

Západočeská univerzita v Plzni

Fakulta elektrotechnická

**KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTROTECHNIKY A
TELEKOMUNIKACÍ**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Software pro impedanční trubici

Autor práce: Bc. Tomáš Burda

Vedoucí práce: Ing. Oldřich Tureček, PhD.

PLZEŇ 2013

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Tomáš BURDA**
Osobní číslo: **E11N0052P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a aplikovaná informatika**
Název tématu: **Software pro impedanční trubici**
Zadávací katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

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

1. Prostudujte možnosti měření činitele zvukové pohltivosti v impedanční trubici.
2. Navrhněte a realizujte program, který pomocí měřicí karty a impedanční trubice dostupné v akustických laboratořích FEL umožní měření a výpočet činitele zvukové pohltivosti měřených akustických materiálů.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

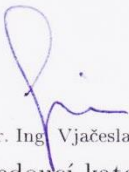
Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Oldřich Tureček, Ph.D.**
Katedra technologií a měření
Konzultant diplomové práce: **Ing. Petr Kropík, Ph.D.**
Katedra teoretické elektrotechniky
Datum zadání diplomové práce: **15. října 2012**
Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2013**




Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan

L.S.


Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Anotace

Burda, T. Software pro impedanční trubici. Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací, Západočeská univerzita v Plzni – Fakulta elektrotechnická, 2013, 52 s., vedoucí: Ing. Oldřich Tureček, PhD.

Tato práce se zabývá dostupnými metodami pro měření činitele zvukové pohltivosti impedanční trubici a realizací metody přenosové funkce ve vývojovém prostředí LabVIEW s využitím měřicí karty od společnosti National Instruments.

Klíčová slova:

Interferometr, Impedanční trubice, LabVIEW

Abstract

Burda, T. Impedance tube software. Department of applied electronics and telecommunication, University of West Bohemia in Pilsen – Faculty of electrical engineering, 2013, 52 p., head: Ing. Oldřich Tureček, PhD.

This work is concerned with complex study of sound absorption factor in impedance tube and designing of automated measuring software in LabVIEW development system. Application will use transfer method function and measuring module NI9234 by National Instruments.

Keywords

Interferometer, Impedance tube, LabVIEW

Prohlášení:

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

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

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

v Plzni, dne

.....

Podpis diplomanta

Obsah

1. Úvod.....	1
2. Základní pojmy	2
3. Metody pro měření v Interferometru	5
3.1 Metoda poměru stojaté vlny.....	5
3.2 Metoda přenosové funkce	7
4. Teoretický rozbor měřicí metody	10
5. Měřicí postup	11
5.1 Předběžná měření a kalibrace.....	11
5.2 Umístění měřeného vzorku	14
5.3 Samotné měření.....	15
5.4 Protokol o měřicí zkoušce.....	18
6. Zdroje chyb	20
6.1 Systematické chyby.....	20
6.2 Náhodná chyba.....	21
6.3 Přesnost přenosové funkce.....	22
7. Prostředky pro měřicí úlohu	23
7.1 Měřicí karta NI 9234.....	23
7.1 Měřicí mikrofón G.R.A.S. 40PH	26
7.2 Vývojové prostředí LabVIEW	28
8. Nutné úpravy interferometru	35
8.1 Návrh mikrofonních držáků.....	35
9. Programové řešení	36
9.1 Získání dat z měřicí karty.....	36
9.2 Výpočet přenosové funkce H_{12}	37
9.3 Hlavní část programu	38

9.4	Front panel a prezentace dat.....	39
9.2	Ostatní subVI	40
10.	Měření.....	41
10.1	Přípravy před měřením	41
10.2	Naměřené hodnoty.....	43
11.	Závěr	44
	Seznam obrázků.....	45
	Seznam tabulek	46
	Seznam použitých zdrojů.....	46
	Zdroje obrázků.....	47
	Příloha.....	48
	Příloha 1: Program pro načtení dat	48
	Příloha 2: Program pro výpočet přenosové funkce H_{12}	49
	Příloha 3: Program pro výpočet reflexe.....	50
	Příloha 4: Hlavní program, první část.....	51
	Příloha 5: Hlavní program, druhá část	52

Poděkování

Nejprve bych chtěl poděkovat svým rodičům za jejich stálou podporu, která mi umožnila studovat.

Dále bych rád touto cestou poděkoval vedoucímu mé diplomové práce, panu Ing. Oldřichu Turečkovi PhD. za jeho cenné rady a připomínky, které mi vždy s ochotou poskytoval při zpracovávání této práce.

1. Úvod

Tato diplomová práce se zabývá problematikou z oblasti akustiky – konkrétně měřením akustických parametrů obkladových materiálů. Tato práce navazuje na diplomovou práci M. Vávry (Měření činitele zvukové pohltivosti v interferometru) z roku 2009, jejímž obsahem byl návrh a konstrukce samotného interferometru.

Účelem této práce je navrhnout software pro běžná provozní měření pomocí interferometru, a tím i ověření jeho funkčnosti. Interferometr bude vybaven měřicí kartou s kompatibilními mikrofony a kartou pro generaci signálů, která umožní plné programové ovládání. Měřicí karta musí být minimálně dvoukanálová, schopná simultánního vzorkování obou kanálů a bude vybrána z nabídky National Instruments.

Řízení těchto karet bude zajištěno softwarem s grafickým uživatelským rozhraním pro ovládání programu, jako vývojová platforma může být použito prostředí LabVIEW, CVI nebo Microsoft Visual studio.

2. Základní pojmy

Impedanční trubice

Impedanční trubici neboli interferometrem je myšleno zkušební zařízení skládající se z držáku měřeného vzorku (např. výřez z obkladového materiálu pro zvukové komory) na jednom konci a držáku generátoru měřicího signálu. Měřicí mikrofony je možné umístit buď na bok, nebo vrchní stranu zařízení. Pojem impedanční trubice je obecný, zařízení může mít libovolný průřez, ale je třeba zahrnout případné korekce do výpočtů. Doporučený je tvar kruhový či pravoúhlý, který je popsán v normě [1]. Impedanční trubice musí mít konstantní průřez a tuhé hladké vnitřní stěny, aby se co nejvíce zamezilo ztrátám při šíření zvukových vln. Trubice také musí být dostatečně masivní, aby nedocházelo k rozkmitávání stěn (norma doporučuje tloušťku stěn okolo 10% příčného rozměru zařízení). Také je nutné při konstrukci dbát na řádné utěsnění veškerých otvorů (pro mikrofony, vývody kabelů pro zdroj signálu, atd.).

Činitel zvukové pohltivosti

Uvažuje se při kolmém dopadu akustických vln. Značí se α a představuje poměr nenávratně vstupujícího akustického výkonu do měřeného materiálu k akustickému výkonu dopadající akustické vlny.

Činitel odrazu akustického tlaku

Je uvažován při kolmém dopadu akustických vln. Značí se r a je to komplexní poměr amplitudy odražené vlny k amplitudě dopadající rovinné vlny v **referenční rovině**, která představuje místo zkušební vzorku.

Fourierova transformace a rychlá Fourierova transformace

Je prostředkem analýzy signálů z hlediska frekvenční parametrů a závislosti. Fourierova transformace představuje přechod z časové oblasti do frekvenční a je formulována následujícím vztahem:

$$X(f) = \mathbf{F}\{x(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (2.1)$$

Pro reálné situace není možné pracovat se spojitým signálem a analyzovanou sekvencí je třeba navzorkovat, potom hovoříme o diskrétní Fourierově transformaci (DFT), která se matematicky popisuje takto:

$$X_k = \sum_{i=0}^{n-1} x_i e^{-2\pi i k/n}, \text{ pro } k = 0, 1, 2, \dots, n-1 \quad (2.2)$$

Nevýhodou této koncepce je, že vyžaduje N^2 komplexních operací, které jsou náročné na výpočetní čas. Proto se na programové výpočty využívá upravený algoritmus nazývaný **FFT – Fast Fourier Transform**.

Nejčastější metodou FFT je Cooley-Tukey algoritmus sloužící hlavně k redukci času výpočtu ($N \cdot \log N$ operací). DFT přepíšeme do tvaru:

$$F_k = f_0 \left(e^{-\frac{j2\pi}{N}} \right)^0 + \dots + f_{N-1} \left(e^{-\frac{j2\pi}{N}} \right)^{k(N-1)} = \left[f_0 \left(e^{-\frac{j2\pi}{N}} \right)^0 + f_2 \left(e^{-\frac{j2\pi}{N}} \right)^{2k} + \dots + f_{N-2} \left(e^{-\frac{j2\pi}{N}} \right)^{(N-2)k} \right] + \left(e^{-\frac{j2\pi}{N}} \right)^k \left[f_1 \left(e^{-\frac{j2\pi}{N}} \right)^0 + f_3 \left(e^{-\frac{j2\pi}{N}} \right)^{2k} + \dots + f_{N-1} \left(e^{-\frac{j2\pi}{N}} \right)^{(N-2)k} \right] \quad (2.3)$$

Touto úpravou nám vznikly dva vektory, každý $N/2$ složkách, které se snadno zkombinují. První část se získá z rozdělení na dvě transformace o poloviční velikosti. Zbývá část (pro prvky $> N/2$) se získá z úvahy:

$$\left(e^{-\frac{j2\pi}{N}} \right)^i = f_0 \left(e^{-\frac{j2\pi}{N}} \right)^{\left(\frac{N}{2}\right)+i} \text{ pro } i = 0, \dots, \left(\frac{N}{2}\right) - 1 \quad (2.4)$$

Z vztahu (2.4) je vidět, že se výrazy pro F_k liší pouze v $\left(e^{-\frac{j2\pi}{N}}\right)^k$, transformace jsou stejné. Pokud tedy závorky ze vztahu (2.3) přepíšeme jako $F_{sudá}$ a $F_{lichá}$, tak můžeme formulovat vztah pro FFT takto:

$$F_k = F_{sudá} + \left(e^{-\frac{j2\pi}{N}}\right)^k F_{lichá}, F_{k+N/2} = F_{sudá} - \left(e^{-\frac{j2\pi}{N}}\right)^k F_{lichá} \text{ pro } k = 0, \dots, \left(\frac{N}{2}\right) - 1 \quad (2.5)$$

Postup dělení se dá dále provádět až do skupin vzorků po dvou. Snížení doby výpočtů je vidět na této úvaze:

$$2 * \left(\frac{N}{2}\right)^2 = \frac{N^2}{2} < N^2 \quad (2.6)$$

Normálová povrchová impedance

Značí se Z a je podílem komplexního akustického tlaku a normálové složky komplexní akustické rychlosti na jednom kmitočtu. Její obrácenou hodnotou je **normálová povrchová admitance**.

Komplexní akustický tlak

Značí se \mathbf{p} a je výsledkem Fourierovy transformace časového průběhu tlaku.

Součinem tlaků v místě p_2 a komplexně sdruženým tlakem z místa p_1 získáme parametr zvaný **vzájemné spektrum** (\mathbf{S}_{12}). Součinem p_1 a p_1^* získáme **autospektrum** (\mathbf{S}_{11}).

Přenosová funkce

Značí se H_{12} a je definována komplexním podílem S_{12} a S_{11} , viz dále.

3. Metody pro měření v Interferometru

Metody pro měření akustických parametrů měřených materiálů jsou dané mezinárodní normou ISO 10534. Následující popis metod je založen na české verzi této normy [1] a dělí se na dvě části:

Akustika – Určování činitele zvukové pohltivosti a akustické impedance v impedančních trubcích:

Část 1 – Metoda poměru stojaté vlny

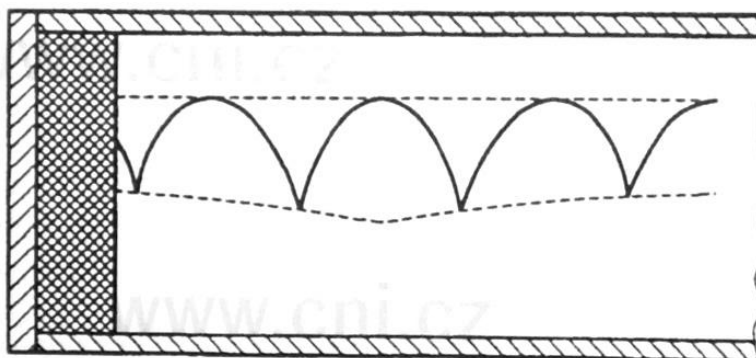
Část 2 – Metoda přenosové funkce

3.1 Metoda poměru stojaté vlny

Metoda je založena na vyhodnocení změřených hodnot amplitud v maximech a minimech. Maximum stojaté vlny se nachází v místě, kde je dopadající a odražená vlna ve fázi a minimum v místě protifáze. V této metodě je mikrofonní sonda pohyblivá a jejím posuvem se snímají amplitudy v různých místech měřicího zařízení. Činitel zvukové pohltivosti potom dopočítáme pomocí následujícího vzorce:

$$\alpha = \frac{4}{\frac{p_{min} + p_{max}}{p_{max} p_{min}} + 2} \quad (3.1)$$

Pro určení zbylých parametrů je třeba měřit vzdálenost mezi prvním akustickým minimem a referenční rovinou.



Obrázek 3.1 Narušený obrazec stojaté vlny

V této metodě se musí před samotným měřením provést tři doplňující zkoušky. Nejprve je třeba ověřit poměr stojaté vlny. Tato zkouška spočívá v záznamu obrazce stojatých vln a vyhodnocení obálky, která musí být buď vodorovná, nebo narůstat směrem k reproduktoru. Poměry obrazců nesmí být menší než 45 dB. Tento záznam se pořizuje na všech třetinooktávových kmitočtech (pokud by došlo k velkým neshodám, je třeba měřit i mimo tyto kmitočty).

Další zkouškou je dynamický rozsah mikrofonní sondy. Zkouška se dělí na dvě části, v první se měří pohybem sondy s vypnutým zdrojem signálu. Tímto se určí hladina šumu a hluku pozadí. V druhé části se měří při zapnutém zdroji signálu a utěsněném snímacím otvoru. Měření probíhá na kmitočtech z první zkoušky. Požadavek je splněn, pokud je přijímaný signál o 5 dB vyšší při utěsněném otvoru, anebo přesahuje 10 dB při vypnutém zdroji signálu. V opačném případě se zkouška opakuje s vyšší amplitudou.

Poslední zkouška je kontrola vibrací trubice. Realizuje se zátkou zasunutou do izolačního materiálu před reproduktorem. Zátka by měla mít délku 0,5 – 1 m a měla by být zakryta z obou stran deskami upevněnými tak, aby nebyly v přímém kontaktu se stěnou trubice. Následně se opět provede měření na stejných kmitočtech jako v předchozích případech. Zaznamenané hladiny musejí být výrazně nižší, pokud nejsou, dochází k přenosům vibrací z reproduktoru na trubici a je potřeba reproduktor lépe utěsnit nebo zvolit tlustější stěny trubice.

