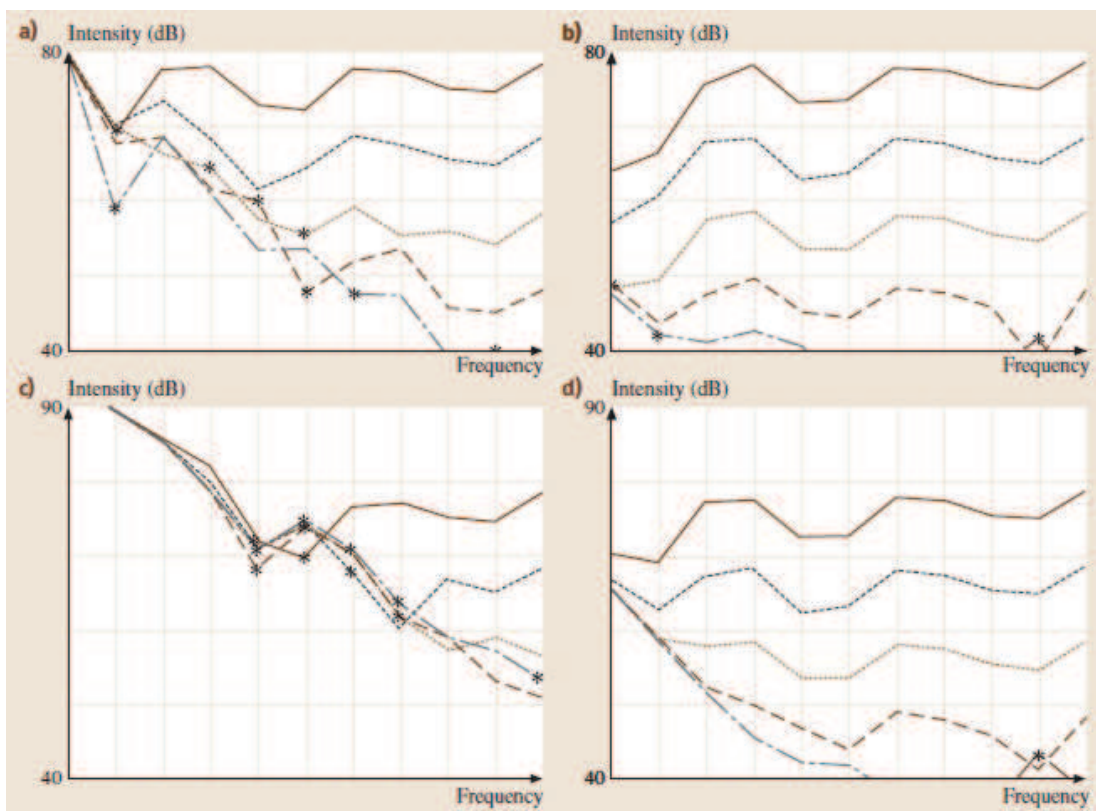
Graf 4: p-I index na povrchu, obklopujícího zdroj zvuku, definovaného třemi způsoby: plná křivka - přiměřená plocha, čárkovaná křivka - neobvyklá plocha, dlouhá čárkovaná křivka - měření se silným okolním rušením na nízkých kmitočtech[1]

2.1.5 Ostatní zdroje chyb

Může být složité ochránit měřicí sondu před prouděním vzduchu, například při měření akustické intenzity v blízkosti klimatizačních zařízení. Z tohoto plyne, že p-p měřicí princip se nehodí pro měření v každé situaci. Praxe nám ukazuje, že při měření ve větru s rychlostí proudění větší než 10m/s dochází k nezanedbatelné chybě měření. Dalším skutečným problémem jsou turbulentní proudění, která produkují velmi nízké frekvence. Tyto turbulence „kontaminují“ měřený signál z mikrofonů, což samozřejmě není žádoucí. Tento problém nastává hlavně při frekvencích nižších než 200Hz. Nechá se vyřešit při použití delší distanční vložky, ale mnohem účinnější je použití větrné clony. Chování sondy s použitím větrné clony zobrazuje Graf 5. Větrná clona velmi zvýší chybu na nízkých frekvencích při měření ve velmi „pohyblivých“ zvukových polích díky ztrátám v molitanu, jež popisuje modifikovaná Eulerova pohybová rovnice. Měli bychom se vyhnout měření s větrnou clonou velmi blízko zdroje zvuku.

Konečný čas průměrování použitý u každého měření způsobuje náhodnou chybu. Tato chyba bývá obvykle větší při měření akustické intenzity, než při měření akustického tlaku – často mnohem větší. Proto pro zachování stejné náhodné chyby jako u měření akustického tlaku je obvykle nutné použít delší čas průměrování. Mnoho aplikací měření akustické intenzity sice obsahuje integrování přes měřenou plochu, ale je to celkový čas průměrování, který je rozhodující.

Dalším zdrojem chyb je samotný šum z mikrofonů a obvodů předzesilovače. Avšak moderní 1/2“ mikrofony mají vlastní šum tak malý, že problémy mohou nastat pouze při měření velmi malých úrovní akustické intenzity. Díky šumu narůstá i náhodná chyba spojená s konečným časem průměrování na nízkých frekvencích. Z toho plyne, že díky těmto náhodným chybám je velmi špatná nebo nemožná opakovatelnost měření.[1]



Graf 5: Měřeno 60 cm od reproduktoru s ventilátorem v měřicí poloze produkujícím vítr o rychlosti 4m/s. Horní grafy - 50mm vložka, dolní grafy 12mm vložka. Vlevo umístěné grafy - bez větrné clony, vpravo umístěné grafy - s větrnou clonou. Nominální hodnota akustického výkonu zdroje: 100db – plná křivka, 90dB – čárkovaná křivka, 80dB - tečkovaná křivka, 70dB – dlouze čárkovaná křivka, 60dB – čerchovaná křivka[1]

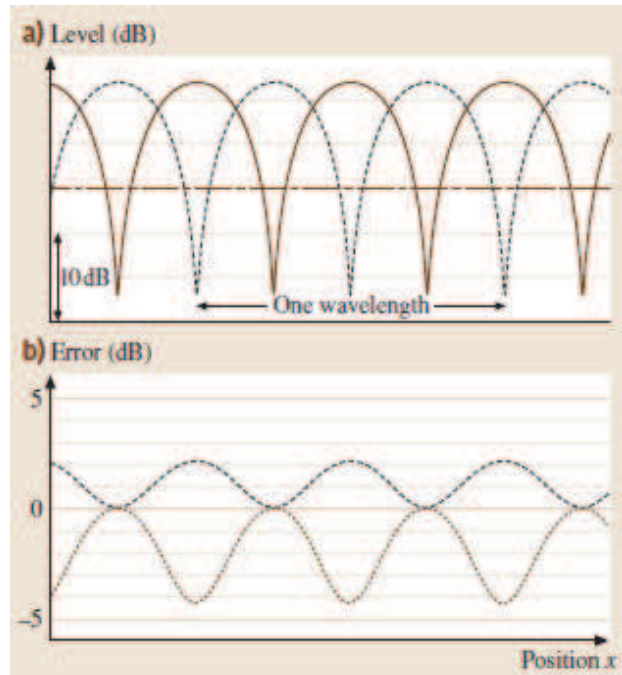
2.1.6 Kalibrace p-p měřicího systému

Kalibrace p-p měřicího systému je vcelku jasná: dva tlakové mikrofony jsou kalibrovány v pistonfonu s instalovaným nástavcem pro kalibraci mikrofonního páru. Zbytková intenzita značně ovlivňuje fázovou chybu, proto IEC normy pro měřicí přípravky akustické intenzity specifikují minimální hodnotu zbytkové intenzity akceptovatelnou jak pro měřicí sondu, tak pro měřicí kartu. V závislosti na výsledku testu jsou klasifikovány buď jako třída 1 nebo třída 2. Test zahrnuje vystavení dvou mikrofonů měřicí sondy stejnému akustickému tlaku v malém prostoru, kde na ně působí širokopásmový zdroj šumu. Podobně testujeme měřicí kartu. Na vstupy měřicí karty přivedeme totožný signál, abychom ověřili její vlastnosti. Kmitočtová charakteristika sondy pro akustický tlak i intenzitu může být také testována rovinnou vlnou a směrová charakteristika sondy musí odpovídat ideální kosinové větě v zadané toleranci. [1]

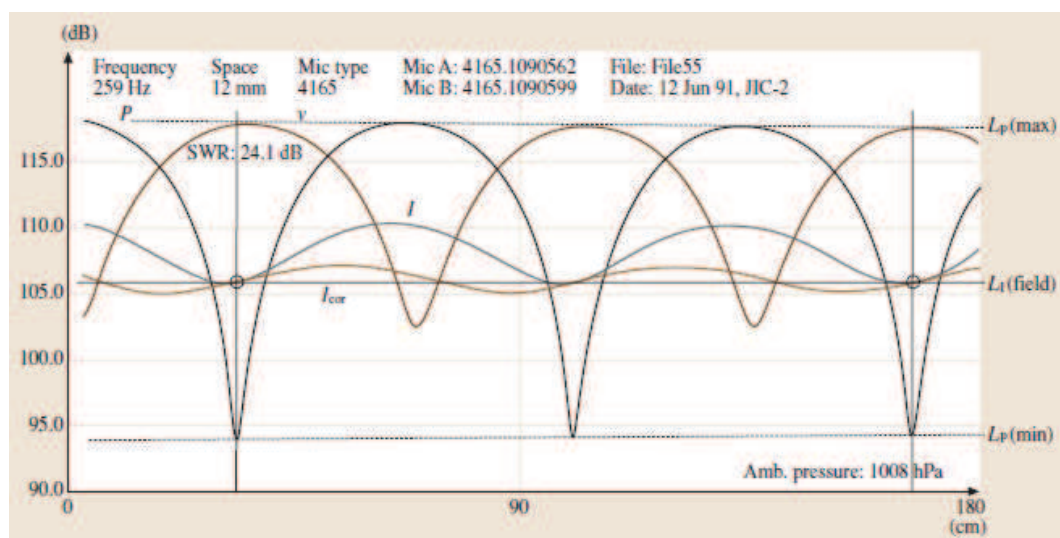
V souladu se dvěma normami je požadován speciální test ve frekvenčním rozsahu do 400Hz. Intenzitní sonda je vystavena stojatému vlnění uvnitř trubky se specifickou hodnotou stojatého vlnění (pro zařízení třídy 1 je tato hodnota 24dB). Když je intenzitní sonda tažena skrz toto interferenční pole, tak intenzita indikovaná měřicím systémem musí být v daných mezích.

Graf 6 zobrazuje průběhy akustického tlaku, akustické rychlosti a akustické intenzity v závislosti na poloze v jednorozměrném prostoru. Je patrné, že p-I index se velmi liší podle polohy sondy v takovémto zvukovém poli.

Vliv fázové chyby tedy závisí na poloze, jak je zobrazeno v grafu 6. Graf 7 zobrazuje příklad výsledku měření s intenzitní sondou posunovanou v trubici se stojatým vlněním. Test pomocí stojatého vlnění často odhalí různé další chyby, než je pouze fázová chyba, například vliv nepříjemně vysoké citlivosti větracího otvoru mikrofonů[1].



Graf 6: a) Akustický tlak - plná křivka, akustická rychlost - čárkovaná křivka, akustická intenzita - čerchovaná křivka; b) zobrazení chyby měřicího systému s indexem zbytkové intenzity 14dB (pozitivní a negativní zbytková intenzita)[1]



Graf 7: Odezva intenzitní sondy vystavené stojatému vlnění: akustický tlak, akustická rychlost, intenzita a intenzita s korigovanou fází[1]

2.2 Metoda p-u

Měření akustické intenzity p-u metodou kombinuje dva zcela odlišné snímače. Prvním snímačem je tlakový mikrofon a druhým snímačem je snímač akustické rychlosti. Akustická intenzita je jednoduše okamžitou hodnotou akustického tlaku a akustické rychlosti.

$$I_r = \langle p(t)u_r(t) \rangle_t = 1/2\text{Re}(pu_r^*) \quad (2.2.0)$$

Vyjádření písmen je zde v komplexně sdruženém tvaru. Pro frekvenční vyjádření by tento vztah měl tvar:

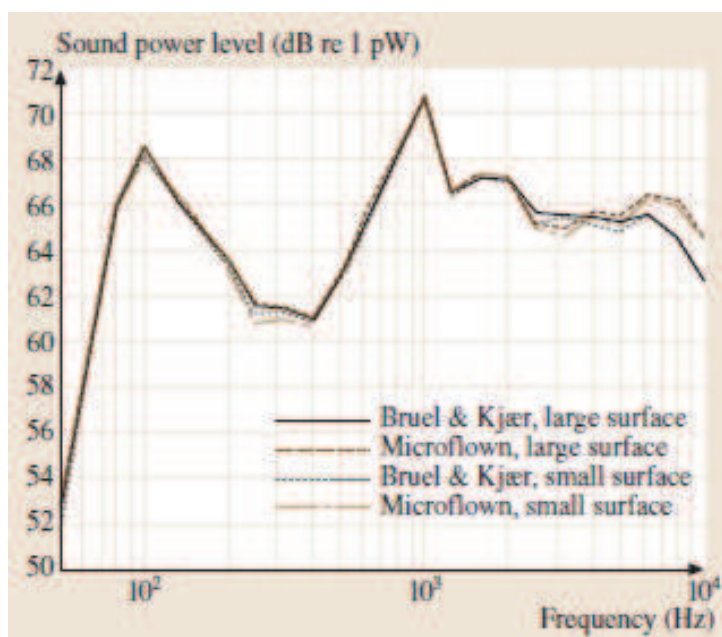
$$I_r(\omega) = S_{pu}(\omega) \quad (2.2.1)$$

Pomocí obou vztahů bychom se měli dostat ke stejnému výsledku, když je budeme integrovat přes frekvenční pásmo, o které se zajímáme.

