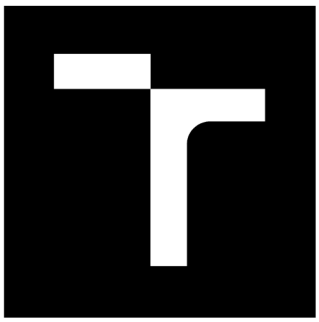



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS


# AUTOMATIZOVANÉ MĚŘENÍ AKUSTICKÉHO VÝKONU

AUTOMATED MEASUREMENT OF ACOUSTIC POWER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS


AUTOR PRÁCE — Marek Prát

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. Jiří Schimmel, PhD

SUPERVISOR



BRNO 2016

**Prohlášení**

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „ Automatizované měření akustického výkonu“ 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/nebo majetkových a jsem si plně vědom následku porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona c. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonu (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne ……. ……

podpis autora

# PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu práce Ing. Jiří Schimmelovy za cenné připomínky, rady a vedení při vypracování této bakalářské práce

Faculty of Electrical Engineering and Communications

Brno University of Technology
Purkynova 118, CZ-61200 Brno
Czech Republic

http://www.six.feec.vutbr.cz

# PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsaný v této bakalářské práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

BRNO . . . . . .

. . . . . .
podpis autora(-ky)

Abstrakt

Tato bakalářské práce se zabývá metodami pro měření a zpracování hladin akustického výkonu a výpočet nejistot měření podle mezinárodní normy ISO 3744:2010.

Abstract

This bachelor´s thesis presents methods for the measurement and processing of acoustic power levels and mathematical calculation of measurement uncertainty according to international standard ISO 3744:2010.

Klíčová slova

Akustický tlak, akustický výkon, měřící povrch, pozice mikrofonu, nejistota měření.

Key words

Sound pressure, sound power, measurement surface, microphone positions, measurement uncertainty.

Biblografická citace

PRÁT, M. *Automatizované měření akustického výkonu.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 28 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Schimmel, Ph.D..

**Obsah**

Úvod

1. Základní akustické veličiny a pojmy

1.1 Akustický tlak

1.2 Hladina akustického tlaku

1.3 Odrazová rovina

1.3 Charakteristický rozměr zdroje

1.4 Referenční box

1.4.1 Referenční box na jedné odrazové rovině

1.4.2 Referenční box na dvou odrazových rovinách

1.4.3 Referenční box na třech odrazových rovinách

1.5 Měřící vzdálenost

1.7 Měřící poloměr

1.8 Měřící povrch

1.8.1 Hemisférický (koule)

a) Plná hemisféra

b) Půl-hemisféra

c) Čtvrt-hemisféra

1.8.2 Rovnostěnný (hranol)

a) Malý hranol

b) Vysoký hranol

c) Dlouhý hranol

d) Hranol pro středně velké stroje

e) Hranol pro velké stroje

f) Hranol na 2 měřících rovinách

g) Hranol na 3 měřících rovinách

1.8.3 Cylindrický (válec)

a) Válec na 1 odrazové rovině

b) Válec na 2 odrazových rovinách

c) Válec na 3 odrazových rovinách

1.9 Hladina akustického tlaku pozadí

1.10 Korekce hluku pozadí

1.11 Korekce prostředí

1.12 Korigovaná hodnota hladiny akustického tlaku na měřícím povrchu

1.13 Akustický výkon

1.14 Hladina akustického výkonu

1.15 Index směrovosti

1.16 Zdánlivý index nerovnoměrnosti hladiny akustického tlaku na měřícím povrchu

1.17 Akustický výkon s referenčními meteorologickými podmínkami

2. Odchylky měření

2.1 Směrodatná odchylka

2.2 Směrodatná odchylka reprodukovatelnosti

2.3 Celková směrodatná odchylka měření

2.4 Rozšířená nejistota měření

2.5 Odchylka měřící metody

2.6 Odchylka opakovatelnosti měření akustického tlaku

2.7 Odchylka měřící vzdálenosti

2.8 Odchylka korekce hluku v pozadí

2.9 Odchylka korekce zkušebního prostředí

2.10 Odchylka meteorologické korekce a korekce vyzařovací impedance

2.11 Odchylka měřícího přístroje

2.12 Odchylka snímání akustického tlaku

2.13 Odchylka úhlu měření

2.14 Odchylka teploty

2.15 Odchylka vlhkosti

3. Algoritmy

3.1 Referenční box

3.2 Měřící povrch

3.3 Měřící vzdálenost

3.4 Výpočet pozic mikrofonu

3.5 Filtry

3.6 Měření hladiny akustického tlaku

3.7 Výpočet výkonu

3.8 Přidat pozice mikrofonu

3.9 Výpočet chyb měření

4. Váhové filtry

5. Zvukoměr

6. Závěr

7. Seznam literatury
8. Seznam obrázků
9. Seznam tabulek
10. Seznam zkratek
11. Seznam příloh

# Úvod

Cílem této bakalářské práce je stanovit metody pro měření hladiny akustického výkonu, korekce a výpočet nejistot měření. Akustický výkon, vyzařovaný zdrojem zvuku do zkušebního prostředí, je vypočítán ze střední kvadratické hodnoty akustického tlaku, který je měřen na hypotetické měřicí ploše obklopující zdroj. Metody stanovené v této práci dovolují určování hladiny akustického výkonu ve frekvenčních pásmech nebo s použitím váhového filtru A. Zavádí se korekce pro zvuk v pozadí a odrazu od stěn a stropu. Tato práce popisuje metody třídy přesnosti 2 definované normou ISO 12001.

Pro měření s oktávovými filtry volíme střední frekvence zdroje 125 Hz – 8 Khz. Pro měření s třetino-oktávovými filtry volíme střední frekvence zdroje 100 Hz – 10 Khz.

Veškeré výpočty se provádí v programu Microsoft Excel, který podporuje Visual Basic for Applications s užitím maker. Makra se spouští tlačítky na straně „List1“. Výsledné hodnoty jsou volně reprodukovatelné.

# 1. Základní akustické veličiny a pojmy

### 1.1 Akustický tlak

Akustický tlak je výsledkem změn tlaku vzduchu, způsobených zvukovými vlnami.
p [Pa]

### 1.2 Hladina akustického tlaku

Je logaritmická míra akustického tlaku, který je podělený referenční hodnotou akustického tlaku $p_0$, při kterém je hladina rovna nule.

$$L_p = 20\log\left(\frac{p}{p_0}\right) \text{ [dB]} \qquad [1]$$

,kde $p_0$ je referenční hodnota akustického tlaku 20 μPA

### 1.3 Odrazová rovina

Rovina, na které se nachází zdroj zvuku.

### 1.4 Charakteristický rozměr zdroje

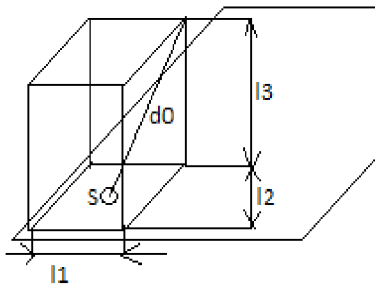
Vzdálenost od počátku do nejvzdálenějšího rohu referenčního boxu.
$d_0$ [m]

### 1.5 Referenční box

Hypotetický hranol nacházející se na odrazové rovině, který kompletně obklopuje zdroj zvuku. Rozměry boxu - $l_1$ délka, $l_2$ šířka, $l_3$ výška.
Může to být velikost reproduktoru, pokud v něm máme výklenek nebo nerovnosti, náš referenční box musí obklopit i je.

#### 1.5.1 Referenční box na jedné odrazové rovině

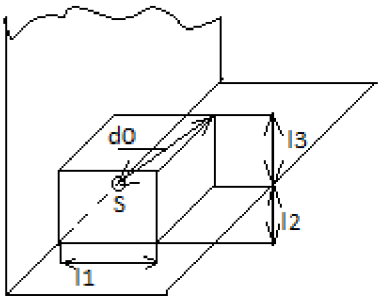
$$d_0 = \sqrt{\left(\frac{l_1}{2}\right)^2 + \left(\frac{l_2}{2}\right)^2 + {l_3}^2} \text{ [m]} \qquad [1]$$




Obr.1 Referenční box na jedné odrazové rovině

### 1.5.2 Referenční box na dvou odrazových rovinách

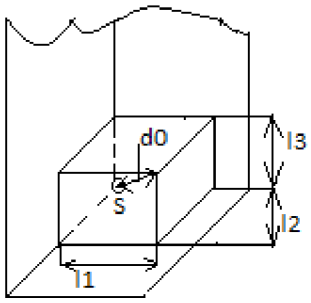
$$d_0 = \sqrt{l_1^{\,2} + (\frac{l_2}{2})^2 + l_3^{\,2}}\ [\mathrm{m}] \qquad [1]$$




Obr.2 Referenční box na dvou odrazových rovinách

### 1.5.3 Referenční box na třech odrazových rovinách

$$d_0 = \sqrt{l_1^{\,2} + l_2^{\,2} + l_3^{\,2}}\ [\mathrm{m}] \qquad [1]$$




Obr.3 Referenční box na třech odrazových rovinách

## 1.6 Měřící vzdálenost

Vzdálenost od počátku referenčního boxu k měřícímu povrchu.
Typicky je to vzdálenost od zdroje zvuku při které kalibrujeme mikrofon.
$d\ [\mathrm{m}]$

## 1.7 Měřící poloměr

Poloměr hemisférického (kulového) a válcového měřícího povrchu.
$r\ [\mathrm{m}]$

## 1.8 Měřící povrch a pozice mikrofonu na něm

Hypotetická plocha, S, na které se nachází mikrofon pro měření akustického tlaku.
Existují 4 měřící povrchy
- Hemisférický (koule)
- Rovnostěnný (hranol)
- Cylindrový (válec)
- Kombinovaný

My se budeme zabývat jen prvními třemi.

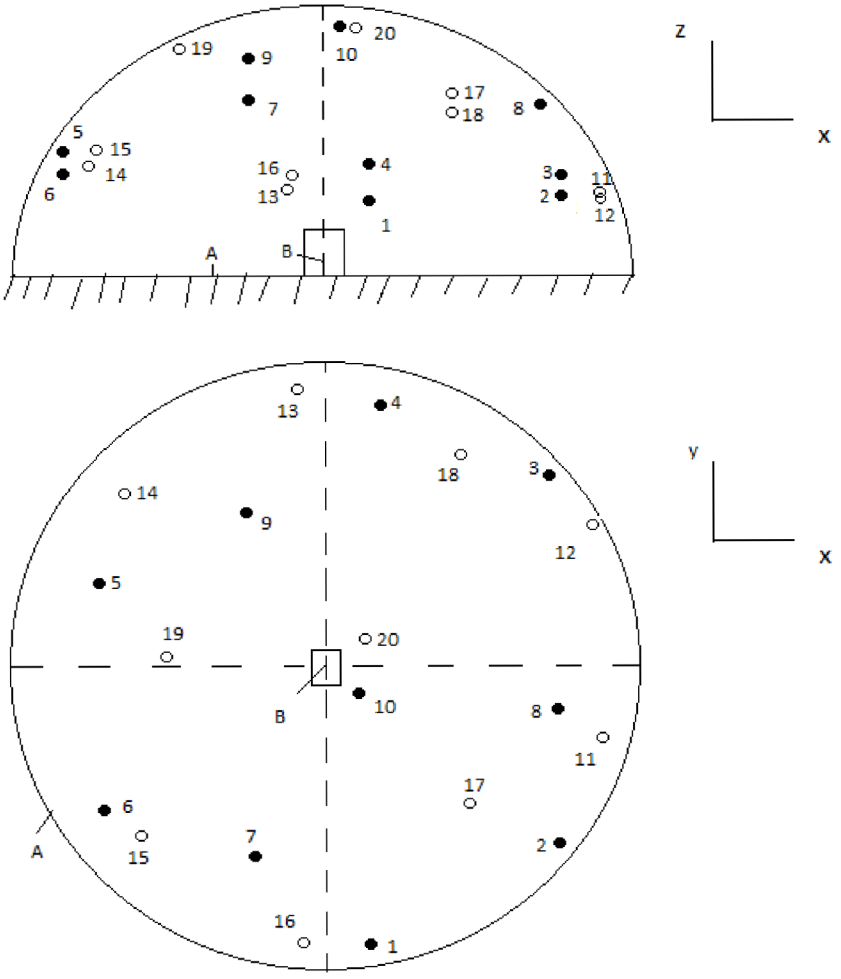
### 1.8.1 Hemisférický (koule)

