



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

AUTHOR

Marek Prát

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Schimmel, PhD

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 zákonů (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. Jirí 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 popsáný 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 mikrofону, nejistota měření.

Key words

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

Bibliografická 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 Měřicí vzdálenost

1.7 Měřicí poloměr

1.8 Měřicí 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 mikrofону
- 3.5 Filtry
- 3.6 Měření hladiny akustického tlaku
- 3.7 Výpočet výkonu
- 3.8 Přidat pozice mikrofону
- 3.9 Výpočet chyb měření

4. Váhové filtry

5. Zvukoměr

6. Závěr

7. Seznam literatury

8. Seznam obrázků

9. Seznam tabulek

10. Seznam zkratk

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.

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

,kde p_0 je referenční hodnota akustického tlaku $20 \mu\text{PA}$

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]

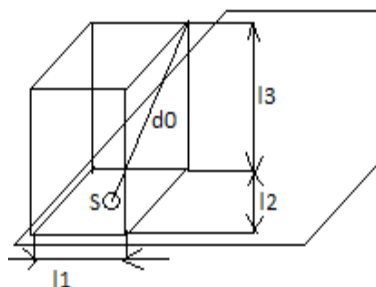
1.5 Referenční box

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

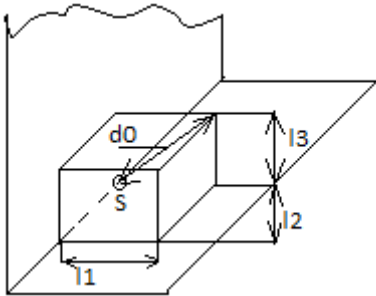
$$d_0 = \sqrt{\left(\frac{l_1}{2}\right)^2 + \left(\frac{l_2}{2}\right)^2 + l_3^2} \text{ [m]} \quad [1]$$



Obr.1 Referenční box na jedné odrazové rovině

1.5.2 Referenční box na dvou odrazových rovinách

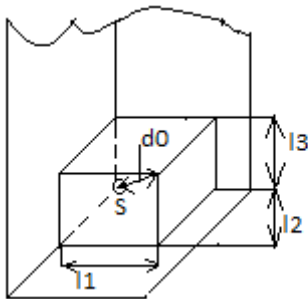
$$d_0 = \sqrt{l_1^2 + \left(\frac{l_2}{2}\right)^2 + l_3^2} \text{ [m]} \quad [1]$$



Obr.2 Referenční box na dvou odrazových rovinách

1.5.3 Referenční box na třech odrazových rovinách

$$d_0 = \sqrt{l_1^2 + l_2^2 + l_3^2} \text{ [m]} \quad [1]$$



Obr.3 Referenční box na třech odrazových rovinách

1.6 Měřicí vzdálenost

Vzdálenost od počátku referenčního boxu k měřicímu povrchu.

Typicky je to vzdálenost od zdroje zvuku při které kalibrujeme mikrofon.

d [m]

1.7 Měřicí poloměr

Poloměr hemisférického (kulového) a válcového měřicího povrchu.

r [m]

1.8 Měřicí povrch a pozice mikrofonu na něm

Hypotetická plocha, S , na které se nachází mikrofon pro měření akustického tlaku.

- Existují 4 měřicí povrchy
- Hemisférický (koule)
 - Rovnostěnný (hranol)
 - Cylindrový (válec)
 - Kombinovaný

My se budeme zabývat jen prvními třemi.

1.8.1 Hemisférický (koule)

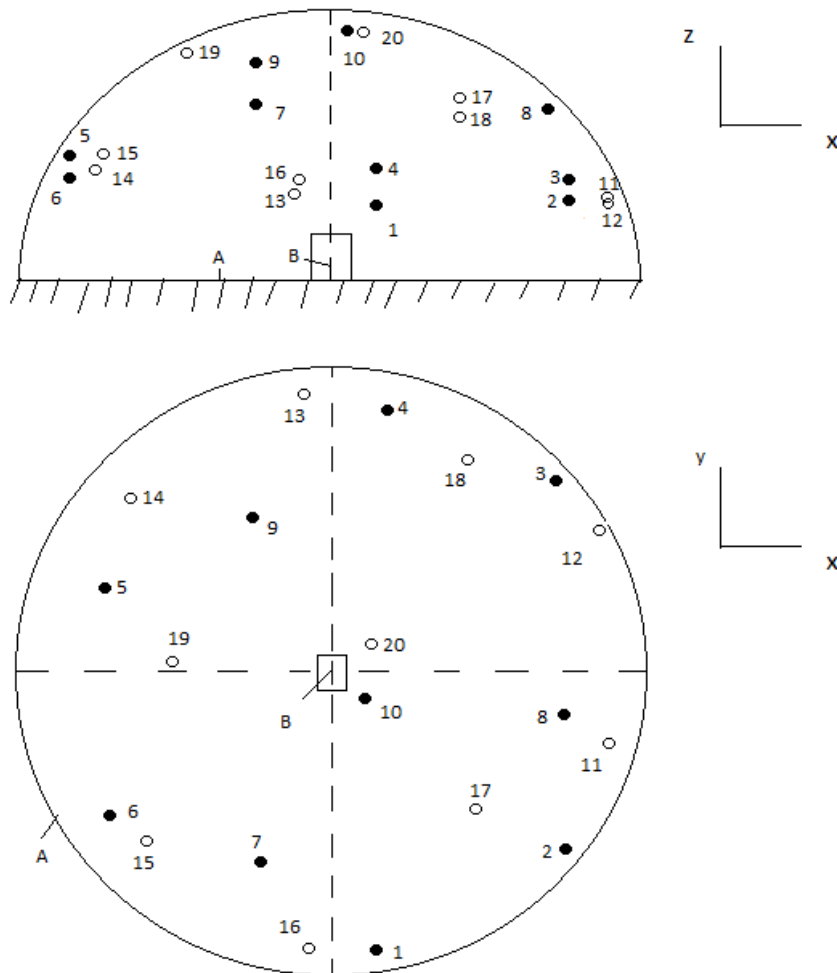
Poloměr hemisféry musí být v rozmezí 1 ÷ 16 metrů a zároveň musí být roven nebo větší než dvojnásobek největšího rozměru referenčního boxu d_0 .

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

[1]

a) Plná hemisféra (1 odrazová rovina)

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



Obr.4 Příklad hemisférického měřicího povrchu s pozicemi mikrofону přilehlého k jedné odrazové rovině

- – klíčová mikrofonní pozice
- – vedlejší mikrofonní pozice
- A – měřící povrch
- B – referenční box

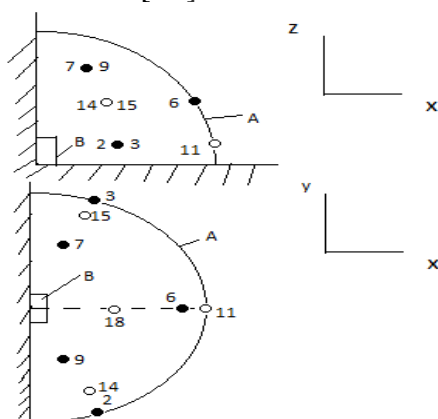
Tabulka 1 – Pozice mikrofonů na hemisférickém povrchu přilehlého k jedné odrazové rovině [1]