P-u měřicí sonda založená na kombinaci tlakového mikrofonu a snímače založeném na šíření ultrazvukového paprsku tokem akustické rychlosti byla vyráběna firmou NorwegianElectronics, avšak zařízení bylo velmi objemné, citlivé na proudění vzduchu a bylo velmi obtížně kalibrovatelné. Proto byla výroba tohoto zařízení v roce 1990 zastavena. V pozdější době se stal dostupným mnohem přijatelnější a zmenšený snímač pro měření akustické rychlosti zvaný „Microflown“, a tak vznikla měřicí sonda založená na kombinaci microflownu a tlakového mikrofonu, jež je nyní komerčním výrobkem dostupným pro všechny. Snímač akustické rychlosti Microflown se skládá ze dvou blízko sebe umístěných drátků zahřátých na teplotu okolo 300°C. Jejich odpor je závislý na teplotě. Signál akustické rychlosti působící v kolmém směru mění okamžitě rozložení teploty, protože jeden z drátků bude proudícím vzduchem více ochlazován než druhý. [1]

Frekvenční charakteristika tohoto zařízení je celkem rovná až do zlomové frekvence okolo 1kHz, což je způsobeno difúzí závislou na vzdálenosti mezi drátky. Druhá zlomová frekvence je okolo 10kHz, která je způsobená měrnou tepelnou kapacitou daných vodičů. Mezi frekvencemi 1-10kHz je útlum 6dB/okt. Snímač akustické rychlosti je kombinován s malým kondenzátorovým mikrofonem v 1/2“ měřicí sondě, stejně jako u p-p měřicí sondy. Snímač rychlosti je namontován na malém silném válečku a kondenzátorový mikrofon je umístěn uvnitř druhého dutého válečku. Toto geometrické rozmístění zvyšuje citlivost rychlostního snímače. Oproti sondě od firmy NorwegianElectronics je sonda Microflown opravdu malá a menší než většina p-p měřicích sond, což umožňuje měřit velmi blízko vibrujících ploch. Graf 8 zobrazuje měření akustického výkonu pomocí sondy Microflown a p-p měřicí sondy od firmy Brüel&Kjær. [1]

Varianta p-u kombinuje tlakový mikrofón se snímačem vibrací, rychlosti nebo zrychlení dané plochy, například s akcelerometrem nebo laserovým vibrometrem. Obvykle tato metoda získá pouze normálovou část akustické intenzity blízko vibrujících ploch. Nevýhodou měření plošné intenzity je, že zvuková pole poblíž komplexních zdrojů zvuku jsou často mnohem složitější, komplikovanější, což činí nutným měřit v mnoha různých bodech[41,42,43].



Graf 8: Změřený akustický výkon pomocí sondy p-u a p-p [1]

3 DOSTUPNÉ HARDWAROVÉ VYBAVENÍ PRO MĚŘENÍ AKUSTICKÉ INTENZITY

K měření akustické intenzity je v laboratoři k dispozici měřicí vybavení od firmy G.R.A.S a National Instruments. Konkrétně tedy intenzitní sonda G.R.A.S. Type 50AI. K připojení sondy je zapotřebí zesilovač, kterým bude napájena intenzitní mikrofonní dvojice. K dispozici je napájecí modul G.R.A.S. Type 12AB, pomocí něhož bude napájen mikrofonní pár G.R.A.S40AI a získáván z něj elektrický signál do měřicí karty National Instruments PXI 4461.

Ke kalibraci a zjištění zbytkové intenzity je dostupný kalibrátor intenzity G.R.A.S Type 51AB. Dále ke zjištění indexu zbytkové intenzity a ke kalibraci mikrofonního páru je k dispozici pistonfon G.R.A.S. Type 42AP. Pomocí tohoto zařízení je možné zjistit chybu měření celého měřicího řetězce. Pistonfon po vložení mikrofonní dvojice umí vygenerovat na mikrofonní dvojici přesnou hladinu akustického tlaku 114dB vztažené k prahu slyšitelnosti (tlak 20μPa). Hladina 114 dB odpovídá tedy akustickému tlaku 10 Pa.

Pro měření akustické intenzity p-p metodou je stěžejním parametrem fázová chyba. V tabulce níže jsou uvedena dostupná zařízení s vypsány parametry, které jsou pro nás důležité. Ostatní parametry je možné najít v katalogových listech dodaných na přiloženém CD.

Tabulka 1: Srovnání fázových chyb [°] měřících karet [3,4]

Měřicí karta	Gain[dB]					AC vazba	
	30	20	10	0	-10,-20		
NI PXI 4461	0.1 0	0.04	0.01 5	0.01 5	0.01	0.7	0.08
NI PXI 4462	0.1 0	0.04	0.01 5	0.01 5	0.01	0.7	0.08
NI PXI 4497	-	<0.2	<0.0 2	-	-	-	<0.8
NI 9234	$f_{in}(\text{kHz}) * 0.045^\circ + 0.04 \text{ max}$						
B&K 3050	50-250Hz – 0.017° 250Hz-2.5kHz – 0.017°*(f/250) 2.5-6.4kHz – 0.17°						

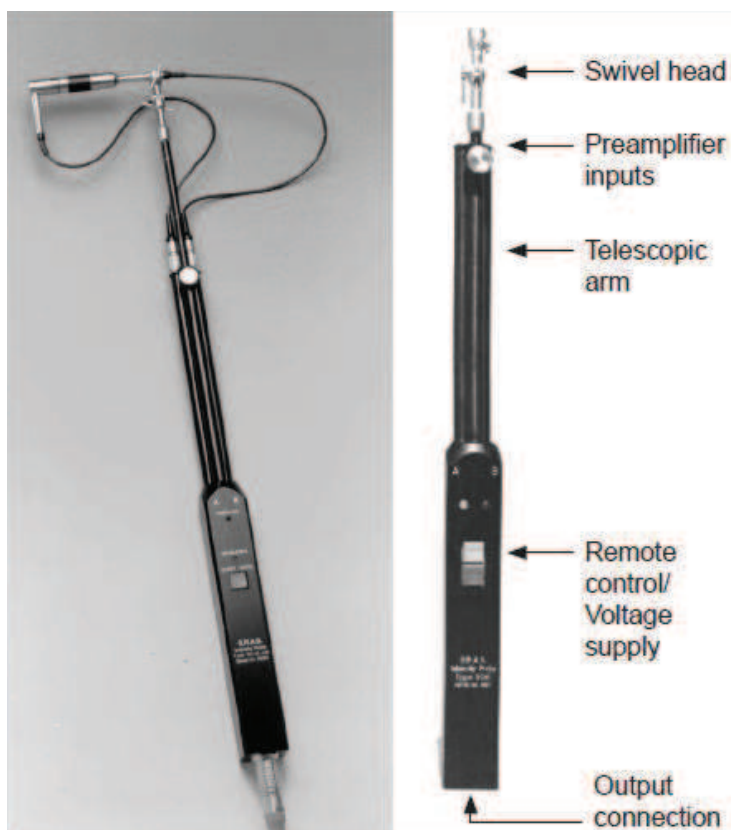
Tabulka 2: Parametry měřicí sondy [5]

Zařízení	Fázová chyba [°]	Citlivost	Frekvenční rozsah [Hz]
G.R.A.S 12AB	-	-	0-200k ±0.2dB
G.R.A.S 40AK	Do 250Hz 0.05 Nad 250Hz = f/5000	25mV/Pa ±1.5dB	1 – 12.5k ±1dB 1 – 16k ±2dB

3.1 Intenzitní sonda G.R.A.S. Type 50AI - B

Typické použití měřicí sondy:

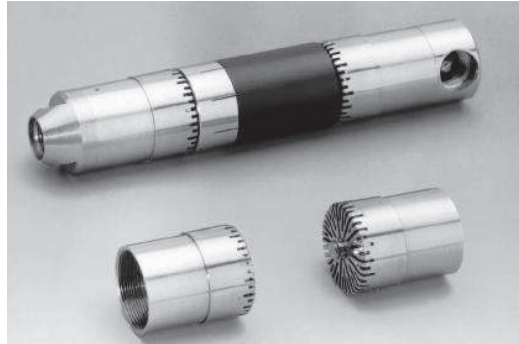
Intenzitní sonda slouží převážně k měření akustické intenzity, dále se pomocí ní nechají lokalizovat zdroje zvuku, měřit akustický výkon, mapovat zvuková pole. Sonda splňuje standard IEC 61043 pro měření akustické intenzity.



Obrázek 1: Intenzitní sonda G.R.A.S typ 50AI – B [5]

Intenzitní sonda zahrnuje pár kondenzátorových ½“ mikrofonů typ 40AI, distanční vložky, pár ¼“ předzesilovačů typ 26AA a rukojeť s dálkovým ovládním.

3.2 Mikrofonní pár G.R.A.S. pro měření akustické intenzity typ 40AK



Obrázek 2: Mikrofonní pár typ 40AK [5]

Při měření akustické intenzity p-p metodou se jako snímače akustického tlaku používají přesné kondenzátorové mikrofony. Nejdůležitějším parametrem při měření touto metodou je fázová přesnost, která by u těchto mikrofonů měla být při frekvencích do 250Hz menší než 0.05° a nad 250Hz by fáze měla být menší než $f/5000$, kde f je frekvence zadaná v jednotkách Hz.

Obrázek 3: Parametry mikrofonního páru typ 40AK [5]

Open-circuit sensitivity:	25 mV/Pa ± 1.5 dB	Intensity-probe configuration specifications	Sound Intensity Microphone Pair Type 40AI fulfils the phase requirements of a Class 1 Sound Intensity Probe in accordance with IEC International Standard 61043.
Polarization voltage:	200 V	Difference in phase response:	From 50 Hz to 250 Hz $< 0.05^\circ$ From 250 Hz to 6.3 kHz $< f/5000^\circ$
Free-field frequency response (as a pair in a probe):	According to IEC 61043 1993 Class 1 and IEC 60651 Type 1 from 20 Hz to 10 kHz	Difference in amplitude response:	(normalised at 250 Hz) From 20 Hz to 1 kHz < 0.2 dB From 20 Hz to 5 kHz < 0.4 dB
1 Hz - 16 kHz	± 2.0 dB	Difference in sensitivity at 250 Hz:	< 1 dB
1 Hz - 12.5 kHz	± 1.0 dB	Difference in polarized capacity:	< 0.6 pF
Resonant frequency:	12 kHz	Dimensions:	Length: 16.6 mm Diameter: 13.2 mm
Lower-limiting frequency, -3 dB:	0.2 Hz	Pre-amplifier mounting thread:	11.7 mm - 60 UNS
Polarized cartridge capacitance at 250 Hz:	23 pF	Weight:	6 g
Inherent cartridge noise:	< 20 dBA re. 20 μ Pa	Accessories included with Type 40AK:	Solid spacers for microphone separation: 12 mm, 25 mm, 50 mm and 100 mm
Upper limit of dynamic range:	160 dB re. 20 μ Pa ($< 3\%$ THD at 100 Hz)	Adapters, 1/2-inch to 1/4-inch:	Straight RA0003 Right angled (2) RA0001
Temperature coefficient at 250 Hz:	From -10°C to $+50^\circ\text{C}$ -0.002 dB/ $^\circ\text{C}$		
Ambient pressure coefficient at 250 Hz:	-0.0007 dB/hPa		
Humidity coefficient:	< 0.1 dB/100% RH		
Influence of axial vibrations, 1 m/s²:	62 dB re. 20 μ Pa		
Influence of magnetic fields:	34 dB re. 20 μ Pa at 50 Hz, 80 A/m		

3.3 Napájecí modul G.R.A.S. typ 12AB pro mikrofonní sondu



Obrázek 4: Napájecí modul typ 12AB [5]

Napájecí modul typ 12AB slouží k napájení měřicí sondy typ 50AI. Napájecí modul lze používat jako mobilní, kdy je napájení zajištěno bateriemi, nebo jako statický, kdy jej lze napájet ze sítě pomocí dodávaného napájecího zdroje. Tento typ má též RS232 rozhraní, za pomoci kterého se nechá přímo připojit k PC a pomocí vhodného software lze používat dálkové ovládání sondy 50AI.

Vstup je řešen pomocí 12-pinového konektoru LEMO, který je umístěn na předním panelu. Výstup z napájecího zdroje tvoří standardní BNC konektory, na kterých je naměřený signál z mikrofonní dvojice (output A – první mikrofon, output B – druhý mikrofon).