Poloměr hemisféry musí být v rozmezí 1 ÷ 16 metrů a zároveň musí být roven nebo větší než dvojnásobek největšího rozměru referenčního boxu $d_0$.

$$r \leq 2d_0 \text{ [m]} \quad \text{<1;16>} \qquad [1]$$

## a) Plná hemisféra (1 odrazová rovina)

$\boldsymbol{S = 2\pi r^2}$ [m$^2$]




Obr.4 Příklad hemisférického měřícího povrchu s pozicemi mikrofonu přilehlého k jedné odrazové rovině

● – klíčová mikrofonní pozice

○ – vedlejší mikrofonní pozice

A – měřící povrch

B – referenční box

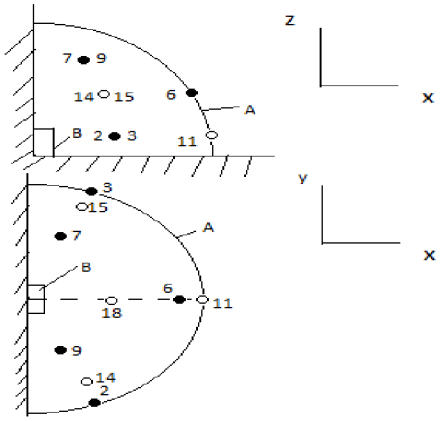
Tabulka 1 – Pozice mikrofonů na hemisférickém povrchu přilehlého k jedné odrazové rovině [1]

| Číslo pozice | xlr | ylr | zlr |
|---|---|---|---|
| 1 | -0,99 | 0 | 0,15 |
| 2 | 0,50 | -0,86 | 0,15 |
| 3 | 0,50 | 0,86 | 0,15 |
| 4 | -0,45 | 0,77 | 0,45 |
| 5 | -0,45 | -0,77 | 0,45 |
| 6 | 0,89 | 0 | 0,45 |
| 7 | 0,33 | 0,57 | 0,75 |
| 8 | -0,66 | 0 | 0,75 |
| 9 | 0,33 | -0,57 | 0,75 |
| 10 | 0 | 0 | 1 |
| 11 | 0,99 | 0 | 0,15 |
| 12 | -0,50 | 0,86 | 0,15 |
| 13 | -0,50 | -0,86 | 0,15 |
| 14 | 0,45 | -0,77 | 0,45 |
| 15 | 0,45 | 0,77 | 0,45 |
| 16 | -0,89 | 0 | 0,45 |
| 17 | -0,33 | -0,57 | 0,75 |
| 18 | 0,66 | 0 | 0,75 |
| 19 | -0,33 | 0,57 | 0,75 |
| 20 | 0 | 0 | 1 |

**b) Půl-hemisféra (2 odrazové roviny)**

Nejmenší poloměr pro hemisférický měřící povrch přilehlý ke dvěma odrazovým rovinám

$S = \pi r^2$ [m$^2$]




Obr.5 Příklad hemisférického měřícího povrchu s pozicemi mikrofonu přilehlého ke dvěma odrazovým rovinám

● - klíčová mikrofonní pozice

○ - vedlejší mikrofonní pozice

A - měřící povrch

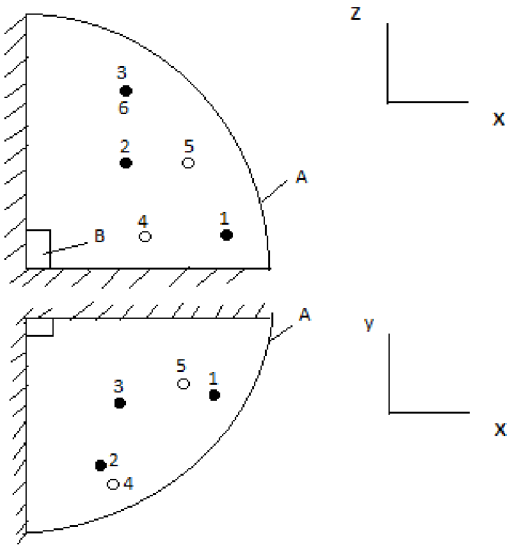
B - referenční box

Tabulka 2 - Pozice mikrofonů na hemisférickém povrchu přilehlého ke dvěma odrazovým rovinám [1]

| Číslo pozice | xlr | ylr | zlr |
|---|---|---|---|
| 2 | 0,50 | -0,86 | 0,15 |
| 3 | 0,50 | 0,86 | 0,15 |
| 6 | 0,89 | 0 | 0,45 |
| 7 | 0,33 | 0,57 | 0,75 |
| 9 | 0,33 | -0,57 | 0,75 |
| 11 | 0,99 | 0 | 0,15 |
| 14 | 0,45 | -0,77 | 0,45 |
| 15 | 0,45 | 0,77 | 0,45 |
| 18 | 0,66 | 0 | 0,75 |

**c) Čtvrt-hemisféra (3 odrazové roviny)**

$S = \frac{1}{2}\,\pi r^2\ [\mathrm{m}^2]$ [1]




Obr.6 Příklad hemisférického měřícího povrchu s pozicemi mikrofonu přilehlého ke třem odrazovým rovinám

● - klíčová mikrofonní pozice

○ - vedlejší mikrofonní pozice

A - měřící povrch

B - referenční box

Tabulka 3 - Pozice mikrofonů na hemisférickém povrchu přilehlého ke třem odrazovým rovinám

| Číslo pozice | xlr | ylr | zlr |
|---|---|---|---|
| 1 | 0,86 | -0,50 | 0,15 |
| 2 | 0,45 | -0,77 | 0,45 |
| 3 | 0,47 | -0,47 | 0,75 |
| 4 | 0,50 | -0,86 | 0,15 |
| 5 | 0,77 | -0,45 | 0,45 |
| 6 | 0,47 | -0,47 | 0,75 |

### 1.8.2 Rovnostěnný (hranol)

Měřící vzdálenost *d* musí být nejméně 0,25 metrů, nejlépe více jak 1 metr.

Rozměry hranolu se vypočítají pomocí rozměrů referenčního boxu ($l_1$ - délka , $l_2$ - šířka, $l_3$ - výška)

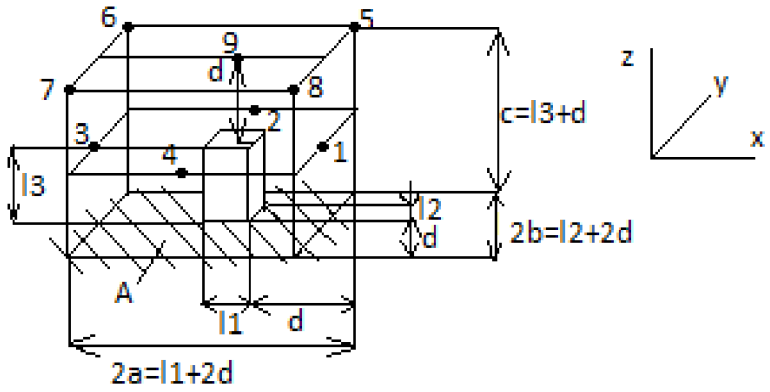
$S = 4(\mathrm{ab} + \mathrm{bc} + \mathrm{ca})\ [\mathrm{m}^2]$ [1]

$a = 0{,}5l_1 + d$ [m]

$b = 0{,}5l_2 + d$ [m]

$c = l_3 + d$ [m]

## a) Malý hranol (1 odrazová rovina)




Obr.7 Příklad měřícího povrchu s pozicemi mikrofonu a cestami pro malý stroj

● - klíčová mikrofonní pozice

A - odrazová rovina

B - referenční box

2a - délka měřícího povrchu

2b - šířka měřícího povrchu

c - výška měřícího povrchu

d - měřící vzdálenost

$l_1$ - délka referenčního boxu

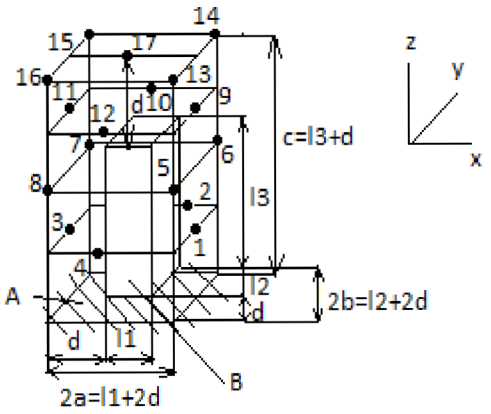
$l_2$ - šířka referenčního boxu

$l_3$ - výška referenčního boxu

Maximální rozměry malého hranolu

$l_1 \leq d\ , l_2\ \leq d\ , l_3\ \leq 2d$ [1]

## b) Vysoký hranol (1 odrazová rovina)

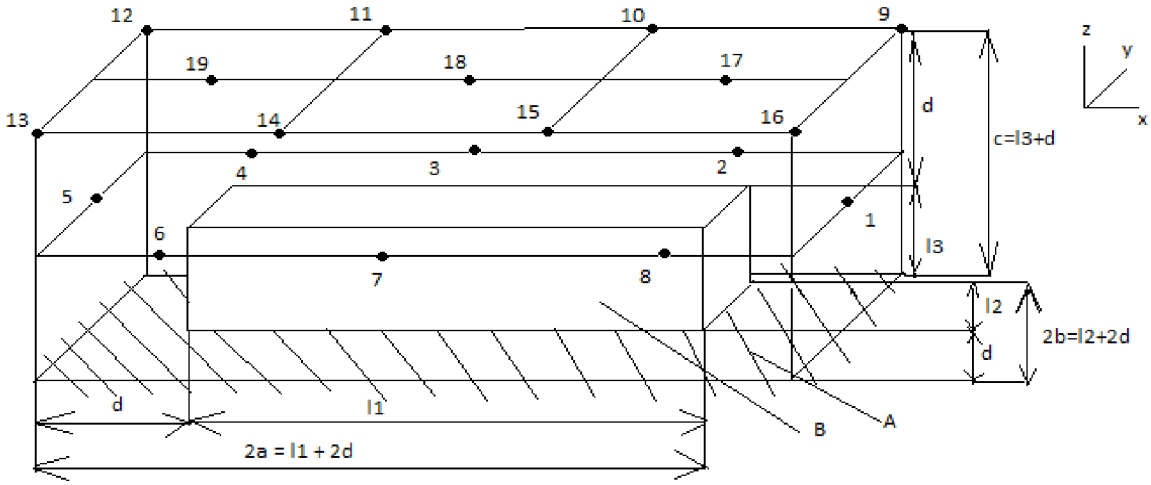



Obr. 8 Příklad měřícího povrchu s pozicemi mikrofonu a cestami pro vysoký stroj
Maximální rozměry vysokého hranolu

● - klíčová mikrofonní pozice
A - odrazová rovina
B - referenční box
2a - délka měřícího povrchu
2b - šířka měřícího povrchu
c - výška měřícího povrchu
d - měřící vzdálenost
$l_1$ - délka referenčního boxu
$l_2$ - šířka referenčního boxu
$l_3$ - výška referenčního boxu

$$l_1 \leq d\,, l_2 \leq d\,, 2d < l_3 \leq 5d \qquad [1]$$

## c) Dlouhý hranol (1 odrazová rovina)




Obr. 9 Příklad měřícího povrchu s pozicemi mikrofonu a cestami pro dlouhý stroj

● - klíčová mikrofonní pozice

A - odrazová rovina

B - referenční box

2a - délka měřícího povrchu

2b - šířka měřícího povrchu

c - výška měřícího povrchu

d - měřící vzdálenost

$l_1$ - délka referenčního boxu

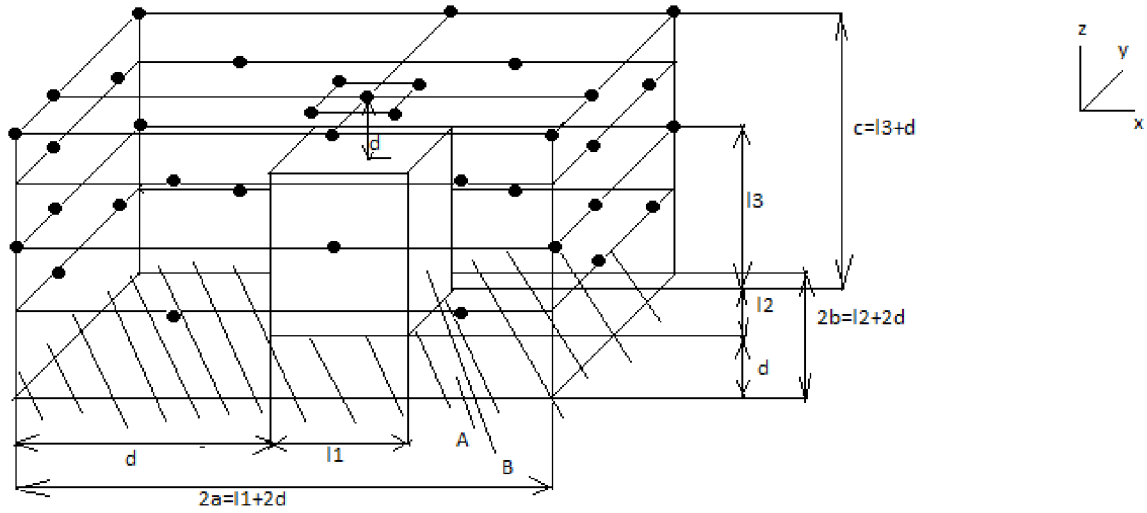
$l_2$ - šířka referenčního boxu

$l_3$ - výška referenčního boxu

Maximální rozměry dlouhého hranolu

$4d < l_1 \leq 7d\,, l_2 \leq d\,, l_3 \leq 2d$ [1]