3.2 Metoda přenosové funkce

Metoda je založena na buzení rovinných vln v trubici (šumem nebo klouzavým tónem) a měření akustického tlaku na dvou místech interferometru. Ze získaných hodnot komplexního akustického tlaku se počítá komplexní akustická přenosová funkce. Z té je možno určit činitele zvukové pohltivosti a impedanci akustického materiálu (admitanci). Všechny spočítané veličiny jsou funkcí kmitočtu.

Tato měřicí metoda umožňuje měření pomocí jednoho nebo dvou mikrofonů, měření se dvěma mikrofony je rychlejší a přesnější metoda, ale vyžaduje provést při každém měření korekční postup (minimalizace rozdílů v amplitudě a fázi). Postup pro jeden mikrofon je zdlouhavější, vyžaduje speciální buzení a je určen spíše pro popisování laděných rezonátorů.

3.2.1 Požadavky na části interferometru

Rozměry interferometru

Rozměry celého měřicího systému určují pracovní frekvence.

Pracovní kmitočtový rozsah:

$$f_d < f < f_h \quad (3.2)$$

f_d – dolní pracovní kmitočet (omezeno přesností zařízení pro zpracování signálu)

f – pracovní kmitočet

f_h – horní pracovní kmitočet (volen tak, aby se zabránilo jiných než rovinných vlnových módů)

Podmínka pro f_h v kruhové trubici:

$$d < 0,5\lambda_h; f_h \cdot d < 0,5c_0 \quad (3.3)$$

Vzdálenost s mezi mikrofony musí být zvolena tak, aby:

$$f_h \cdot s < 0,45c_0 \quad (3.4)$$

Vzdálenost s mezi mikrofony by měla přesáhnout 5% vlnové délky odpovídající dolnímu kmitočtu – větší vzdálenost zvyšuje přesnost.

Mikrofony

Pokud je použito více mikrofonů, je třeba, aby byly stejného typu. Pro mikrofony zabudované do stěny trubice jsou normou doporučeny tlakové mikrofony a pro zabudování dovnitř trubice jsou doporučeny mikrofony pro volné pole. Průměr mikrofonů zabudovaných do stěny by měl být menší než 20% jejich vzájemné vzdálenosti. Mikrofony musejí být usazeny v trubici a pečlivě zaizolovány, aby nedocházelo ke ztrátám netěsnostmi.

Držák vzorku

Držák by měl být zabudován do impedanční trubice nebo tvořit oddělenou část, která je během měření pevně spojena. U kruhových trubic je doporučeno, aby byl vzorek přístupný z předního i zadního konce držáku zkušební vzorku – kvůli kontrole umístění a rovinnosti lícového povrchu a umístění rubu. Zadní deska držáku musí být tuhá – kvůli kalibracím a kontrolním měřením.

Zařízení pro zpracování signálu

Zařízení by se mělo skládat ze zesilovače a dvoukanalového (pro metodu dvou mikrofonů) systému pro rychlou Fourierovou transformaci. Dynamický rozsah

analyzátoru by měl být větší než 65 dB. Veškeré chyby v počítané přenosové funkci H_{12} nesmí přesáhnout 0,2 dB.

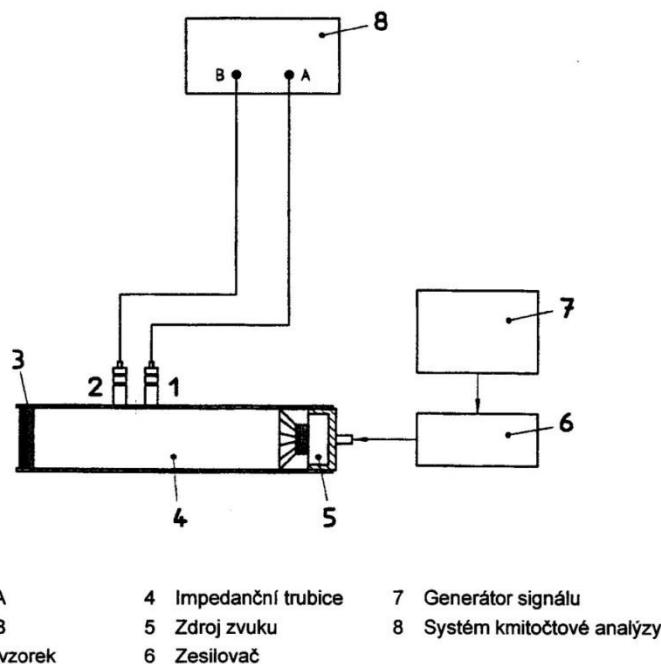
Reproduktor

Pro nižší kmitočty je normou doporučen membránový reproduktor. Plocha reproduktoru by měla splňovat alespoň 2/3 velikosti z celkového průřezu trubice. Izolace musí být zajištěna tak, aby se zabránilo bočnímu přenosu zvuku vzduchem k mikrofonům – toho se dosáhne zabudováním do zvukově utěsněné skříně odizolované pružným těsněním.

Generátor signálu

Generátor musí umět vytvářet signál s plochou spektrální hustotou v daném kmitočtovém rozsahu. Doporučené jsou tyto průběhy:

Náhodný, pseudonáhodný, periodický pseudonáhodný nebo klouzavý tón.



Obrázek 3.2 Příklad uspořádání měřicího zařízení

4. Teoretický rozbor měřící metody

Pro výpočet akustických parametrů bude použita **metoda přenosové funkce**, pro kterou byl interferometr navržen a zkonstruován v rámci diplomové práce [9], na níž je navazováno. Tato metoda byla zvolena zejména díky rychlosti a jednoduchosti jejího použití.

Metoda vychází ze skutečnosti, že všechny akustické parametry je možné postupně určit z přenosové funkce získané během jednoho měření.

Akustické tlaky dopadajících a odražených vln se dají popsat vztahy:

$$p_I = \hat{p}_I e^{jk_0 x} \text{ a } p_R = \hat{p}_R e^{-jk_0 x} \quad (4.1, 4.2)$$

kde \hat{p}_I a \hat{p}_R jsou amplitudy v referenční rovině a k_0 je komplexní vlnové číslo.

Pomocí vzorců (4.1 a 4.2) můžeme vyjádřit akustický tlak v místě mikrofonů:

$$p_1 = \hat{p}_I e^{jk_0 x_1} + \hat{p}_R e^{-jk_0 x_1} \quad (4.3)$$

$$p_2 = \hat{p}_I e^{jk_0 x_2} + \hat{p}_R e^{-jk_0 x_2} \quad (4.4)$$

Přenosovou funkci je možné určit jak pro přenos z místa mikrofonu 1 do místa mikrofonu 2, tak pro dopadající a odraženou vlnu tímto způsobem:

$$H_{I,R} = \frac{p_{2I,R}}{p_{1I,R}} = e^{-jk_0(x_1-x_2)} \quad (4.5)$$

Samotná přenosová funkce H_{12} se získá podílem akustických tlaků v místech mikrofonů 1 a 2. Poměry mezi dopadající a odraženou vlnou jsou vyjádřeny **činitelem odrazu zvuku r** .

$$H_{12} = \frac{p_2}{p_1} = \frac{e^{jk_0 x_2} + r e^{-jk_0 x_2}}{e^{jk_0 x_1} + r e^{-jk_0 x_1}} \quad (4.6)$$

Samotný činitel odrazu zvuku:

$$r = \frac{H_{12} - H_I}{H_R - H_{12}} e^{2jk_0 x_1} \quad (4.7)$$

5. Měřící postup

5.1 Předběžná měření a kalibrace

Určení akustického středu mikrofonu

Akustický střed mikrofonu se musí určit v případech, kdy není shodný s geometrickým středem mikrofonu. Chybné určení má za následek špatně umístěný střed mikrofonu. V normě [1] není určen žádný postup určení či kalibrace středu mikrofonu pro případ mikrofonů namontovaných do boku impedanční trubice, proto budou tyto chyby zahrnuty do části nejistot (viz část Chyby). Jediné doporučení je použít mikrofony s co nejmenším průměrem membrány vzhledem k jejich vzájemné poloze.

Kalibrace mikrofonu

Před každou zkouškou by měla být amplituda signálu v mikrofonu kalibrována s přesností na 0,3 dB v celém pracovním rozsahu frekvencí. Zkouška pistonfonem na jednom kmitočtu je možná, pokud má mikrofon lineární kmitočtovou odezvu v celém pracovním pásmu.

Měření teploty a tlaku

Teplota a tlak se musí změřit před každou zkouškou. Teplota pomocí přístroje s přesností nejméně 0,5 K. Je také důležité, aby měření teploty proběhlo až po stabilizaci teploty v trubici – proto by měl být generátor signálu spuštěn už 10 - 15 minut před samotnou zkouškou.

Odstup signálu od šumu

Spektrum akustického tlaku musí být změřeno bez zapnutého zdroje a se zapnutým zdrojem signálu. Spektrum zdroje signálu musí být nejméně od 10 dB vyšší než šum okolí. Kmitočty, které podmínku nesplňují, musejí být uvedeny v protokolu měření.

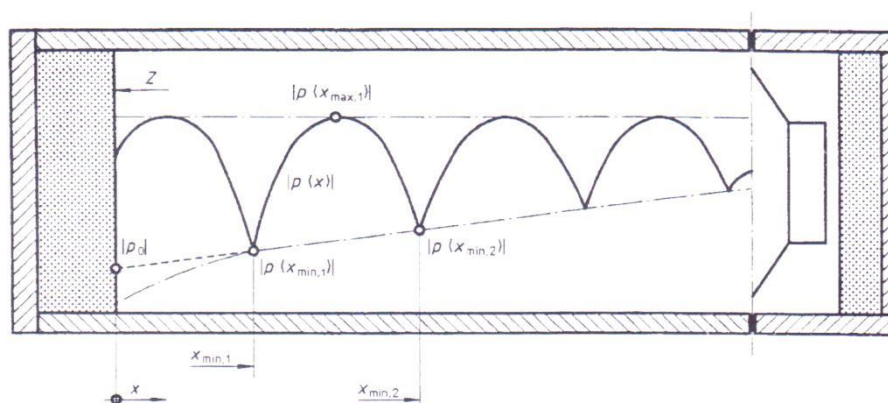
Určení korekce na útlum v trubici

Útlum v trubici vzniká během šíření zvukových vln tepelnými a viskózními ztrátami. Jeho důsledkem je nárůst amplitud v akustických minimech šířené vlny, z čehož je možné soudit, že tento útlum se projeví až v dlouhých trubících. Dlouhou trubici [1] stanovuje od vzdálenosti mezi zdrojem signálu a prvním mikrofonem větší než 3 průměry trubice nebo trojnásobek maximálního příčného rozměru. Pak se musí provést korekce na útlum.

Útlum lze popsat:

$$k_0 = k'_0 - jk''_0 \quad (5.1)$$

kde $k'_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$ a k''_0 je činitel zeslabení [$\text{Np} \cdot \text{m}^{-1}$]. Pro určení tohoto činitele experimentální metodou je potřeba změřit alespoň dvě tlaková minima, pokud to není možné, tak se na určení toho činitele použije metoda odhadu.



Obrázek 5.1 Korekce na útlum v trubici

Experimentální určení korekce

Amplitudy v minimech jsou dány vztahem: (vychází z (4.3), (4.4) a (4.6))

$$|p(x_{max,min;n})| = |p_0| \cdot |e^{k_0''_{min,max;n}} - |r| \cdot e^{-k_0''_{min,max;n}}| \quad (5.2)$$

Z vzorce (4.6) je možné odvodit vztah pro poměr stojaté vlny pomocí n-tého maxima a minima:

$$S_n = \frac{p(x_{max,n})}{p(x_{min,n})} = \frac{e^{k_0''_{max,n}} + |r|e^{-k_0''_{max,n}}}{e^{k_0''_{min,n}} - |r|e^{-k_0''_{min,n}}} \quad (5.3)$$

Stejným způsobem lze odvodit i absolutní činitel odrazu:

$$|r| = \frac{s_n e^{k_0''_{min,n}} - e^{k_0''_{max,n}}}{s_n e^{-k_0''_{min,n}} + e^{-k_0''_{max,n}}} \quad (5.4)$$

Z vlnové teorie lze tvrdit, že $x_{max,n} = x_{min,n} + \frac{\lambda_0}{4}$, pak lze absolutní činitel odrazu odvodit tímto způsobem:

$$|r| = 2k_0''_{min,n} \left(\frac{s_n - e^{k_0'' \frac{\lambda_0}{4}}}{s_n + e^{-k_0'' \frac{\lambda_0}{4}}} \right) \quad (5.5)$$

Můžeme tedy zapsat, že platí $k_0''_{min,n} = 4(k_0'' \frac{\lambda_0}{4}) (\frac{x_{min,n}}{\lambda_0})$, potom je $k_0'' \frac{\lambda_0}{4}$ veličina potřebná pro korekci. Změříme ji v trubici měřením bez vloženého vzorku, aby platilo, že $|r| = 1$. Potom můžeme základní vztahy pro akustický tlak v maximum a minimum přepsat:

$$|p(x_{max,n})| = 2|p_0| \cdot \cosh(k_0'' x_{max,n}) \quad (5.6)$$

$$|p(x_{min,n})| = 2|p_0| \cdot \sinh(k_0'' x_{min,n}) \quad (5.7)$$

Pokud změříme maximum mezi dvěma minimy, pak můžeme vyjádřit veličinu Δ_n tímto způsobem:

$$\Delta_n = \frac{|p(x_{min,n+1})| - |p(x_{min,n})|}{|p(x_{max,n})|} \quad (5.8)$$

$$\text{Pak } \Delta_n = 2 \sinh \left(k_0'' \frac{\lambda_0}{4} \right) \quad (5.9)$$

Z těchto vzorců už lze vyjádřit korelační veličinu:

$$k_0'' \frac{\lambda_0}{4} = \operatorname{arcsinh} \frac{\Delta_n}{2} = \ln \left[\frac{\Delta_n}{2} + \sqrt{\frac{\Delta_n^2}{4} + 1} \right] \quad (5.10)$$

nebo

$$e^{\pm k_0'' \frac{\lambda_0}{4}} = \left(\frac{\Delta_n}{2} + \sqrt{\frac{\Delta_n^2}{4} + 1} \right) \quad (5.11)$$

Určení korekce metodou odhadu

Pokud jde o provozní měření, nebo se pohybujeme v oblastech nízkých kmitočtů, je možné s dostatečnou přesností činitel k_0'' určit takto:

$$k_0'' = 1,94 \times 10^{-2} \frac{\sqrt{f}}{c_0 d} \quad (5.12)$$

kde d je průměr u kruhových trubici nebo poměr čtyřnásobku plochy (řezu) k obvodu a f je kmitočet. Výpočet je však ideální jen pro trubici, kde nejsou zahrnuty dodatečné ztráty vzniklé izolací nebo použitým materiálem, proto je třeba je brát za **dolní** hranici útlumu.