Obrázek 5: Parametry napájecího modulu [5]

Input/Output sockets:	Fuse:
2-channel input: 12-pin LEMO 1B female	500 mA (Slow)
Outputs: 2 BNC coaxial	Battery life (valid for 23 °C and alkaline cells) for:-
RS232:	120 V supply: ≈ 9 hours
9-pin female D-sub connector	28 V supply: ≈ 11 hours
Output-voltages:	Operating temperature range:
Preamplifier supply: 28 V or 120 V	-10 °C to +50 °C
Polarization voltage: 0 V or 200 V	Dimensions:
Frequency response:	($\frac{1}{12}$ of a standard 19-inch rack)
0 Hz - 200 kHz: ±0.2 dB	Height: 132.6 mm (5¼ in)
Output impedance:	Width: 34.6 mm (1.3 in)
30 Ω	Depth: 196.0 mm (7.7 in)
Power supply:	Weight:
10 x LR6 (AA) standard alkaline cells, or	770 gm (1.69 lbs)
DC line adapter supply: 12 V - 18 V	Accessories available:
Power consumption:	19-inch Rack-mounting System: AK0040
With a G.R.A.S preamplifier using:-	
120 V: 210 mA	
28 V: 180 mA	

3.4 Kalibrátor akustické intenzity G.R.A.S. typ 51AB



Obrázek 6: Kalibrátor akustické intenzity typ 51AB s vloženým mikrofonním párem [5]

Kalibrátor akustické intenzity typ 51AB slouží ke kalibrování fáze a výstupní úrovně mikrofonního páru. Dále se využívá pro zjištění zbytkové intenzity, kalibraci akustické intenzity a akustické rychlosti dle normy IEC 1043. Ke kalibrátoru připojujeme signál

z tónového generátoru pomocí standardního konektoru BNC. Avšak maximální vstupní signál nesmí překročit 1V RMS.

Kalibrátor po přivedení signálu vytvoří na membrány mikrofonů stejný akustický tlak s velmi malou fázovou odchylkou. Tato kalibrace se dle standardu IEC 1043 provádí s 25mm distanční vložkou, kdy s touto mikrofonní vzdáleností by fázová chyba na frekvenci 100Hz měla být menší než 0.006°.

Pro kalibraci akustické intenzity se do kalibrátoru vloží přípravek pro posunutí fáze, který nám zajistí rozdílný tlak na membrány mikrofonů a tedy nenulovou intenzitu.

Obrázek 7: Parametry kalibrátoru typ 51AB [5]

Standards: IEC standard 1043 Electroacoustics - Instruments for the measurements of sound intensity - Measurement with pairs of pressure sensing microphones	Sound-pressure-level difference between channels: <0.1 dB
Input connector: BNC socket	Operating temperature range: +5 °C to +40 °C
Maximum input signal: 1 V RMS	Dimensions: Height: 42.2 mm Width: 50.3 mm Depth: 60.0 mm
Frequency range: 50 Hz - 6.3 kHz	Weight: 515 gm (1.3 lbs)
Pressure-intensity index: >27 dB (for 25 mm nominal microphone spacing)	Accessories included: Two ¼-inch microphone adapters

3.5 Pistonfon G.R.A.S. typ 42AP



Obrázek 8: Pistonfon typ 42AP [44]

Pistonfon typ 42AP je baterií napájený precizní zdroj akustického tlaku pro kalibraci měřicích mikrofónů, měřičů akustického tlaku a jiného měřicího vybavení. Pistonfon má v sobě zabudovaný velmi přesný barometr a teploměr, který zobrazuje naměřené údaje buď přímo na displej, či pomocí rozhraní RS232 na PC.

S použitím přípravku pro vložení mikrofonního páru se na mikrofony vytvoří akustický tlak 114dB vztažených k prahu slyšitelnosti (tlaku $20\mu\text{Pa}$) na frekvenci 250Hz nebo 251.2Hz.

Pomocí pistonfonu je uživatel schopen zjistit zbytkový P-I index měřicí soustavy, případně přesně kalibrovat na měřený akustický tlak. [5]

Obrázek 9: Parametry pistonfonu typ 42AP [44]

<p>Sound pressure level: Nominal: 114 dB re. 20 μPa Individually calibrated under the following reference conditions:- Ambient pressure: 101.3 kPa Ambient temperature: 20 °C Ambient humidity: 65 % RH</p> <p>Calibration accuracy: Absolute: ± 0.09 dB at reference conditions Accuracy when corrected for ambient pressure with: ± 0.1 dB</p> <p>Frequencies: 250 Hz: ± 0.1 % 251.2 Hz: ± 0.1 %</p> <p>Distortion: < 1.5 %</p> <p>Barometer: Range: 750 hPa to 1100 hPa with reduced accuracy (± 4 hPa): 300 hPa to 1100 hPa Calibration accuracy: Absolute: ± 1 hPa (0 °C to +55 °C) Long-term stability: -1hPa (12 months)</p> <p>Thermometer: Range: -10 °C to +55 °C Absolute: ± 1 °C</p> <p>Nominal effective coupler volume: 15540 mm³ (including effective load volume of microphone type 40AG or type 40EN)</p> <p>Temperature range: Batteries permitting: -10 °C to +55 °C</p>	<p>Batteries: Four standard LR6-AA alkaline cells</p> <p>External power: Voltage: 6 V DC Current: 90 mA</p> <p>Dimensions: Length: 184 mm (7.24 in) Width: 35 mm (1.38 in) Height: 35 mm (1.38 in) Weight (with batteries): 437 g (1 lb)</p> <p>Accessories included: 1" microphone coupler: RA0023 Adapter for 1/2" microphones¹: RA0048 Adapter for 1/4" microphones: RA0049 Adapter for 1/8" microphones: RA0069 Four LR6-AA alkaline cells: EL0001</p> <p>Accessories available: Adapter for Outdoor Microphone System¹:- Type 41AM: RA0009 Type 41CN: RA0041 Adapter for Environmental Microphone¹:- Type 41AL: RA0010 Two-port calibration coupler: RA0024 Octopus coupler (1/2" mics.): RA0072 94 dB Pistonphone coupler: RA0090</p> <p>¹ For pistonphone fitted with the 1" microphone coupler RA0023</p>
---	--

4 POSTUP PŘI MĚŘENÍ AKUSTICKÉ INTENZITY

4.1 Teoretický výpočet zbytkové intenzity měřicí sondy

Nejprve si musíme spočítat, jakou má náš měřicí systém zbytkovou intenzitu, abychom byli schopni říci, zda bude měření použitelné a bude mít jistou vypovídající hodnotu. Zbytkovou intenzitu vypočítáme následujícím způsobem:

$$I_0 = -\frac{\varphi_{PE}}{k\Delta r} * \frac{p_0^2}{\rho c} = -\frac{8,7266 * 10^{-4}}{4,62 * 12 * 10^{-3}} * \frac{10^2}{1,2047 * 340} = -3,84 * 10^{-3} W m^{-2}$$

$$L_I = 10 \log \frac{|I_0|}{I_{ref}} = 10 \log \frac{|-3,84 * 10^{-3}|}{10^{-12}} = 95,84 dB$$

$$\delta_{pI} = 10 \log \left(\frac{p_0^2 / \rho c}{|I_0|} \right) = 10 \log \left(\frac{100 / 1,2047 * 340}{|-3,84 * 10^{-3}|} \right) = 18,03 dB$$

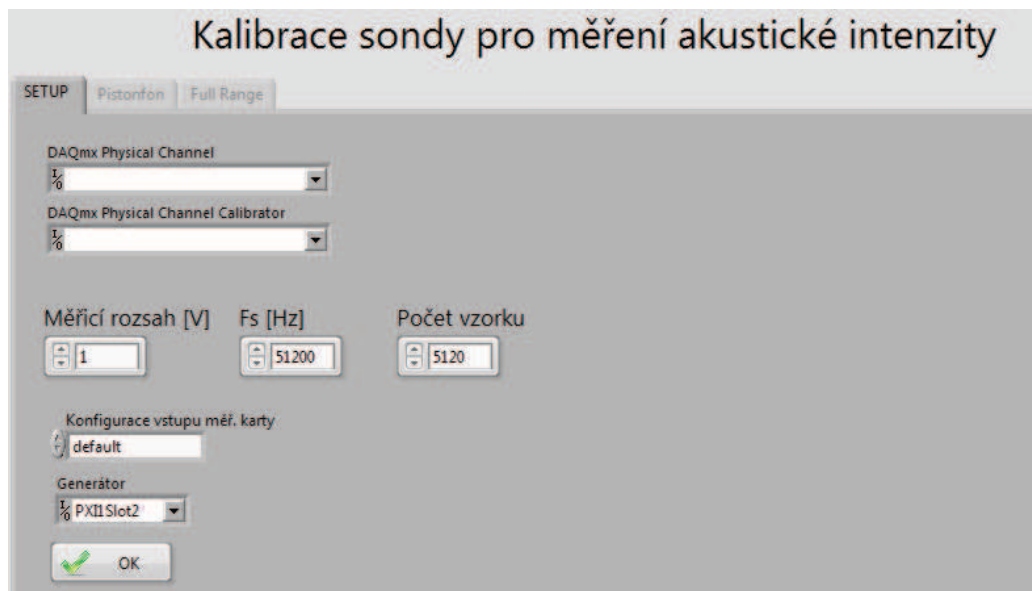
Zbytková intenzita měřicí sondy je $-3,84 * 10^{-3} W m^{-2}$, což odpovídá hladině zbytkové intenzity 95,84dB. Index zbytkové intenzity δ_{pI} je pak 18,03dB. Toto by měl být nejhorší možný případ z údajů daných výrobcem.

4.2 Experimentální zjištění zbytkové intenzity (indexu δ_{pI})

4.2.1 Zjištění δ_{pI} měřicí karty

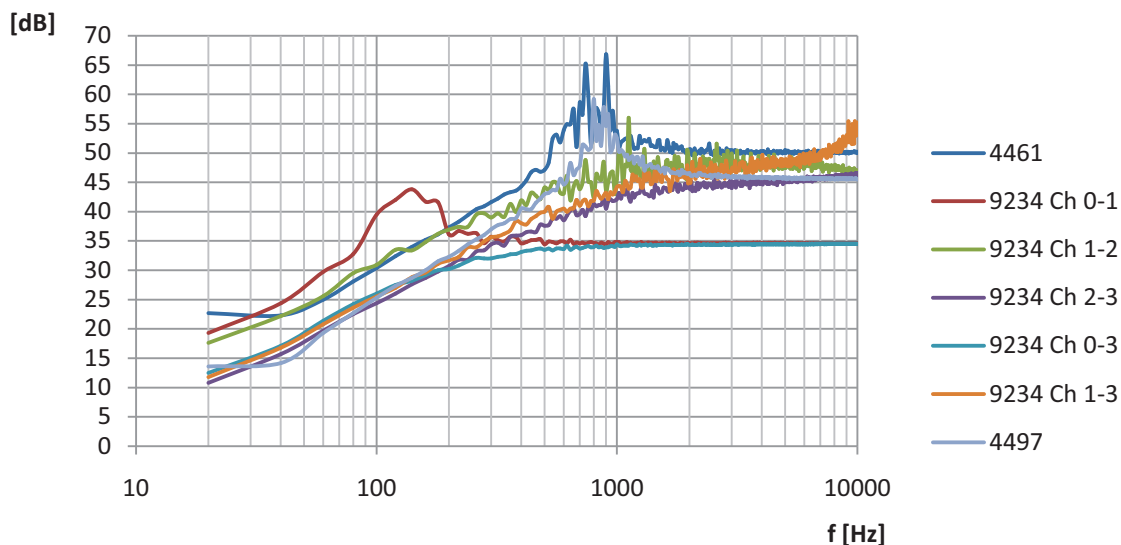
Zjištění zbytkového indexu měřicí karty se nechá též zjistit výpočtem, jak je uvedeno v kapitole 4.1. Pro experimentální zjištění zbytkového indexu je zapotřebí funkční generátor, dva koaxiální kabely na propojení přístrojů a „T“ pro rozdělení signálu na vstupy měřicí karty. Pro měření akustické intenzity jsme vybrali z katalogových dat kartu NI PXI 4461, která má ze všech dostupných karet nejlepší parametry. Na generátoru nastavíme generování sinu o frekvenci 250Hz a amplitudě 250mV. Toto nastavení by mělo odpovídat tlaku 10Pa, při citlivosti mikrofону 25mV/Pa.

Pro zjištění δ_{pI} použijeme vytvořenou LabVIEW aplikaci Kalibrace, kde uživatel v záložce SETUP vybere nainstalovanou měřicí kartu, vybere požadované vstupní kanály, nastaví měřicí rozsah, vzorkovací kmitočet, počet vzorků a nastavení připojení vstupního terminálu. Když je toto nastavení hotové, potvrdí se tlačítkem OK a přejde se do záložky Pistonfon. Zde se vynechá záložka Citlivost a přejde se do záložky Zbytkový index p-I. Citlivost se ponechá na defaultní hodnotě a stiskem tlačítka Použij ručně zadanou citlivost MIC. Tento krok je tu z toho důvodu, že pokud se provádí kalibrace celé sondy, tak se automaticky použije zjištěná citlivost mikrofonů ze záložky Citlivost. Dále se nastaví doba měření a stiskne se tlačítko START. Progress bar uživateli zobrazuje průběh měření. Po dokončení měření se v indikátoru Index p-I zobrazí zjištěný p-I index. Norma uvádí, že δ_{pI} měřicí karty musí být minimálně 29dB pro frekvence vyšší než 300Hz, což vybraná karta NI PXI 4461 splňuje ($\delta_{pI} = 42\text{dB}$). V Graf 9 uvádím srovnání zbytkového indexu dostupných měřicích karet.