## d) Hranol pro středně velké stroje (1 odrazová rovina)




Obr. 10 Příklad měřícího povrchu s pozicemi mikrofonu a cestami pro středně velký stroj

● - klíčová mikrofonní pozice

A - odrazová rovina

B - referenční box

2a - délka měřícího povrchu

2b - šířka měřícího povrchu

c - výška měřícího povrchu

d - měřící vzdálenost

$l_1$ - délka referenčního boxu

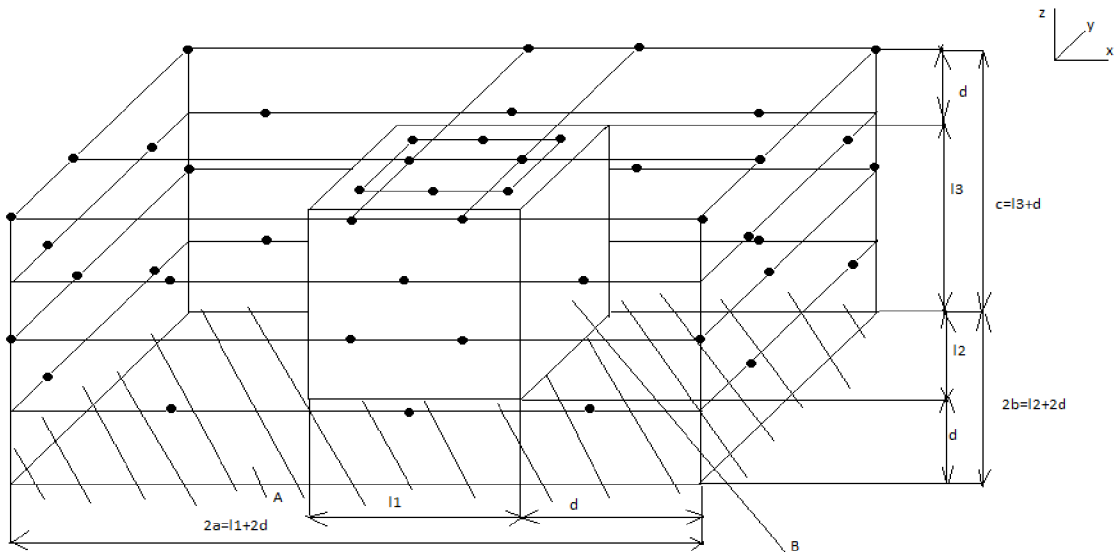
$l_2$ - šířka referenčního boxu

$l_3$ - výška referenčního boxu

Maximální rozměry hranolu pro středně velké stroje

$d < l_1 \leq 4d\,, d < l_2 \leq 4d\,, 2d < l_3 \leq 5d$ [1]

## e) Hranol pro velké stroje (1 odrazová rovina)




Obr. 11 Příklad měřícího povrchu s pozicemi mikrofonu a cestami pro velký stroj

● - klíčová mikrofonní pozice

A - odrazová rovina

B - referenční box

2a - délka měřícího povrchu

2b - šířka měřícího povrchu

c - výška měřícího povrchu

d - měřící vzdálenost

$l_1$ - délka referenčního boxu

$l_2$ - šířka referenčního boxu

$l_3$ - výška referenčního boxu

Maximální rozměry hranolu pro velké stroje

$4d < l_1 \leq 7d\,, d < l_2 \leq 4d\,, 2d < l_3 \leq 5d$ [1]

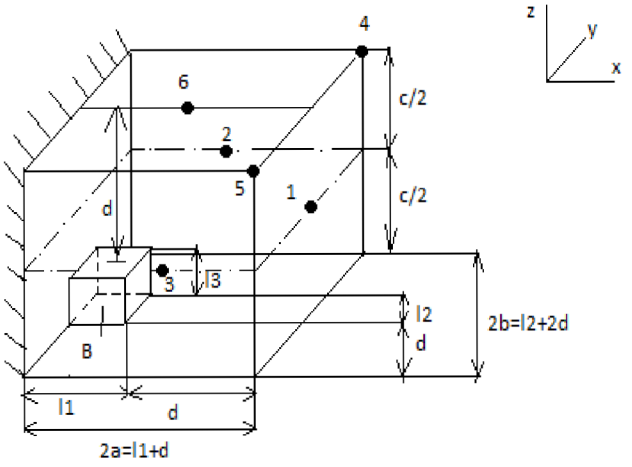
## f) Hranol na 2 odrazových rovinách

$\boldsymbol{S = 2(2ab + bc + 2ca)}$ [m$^2$] [1]

$\boldsymbol{a = 0,5l_1 + 0,5d}$ [m]

$\boldsymbol{b = 0,5l_2 + d}$ [m]

$\boldsymbol{c = l_3 + d}$ [m]




Obr. 12 Rovnostěnný měřící povrch s pozicemi mikrofonu a cestami pro zdroj zvuku přilehlí ke dvěma odrazovým rovinám

● - klíčová mikrofonní pozice

B - referenční box

2a - délka měřícího povrchu

2b - šířka měřícího povrchu

c - výška měřícího povrchu

d - měřící vzdálenost

$l_1$ - délka referenčního boxu

$l_2$ - šířka referenčního boxu

$l_3$ - výška referenčního boxu

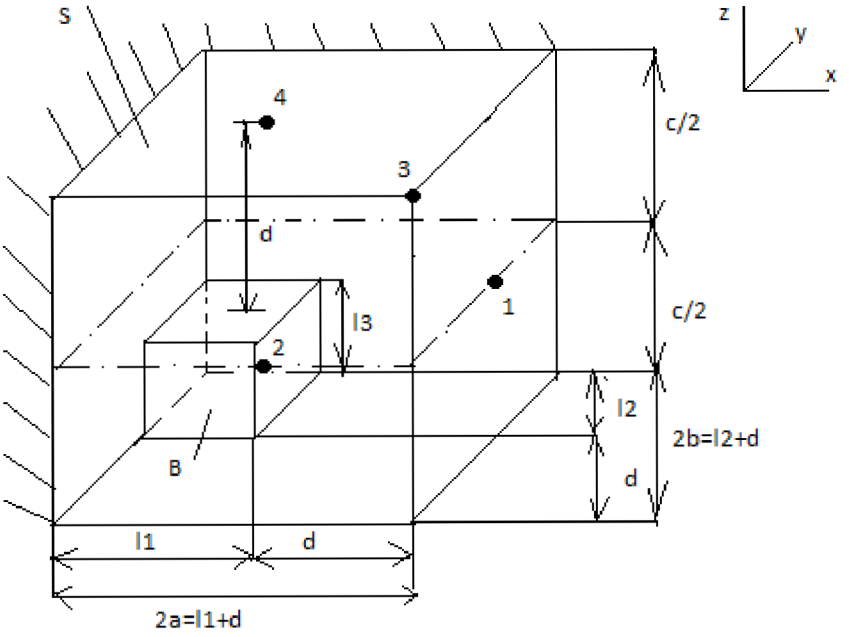
### g) Hranol na 3 odrazových rovinách

$\boldsymbol{S = 2(2ab + bc + ca)}$ [m$^2$] [1]

$\boldsymbol{a = 0,5l_1 + 0,5d}$ [m]

$\boldsymbol{b = 0,5l_2 + 0,5d}$ [m]

$\boldsymbol{c = l_3 + d}$ [m]




Obr. 13 Rovnostěnný měřící povrch s pozicemi mikrofonu a cestami pro zdroj zvuku přilehlý ke třem odrazovým rovinám

● - klíčová mikrofonní pozice

A - odrazová rovina

B - referenční box

2a - délka měřícího povrchu

2b - šířka měřícího povrchu

c - výška měřícího povrchu

d - měřící vzdálenost

$l_1$ - délka referenčního boxu

$l_2$ - šířka referenčního boxu

$l_3$ - výška referenčního boxu

S - plocha měřícího povrchu

### 1.8.3 Cylindrový (válec)

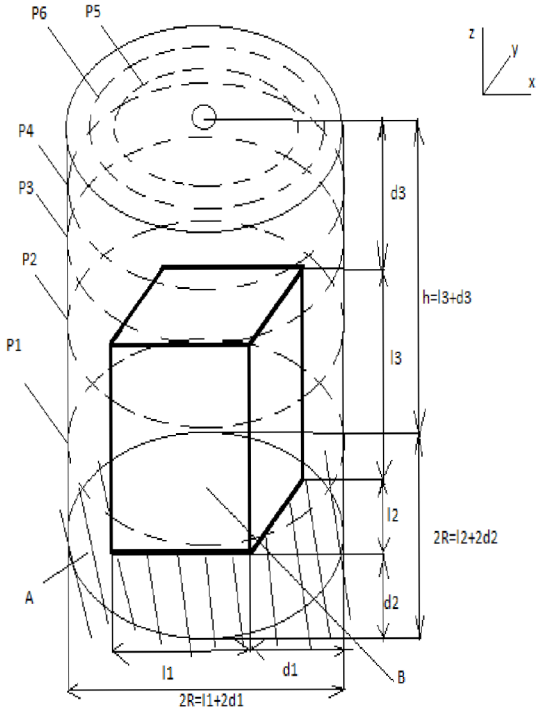
### a) Válec na jedné odrazové rovině

Poloměr a výška válce se vypočítá podle rozměrů referenčního boxu ($l_1$ - délka,$l_2$ - šířka, $l_3$ - výška)

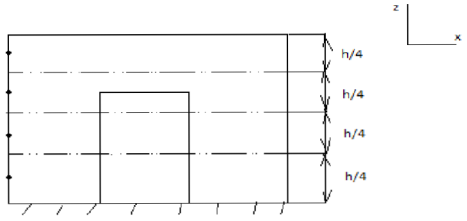
$$\boldsymbol{R = \frac{l_1}{2} + d_1 = \frac{l_2}{2} + d_2} \text{ [m]} \qquad [1]$$

$$\boldsymbol{h = l_3 + d_3} \text{ [m]}$$

P

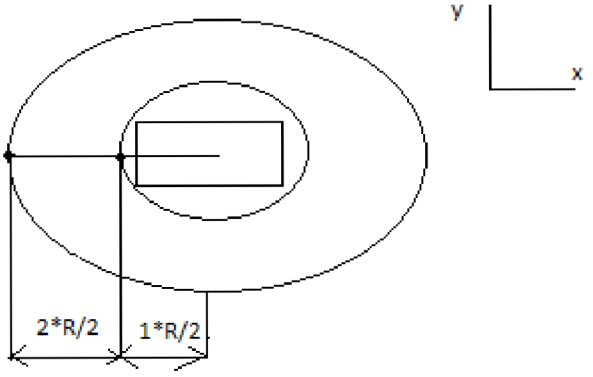



Obr. 14 Příklad válcového měřícího povrchu s cestami pro pozice mikrofonu
P1-P4 - cesta pozic mikrofonu na straně válce
P5-P6 - cesta pozic mikrofonu na podstavě válce
A - odrazová rovina
B - referenční box
$d_1$ - měřící vzdálenost délky povrchu
$d_2$ - měřící vzdálenost šířky povrchu
$d_3$ - měřící vzdálenost výšky povrchu
$l_1$ - délka referenčního boxu
$l_2$ - šířka referenčního boxu
$l_3$ - výška referenčního boxu
h - výška měřícího povrchu
2R - průměr měřícího povrchu




