

KAROTÁZS TUDOMÁNYOS MŰSZAKI ÉS KERESKEDELMI KFT.
7634 Pécs, Kővirág u. 39., Tel: 20 9372905, 72 224 999
Fax: 20 9397 905, E-mail: posta@karotazs.hu

Akusztikus Impedancia mérésekhez alkalmazásfejlesztés

Projekt azonosítószáma: GOP-1.3.1-11/C-2012-0458

**Komplex Elektromos Impedancia Mérőeszköz
alkalmazhatóságának vizsgálata akusztikus impedancia
mérésekhez**

(összefoglaló tanulmány alapfogalmak tisztázására,
mérési eljárások, alternatívák kidolgozására)



Pécs, 2012. november 01. – 2012. december 31.

Szerkesztette:

**Vizvári Zoltán Ákos
okl. környezetmérnök**

Jóváhagyta:

**Henézi Ferenc
projektvezető**

Tartalomjegyzék:

1. Előzmények.....	3
2. Bevezetés.....	6
3. Elméleti alapok.....	9
3.1. A vezetésses áramsűrűség és kialakulása [3].....	10
3.2. Akusztikus hullámterjedés fenomenologikus összefüggése.....	11
4. Periodikus (sinusos) jelenségek leírása.....	13
4.1. A komplex mennyiségek bevezetése – elektromos hálózatok [7].....	13
4.2. Akusztikus rezgések leírása [1; 3].....	17
4.2.1. Akusztikus rezgés terjedésének leírása.....	17
4.2.2. Harmonikus hullámok az akusztikában és ezek leírása (komplex írásmód).....	19
5. Akusztika, akusztikus hullámok kialakulása [4, 1].....	22
5.1. Az akusztikai hullámok csoportosítása (a zavarás közegben létrehozott deformációja alapján) [4].....	23
5.2. Hangterjedés levegőben és folyadékokban [6].....	24
5.3. Hangterjedés szilárd anyagokban [6].....	25
6. Akusztikai jellemzők és tipikus értékei, analógiák [1].....	27
6.1.1. Az akusztikus impedancia bevezetése [1].....	29
7. Méréstechnikai megoldások.....	31
7.1. Hangszintmérés [1].....	31
7.2. A logaritmus bevezetése, a szintes írásmód [4].....	32
7.3. Hangforrások [1].....	33
7.3.1. Dinamikus hangszóró.....	34
7.4. Detektorok.....	36
8. Komplex elektromos impedancia mérőrendszerek alkalmazhatósága akusztikus mérésekhez.....	39
9. Összefoglalás.....	40

1. Előzmények

A Karotázs Tudományos Műszaki és Kereskedelmi Kft. pályázatot nyert mérőműszer család fejlesztésére. A projekt száma GOP-1.3.1-09/A-2009-0051, címe „Elektromos Impedancia mérésre termékcsoport fejlesztés”, időtartama 2010.03.01 – 2012.10.31.

Alapok:

Impedancia: az anyagok azon tulajdonsága/reakciója, mely az inhomogén intenzív hatására létrejövő extenzív mennyiség áramlását/mozgását akadályozza.

Elektromos impedancia: az anyagok váltakozó áramú ellenállása. Váltóáramú elektromos hálózatban a komplex feszültség és a komplex áram értékeinek hányadosa.

A projekt célkitűzése műszercsalád – hardver, szoftver, módszer – fejlesztése volt anyagok (élő, élettelen struktúrák) elektromos impedanciájának rutinszerű (EI) mérésére mikro és makró környezetben. A módszerek, melyeket célul tűztünk ki:

- Elektromos Impedancia Tomográfia (EIT), anyagjellemzők eloszlása térben és időben. A mérési geometriát leképező sokcsatornás mérések.
- Elektromos Impedancia Spektrumérés (EIS), anyagjellemzők frekvencia függésének vizsgálatára.
- Környezet elektromos zajspektrumának vizsgálata (FFT), mérés optimalizálás.