Obrázek 10: Aplikace pro kalibraci - SETUP

Měření p_i indexu měřících karet

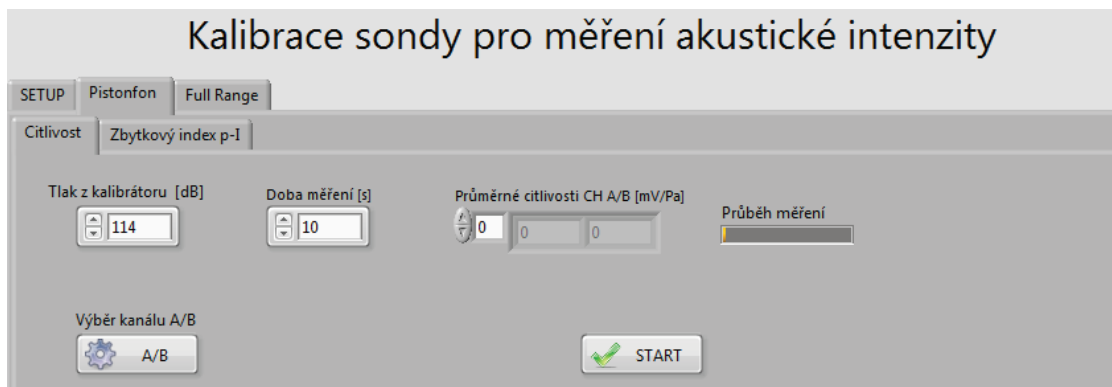


Graf 9: Porovnání p_i měřících karet NI

4.2.2 Zjištění citlivosti mikrofonů

Tento krok kalibrace by se dal přeskočit, avšak pokud chce uživatel znát opravdu přesnou hodnotu citlivosti použitých mikrofonů, je lepší si citlivost experimentálně zjistit. Výrobce u mnou použitých mikrofonů udává citlivost 25mV/Pa, avšak z měření jsme zjistili, že tato hodnota u mikrofonu A odpovídá hodnotě 23,3mV/Pa a u mikrofonu B hodnotě 23,6mV/Pa. Citlivost mikrofonů zjistím tak, že zapojím měřící sondu dle návodu výrobce, poté připojím výstupní kanály sondy do vstupů vybrané karty (NI PXI 4461) a spustím vytvořenou aplikaci pro kalibraci sondy.

Prvním krokem po spuštění aplikace je SETUP, kde uživatel vybere požadovanou měřící kartu a její vstupní kanály, nastaví vzorkovací kmitočet a počet vzorků, nakonfiguruje vstupní terminál, vstupní kanál pro měření napětí na kalibrátoru a výstupní kanál generátoru. Konfiguraci se potvrdí tlačítkem OK. Poté je možné přejít do záložky Pistonfon a vybrat záložku Citlivost.



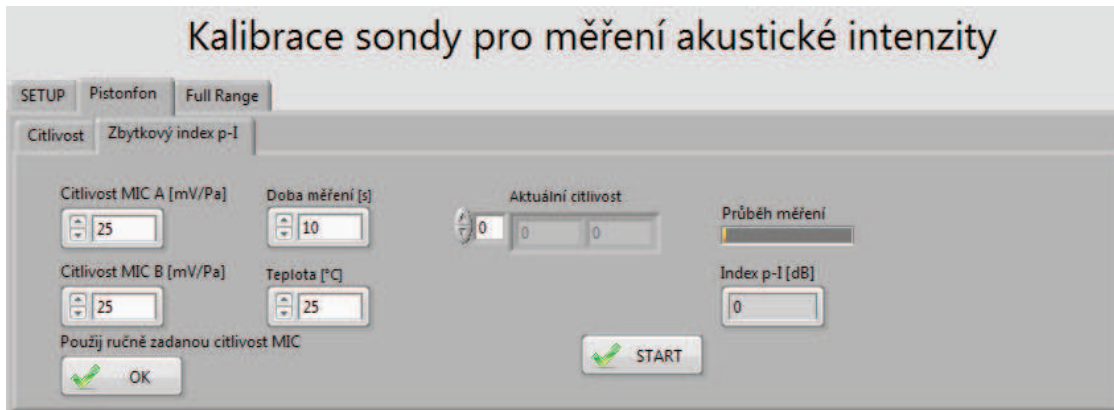
Obrázek 11: Aplikace pro kalibraci - zjišťování citlivosti

Ke změření citlivosti je zapotřebí pistonfonu, na který se připevní nástavec pro jeden ½“ mikrofon a vloží se do něj mikrofon připojený ke kanálu A. Je nutné dbát na to, aby byl mikrofon řádně do nástavce domáčknut, jinak by měření neodpovídalo skutečnosti. Po řádném umístění mikrofonu lze zapnout pistonfon a do programu vložit údaje požadované pro zjištění citlivosti. Těmi jsou Tlak z kalibrátoru, který nám pistonfon generuje, a dále doba měření. Dobu si uživatel zvolí dostatečně dlouhou pro odeznění všech přechodových dějů. Ideální doba měření je cca 60-120s. Po nastavení všech parametrů se stiskne tlačítko START, které zahájí měření. Grafický indikátor zobrazuje průběh měření. Po dokončení měření se zjištěná citlivost mikrofonu připojeného ke kanálu A zobrazí v indikátoru Průměrné citlivosti v prvním poli. Poté se vloží do pistonfonu mikrofon připojený ke kanálu B a stiskne se tlačítko Výběr kanálu A/B. Tlačítko zůstane stisknuté, což značí, že se měří druhý kanál. Po dokončení měření se zobrazí citlivosti v indikátoru Průměrné citlivosti CH A/B. Aplikace se nechá spuštěná, aby se data uchovala do dalších kroků kalibrace.

4.2.3 Zjištění δ_{pI} měřicí soustavy pomocí pistonfonu

V tomto kroku kalibrace se použije na pistonfon nástavec pro vložení dvou mikrofonů. Po jejich vložení a řádném upevnění do nástavce lze přistoupit ke zjištění δ_{pI} měřicí soustavy. V aplikaci se zůstane v záložce Pistonfon, ale přepne se do dalšího kroku a to záložky Zbytkový index p-I. Zde uživatel nastaví potřebné parametry, kterými jsou teplota a doba měření. Teplota se odečte z údaje udávaného pistonfonem a doba měření se nastaví na 120s, aby bylo zajištěno odeznění všech přechodových dějů. Citlivosti mikrofonů uživatel nevyplňuje, v paměti je uložena zjištěná citlivost, kterou zobrazuje indikátor Aktuální citlivost. Pokud by však uživatel měl mikrofony se známou citlivostí, lze přeskočit krok zjišťování citlivosti a zadat si citlivosti ručně. Pro tento účel jsou v tomto okně dva „kontroly“, do kterých uživatel může zapsat citlivosti. Poté se stiskne tlačítko OK a tyto hodnoty se přenesou do Aktuální citlivosti, se kterou program dále počítá.

Po zadání všech parametrů se stiskne tlačítko START a počká se na výsledek měření, který se po uplynutí doby měření zobrazí v indikátoru Index p-I. Měřicí soustava by podle normy měla tento index mít 18dB. Mnou používaná soustava má index $\delta_{pI} = 22,16\text{dB}$. Aplikace se ponechá zapnuta, aby byla uchována zjištěná data.



Obrázek 12: Aplikace pro kalibraci - zjištění δ_{pI} pomocí pistonfonu

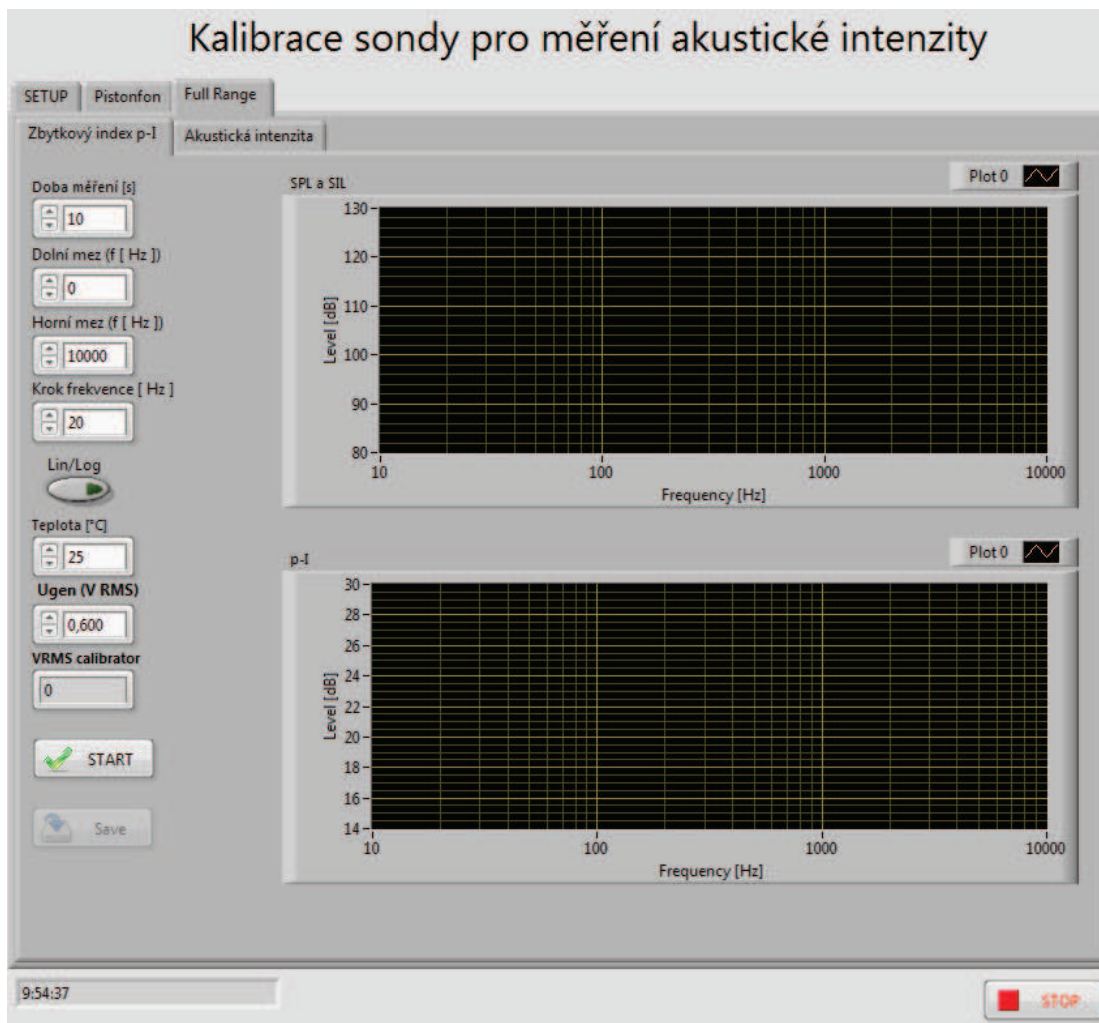
4.2.4 Zjištění δ_{pI} pomocí kalibrátoru G.R.A.S. 51AB

Dalším krokem kalibrace je zjištění δ_{pI} v celém frekvenčním rozsahu mikrofonů. Pro tento účel slouží kalibrátor G.R.A.S. 51AB, který se budí sinusovým signálem z funkčního generátoru, tedy z karty NI PXI 5412. Napětí na kalibrátoru nikdy nesmí překročit 1V RMS, jinak dojde k jeho zničení.

Mikrofony vložíme do připojeného kalibrátoru a ujistíme se, zda jsou řádně zasunuté. Poté se ve spuštěné aplikaci pro kalibraci přepne ze záložky Pistonfon na Full Range a dále se zvolí záložka Zbytkový index p-I. Zde si uživatel nastaví dobu měření na daném kmitočtu, horní a dolní mez, pro kterou chce zbytkový index δ_{pI} zjišťovat. Dále si uživatel může zvolit tlačítkem Lin/Log typ měření. Výchozí hodnota tlačítka je lineární měření, tedy uživatel musí zvolit krok frekvence. Pokud uživatel zvolím tlačítkem Lin/Log logaritmické měření, tak měření bude probíhat s 1/3oct. krokem v zadaných mezích. Dále nastavíme teplotu okolí a amplitudu na generátoru. Pokud je vše nastavené, stiskne se tlačítko START a počká se na dokončení měření. Průběh měření se postupně zobrazuje v grafech SPL a SIL a grafu p-I.