Obr. 15 Příklad válcového měřícího povrchu se 4mi pozicemi mikrofonu po stranách

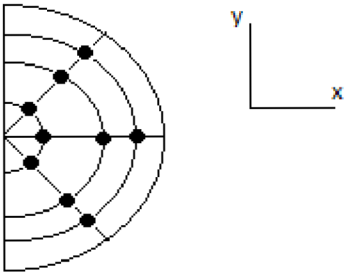
h- výška válce




Obr. 16 Příklad válcového měřícího povrchu se 2ma pozicemi mikrofonu na podstavě válce

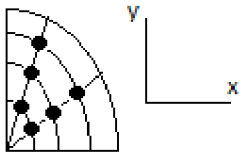
R- poloměr válce

## b) Válec na dvou odrazových rovinách




Obr. 17 Příklad válcového měřícího povrchu na 2 odrazových rovinách

### c) Válec na třech odrazových rovinách




Obr. 18 Příklad válcového měřícího povrchu na 3 odrazových rovinách

## 1.9 Hladina akustického tlaku pozadí $L_{p(B)}$

Hladiny akustického tlaku ze všech zdrojů zvuku, kromě měřeného
$L_{p(B)}$ [dB]

## 1.10 Korekce hluku pozadí $K_1$

Korekce aplikovaná na střední hodnotu akustického tlaku na měřící ploše.

$$K_1 = -10\log(1 - 10^{-0,1\Delta L_p}) \text{ [dB]} \qquad [1]$$

$$\Delta L_p = \overline{L_{p(ST)}} - \overline{L_{p(B)}} \text{ [dB]} \qquad [1]$$

,kde $\overline{L_{p(ST)}}$ je střední hodnota hladiny akustického tlaku naměřená zvukoměrem
$\overline{L_{p(B)}}$ je střední hodnota hladiny akustického tlaku pozadí

Pokud $\Delta L_p > 15$ dB, tak $K_1$ se považuje za nulu a žádná korekce není aplikována.

Pokud 6 dB < $\Delta L_p$ < 15 dB, tak se $K_1$ vypočítá podle vzorce víše a aplikuje se.

Pokud je $\Delta L_p$ < 6 dB, tak se $K_1$ považuje za 1,3 dB.

## 1.11 Korekce zkušebního prostředí $K_2$

Zvuk se v prostředí odráží od stěn a část se ho vrací zpět, to ovlivňuje měření a musíme ho korigovat.

$$K_2 = 10\log(1 + 4\frac{S}{A}) \text{ [dB]} \qquad [1]$$

,kde S je měřícího povrchu [$m^2$]
A je celková pohltivost vzduchu místnosti [$m^2$]

Norma ISO 3744 je použitelná pouze, pokud $K_2$ < 4 dB. V opačném případě musíme pracovat s jinou normou, například ISO 3746.

## 1.12 Korigovaná hodnota hladiny akustického tlaku na měřícím povrchu

Střední hodnota hladiny akustického tlaku na měřícím povrchu korigovaná hodnotami $K_1$ a $K_2$.

$$\overline{L_p} = \overline{L_{p(ST)}} - K_1 - K_2 \text{ [dB]} \quad [1]$$

,kde $\overline{L_{p(ST)}}$ je střední hodnota hladiny akustického tlaku naměřená zvukoměrem [dB]

## 1.13 Akustický výkon

Zdrojem vyzářená energie zvuku, přenesená za jednotku času prostředím.
P [W]

## 1.14 Hladina akustického výkonu

Je logaritmická míra akustického tlaku, který je podělený referenční hodnotou akustického tlaku $P_0$.

$$L_W = 10(\log\frac{P}{P_0}) = \overline{L_p} + 10\log\left(\frac{S}{S_0}\right) \text{ [dB]} \quad [1]$$

,kde P je výkon zvuku, S je plocha měřícího povrchu, $P_0$ = 1 pW, $S_0$ = 1 $m^2$

## 1.15 Zdánlivý index směrovosti

Hodnota, která vyjadřuje, jak moc zdroj zvuku vyzařuje energii do směru měřené i-té pozice mikrofonu.

$$D_{Ii}^{*} = L_{pi(ST)} - [\,\overline{L_{p(ST)}} - K_1] \text{ [dB]} \quad [1]$$

,kde $L_{pi(ST)}$ je hladina akustického tlaku na i-té mikrofonní pozici naměřená zvukoměrem [dB]

Pokud je index směrovosti na kterékoli mikrofonní pozici vyšší jak 5 dB, pak musíme změřit další hodnoty na přídavných mikrofonních pozicích.

## 1.16 Zdánlivý index nerovnoměrnosti hladiny akustického tlaku na měřícím povrchu

Je definován jako míra variability měřených hladin akustického tlaku na měřící ploše.

$$V_I^{*} = \sqrt{\frac{1}{N_M - 1}\sum_{i=1}^{N_M}[\,L_{pi(ST)} - L_{p(AV)}]^2} \text{ [dB]} \quad [1]$$

,kde $L_{pi(ST)}$ je hladina akustického tlaku na i-té mikrofonní pozici naměřená zvukoměrem
$L_{p(AV)}$ je aritmetický průměr hladin akustického tlaku na všech mikrofonních pozicích
$N_M$ je celkový počet pozic mikrofonu

### 1.17 Akustický výkon s referenčními meteorologickými podmínkami

Meteorologické referenční podmínky jsou statický tlak 101,325 KPa a atmosférická teplota 23°C.

$$L_{W,ref} = L_W + C_1 + C_2 \text{ [dB]} \quad [1]$$

,kde $L_W$ je hladina akustického výkonu [dB]
$C_1$ je korekce referenční kvantity [dB]
$C_2$ je korekce vyzařovací impedance [dB]

$$C_1 = -10\log\left(\frac{p_s}{p_{s,0}}\right) + 5\log\left(\frac{273{,}15+\theta}{\theta_0}\right) \text{ [dB]} \quad [1]$$

$$C_2 = -10\log\left(\frac{p_s}{p_{s,0}}\right) + 15\log\left(\frac{273{,}15+\theta}{\theta_0}\right) \text{ [dB]} \quad [1]$$

,kde $p_s$ je statický tlak během měření
$p_{s,0}$ je referenční statický tlak 101,325 KPa.
Θ je teplota vzduchu během měření [°C]
$\Theta_0$ je teplota 314 K.
$\Theta_1$ je teplota 296 K.

# 2. Odchylky měření

## 2.1 Směrodatná odchylka opakovatelnosti $\delta_{OMC}$

Při opakovaném měření se stejným vybavením, na stejném místě, se stejnou obsluhou se od sebe výsledné hodnoty vždy liší. Tento rozdíl popisuje odchylka $\delta_{OMC}$, může vzniknout například z dlouhodobě spuštěného zdroje.

$$\delta_{OMC} = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{j=1}^{N}\left(L_{p,j} - L_{p,AV}\right)^2} \text{ [dB]} \quad [1]$$

,kde N je počet měření
$L_{p,j}$ je hladina akustického tlaku změřená na předepsané pozici pro j-té opakování měření za předepsaných podmínek provozu.
$L_{p,av}$ je aritmetický průměr hladin akustického tlaku všech opakování

Odchylka $\delta_{OMC}$ v praxi nabývá větších hodnot než odchylka reprodukovatelnosti $\delta_{R0}$, proto ji považujeme za významnější. Pokud je $\delta_{OMC} > \delta_{R0}$ pak ká náš měřící postup vysokou přesnost.

## 2.2 Směrodatná odchylka reprodukovatelnosti $\delta_{R0}$

Tato odchylka popisuje stavové a podmínkové nejistoty jako je různá vyzařovací charakteristiku zdroje, různá instrumentace nebo implementace metody měření Hodnoty $\delta_{R0}$ se zjišťují Mezilaboratorní porovnávací test nebo s použitím matematického modelování.

Mezilaboratorní porovnávací test se provádí podle normy ISO 5725 s podmínkou reprodukovatelnosti, tj. s jinou obsluhou, v jiném prostředí, s jiným vybavením.
Pokud se hodnoty $\delta_{R0}$ po testech v několika prostředí liší jen málo, můžeme jejich střední hodnotu považovat za odchylku $\delta_{R0}$ měřícího přístroje.

Jestli nebyli vykonány mezilaboratorní porovnávací testy, musíme hodnotu odchylky $\delta_{R0}$ zjistit pomocí matematického modelu. Tento model se skládá z odchylky měřící metody $\delta_{METHOD}$, odchylky opakovatelnosti měření $\delta_{Lp(ST)}$, odchylky měřící vzdálenosti $\delta_S$, odchylky korekce hluku pozadí $\delta_{K1}$, odchylky korekce zkušebního prostředí $\delta_{K2}$, odchylky korekce meteorologických podmínek a vyzařovací impedance $\delta_{C1+C2}$, odchylky měřícího přístroje $\delta_{SLM}$, odchylky vzorkování $\delta_{MIC}$, odchylky úhlu $\delta_{ANGLE}$, odchylky teploty $\delta_{TEMP}$, odchylky vlhkosti $\delta_H$.
Každá tato odchylka se vypočítá jako roznásobení nejistoty *u* koeficientem citlivosti *c*.

$$\delta_{RO} = \sum(u_i c_i)^2 \text{ [dB]} \qquad [1]$$

Typické horní hranice hodnot odchylky $\delta_{R0}$ jsou zapsané v tabulce 4 níže.

Tabulka 4 – Typické horní hranice standartní odchylky reprodukovatelnosti metody, $\delta_{R0}$, pro výpočet hladin výkonu zvuku a hladin energie zvuku [1]

| Frekvenční šířka pásma | Střední frekvence třetino-oktávového pásma [Hz] | Horní hranice odchylky $\delta_{R0}$ [dB] |
|---|---|---|
| Třetino-oktávová | 100 - 160 | 3,0 |
| | 200 - 315 | 2,0 |
| | 400 - 5 000 | 1,5 |
| | 6 300 - 10 000 | 2,5 |

## 2.3 Celková směrodatná odchylka měření $\delta_{TOT}$

Skládá se z odchylek $\delta_{R0}$ a $\delta_{OMC}$.

$$\delta_{TOT} = \sqrt{{\delta_{OMC}}^2 + {\delta_{RO}}^2} \text{ [dB]} \qquad [1]$$

## 2.4 Rozšířená nejistota měření *U*

Pro oboustranné normální rozdělení distribuční funkce existuje 95% pravděpodobnost, že skutečná hodnota hladiny akustického výkonu leží v rozsahu ($L_W$ - U ; $L_W$ + U) s činitelem rozšíření *k* = 2.
Pro jednostranné normální rozdělení distribuční funkce existuje 95% pravděpodobnost, že skutečná hodnota hladiny akustického výkonu leží v rozsahu ($L_W$ - U ; $L_W$ + U) s činitelem rozšíření *k* = 1,6.

$$U = k * \delta_{TOT} \text{ [dB]} \quad [1]$$

## 2.5 Směrodatná odchylka měřící metody $\delta_{METHOD}$

Pro matematický model uvažujeme nejistotu měřící metody $u_{METHOD}$ = 0,4 dB a koeficient citlivosti $c_{METHOD}$ = 1.

$$\delta_{METHOD} = u_{METHOD} c_{METHOD} \text{ [dB]} \quad [1]$$

## 2.6 Směrodatná odchylka opakovatelnosti měření akustického tlaku $\delta_{Lp(ST)}$

Za stejných podmínek, se stejným vybavením a obsluhou změříme šestkrát na jedné mikrofonní pozici akustický tlak. Nejistota $u_{Lp(ST)}$ je velikost shody výsledků jednotlivých měření

$$u_{Lp(ST)} = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{j=1}^{N}(L'_{p,j} - L'_{p(AV)})^2} \text{ [dB]} \quad [1]$$

,kde $L'_{p,j}$ je nekorigovaná hladina akustického tlaku pro j-té opakování [dB]
$L'_{p(AV)}$ je aritmetický průměr hladin akustického tlaku pro všechna opakování [dB]

Koeficient citlivosti $c_{Lp(ST)}$ je ovlivněn hlukem v pozadí a získává se výpočtem

$$c_{Lp(ST)} = 1 + \frac{1}{10^{0,1\Delta L_p} - 1} = 1 + c_{K1} \text{ [-]}$$

$$\Delta L_p = \overline{L'_{p(ST)}} - \overline{L'_{p(B)}} \text{ [dB]} \quad [1]$$

,kde $\overline{L'_{p(ST)}}$ je střední hodnota hladiny akustického tlaku naměřená zvukoměrem pro všechna opakování [dB]
$\overline{L'_{p(B)}}$ je střední hodnota hladiny akustického tlaku pozadí [dB]

$$\delta_{Lp(ST)} = u_{Lp(ST)} c_{Lp(ST)} \text{ [dB]} \quad [1]$$

## 2.7 Směrodatná odchylka měřící vzdálenosti $\delta_S$

Nejistota $u_S$ vzniká z nepřesného umístění mikrofonu od zdroje zvuku.

$$u_S = \frac{\Delta d}{\sqrt{3}} \text{ [dB]} \quad [1]$$

,kde Δd je absolutní chyba měřené vzdálenosti [m]

Koeficient citlivosti $c_S$ se vypočítá jako

$$c_S = \frac{8{,}7}{d} \text{ [-]} \quad [1]$$

,kde d je měřící vzdálenost od zdroje zvuku

$$\delta_S = u_S c_S \text{ [dB]} \quad [1]$$

## 2.8 Směrodatná odchylka korekce hluku v pozadí $\delta_{K1}$

Nejistota vzniká z nepřesného výpočtu $K_1$ a získává se z opakovaného měření hluku pozadí na jedné mikrofonní pozici na měřícím povrchu.