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

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



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

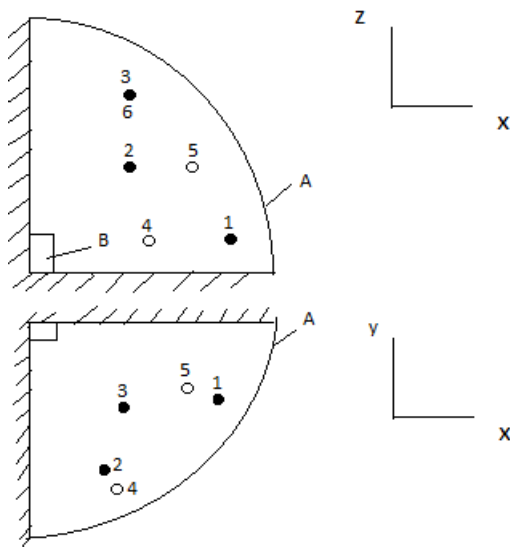
Tabulka 2 - Pozice mikrofonů na hemisférickém povrchu přilehlého ke dvěma odrazovým rovinám [1]

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)

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

[1]



Obr.6 Příklad hemisférického měřicího 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)

Měřicí 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)

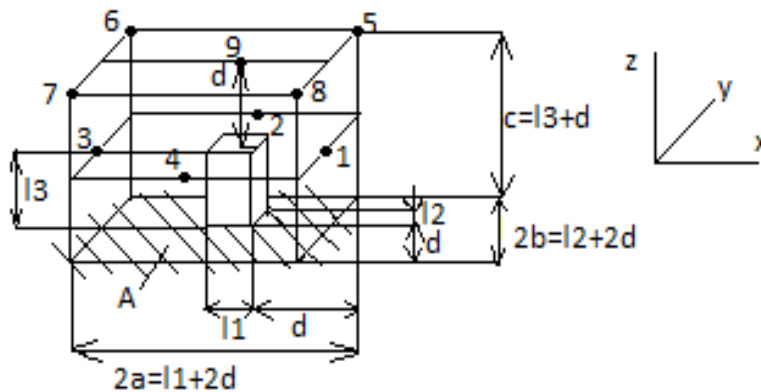
$$S = 4(ab + bc + ca) \text{ [m}^2\text{]} \quad [1]$$

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

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

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

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 - měřicí vzdálenost

l_1 - délka referenčního boxu

l_2 - šířka referenčního boxu

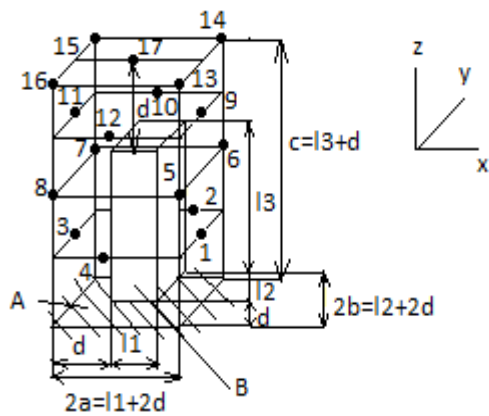
l_3 - výška referenčního boxu

Maximální rozměry malého hranolu

$$l_1 \leq d, l_2 \leq d, l_3 \leq 2d$$

[1]

b) Vysoký hranol (1 odrazová rovina)

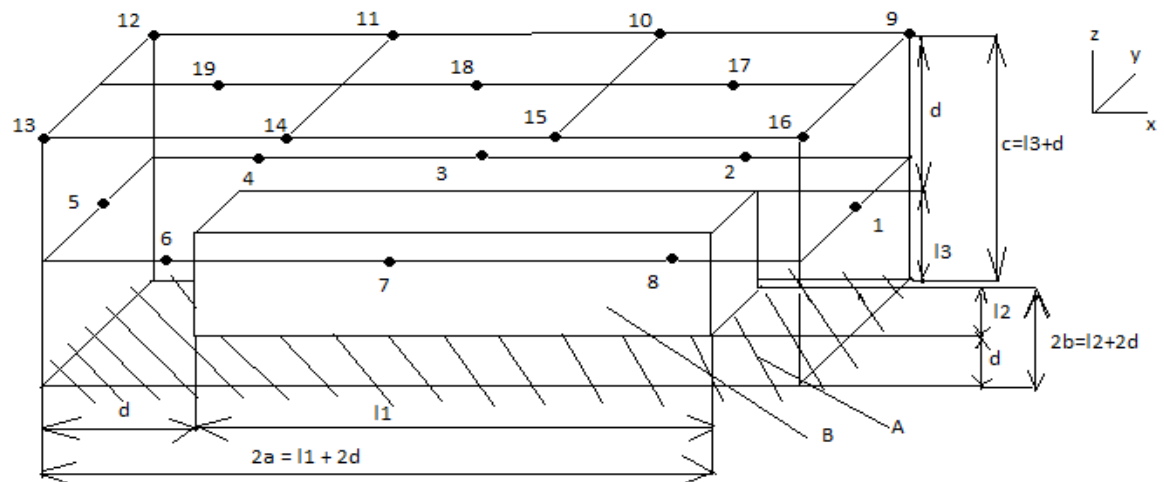


Obr. 8 Příklad měřícího povrchu s pozicemi mikrofону a cestami pro vysoký stroj
Maximální rozměry vysokého hranolu

- - 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
- $l_1 \leq d, l_2 \leq d, 2d < l_3 \leq 5d$

[1]

c) Dlouhý hranol (1 odrazová rovina)



