

KUNDTOVA CEV

ISO 10534-1:1998(E)
ISO 10534-2:1998(E)

ACOUSTICS DETERMINATION OF SOUND ABSORPTION COEFFICIENT AND IMPEDANCE IN IMPEDANCE TUBES

I. IZRAČUN IZ IZMERJENE OBLIKE STOJEČEGA VALOVANJA

Za določevanje

1. koeficienta absorpcije zvoka
2. faktorja refleksije
3. površinske impendanc
4. površinske sprejemnosti (amittance)

za normalno vpadli zvok (pravokotno na površino)

potrebni so samo majhni vzorci materiala

ravno valovanje

exact values under this conditions

vzorci imajo površino ki je enaka preseku cevi

Za preračun iz normalnega vpada valovanja na difuzni vpad valovanja je anex D

Numerične metode preračuna in ne grafične

Argumenti trigonometričnih funkcij so podani v radianih

DEFINICIJE

Koeficient absorpcije zvoka: α

Razmerje med močjo zvočnega valovanja ki vstopa na površino vzorca (brez vrnitve), in močjo ravnega zvočnega valovanj, ki pod pravim kotom vpada na površino vzorca

Faktor refleksije zvočnega tlaka pri pravokotnem vpadnem kotu: r

Kompleksno razmerje med amplitudo tlaka odbitega valovanja in vpadnega valovanja v referenčni ravnini za ravno valovanje pri pravokotnem vpadnem kotu

Referenčna ravnina

Presek cevi ki je ponavadi površina ravnega vzorca in se predpostavlja da je : $x=0$

Impedanca polja: $Z(x)$

Razmerje med zvočnim tlakom in hitrostjo delcev medija $v(x)$, ki so usmerjeni v vzorec, v točki x

Impedanca v referenčni ravnini: Z_r

Razmerje zvočnega tlaka in hitrosti delcev v referenčni ravnini

Površinska impedanca Z

Kompleksno razmerje med zvočnim tlakom $p(0)$ in normalno komponento hitrosti delcev $v(0)$ v referenčni ravnini

Površinska admitanca G

Kompleksno razmerje med normalno komponento hitrosti delcev $v(0)$ in zvočnim tlakom na referenčni ravnini.

Površinska admitanca G_s

Komponenta admittance normalna na površino vzorca in na površini vzorca.

Karakteristična impedance: Z_0

Impedanca polja (v smeri širjenja) v enem samem ravnem valu.

$$Z_0 = \rho_0 c_0$$

pri tem je ρ_0 gostota medija (zrak) in c_0 je hitrost zvoka

normalizirana impedanca z :

razmerje med impedancama Z in Z_0

normalizirana admittance: g

produkt impedance in admittance

$$g = Z_0 G$$

Razmerje stoječega valovanja - standing wave ratio: s

$$s = \frac{|\rho_{\max}|}{|\rho_{\min}|}$$

razmerje med amplitudo zvočnega tlaka na maksimumu in pripadajočemu minimumu. Po potrebi po korekciji za spreminjajoče se vrednosti na minimumu do katerih pride zaradi atenuacije zvoka v cevi.

Razmerje stoječega valovanja z atenuacijo s_n

Razmerje med n tim maximumom in n tim minimumom

Valovno število prostega polja k_0

$$k_0 = \frac{\omega}{c_0} = \frac{2\pi f}{c_0}$$

v splošnem je valovno število kompleksno tako da velja

$$k_0 = k'_0 - ik''_0$$

kjer je: $k'_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$

k''_0 = imaginarna komponenta, ki predstavlja konstanto atenuacije v nepers/meter

fazni kot refleksije Φ

je posledica predstavitve faktorja kompleksnega odboja z amplitudo in fazo

$$r = r' + r'' = |r|e^{i\Phi} = |r|(\cos \Phi + i \sin \Phi)$$

$$|r| = \sqrt{r'^2 + r''^2}$$

$$\Phi = \arctan \frac{r''}{r'}$$

$$r' = |r| \cos \Phi$$

$$r'' = |r| \sin \Phi$$

območje delovne frekvence f

to je frekventno območje v katerem se lahko v dani cevi izvajajo meritve.

$$f_1 < f < f_2$$

testno območje

območje kjer v cevi ni višjih načinov valovanja

območje instalacije

območje kjer postavljamo cev

PRINCIP DELOVANJA

Vzorec je pritrjen na eno stran toge gladke kundtove cevi. Vzorec se mora cevi točno prilegati. Cev naj bi bila tesno zaprta (tight fit). Na drugem koncu cevi, generira zvočnik vpadno sinusno valovanje. Zaradi superpozicija vpadnega valovanja p_i in odbitega valovanja p_r pride do stoječega valovanja. Iz izmerjenih veličin sledi izračun

Izmeriti moramo (v linearni ali logaritemski skali)

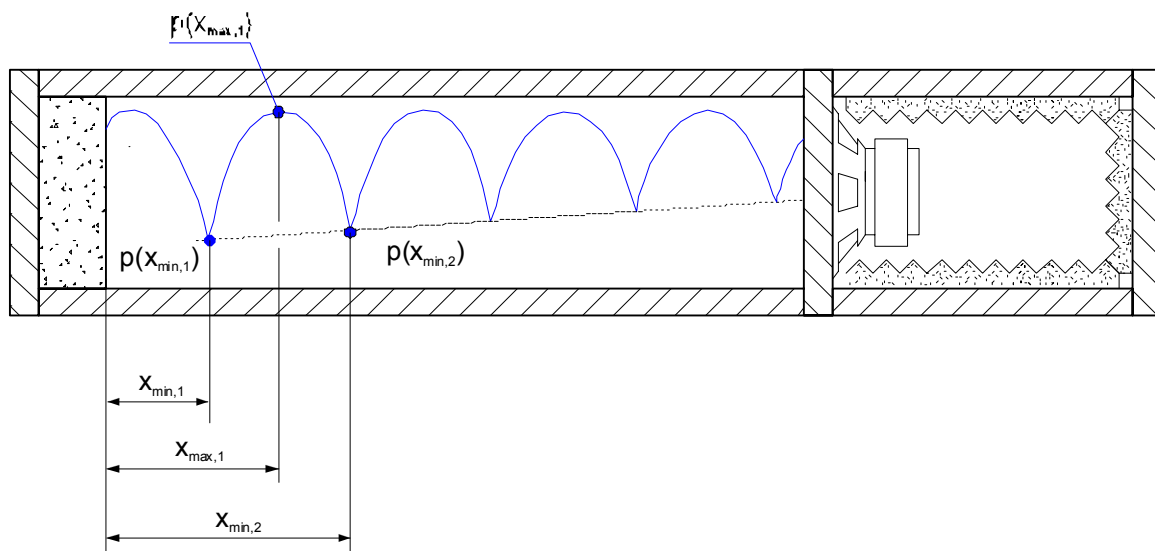
1. amplitudo in pozicijo minimuma stoječega zvočnega polja
2. amplitudo in pozicijo maksimuma stoječega zvočnega polja
3. razdalja $x_{\min,1}$

razdaljo $x_{\min,1}$ in valovno dolžino λ_0 potrebujemo za določitev faktorja refleksije in impedance oziroma admittance $G=1/Z$.