5.2 Umístění měřeného vzorku

Každý vzorek se musí do úchyty umístit tak, aby nebyl příliš stlačen nebo nebyl volný. Všechny případné otvory je doporučeno utěsnit odstranitelným těsněním (norma doporučuje vazelínu či plastelínu). Vzorky koberců nebo podobného materiálu je na místo jejich upevnění do držáku doporučeno přilepit lepicí páskou, abychom zamezili vibracím. Lehké materiály je možné upevnit například sítí s velkými oky. U děrovaných

materiálů se řezy volí podél čar symetrie děrování. Vždy je lepší změřit více vzorků materiálu pro vyloučení chyb vzorkem.

5.3 Samotné měření

Určení referenční roviny

Většinou referenční rovina souhlasí s držákem vzorku, pak se volí $x = 0$. Jestliže má materiál výrazný povrch, musí se rovina stanovit před materiál, určuje se s přesností na 0,5 mm. Referenční rovinu není nutné určovat v případě, kdy je cílem měření pouze činitel zvukové pohltivosti.

Určení rychlosti šíření, vlnové délky a vlnového odporu prostředí

Rychlost šíření zvuku v trubici:

$$c_0 = 343,2\sqrt{T/293} \text{ [m*s}^{-1}\text{]} \quad (5.13)$$

kde T je teplota v Kelvinech.

Vlnová délka:

$$\lambda_0 = c_0/f \quad (5.14)$$

Hustota prostředí:

$$\rho = \rho_0 \frac{p_a T_0}{p_0 T} \quad (5.15)$$

kde: p_a – atmosférický tlak, $p_0 = 101,325 \text{ kPa}$, $T_0 = 293 \text{ K}$, $\rho_0 = 1,186 \text{ kg*m}^{-3}$

Vlnový odpor: ρc_0 (5.16)

Volba amplitudy signálu

Musí být zvolena tak vysoká, aby odstup signál-šum byl ve všech místech nejméně 10 dB.

Volba počtu opakování pro průměry

Tato volba by měla být v každém měření nastavitelná, protože se její nastavení mění pro různé materiály. Průměrováním potlačujeme chyby vzniklé náhodným šumem.

Korekce neshody mikrofونů

Tato korekce je potřebná pouze pro metodu dvou mikrofونů. Existují dvě možnosti korekce, a to měření opakované se záměnou mikrofону nebo předem určený kalibrační součinitel. Měřicí zařízení realizované pro tuto práci umožňuje velmi snadnou záměnu mikrofونů, a proto bude popsána a použita tato metoda, která zaručí vyšší přesnost.

Její postup je velmi jednoduchý a při automatizovaném sběru dat a zpracování výpočtů také rychlý. Měřený vzorek se vloží podle pravidel do interferometru a všechny parametry (průměry, měřicí signál) se nastaví stejně jako pro měření. Výpočtem se určí přenosová funkce H_{12} , mikrofony se prohodí a znovu se spočte přenosová funkce. Poté se může dopočítat korekční přenosová funkce.

$$H_{12} = (H_{12}^I \cdot H_{12}^II)^{\frac{1}{2}} = |H_{12}|e^{j\varphi} \quad (5.17)$$

Pro případ, kdy analyzátor dovoluje měřit pouze jedním směrem, se ve vzorci mění násobení přenosových funkcí na podíl.

Určení přenosové funkce

Po určení korekce a umístění mikrofonů na původní pozice je možné učit přenosovou funkci:

$$H_{12} = \frac{S_{12}}{S_{11}} |H_{12}| e^{j\varphi} = H_r + jH_i \quad (5.18)$$

kde S_{12} je vzájemné spektrum a S_{11} autospektrum, viz kapitola 2., $|H_{12}| e^{j\varphi}$ je korekce neshody mikrofonů.

Pro případy, kde na vstupu je šum se rovnice modifikuje:

$$H_{12} = \frac{S_{22}}{S_{21}} |H_{12}| e^{j\varphi} = H_r + jH_i \quad (5.19)$$

A pro případy, kde je šum přítomen na vstupu a i na výstupu:

$$H_{12} = \left[\frac{S_{12}}{S_{11}} \cdot \frac{S_{22}}{S_{21}} \right]^{\frac{1}{2}} = H_r + jH_i \quad (5.20)$$

Určení činitele odrazu

$$r = |r| e^{j\theta_r} = \frac{H_{12} - H_I}{H_R - H_{12}} e^{2jk_0 x_1} \quad (5.21)$$

Určení činitele zvukové pohltivosti

$$\alpha = 1 - |r|^2 = 1 - r_r^2 - r_i^2 \quad (5.22)$$

Určení normované akustické impedance

$$\frac{Z}{\rho c_0} = \frac{R}{\rho c_0} + \frac{jX}{\rho c_0} = \frac{(1+r)}{(1-r)} \quad (5.23)$$

Určení normované akustické admitance

$$G \rho c_0 = \frac{\rho c_0}{Z} \quad (5.24)$$

5.4 Protokol o měřící zkoušce

Protokol musí obsahovat tyto informace:

- Prohlášení o shodě s [1] – v případě, že došlo k nějakým odchylkám, je třeba všechny uvést
- Údaje o zkušebním místě
- Název a výrobce měřeného vzorku
- Uvedený cíl měření či osobu, která si ho objednala
- Popis vzorku včetně jeho akusticky relevantních charakteristik
 - Strukturální údaje
 - Rozměry
 - Popis povrchu materiálu
 - Počet, sestava a tloušťky vrstev
 - Rozměry a poloha částí jako dutiny, či rezonátory
 - Materiálové údaje
 - Objemová hustota, odpor proudění vzduchu
 - Všechny materiály, pokud vzorek není homogenní
 - Konstrukční údaje
 - Spojení vrstev (lisování, lepení,..)
 - Kazetování – přepážky kolmé dopadu vln
- Popis zkušebního vzorku

- Počet
- Velikost
- Upevnění
- Teplotu a atmosférický tlak
- Datum zkoušky
- Tabele nebo grafickou prezentaci výsledků
- Popis měřících přístrojů, měřícího zařízení a postupu

6. Zdroje chyb

6.1 Systematické chyby

Systematickými chybami nazýváme chyby v měření či analýze. Patří mezi ně například kmitočtový aliasing nebo přelévání výkonu do bočních laloků. Tyto chyby se minimalizují běžně známými postupy. Mezi systematické chyby patří:

Časové překrývání – časový aliasing

Vzniká u neperiodických signálů, když trvání každého záznamu je podobné nebo kratší než impulsní odezva způsobující přeslechové deformace ve zpracování signálu.

Řešením je volba vhodné délky záznamu tak, že:

$$t \gg \frac{2x_1}{c_0} \quad (6.1)$$

kde t je délka záznamu v sekundách a x_1 je vzdálenost od prvního mikrofonu.

Fázová neshoda

Je nevyhnutelná při použití dvou mikrofonů, její kompenzace je popsána v kapitole 5.4.

Amplitudová neshoda

Při použití dvou mikrofonů může dále dojít k neshodě jejich citlivostí. K potlačení této chyby je třeba mikrofony kalibrovat tak, aby se amplitudy nelišily o více než 0,3 dB, jak bylo popsáno v kapitole 5.2.

6.2 Náhodná chyba

Chyby jsou způsobené zpracováním šumových signálů konečné délky nebo vnitřním šumem měřicích zařízení. Úplně potlačit tuto chybu nelze, ale je možné ji minimalizovat průměrováním a volbou deterministických signálů. Délka a šířka pásma měřicího signálu se volí tak, aby dávala určitou směrodatnou odchylku. Počet měření pro průměry je dán vztahem:

$$n = \left(\frac{1}{2\sigma}\right)^2 \quad (6.2)$$

kde σ je směrodatná odchylka.

Normou je doporučen součet šířky pásma a doby průměrování takový, aby vycházel na 50 – 100 měření.

6.3 Přesnost přenosové funkce

Odhad počtu měření pro průměrování se volí tak, aby byla dodržena doporučená velikost směrodatné odchylky.

$$n = \frac{1}{2\varepsilon^2} \left[\frac{1}{\gamma^2} - 1 \right] \quad (6.3)$$

$$\gamma^2 = \frac{|S_{12}|^2}{(S_{11} \cdot S_{22})} \quad (6.4)$$

kde ε – normalizovaná směrodatná odchylka, γ^2 - koherenční funkce

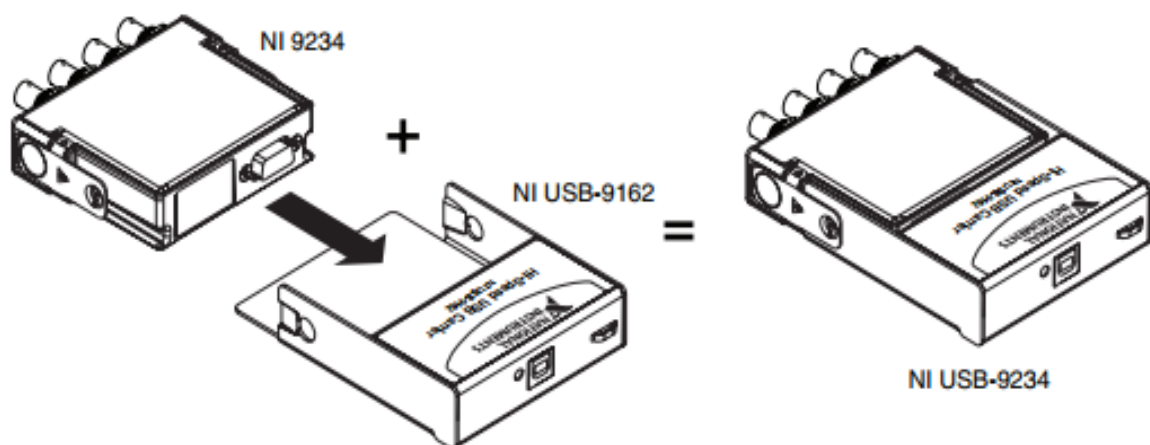
Při určování koherence norma stanovuje standardní hodnoty přibližně 0,9 a 0,5 v případě vysoce odrazivého zakončení.

7. Prostředky pro měřící úlohu

7.1 Měřící karta NI 9234

Pro programem řízený sběr dat byla vybrána měřící karta 9234 od společnosti National Instruments (dále NI). Obsahuje 4 nezávislé kanály pro zpracování vstupní veličiny a možnost buzení připojených senzorů. Odpovídá standardu NI-DAQmx pro měřící moduly od NI. Karta je ve standardizovaném pouzdře s proprietárním konektorem. Toto pouzdro vyžaduje interface pro připojení k běžnému PC prostřednictvím běžných počítačových rozhraní. Pro vývoj aplikace jsem používal NI USB-9162 Carrier, který je přemost'ovacím rozhraním pro USB port.

Na běžné použití bude měřící karta umístěna do docku, který je schopen pojmout až 4 tyto moduly a k počítači se připojí pomocí rozhraní Ethernet. Přestože tato práce bude vyvíjena v prostředí LabVIEW, lze tyto moduly ovládat i přes software LabWindows (CVI) anebo přes externí aplikace napsané v jazycích jako ANSI C, C++ a C#. Pro všechny tyto jazyky jsou k dispozici knihovny, které volají ovládací program DAQ Assistant, protože komunikační protokol je neveřejný. K měřící kartě je možné připojit rozsáhlé množství senzorů, od mikrofonů přes akcelerometry až po tachometry.



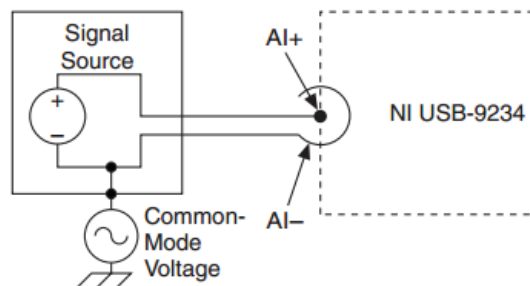
Obrázek 7.1 Měřící modul NI 9234 a USB rozhraní

Parametry měřicí karty

Počet kanálů	4
Rozlišení převodníků	24 bitů
Vzorkovací frekvence	
Maximální	51,2 kS/s
Minimální	1,65 kS/s
Vzorkování	Simultánní na všech kanálech
Frekvence vnitřních hodin	13,1072 MHz
Vstupní napěťový rozsah	± 5 V
Maximální souhlasné napětí	± 2 V
IEPE budící proud	
Minimální	2 mA
Náběžný	90 mA
Podpora TEDS čipu	IEEE.1451.4 TEDS Class I
Šumy	
Při f_s 51,2 kS/s	$50 \mu\text{V}_{\text{rms}}$
Při f_s 25,6 kS/s	$40 \mu\text{V}_{\text{rms}}$
Při f_s 2048 S/s	$25 \mu\text{V}_{\text{rms}}$
Vstupní konektor	BNC

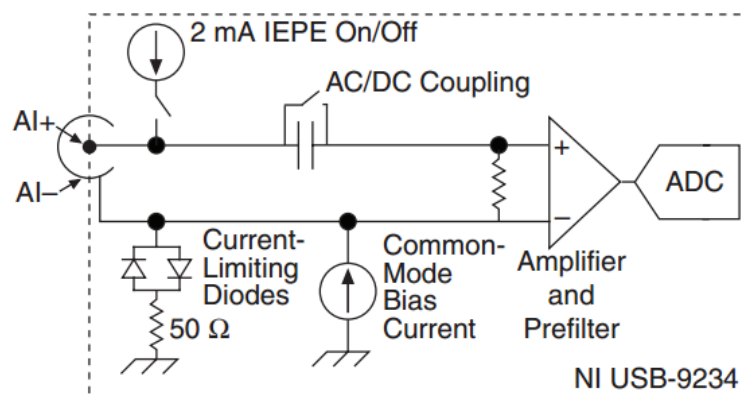
IEPE měniče

IEPE je zkratka Integrated Electronic Piezoelectric. Jde tedy o piezoelektrické měniče, které produkují elektrický signál obvykle velmi nízkých úrovní. Z toho důvodu je tedy třeba výstupní signál zesílit. Toho se dosáhne zabudováním napěťového zesilovače nebo nábojové pumpy. Zesilovače musejí být napájeny z měřicího zařízení, což je realizováno obvykle proudem, který se v anglické literatuře označuje jako IEPE excitation current a běžné hodnoty se pohybují okolo 0,5-8 mA. Napájení je zajištěno po vnitřním vodiči koaxiálního kabelu a definováno podle IEEE 1451.4. Stínění kabelu potom slouží jako vodič pro napájecí proud a zároveň funguje jako stínění proti elektromagnetickému rušení.