További feladatok:

- Projekt befejezését követően alkalmazásfejlesztések indikálása és az ezeket kiszolgáló célirányos továbbfejlesztések.
- Frekvencia tartomány kibővítése, felfelé kettő nagyságrendel.
- konduktív-kapacitív-induktív elektródapárok fejlesztése és a hozzátartozó mérési eszközök, metodika kidolgozása. Elektromos kapacitás tomográfia (ECT), elektromágneses tomográfia (EMT)
- Feldolgozó, mérés értelmező szoftverfejlesztések.

A kifejlesztett mérőeszközök főbb paraméterei:

Alkalmazott mérési elv: áram- vagy feszültséggenerátoros gerjesztés, feszültségmérés, detektálás csatornánként digitális lock-in erősítővel

Mérőeszközök felépítése: max. 8 csatornás modulokból,

Maximális csatornaszám (1 eszköz esetében): multiplexálási lehetőségek csatornaszám növelése céljából: 2x8 csatorna multiplexálva idővesztés nélkül, multiplexer hozzáillesztésével minden csatorna esetében 8 multiplexálási lehetőség, tehát összesen 2x8x8, ami maximálisan 128 csatornás mérést tesz lehetővé. Az egyes 8/16/64/128 csatornás egységek master-slave elv felhasználásával elvileg tetszőleges számú EIT eszközzé bővíthetők.

Mérési tartomány: 1 Ohm-100 MOhm és 0-90 fok,

Rendszer pontosság (mérési paramétereiktől függően) minimum: 1 ppm (impedancia abszolút érték) és +/-0,01 fok

Periódushoz szinkronizált, precíz online 12 bit felbontású DC mérés, impedancia mérés ideje alatt

Mérő frekvencia tartomány: 0,01 Hz – 90 kHz,

Az elektromos Impedancia Spektrum (EIS) felbontóképessége az értelmezési tartományban: 0.01 Hz.

Kimenő áram tartomány: 10 $\mu\text{A}_{\text{p-p}}$ - 50 $\text{mA}_{\text{p-p}}$,

Kimenő feszültség: 10 $\text{mV}_{\text{p-p}}$ -10 $\text{V}_{\text{p-p}}$,

Impedancia mérés esetén lehetőség van két ponton egy időben 4 frekvencián mérni, valamint egy frekvencián sok ponton mérni.

Lehetőség van egy időben két csatornán mért jel FFT spektrumának mérésére

Impedancia valós és képzetes rész kimenet: 2x48 bit felbontás

Minden paraméter PC programból állítható, programozható.

Tervezett felhasználási területek:

1. Karotázs: a mélyfúrás-geofizikai munkaállomás részeként: négy csatornás, különböző behatolási mélységű és felbontású komplex kőzetellenállás mérések végzése, porozitás, permeabilitás meghatározása különböző elrendezésekben.
2. Mint önálló mérőeszköz:
 - Frekvencia tartomány: $f = 1 \text{ Hz} - 1 \text{ kHz}$, $U_g/I_g = 80 \text{ V} / 10 \text{ mA}$, mérés egyszerre négy frekvencián (EIS, folyamatos mérés). EIS pontmérés (Z1-4, DC). Mérés külső mélyég/idő szinkronnal,
 - Időtartomány (IP): $f = 0,2 - 30 \text{ Hz}$, dinamikus mérés 2*32 pontban! (Z1, DC, látszólagos tölthetőség, metál faktor, időállandó spektrum, Cole-Cole spektrum)
 - Kút-kút közötti EIT, EIS vizsgálatok.
3. Felszíni geofizika, környezetvédelem (PC és adatgyűjtő mód):
 - Vezérlés/érzékelés: 128 csatornáig bővíthető (8 csatornánként), aktív (sorosan, külön címezhető) konduktív szondákkal, PC-ről letölthető vezérlő programmal.
 - Mérés (frekvenciatartomány): $f = 0,01 \text{ Hz} - 1 \text{ kHz}$, $U_g/I_g = 100 (500) \text{ V} / 20 - (200) \text{ mA}$, vezérelhető, szinkronizálható generátor, kettő (nyolc) csatornás DSP feldolgozó rendszerrel, 4/8 GB adattárolóval, IP64 terepi védelemmel. (Z1-n, DC1-n),
 - Mérés (időtartomány): mint a karotázsnál, dinamikus mérés, 4/8 GB adattárolóval, (Z1-n, DC1-n),