OSNOVE

Ta način merjenja temelji na predpostavki, da v cevi obstaja samo ravno valovanje, tako vpadno kot odbito. Nastanek višjih načinov valovanja se preprečuje anex B.

Predpostavlja se tudi, da valovanje po cevi širi brez izgub. Korekcije se lahko uporabijo za ostale atenuacije ki so posledica trenja in termičnih izgub na steni cevi. Metode so opisane v anexu A



FORMULE

Časovni faktor $e^{i\omega t}$ je v naslednjih formulacijah izpuščen, (ne igra nobene vloge, ker gledamo vse izključno krajevno.)

Vpadno valovanje je ravno in ima frekvenco f . Ni atenuacije (za korekcijo atenuacije je anex A).

Valovanje se širi v negativni x smeri

$$p_i(x) = p_0 e^{ik_0 x}$$

amplituda p_0 je poljubna

odbito valovanje je zaradi izgub nekoliko manjše

$$p_r(x) = r p_0 e^{ik_0 x}$$

hitrost delcev je pozitivna če se gibajo v negativni x smeri

$$v_i = \frac{1}{Z_0} p_i(x)$$

$$v_r = -\frac{1}{Z_0} p_r(x)$$

impedanca polja (v negativni smeri x) v stoječem zvočnem polju je:

$$Z(x) = \frac{p_i(x) + p_r(x)}{v_i(x) + v_r(x)} = Z_0 \frac{p_i(x) + p_r(x)}{p_i(x) - p_r(x)}$$

Na referenčni ravnini $x=0$ je torej

$$Z = Z(0) = Z_0 \frac{1+r}{1-r}$$

odkod lahko izpeljemo r

$$r = \frac{\frac{Z}{Z_0} - 1}{\frac{Z}{Z_0} + 1}$$

koefficient absorbcije zvoka za ravno valovanje je:

$$\alpha = 1 - |r|^2$$

kjer $| \dots |$ označuje amplitudo kompleksne veličine.

STOJEČE ZVOČNO POLJE

Maksimum zvočnega tlaka se pojavi ko sta vpadno in odbito valovanje v fazi

$$|p_{\max}| = |p_0|(1+|r|)$$

minimum zvočnega tlaka se pojavi ko sta vpadno in odbito valovanje v proti fazi

$$|p_{\min}| = |p_0|(1-|r|)$$

če uporabimo razmerje stoječega valovanja

$$s = \frac{|p_{\max}|}{|p_{\min}|} \text{ potem lahko zapišemo}$$

$$s = \frac{1+|r|}{1-|r|} \text{ in}$$

$$|r| = \frac{s-1}{s+1}$$

KOEFICIENT ABSORBCIJE ZVOKA

Če merimo zvočni tlak v dB in je razlika med minimalno in maksimalno amplitudo zvočnega tlaka ΔL [dB], potem lahko zapišemo:

$$s = 10^{\frac{\Delta L}{20}}$$

koefficient absorbcije zvoka tako dobimo

$$\alpha = 4 * \frac{10^{\frac{\Delta L}{20}}}{\left(1 + 10^{\frac{\Delta L}{20}}\right)^2}$$

FAKTOR REFLEKSIJE

Fazni kot Φ kompleksnega faktorja refleksije sledi iz faznih pogojev minimuma stoječega zvočnega polja:

$$r = |r|e^{i\Phi}$$

$$\Phi + (2n-1)\pi = 2k_0 x_{\min,n}$$

to velja za n-ti minimum pred referenčno ravnino, proti zvočnemu viru. Iz tega sledi:

$$\Phi = \pi \left(\frac{4 \cdot x_{\min,n}}{\lambda_0} - 2n + 1 \right)$$

in za prvi minimum velja

$$\Phi = \pi \left(\frac{4 \cdot x_{\min,1}}{\lambda_0} - 1 \right)$$

faktor refleksije je potem:

$$r = r' + r''$$

$$|r| = \sqrt{r'^2 + r''^2}$$

$$r' = |r| \cos \Phi$$

$$r'' = |r| \sin \Phi$$

IMPEDANCA

Normalizirana impedanca je definirana

$$z = \frac{Z}{Z_0}$$

$$z = z' + iz''$$

$$z' = \frac{1 - r'^2 - r''^2}{(1 - r')^2 + r''^2}$$

$$z'' = \frac{2r''}{(1 - r')^2 + r''^2}$$

VALOVNA DOLŽINA

Valovna dolžina sledi ali iz osnovne enačbe:

$$\lambda_0 = \frac{c_0}{f}$$

ali pa že iz meritve

$$\lambda_0 = \frac{2}{n-m} (x_{\min,n} - x_{\min,m})$$

MERILNA OPREMA

Seznam potrebne merilne opreme:

Kundtova cev

Držalo vzorca v cevi

Mikrofon

Mehanizem pozicioniranja mikrofona

Oprema za procesiranje signala

Zvočnik

Generator signala

Termometer

Terminator absorberja

Procedura preverjanja opreme je opisana v aneksu B

KUNDTOVA CEV

Konstrukcija

Mora biti ravna

Konstanten prerez (znotraj 0,2%)

Stene morajo biti toge gladke neporozne

Stene morajo biti težke in debele, da jih zvočno polje ne more vzbuditi (kovina, beton)

Kovinske stene naj bodo debele 10-15% prečne dimenzije cevi (premera če je cev okrogla)

Če je cev narejena iz lesa mora biti na zunanji strani ojačana z železom ali pa naj ima svinčen oklep.

Oblika cevi je poljubna, če je pravokotna, je priporočen kvadrat.

Pravokotne cevi naj nimajo rež v kotih

Frekventno območje

$$f_1 < f < f_2$$

f_1 da bi lahko opazili vsaj dva minimuma, potem mora biti dolžina tsnega območja v cevi vsaj :

$$l \geq \frac{3}{4} \lambda_0(f_1)$$

Poleg osnovnega načina zvočnik generira tudi višje načine (usmerjenost zvočnika) toda le ti naj bi zamrli po nekaj premerih cevi ali treh največjih prečnih dimenzijah cevi pod spodnjo cut-off frekvenco prvega višjega načina. Vzorci ki se jim akustične lastnosti spreminjajo (resonatorji) pa bodo generirali višje načine odbitega valovanja

V testnem območju se moramo izogniti obem izvorom generiranja višjih načinov stoječega valovanja. Torej je dolžina med površino vzorca in zvočnikom povezana z spodnjo mejo frekvenčnega območja s pogojem

$$l \geq \frac{250}{f_1} + 3d$$

d je notranji premer cevi ali pa daljša notranja dimenzija.