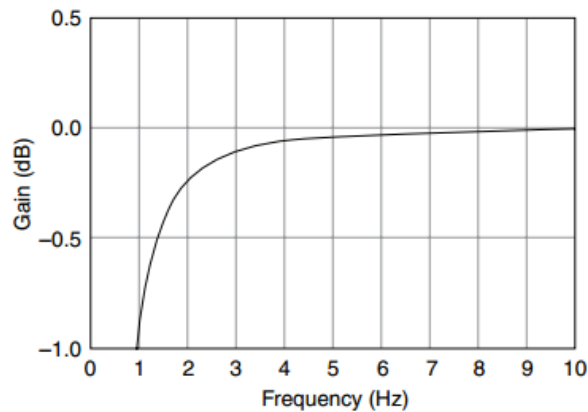
Obrázek 7.2 Zapojení koaxiálního kabelu

Vnitřní struktura



Obrázek 7.3 Zjednodušená vnitřní struktura měřicí karty

Vstupní analogový signál je uzemněn přes 50 Ω rezistor a zároveň vybaven ochranou proti přepětí (± 30 V) a nadproudu. Dále je možné přepínat mezi střídavou a stejnosměrnou vazbou.



Obrázek 7.4 Amplitudová charakteristika AC vazby

Pokud je zvolena vazba střídavá, je možné softwarově připojit zdroj budícího proudu pro IEPE měniče. Potom se analogový signál navzorkuje a převede na digitální pomocí 24 bitového Sigma-Delta převodníku.

7.1 Měřicí mikrofon G.R.A.S. 40PH

Jde o cenově dostupné mikrofony pro použití v polích a maticových soustavách mikrofonů. Mikrofon je určen pro frekvenční rozsahy do 20 kHz a nejvyšší dynamický rozsah 135 dB. Mikrofon má velikost $\frac{1}{4}$ palce a má integrovaný CCP (Constant Current Power) předzesilovač a TEDS čip. Tento mikrofon byl zvolen na základě doporučení od dodavatele měřicí karty díky kompatibilitě napájení zesilovače (měřicí karta poskytuje maximálně 2 mA).



Obrázek 7.5 Měřicí mikrofon G.R.A.S. 40PH

TEDS

Je zkratka pro **Transducer Electronic Data Sheet** neboli elektronický datový list pro měnič. Jde nejčastěji o paměť EEPROM, která se na základě specifikace IEEE 1451 zabuduje do těla měřicího zařízení (mikrofonu, akcelerometru,...) a obsahuje informace o parametrech a poslední kalibraci senzoru.

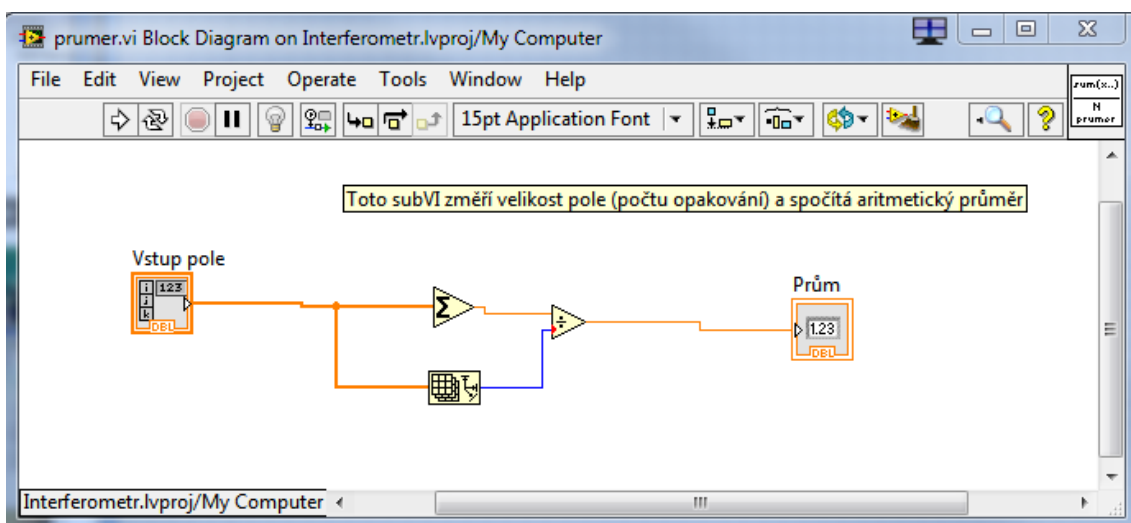
Parametry mikrofonu

Nominální citlivost	50 mV/Pa (± 2 dB)
Dynamický rozsah	
Horní hranice – max. výstup	135 dB pro 20 μ Pa
Spodní hranice – tepelný šum	<32 dA pro 20 μ Pa
Výstupní impedance	<50 Ω
Napájecí proud	2-20 mA
Výstupní konektor	SMB

Kalibrace se provádí pro každý mikrofon individuálně ve zkušební laboratoři a naměřená hodnota je poté uložena do TEDS čipu. Každý mikrofon obsahuje list dokládající kalibraci a frekvenční charakteristiku.

7.2 Vývojové prostředí LabVIEW

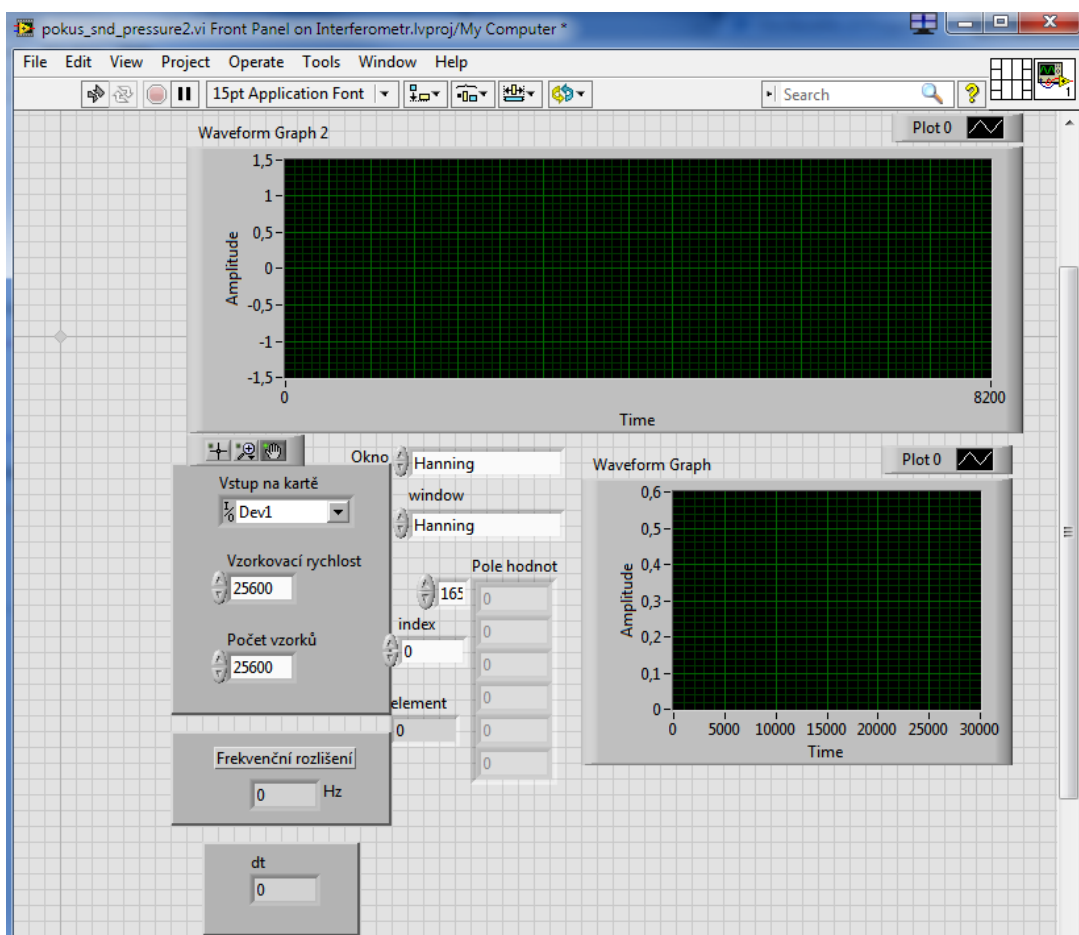
LabVIEW je multiplatformní objektové grafické vývojové prostředí založené na principu „Dataflow“ (viz níže). Pracovní prostředí se skládá z dvou hlavních oken, a to Front panelu a Block diagramu. **Block diagram** slouží k sestavování programu. Z knihovny funkcí se vybere vybraný blok a vloží do okna. Na okrajích bloku se objeví přípojné body pro vodiče tzv. terminály. Jednotlivé bloky se poté propojují vodiči, které se zbarví podle typu proměnné. Typ proměnné určuje terminál na bloku, z něhož se začne táhnout vodič. V případě nesouhlasných terminálů LabVIEW označí chybu a vypíše střet dvou datových typů. Jednoduché proměnné jsou vyobrazeny tenkou linkou, pole proměnných tlustou a klastry (obsahují více druhů proměnných, skaláry, pole, stringy,...) mají složenou linku.



Obrázek 7.6 Ukázka Block diagramu

Front Panel představuje tu část programu, kterou uvidí jeho uživatel, automaticky jsou do něj vloženy grafické prvky bloků, které jsou vloženy do block diagramu, a stejně tak prvky vloženy do front panelu se ihned objeví v block diagramu, díky provázanosti nevznikají sirotci (nepropojené bloky). Jediné samostatné objekty jsou grafické dekorace front panelu nebo ovladače (přepínače listů, posuvníky). Tyto dva panely společně tvoří program zvaný **Virtual Instrument (zkráceně VI)**.

Princip programování „Dataflow“ zohledňuje motto LabVIEW, které zní „Program the way you think.“ Myšlenka tvořící program je založena na logickém toku informací zleva doprava. Každý blok vykoná svojí činnost a poté odešle zpracovanou informaci vodičem do dalšího bloku, přičemž program je ukončen po zpracování posledního bloku.



Obrázek 7.7 Ukázka Front panelu

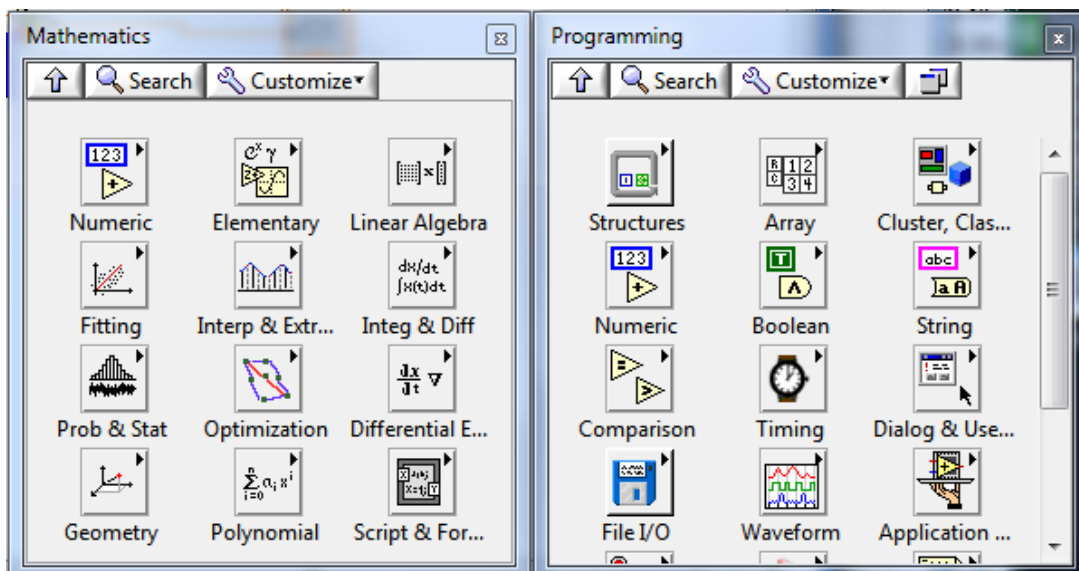
LabVIEW lze provozovat na všech hlavních, dnes používaných, operačních systémech a po naprogramování a otestování lze program zkompilovat do samostatně spustitelné formy i na počítačích bez licence. Potřebné rozhraní (runtime) se dá přiložit do instalace zkompilovaného programu nebo nechat stáhnout při instalaci pro zmenšení velikosti instalačního balíku.

Hlavní výhody LabVIEW

Tato podkapitola shrne hlavní důvody, proč volba vývojového prostředí padla na LabVIEW.

Rychlost a omezení chybovosti při programování

Při sestavování bloků kódu je na výběr velká paleta základních funkcí a k dispozici je i online knihovna příkladů, ze které se snadno získá prvotní úvaha o projektu (v mém případě komunikace s měřicí kartou).



Obrázek 7.8 Palety s funkčními bloky

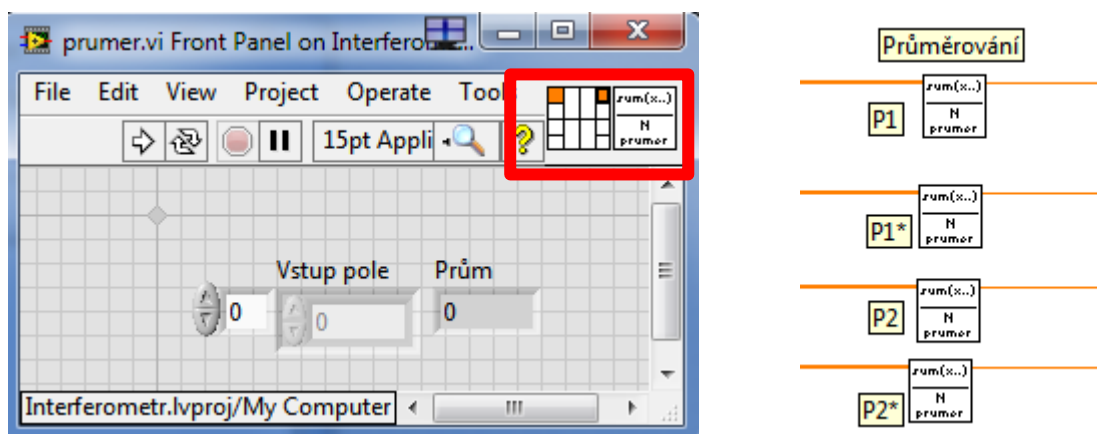
Další výhodou blokového programování je přehled o typech dat, se kterými se pracuje, a prakticky nemůže dojít k situaci, kdy přeteče registr, nebo dojde ke ztrátě přesnosti chybným datovým typem.

