Akusztikus Impedancia mérések kivitelezése elektromos analógiák alapján

1. Bevezetés

Az analógiákra épülő gondolatmenetünk alapjai:

A tapasztalat szerint az extenzívek konduktív áramlását az adott extenzívhez tartozó intenzív mennyiség inhomogenitása hozza létre, s az áramlás „célja” éppen az ilyen inhomogenitások megszűntetése. Így a kiegyenlítődési folyamatoknál az intenzívek gradiensei határozzák meg a folyamat irányát és sebességét, s az intenzívek gradienseit a folyamatok hajtóerejének tekinthetjük.

Így tehát például:

- a hővezetésre a Fourier törvény:

$$j_{q_{kd}} = -\lambda \cdot \mathrm{grad}T$$

- az elektromos vezetésre az Ohm törvény:

$$j_{Q_{kd}} = -\sigma \cdot \mathrm{grad}E$$

- a diffúzióra a Fick törvény:

$$j_{mk_{kd}} = -D \cdot \mathrm{grad}\omega_k$$

A fenti összefüggésekben előforduló együtthatók elnevezése rendre: hővezetési tényező, elektromos vezetési tényező (fajlagos vezetőképesség), illetve diffúziós tényező. A fenti összefüggések matematikailag azonos alakúak: a baloldalon az adott extenzív áramsűrűsége áll (vektor, ill. tenzor), a jobb oldalon az extenzívhez tartozó intenzív gradiensének és egy vezetési tényezőnek a szorzata.

A fenti példák az általános erő (inhomogenitás) és az általános vezetési tényező segítségével azonos alakban írhatók fel:

$$\mathbf{j}_{j_{kd}} = L_i \cdot \mathbf{X}_i$$

ahol az általános termodinamikai erő (az i-edik extenzívre)

$$\mathbf{X}_i = -\mathrm{grad}y_i$$

tehát az i-edik intenzív negatív gradiense.

Ezek alapján megállapíthatjuk, hogy

- impedancia: az anyagok azon tulajdonsága/reakciója, mely az inhomogén intenzív hatására létrejövő extenzív mennyiség áramlását/mozgását akadályozza (a vezetési tényező reciproka),
- elektromos impedancia: az anyagok váltakozó áramú ellenállása, váltóáramú elektromos hálózatban a komplex feszültség és a komplex áram értékeinek hányadosa (váltóáramú vezetési tényező, az admittancia reciproka),

- akuszttikus impedancia: hasonlóan az elektromos impedanciához az inhomogén extenzív (nyomáskülönbség) és az létrejött intenzív (részecskesebesség) aránya: Z = p/c.

2. Akusztikus rezgés terjedése

Egy 9 kHz-es rezgés csak akkor „hang", ha valami rezgő tárgy a levegő részecskéit hozza mozgásba és az a fülünkbe jut. Ezért nem hallunk egy 9 kHz-es rezgőkört rezegni.

A hangterjedéskor a mozgásállapot terjed, nem pedig maga az anyag. A közeg tehát lehet légnemű, tipikusan a levegő, de szilárd és folyékony is. Különböző közeg ellenállása különböző, így benne a hang terjedési sebessége ill. annak távolsága változó.

A rezgés leírása történhet az időtartományban (pl. oszcilloszkóp) és a frekvenciatartományban (pl. spektrum analizátor). A két tartomány közötti átszámítási lehetőségeket a Fourier-transzformáció biztosít.

Hanghullámnak (akusztikus hullámnak) nevezzük a 20 Hz – 20 kHz közötti rezgéseket és azok összetételét. Azt az eszközt, ami képes az (elektro)mechanikai rezgéseket hanghullámokká és viszont alakítani elektromechanikai átalakítónak nevezzük.

A hullámot létrehozó gerjesztés és a vivőközeg jellemzőitől függően, a zavarás hatására a közegben különböző alakváltozási állapotok alakulhatnak ki. A létrehozható alakváltozási állapotoknak és a hullámmozgás sajátosságainak megfelelően általában az alábbi öt hullám típust szokás megkülönböztetni:

1. Longitudinális vagy hosszanti komresssziós hullám,
2. Transzverzális vagy nyírási hullám,
3. Hajlítási hullám,
4. Torziós hullám,
5. Rayleigh-féle hullám.