Zgornja frekventna meja, pa je določena z možnostjo širjenja višjih načinov

Okrogle cevi	Pravokotne cevi
$d \leq 0,5\lambda_0(f_2)$	$a < 0,58\lambda_0$
$f_2 d < 170$	$f_2 a < 200$

DRŽALO VZORCA

Za vzorcem mora biti dovolj prostora

Okrogla cev ima radialno namestitvev, kvadratna pa radialno

Namestitvev mora bit toga in tesna (za tesnitev se proporoča vazelin, in ne gume)

Priporoča se namestitvev držala vzorca v samo cev, tako, da se pri vstavljanju lahko preveri lega

vzorca, kasneje se lahko poravna z referenčno ravnino. Izognemo se lahko tudi lokalnemu stiskanju mehkejših materialov.

Zadnja stran držala naj bo čim bolj toga. Pogosto se uporablja kovinske plošče ki so debele preko 20mm.

Pri nekaterih meritvah volumen za vzorcem predstavlja pressure-release termination. Dolžina od vzorca do konca držala je v tem primeru $\lambda_0/4$.

MIKROFON

Mikrofon je na koncu merilne cevke, katere merilni del pomikamo po cevi.

Cevka mora biti kovinska.

Premer cevi mora biti proporcionalen z dolžino. Pri malem prerezu in dolgi cevi, pride do velikih izgub.

Cevka ali mikrofon, ne smeta biti večja od 5% prereza kundtove cevi.

V horizontalni kundtovi cevi mora biti merilna cevka na sredini dodatno vpeta da se ne upogiba.

V vertikalni kundtovi cevi mikrofon lahko prosto visi

V pravokotni cevi je lahko merilna cevka v kotu, v kundtovi cevi pa je pod kotom 45 zakrivljena v center kot je prikazano na sliki 3. nadaljna prednost je v tem da so structure-born-vibrations kundtove cevi najmanše v kotih. V principu bi lahko bila merilna odprtina v kotu.

Mehanskega kontakta med kundtovo cevjo in merilno cevko naj ne bo.

Na mestu kjer merilna cevka vstopa v kundtovo cev je priporočena podpora iz mehke pene.

Določanje akustičnega centra ni nujno geometrični center cevi, glej prilogo A

POZICIONIRANJE MIKROFONA

Preciznost naprave za pozicioniranje mikrofona naj bo $\pm 0,5$ mm za frekvence nad 300Hz

Preciznost naprave za pozicioniranje mikrofona lahko linearno narašča do $\pm 2,0$ mm za frekvence do 50 Hz.

Mehanizem za pozicioniranje naj ne bi imel histerize

Možnost nastavitve koordinatnega izhodišča v referenčno ravnino.

Naprava za enakomerno gibanje mikrofona je lahko zelo uporabna.

OPREMA ZA OBDELAVO SIGNALA

Ojačevalec

Filter

SPL meter

Priporočljiv je tudi rekorder za zapis oblike stoječega valovanja

Dynamic range > 60dB

Napaka zaradi nelinearnosti, merilnih odčitkov, nestabilnosti in temperature mora biti manjša od 0,2dB oziroma manjša od 2%

Filtriranje signala iz mikrofona mora biti tako, da so šum in višji harmoniki vsaj 50 dB pod nivojem signala.

IZVOR ZVOKA

Membranski zvočnik ali tlačna komora z trobljo

Površina membrane zvočnika mora biti vsaj 2/3 prereza kundtove cevi

Os zvočnika je lahko v osi kundtovi cevi, lahko je tudi pod poljubnim kotom, lahko pa je narejena tudi iz kolena.

Zvočnik mora biti zaprt, tako da se prepreči transmisija zvoka iz okolice skozi zvočnik v cev.

Zvočnik mora biti mehko vpet na ohišje zvočnika tako da se prepreči prenos vibracij iz zvočnika na ohišje.

Ohišje zvočnika mora biti prav tako mehko vpeto na kundtovo cev za dodatno izolacijo vibracij.

Če se uporabi več kot en zvočnik, potem se mora preveriti njihova faza, da ne pride do generiranja višjih načinov širjenja zvoka.

Resonanca zračnega stolpa v kundtovi cevi je lahko tudi posledica velike mehanske impedance membrane zvočnika. Zato lahko v bližini zvočnika v kundtovi cevi postavimo porozne absorberje.

GENERATOR SIGNALA

Generator naj vsebuje: Sinusni signal
Ojačevalnik
Števec frekvenc

Natančnost nastavitve in odčitavanja frekvence naj bo boljša od 2%
Višji harmoniki morajo biti za 50 dB nižji od signala

TERMOMETER

Med meritvijo naj bo temperatura znotraj cevi konstantna znotraj 1K. Hitrost zvoka in posledično valovna dolžina sta odvisna od temp.

NAMESTITEV VZORCA

Impedanca in koeficient absorpcije vzorca so močno odvisne od pravilnosti in točnosti namestitve. Vzorec se mora udobno namestiti. Ne sme se premikati, mora tesniti (priporoča se vazelin). Ne sme se ga tlačiti, da se mehkejšemu vzorcu ne spremeni gostota. Toga telesa namastimo in pritrdimo v cev.

Sprednja stranica vzorca naj bo pravokotna na os kundtove cevi.

Pozicija mora biti specificirana na 0,5 mm natančno.

Porozni materiali z nizko gostoto, ki ne morejo tvoriti površine (vata, pesek) se lahko pritrdijo na tanko nevibrirajočo (togo) mrežo z velikimi odprtinami.

Pri testiranju moramo narediti vsaj 2 vzorca.

Če ima vzorec pravilno ponavljajočo stransko geometrijo (resonatorji, perforirani pokrovi...) potem morajo biti vzorci prerezani vzdolž linij simetrije. Če se dimenzija večkratnika perforacij ne ujema z dimenzijo kundtove cevi, potem moramo razrezati vzorec na različnih mestih relativno na strukturo.

METODA TESTIRANJA

DEFINICIJA REFERENČNE RAVNINE

Referenčna ravnina se ponavadi ujema z površino vzorca.

Če ima vzorec površinski profil, potem se mora referenčna ravnina postaviti pred testni vzorec.

Na koncu se lahko faktor refleksije in impedance transformira z preračunom v ravno valovanje, ki je dobro definirano s strukturnim kriterijem objekta.

Tudi objektom, ki imajo ravno površino a prečno notranjo dimenzijo, postavimo referenčno ravnino pred površino vzorca.

Razdalja od referenčne ravnine do prvega minimuma ne sme biti manjša od 2D za okroglo kundtovo cev, oziroma manjša od večje dimenzije prereza če imamo pravokotno kundtovo cev.

Tudi pri homogenih vzorcih z ravno površino, se ne priporoča da vzamemo minimumov ki so znotraj tega območja

DOLOČITEV FREKVENCE

Delovno frekventno območje naj ne bo pokrito s koraki ki so večji od 1/3 oktave. Uporaba centralnih frekvenc 1/3 oktavnega pasu je priporočljiva. Ostale frekvence so potrebne samo v primeru testiranja resonance vzorcev.