Komunikace s hardwarem

Komunikace s měřicími kartami od National Instruments je uskutečněna přes device manager a připojení hardwaru k počítači je formou plug&play. S hardwarem ostatních výrobců se komunikuje buď pomocí dodaných VI nebo dll knihovnou dodanou jako běžný ovladač pro operační systém.

Opakovaná využitelnost kódu

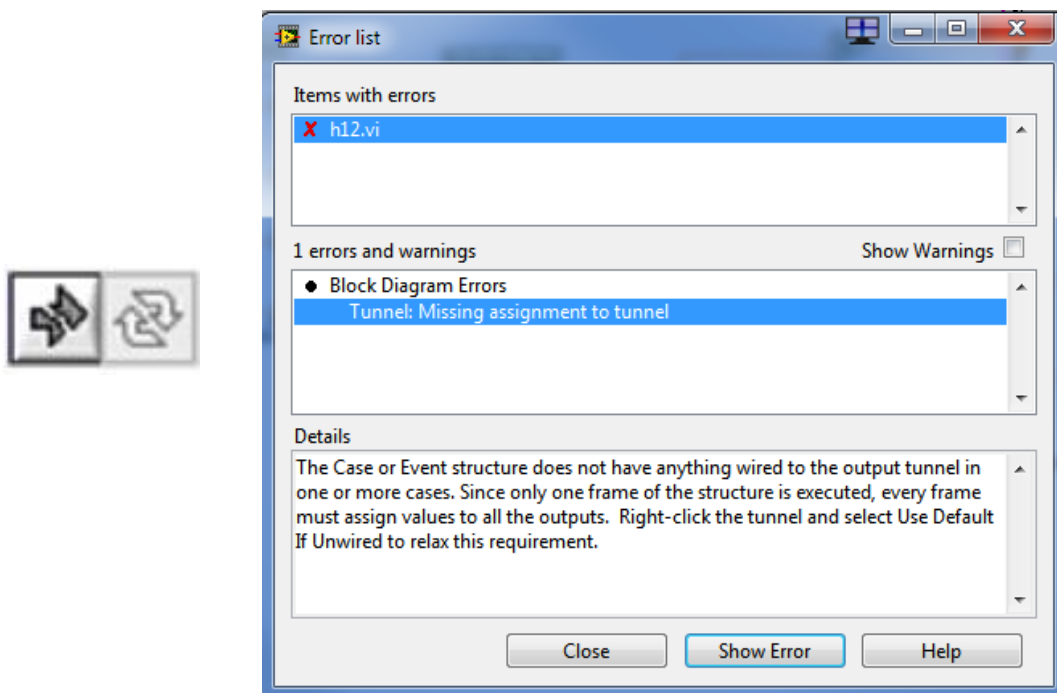
Části programu, které se používají často, je možné použít jako subVI, princip je totožný jako u funkcí v jazyce C nebo metod v jazyce C#. Ve Front panelu se VI vytvoří ikona bloku a tzv. terminal pinout. Poté v dalším VI stačí v paletě nástrojů zvolit položku: „Select VI“.



Obrázek 7.9 Ukázka pinoutu a ikony subVI a jeho použití v kódu

Snadné ladění programu

Ladění programu v LabVIEW neboli debug je oproti běžným vývojovým prostředím velmi jednoduché a efektivní. V programu probíhá neustálá kontrola zkompileovatelnosti, která je indikovaná „zlomenou“ šipkou v případě, že je v kódu chyba. Kliknutím na „zlomenou“ šipku se otevře okno s výpisem chyb a tipy k jejich odstranění.



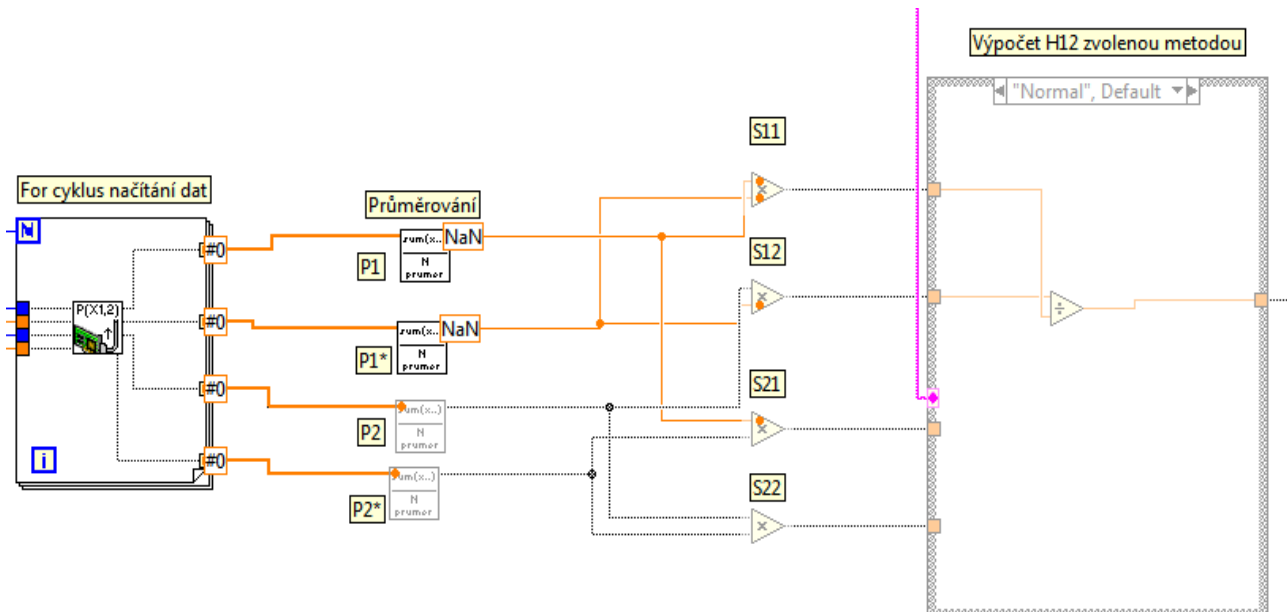
Obrázek 7.10 Ikona indikující chybu v programu a výpis chyb

K samotnému ladění programu slouží debug lišta obsahující běžné možnosti jako krokování programu, přeskočení cyklu, výpis hodnot proměnných na jednotlivých vodičích a hlavně, z mého pohledu nejzajímavější funkci LabVIEW, „highlight executions“.



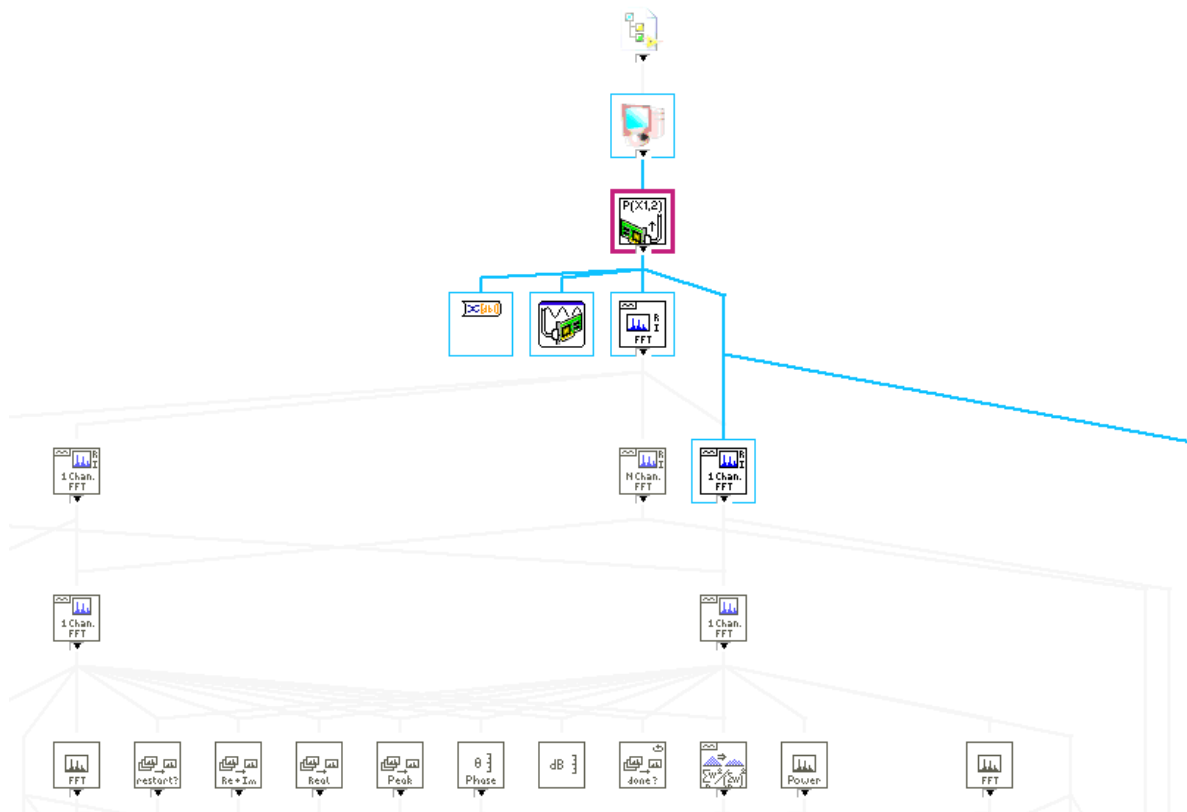
Obrázek 7.11 Debug lišta a označené tlačítko „Highlight executions“

Tato funkce zobrazí v block diagramu přesný postup, jak program pracuje, neaktivní bloky jsou zašedlé a přenos dat po vodičích je realizován „putujícími body“ které ukazují pořadí vykonávání operací. Díky tomu je možné program přesně odladit z hlediska časové posloupnosti dodaných dat a k tomu souvisejících výpočtů.



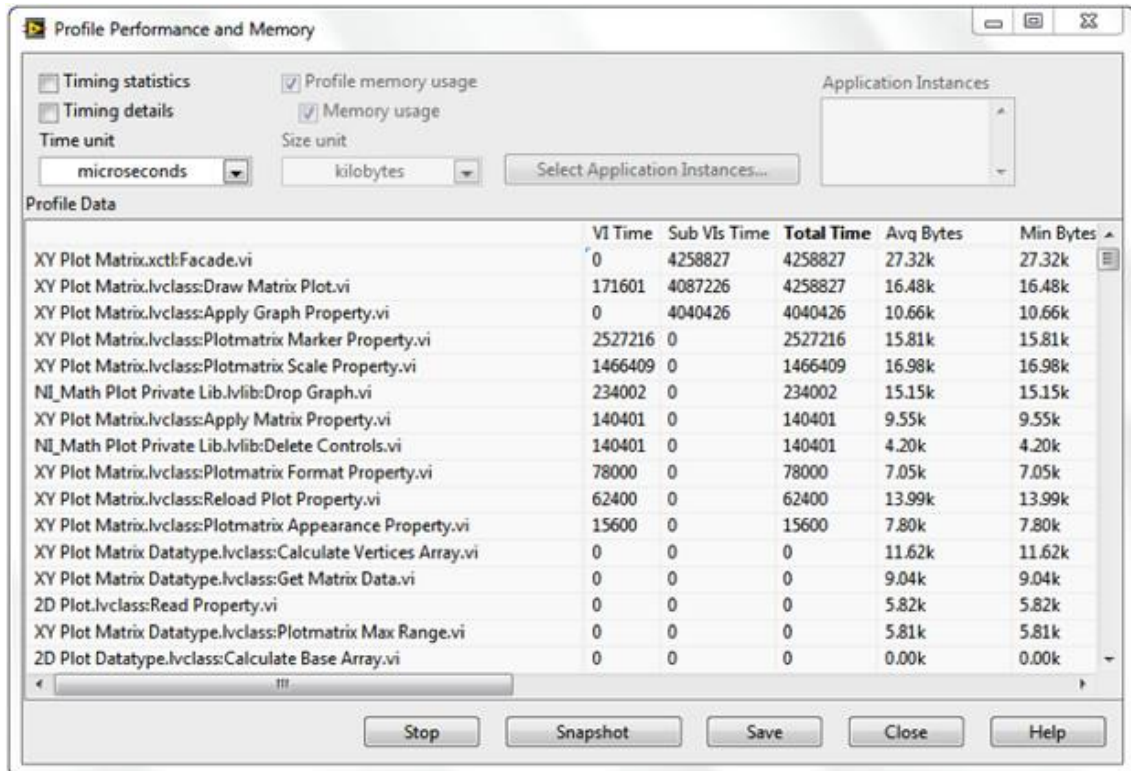
Obrázek 7.12 Ukázka funkce „Highlight Executions“

Hierarchie jednotlivých VI se při složitých projektech neúměrně rozrůstá, a programátor tak ztrácí přehled o využitých blocích. Pro zjednodušení a snadné seznámení se s vnitřní strukturou programu LabVIEW umožňuje zobrazit hierarchii použitých bloků – blokové schéma programu.



Obrázek 7.13 Ukázka hierarchie programu pro načtení dat

Jednotlivé procesy a programové bloky se zpracují za určitý čas a využijí paměť. Jestliže uživatel programuje aplikace, kde je nutné tyto hodnoty přesně ohlídat, nabízí LabVIEW monitor výkonu a spotřeby paměti pro každou aplikaci.



Obrázek 7.14 Manažer procesů

Paralelní chod programu

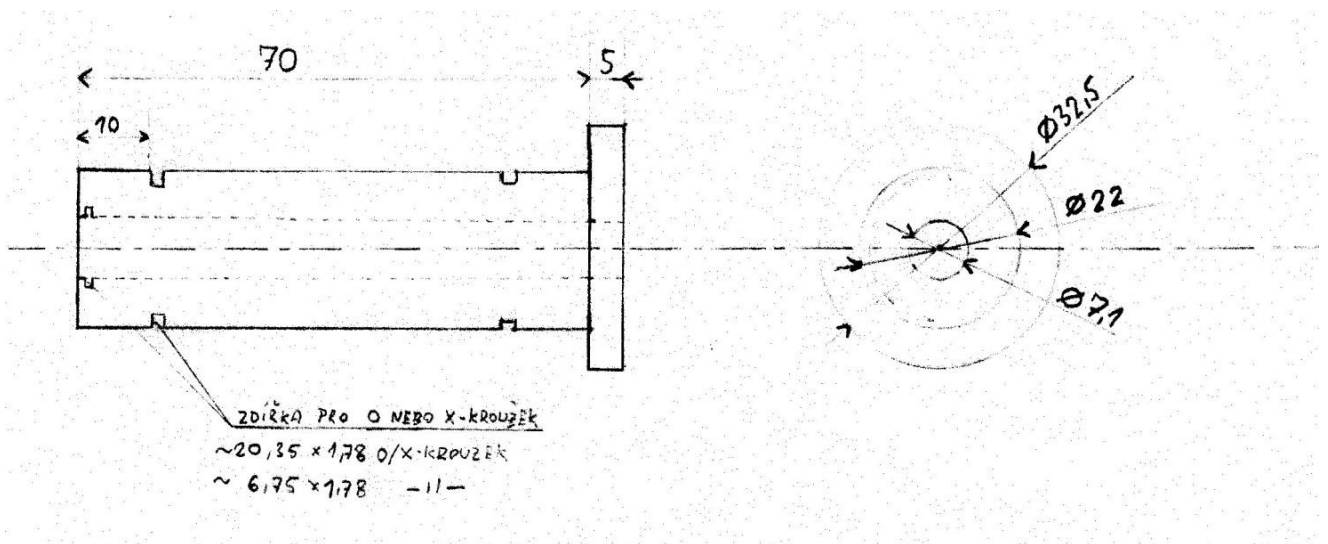
Vnitřní kompilátor neustále hlídá přidávané bloky kódu a kontroluje možnost jejich simultánního běhu. Všechny funkční bloky čekají, až budou mít na svých vstupech platná data. Bloky s platnými daty, které jsou schopné běžet společně, se vnitřně synchronizují a provedou. Celý tento proces lze dobře sledovat pomocí funkce „highlight executions“. Díky této optimalizaci je LabVIEW schopno využít vícejadrových procesorů a multithreadingu bez hlubších znalostí programátora. Další výhodou je aplikace paralelně běžícího kódu do FPGA. Pro tyto aplikace je k dispozici analyzátor VI z hlediska jejich společného vykonávání.