- Kút-felszín közötti EIT, EIS vizsgálatok

Felhasználási terület: érckutatás, vízkutatás, grafitkutatás, szénhidrogén kutatás, litológiai azonosítás, régészeti kutatások, környezetvizsgálatok, környezetvédelem, gátak vizsgálata, monitoring,

Idő és frekvencia tartomány közötti átjárhatóság a biztosítása, szoftverfejlesztés, vásárlás!

4. Anyagvizsgálatok:

- EIT és EIS alkalmazásával lehetőség nyílik olyan roncsolásmentes vizsgálatok elvégzésére, melyek az ipari folyamat menedzsment során kiválóan alkalmazhatóak. Így a vegyipari, környezetvédelmi gyakorlatban alkalmazott reaktortípusok esetében EIT méréssel 2D-s, 3D-s, 4D-s képek vehetők fel a vezetőképesség térbeli, időbeli változásáról, amivel folyamat optimalizálási feladatok hajthatóak végre hatékonyan.
- EIS segítségével elektrokémiai vizsgálatok hajthatóak végre, hiszen a felvett spektrum a vizsgált elektrolit esetében az oldott anyagra jellemző, fémek esetében a korrodáltságra.

5. Biofizikai alkalmazás

- Élelmiszer (minőség) vizsgálat, növények élettani vizsgálatai,

6. Humán alkalmazás:

- Vezérlés: 64/256 csatornáig bővithető (8/64 csatornánként), passzív (párhuzamosan, külön címezhető) konduktív szondákkal, időkritikus mérések (20 msec felbontással) PC-ről letölthető vezérlő programmal!
- Mérés: 16/64/256 csatornás DSP egységgel, az előzőekben definiált mérési paraméterekkel. $f=1 \text{ kHz} - 90 \text{ kHz}$, $U_g/I_g= 1 \text{ mV}-5 \text{ V}/1 \mu\text{A}-10 \text{ mA}$,

Felhasználási területek: EIT orvosi képzés, diagnosztika, testösszetétel.

2. Bevezetés

Az Előzményekben bemutatott projektünkre épülő projekt (GOP-1.3.1-11/C-2012-0458) címe „Akusztikus Impedancia mérésekhez alkalmazásfejlesztés”, időtartalma: 2012. 11.01. – 2012.10.31.

Akusztikus impedancia: bármely közeg akusztikus impedanciája: hasonlóan az elektromos impedanciához az inhomogén extenzív (nyomáskülönbség) és az létrejött intenzív (részecskesebesség) aránya: $Z = p/c$. A reflexió kizárólag két különböző akusztikus impedanciájú közeg határfelületén jön létre.

Célkitűzések:

- A fennálló analógiák alapján, az EI fejlesztések berendezéseinek kisebb mértékű átalakításával alkalmassá tenni Akusztikus Impedancia (AI) mérésekre.

Hasonlóság:

- Különbségek: eltérő adó és vevő egységek, nagyobb teljesítményű gerjesztések, a 'v' értéke változó, mely befolyásolja a mérések eredményeit,
- FFT, spektrum felvétel, jel/zaj viszony vizsgálat,
- AIS, Akusztikus impedancia spektrum felvétele az értelmezési tartományban,
- AIT, Akusztikus impedancia tomográf, 8/64 csatornás felbontásban, több egység közös, szinkronizált használatával,

Várható hasznosítás: különböző alkalmazásfejlesztésekhez saját szolgáltatások, eladható berendezések, mérési módszerek kifejlesztése az elektromos impedancia mérések kiegészítése, egymás alternatívájaként.