Obr. 9 Příklad měřicího povrchu s pozicemi mikrofónu a cestami pro dlouhý stroj

● - klíčová mikrofónní pozice

A - odrazová rovina

B - referenční box

2a - délka měřicího povrchu

2b - šířka měřicího povrchu

c - výška měřicího povrchu

d - měřicí vzdálenost

l_1 - délka referenčního boxu

l_2 - šířka referenčního boxu

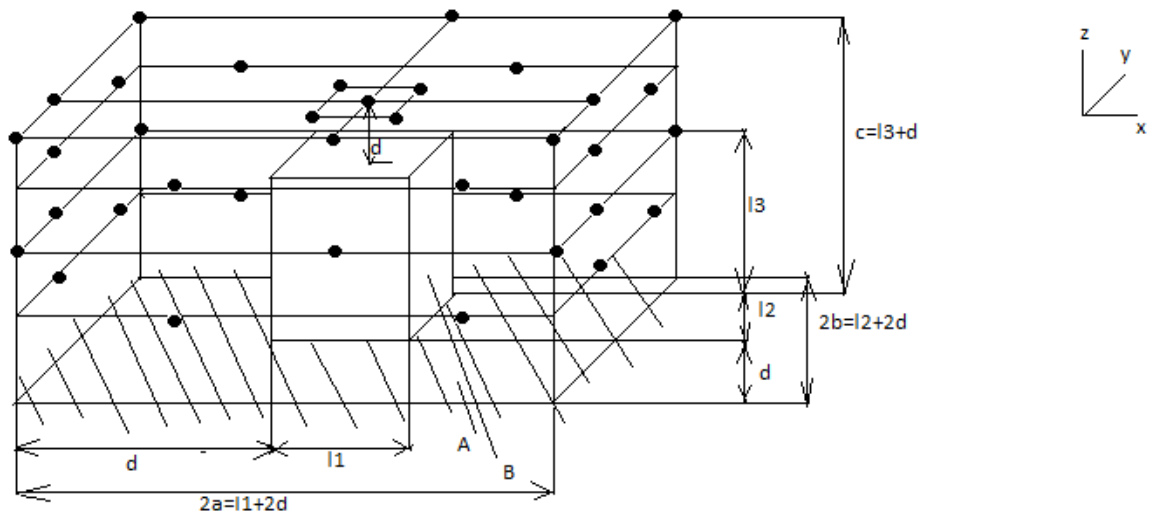
l_3 - výška referenčního boxu

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

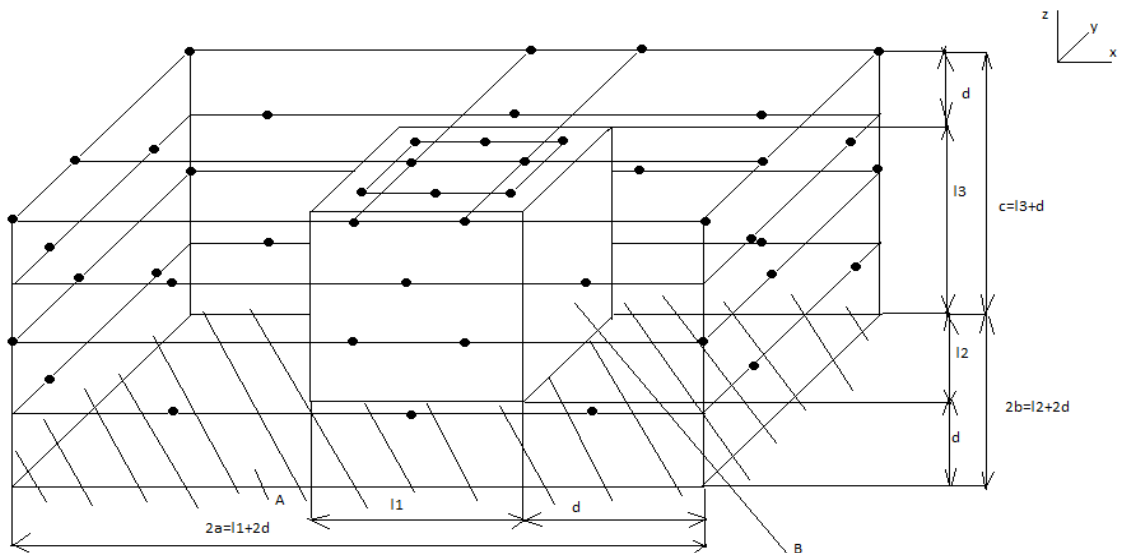
l_3 - výška referenčního boxu

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 mikrofону 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

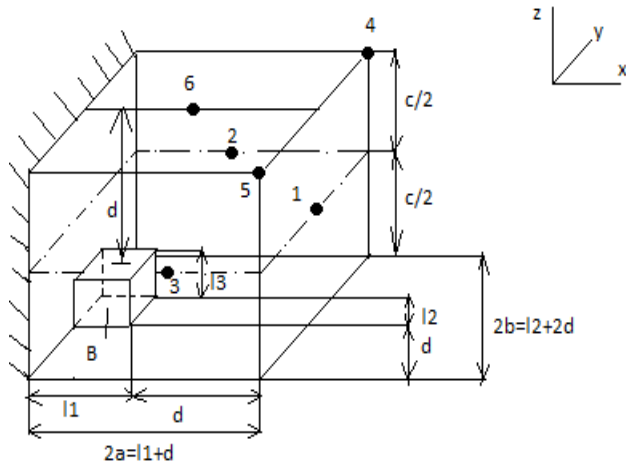
$$S = 2(2ab + bc + 2ca) \text{ [m}^2\text{]}$$

[1]

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

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

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



Obr. 12 Rovnostěnný měřicí povrch s pozicemi mikrofonu a cestami pro zdroj zvuku přilehlý 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

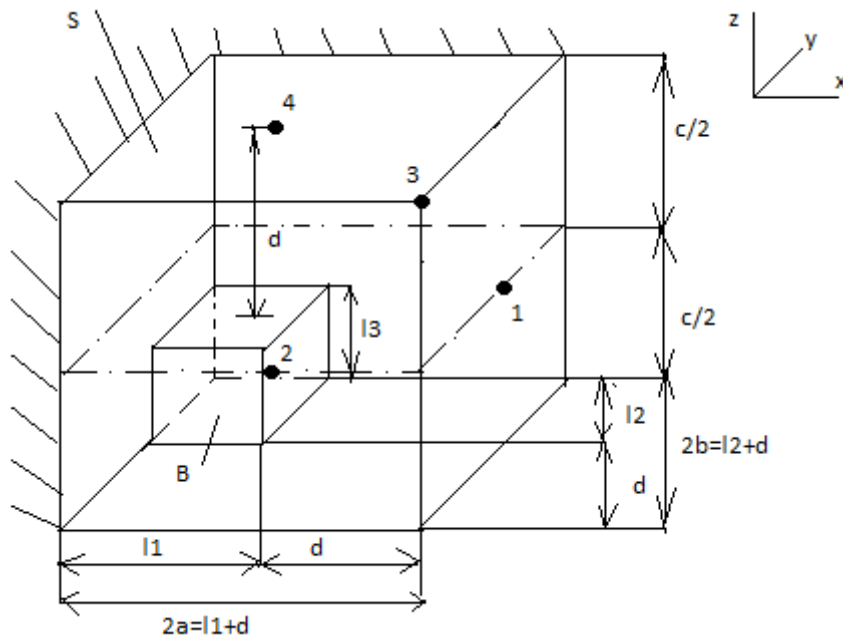
$$S = 2(2ab + bc + ca) \text{ [m}^2\text{]}$$

[1]

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

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

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



Obr. 13 Rovnostěnný měřicí 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 - měřicí 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)

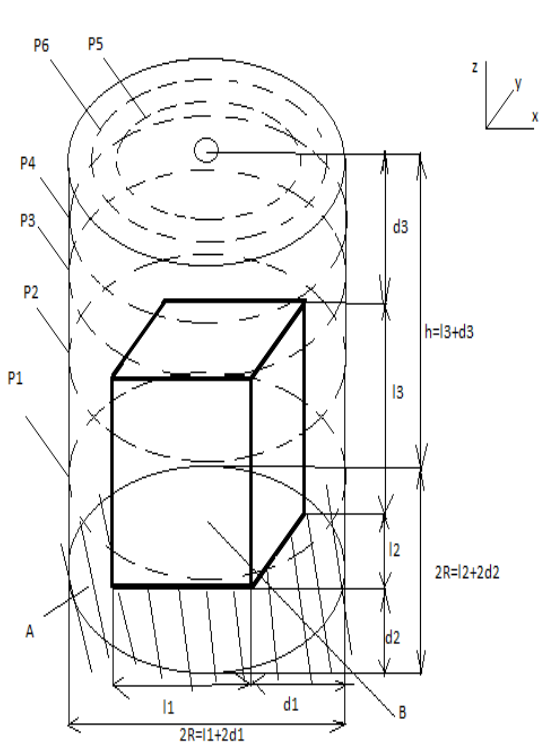
a) Válec na jedné odrazové rovině

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

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

[1]

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



Obr. 14 Příklad válcového měřícího povrchu s cestami pro pozice mikrofону

P1-P4 - cesta pozic mikrofону na straně válce

P5-P6 - cesta pozic mikrofону 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