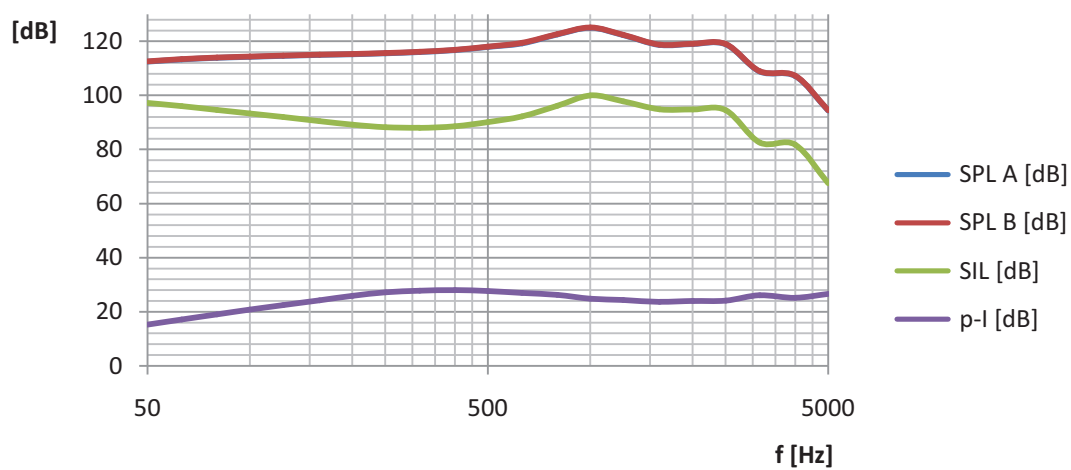
Po ukončení měření je možné si naměřená data uložit do textového souboru stiskem tlačítka Save, kdy bude uživatel vyzván ke zvolení místa, kam se má soubor uložit, a k zapsání jeho názvu.

V Graf 10 jsou zobrazená naměřená data z full range kalibrace.



Obrázek 13: Aplikace pro kalibraci - full range zjišťování δp_I pomocí přípravku G.R.A.S. 51AB

Měření δ_{pI} soustavy s měřicí kartou NI PXI 4461

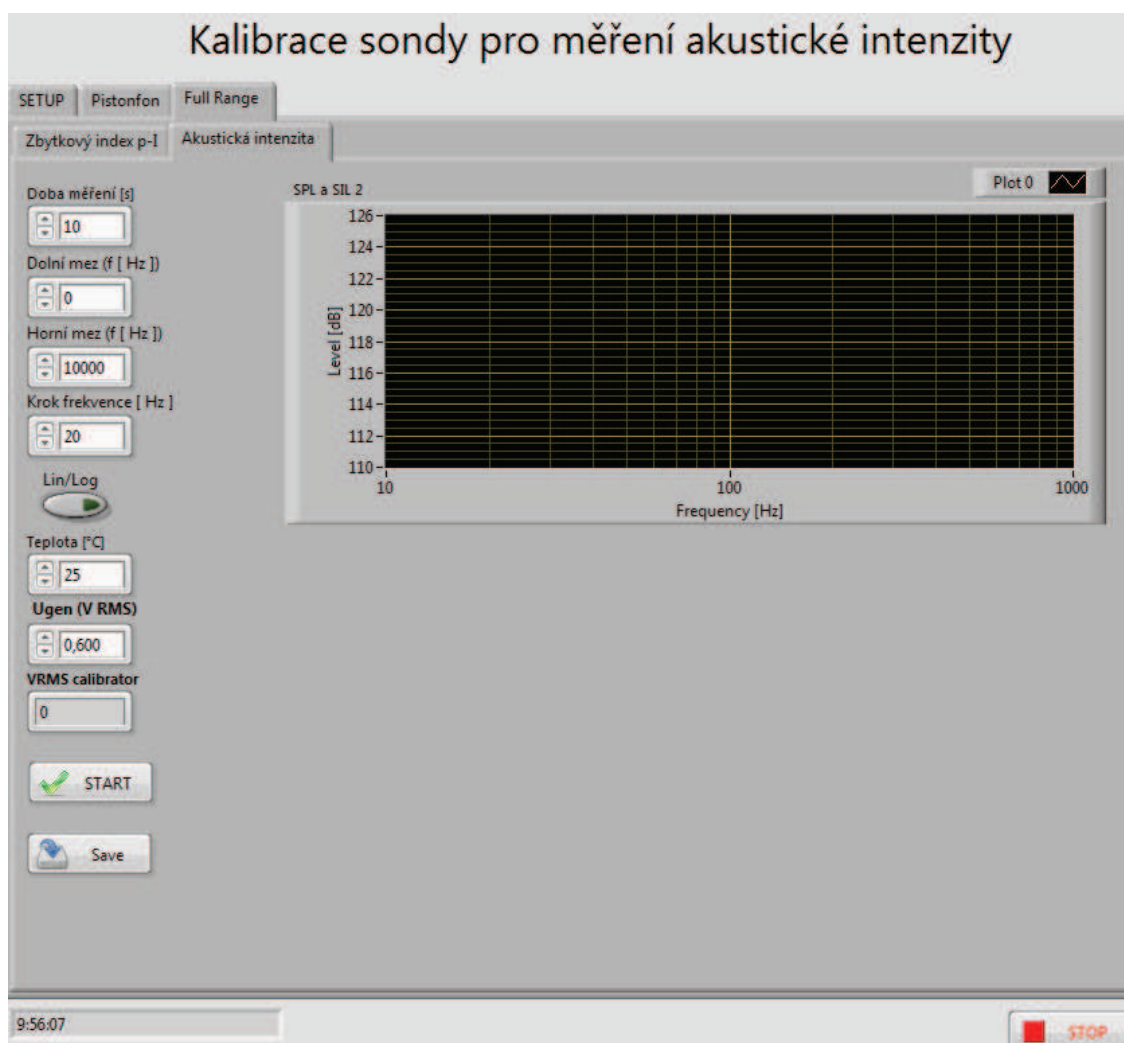


Graf 10: Měření δ_{pI} soustavy s měřicí kartou NI PXI 4461

4.2.5 Zjištění akustické intenzity

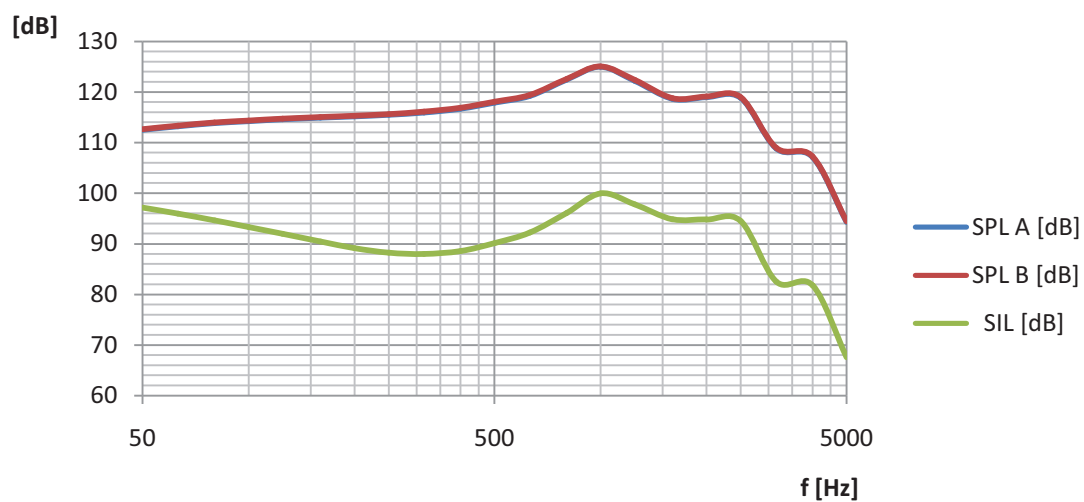
Zjištění akustické intenzity se provádí pomocí kalibrátoru G.R.A.S. typ 51AB, do kterého se přišroubuje vložka, která nám zaručí fázovou odchylku mikrofonů, tedy je možné měřit akustickou intenzitu. V aplikaci pro kalibraci uživatel zvolí záložky Full Range a Akustická intenzita, kde po nastavení parametrů jako v kroku měření Full range zbytkového indexu p-I změříme akustickou intenzitu. Zvolí se vhodná doba měření, aby se vždy ustálily přechodové děje. Dále si uživatel zvolí frekvenční rozsah měření a logaritmické, či lineární měření. Do kontrolu Teplota se napíše okolní teplota a do kontrolu U_{gen} se nastaví amplituda generátoru. Po umístění mikrofonů do kalibrátoru a provedení veškerých nastavení je možné stiskem tlačítka START spustit měření. Naměřené výsledky se průběžně uživateli zobrazují v grafu. Naměřené výsledky lze uložit do souboru jako v předchozím kroku pro další zpracování.

Příklad naměřených výsledků při kalibraci je uveden v Graf 11.



Obrázek 14: Aplikace pro kalibraci - full range zjišťování SIL v přípravku G.R.A.S. 51AB

Měření SIL soustavy s měřicí kartou NI PXI 4461 a instalovanou intenzitní vložkou



Graf 11: Měření SIL soustavy s měřicí kartou NI PXI 4461 a instalovanou intenzitní vložkou

4.3 Opakovatelnost měření

Protože se při měření ať s pistonfonem či kalibrátorem G.R.A.S. 51AB ukázalo, že při nepatrně jiném natočení mikrofonů při vsouvání do kalibračních přípravků dochází k mírné odchylce od dvou po sobě měřených hodnot, zjišťoval jsem též průměrnou odchylku v deseti po sobě jdoucích měřeních. Naměřená data jsou zaznamenána v Tabulka 4, Tabulka 3, Tabulka 5. V tabulce č. 5 jsou zaznamenány hodnoty δ_{pI} pro různé SPL. δ_{pI} by se v ideálním případě nemělo s měnícím se akustickým tlakem měnit. Měření probíhalo na frekvenci 250Hz, aby bylo možné srovnat pistonfon s kalibrátorem G.R.A.S. 51AB. Měření probíhalo za těchto podmínek:

SPL pistonfon: 113,73dB

$t = 25^{\circ}\text{C}$

$p = 983\text{hPa}$

1 minuta na odeznění přechodných dějů

Opakované měření jednotlivých mikrofonů										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SPL A [dB]	113,74	113,74	113,73	113,71	113,70	113,70	113,70	113,70	113,70	113,72
SPL B [dB]	113,71	113,70	113,71	113,71	113,71	113,71	113,71	113,71	113,71	113,71

Tabulka 3: Opakovatelnost měření s jedním mikrofonem v pistonfonu.

Opakované měření mikrofonního páru										
<i>Poloha mikrofonu kanál A: 1. vzadu, případně u plastu; 2. vpředu, u železa</i>										
Pistonfon 250Hz	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
SPL A [dB]	120,830	120,810	120,790	120,820	120,790	120,800	120,790	120,810	120,770	120,760
SPL B [dB]	120,810	120,820	120,770	120,810	120,770	120,810	120,770	120,810	120,760	120,760
δ_{pI} [dB]	18,39	17,86	18,39	19,12	19,50	17,88	20,75	18,77	19,14	19,22
Kalibrátor 250Hz; 395,75mV	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
SPL A [dB]	120,031	120,076	120,085	120,068	120,076	120,051	120,085	120,077	120,067	120,073
SPL B [dB]	120,024	120,055	120,079	120,041	120,052	120,042	120,086	120,065	120,069	120,061

Tabulka 4: Zjišťování opakovatelnosti měření

Opakované měření v kalibrátoru					
SPL mic A [dB]	88	93,9	99,9	106	112
Číslo měření:	δpI [dB]	δpI [dB]	δpI [dB]	δpI [dB]	δpI [dB]
1	30	29	29,3	32,3	31,6
2	31,4	29	30,8	31,6	31,7
3	29,4	28,7	34	29,5	29,3
4	30,7	27	34,2	34,5	27,9
5	31	28,5	29,1	37,5	32

Tabulka 5: Opakované měření δpI v kalibrátoru

Výpočet průměrné naměřené hodnoty SPL A v poloze mikrofonu 1 pro pistonfon:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{603,97}{5} = 120,8dB$$

Výpočet průměrné naměřené hodnoty SPL A v poloze mikrofonu 2 pro pistonfon:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{604,00}{5} = 120,8dB$$

Výpočet průměrné naměřené hodnoty SPL B v poloze mikrofonu 1 pro pistonfon:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{603,88}{5} = 120,8dB$$

Výpočet průměrné naměřené hodnoty SPL B v poloze mikrofonu 2 pro pistonfon:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{604,01}{5} = 120,8dB$$

Výpočet průměrné naměřené hodnoty SPL A pro kalibrátor G.R.A.S. 51AB v poloze mikrofonu 1:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{600,353}{5} = 120,1dB$$

Výpočet průměrné naměřené hodnoty SPL A pro kalibrátor G.R.A.S. 51AB v poloze mikrofonu 2:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{600,345}{5} = 120,1dB$$

Výpočet průměrné naměřené hodnoty SPL B pro kalibrátor G.R.A.S. 51AB v poloze mikrofonu 1:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{600,310}{5} = 120,1dB$$

Výpočet průměrné naměřené hodnoty SPL B pro kalibrátor G.R.A.S. 51AB v poloze mikrofonu 2:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{600,264}{5} = 120,1dB$$

5 MĚŘENÍ AKUSTICKÉHO VÝKONU REPRODUKTORU V OTEVŘENÉ A UZAVŘENÉ OZVUČNICI

Jako ověření funkčnosti vyvinutého algoritmu pro zpracování akustické intenzity sloužil experiment s reproduktorem umístěným v uzavřené a otevřené ozvučnici. Teoretický předpoklad je, že akustický výkon na nižších kmitočtech bude s reproduktorem umístěným v ozvučnici vyšší, protože nebude docházet k akustickému zkratu, ke kterému dochází s reproduktorem umístěným v otevřené ozvučnici.