2.1. Akusztikus rezgés terjedésének leírása

Az akusztikában a harmonikus rezgőmozgás alapegyenletét alkalmazzák a következő formában:

$$y(t) = A_0 + A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi)$$

ahol

y(t) a pillanatérték az idő függvényében,

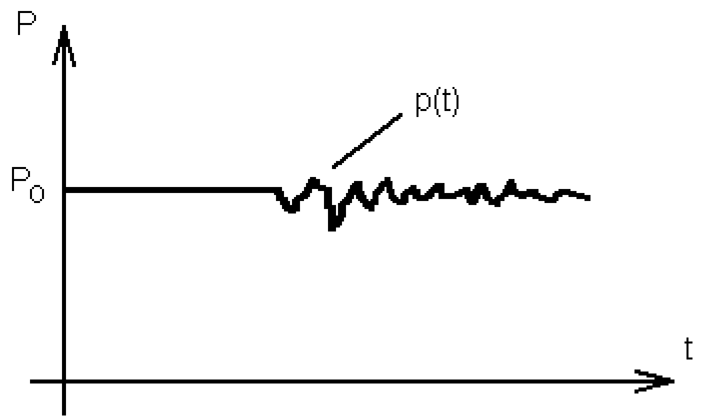
A_0 az amplitúdó egyenszintje,

A az amplitúdó,

ω a körfrekvencia [rad/sec]-ban, $\omega = 2\pi f$ ahol f a frekvencia [Hz]-ben

φ a fázis, amely a környezethez vagy más rezgésekhez való időviszonyt fejezi ki; más néven a függvény értéke a t = 0 időpillanatban

Levegőben történő hanghullámterjedés $A_0 \approx 10^5$ [Pa] = 1 [atm]. Ebből is látható már, hogy a hanghullámoknál az amplitúdó a hangnyomásnak felel meg, de ez az általános leírás használható a hangszóró kapcsaira adott feszültségnél is, akkor azonban Volt dimenziójú. A számításoknál ezt az értéket nem szoktuk figyelembe venni, hiszen ez egy DC nyomásérték, amire legtöbbször nincs szükségünk, csak az erre rászuperponálódó változásra.



A hangnyomás időfüggvénye, amelyet fülünk érzékel rászuperponálódva az atmoszféra DC nyomására

Ezt a gondolatmenetet kiterjeszthetjük a többi környezeti tényezőre is, amelyek a hang terjedését befolyásolják, így jutunk el az ún. lineáris akusztikai közelítéshez. E szerint a hangtéri jellemzőket bontsuk fel egy időben állandó, egyensúlyi és egy időben változó, ingadozó összetevőre. Ennek megfelelően:

$$p = p_0 + p',\ \underline{v} = \underline{v}_0 + \underline{v}',\ \rho = \rho_0 + \rho',\ T = T_0 + T'$$

ahol:

p [Pa] a közegben mérhető nyomás.

$\underline{v}$ [m/s] a közeg áramlási sebessége

ρ $\left[\mathrm{kg/m^3}\right]$ az áramló közeg (tömeg)sűrűsége

T [°K] a közeg mérhető hőmérséklete

az index nélküli változó a teljes mennyiség.

a "0" index az adott változó egyensúlyi, időben állandó összetevőjét jelöli.

a " ' " index az adott változó időben ingadozó összetevőjét jelöli.

Ezek alapján a homogén akusztikai hullámegyenlet megoldásait alkalmazzák az egyes akusztikai jellemzők leírására. Ilyen tipikus akusztikai jellemzők a

- Frekvencia, azaz a másodpercenként rezgések száma, [f] = Hz, 1/s, ciklus/sec, f=c/λ
- Amplitúdó, azaz a kitérés maximuma, [A] = általában méter,
- Periódusidő, azaz mennyi ideig tart egy teljes periódus, [T] = sec, T = 1/f
- Körfrekvencia, [ω] = rad/sec, ω = 2πf

- Hullámhossz, azaz egy periódus méterben mért hossza, a maximumok (az azonos amplitúdójú pontok) távolsága, [λ] = méter
- Hullámszám, [k] = 1/m, k = ω/c
- Terjedési sebesség, azaz a kitérés idő szerinti deriváltja, [c] = m/s, c = λf

2.1.1. Hangterjedés levegőben

A hang terjedési sebessége anyagfüggő, függ a közeg anyagától, hőmérsékletétől, sűrűségtől:

$$c = \sqrt{\kappa \frac{p}{\rho}}\text{, azaz levegőre (ideális gázt feltételezve): } c = \sqrt{\frac{1{,}4 p_0}{\rho}}$$

20 °C-tól eltérő hőmérsékleten az alábbi képlettel módosíthatunk (levegő esetében):

$$c(T) = 332\sqrt{1 + \frac{T}{273}} = 332 \cdot 0{,}6\Delta T$$

2.1.2. Hangterjedés folyadékokban

Valamely folyadék V térfogatának kompresszibilitása, vagyis a Δp nyomásváltozás hatására létrejövő $\frac{\Delta V}{V}$ relatív térfogatváltozás:

$$\kappa = \frac{1}{K} = -\frac{1}{V}\frac{dV}{dp}$$

L hosszúságú, állandó A keresztmetszetű folyadékoszlopban a $\sigma = -\frac{F}{A}$ nyomófe-szültség hatására történő relatív hosszváltozás:

$$\frac{\Delta L}{L} = -\frac{\Delta V}{V} = \kappa dp = \kappa \frac{F}{A} = \frac{1}{K}\frac{F}{A}$$