DOLOČITEV VALOVNE DOLŽINE IN ATENUACIJE

V kundtovi cevi ki ima namesto vzorca togo steno določimo c_0 in λ_0

Določimo tudi atenuacijo same kundtove cevi.

AMPLITUDA SIGNALA

Minimum mora biti najmanj 5dB višji od okolice, priporoča se 10dB

DOLOČITEV KOEFICIENTA ABSORBIJE ZVOKA

Izmerimo amplitudo in položaj maksimumov in minimumov v Pa.

$$S_1 = \frac{|p(x_{\max,1})|}{|p(x_{\min,1})|}$$

$$|r| = e^{2k_0 x_{\min,n}} \left(\frac{S_n - e^{k_0 \frac{\lambda_0}{4}}}{S_n + e^{-k_0 \frac{\lambda_0}{4}}} \right)$$

$$\alpha = 1 - |r|^2$$

za grobo oceno pa lahko uporabimo naslednje enačbe uporabimo dB:

$$s = 10^{\frac{\Delta L}{20}}$$

$$\alpha = 4 * \frac{10^{\frac{\Delta L}{20}}}{\left(1 + 10^{\frac{\Delta L}{20}}\right)^2}$$

DOLOČITEV FAKTORJA REFLEKSIJE

Izmerimo amplitudo in položaj maksimumov in minimumov v Pa.

$$S_1 = \frac{|p(x_{\max,1})|}{|p(x_{\min,1})|}$$

$$|r| = e^{2k_0 x_{\min,n}} \left(\frac{S_n - e^{k_0 \frac{\lambda_0}{4}}}{S_n + e^{-k_0 \frac{\lambda_0}{4}}} \right)$$

$$\Phi = \pi \left(\frac{4 * x_{\min,1}}{\lambda_0} - 1 \right) \text{ enača da fazni kot v radianih}$$

$$r = r' + r''$$

$$|r| = \sqrt{r'^2 + r''^2}$$

$$r' = |r| \cos \Phi$$

$$r'' = |r| \sin \Phi$$

DOLOČITEV IMPEDANCE

Impedanca zraka je podana z enačbo

$$Z_0 = \rho_0 c_0 = \frac{7064}{\sqrt{T}}$$

Temperatura je v K

DOLOČITEV ADMITANCE

$$G = \frac{1}{Z}$$

$$G = G' + iG''$$

$$G = \frac{Z' - iZ''}{Z'^2 + Z''^2}$$

TRANSFORMACIJA FAKTORJA REFLEKSIJE IN IMPEDANCE

Faktor refleksije in impedanca, sta določena za referenčno ravnino $x=0$

V primeru ko je potrebno referenčno ravnino odmakniti od površine vzorca, moramo to korigirati, ker je površina vzorca na razdalji $x = -D$.

Transformiran faktor refleksije na katerikoli točki x je podan z enačbo:

$$r(x) = \frac{p_r(x)}{p_i(x)} = r e^{-2ik_0 x} = r [\cos(2k_0 x) - i \sin(2k_0 x)]$$

$$r(-D) = [r' \cos(2k_0 D) - r'' \sin(2k_0 D)] + i [r'' \cos(2k_0 D) + r' \sin(2k_0 D)]$$

Normalizirana impedanca $z(x)$ je definirana kot razmerja med

$$z(x) = \frac{Z(x)}{Z_0}$$

$$z(x) = \frac{z \cos(k_0 x) + i \sin(k_0 x)}{\cos(k_0 x) + iz \sin(k_0 x)}$$

$$z(-D) = \frac{z'}{[\cos(k_0 D) + z'' \sin(k_0 D)]^2 + [z' \sin(k_0 D)]^2} + i \frac{z''(\cos^2(k_0 D) - \sin^2(k_0 D)) - \sin(k_0 D) \cos(k_0 D)(1 - z'^2 - z''^2)}{(\cos(k_0 D) + z'' \sin(k_0 D))^2 + (z' \sin(k_0 D))^2}$$

PRELIMINARNE MERITVE - KALIBRACIJA OZIROMA VALIDACIJA

DOLOČITEV AKUSTIČNEGA CENTRA MIKROFONA

Za vse frekvence v delovnem frekventnem območju s koraki ki niso večji od 1/3 oktavnega pasu. Meritve so narejene brez vzorca, torej se zvok odbije od toge površine (20 mm kovinska plošča). Referenčna ravnina predpostavimo da je na površini te toge kovinske plošče.

$$x_{\min, n} = \frac{2n-1}{4} \lambda_0$$

Predpostavimo da je y pozicija geometrične sredine merilne cevke oz. Mikrofona. Naj $y=0$ sovpada z togo steno.

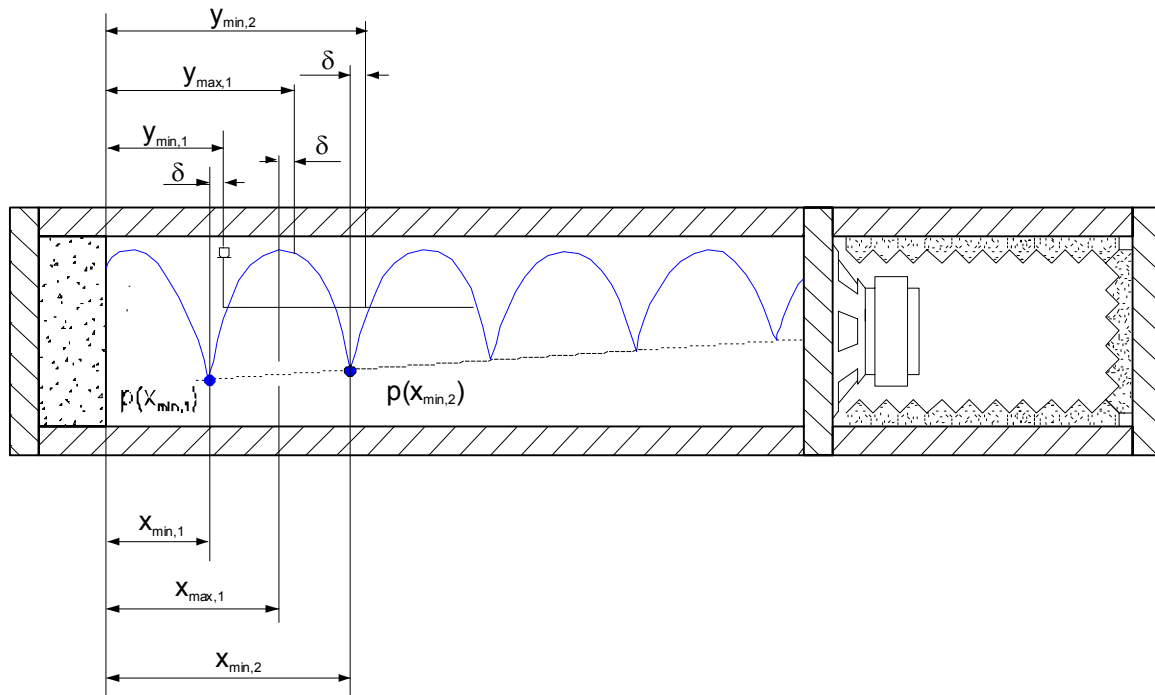
Če je $y_{\min, 1}$ in $y_{\min, 2}$ izmerjena pozicija mikrofona kjer ima stoječe zvočno polje minimum št.1 in št.2, potem je korekcija δ po kateri je akustični center levo od geometrične sredine.

$$\delta = \frac{3y_{\min, 1} - y_{\min, 2}}{2}$$

Ta korekcija se mora upoštevati na vseh meritvah $y_{\min, n}$, tako da velja.

$$X_{\min, n} = y_{\min, n} - \delta$$

δ bo negativen, če bo akustični center na desno.