8. Nutné úpravy interferometru

Pro měření bylo nutné udělat úpravu na konstrukci interferometru, především z důvodu použití jiných mikrofonů. Původní mikrofony byly velikosti $\frac{1}{2}$ " , zatímco mikrofony použité pro měřicí úlohu mají velikost $\frac{1}{4}$ " .

8.1 Návrh mikrofonních držáků

Jako materiál byl zvolen silon, držáky byly vyrobeny v dílně Katedry technologií a měření. Oproti původnímu návrhu, kde jsem navrhl zatěsnění v interferometru pomocí o-kroužků, byly držáky vyrobeny bez drážek a utěsnění samotného držáku v trubici je zajištěno přesahem. Mikrofony jsou v držáku utěsněny pomocí vaty, přičemž jejich pozice je zajištěna izolační páskou. Tento způsob se ukázal jako vhodnější díky snadnosti vyjmutí mikrofonu např. kvůli kalibraci.

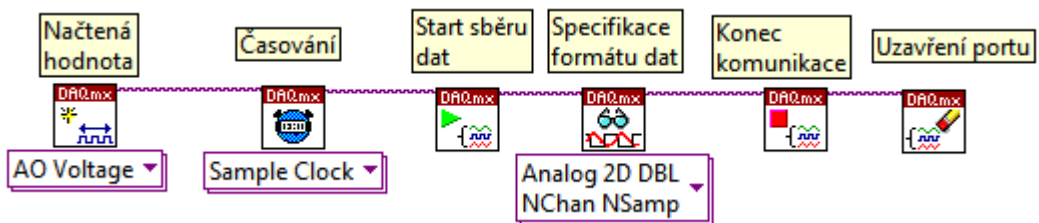


Obrázek 8.1 Sken výkresu pro držák mikrofonu

9. Programové řešení

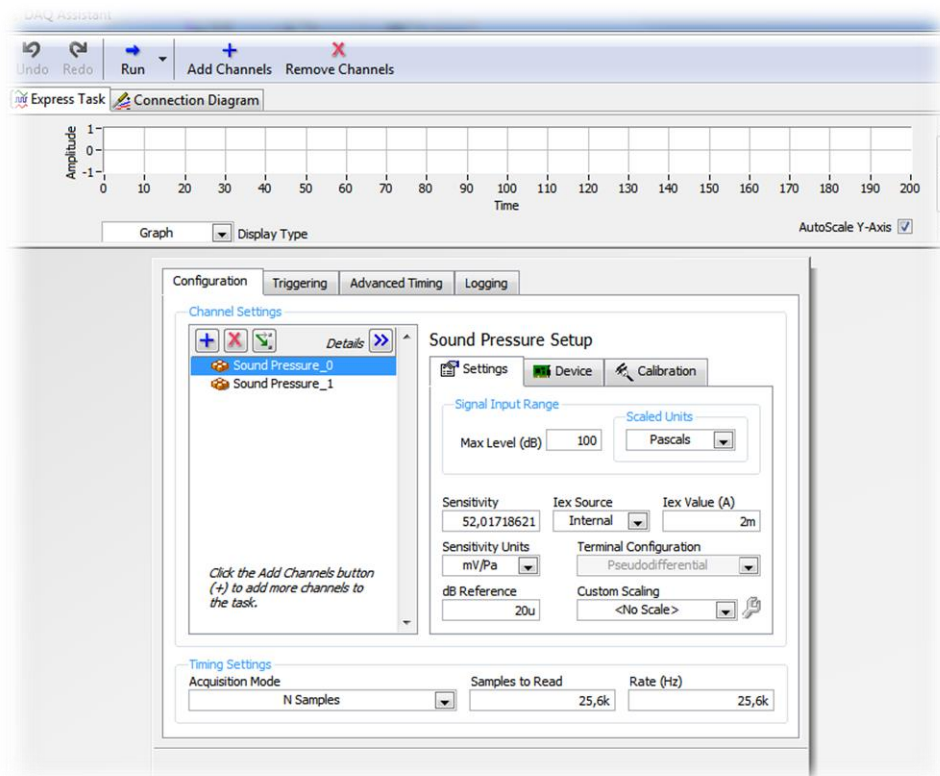
9.1 Získání dat z měřicí karty

Získání dat z měřicí karty probíhá přes programový blok DAQ Assistant, který na základě nastavených parametrů pozměňuje základní strukturu DAQ komunikačních bloků.



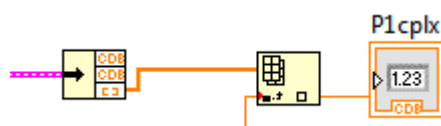
Obrázek 9.9.1 Struktura komunikace s DAQ zařízením

DAQ Assistant tedy pracuje vlastně jako subVI a jeho použitím se zpřehlední aplikace.



Obrázek 9.9.2 DAQ Assistant

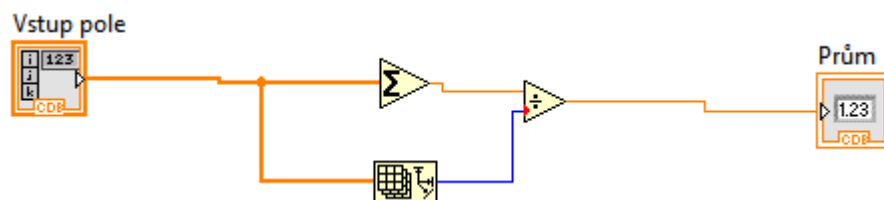
Všechny informace o senzoru jsou v tomto případě načteny z TEDS čipu a přepočten na 1 Pa se nemusí dále řešit, stejně jako zapnutí budícího proudu pro měnič. DAQ Assistant blok generuje výstupní informace ve formě clusteru, ten je pro další zpracování potřeba rozdělit a získat z něj pole hodnot pro oba použité kanály. Použitím Fourierovy transformace na pole vzorků získáme amplitudy tlaků pro jednotlivé frekvence a pomocí bloku indexace pole se vybere hodnota pole pro zkoumanou frekvenci. Správný prvek pole se počítá pomocí frekvenčního rozlišení. Vybraný prvek je poté výstupem VI. Celé VI s názvem „nacti_data.vi“ je k dispozici v příloze.



Obrázek 9.9.3 Rozdělení Clusteru a výběr hodnoty z pole

9.2 Výpočet přenosové funkce H_{12}

Zde se popsaným postupem stanovuje přenosová funkce H_{12} , která je následně korigována na útlum v trubici. Pomocí funkce „nacti_data.vi“ získáme hodnoty akustických tlaků pro oba mikrofony. Načítací funkce je v cyklu „for“, pomocí kterého se řeší průměrování kvůli možné odchylce načtených hodnot. Cyklus „for“ na svém výstupu indexuje hodnoty a ukládá je do pole, které si po skončení cyklu převezme subVI starající se o výpočet průměrné hodnoty.

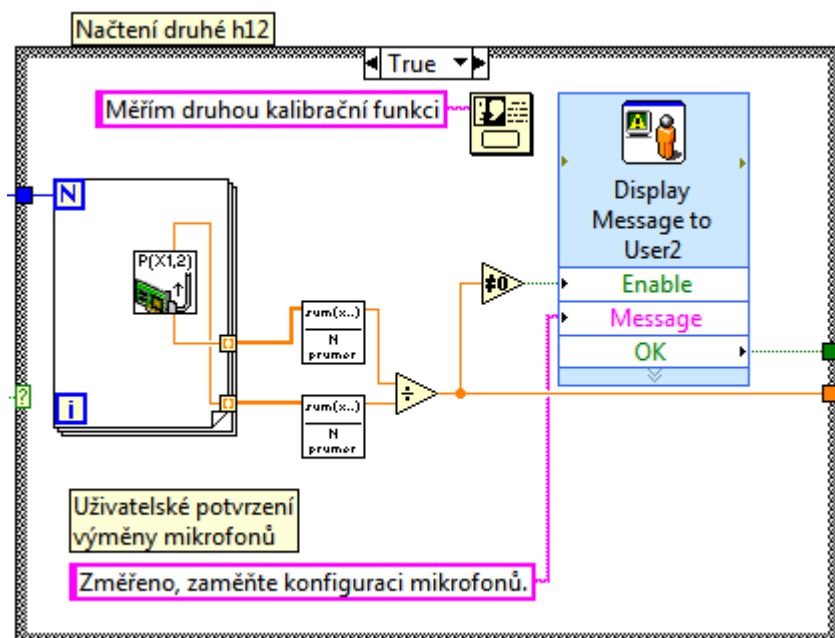


Obrázek 9.9.4 Funkce průměrování

Tato funkce určí velikost výstupního pole a spočte jeho aritmetický průměr. Funkce pracuje v oboru komplexních čísel. Z průměrných hodnot se poté vypočítají vzájemná spektra a autospektra a dopočte se přenosová funkce. Metodu výpočtu kvůli potlačení šumu je možné zvolit před zahájením výpočtu. VI se nachází v příloze pod názvem „h12.vi“.

9.3 Hlavní část programu

Zadávání hodnot uživatelem je řešeno pomocí smyčky „while“, kdy ukončení podmínky je signálem od uživatele, že jsou zadány správné hodnoty a program se může spustit. Kalibrace metodou dvou mikrofonů byla realizována pomocí dvou smyček „case“. Každá smyčka uživatele upozorní na nutnost změny konfigurace mikrofonů a po jeho potvrzení změní přenosovou funkci (funkce je určena komplexním podílem p_1 a p_2). Správné časování je zachováno díky „dataflow“ zpracování. Informace pro uživatele o dokončení měření je generována v případě dodání dat na výstup cyklu (podíl p_1 a p_2 je rozdílný od 0).

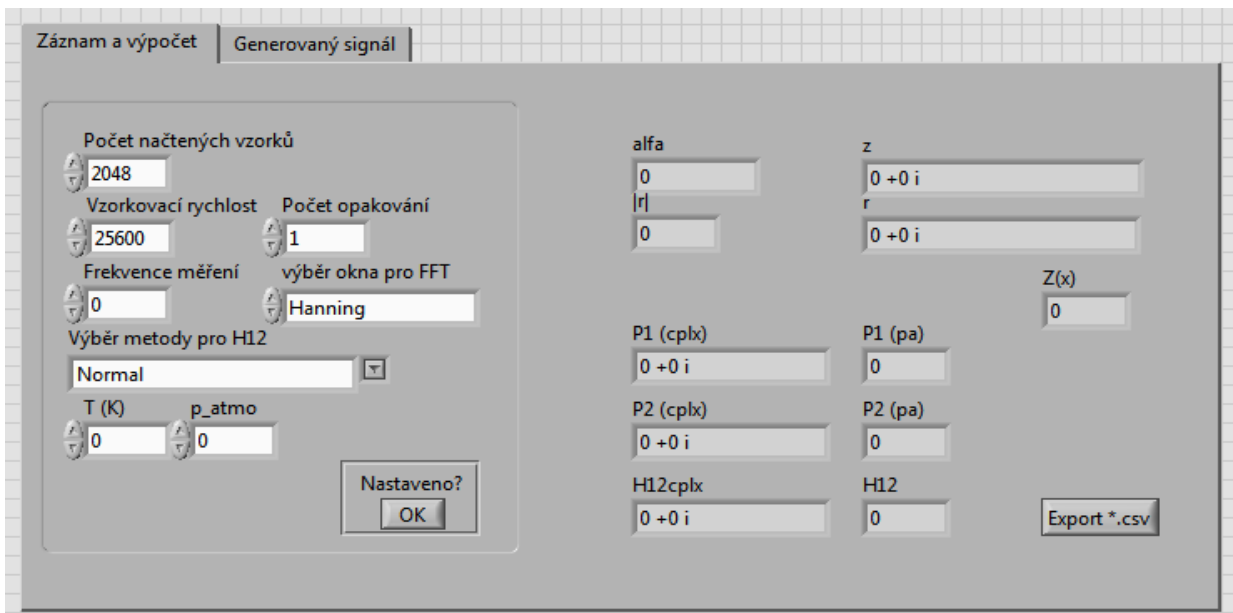


Obrázek 9.9.5 "Case" smyčka s načítáním dat pro druhou konfiguraci mikrofonů

Další část programu byla kvůli synchronizaci opět řešena smyčkou case o dvou možných případech (smyčka je spuštěna uživatelským potvrzením konce měření z předchozí smyčky). Po spuštění hlavní smyčky se spustí subVI „h12.vi“ a spočítá se korekce na útlum v trubici. Se zkorigovanou přenosovou funkcí se vypočítají ostatní akustické parametry. Výsledky jsou prezentovány ve formě komplexního čísla a absolutní hodnoty. Pro výpočet činitele k_0 byla zvolena metoda odhadu, která je pro informativní měření trubicí o velikosti, jíž jsem měl k dispozici, plně postačující. Zapojení celého VI je k dispozici v příloze pod názvem „hlavni.vi“.