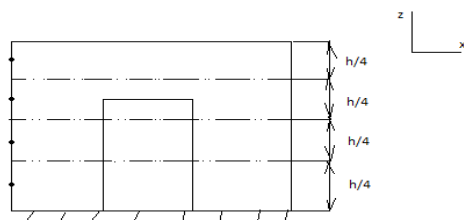
l_1 - délka referenčního boxu

l_2 - šířka referenčního boxu

l_3 - výška referenčního boxu

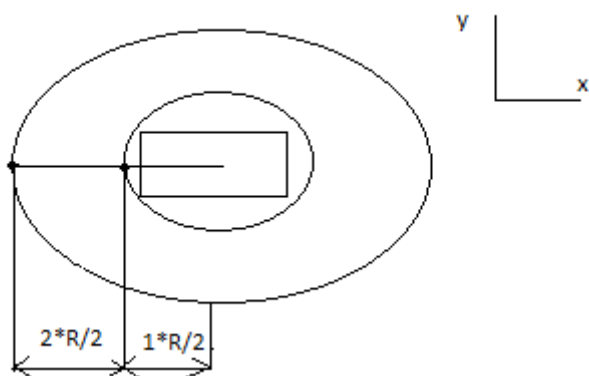
h - výška měřícího povrchu

$2R$ - průměr měřícího povrchu



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

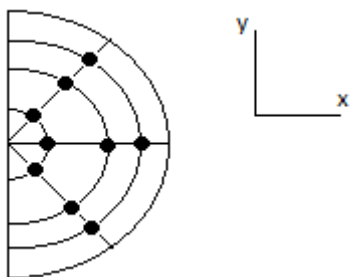
h- výška válce



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

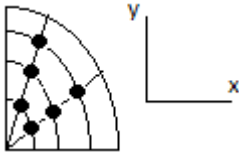
R- poloměr válce

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 měřicího 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 měřicí ploše.

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

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

,kde $\overline{L_{p(ST)}}$ je střední hodnota hladiny akustického tlaku naměřená zvukoměrem
 $\overline{L_{p(B)}}$ 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 $6 \text{ dB} < \Delta L_p < 15 \text{ dB}$, tak se K_1 vypočítá podle vzorce výše 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.

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

,kde S je měřicího 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 vyzařená 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 .

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

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

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 přídatných 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]

θ_0 je teplota 314 K.

θ_1 je teplota 296 K.

2. Odchyly měření

2.1 Směrodatná odchylna opakovatelnosti δ_{OMC}

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

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

,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

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

2.2 Směrodatná odchylka reprodukovatelnosti δ_{RO}

Tato odchylka popisuje stavové a podmínkové nejistoty jako je různá vyzářovací charakteristiku zdroje, různá instrumentace nebo implementace metody měření. Hodnoty δ_{RO} 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 δ_{RO} po testech v několika prostředí liší jen málo, můžeme jejich střední hodnotu považovat za odchylku δ_{RO} měřícího přístroje.

Jestli nebyli vykonány mezilaboratorní porovnávací testy, musíme hodnotu odchylky δ_{RO} zjistit pomocí matematického modelu. Tento model se skládá z odchylky měřící metody δ_{METHOD} , odchylky opakovatelnosti měření $\delta_{LP(ST)}$, odchylky měřící vzdálenosti δ_S , odchylky korekce hluku pozadí δ_{K1} , odchylky korekce zkušební prostředí δ_{K2} , odchylky korekce meteorologických podmínek a vyzářovací impedance δ_{C1+C2} , odchylky měřícího přístroje δ_{SLM} , odchylky vzorkování δ_{MIC} , odchylky úhlu δ_{ANGLE} , odchylky teploty δ_{TEMP} , odchylky vlhkosti δ_H .

Každá tato odchylka se vypočítá jako roznásobení nejistoty u koeficientem citlivosti c .

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

Typické horní hranice hodnot odchylky δ_{RO} jsou zapsané v tabulce 4 níže.

Tabulka 4 – Typické horní hranice standartní odchylky reprodukovatelnosti metody, δ_{RO} , pro výpočet hladin výkonu zvuku a hladin energie zvuku [1]

Frekvenční šířka pásma	Střední frekvence třetino-oktávového pásma [Hz]	Horní hranice odchylky δ_{RO} [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 δ_{TOT}

Skládá se z odchylek δ_{RO} a δ_{OMC} .

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

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 δ_{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

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

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

,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]

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

2.7 Směrodatná odchylka měřící vzdálenosti δ_s

Nejistota u_s vzniká z nepřesného umístění mikrofону 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 δ_{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 δ_{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 δ_{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 δ_{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 δ_{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 $c_{MIC} = 1$

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

2.13 Směrodatná odchylka úhlu měření δ_{ANGLE}

Tato nejistota vzniká z úhlu dopadu akustické energie. Pro hemisférický a cylindrový měřící povrch 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

$$c_{ANGLE} = 10^{-K^2/10} \text{ [-]} \quad [1]$$

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

2.14 Směrodatná odchylka teploty δ_θ

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

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

,kde $\Delta\theta$ je rozdíl teplot v místnosti [°C]

Koeficient citlivosti c_θ se vypočítá jako

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

,kde f je frekvence zdroje zvuku při měření

H je relativní hustota vyjádřená v procentech

θ teplota při měření

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

2.15 Směrodatná odchylka vlhkosti δ_H

Tato nejistota vzniká ze změn relativní vlhkosti.

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

,kde ΔH je rozdíl vlhkosti v místnosti [%]

Koeficient citlivosti c_H se vypočítá jako

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

,kde f je frekvence zdroje zvuku při měření [Hz]

H je relativní vlhkost vzduchu během měření [%]

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

3. Algoritmy

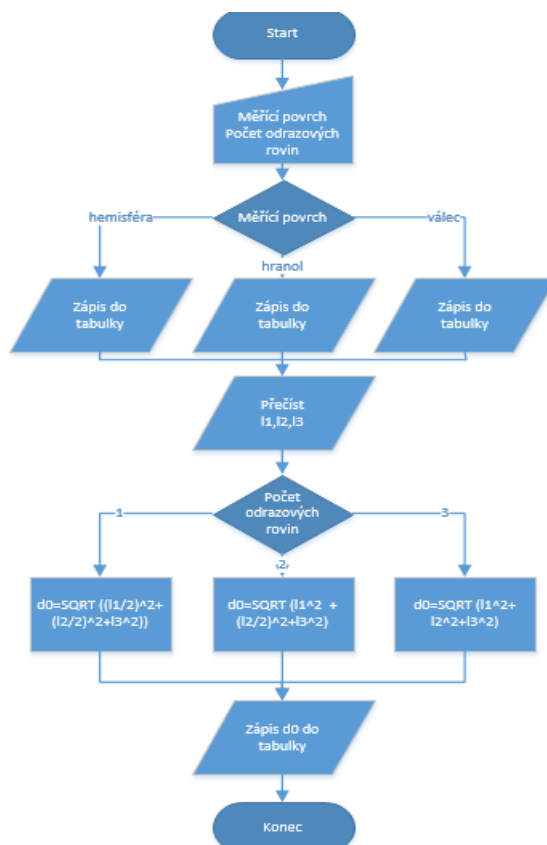
3.1 Referenční box



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.