Koeficient citlivosti se vypočítá

$$c_{K1} = \frac{1}{10^{0{,}1\Delta L_p} - 1} \text{ [-]} \quad [1]$$

$$\Delta L_p = \overline{L'_{p(ST)}} - \overline{L'_{p(B)}} \text{ [dB]} \quad [1]$$

,kde $\overline{L'_{p(ST)}}$ je střední hodnota hladiny akustického tlaku naměřená zvukoměrem pro všechna opakování [dB]

$\overline{L'_{p(B)}}$ je střední hodnota hladiny akustického tlaku pozadí [dB]

$$\delta_{K1} = u_{K1} c_{K1} \text{ [dB]} \quad [1]$$

## 2.9 Směrodatná odchylka korekce zkušebního prostředí $\delta_{K2}$

Nejistota $u_{K2}$ je dána jako čtvrtina korekce zkušebního prostředí.

$$u_{K2} = \frac{K_2}{4} \text{ [dB]} \quad [1]$$

Koeficient citlivosti $c_{K2} = 1$.

$$\delta_{K2} = u_{K2} c_{K2} \text{ [dB]} \quad [1]$$

## 2.10 Směrodatná odchylka meteorologické korekce a korekce vyzařovací impedance $\delta_{C1+C2}$

Nejistota $u_{C1+C2}$ je pro matematický model rovna 0,2 dB.
Koeficient citlivosti $c_{C1+C2} = 1$

$$\delta_{C1+C2} = u_{C1+C2} c_{C1+C2} \text{ [dB]} \quad [1]$$

## 2.11 Směrodatná odchylka měřícího přístroje $\delta_{SLM}$

Nejistota měřícího přístroje přímo ovlivňuje výsledné hodnoty měření. Pro měřící přístroje třídy 1, hodnota $u_{SLM} = 0,5$ dB.

Koeficient citlivosti $c_{SLM} = 1$

$$\delta_{SLM} = u_{SLM} c_{SLM} \text{ [dB]} \quad [1]$$

## 2.12 Směrodatná odchylka snímání akustického tlaku $\delta_{MIC}$

Vzniká z konečného počtu mikrofonních pozic a je dána zdánlivým indexem nerovnoměrnosti hladiny akustického tlaku na měřícím povrchu $V_I^*$ a počtem mikrofonních pozic pro měření $N_M$.

$$u_{MIC} = \frac{V_I^*}{\sqrt{N_M}} \text{ [dB]} \quad [1]$$

Koeficient citlivosti $c_{MIC} = 1$

$$\delta_{MIC} = u_{MIC} c_{CIM} \text{ [dB]} \quad [1]$$

## 2.13 Směrodatná odchylka úhlu měření $\delta_{ANGLE}$

Tato nejistota vzniká z úhlu dopadu akustické energie. Pro hemisférický a cylindrový měřící povrchu je nejistota $u_{ANGLE} = 0,25$ dB. Pro rovnostěnný měřící povrch se nejistota $u_{ANGLE}$ musí vypočítat.

$$u_{ANGLE} = 0,05 + 0,6 \log\left(\frac{S}{d^2}\right) \text{ [dB]} \quad [1]$$

,kde *S* je plocha měřícího povrchu a *d* je měřící vzdálenost

Koeficient citlivosti $c_{ANGLE}$ se vypočítá jako

$$c_{ANGLE} = 10^{-K2/10} \text{ [-]} \quad [1]$$

$$\delta_{ANGLE} = u_{ANGLE} c_{ANGLE} \text{[dB]} \quad [1]$$

## 2.14 Směrodatná odchylka teploty $\delta_\theta$

Tato nejistota vzniká z důvodu měnící se teploty okolí. Změny teploty ovlivňují pohltivost stěn v místnosti a tím ovlivňují korekci zkušebního prostředí $K_2$.

$$u_\theta = \frac{\Delta\theta}{\sqrt{3}} \text{ [dB]} \qquad [1]$$

,kde Δθ je rozdíl teplot v místnosti [°C]

Koeficient ciltivosti $c_\theta$ se vypočítá jako

$$c_\theta = \frac{-0{,}57+0{,}25(2{,}6f)}{1+0{,}0011H+0{,}007\theta}(1-10^{-\frac{K_2}{10}}) \text{ [-]} \qquad [1]$$

,kde f je frekvence zdroje zvuku při měření
H je relativní hustota vyjádřená v procentech
Θ teplota při měření

$$\delta_\theta = u_\theta c_\theta \text{ [dB]} \qquad [1]$$

## 2.15 Směrodatná odchylka vlhkosti $\delta_H$

Tato nejistota vzniká ze změn relativní vlhkosti.

$$u_H = \frac{\Delta H}{\sqrt{3}} \text{ [dB]} \qquad [1]$$

,kde *ΔH* je rozdíl vlhkosti v místnosti [%]

Koeficient citlivosti $c_H$ se vypočítá jako

$$c_H = \frac{-2{,}6+1{,}6\log(0{,}7f)}{1+0{,}5H}(1-10^{-\frac{K_2}{10}}) \text{ [-]} \qquad [1]$$

,kde f je frekvence zdroje zvuku při měření [Hz]
H je relativní vlhkost vzduchu během měření [%]

$$\delta_H = u_H c_H \text{ [dB]} \qquad [1]$$

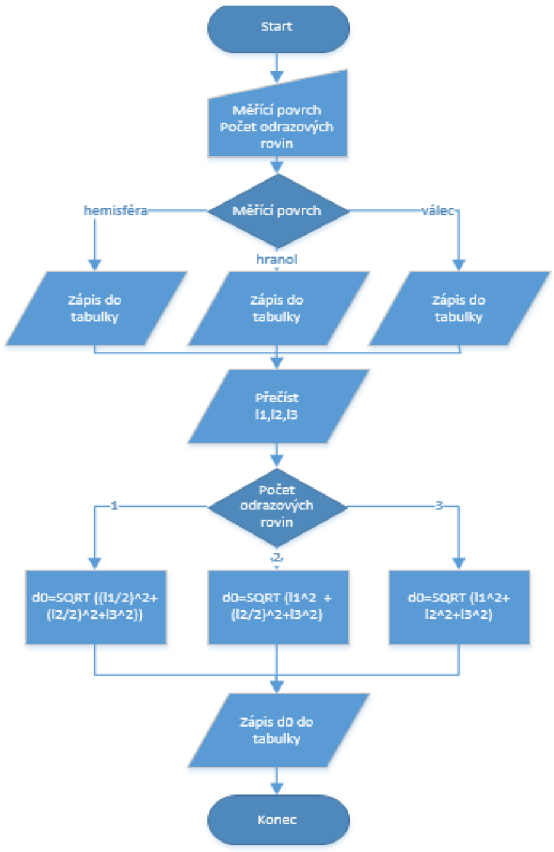
# 3. Algoritmy

## 3.1 Referenční box

Obr.19 Stručný vývojový diagram makra pro referenčního box

Po zmáčknutí tlačítka „REFERENČNÍ BOX“ se ukáže okno, do kterého se zadává velikost referenčního boxu, tyto hodnoty se poté uloží do tabulky na List1.

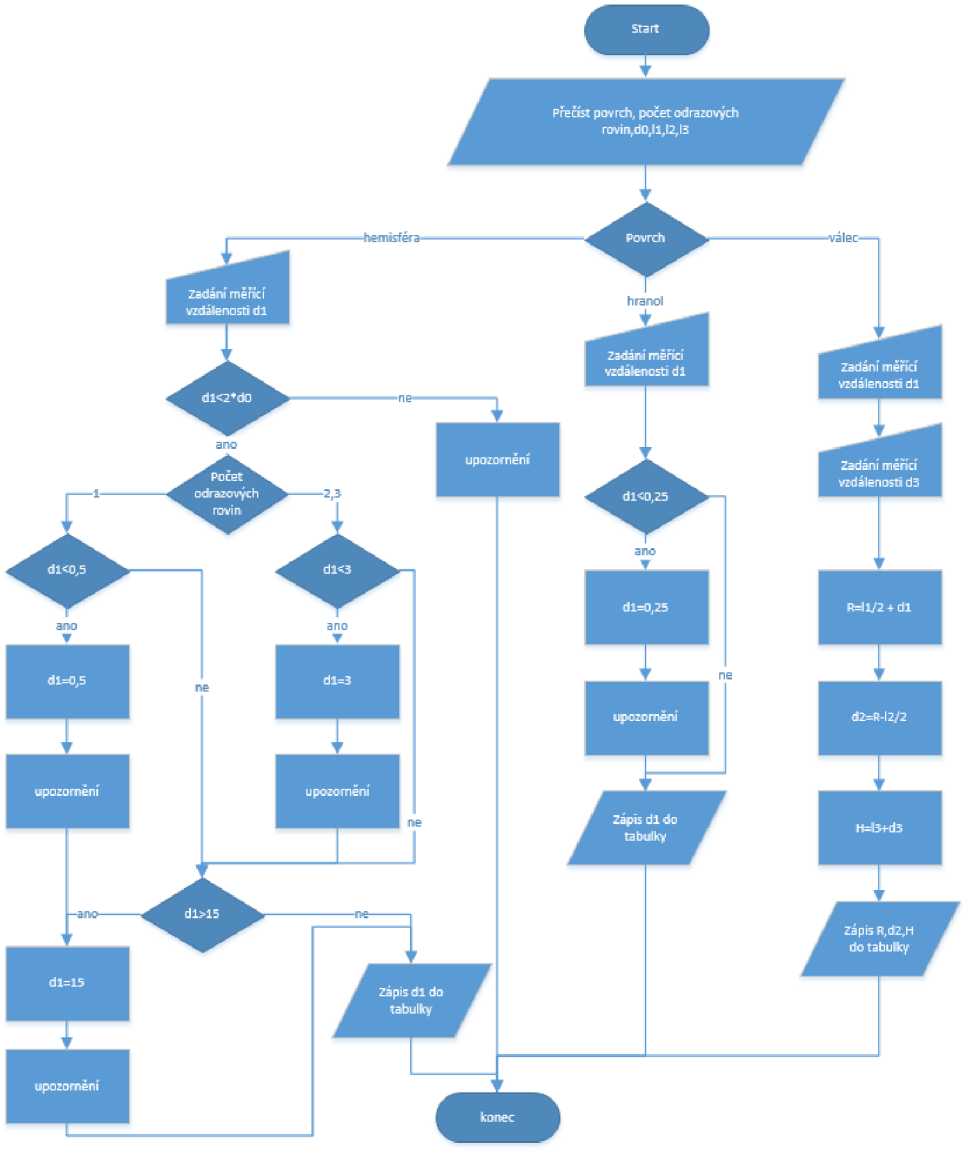
## 3.2 Měřící povrch




Obr.20 Stručný vývojový diagram makra pro měřící povrch

Po zmáčknutí tlačítka „MĚŘÍCÍ POVRCH“ se ukáže okno, ze kterého si musíme vybrat měřící povrch a počet odrazových rovin. Poté se vypočítá charakteristický rozměr zdroje „$d_0$“. Na List1 se zapíše zvolený měřící povrch a počet odrazových rovin, do neviditelné strany List2 se uloží hodnota „d0“, se kterou se pracuje v dalším makru „MĚŘÍCÍ VZDÁLENOST“