9.4 Front panel a prezentace dat

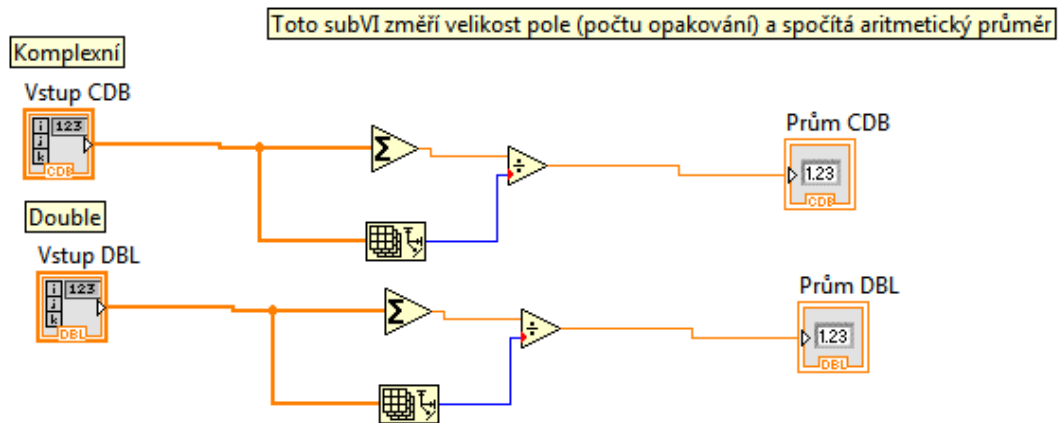
Program disponuje jednoduchým ovládacím panelem, kde se nastaví všechny potřebné údaje a klepnutím na tlačítko ok se spustí výpočet, během něhož bude uživatel dvakrát vyzván k změně konfigurace mikrofónů, a následně budou zobrazeny vypočítané hodnoty. Panel pro generaci signálů je připraven pro budoucí rozšíření programu o kartu na generaci signálů. **V případě měření šumem se uplatňuje nastavení pro počet opakování, jinak by mělo být nastaveno na hodnotu 1.**



Obrázek 9.9.6 Front panel hlavní aplikace

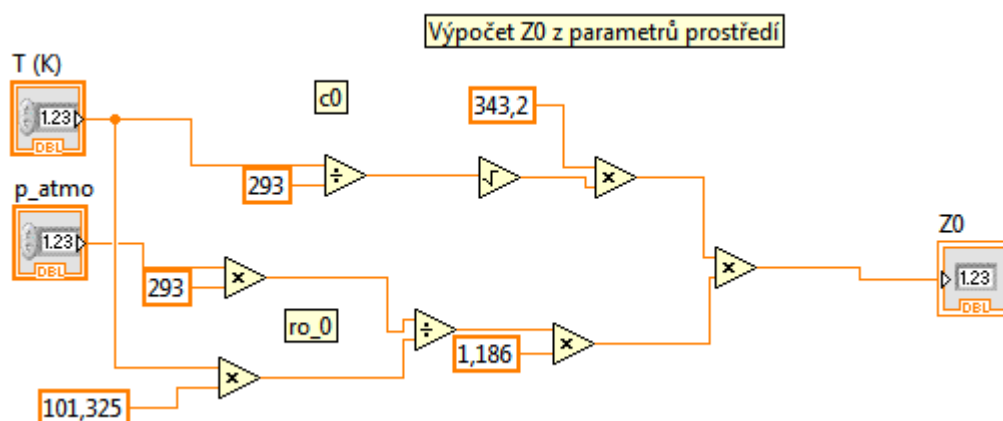
9.2 Ostatní subVI

Celý program jsem se snažil rozdělit do co nejvíce samostatných bloků, abych zjednodušil orientaci v kódu. Nejčastěji využitým je blok pro průměrování dat, který jsem upravil pro průměrování hodnot ve formátu double a complex double.



Obrázek 9.9.7 SubVI pro průměrování

Dalšími subVI, které značně zjednoduší strukturu hlavního programu, jsou bloky pro výpočet činitele r , který jsem musel v průběhu práce na programu několikrát předělávat, a proto jsem využil automatického verzování VI, a snadno se tak vrátil k předchozím koncepcím. Dalším je podprogram pro výpočet impedance Z_0 , který ji vypočítává na základě aktuálního stavu prostředí (tlak, teplota).



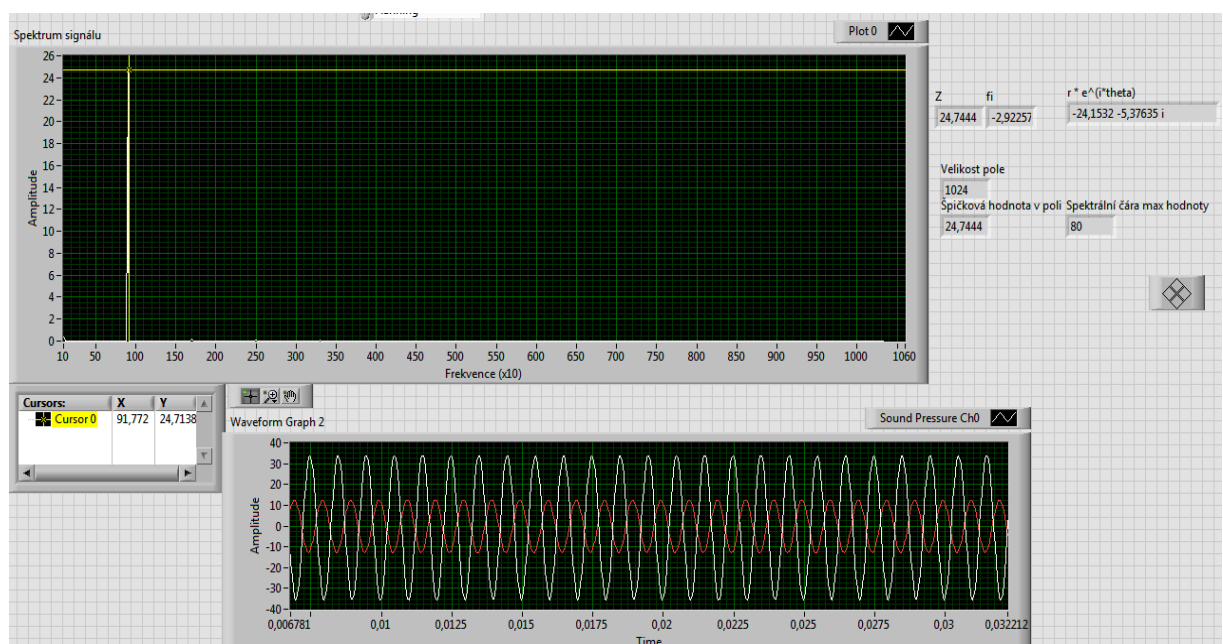
Obrázek 9.9.8 SubVI pro výpočet Z_0

10. Měření

Po zprovoznění měřicí konfigurace (umístění mikrofonů a konfigurace programu) jsem provedl kontrolní měření na trubici zakončené tuhým koncem (simulace ideálního odrazu) a na trubici s vloženým molitanem.

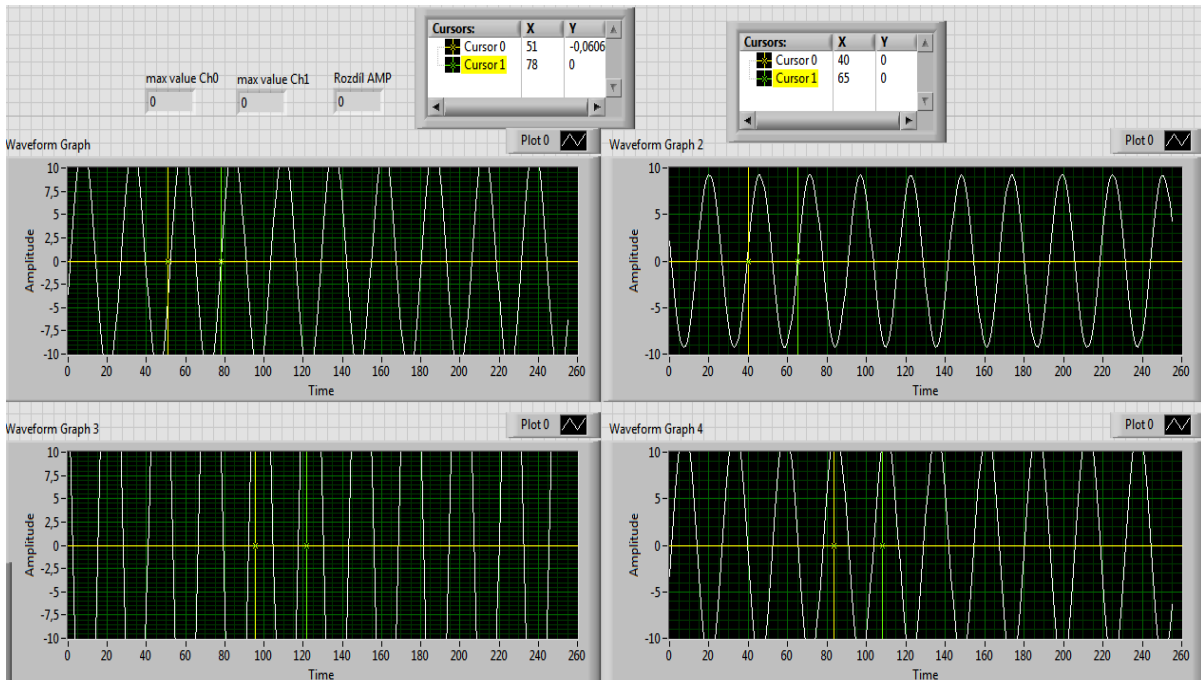
10.1 Přípravy před měřením

Abych zajistil správnost výpočtů při testech na trubici, provedl jsem nejprve několik testů a kalibrací. Jako první jsem provedl kalibraci mikrofonů pomocí kalibrátoru dostupného v akustických laboratořích. Kalibrátor generuje sinusový průběh o amplitudě 1 Pa s frekvencí 1 kHz. Pro toto ověření jsem vytvořil samostatný program v prostředí LabVIEW, který vykreslil zaznamenaný časový průběh akustického tlaku v mikrofonu a provedl jeho transformaci do frekvenční oblasti. Z výsledků těchto měření jsem nastavil tolerance a přepočty do hlavní aplikace pro sběr dat tak, abych pracoval se správnými hodnotami komplexních akustických tlaků.



Obrázek 10.10.1 Ukázka programu pro odladění mikrofonů

Jako další jsem testoval vliv a velikost fázových posunů mezi jednotlivými signály a konfiguracemi mikrofonů. Pro tyto účely jsem použil aplikaci pro testování mikrofonů a další samostatnou aplikaci pro zobrazení více průběhů.



Obrázek 10.10.2 Pomocná aplikace pro určení fázových posunů

Posledním testem bylo ověřování výpočtu přenosové funkce H_{12} . Protože jsem neměl k dispozici ani přibližnou velikost, provedl jsem výpočty přenosové funkce pomocí vzorce dostupného v [1] a pomocí vzorců popsanych v [3]. Výpočty jsem provedl jak v oboru komplexních čísel, tak jen s absolutními velikostmi, abych ověřil vliv fázového posunu. Měření jsem prováděl na trubici s tuhým zakončením a na trubici s dvěma různými vzorky molitanu. Výsledné hodnoty se lišily v řádu setin, a proto v hlavním programu používám obě dostupné metody.

10.2 Naměřené hodnoty

Tabulka 10-1 Naměřené hodnoty pro tuhé zakončení

Tuhé zakončení

f (Hz)	250	500	800	1000	1600	2000
α (-)	0,06	0,02	0,02	0,01	0,01	0
r (-)	0,96	0,98	0,98	0,99	0,99	1,05
P1 (Pa)	5,27	11,46	1,33	3,72	1,09	0,61
P2 (Pa)	13,7	6,16	5,09	2,59	1,19	0,68

Tabulka 10-2 Naměřené hodnoty pro trubici zakončenou molitanem

Molitan

f (Hz)	250	500	800	1000	1600	2000
α (-)	0,04	0,23	0,23	0,25	0,2	0,16
r (-)	0,97	0,87	0,87	0,85	0,89	0,9
P1 (Pa)	4,4	8,71	1,43	1,7	0,93	0,49
P2 (Pa)	11,62	5,43	2,55	1,35	0,57	1,34

11. Závěr

Pomocí simulace akustických tlaků a fázového posuvu na generátoru se podařilo ověřit, že program pracuje a algoritmus výpočtů je správný. Z naměřených výsledků můžeme tvrdit, že v případě trubice s tuhým zakončením výsledky odpovídají teoretickým předpokladům na minimální pohltivost v trubici při všech měřených kmitočtech. V případě vloženého molitanu výsledek potvrzuje předpoklad, že by se zvuková pohltivost materiálu měla začít zvyšovat při dané tloušťce materiálu ve frekvenční oblasti od 300 Hz. Přesný průběh pohltivosti bohužel nebyl pro zkoumaný materiál k dispozici, a proto jsem vycházel z teoretických předpokladů, doporučení a chování podobných materiálů. Velikost činitele α neodpovídá teoretickým předpokladům, tato skutečnost je pravděpodobně způsobena netěsnostmi a vzduchovými mezerami na měřeném vzorku.

Na základě dosažených výsledků bych pro budoucí měření doporučil konstrukční úpravy na interferometru, a to úpravu zakončení impedanční trubice s hlediska utěsnění. Tuto úpravu bych realizoval držákem vzorku, který by byl zvukově utěsněný po stranách a přetěsněním současného zakončení. Další úprava, kterou bych doporučil, se týká reproduktoru. Nejvýhodnější by bylo pružné uložení reproduktoru, které by zamezilo přenosu vibrací do stěn impedanční trubice, případně alespoň jeho dodatečné utěsnění.

Modul generující signál pro reproduktor nebyl v době odevzdání této práce ještě k dispozici, proto je program upraven pro jeho snadnou implementaci. Všechny programy vytvořené pro tuto diplomovou práci jsou na přiloženém cd ve formě VI souborů pro LabVIEW a samostatně spustitelného programu pro platformu Microsoft Windows XP a vyšší.