Tervezett felhasználási területek:

1. Karotázs: akusztikus mérések, VSP,

Akusztikus mérések (10-25 kHz, 1-5 W), VSP (5 – 500 Hz, 50-500 W sekély),

2. Felszíni geofizika, környezetvédelem, mérnökgeofizika, monitoring:

Felszíni forrásból kibocsátott és a reflektált akusztikus hullámok kutakban, fúrásokba, különböző mélységekben, geofonokkal (hidrofonokkal) való rögzítése. Ha a forrás 0 offset-ű fúrásban található, a mérés elnevezése Függőleges Szeizmikus Profile (Vertical Seismic Profile, VSP). A kőzetekben a rugalmas hullám terjedési sebessége függ a kőzet minőségétől. Porózus képződményeknél függ a porozitás mértékétől, és a pórust kitöltő anyagtól is. A szeizmikus kutatásoknál 10 Hz és néhányszor 100 Hz közötti a gerjesztő frekvencia. A hullámhossz nagysága a felbontóképességet határozza meg.

A rugalmas hullám energiája a mélységgel exponenciálisan és a távolság első hatványával fordítottan csökken homogén féltér esetén. A szeizmikus csatorna jelének erősítésére a gömbi szóródás, az elnyelődés és a reflexiók veszteségek miatt van szükség. A rugalmas hullámenergiája lefelé haladva ugyanolyan mértékben csökken, mint felfelé. Az optimális megjelenítés érdekében az ily módon előálló jelcsökkenést kompenzálni kell. Minél

mélyebbről verődik vissza a jel, általában annál nagyobb erősítésre van szükség annak érdekében, hogy a reflexiók közel azonos amplitúdóval jelentkezzenek.

Automatikus erősítés szabályozás (AGC automatic gain control) a beérkező jelek intenzitásához alkalmazkodó mérés közbeni erősítés, mely a jel amplitúdója alapján automatikus szabályozott.

3. Teremakusztika/műszaki akusztikus vizsgálatok

Műszaki vizsgálatok: frekvencia amplitúdó/teljesítmény vizsgálatok (hangszóró, geofon, hidrofon),

A műszaki akusztikus vizsgálatokat csoportosíthatjuk esetünkben aszerint, hogy a akusztikai teret milyen közegben hozzuk létre. E szerint:

- Rezgésvizsgálatok szilárd anyagokban: nagy jelentősége lehet anyagszerkezeti vizsgálatok során, de például a zajvédelem területén is, ahol a válaszfalak zajjal szembeni viselkedését lehet így vizsgálni.
- Akusztikus vizsgálat folyadékokban: szonár, víz alatti radar. Ez esetben a folyadékbeli akusztikus nyomástér kialakulását vizsgáljuk tomográfiásan.
- Teremakusztikai vizsgálatok: zárt térben létrehozott akusztikai tér jellemzőinek a vizsgálata energiatárolók észrevétele, rezonanciák kimutatása (wobler és tomográfiás méréssel)
- Akusztikus impedancia vizsgálatok hangszerek esetében: napjainkban az akusztikus impedancia mérés egyik legelterjedtebb alkalmazási területe, fűvös hangszerek akusztikus impedanciájának spektrális elemzése.

4. Hallásvizsgálat

Az akusztikus impedancia-vizsgálat a dobhártya és hallócsontláncolatnak a hangrezgésekkel szembeni ellenállását elemzi. A timpanometria az audiometria egyik fajtája, lényege a középfül nyomással szembeni ellenállásának meghatározása. Általában a vezetéssel halláscsökkenés okainak elkülönítésére használják. A méréshez nincs szükség a beteg tevékeny közreműködésére, így gyakran használják gyermekek vizsgálatakor. Egy mikrofont és egy folyamatos hangot kiadni képes hangforrást tartalmazó eszközt illesztnek a hallójáratba. A készülék azt méri, hogy a hallójárat különböző légnyomásainál mennyi hang jut át a középfülön, illetve mennyi verődik onnan vissza. A vizsgálat eredményeként megállapítható, hogy a középfület az orrüreg hátsó részével összekötő fülkürtelzáródás, folyadék jelenléte a középfülben vagy a hangvezető hallócsontláncolat megszakadása áll-e a háttérben.