## 3.3 Měřící vzdálenost

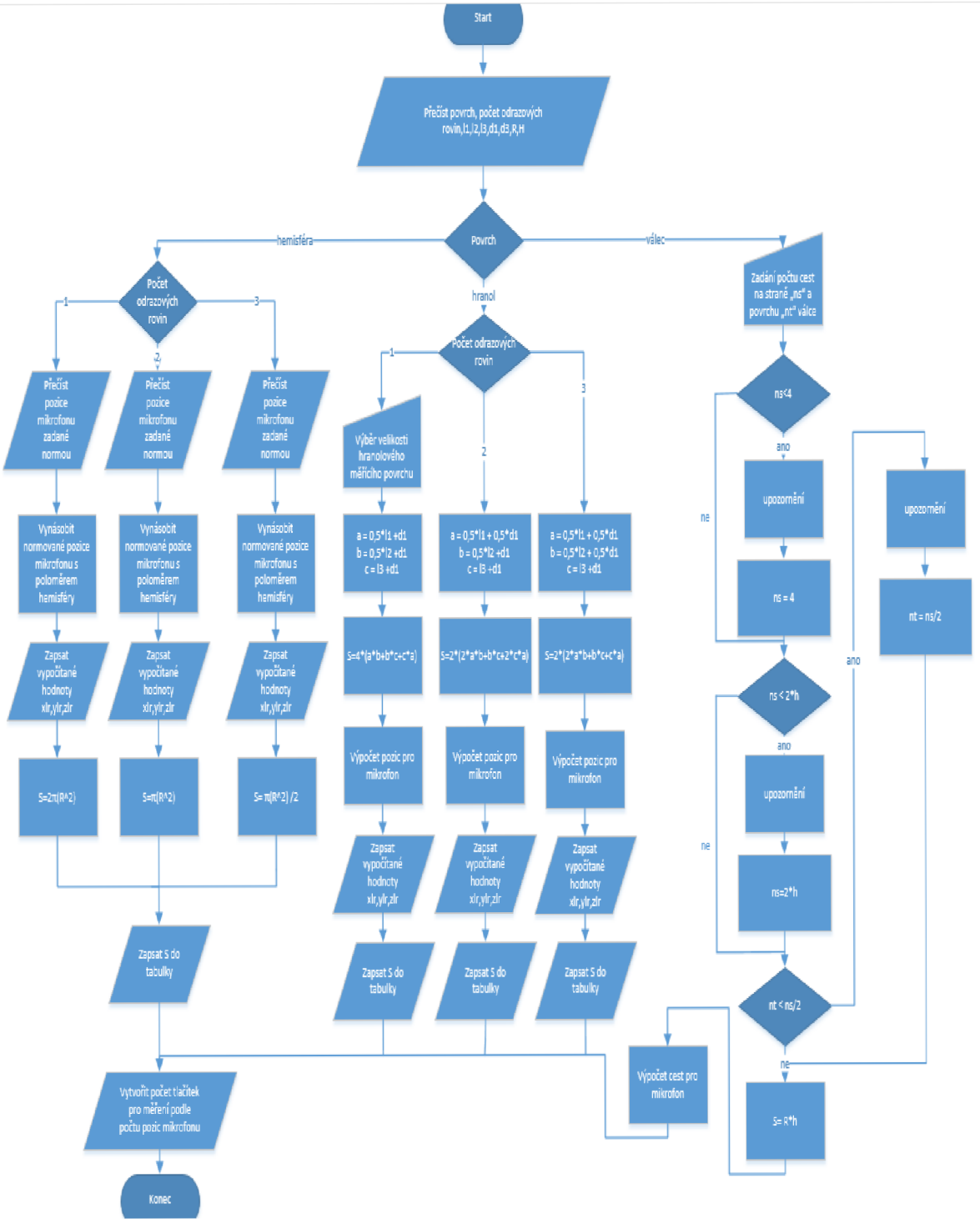



Obr.21 Stručný vývojový diagram makra pro měřící vzdálenost

Z tabulky se vyčte měřící povrch, počet odrazových rovin a velikost referenčního boxu. Ukáže se okno, do kterého zadáváme velikosti měřící vzdálenosti, pokud je měřící vzdálenost „d1“ pro hemisféru menší než dvojnásobek charakteristického rozměru zdroje „d0“, otevře se okno s upozorněním a program se ukončí, pokud bude zvolená hodnota měřící vzdálenosti menší/větší než je minimální/maximální, ukáže se se okno s upozorněním a automaticky se ta hodnota přepíše na minimální/maximální, která se

dále zapíše do tabulky. Pro hranol je minimální hodnota měřící vzdálenosti 0.25m , v případě, že zvolíme menší než je minimální, automaticky se tato hodnota přepíše na minimální a zapíše se do tabulky.
Poloměr, šířka a výška válce se vypočítá podle velikosti referenčního boxu a zadaných velikostí měřících vzdáleností.

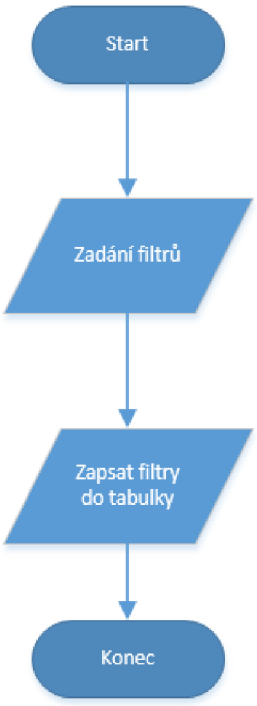
## 3.4 Výpočet pozic pro mikrofon




Obr.22 Stručný vývojový diagram makra na výpočet pozic pro mikrofon

Z tabulky se vyčte měřící povrch, počet odrazových rovin a velikost referenčního boxu, měřících vzdáleností, poloměr a výšku válce. Pro zvolenou hemisféru se vypočítají dle normované tabulky pozice mikrofonu a obsah koule. Pro hranol se nejdříve ukáže okno, ze kterého vybereme velikost zdroje zvuku, pokud nevíme co zvolit, tak vybereme první položku Default a zbytek se vypočítá, dále se vypočítají strany hranolu a podle nich se vypočítají pozice pro mikrofon s obsahem hranolu. Pro válec se ukáže okno, do kterého zadáme počet cest mikrofonu na plášti a podstavy válce. Pro přesnější měření je nutné mít počet cest na plášti jako nejméně dvojnásobek výšky válce, s minimálním počtem ns = 4. Počet cest na podstavě válce je nutné mít nejméně ns/2. V průběhu programu se vypočítá i obsah válce a všechny hodnoty se zapíšou do tabulky na List1. Pro každou pozici/cestu mikrofon se vytvoří tlačítka Lp a Lb, kterými probíhá měření akustického tlaku.

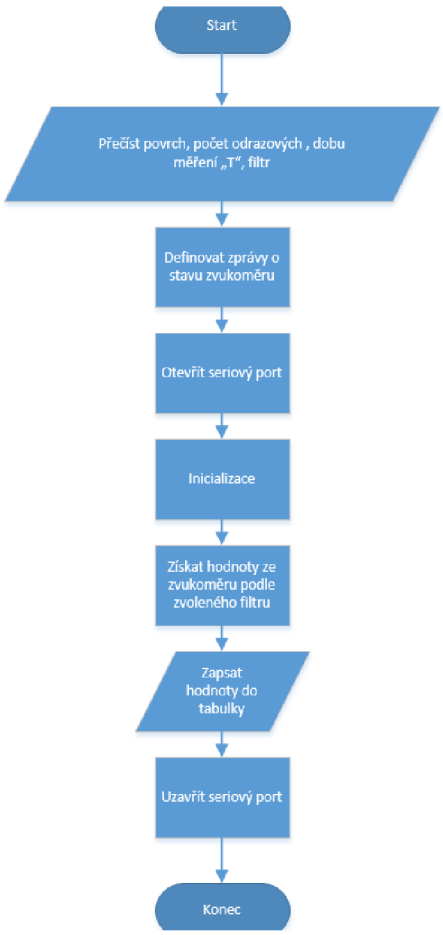
## 3.5 Filtry




Obr.23 Stručný vývojový diagram makra pro výběr filtrů

Po spuštění programu se ukáže okno, ze kterého zvolíme filtr, se kterým chceme měřit akustický tlak. Zvolený filtr se zapíše do tabulky na List1. Samotné měření probíhá jinými tlačítky.

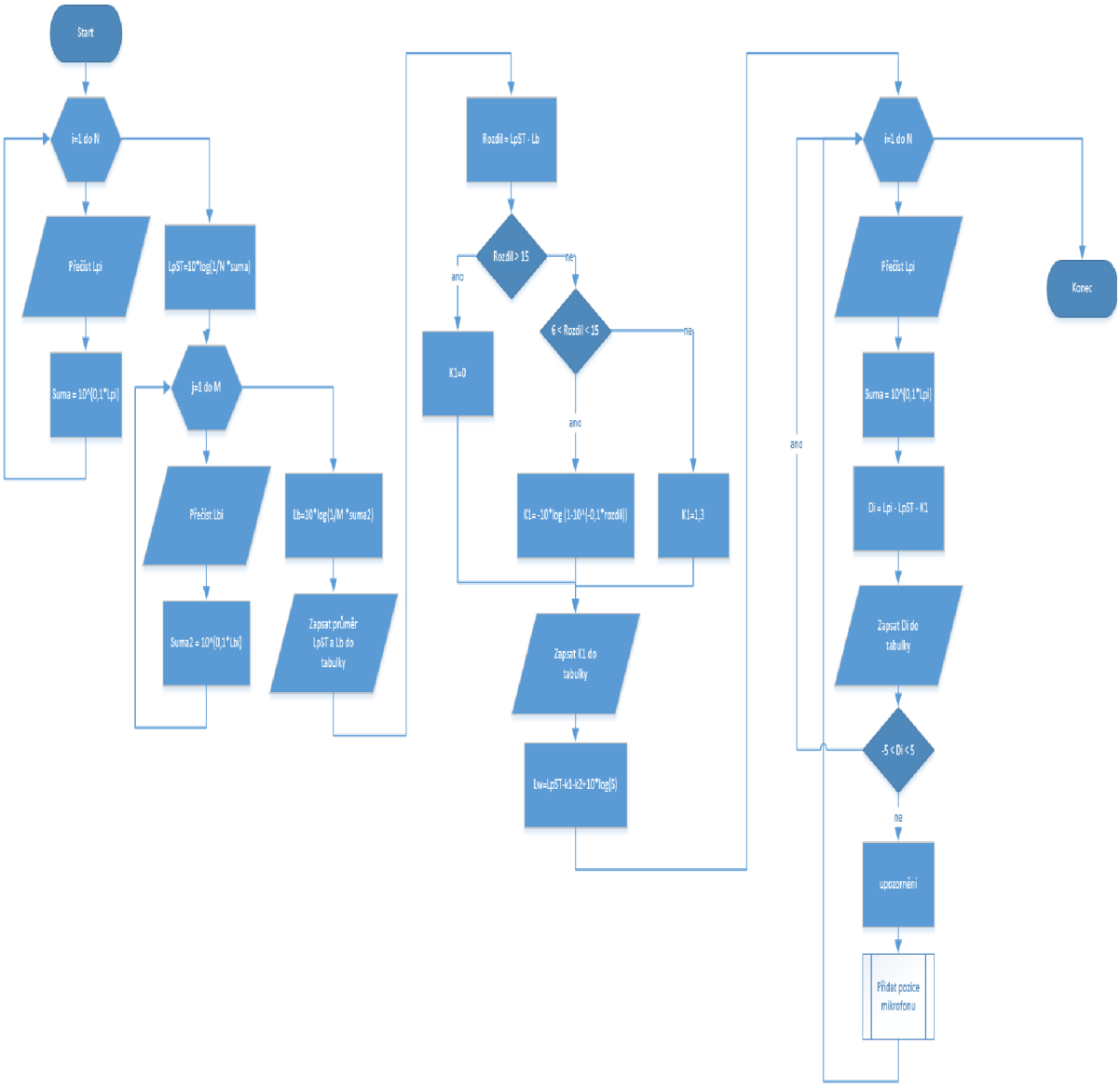
## 3.6 Měření akustického tlaku zvukoměrem




Obr.24 Stručný vývojový diagram makra na měření hladiny akustického tlaku zvukoměřem

Měření se spouští tlačítky „Lp“ a „Lb“. Jediný rozdíl mezi tlačítky je místo kam se výsledné hodnoty budou ukládat. Měření se skládá asi ze 40ti maker, na začátku každého z nich spustí makro pro otevření komunikačního portu a na konci je uzavření komunikace na stejném portu. V případě, že se zvukoměr v průběhu měření odpojí od počítače se nám tak zajistí, že program pro měření vyhlásí chybu a zastaví se. Po zahájení komunikace se spustí inicializace, kde se zjišťuje jestli je zvukoměr k počítači připojený správně. Po inicializaci se z List1 vyčte doba měření a zadané filtry, například frekvenční A a časový F, do zvukoměru se vyšle řetězec LAF a vrátí se nám hodnota naměřená zvukoměrem s filtrem AF. Pokud je zadaná doba měření například 4 sekundy, tak zvukoměr každou sekundu změří hodnotu akustického tlaku, zapíše je na neviditelný List2 , udělá se aritmetický průměr těchto 4 změřených hodnot a výsledek se zapíše se na své místo do tabulky na List1.