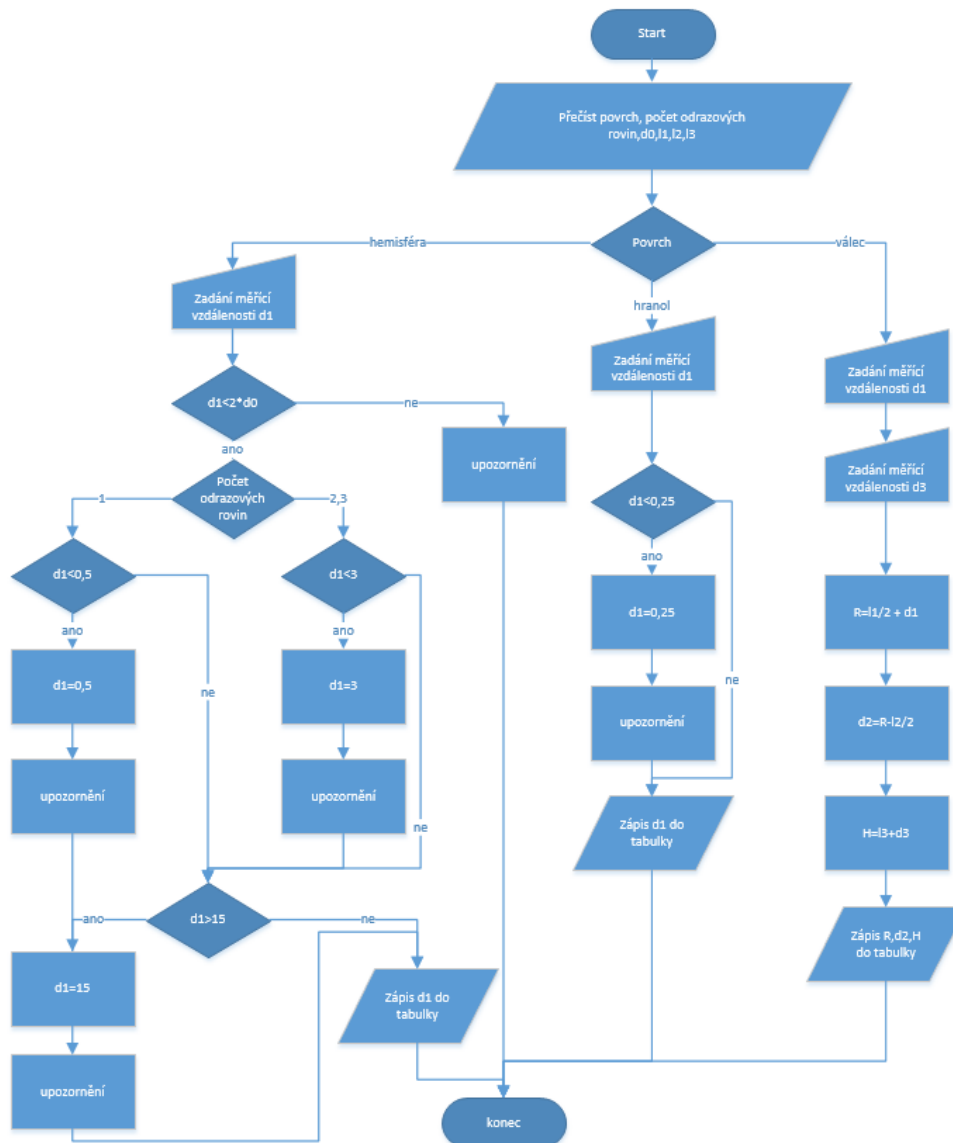
3.2 Měřící povrch



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 „ d_0 “, se kterou se pracuje v dalším makru „MĚŘÍCÍ VZDÁLENOST“

3.3 Měřící vzdálenost



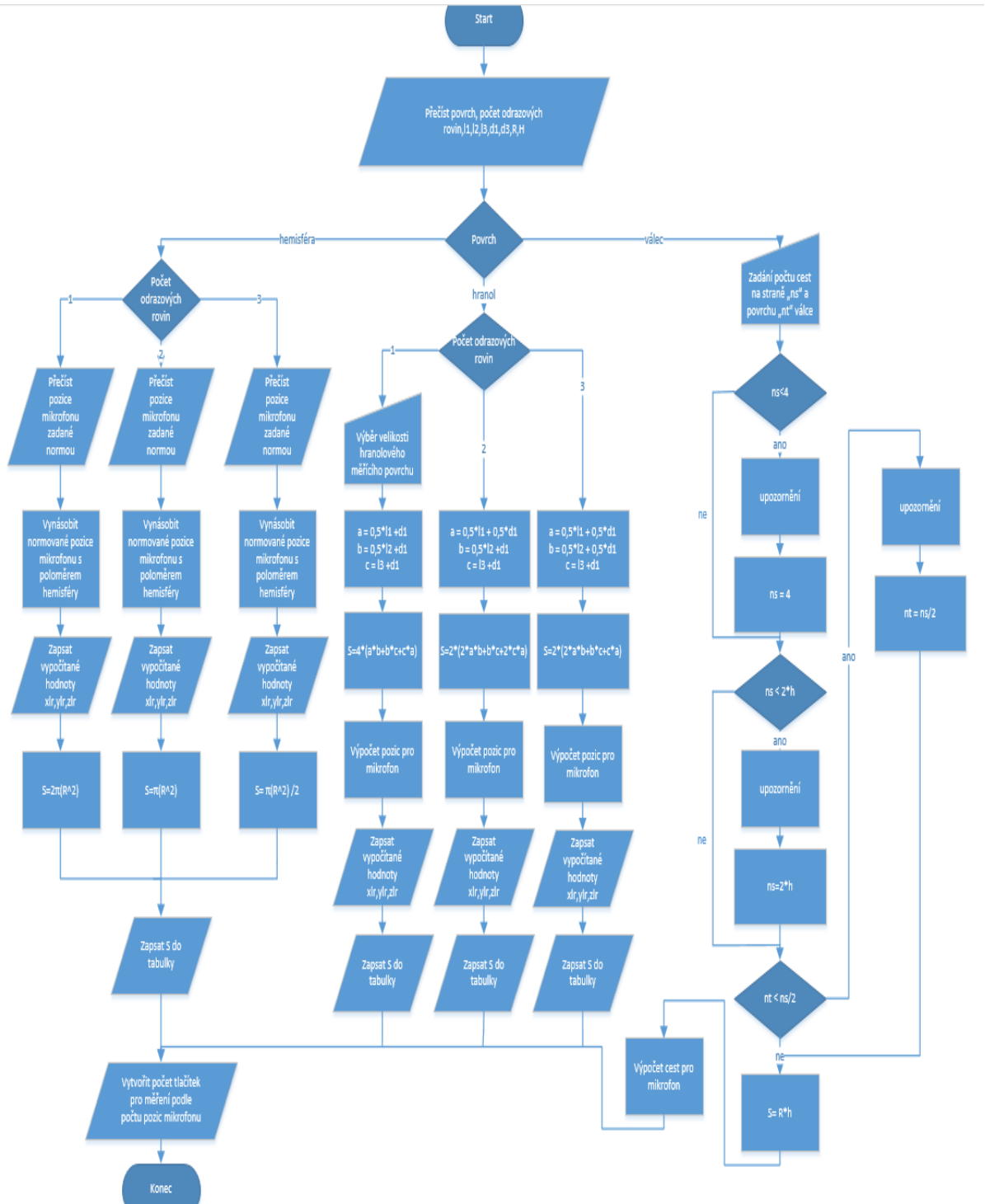
Obr.21 Stručný vývojový diagram makra pro měřící vzdálenost

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 „ d_1 “ pro hemisféru menší než dvojnásobek charakteristického rozměru zdroje „ d_0 “, 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.