A rezonancia fizikai jelenség, mely gerjesztett rezgéseknél lép fel olyankor, ha a gerjesztés frekvenciája és a lengőrendszer szabadlengéseinek frekvenciája közel van egymáshoz. Ilyen esetben a gerjesztés által a rendszerbe egy-egy kitérés alatt bevitt kis energiaadagok fokozatosan összegeződnek és nagy rezgésamplitúdót okoznak. Csillapítás nélküli (idealizált) rendszerek esetén a rezgésamplitúdó rezonanciában végtelen nagy is lehet.

5. Termikus impedancia

Az elektromos impedanciával analóg fogalom, a szilárd testekben végbemenő termikus folyamat leírására. Az elektromos impedancia definíciója itt is érvényes, csak feszültség helyett hőmérséklet, áram helyett hőáram értendő. A termikus ellenállásokból és termikus kapacitásokból építhető fel, az elektromos áramkörökhöz hasonló módon.

6. Optikai koherencia tomográfia (OCT)

Az OCT működésének elve hasonlít az ultrahangéhoz. Az ultrahangnál jelentősen magasabb hullámhosszú fény (elektromágneses hullám) alkalmazása azonban nagyobb felbontást eredményez. Nincs szükség kontaktmédiumra, mert a szövetek és a levegő közötti törésmutató (optikai impedancia) nem olyan nagyságrendű, mint az akusztikus impedancia az ultrahang esetében. A fény sebessége azonban az ultrahangnál százötvenezereszer nagyobb, ezért a reflexiók direkt módon nem mérhetők. Az OCT technológia az „alacsony koherenciájú interferometria” elvén alapul. Ennek során a szemből visszaverődő – és a számunkra fontos jelet hordozó – fény interferál egy másik fénysugárral, amelynek megtett útja ismert (referencia fény). Az eljárás alapja a Michelson-interferométer.

3. Elméleti alapok

Az akusztikus és elektromos impedancia mérési és kiértékelési módszereinek analógiáját a transzportfolyamatok tudományág felfogásában könnyen megérthetjük és az összehasonlítás is egyszerűbb.

Alapfogalmak: [3]

- **Állapot:** az alaktól független tulajdonságok összessége az állapot, maguk a tulajdonságok az állapothatározók vagy állapotfüggvények. Az alaktól független tulajdonságok megváltozását állapotváltozásnak nevezik.
- **Rendszer:** az anyagi világ azon általunk elhatárolt része, amelyben a vizsgált állapotváltozás végbemegy. A rendszer mindig véges, anyagi természetű és definiált felületekkel határolt. A rendszer lehet:
 - homogén vagy koncentrált paraméterű rendszer, amelynél az egyes állapothatározók minden pontban azonosak és
 - inhomogén rendszer, ahol az állapothatározó tulajdonságok egy része változik a hely függvényében (megoszló paraméterű rendszer). Speciális, de igen fontos inhomogén rendszer az, amelyet több homogén vagy inhomogén alrendszer alkot. Az ilyen rendszert heterogén rendszernek nevezik. Ekkor az alrendszerek neve: fázis, és az alrendszereket elválasztó felület a fázis-határfelület.
- **Környezet:** a természeti világ azon részét, amely nem tartozik a rendszerhez, környezetnek hívjuk.
- **Állapotváltozás:** az állapotváltozás a rendszeren belüli, az alrendszerek közötti, illetve a rendszer és környezete közötti kölcsönhatások – egymásra hatások eredménye.
- **Szigetelt rendszer:** ha csak a rendszerben megy végbe állapotváltozás, de a környezetben nem.
- **Nyitott rendszer:** ha a rendszer és környezete között anyagcsere is és energia transzport is történik.
- **Zárt rendszer:** ha a rendszer és környezete között nincs anyagcsere (tömeg nem hagyhatja el a rendszert és nem is jöhet be). A rendszer és környezete között energetikai kölcsönhatás lehetséges!
- **Állapothatározók (állapotjelzők):** az állapothatározókat két csoportba lehet sorolni:
 - egyik homogén (lineáris) függvénye az anyag mennyiségének, ezek extenzív tulajdonságok,
 - a másik csoport független a mennyiségtől, ezek intenzív tulajdonságok. Mivel az anyagtól függetlenül az intenzív tulajdonságok nem létezhetnek, úgy is mondhatjuk, hogy az intenzív állapotjelzők az anyagmennyiség homogén nulladrendű függvényei.