Seznam obrázků

Obrázek 3.1 Narušený obrazec stojaté vlny.....	6
Obrázek 3.2 Příklad uspořádání měřícího zařízení	9
Obrázek 5.1 Korekce na útlum v trubici.....	12
Obrázek 7.1 Měřící modul NI 9234 a USB rozhraní	23
Obrázek 7.2 Zapojení koaxiálního kabelu	25
Obrázek 7.3 Zjednodušená vnitřní struktura měřící karty	25
Obrázek 7.4 Amplitudová charakteristika AC vazby	26
Obrázek 7.5 Měřící mikrofón G.R.A.S. 40PH.....	26
Obrázek 7.6 Ukázka Block diagramu	28
Obrázek 7.7 Ukázka Front panelu	29
Obrázek 7.8 Palety s funkčními bloky.....	30
Obrázek 7.9 Ukázka pinoutu a ikony subVI a jeho použití v kódu	31
Obrázek 7.10 Ikona indikující chybu v programu a výpis chyb	32
Obrázek 7.11 Debug lišta a označené tlačítko „Highlight executions“	32
Obrázek 7.12 Ukázka funkce „Highlight Executions“	33
Obrázek 7.13 Ukázka hierarchie programu pro načtení dat	33
Obrázek 7.14 Manažer procesů	34
Obrázek 8.1 Sken výkresu pro držák mikrofónu	35
Obrázek 9.9.1 Struktura komunikace s DAQ zařízením	36
Obrázek 9.9.2 DAQ Assistant.....	36
Obrázek 9.9.3 Rozdělení Clusteru a výběr hodnoty z pole	37
Obrázek 9.9.4 Funkce průměrování.....	37
Obrázek 9.9.5 "Case" smyčka s načítáním dat pro druhou konfiguraci mikrofónů	38
Obrázek 9.9.6 Front panel hlavní aplikace	39

Obrázek 9.9.7 SubVI pro průměrování.....	40
Obrázek 9.9.8 SubVI pro výpočet Z_0	40
Obrázek 10.10.1 Ukázka programu pro odladění mikrofonů	41
Obrázek 10.10.2 Pomocná aplikace pro určení fázových posuvů	42

Seznam tabulek

Tabulka 10-1 Naměřené hodnoty pro tuhé zakončení	43
Tabulka 10-2 Naměřené hodnoty pro trubici zakončenou molitanem	43

Seznam použitých zdrojů

[1] - ČSN ISO 10534-2. Akustika - Určování činitele zvukové pohltivosti a akustické impedance v impedančních trubcích: Část 2: Metoda přenosové funkce. První vydání. Český normalizační institut, 2000.

[2] - VLACH, Jaroslav, Josef HAVLÍČEK a Martin VLACH. *Začínáme s LabVIEW*. 1. vyd. Ilustrace Viktorie Vlachová. Praha: BEN - technická literatura, 2008, 247 s. ISBN 978-80-7300-245-9.

[3] - COX, Trevor J a Peter D'ANTONIO. *Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application*. 2nd ed. New York: Taylor, c2009, xvii, 476 p. ISBN 02-038-9305-0.

[4] - EVEREST, F. Alton a Ken C. POHLMANN. *Master handbook of acoustics*. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2009. ISBN 978-007-1603-331.

- [5] - Univerzita Palackého v Olomouci: Učebnice. *FFT: Fourierova transformace* [online]. Olomouc: UP, 2004 [cit. 2013-04-16]. Dostupné z: <http://apfyz.upol.cz/ucebnice/down/mini/fourtrans.pdf>
- [6] - National Instruments: Products and Services. NI. The Benefits of Programming Graphically [online]. [cit. 2013-04-16]. Dostupné z: <http://sine.ni.com/np/app/main/p/docid/nav-104/lang/cs/fmid/2048/>
- [7] - National Instruments: Support. NI. What is IEPE [online]. 2002, 18.12.2002 [cit. 2013-04-16]. Dostupné z: <http://digital.ni.com/public.nsf/allkb/E96DCCBD929EF9E886256C93006D9EC5>
- [8] - National Instruments: Devzone. NI. Top 5 rookie mistakes in LabVIEW [online]. 2013, 2.3.2013 [cit. 2013-04-16]. Dostupné z: <http://zone.ni.com/devzone/cda/pub/p/id/1735>
- [9] - VÁVRA, Marek. *Měření činitele zvukové pohltivosti v interferometru*. Plzeň, 2009. Dostupné z: <https://portal.zcu.cz>
- Diplomová práce. ZČU FEL v Plzni. Vedoucí práce Ing. Oldřich Tureček, PhD.
- [9] - Fundamentals of FFT-Based signal analysis in LabVIEW. NI. National Instruments: Devzone [online]. NI, 2009, VI 08, 2009 [cit. 2013-05-03]. Dostupné z: www.ni.com/white-paper/4278/en

Zdroje obrázků

3.1, 3.2, 5.1 – [1]

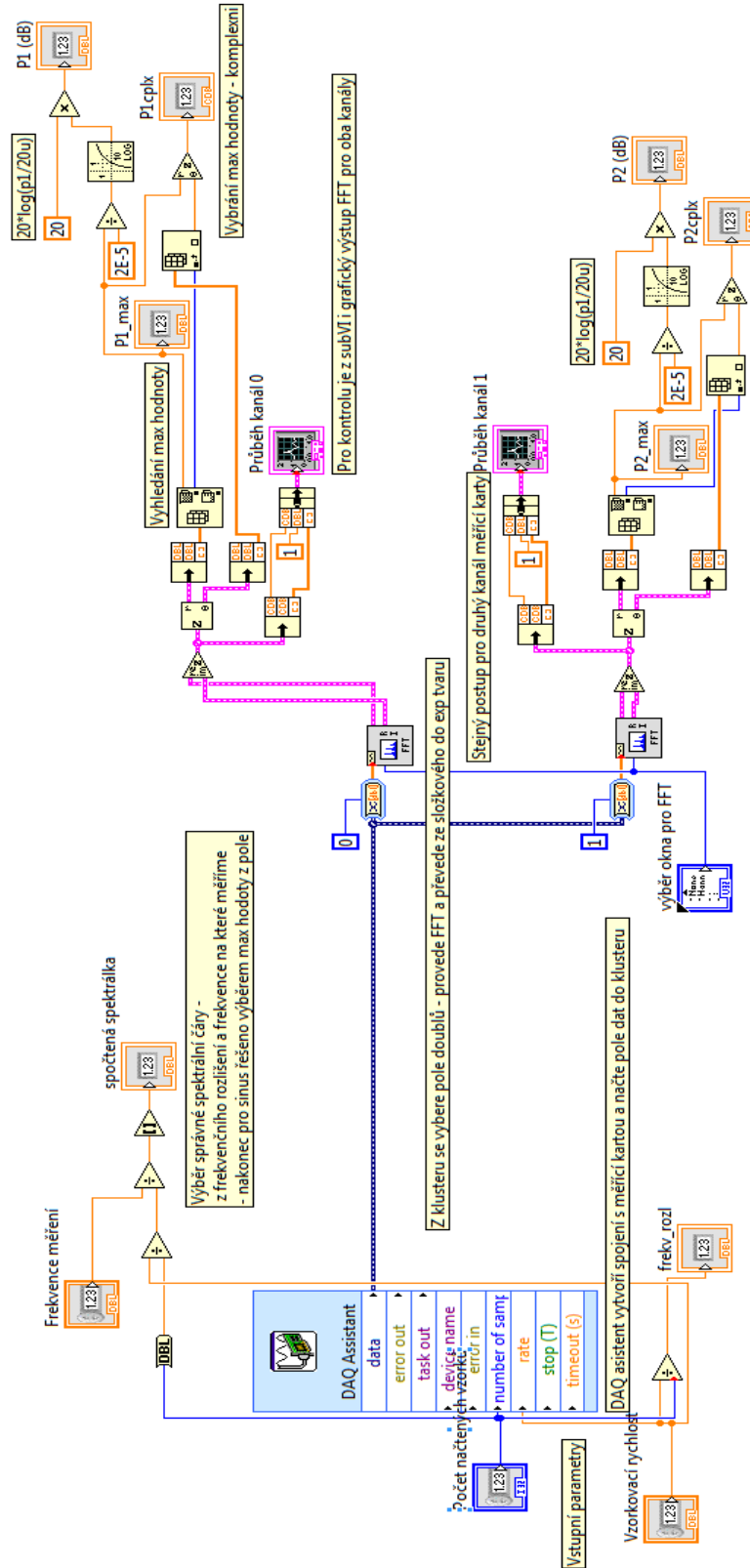
7.1 - <http://www.ni.com/gettingstarted/setuphardware/dataacquisition/usb.htm> (4.5.13)

7.2, 7.3, 7.4 - www.ni.com/pdf/manuals/372307a.pdf

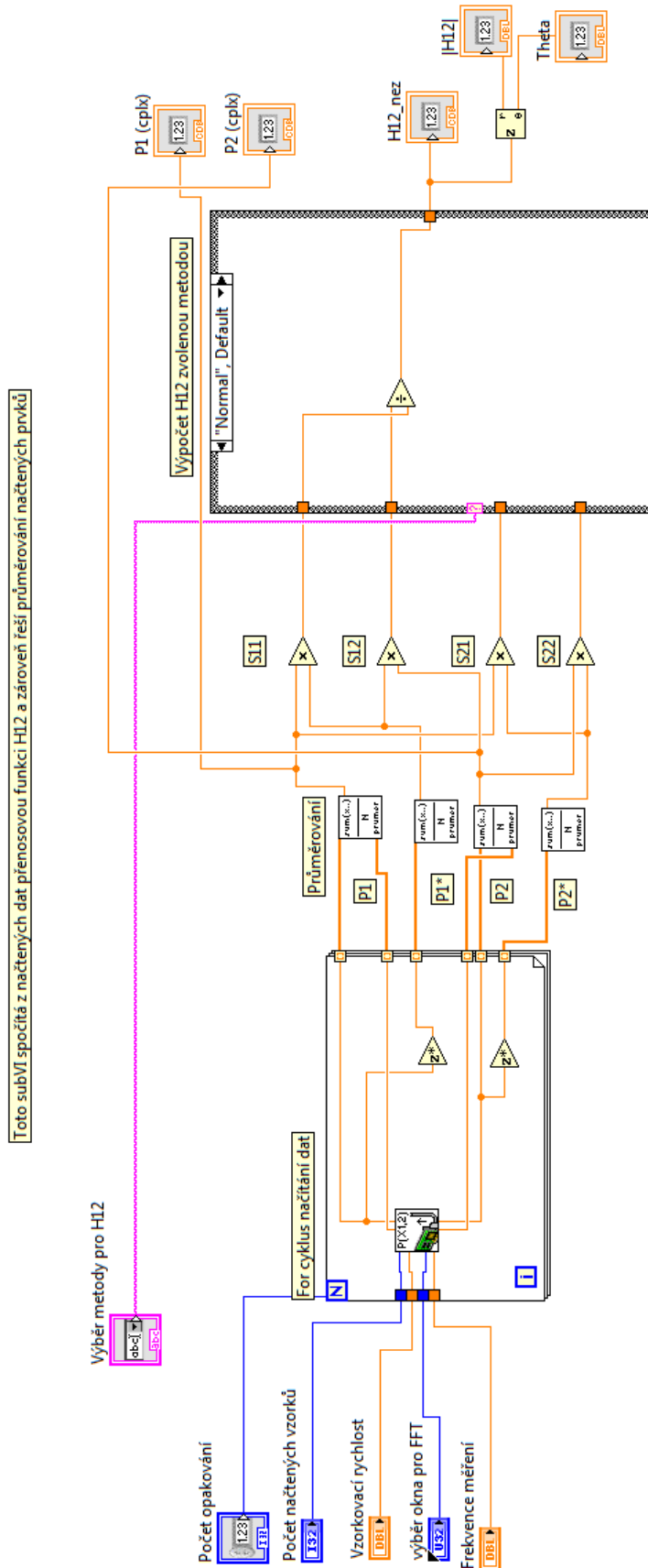
7.5 - http://www.gras-tippkemper.de/system/html/40PH_Web-5fd613f9.jpg

Příloha

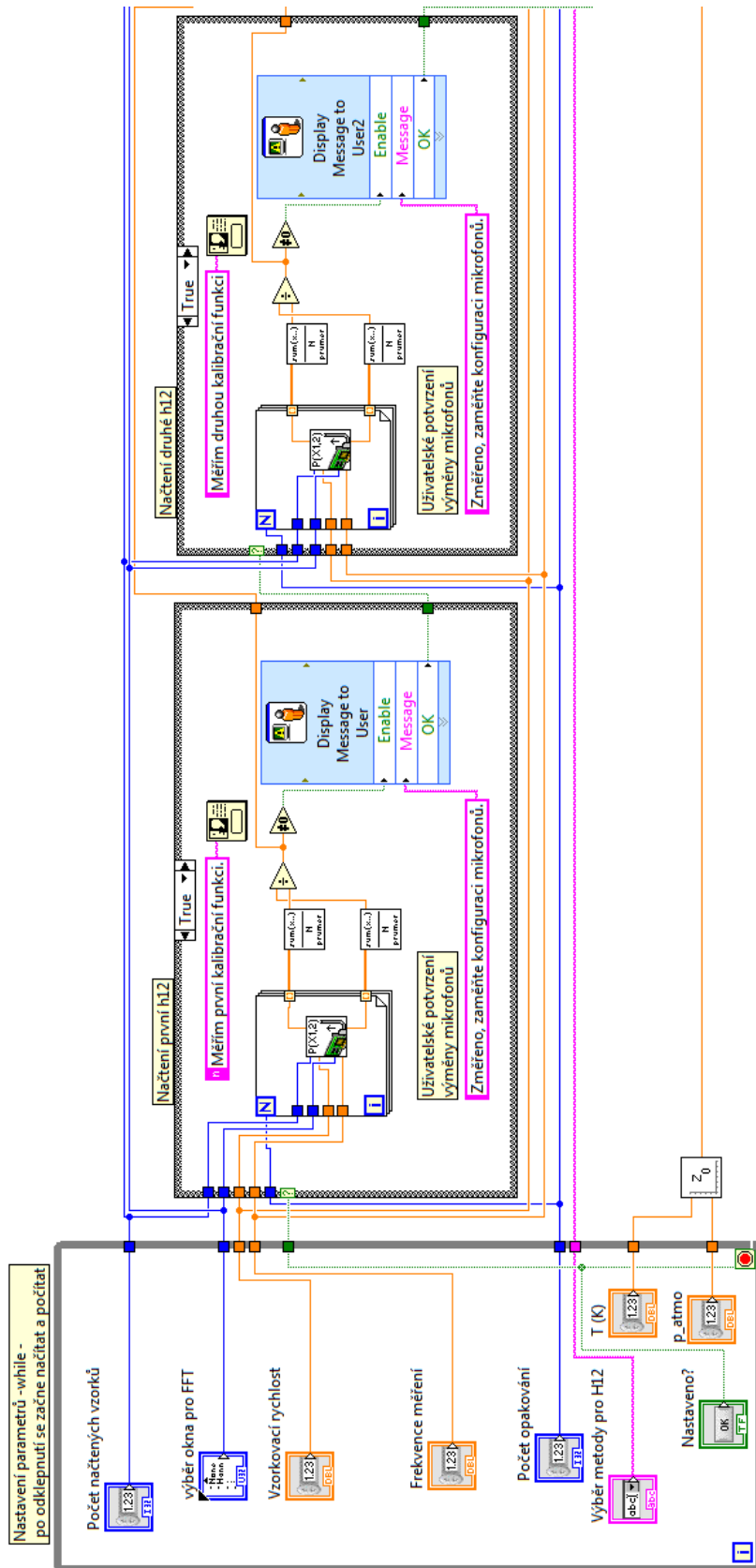
Příloha 1: Program pro načtení dat



Příloha 2: Program pro výpočet přenosové funkce H_{12}



Příloha 4: Hlavní program, první část



Příloha 5: Hlavní program, druhá část