K výpočtu akustického výkonu se použije vztah 5.1. I je změřená akustická intenzita ve vzdálenosti cca 5cm od měřeného objektu a S je plocha měřeného bodu.

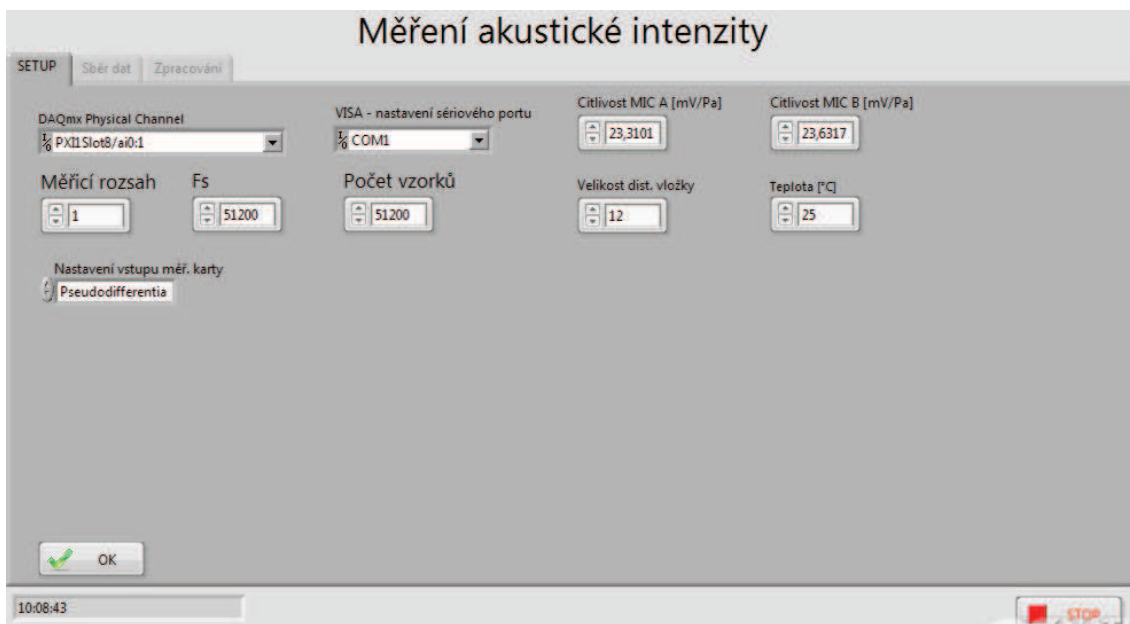
Měření akustického výkonu probíhalo tak, že jsem si určil, v jaké vzdálenosti od měřeného objektu budu měřit akustickou intenzitu, poté jsem si objekt virtuálně obalil sítí bodů, ve kterých bude probíhat měření. Jelikož jsem experiment prováděl na reproboxu, tak jsem si určil dva body z čela reproboxu, dva na zadní straně, po bocích též dva body a jeden bod z vrchní strany boxu a jeden ze spodní strany boxu. To dává dohromady celkem 10 měřicích bodů. Ze známých rozměrů reproboxu, které jsou (21x13x9cm) jsem si vypočetl virtuální síť, kterou tvořil kvádr s rozměry (26x18x14cm). Z těchto rozměrů jsem určil průměrnou velikost měřeného bodu, která byla 0,0217m².

$$S = 2 * ac + 2 * ab + 2bc \quad (5.0)$$

$$S = 2 * 26 * 14 + 2 * 26 * 18 + 2 * 18 * 14 = 2168\text{cm}^2 = 0,0217\text{m}^2$$

$$P_{acoustic} = I * S \quad (5.1)$$

Měření jsem prováděl v bezodrazové komoře, kde byl měřený objekt umístěn na stativu kvůli lepšímu přístupu při měření intenzitní sondou. K měření jsem použil aplikaci vyvinutou v prostředí LabVIEW určenou k měření akustické intenzity.



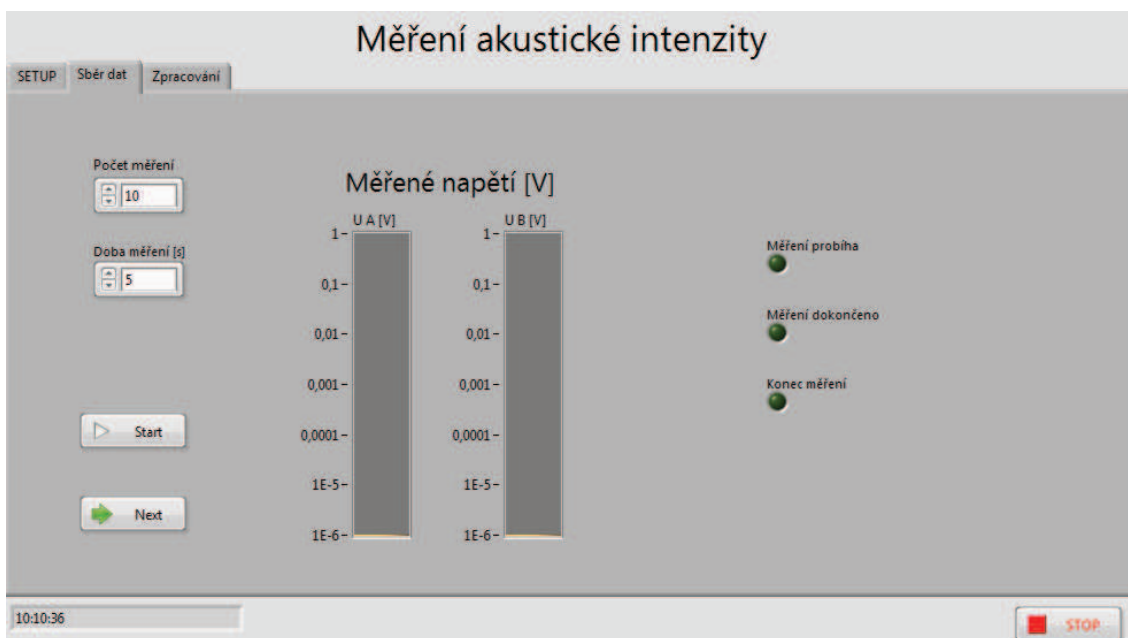
Obrázek 15: Aplikace pro měření SIL - SETUP

Z kalibrace jsem si do měřicí aplikace přepsal hodnoty citlivostí mikrofonů, nastavil jsem vstupní kanály měřicí karty, jejich měřicí rozsah napětí, vzorkovací frekvenci a počet vzorků, dále port pro komunikaci RS232, velikost použité distanční vložky, teplotu a potvrdil jsem nastavení. RS 232 komunikaci používá sonda pro přenos dat s PC. Zapojení pinů konektoru RS232 je detailněji popsáno v dokumentaci intenzitní sondy. Na měřicí sondě jsou dvě funkční tlačítka a dvě signalizační LED diody, které jsou ovládané právě pomocí sběrnice RS232. V měřicí aplikaci se ze záložky SETUP po stisku tlačítka OK přejde do záložky Sběr dat, kde si uživatel zvolí počet měření, v mém případě se jednalo o 10 měření a jako dobu měření jsem zvolil dobu 5s, aby odezněly přechodné děje. Měření lze ovládat dvěma způsoby, buď pomocí PC v aplikaci tlačítka Start a Next nebo přímo tlačítka na měřicí sondě. Modré tlačítko sondy slouží pro spuštění měření a šedivé pro přechod do dalšího kroku. V záložce Sběr dat jsou umístěné dva grafické indikátory, které zobrazují velikost napětí na mikrofonech. To je dobré pro kontrolu, zda je zvolený měřicí rozsah dostatečný. Pokud by indikátory byly trvale na úrovni blízké maximu, je dobré, aby uživatel zvolil vyšší

měřicí rozsah karty. Dále jsou v záložce Sběr dat tři LED indikátory, kdy první indikuje právě probíhající měření, druhý dokončení stávajícího kroku měření a třetí úplný konec měření a přechod do záložky Zpracování.

Po nastavení aplikace lze přistoupit k vlastnímu měření. Reproduktor jsem budil bílým šumem z generátoru a pomocí zesilovače Yamaha P2500 nastavil požadovanou úroveň hlasitosti. Tu jsem volil takovou, aby měření nebylo ovlivňováno okolím, protože při měření musely zůstat dveře bezodrazové komory otevřené.

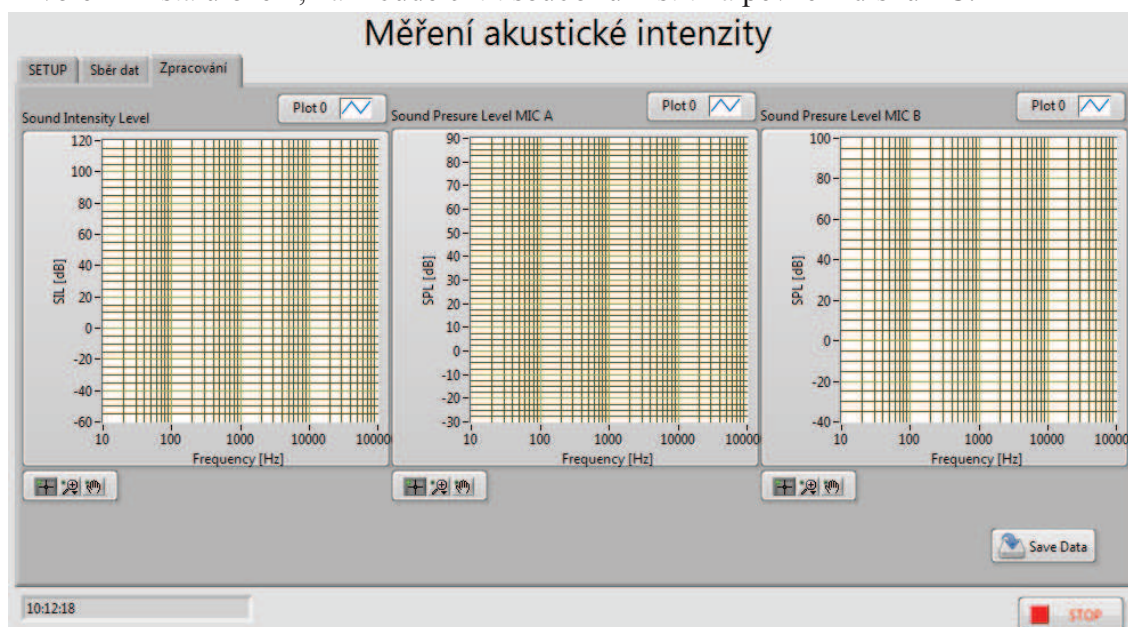
Poté jsem umístil měřicí sondu kolmo k prvnímu bodu měření, tedy v ose proti reproduktoru ve vzdálenosti cca 5cm. Stiskl jsem modré tlačítko, kterým se spustilo měření. LED dioda A začne přerušovaně blikat červeně/zeleně, což značí, že právě probíhá měření. Po spuštění měření zhasne LED dioda B. Pokud měření proběhne v pořádku, rozsvítí se zeleně LED dioda A. Pokud by nastala chyba při měření, tedy zvolený rozsah měřicí karty by byl příliš malý a měřené napětí by bylo vyšší, než je zvolený rozsah, tak se rozsvítí červeně LED dioda A. Pokud by nastal tento stav, musí aplikaci uživatel zastavit tlačítkem STOP a provést znovu nastavení měřicího rozsahu a zvolit vyšší rozsah měřicí karty. Při mém experimentu proběhlo vše v pořádku a mohl jsem pokračovat stiskem šedého tlačítka na sondě. Stiskem tohoto tlačítka se přejde do měření dalšího bodu, kdy se zároveň uloží první měření. Poté se rozsvítí červeně LED dioda B, která značí stav READY, je tedy připraveno k měření. Umístil jsem sondu do druhého bodu, tedy na čelní straně do spodní části reproboxu a modrým tlačítkem jsem spustil měření. Tento postup jsem opakoval pro všechny zvolené body měření.