Tipikus extenzív tulajdonságok például a tömeg, a térfogat, a belső energia, míg intenzív a nyomás, a hőmérséklet, a koncentráció, az elektromos potenciál stb. Az extenzívek fajlagos értékeinek nevezzük valamely extenzív és az anyag mennyiségének hányadosát. Ilyen például

a fajtérfogat ($v = V/m$) vagy a sűrűség ($\rho = m/V$). Látható, hogy az extenzívek fajlagos értékei intenzív tulajdonsággá válnak.

A transzportfolyamatok az extenzív tulajdonságok helyváltoztatását vizsgáló tudomány. A transzportjelenségek leírása tapasztalati összefüggések, törvények alapján történhet, ez a fenomenologikus megközelítés. A különböző transzportjelenségeket általánosítani lehet, hiszen azonos törvényszerűségekkel írhatók le, tehát analóg jelenségek.

Extenzív mennyiségek helyváltoztatása áramlás és átadás révén valósulhat meg. Így beszélhetünk áramlásos és átadásos transzportról. Az áramlásos transzport – mely egy adott fázison belül valósul meg – lehet konduktív (vezetési) és konvektív (szállítási) transzport. Az átadásos transzport lényegében összetett áramlásos transzport. E folyamatokat az áramerősséggel és áramsűrűséggel jellemezzük. Áramsűrűség alatt az időegység alatt felületegységen átáramló extenzív állapotjelzőt értjük. Az eredő áramsűrűség a konvektív és konduktív áramsűrűségek eredőjeként jön létre. Az áramerősség az áramsűrűség felületi integrálja.

3.1. A vezetési áramsűrűség és kialakulása [3]

A tapasztalat szerint az extenzívek konduktív áramlását az adott extenzívhez tartozó intenzív mennyiség inhomogenitása hozza létre, s az áramlás „célja” éppen az ilyen inhomogenitások megszüntetése. Az extenzívek áramlása tehát kiegyenlítődési folyamat, amely – magára hagyott rendszerben – valamilyen egyensúlyi állapot felé tart. Ismeretes, hogy fizikai mennyiségek térbeli inhomogenitását pl. a szintfelületre merőleges gradiens fejezi ki.

Így a kiegyenlítődési folyamatoknál az intenzívek gradiensei határozzák meg a folyamat irányát és sebességét, s az intenzívek gradienseit a folyamatok hajtóerejének tekinthetjük. Erre alapozva a vezetési áramokra vonatkozó általános tapasztalati törvények az ún. fenomenologikus összefüggések.