A folyadékok esetén a K kompressziós modulusz ($\kappa = \frac{1}{K}$ a kompresszibilitás), így folyadékok esetén a hangsebesség:

$$c_f = \sqrt{\frac{K}{\rho}} = \sqrt{\frac{1}{\kappa\rho}}$$

Gázok esetén megkapjuk a hangsebességet, ha az adiabatikus kompresszióra vonatkozó gázegyenletet vesszük figyelembe, mivel a hanghullámok esetében fellépő nyomásváltozások olyan gyors állapotváltozásnak tekinthetők, amelyek során nem alakulhat ki termikus kiegyenlítődés.

2.1.3. Hangterjedés szilárd anyagokban

Szilárd testek esetében egy l hosszúságú, A keresztmetszetű, E rugalmassági moduluszú rúd ε relatív hosszváltozása (nyúlása) a $\sigma = \frac{F}{A}$ húzófeszültség hatására (Hooke-törvény):

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{1}{E}\sigma$$

Mivel esetünkben a feszültségváltozás a nyomásváltozásnak felel meg, valamint figyelembe véve azt, hogy a sűrűségváltozás a hosszváltozással arányos és a nyomásnövekedés a hosszúság csökkenésével jár:

$$dp = -E\frac{\Delta l}{l} = E\frac{\partial \rho}{\rho}$$

Így ezekből következik, hogy az egydimenziós szilárd testben kialakuló longitudinális hullámok sebessége:

$$c_l = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

Szilárd testekben nemcsak longitudinális, hanem tranzverzális hullámok is kialakulhatnak, mert a szilárd testek tangenciális nyíróerőket is képesek felvenni. Nyíráskor a deformációt a következő egyenlet írja le, amelyben az E rugalmassági modulusz helyett a G nyírási modulusz szerepel, ennek megfelelően a szilárd testekben a tranzverzális nyírási hullámok és a torziós hullámok terjedési sebessége (amelyek szintén a nyíráson alapulnak):

$$c_t = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

A G nyírási modulusz az E rugalmassági modulusszal a következő összefüggésben van homogén, izotróp anyagokra:

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}$$

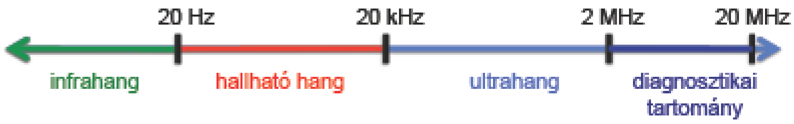
ahol:

> μ a Poisson-szám, amelynek értéke 0-0,5 között van anyagtól függően, és egydimenziós húzás esetén kifejezi a keresztmetszetben a kontrakciót:

$$\varepsilon_y = \varepsilon_z = -\mu\varepsilon_x$$

3. Akusztikai jellemzők tipikus értékei

3.1. Alkalmazott frekvenciák:



Hangfrekvencia tartományok [5]

Az akusztikában alkalmazott legjelentősebb frekvencia intervallum a kb. 20 Hz és 20 KHz közötti, mely az emberi fül számára hallható hang tartománya. Ez alatt, tehát 20 Hz alattit az infrahang és fölöttit az ultrahang tartománynak nevezzük.

3.2. Terjedési sebességek

A hang terjedési sebessége különböző anyagokban [1, 5]:

Anyag neve	Hőmérséklete [°C]	Sebesség [m/s]
CO_2	0	258
CO_2	35	274
Levegő	0	331,5
Levegő	20	344
Vízgőz	35	402
Hélium	20	927
Hidrogén	0	1270
Víz	15	1437
Zsír	-	1450
Csont	-	2500 – 4700
Vér	-	1570
Izom	-	1590
Acél	-	5000

A hang terjedési sebessége, különböző anyagokban

3.3. Az akusztikus impedancia bevezetése [1]

A fizikai mennyiségeken kívül a műszaki, elektroakusztikai kezeléshez más mennyiségekre is szükségünk van. Az akusztikában alkalmazott impedancia mennyiségek közül a legfontosabb az ún. specifikus vagy más néven akusztikus impedancia:

$$Z = \frac{p}{c}$$

Ez általában komplex mennyiség, és a p hangnyomás valamint a c részecskesebesség hányadosa. Ha a hang forrása pontszerű és a térben a hang minden irányban akadálytalanul terjedhet, akkor gömbhullámok jönnek létre. Kellően nagy távolságra a forrástól az azonos fázisú gömbfelületek már alig görbülnek, így ezeket már síkhullámoknak tekinthetjük. Egy speciális esetben, síkhullámoknál az akusztikus impedancia valós, értéke [1]

$$Z_{\text{síkhullám}} = \rho \cdot c$$

Amennyiben a közeg a levegő, akkor a sűrűséget ρ_0-al jelöljük, és a fenti impedanciát a közeg karakterisztikus impedanciájának, vagy más néven fajlagos akusztikus impedanciának is nevezzük. Síkhullámokra érvényes, hogy a hangnyomás és a részecskesebesség hányadosa állandó:

$$Z_{\text{síkhullám,levegő}} = \frac{p}{c} = \rho_0 \cdot c = 415 \frac{Ns}{m^3}$$