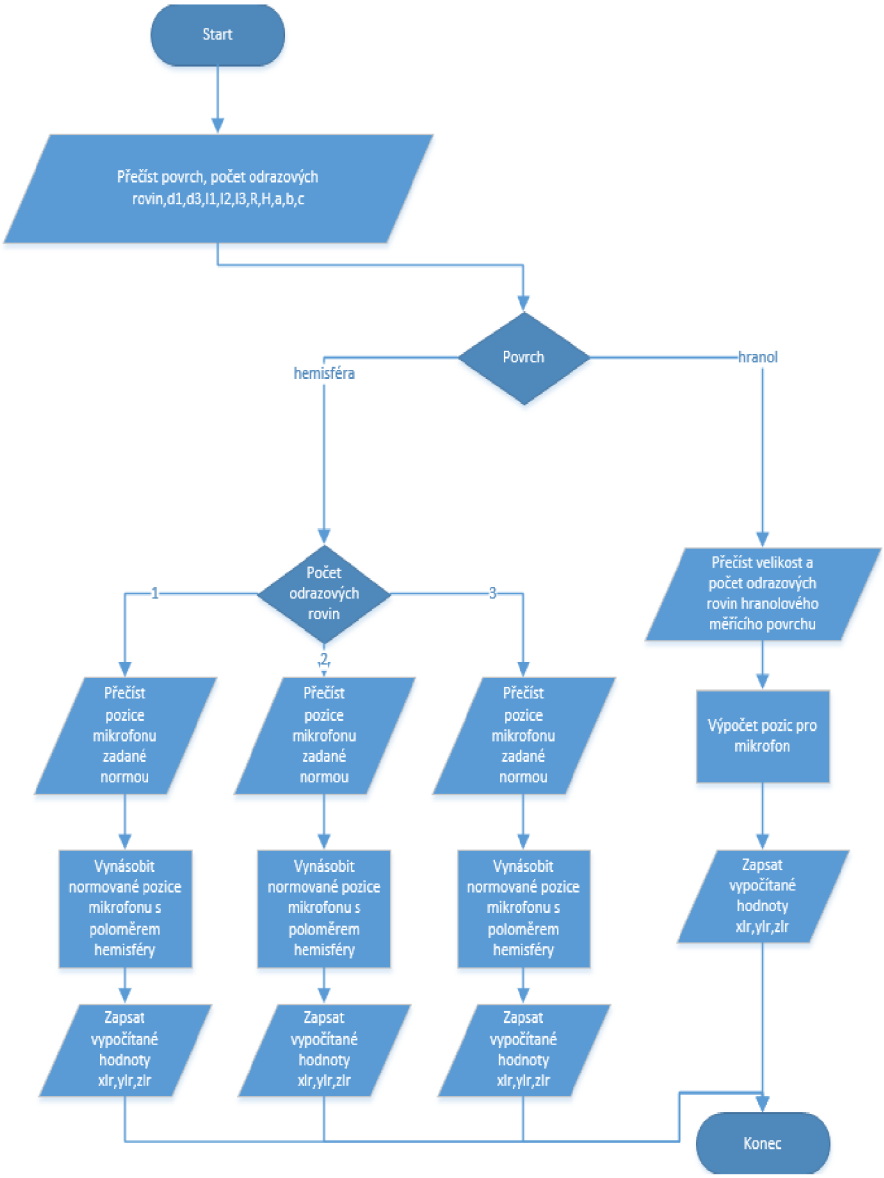
## 3.7 Výpočet výkonu




Obr.25 Stručný vývojový diagram makra na výpočet výkonu

Na začátku programu se spočítá střední hodnota hladin akustického tlaku zdroje zvuku i akustického tlaku v pozadí, naměřené na všech pozicích mikrofonu. Pokud je rozdíl těchto středních hodnot větší než 15dB , není potřeba korekce zvuku v pozadí a zapsat psát, že K1=0. Pokud je rozdíl v rozmezí 6-15dB, je vypočítá se korekce K1. Pokud je rozdíl menší než 6dB,měření je vysoce nepřesné a počítáme s korekcí K1=1,3dB. Dále se vypočítá zdánlivý index směrovosti Di pro každou hladinu akustického tlaku zdroje zvuku na všech pozicích mikrofonu. Pokud je tato hodnota větší než 5dB nebo menší než -5dB, spustí se podprogram „Přidat pozice mikrofonu“.

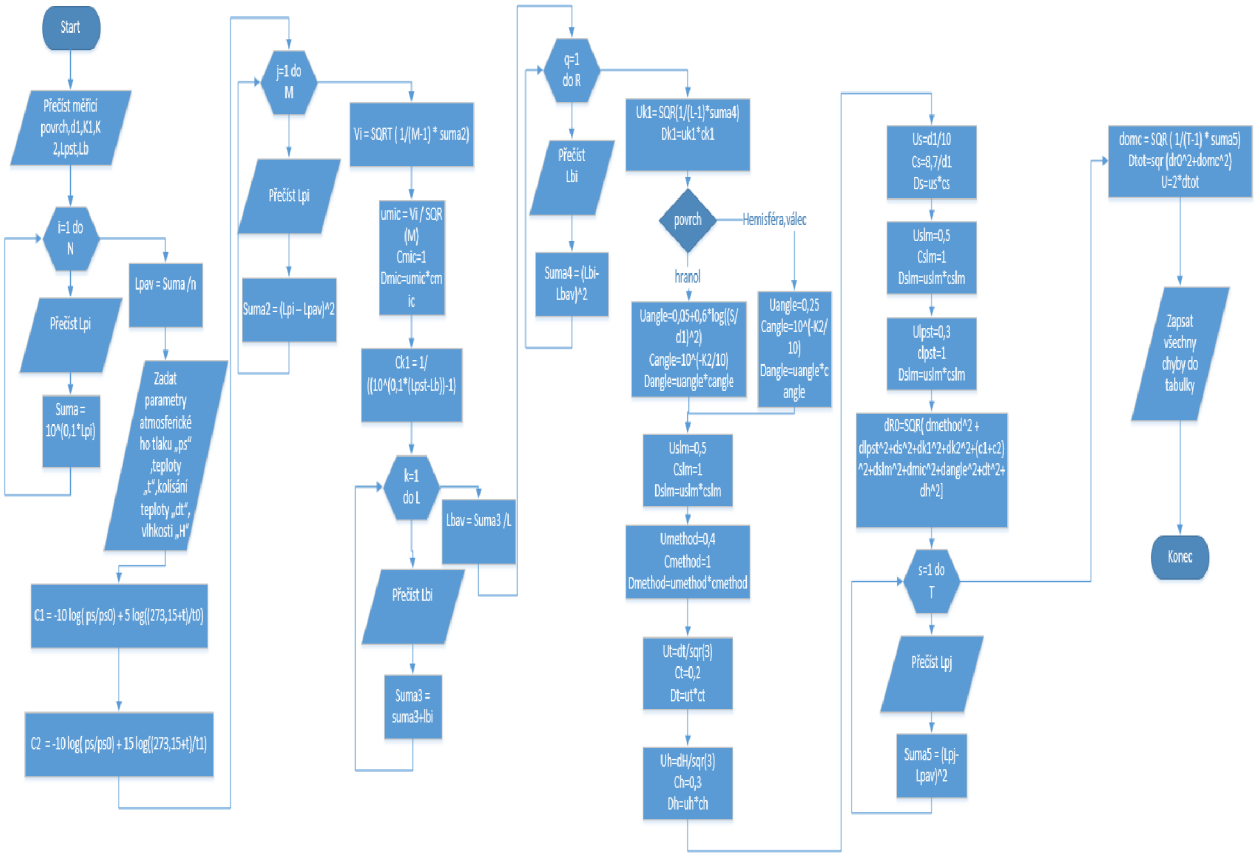
## 3.8 Přidat pozice mikrofonu




Obr.26 Stručný vývojový diagram makra pro přídavné pozice mikrofonu

Po spuštění programu se přečte tvar měřícího povrchu, počet odrazových rovin, velikosti referenčního boxu a měřícího povrchu. Vypočítají se další pozice pro mikrofon a zapíšou se do tabulky na List1.

## 3.9 Chyby měření

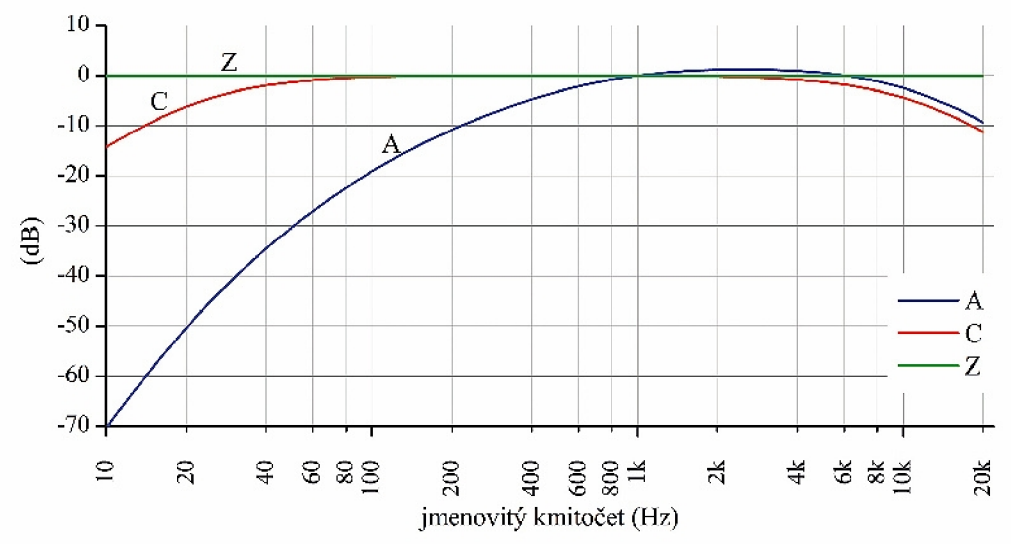



Obr.27 Stručný vývojový diagram makra pro výpočet chyb v měření

Na začátku programu se přečte tvar měřícího povrchu, korekce, střední hodnota hladiny akustického tlaku zdroje zvuku a zvuku v pozadí. Udělá se aritmetický průměr hladin akustického tlaku na všech pozicích mikrofonu a objeví se okno do kterého se musíme zadat velikost atmosférického tlaku „ps“, teploty „t“, kolísání teploty „dt“, a kolísání vlhkosti „dh“. Dále se spočítá chyba meteorologické korekce C1, korekce vyzařovací impedance C2, odchylka vzorkování mikrofonu $\delta_{mic}$, odchylka korekce zvuku v pozadí $\delta_{k1}$, odchylka korekce v prostředí $\delta_{k2}$, odchylka úhlu měření $\delta_{angle}$, odchylka měřícího přístroje $\delta_{slm}$, odchylka způsobená měřící metodou $\delta_{method}$, odchylka způsobená teplotou $\delta_t$ a vlhkosti $\delta_h$, odchylka měřící vzdálenosti $\delta_s$, odchylka opakovatelnosti měření akustického tlaku $\delta_{lpst}$. Ze všech těchto odchylek se vypočítá celková odchylka od výkonu akustického tlaku U.