Obrázek 16: Aplikace pro měření SIL - Sběr dat

Po dokončení posledního bodu měření aplikace automaticky přeskočí na záložku Zpracování, kde se zobrazí naměřené průběhy SIL a SPL měřené mikrofonom A/B. V grafech má uživatel možno přibližovat a pohybovat se mezi hodnotami pomocí

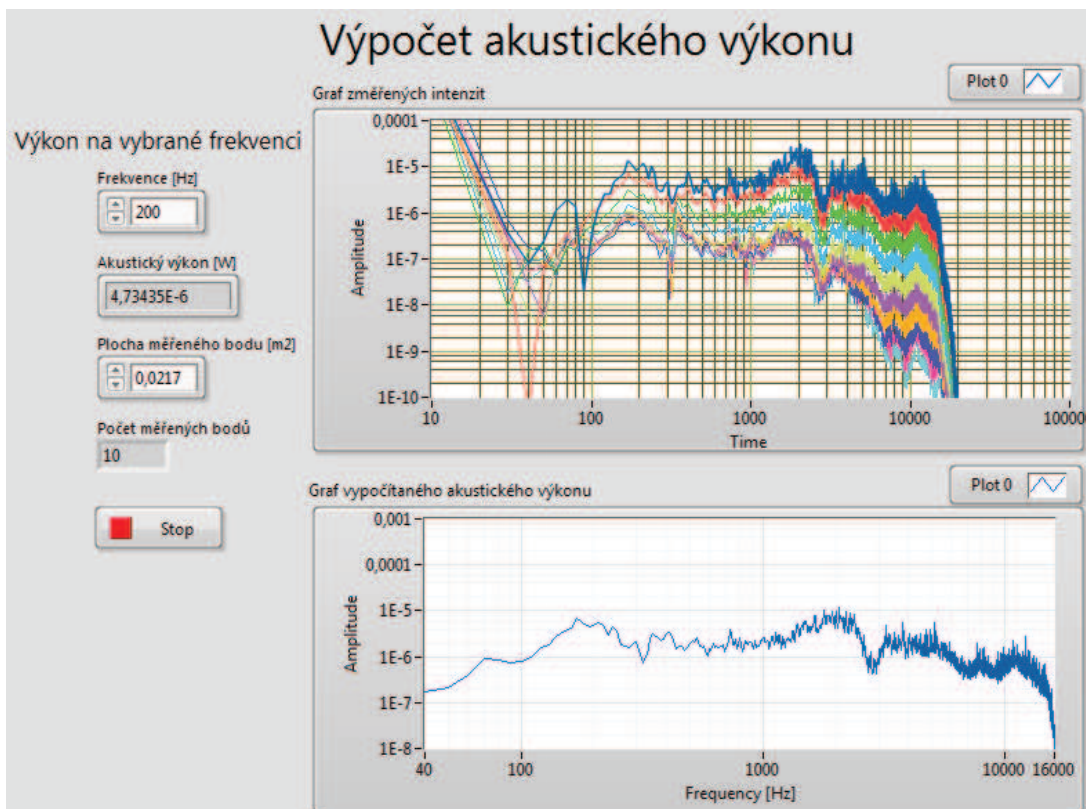
nástrojů pod grafy. Protože experiment měl sloužit ke zjištění akustického výkonu, je v záložce zpracování tlačítko Save Data, které slouží pro uložení naměřených akustických intenzit v daných bodech do textového souboru. Po stisku tlačítka Save Data se zobrazí dialogové okno, které vyzve uživatele k napsání názvu souboru a zvolení místa uložení, kam bude chtít soubor umístit na pevném disku PC.



Obrázek 17: Aplikace pro měření SIL - Zpracování

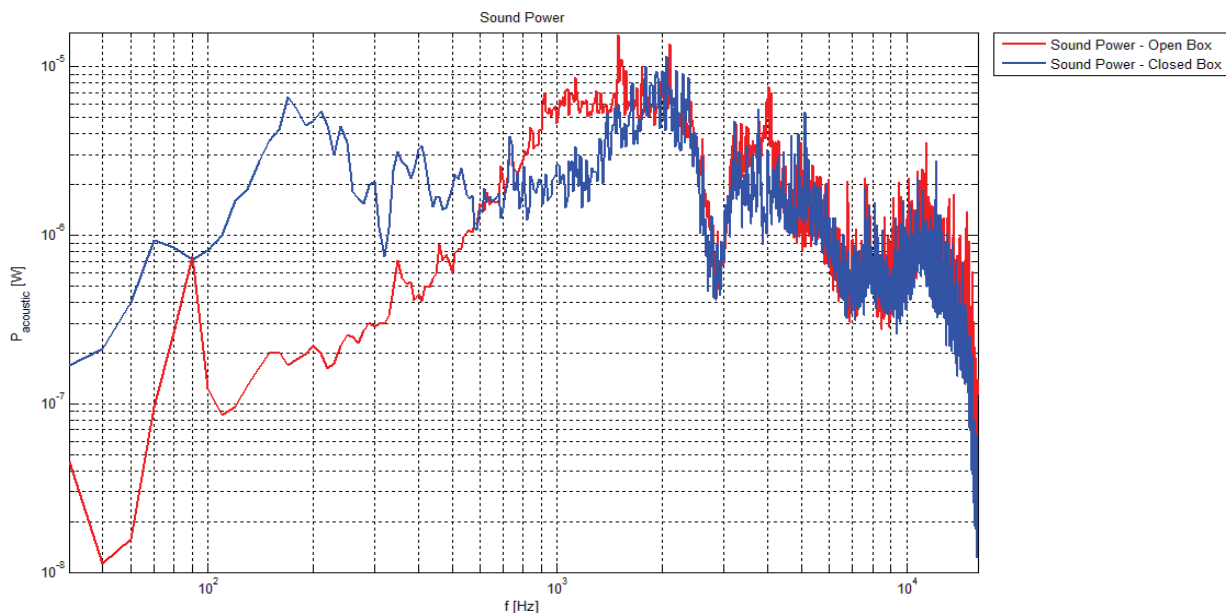
Pokud by uživatel chtěl uložit data v zobrazených grafech, je možné kliknutím pravým tlačítkem myši vybrat z menu položku export a vyexportovat data např. do Excelu.

Pro výpočet akustického výkonu jsem vytvořil další aplikaci v prostředí LabVIEW, která má za úkol načíst vyexportovaný textový soubor a vykreslit vypočítaný akustický výkon. Před spuštěním aplikace si uživatel může nastavit frekvenci, na které ho přímo zajímá akustický výkon, který se zobrazí v indikátoru SoundPower. Co je klíčové pro tuto aplikaci, bez níž by výpočet nebyl možný, je zadání plochy měřeného bodu. V mém případě byla plocha měřeného bodu $0,0217\text{m}^2$. Po zadání klíčových parametrů můžeme spustit aplikaci, která nás vyzve pro vybrání vstupního souboru. Uživatel vybere soubor, který si uložili z měření. Aplikace tento soubor načte a zobrazí průběh intenzit v daných bodech. Z počtu měření, tedy z velikosti pole hodnot, aplikace zobrazí uživateli počet provedených měření v indikátoru. A pro uživatele nejdůležitější věc, která ho zajímá, je vypočtený akustický výkon tělesa, v mém případě reproboxu buzeného bílým šumem. Ukázka aplikace pro výpočet akustického výkonu:

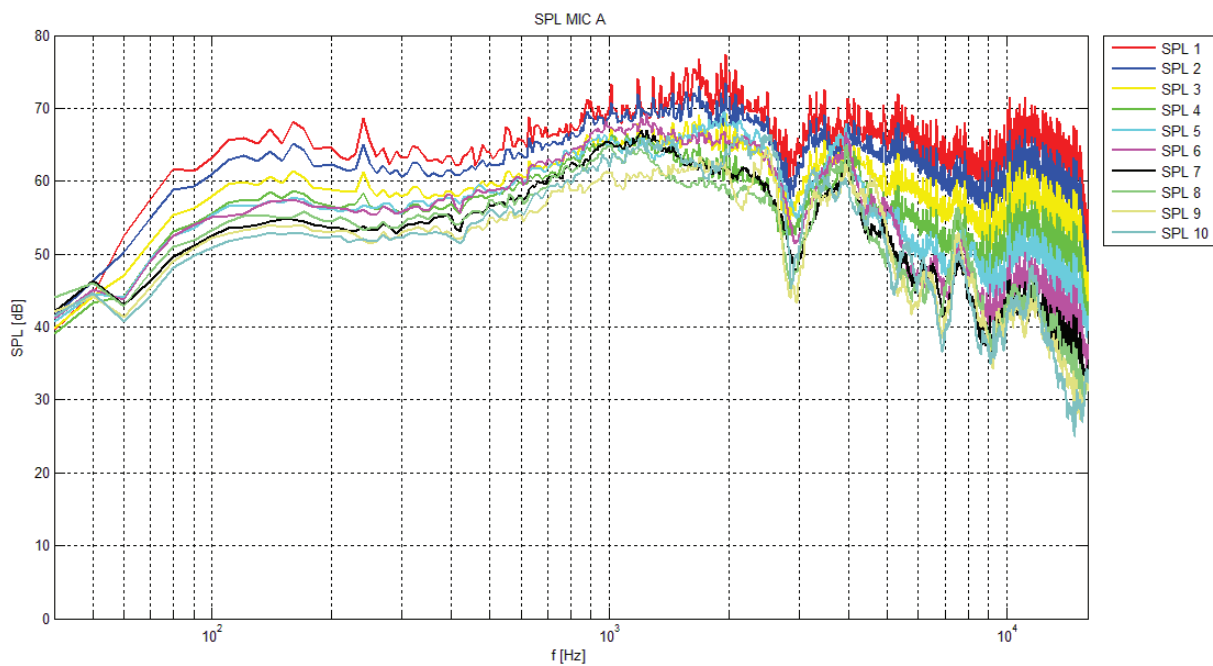


Obrázek 18: Ukázka aplikace pro výpočet akustického výkonu.

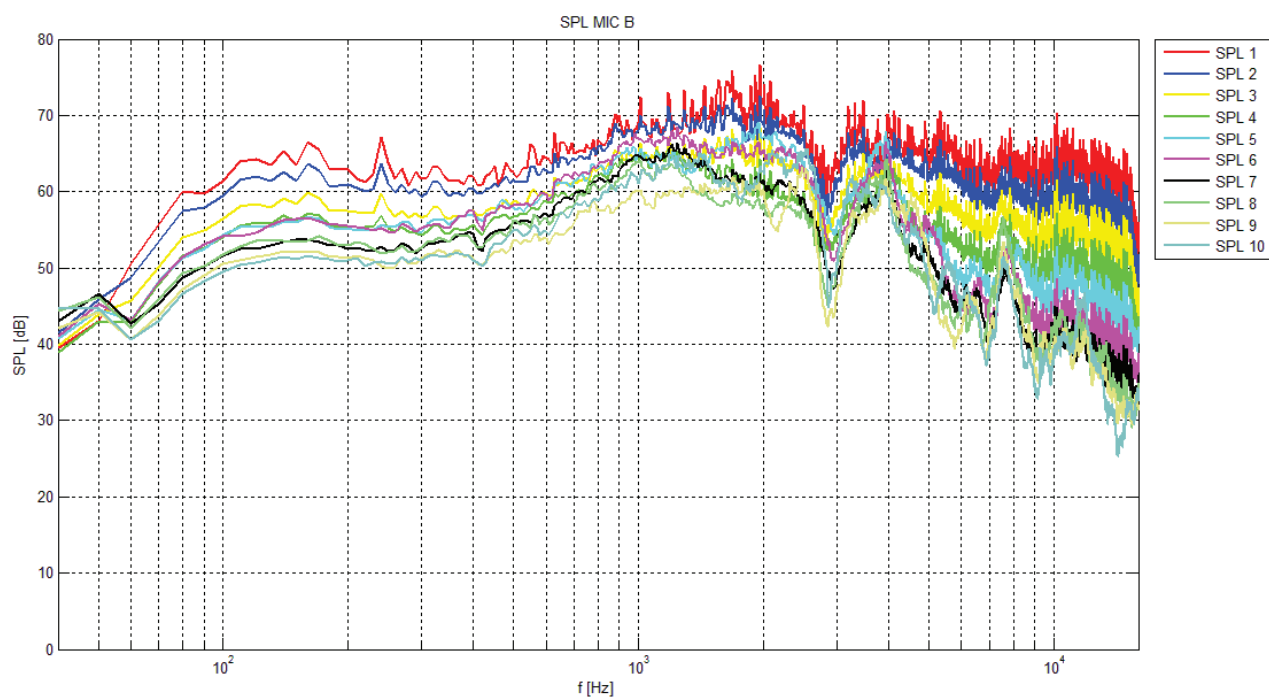
Jak je uvedeno výše, měření jsem prováděl pro reproduktor umístěný v reproboxu a reproduktor bez zadní části ozvučnice, tedy umístěného ve volném prostoru. Naměřené průběhy jsou zobrazené v následujících grafech.