A hő vagy az elektromos töltések vezetési áramlása a tér egyik pontjából egy másikba, szilárd anyag oldódása folyadékban, valamely folyadék oldódása egy másik folyadékban, mind egy-egy példa azokra az áramlásokra, amelyek a fenti inhomogenitások hatására jönnek létre. A példákban ezek a hőmérséklet, az elektromos potenciál és a koncentráció gradiense, a jelenségek a hővezetés, az elektromos vezetés és a diffúzió. A diffúzió elnevezésen az anyag molekuláris vezetési áramát értjük (Berthollet, 1803.). A hővezetésre Fourier (1822) azt találta, hogy a hőáramsűrűség és a hőmérsékletgradiens között lineáris kapcsolat van. Néhány évvel később Ohm (1827) kimutatta, hogy az elektromos töltések áramsűrűsége lineáris kapcsolatban van az áramlást előidéző feszültség-gradienssel.

A fentieknek megfelelően tehát a zárt rendszerben (is) létrejövő konduktív áramsűrűség és a létrehozó erő közötti kapcsolat általános formája a következő:

$$j_{i, kd} = \text{együttható} \cdot \text{grady}_i \quad (3.1)$$

ahol y_i -vel az i -edik extenzívhez tartozó jellemző intenzívet értjük. Az (3.1) összefüggés tapasztalati jelenségek megfigyelésén és általánosításán alapul, s a vezetési áramsűrűségek fenomenologikus kifejezésének tekintjük.

Így tehát az ún. fenomenologikus összefüggések a fenti példákra:

- a hővezetésre a Fourier törvény:

$$\mathbf{j}_{q_{kd}} = -\lambda \cdot \text{grad}T \quad (3.2a)$$

- az elektromos vezetésre az Ohm törvény:

$$\mathbf{j}_{Q_{kd}} = -\sigma \cdot \text{grad}E \quad (3.2b)$$

- a diffúzióra a Fick törvény:

$$\mathbf{j}_{m_{kd}} = -D \cdot \text{grad}\omega_k \quad (3.2c)$$

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 gradiensek és egy vezetési tényezőnek a szorzata.

A (2) összefüggések az általános erő (inhomogenitás) és az általános vezetési tényező segítségével azonos alakban írhatók fel:

$$\mathbf{j}_{j_{kd}} = L_i \cdot \mathbf{X}_i \quad (3.3)$$

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

$$\mathbf{X}_i = -\text{grad}y_i \quad (3.4)$$

tehát az i-edik intenzív negatív gradiense.

3.2. Akusztikus hullámterjedés fenomenologikus összefüggése

Mint láthattuk, az elektromos vezetés esetében az Ohm törvény írja le az intenzív mennyiség (elektromos térerősség) inhomogenitásai által létrehozott extenzív (elektromos töltésáram) áramsűrűségének kapcsolatát, (3.2b) képlet.

Például a léghangok terjedése során a levegő részek sajátos áramlása jön létre. Feltételezések szerint ennek során a kialakuló nyomás változás a vivő-közeg, jelen esetben a levegő sűrűségének és hőmérsékletének megváltozásával jár együtt. Ezért a hangteret az őt kitöltő közeg áramlástan és termodinamikai jellemzőivel (sebesség, nyomás, sűrűség, hőmérséklet) írhatjuk le. Az így adódott változók közötti kapcsolat megteremtéséhez olyan fizikai alapelveket kell keresnünk, amelyek teljesülnek a hangterjedés során kialakuló fizikai folyamatokban. Mint általában a mechanikában, a hangtér bármely pontjában, és annak szűk környezetében létrejövő áramlási jelenségre is teljesül a tömeg-, az impulzus-, és az energiamegmaradás elve. Ezek alapján a kellő elhanyagolások mellett kapjuk a lineáris akusztikai mozgásegyenletet: [4]

$$\frac{\partial \mathbf{v}'}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_0} \cdot \text{grad}p' \quad (3.5)$$

ahol

$\frac{\partial v'}{\partial t}$ a részecskesebesség időben ingadozó összetevője,

ρ_0 a közeg (amiben a hullámterjedés létrejön) sűrűségének egyensúlyi, időben állandó összetevőjét jelöli

p' a nyomás időben ingadozó összetevője.

Ez alapján megállapítható, hogy (az analógia alapján) a hangnyomás változás (intenzív inhomogenitása) a sebesség időbeli változását eredményezi.