Ez az érték természetesen erősen függ a terjedési sebességtől (közvetve a hőmérséklettől), de ezt az átlagos értéket találjuk a legtöbbször. Állóhullámok és egyéb hullámok esetén Z értéke komplex szám.

Az impedancia az ellenállás frekvenciafüggését tartalmazza, és közös számítási alapokat nyújt a valós (ellenállás) és a frekvenciafüggő (komplex) elemek kezeléséhez.

4. Összefoglalás

Cégünk által kifejlesztett Komplex elektromos impedancia mérőeszközök által alkalmazott mérési elv (lock-in elv) alkalmas akusztikus mérések végrehajtására. Az eszköz jelenleg elektromos mérésekhez alkalmazható.

Az akusztikus mérésekkel kapcsolatban áttekintettük a különböző halmazállapotú anyagokban történő hullámterjedés leírását és az egyéb elméleti háttérinformációkat. Ezeken kívül példákat adtunk meg a tipikus paraméterek tipikus értékeivel kapcsolatban. Ezután összefoglaltuk az akusztikában alkalmazott impedancia fogalmakat és azok kiszámítási módjait.

Ezen alapinformációk alapján a jövőben összeállíthatóak a kezdeti kísérleti és mérési tervek, melyekkel elkezdhető a gyakorlati munka. A mérés alapját az impedancia mérés analógiája képezi: feszültség és áram mérésével meghatározható a vizsgált rendszer impedanciája. Ezt kihasználva az akusztikus, specifikus impedancia nyomás és részecskesebesség mérésével előállítható a léghang akusztikában ez kivitelezhető nyomásmikrofon és sebességmikrofon használatával, egy pontban mérve mindkettővel:

$$Z = \frac{p}{c}.$$

A két paraméter mérésével, illetve az elektromos impedancia méréssel megegyező módon kiértékelve juthatunk a specifikus impedancia abszolút értékéhez és fázisához.

A háttér információk áttekintését követően megkezdjük a detektorok és rezgéskeltől kiválasztását, illetve az ehhez tartozó illesztő interfészek tervezését és kivitelezését. A általunk kifejlesztett komplex elektromos impedancia mérő eszközök akusztikai alkalmazásához a generátor kimenteket a rezgéskeltőkhöz, míg a bementi csatornákat az érzékelőkhöz illesztjük.

Szakirodalomjegyzék

[1] Dr. Wersényi György: Műszaki akusztika, egyetemi jegyzet, 2010.

[2] http://oktatas.ch.bme.hu/oktatas/konyvek/fizkem/kerevf/FK2/TR1.pdf

[3] http://www.google.hu/url?sa=t&rct=j&q=az%20akusztika%20alapjai%20orvosbiol%C3%B3giai%20%20m%C3%A9rn%C3%B6khallgat%C3%B3k%20sz%C3%A1m%C3%A1ra&source=web&cd=4&ved=0CDkQFjAD&url=http%3A%2F%2Fszft.elte.hu%2F~kojnok%2Fakuea08%2FOrvAKUSZT.DOC&ei=hGicUdTvFIPNtQbd4IDIBw&usg=AFQjCNFNIyen6bJbIObZzkHdQ2l5VepySw&bvm=bv.46751780,d.Yms&cad=rja

[4] http://www.ett.bme.hu/upload/1293143305631.7_9e6c14ab5c180d9d728ca695ef3aa441/MHA_05_SAM.pdf

[5] http://www.google.hu/url?sa=t&rct=j&q=horv%C3%A1th%20r%C3%B3bert%2C%20debreceni%20egyetem%20zaj-%20%C3%A9s%20rezg%C3%A9sv%C3%A9delem&source=web&cd=5&ved=0CDoQFjAE&url=http%3A%2F%2Fwww.sze.hu%2F~gyorfia%2FImmisszio%2520terkepezes%2520-%2520Zaj%2FJegyzet%2F01%2520Akusztikai%2520alapfogalmak.doc&ei=h2mcUa29OYbFtQbO3IGwBw&usg=AFQjCNHneevq2Y1Z7BuHrkGvJFjOQcQ58w&cad=rja