DOLOČITEV VALOVNE DOLŽINE

Valovno dolžino naj bi se določilo eksperimentalno med določevanjem hitrosti zvoka c_0 in to za vse frekvence v delovnem območju po korkaih ki so najmanj 1/3 oktave
Valovno dolžino dobimo iz meritev po enačbi

$$\lambda_0(f) = \frac{2}{n-m} (x_{\min,n} - x_{\min,m})$$

in posledično še hitrost zvoka:

$$c_0(f) = \lambda_0(f) \cdot f$$

Narišemo krivuljo hitrosti zvoka v odvisnosti od frekvence. Krivulja naj bo smoothed ali interpolirana. Nakloni ali vrhovi te krivulje so indikatorji napak eksperimentalnega setupa.

- Netesnost
- Višji načini valovanja
- Netočna frekvenca vzbujanja
- Netočnost merjenja

Če smo meritve hitrosti izvedli pri temperaturi T_0 meritve absorbcije pa izvajamo pri temperaturi T , potem moramo korigirati hitrost zvoka:

$$c_0(T) = c_0(T_0) \sqrt{\frac{T}{T_0}}$$

Alternativno lahko izračunamo hitrost zvoka iz enačbe, kjer vemo da je hitrost zvoka pri 293K enaka 343,3 m/s

$$c_0(T) = 343,30 \sqrt{\frac{T}{293}}$$

DOLOČITEV ATENUACIJE SAME KUNDTOVE CEVI

Vpadno in odbito valovanje sta ob širjenju atenuirana zaradi viskoznih in termičnih izgub
Glavni efekt (posledica tega) je, monotono naraščanje amplitude minimumov s oddaljevanjem reflektirajoče površine.

Za ta pojav bomo izvedli korekcijo.

Analično lahko atenuacijo opišemo tako da realnemu valovnemu številu pripišemo kompleksno komponento, tako da postane valovno št. Kompleksno.

$$k_0 = k'_0 - ik''_0$$

$$\text{realni del ostane enak: } k'_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$$

imaginarni del pa predstavlja atenuacijov **nepers/meter**
valovno dolžino še vedno lahko določimo s pomočjo enačbe

$$\lambda_0(f) = \frac{2}{n-m} (x_{\min,n} - x_{\min,m}) \text{ ali}$$

$$\lambda_0 = \frac{c_0}{f}$$

Enačbi za amplitudo minimuma in maksimuma lahko sedaj podamo v obliki v kateri nastopa imaginarni del valovnega števila, ki predstavlja atenuacijo

$$|\rho(x_{\min,n})| = |\rho_0| * \left| e^{k_0'' x_{\min,n}} - |r| e^{-k_0'' x_{\min,n}} \right|$$

$$|\rho(x_{\max,n})| = |\rho_0| * \left| e^{k_0'' x_{\max,n}} + |r| e^{-k_0'' x_{\max,n}} \right|$$

n je index ki se začne z 1 na najsrajnejšem minimumu oziroma maximumu (šteti začnemo na tisti strani kjer je vzorec). Definirajmo razmernik stoječega valovanja s_n z razmerjem med amplitudo n-tega maksimuma in amplitudo n-tega minimuma.

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

Odtod lahko izračunamo velikost faktorja refleksije z njegovo končno obliko.

$$|r| = \frac{s_n e^{k_0'' x_{\min,n}} - e^{k_0'' x_{\max,n}}}{s_n e^{-k_0'' x_{\min,n}} + e^{-k_0'' x_{\max,n}}}$$

ker pa je

$$x_{\max,n} = x_{\min,n} + \frac{\lambda_0}{4}$$

lahko faktor refleksije zapišemo v končno obliko:

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

Zapišemo lahko tudi:

$$k_0'' x_{\min,n} = 4 \left(k_0'' \frac{\lambda_0}{4} \right) \left(\frac{x_{\min,n}}{\lambda_0} \right)$$

jasno se vidi da je količina $k_0'' \frac{\lambda_0}{4}$ potrebna za izvedbo korekcije. To količino določimo v prazni

kundtovi cevi, ki ima idealno tog zaključek, ki omogoča popoln odboj, tako da velja $|r|=1$.

Če to velja, potem lahko zapišemo še enačbi:

$$|\rho(x_{\min,n})| = 2|\rho_0| \sinh(k_0'' x_{\min,n})$$

$$|\rho(x_{\max,n})| = 2|\rho_0| \cosh(k_0'' x_{\max,n})$$

Sedaj izmerimo n-ti minimum, (n+1) -ti minimum in maximum med njima. Iz teh treh veličin lahko izračunamo količino Δ_n , ki jo definiramo.

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

Z vstavljanjem zgornjih dveh enačb dobimo:

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

Končno lahko izrazimo vrednost, ki nas zanima

$$k_0'' \frac{\lambda_0}{4} = \operatorname{arcsinh} \frac{\Delta_n}{2}$$

$$k_0'' \frac{\lambda_0}{4} = \ln \left[\frac{\Delta_n}{2} + \sqrt{\frac{\Delta_n^2}{4} + 1} \right]$$

za eksponentni factor v enačbah lahko zapišemo

$$e^{\pm k_0'' \frac{\lambda_0}{4}} = \left[\frac{\Delta_n}{2} + \sqrt{\frac{\Delta_n^2}{4} + 1} \right]^{\pm 1}$$

fazni kot faktorja refleksije je še vedno Φ in je določen z enačbama

$$\Phi = \pi \left(\frac{4 * x_{\min, n}}{\lambda_0} - 2n + 1 \right) \text{ in za prvi minimum } \Phi = \pi \left(\frac{4 * x_{\min, 1}}{\lambda_0} - 1 \right)$$

Atenuacijska konstanta kundtove cevi k_0'' naj bi bila izmerjena po vsakem spreminjanju konstrukcije cevi, ali pogojev ki vplivajo na karakteristiko cevi.