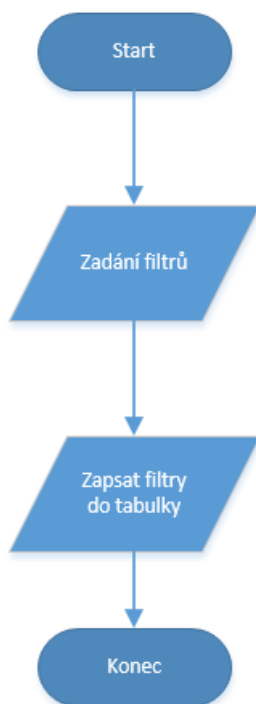
3.4 Výpočet pozic pro mikrofon



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 podstavě válce. Pro přesnější měření je nutné mít počet cest na plášti jako nejméně dvojnásobek výšky válce, s minimálním počtem $n_s = 4$. Počet cest na podstavě válce je nutné mít nejméně $n_s/2$. V průběhu programu se vypočítá i obsah válce a všechny hodnoty se zapíší do tabulky na List1. Pro každou pozici/cestu mikrofon se vytvoří tlačítka Lp a Lb, kterými probíhá měření akustického tlaku.

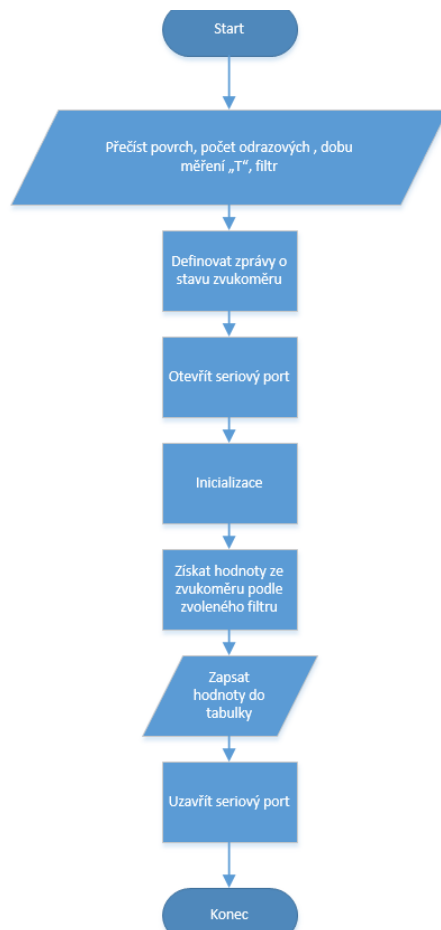
3.5 Filtry



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.

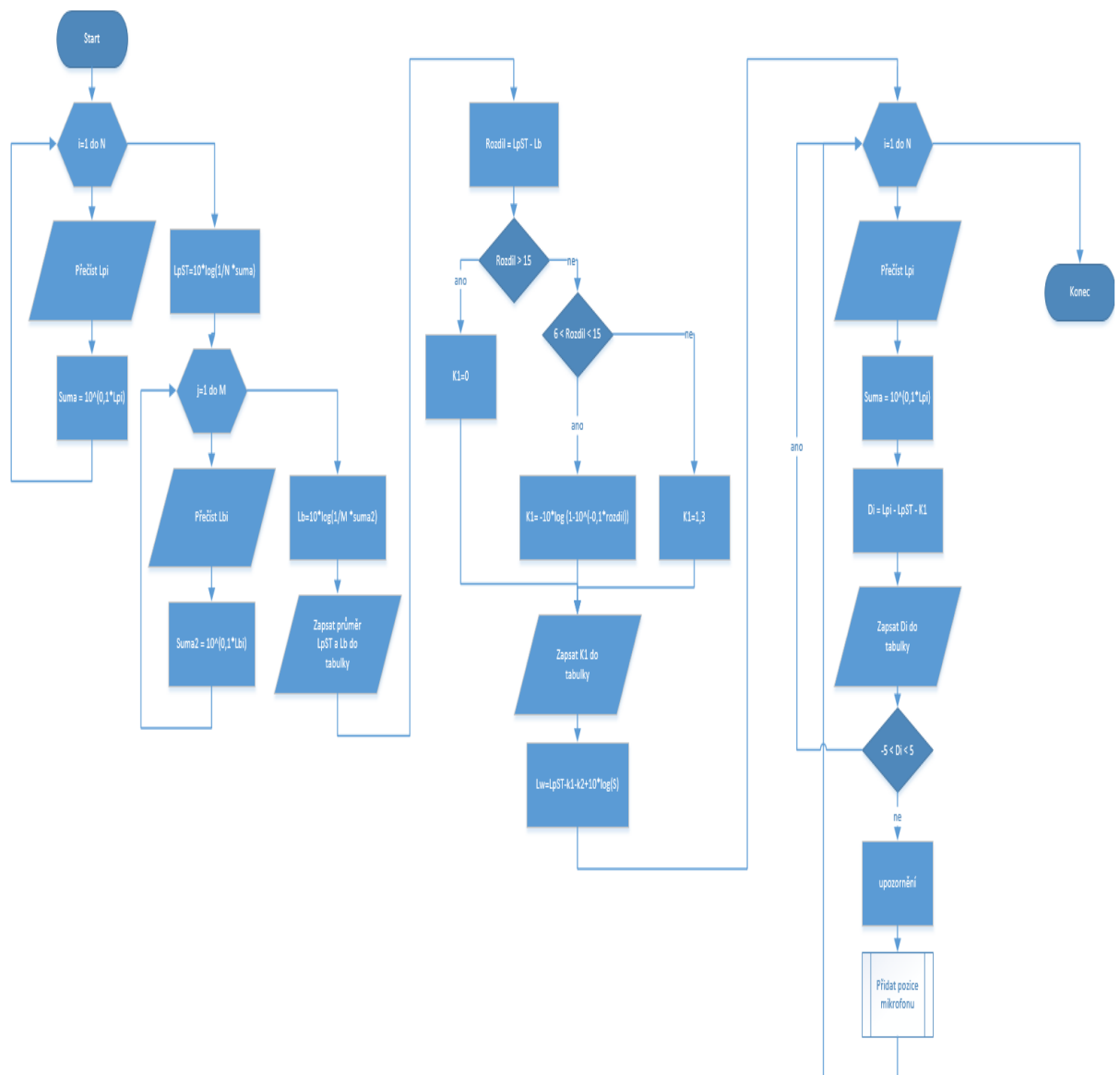
3.6 Měření akustického tlaku zvukoměrem



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

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.