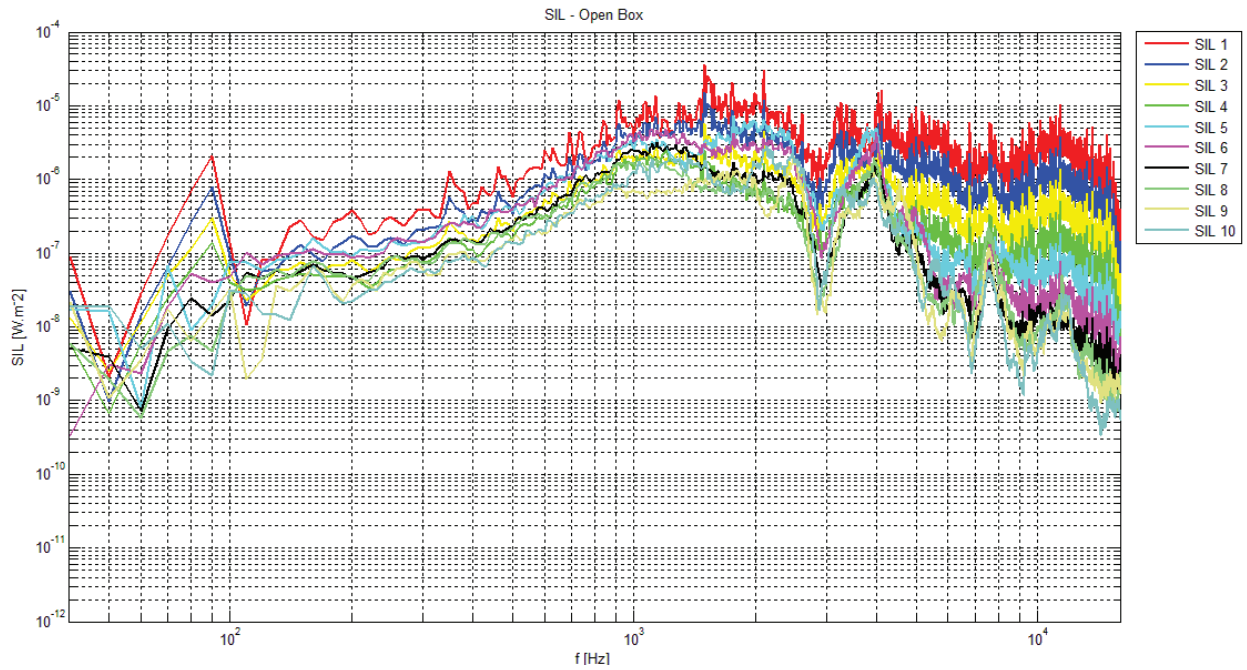
Graf 12: Změřený akustický výkon - červeně reproduktor v otevřené ozvučnici, modře v uzavřené ozvučnici.



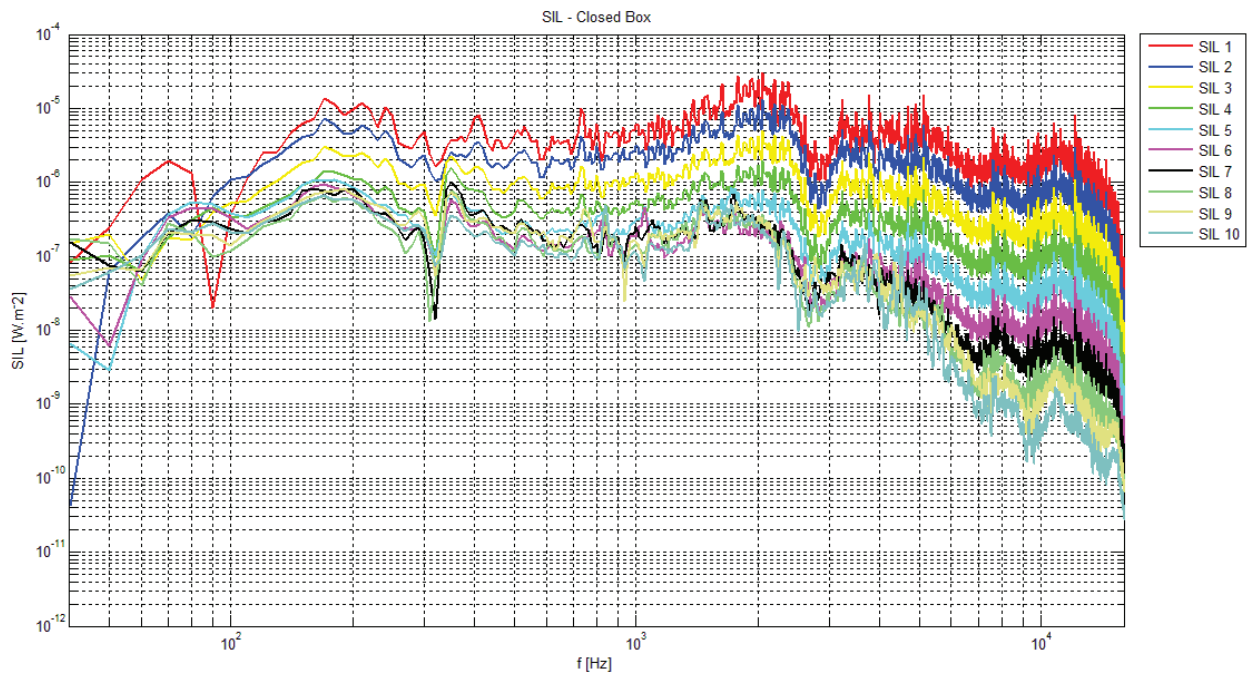
Graf 13: Naměřené SPL na mikrofonu A v daných bodech.



Graf 14: Naměřené SPL na mikrofonu B v daných bodech.



Graf 15: Naměřená akustická intenzita reproduktoru umístěného v otevřené ozvučnici.



Graf 16: Naměřená akustická intenzita reproduktoru umístěném v uzavřené ozvučnici.

6 ZHODNOCENÍ MĚŘENÍ

Výpočtem jsem zjistil, že teoretický zbytkový index δ_{pl} měřicích mikrofonů je 18,03 dB. Tuto hodnotu jsem ověřoval měřením pomocí dvou kalibračních přístrojů, prvně pomocí pistonfonu, kde zbytkový index δ_{pl} byl naměřen 22,17dB. Dále jsem zjišťoval, jaký bude δ_{pl} na frekvenci 250Hz při umístění mikrofonního páru do přípravku G.R.A.S. 51AB. Tento přípravek se jeví jako kvalitnější, protože změřený δ_{pl} byl cca 34dB. Dále jsem zjišťoval vliv chyby fáze měřicí karty na index zbytkové intenzity. Dostupné měřicí karty by všechny splnily požadavek, který udává norma, a to je $\delta_{pl} \geq 29\text{dB}$ pro frekvence vyšší než 300Hz. Závislost indexu δ_{pl} je uvedena v Graf 9. Tedy vliv chyby fáze měřicí karty na měřicí soustavu je zanedbatelný. Z porovnání měřicích karet jsem jako nejvhodnější kartu pro měření akustické intenzity vybral NI PXI 4461, která má z dostupných měřicích karet nejnižší fázovou chybu. Veškerá měření poté probíhala za pomoci měřicí karty NI PXI 4461. Měření δ_{pl} celé měřicí soustavy s intenzitní sondou je uvedeno v Graf 10. Toto měření bylo prováděno v přípravku G.R.A.S. 51AB a průměrný zbytkový index vyšel 29,71dB. Norma požaduje, aby soustava měla zbytkový index 18dB, naše soustava ho má o 11,72dB lepší. Měření akustické intenzity pomocí přípravku G.R.A.S. 51AB s instalovanou vložkou pro zjišťování akustické intenzity je zobrazeno v Graf 11.

7 ZÁVĚR

Tato práce obsahuje teoretický rozbor měřících metod akustické intenzity, zvláště se pak věnuje měření p-p metodou. Jsou zde popsány zdroje chyb a postup při kalibraci sondy pro měření akustické intenzity. Dále práce obsahuje přehled dostupného vybavení v laboratoři VUT, včetně kalibračních přípravků.

Výpočtem jsem určil zbytkový index měřicí sondy G.R.A.S. 50AI, který jsem poté experimentálně změřil. Dále v této práci byly ověřovány měřicí karty firmy National Instruments. Z kalibrace jsem zjistil, že všechny dostupné měřicí karty vyhovují normě a jsou tedy vhodné pro měření akustické intenzity. Fázová chyba měřicí karty tedy nemá téměř žádný vliv na celkový zbytkový index.

V prostředí LabVIEW jsem vytvořil aplikaci Kalibrace, která by měla být univerzální pro použití s jakoukoli měřicí sondou a měla by být schopná pomocí výše uvedeného postupu zjistit parametry jak samotné měřicí karty, tak celé měřicí soustavy. Dále jsem vytvořil aplikaci, pomocí které je možné měřit akustickou intenzitu zdrojů zvuků. Tato aplikace se jmenuje Měření SIL a je výhradně určená pro práci s intenzitní sondou G.R.A.S. 50AI-B. Kompatibilita s jinými typy sond pro měření akustické intenzity není zaručena zejména kvůli možnosti dálkového ovládní měření pomocí rozhraní RS 232. Pokud by uživatel tuto funkci nechtěl využívat, musela by aplikace projít menší úpravou a bylo by možné používat i sondy jiných firem a ovládní by bylo možné přímo v aplikaci na PC. Pro sondu G.R.A.S. 50AI-B je možné obojí, jak ovládní pomocí RS 232, tak přímo v aplikaci na PC.

Z obou vytvořených aplikací je možné ukládat naměřená data do textových souborů, která se dále dají zpracovat pomocí Excelu nebo jiných programů.

Posledním úkolem zadání bylo ověření funkčnosti použitých algoritmů na vhodném zdroji zvuku. Jako vhodný zdroj zvuku jsem použil reprosoustavu k PC, u které jsem měřil akustický výkon s reproduktorem umístěným v uzavřené a otevřené ozvučnici. Dle teoretických předpokladů mělo při umístění reproduktoru v otevřené ozvučnici dojít na nízkých kmitočtech k akustickému zkratu a tedy nižšímu vyzářenému výkonu než při umístění reproduktoru do ozvučnice. Tento teoretický předpoklad jsem ověřil měřením reproboxu buzeným bílým šumem v bezodrazové komoře. K vypočtení akustického výkonu jsem vytvořil třetí aplikaci s názvem Výpočet Pacoustic, do které se vloží naměřená data z aplikace Měření SIL. Vypočítaný akustický výkon a srovnání měření reproduktoru v ozvučnici a mimo ní zobrazuje Graf 12, kde se teorie jasně potvrdila. Z tohoto měření tedy usuzuji, že algoritmy použité v aplikacích jsou správné a je tedy možné aplikace k účelům měření akustické intenzity používat.

8 LITERATURA

[1] Thomas D. Rossing. *Springer Handbook of Acoustics*. New York: Springer Science, 2007. ISBN 978-0-387-30446-5.

[2] Jacobsen, F. *Sound Intensity and its measurement and applications*. Note no 31262, DTU Denmark. 40 pp. October 2011.

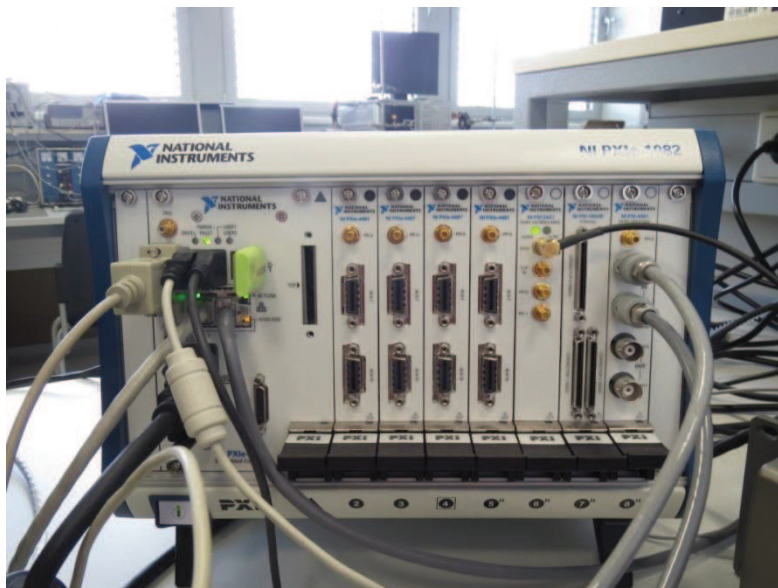
[3] National Instruments. [online]. [cit. 2014-01-16]. Dostupné z: <http://czech.ni.com/>

[4] Brüel&Kjær. [online]. [cit. 2014-01-16]. Dostupné z: <http://www.bksv.com/>

[5] G.R.A.S. [online]. [cit. 2014-01-20]. Dostupné z: <http://www.gras.dk/>

9 PŘÍLOHY

9.1 Obrazová dokumentace z měření



Obrázek 19: Měřicí zařízení NI PXIe 1082 s instalovanou měřicí kartou NI PXI 4461 (karta ve slotu č.8)



Obrázek 20: Intenzitní sonda G.R.A.S. 50AI - B s instalovanou distanční vložkou o velikosti 12mm



Obrázek 21: Napájecí modul G.R.A.S. 12AB pro intenzitní sondu s připojenou sondou, komunikací RS232 a výstupy zapojenými do NI PXI 4461



Obrázek 22: Ukázka z měření reproduktoru umístěného v otevřené ozvučnici. Sonda je ve stavu READY, po stisku modrého tlačítka by se spustilo měření.

9.2 Odevzdávané součásti práce na přiloženém CD:

- Vytvořený software pro kalibraci a měření akustické intenzity včetně aplikace pro výpočet akustického výkonu
- Naměřená data z kalibrací a experimentu s reproduktorem
- Produktové listy použitých zařízení
- M-file soubory pro zpracování naměřených dat pomocí programu Matlab