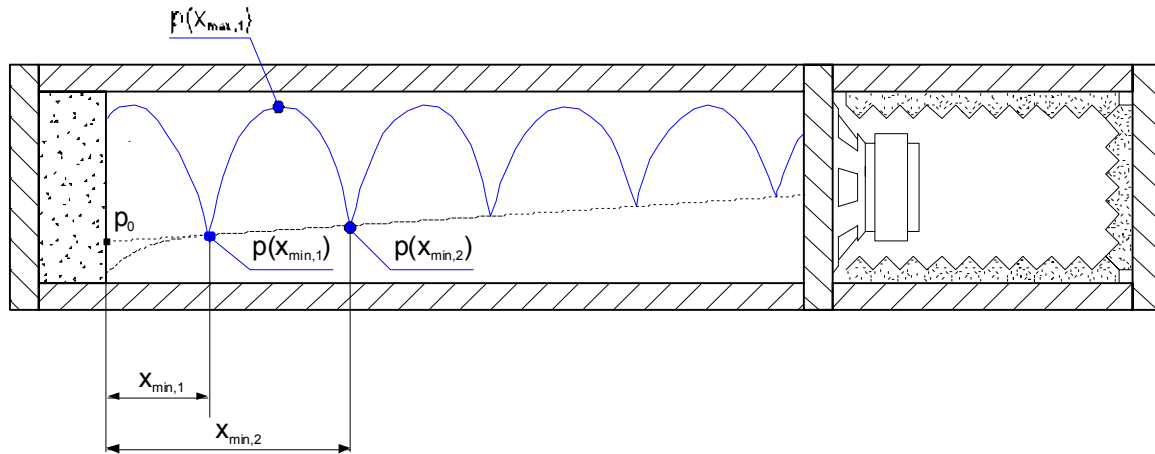
Za majhne izgube lahko uporabimo približek.

Če je

1) razlika med prvim in drugim minimumom je manj kot 2dB

in če je

$$2) \frac{x_{\min, 1}}{\lambda_0} < 0,3$$



potem lahko izvedemo naslednjo poenostavitev. Predpostavimo lahko, da je ničti minimum v linearni povezavi s prvim in drugim minimumom. Dobimo neko fiktivno amplitudo, ki bi bila če bi bil nulti minimum razvit. Iz tega lahko izračunamo razmernik s_0 , ki ga dobimo z ravno ekstrapolacijomimuma na ravnino $x=0$.

Ta ekstrapolacija mora biti narejena za vsak vzorec pri vsaki frekvenci.

Fiktivna amplituda $|p_0|$ nultega minimuma, če bi obstajal na referenčni ravnini $x=0$ je določena iz korigiranega razmernika stoječega valovanja s_0

$$s_0 = \frac{|p(x_{\max, 1})|}{|p_0|}$$

s_0 v zgornji enačbi zamenjamo z s_0 ki smo ga dobili z interpolacijo na spodnji enačbi.

$$\frac{1}{s_0} = \frac{1}{s_1} + \frac{2x_{\min, 1}}{\lambda_0} \left(\frac{1}{s_1} - \frac{1}{s_2} \right)$$

s_1 in s_2 sta razmernika stoječega valovanja na prvem in drugem minimumu definirana z maksimumom $|p(x_{\max, 1})|$ med njima. Popravljen razmernik stoječega valovanja pa uporabimo v enčbi:

$$|r| = \frac{s_0 - 1}{s_0 + 1}$$

Za preliminarne oziroma pregledne meritve lahko v spodnjem frekventnem območju, ko nimamo več dveh minimumov, lahko približno atenuacijsko konstanto kundtove cevi izračunamo numerično iz formule:

$$k_0'' = 0,0194 \left(\frac{\sqrt{f}}{c_0} d \right)$$

d je premer kundtove cevi če je okrogla

d je razmerje med (4*površina prereza) in obsega pravokotne cevi $d = \frac{4ab}{a+a+b+b}$

f je frekvenca valovanja

Ta približek ne upošteva izvorov atenuacije kot so poroznost sten in objektov v cevi, tako ga lahko upoštevamo zgolj kot spodnjo mejo. Če ne vemo, ali so te dodatne atenuacije prisotne, lahko izmerimo atenuacijo v srednjem in visokem frekventnem območju, in jih interpoliramo na nizke frekvence.

PREVERJANJE TESTNE OPREME

RAZMERNIK STOJEČEGA VALOVANJA

Oblika stoječega valovanja naj bo posneta z enakomernim gibanjem mikrofona po cevi, v kateri ni vzorca, tako da je konec cevi iz toge kovinske plošče.

Posnetki morajo biti narejeni za celotno frekventno območje cevi, s koraki ki ne smejo biti manjši od 1/3 oktave. Če pride znotraj območja do večjih variacij, se morajo koraki frekvenc zmanjšati.

Razmernik stoječega valovanja naj ne bi bil manjši od 45dB. Na ta način lahko merimo koeficient absorpcije, ki je majhen celo do 0,04.

Plašč minimumov mora biti ali horizontalen, ali pa mora monotono naraščati proti zvočniku. Na dveh sosednjih minimumih se dovoljuje povečanje za 1dB. Vpliv naklona se lahko korigira.

TROUBLESHOOTING

Prevelik naklon minimumov

Prevelika atenuacija v cevi, groba površina, porozni material sten, vibrirajoče stene, netesnosti med stenami, atenuacija v merilni cevki....

Razmernik stoječega valovanja je premajhen

Premajhen dinamični odziv elektronike

Prevelik akustični šum ozadja

Zračno vzbujen ali strukturno vzbujeno prenašanje zvoka, zaradi preslabo izoliranega zvočnika.

Nedovolj izolirana merilna cevka od kundtove cevi.

Minimumi ne naraščajo enakomerno.

Višji načini valovanja

Premočno vzbujanje - nelinearnost zvočnika

Višji načini valovanja v merilni cevki

Držalo mikrofona in mikrofona oziroma cevka povzročajo višje načine valovanja.

Strukturni hrup v merilni cevki

Stoječe valovanje ima ripples valovčke

Višji harmoniki v signalu nezadostno filtriranje

Nelinearnost zvočnika

Žvenketanje vzorca

Zaokroženost minimumov

Minimumi niso višji od hrupa okolice povečati signal.

DINAMIČNO OBMOČJE MIKROFONA

Najprej je potrebno preveriti elektroniko in določiti hrup ozadja (background noise), in to na vseh frekvencah v danem delovnem frekventnem območju. Pri tem mora biti zvočnik izklopljen.

Če se mikrofona premika z enakomerno hitrostjo, potem se meritve opravljajo z premikajočim mikrofonom.

Nato ponovimo vse meritve s tem da fiksiramo mikrofona oziroma merilno cevko, zatesnimo odprtino za vstavljanje mikrofona oziroma merilne cevke, in vključimo zvočni vir. Signal naj bo vsaj 5dB višji od signala v prvi točki, na vseh merilnih točkah in pri vseh frekvencah. Signal mora biti na vseh merilnih točkah za 10dB večji od hrupa ozadja.