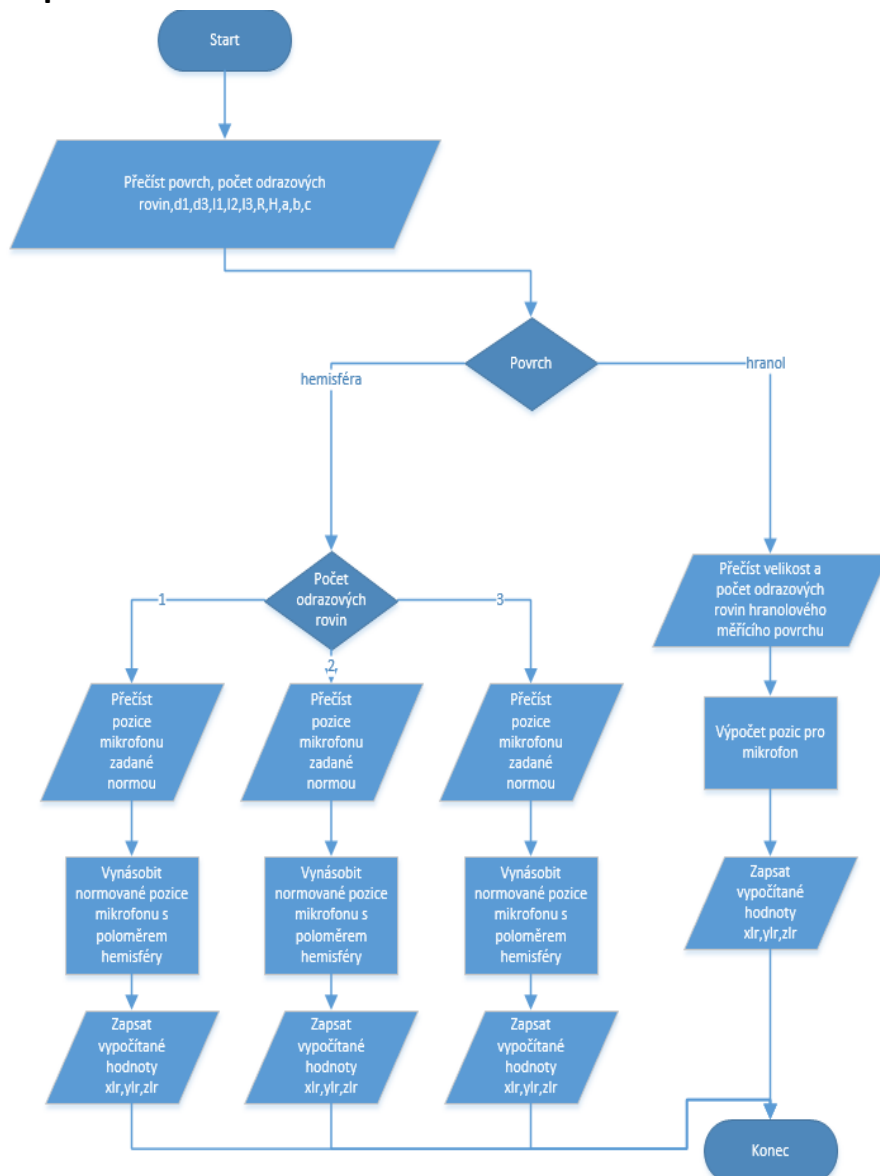
3.7 Výpočet výkonu



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 $K1=1,3$ dB. Dále se vypočítá zdánlivý index směrovosti D_i 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“.

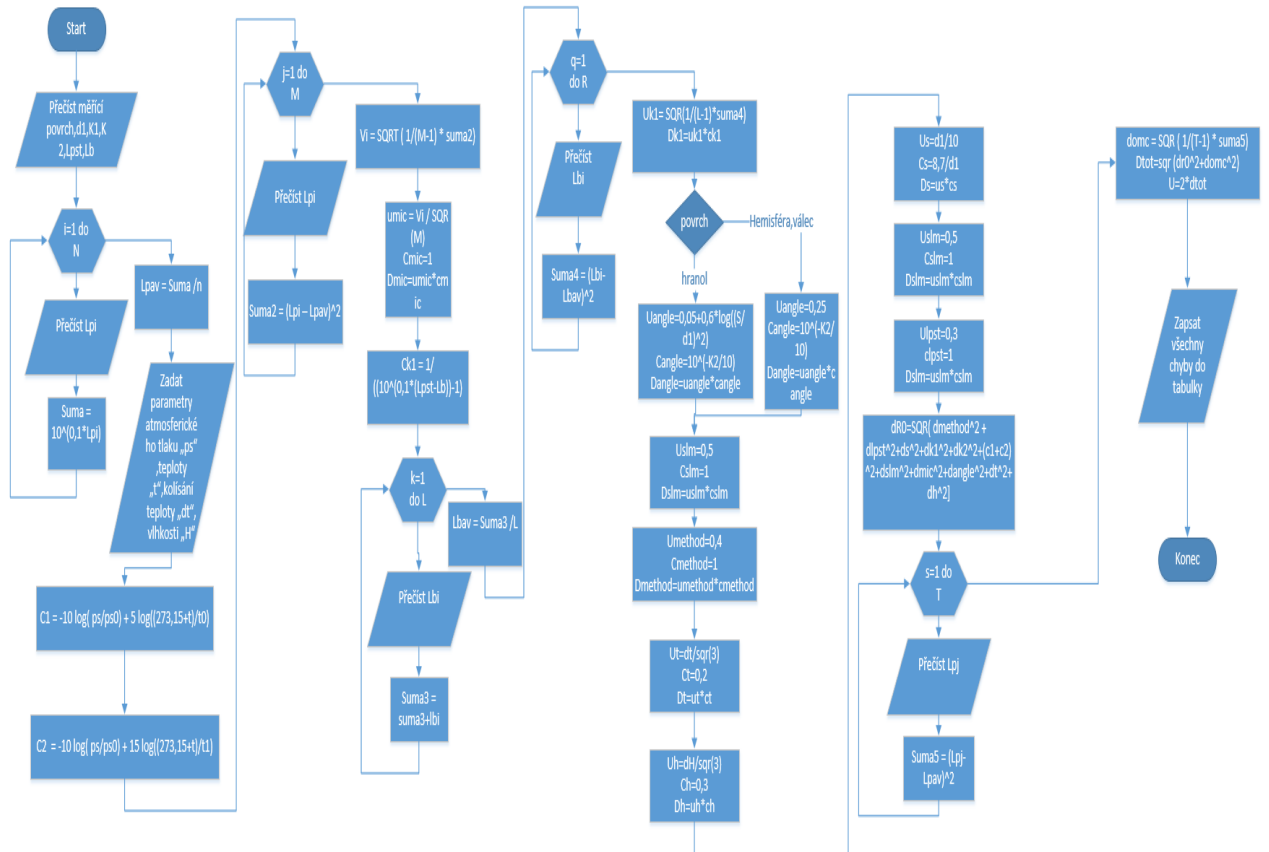
3.8 Přidat pozice mikrofonu



Obr.26 Stručný vývojový diagram makra pro přidání 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 zapíšu se do tabulky na List1.

3.9 Chyby měření

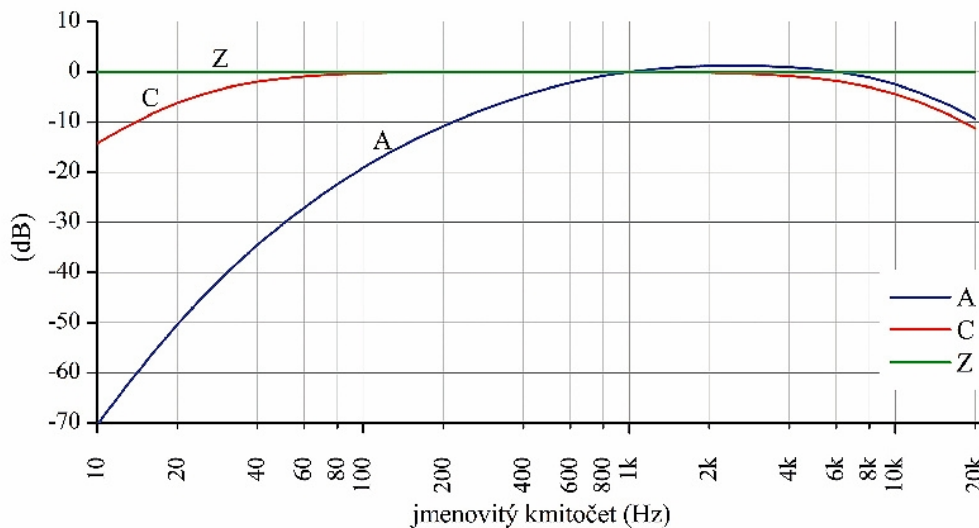


Obr.27 Stručný vývojový diagram makra pro výpočet chyb v měření

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 mikrofону 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 vyzářovací impedance C2, odchylka vzorkování mikrofону δ_{mic} , odchylka korekce zvuku v pozadí δ_{k1} , odchylka korekce v prostředí δ_{k2} , odchylka úhlu měření δ_{angle} , odchylka měřícího přístroje δ_{slm} , odchylka způsobená měřící metodou δ_{method} , odchylka způsobená teplotou δ_t a vlhkosti δ_h , odchylka měřící vzdálenosti δ_s , odchylka opakovatelnosti měření akustického tlaku δ_{ipst} . 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.