# 4. Váhové filtry

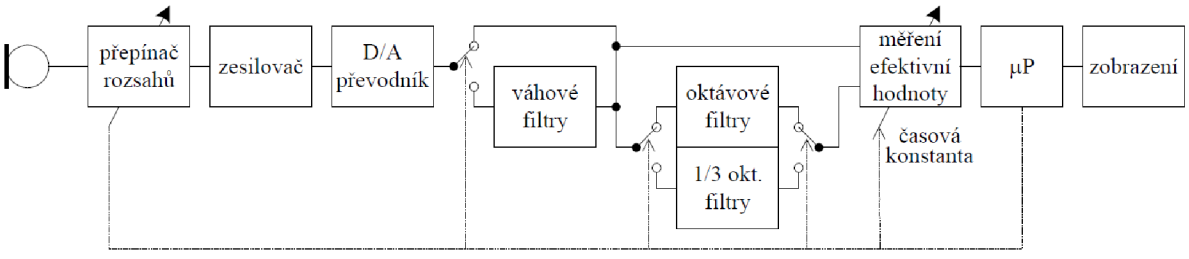
Lidský sluch má všeobecně různou citlivost při různých frekvencích. Dochází tedy ke zkreslení při vnímání zvuku sluchovým orgánem. Z tohoto důvodu se zavádí tzv. váhové filtry, které obsahují určité decibelové korekce.
V mezinárodním měřítku se nejčastěji používá váhový filtr typu A.




Obr.28 Frekvenční charakteristika váhových filtrů [2]

# 5. Zvukoměr

Základním měřicím přístrojem v akustice je zvukoměr (Sound Level Meter, Sound Pressure Meter). V principu se jedná o analogový nebo digitální měřič efektivní hodnoty napětí, který je vybaven převodníkem napětí na hodnotu hladiny akustického tlaku. Většina zvukoměrů je také vybavena oktávovými a třetinooktávovými filtry (nebo umožňuje jejich externí připojení) pro měření veličin zvukového pole v kmitočtových pásmech.




Obr.29 Zjednodušené blokové schéma zvukoměru [2]

# 6. Závěr

Úkolem této bakalářské práce bylo prostudovat a vytvořit metody pro výpočet pozic mikrofonu pro měření, hladin akustického tlaku a výkonu, korekcí, nejistot měření v závislosti na rozměrech referenčního boxu, volbě měřícího povrchu, počtu měřících rovin, vzdálenosti mikrofonu od zdroje zvuku, přímé měření zvukoměrem podle volby filtrů a doby měření v programu Microsoft Excel s užitím tlačítek a maker.

# 7. Seznam literatury

[1] ISO 3744: Acoustics - Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure - Engineering methods for an essentially free field over a reflecting plane. International Organization for Standardization, 2010.

[2] SCHIMMEL, J. Elektroakustika. Skripta VUT v Brně, 2013.

# 8. Seznam obrázků

Obr.1 Referenční box na jedné odrazové rovině
Obr.2 Referenční box na dvou odrazových rovinách
Obr.3 Referenční box na třech odrazových rovinách
Obr.4 Příklad hemisférického měřícího povrchu s pozicemi mikrofonu přilehlého k jedné odrazové rovině
Obr.5 Příklad hemisférického měřícího povrchu s pozicemi mikrofonu přilehlého ke dvěma odrazovým rovinám
Obr.6 Příklad hemisférického měřícího povrchu s pozicemi mikrofonu přilehlého ke třem odrazovým rovinám
Obr.7 Příklad měřícího povrchu s pozicemi mikrofonu a cestami pro malý stroj
Obr.8 Příklad měřícího povrchu s pozicemi mikrofonu a cestami pro vysoký stroj
Obr.9 Příklad měřícího povrchu s pozicemi mikrofonu a cestami pro dlouhý stroj
Obr.10 Příklad měřícího povrchu s pozicemi mikrofonu a cestami pro středně velký stroj
Obr.11 Příklad měřícího povrchu s pozicemi mikrofonu a cestami pro velký stroj
Obr.12 Rovnostěnný měřící povrch s pozicemi mikrofonu a cestami pro zdroj zvuku přilehlí ke dvěma odrazovým rovinám
Obr.13 Rovnostěnný měřící povrch s pozicemi mikrofonu a cestami pro zdroj zvuku přilehlý ke třem odrazovým rovinám
Obr.14 Příklad válcového měřícího povrchu s cestami pro pozice mikrofonu
Obr.15 Příklad válcového měřícího povrchu se 4mi pozicemi mikrofonu po stranách
Obr.16 Příklad válcového měřícího povrchu se 2ma pozicemi mikrofonu na podstavě válce
Obr.17 Příklad válcového měřícího povrchu na 2 odrazových rovinách
Obr.18 Příklad válcového měřícího povrchu na 3 odrazových rovinách
Obr.19 Stručný vývojový diagram makra referenčního box

Obr.20 Stručný vývojový diagram makra měřícího povrchu
Obr.21 Stručný vývojový diagram makra měřící vzdálenost
Obr.22 Stručný vývojový diagram makra na výpočet pozic pro mikrofon
Obr.23 Stručný vývojový diagram makra pro výběr filtrů
Obr.24 Stručný vývojový diagram makra na měření akustického tlaku zvukoměřem
Obr.25 Stručný vývojový diagram makra na výpočet výkonu
Obr.26 Stručný vývojový diagram makra pro přídavné pozice mikrofonu
Obr.27 Stručný vývojový diagram makra pro výpočet chyb v měření
Obr.28 Frekvenční charakteristika váhových filtrů [2]
Obr.29 Zjednodušené blokové schéma zvukoměru [2]
Obr.30 Screenshot souboru Automatizace měření akustického výkonu.xlms

## 9. Seznam Tabulek

Tabulka 1 – Pozice mikrofonů na hemisférickém povrchu přilehlého k jedné odrazové rovině [1]
Tabulka 2 – Pozice mikrofonů na hemisférickém povrchu přilehlého ke dvěma odrazovým rovinám [1]
Tabulka 3 – Pozice mikrofonů na hemisférickém povrchu přilehlého ke třem odrazovým rovinám [1]
Tabulka 4 – Typické horní hranice standartní odchylky reprodukovatelnosti metody, $\delta_{R0}$, pro výpočet hladin výkonu zvuku a hladin energie zvuku [1]

## 10. Seznam zkratek

$L_P$ – hladina akustického tlaku [dB]
$d_0$ – charakteristický rozměr zdroje [m]
$l_1$ – délka referenčního boxu [m]
$l_2$ – šířka referenčního boxu [m]
$l_3$ – výška referenčního boxu [m]
d – měřící vzdálenost [m]
r – poloměr [m]
h – výška válce [m]
S – plocha [$m^2$]
a – délka hranolového měřícího povrchu [m]
b – šířka hranolového měřícího povrchu [m]
c – výška hranolového měřícího povrchu [m]
K1 – korekce hluku pozadí [dB]
K2 – korekce zkušebního prostředí [dB]
$\overline{L_p}$ – střední hodnota hladiny akustického tlaku [dB]

A – absorbce zvuku v místnosti [$m^2$]

P – výkon [W]
$L_W$ – hladina akustického výkonu [dB]
$D_I$ – index směrovosti [dB]
$V_I$ – zdánlivý index nerovnoměrnosti hladiny akustického tlaku [dB]
$N_M$ – počet pozic mikrofonu [-]
$C_1$ – korekce referenční kvantity [dB]
$C_2$ – korekce vyzařovací impedance [dB]
p – statický tlak [Pa]
Θ – teplota vzduchu [K]
t – teplota vzduchu [°C]
$\delta_{OMC}$ – směrodatná odchylka opakovatelnosti [dB]
$\delta_{R0}$ – směrodatná odchylka reprodukovatelnosti [dB]
$\delta_{TOT}$ – celková směrodatná odchylka měření [dB]
U – Rozšířená nejistota měření [dB]
k – činitel rozšíření [-]
$\delta_{METHOD}$ – směrodatná odchylka měřící metody [dB]
$c_{METHOD}$ – koeficient citlivosti [-]
$u_{METHOD}$ – nejistota měřící metody [dB]
$\delta_{Lp(ST)}$ – směrodatná odchylka opakovatelnosti měření akustického tlaku [dB]
$c_{Lp(ST)}$ – koeficient citlivosti [-]
$u_{Lp(ST)}$ – nejistota opakovatelnosti měření [dB]
$\delta_S$ – směrodatná odchylka měřící vzdálenosti [dB]
$c_S$ – koeficient citlivosti [-]
$u_S$ – nejistota měřící vzdálenosti [dB]
$\delta_{K1}$ – směrodatná odchylka korekce hluku v pozadí [dB]
$c_{K1}$ – koeficient citlivosti [-]
$u_{K1}$ – nejistota korekce hluku v pozadí [dB]
$\delta_{K2}$ – směrodatná odchylka korekce zkušebního prostředí [dB]
$c_{K2}$ – koeficient citlivosti [-]
$u_{K2}$ – nejistota korekce zkušebního prostředí [dB]
$\delta_{C1+C2}$ – směrodatná odchylka meteorologické korekce a korekce vyzařovací impedance [dB]
$c_{C1+C2}$ – koeficient citlivosti [-]
$u_{C1+C2}$ – nejistota meteorologické korekce a korekce vyzařovací impedance [dB]
$\delta_{SLM}$ – směrodatná odchylka měřícího přístroje [dB]
$c_{SLM}$ – koeficient citlivosti [-]
$u_{SLM}$ – nejistota měřícího přístroje[dB]
$\delta_{MIC}$ – směrodatná odchylka snímání akustického tlaku [dB]
$c_{MIC}$ – koeficient citlivosti [-]
$u_{MIC}$ – nejistota snímání akustického tlaku [dB]
$\delta_{ANGLE}$ – směrodatná odchylka úhlu měření [dB]

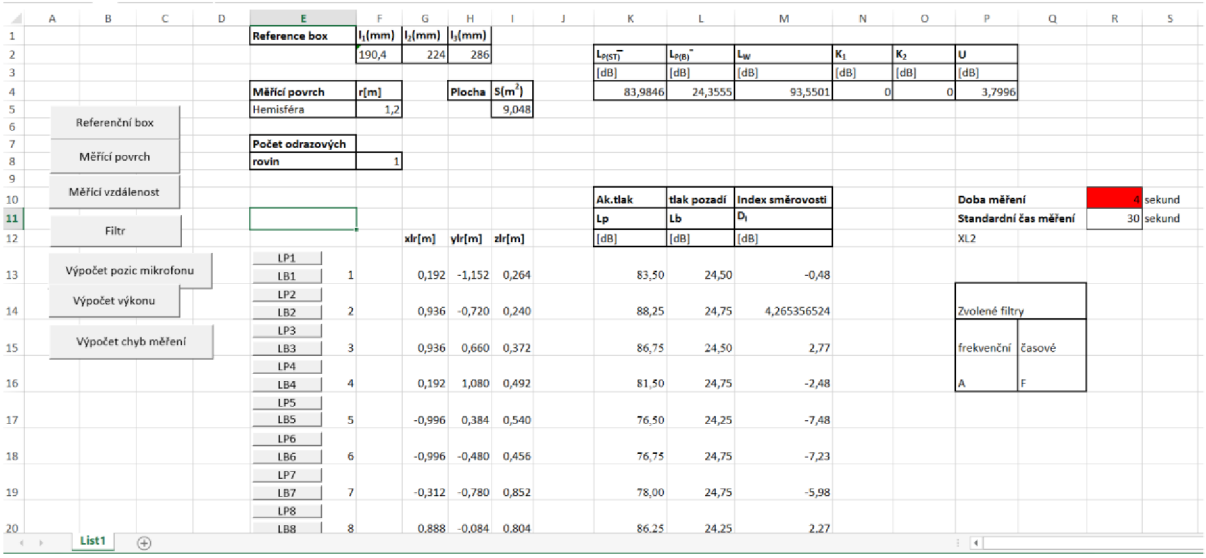
$c_{ANGLE}$ – koeficient citlivosti [-]
$u_{ANGLE}$ – nejistota úhlu měření [dB]
$\delta_{\theta}$ – směrodatná odchylka rozdílu teploty [dB]
$\Delta\theta$ – rozdíl teplot v místnosti [°C]
$c_{\theta}$ – koeficient citlivosti [-]
$u_{\theta}$ – nejistota rozdílu teplot [dB]
f – frekvence/kmitočet [Hz]
H – relativní hustota [%]
$\delta_H$ – směrodatna odchylka rozdílu vlhkosti [dB]
$c_H$ – koeficient citlivosti [-]
$u_H$ – nejistota rozdílu vlhkosti [dB]

# 11. Seznam Příloh

Příloha 1: Soubor Microsoft Excel s makry s názvem „ Automatizované měření akustického výkonu“ .

Příloha 2: DVD, které obsahuje Soubor Microsoft Excel s makry s názvem Automatizované měření akustického výkonu.xlms a pdf bakalářské práce s názvem 2016_BP_Prát_Marek_158215.pdf

Příloha 3: Screenshot souboru Automatizace měření akustického výkonu.xlms




Obr.30 Screenshot souboru Automatizace měření akustického výkonu.xlms