Če zadnje točke ne izpolnimo, moramo uporabiti večje amplitude, pri tem pa se moramo izogniti nelinearnostim. Filtriranje signala. Preveri atenuacijo merilne cevke, in jo po potrebi zamenjaj z večjo. Preveri vibracije sten kundtove cevi. Prepreči airborne cross-talk (boljša izolacija zvočnika)

Preveriti je potrebno strukturalni hrup

Že prej smo preverili in po potrebi odpravili direktni strukturalni hrup merilne cevke in mikrofona. Če je razmernik stoječega valovanja manjši od 45dB, je lahko za to kriv strukturalni hrup same kundtove cevi. (structure born excitation of the impedance tube)

Strukturalni hrup - vibracije kundtove cevi preverimo na sledeč način:

Zvočnik v kundtovi cevi izoliramo. Izolacija mora biti debela od 0,5m do 1m in mora imeti bulk density ne manj kot 20 kg/m^3 in ne več kot 100 kg/m^3 . izolacijo na obeh straneh zapremo z neporoznim pokrovom katerega gostota ne sme biti manjša od 20 kg/m^3 . Plošče se ne smejo dotikati sten kundtove cevi, morajo pa tesniti. Priporočajo uporabo plastelina. Pri tem moramo paziti da je med zvočnikom in izolatorjem dovolj zračnega stebra, da ne spremenimo njegovih karakteristik.

Sedaj premikamo mikrofona po ostanku merilnega območja in merimo amplitudo zvočnega tlaka, medtem ko zvočnik na drugem koncu generira zvok enake amplitude kot v prejšnji meritvi. Izolacija mora biti tako dobra da dejansko merimo hrup ki pride po sami strukturi v merilno območje. Jasno je da mora biti izmerjena amplituda (hrup) manjša od minimuma signala. Če je ista kot smo izmerili v prejšnji meritvi, je potrebno zvočnik in njegovo ohišje dodatno vibracijsko izolirati.

PRESSURE RELEASE TERMINATION OF TEST SAMPLE

Včasih se zahteva da je med zadnjo stranjo vzorca in togo terminacijsko ploščo zračni prostor. Dolžina tega prostora mora biti točno $\lambda_0/4$, za frekvenco pri kateri merimo, upoštevati pa moramo trenutno hitrost zvoka v kundtovi cevi. Zaradi tega se uporabljajo premikajoče toge terminacijske plošče. Toda te plošče imajo na robovih netesnosti, tako da niso več akustično toge. Napake ki nastane zaradi te netesnosti se ne more kvantitativno opisati.

Razlog za uporabo take terminacije je določevanje kompleksne karakteristike impedance Z_a in kompleksne karakteristike konstante širjenja (propagation constant) Γ_a v homogenih absorpcijskih materialih, kot so mineralna volna ali pena.

Če je plast vzorca debela b ,

če je površinska impedanca te plasti Z_r (rigid-toga) pri togi terminaciji

če je površinska impedanca te plasti Z_s (soft -mehka) pri pressure release terminaciji,

potem je karakteristična impedanca in konstanta širjenja absorpcijskega materiala enaka:

$$Z_a = \sqrt{Z_r Z_s}$$

$$\Gamma_a = \frac{1}{b} \operatorname{arctanh} \sqrt{\frac{Z_s}{Z_r}}$$

Problem zero load impedance je prisoten. Izognemo se mu tako, da uporabimo drugo metodo.

Zračna reža za vzorcem ni nujno da je točno $\lambda_0/4$, toda naj bo blizu te vrednosti in naj bo označena s t . Uporni del impedance zadnje strani absorpcijske ravnine je potem

$$Z_1 = -iZ_0 \cot k_0 t$$

Karakteristični podatki za absorpcijski material so potem dobljeni po enačbah

$$Z_a = \sqrt{Z_r Z_s + Z_1(Z_s - Z_r)}$$

$$\Gamma_a = \frac{1}{b} \operatorname{arctanh} \frac{Z_a}{Z_r}$$

Z_r je površinska impedanca dobljena pri togi terminaciji brez reže za vzorcem, Z_s pa je površinska impedanca dobljena z zračno režo. Drugi del pod korenem označuje napako do katere pride v prvi metodi zaradi uporne impedance Z_1 , ki ni točno 0 in ki je lahko kar velika.

V praksi je lahko zračno reža za vzorcem lihi večkratnik vrednosti $\lambda_0/4$. Merimo lahko tudi tiste frekvence ki so tretino oktave oddaljene na obeh straneh. Na ta način se lahko z samo nekaj dolžinamo rež izmeri celotno frekventno območje. Toda te vrednosti morajo biti točno izračunane in nastavljene.

Lažje je nastavljati t na $\lambda_0/4$ in uporabljati drugi enačbi ki upoštevata korekcijo.

Debelina (dolžina) vzorca mora biti pri meritvah s pressure release terminacijo vsaj 3 do 4 kratni premer cevi, sicer se lahko cev vzorec vzbudi v vibracije in napaka pri odčitku dolžine b postane lahko relativno velika.

TRANSFORMACIJA KOEFICIENTA ABSORPCIJE NORMALNO VPADLEGA VALOVANJA NA KOEFICIENT ABSORPCIJE DIFUZNEGA VALOVANJA

Koeficient absorpcije difuzno vpadlega zvoka se lahko izračuna za dušilce, ki so lokalno delujočega tipa (locally reacting type). To so tisti absorberji po katerih se zvok ne širi v smereh ki so vzporedne z njegovo površino. Izračunamo ga s pomočjo normalizirane impendace $z=z'+iz''$, ki jo določimo z meritvami. Povezava je sledeča:

$$\alpha_{st} = 8 * \frac{z'}{z'^2 + z''^2} \left[1 - \frac{z'}{z'^2 + z''^2} \ln(1 + 2z' + z'^2 + z''^2) + \frac{1}{z'} \frac{z'^2 - z''^2}{z'^2 + z''^2} \arctan \frac{z''}{1 + z'} \right]$$

Če je $z''=0$ potem je zadnji člen v oklepaju $1/(1+z')$

Maksimalna vrednost koeficienta dušenja, ki jo lahko dobimo iz te formule je $\alpha_{st}=0,96$.

II IZRAČUN S POMOČJO PRENOSNE FUNKCIJE MED DVEMA RAVNINAMA

PRINCIP MEITVE

Zvočni tlak merimo na dveh ravninah v bližini vzorca. Izračunamo prenosno funkcijo zvočnega tlaka med vpadnim in odbitim valovanjem. Iz prenosne funkcije lahko izračunamo faktor refleksije in nato še absorpcijski koeficient zvoka.

Meritev z dvema mikrofonom. Znati moramo korigirati fazno razliko in razliko med amplitudnim odzivom različnih mikrofonov.

Meritev z enim mikrofonom. Zahteva stabiliziran izvor zvoka. Za to meritev se porabi več časa, toda ne potrebujemo korekcije faze in amplitudnega odziva mikrofona.