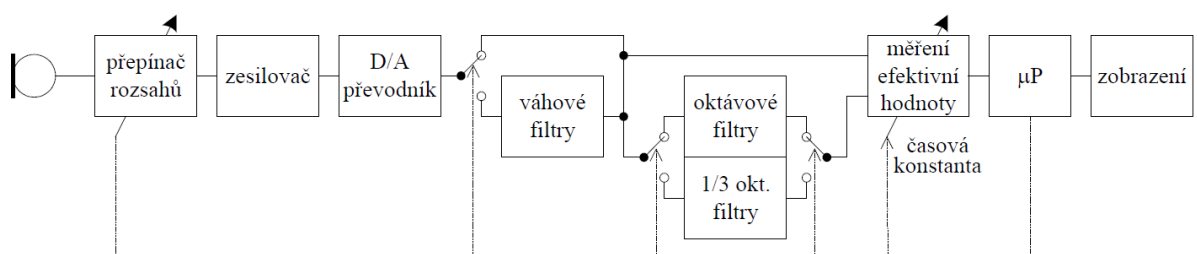


Obr.28 Frekvenční charakteristika váhových filtrů

[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 oktávyovými a třetinooktávyovými 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 mikrofону pro měření, hladin akustického tlaku a výkonu, korekcí, nejistot měření v závislosti na rozměrech referenčního boxu, volbě měřícího povrchu, počtu měřících rovin, vzdálenosti mikrofону 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 mikrofону přilehlého k jedné odrazové rovině](#)

Obr.5 [Příklad hemisférického měřícího povrchu s pozicemi mikrofону přilehlého ke dvěma odrazovým rovinám](#)

Obr.6 [Příklad hemisférického měřícího povrchu s pozicemi mikrofону přilehlého ke třem odrazovým rovinám](#)

Obr.7 [Příklad měřícího povrchu s pozicemi mikrofону a cestami pro malý stroj](#)

Obr.8 [Příklad měřícího povrchu s pozicemi mikrofону a cestami pro vysoký stroj](#)

Obr.9 [Příklad měřícího povrchu s pozicemi mikrofону a cestami pro dlouhý stroj](#)

Obr.10 [Příklad měřícího povrchu s pozicemi mikrofону a cestami pro středně velký stroj](#)

Obr.11 [Příklad měřícího povrchu s pozicemi mikrofону a cestami pro velký stroj](#)

Obr.12 [Rovnostěnný měřící povrch s pozicemi mikrofону a cestami pro zdroj zvuku přilehlý ke dvěma odrazovým rovinám](#)

Obr.13 [Rovnostěnný měřící povrch s pozicemi mikrofону a cestami pro zdroj zvuku přilehlý ke třem odrazovým rovinám](#)

Obr.14 [Příklad válcového měřícího povrchu s cestami pro pozice mikrofону](#)

Obr.15 [Příklad válcového měřícího povrchu se 4mi pozicemi mikrofону po stranách](#)

Obr.16 [Příklad válcového měřícího povrchu se 2ma pozicemi mikrofону 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 boxu](#)

- 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 zvukoměrem](#)
- 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_{RO}\$, pro výpočet hladin výkonu zvuku a hladin energie zvuku](#) [1]

10. Seznam zkratk

- 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 [m²]
- 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 – absorpce 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 mikrofону [-]
 C_1 – korekce referenční kvantity [dB]
 C_2 – korekce vyzařovací impedance [dB]
 p – statický tlak [Pa]
 Θ – teplota vzduchu [K]
 t – teplota vzduchu [$^{\circ}C$]
 δ_{OMC} – směrodatná odchylka opakovatelnosti [dB]
 δ_{RO} – směrodatná odchylka reprodukovatelnosti [dB]
 δ_{TOT} – celková směrodatná odchylka měření [dB]
 U – Rozšířená nejistota měření [dB]
 k – činitel rozšíření [-]
 δ_{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]
 δ_S – směrodatná odchylka měřící vzdálenosti [dB]
 C_S – koeficient citlivosti [-]
 u_S – nejistota měřící vzdálenosti [dB]
 δ_{K1} – směrodatná odchylka korekce hluku v pozadí [dB]
 C_{K1} – koeficient citlivosti [-]
 u_{K1} – nejistota korekce hluku v pozadí [dB]
 δ_{K2} – směrodatná odchylka korekce zkušebního prostředí [dB]
 C_{K2} – koeficient citlivosti [-]
 u_{K2} – nejistota korekce zkušebního prostředí [dB]
 δ_{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]
 δ_{SLM} – směrodatná odchylka měřícího přístroje [dB]
 C_{SLM} – koeficient citlivosti [-]
 u_{SLM} – nejistota měřícího přístroje [dB]
 δ_{MIC} – směrodatná odchylka snímání akustického tlaku [dB]
 C_{MIC} – koeficient citlivosti [-]
 u_{MIC} – nejistota snímání akustického tlaku [dB]
 δ_{ANGLE} – směrodatná odchylka úhlu měření [dB]

C_{ANGLE} – koeficient citlivosti [-]
 u_{ANGLE} – nejistota úhlu měření [dB]
 δ_{θ} – směrodatná odchylna rozdílu teploty [dB]
 $\Delta\theta$ – rozdíl teplot v místnosti [°C]
 c_{θ} – koeficient citlivosti [-]
 u_{θ} – nejistota rozdílu teplot [dB]
 f – frekvence/kmitočet [Hz]
 H – relativní hustota [%]
 δ_H – směrodatná odchylna 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

Reference box	l_1 (mm)	l_2 (mm)	l_3 (mm)	L_{ref} [dB]	L_{ref} [dB]	L_w [dB]	K_1 [dB]	K_2 [dB]	U [dB]
	190,4	224	286	83,9846	24,3555	93,5501	0	0	3,7996

Měřicí povrch	r (m)	Plocha	S (m ²)
Hemisféra	1,2		9,048

Ak. tlak	tlak pozadí	Index směrovosti
L_p [dB]	L_b [dB]	D_i [dB]
83,50	24,50	-0,48
88,25	24,75	4,265356524
86,75	24,50	2,77
81,50	24,75	-2,48
76,50	24,25	-7,48
76,75	24,75	-7,23
78,00	24,75	-5,98
86,25	24,25	2,27

Doba měření	Standardní čas měření
XL2	30 sekund

Zvolené filtry	
frekvenční	časové
A	F

Obr.30 Screenshot souboru Automatizace měření akustického výkonu.xlms