FREKVENTNO OBMOČJE

$$f_{\min} < f < f_{\max}$$

f je merilna frkvenca

f_{\min} je določena z natančnostjo merilne opreme

$$f_{\max} \text{ pa je določena z širjenjem višjih načinov valovanja } f_{\max} = 0,58 \frac{c_0}{d}$$

Pri tem je d premer kundtove cevi, ali pa daljša dimenzija pravokotne cevi.

RAZDALJA MED MIKROFONOMA

Razdalja med dvema mikrofonom vpliva na natančnost meritve. Večja kot je razdalja natančnejše so meritve. Toda razdalja med mikrofonom mora biti manjša od s_{\max} ki je podan z enačbo

$$s_{\max} = 0,45 \frac{c_0}{f_{\max}},$$

da lahko merimo visoke frekvence do f_{\max}

Toda razdalje med dvema mikrofonom ne moremo zmanjšati preko meja. Razdalja med mikrofonom naj bo vsaj 5% valovne dolžine pri kateri želimo meriti. Razdalja med mikrofoni tudi ne sme biti manjša od pet premerov mikrofona.

$$s_{\min} = 5 * d_{\text{mic}}$$

$$s_{\min} = 0,05 * \lambda_0$$

POTREBNA MERILNA OPREMA

Dva mikrofona ali en sam če program oziroma FFT analizator to dopušča. Dvokanalni FFT analizator z možnostjo izračuna prenosne funkcije med obema signaloma. Če ima možnost izračuna med dvema signaloma ki ju posnamemo v različnih časih, potem ni potrebe za dva mikrofona, ampak samo za enega, ki ga prestavljamo. Dinamični odziv generatorja naj bo preko 65 dB. Napake pri ocenjeni prenosni funkciji, do katerih pride zaradi nelinearnosti nestabilnosti in temperaturnih sprememb, mora biti manjša od 0,2%. Signal generator: Signal generator mora biti sposoben generirati beli šum znotraj željenega frekvenčnega območja. Če uporabljamo samo en mikrofona. Točnost izmerjene temperature naj bo $\pm 0,5^\circ\text{K}$ Temperatura naj se med meritvami ne spreminja. Točnost izmerjenega tlaka naj bo $\pm 0,5\text{kBar}$

TESTNA PROCEDURA

DOLOČITEV REFERENČNE RAVNINE

Točnost nastavitve referenčne ravnine naj bo znotraj $\pm 0,5$ mm. Ponavadi je to površina vzorca, razen če ima le ta profil.

Točna določitev referenčne ravnine ni nujno potrebna, če merimo samo koeficient absorpcije.

DOLOČITEV HITROSTI ZVOKA VALOVNE DOLŽINE IN KARAKTERISTIČNE IMPEDANCE

Hitrost zvoka lahko izračunamo če imamo temperaturo

$$c_0 = 343,2 \sqrt{\frac{T}{293}}$$

gostoto tudi lahko izračunamo če poznamo atmosferski tlak in temp. Okolice

$$\rho = 1,186 \frac{293 * p_a}{101325 * T}$$

KOREKCIJA NENAKOSTI KARAKTERISTIK DVEH UPORABLJENIH MIKROFONOV

MEDSEBOJNA MENJAVA MIKROFONOV

Izmerimo prenosni karakteristiki H_{12}^I ko je mikrofona A na poziciji A in mikrofona B na poziciji B.

Mikrofona zamenjamo, tako da je mikrofona A na poziciji B in mikrofona B na poziciji A

Izmerimo prenosno karakteristiko H_{12}^{II}

Če samo zamenjamo konektorje na FFT analizatorju to ni isto!!!!

Ko imamo izmerjene obe prenosni funkciji, lahko izračunamo dejansko prenosno funkcijo.

$$H_{12} = \sqrt{H_{12}^I H_{12}^{II}} = |H_{12}| e^{i\phi}$$

V primeru ko zna analizator izračunati prenosno funkcijo samo v eni smeri, potem lahko izračunamo prenosno funkcijo po enačbi:

$$H_{12} = \sqrt{\frac{H_{12}^I}{H_{21}^{II}}} = |H_{12}| e^{i\phi}$$

KALIBRACIJSKI FAKTOR

Vzorec z majhnim koeficientom absorpcije vstavi v kundtovo cev, na mesto za vzorec in izmeri dve prenosni funkciji: H_{12}^I in H_{12}^{II} .

Pri tem indeks I predstavlja osnovno postavitev (Mic A v luknji A in Mic B v luknji B)

In indeks II predstavlja obrnjeno postavitev (mic A v luknji B in Mic B v luknji A)

Kalibracijski faktor izračunamo po naslednji formuli.

$$H_c = \sqrt{\frac{H_{c12}^I}{H_{c12}^{II}}} = |H_c| e^{i\phi_c}$$

Za končno korekcijo postavi mikrofone v osnovno postavitvev I. V cev vstavi vzorec in izmeri prenosno funkcijo, ki je v tem trenutku še nekorigirana.

$$\bar{H}_{12} = |\bar{H}_{12}| e^{i\bar{\phi}} = \bar{H}_r + i\bar{H}_i$$

Da dobimo pravo vrednost prenosne funkcije za vzorec, moramo nekorigirano prenosno funkcijo vzorca korigirati s prenosno funkcijo ki smo jo izmerili pred njim z vzorcem ki je imel drugačen koeficient absorbcije

$$H_{12} = |H_{12}| e^{i\phi} = \frac{\bar{H}_{12}}{H_c}$$

DOLOČITEV PRENOSNE KARAKTERISTIKE MED DVEMA TOČKAMA V KUNDTOVI CEVI
Kompleksna akustična prenosna funkcija je lahko definirana na več načinov.

$$H_{12} = \frac{S_{12}}{S_{11}} = |H_{12}| e^{i\phi} = H_r + iH_i \quad \text{A}$$

$$H_{12} = \frac{S_{22}}{S_{21}} = |H_{12}| e^{i\phi} = H_r + iH_i \quad \text{B}$$

$$H_{12} = \sqrt{\frac{S_{12} S_{22}}{S_{11} S_{21}}} = |H_{12}| e^{i\phi} = H_r + iH_i \quad \text{C}$$

Enačba A se priporoča v normalnem delu

Enačba B se priporoča, če imamo šum na vhodu

Enačba C se priporoča če imamo šum na vhodu in izhodu

Za tehniko z menjavanjem enega mikrofona se uporablja procedura opisana v aneksu B

DOLOČITEV FAKTORJA REFLEKSIJE

$$r = |r| e^{i\phi} = r_r + ir_i = \frac{H_{12} - H_I}{H_r - H_{12}} e^{2ik_0 x_1}$$

Hi je prenosna funkcija vpadnega valovanja:

Hr je prenosna funkcija odbitega valovanja:

DOLOČITEV KOEFICIENTA ABSORBCIJE ZVOKA

$$\alpha = 1 - |r|^2$$