Veszteségmentes, adiabatikus zavarás terjedési viszonyok mellett, a sűrűség növekedés mindig nyomás növekedést eredményez, illetve az elemi sűrűség növekedés közelítőleg egyenesen arányos a létrejövő elemi nyomás változással. A hangnyomás és a sűrűségingadozás közötti matematikai kapcsolat előállításához használjuk ki, hogy a hangterjedés során a hangnyomás és sűrűségingadozás amplitúdók értéke olyan kicsi, hogy a kapcsolat jó közelítéssel lineárisnak tekinthető. Így (5):

$$p' \cong c^2 \cdot \rho' \quad (3.6)$$

ahol

p' a nyomás időben ingadozó összetevője

c a hangsebesség (levegőben 340 m/s, $K = 293 \text{ }^\circ\text{K}$)

ρ' a sűrűség időben ingadozó összetevője.

A sűrűségingadozás és hangnyomás közötti kapcsolathoz (3.5) hasonlóan, a hőmérséklet ingadozás és a hangnyomás között is közelítőleg lineáris kapcsolat van. Kihhasználva, hogy a hangterjedés során a hőmérsékletingadozás és a hangnyomás amplitúdói igen kicsik:

$$T' \cong \frac{\kappa - 1}{\kappa R \rho} \cdot p' \quad (3.7)$$

ahol

κ az adiabatikus kitevő: $\kappa = \frac{c_p}{c_v} = (c_v + R^*) / c_v$

R az egyetemes gázállandó

Ez alapján a lineáris akusztikai megközelítés egyik előnyös következménye az egyszerű matematikai formalizmus, a hangteret leíró egyenletrendszer könnyű kezelhetősége. A másik előnyös tulajdonság az, hogy két vagy több hangforrás együttes hatása az összetevő források külön-külön vett hangterének az egyszerű összetételéből származtatható (szuperponálható). Ennek megfelelően az adott eredő hangtéri jellemző az egyes hullámösszetevők által létrehozott adott hangtéri jellemzők egyszerű összegeként állítható elő. Úgy is fogalmazhatunk, hogy az egy időben, azonos környezetben terjedő akusztikai hullámok között nincs kölcsönhatás, minden hullám függetlenül halad a másiktól. Ennek a létjogosultságát mi sem igazolja jobban, mint az az egyszerű megfigyelés, hogy egy időben két egyformán közepesen hangos beszélgetés akusztikailag külön-külön jól érthető, tehát a két beszéd akusztikailag egymást nem befolyásolja.

4. Periodikus (sinusos) jelenségek leírása

A rezgés valamely mennyiség időben periódikusan ismétlődő változása, ami a rezgésállapot terjedését magában foglaló anyaghoz (közeghez) kötött. A hullámterjedés ezzel szemben kialakul vákuumban is (pld. az űrben, műholdak esetén), ahol az elektromágneses hullám terjed (közvetítő közeg nélkül).

4.1. A komplex mennyiségek bevezetése – elektromos hálózatok [7]

Ha egy általános hálózatban valamennyi generátor azonos periódusú, tiszta sinuszos feszültséget termel, akkor a hálózat minden árama és feszültsége ugyancsak sinuszos lefolyású és ugyanazon frekvenciájú. (Ez csak akkor igaz, ha lineáris körökről van szó.) Az egyes mennyiségek csak amplitúdójukban és fázisukban fognak egymástól különbözni. Ha egy áramkör viszonyait szemléltetni akarjuk, az egyes mennyiségek időbeli változását egy koordináta-rendszerben ábrázoljuk. Eltekintve attól, hogy egy szinuszgörbét önmagában is nehéz gyorsan és jól megrajzolni, már a legegyszerűbb körben áttekinthetetlen az ábrázolás, az egyes fázisszögek nehezen olvashatók le. Két egymáshoz képest eltolt görbe eredőjének megszerkesztése csak pontról pontra történhet.

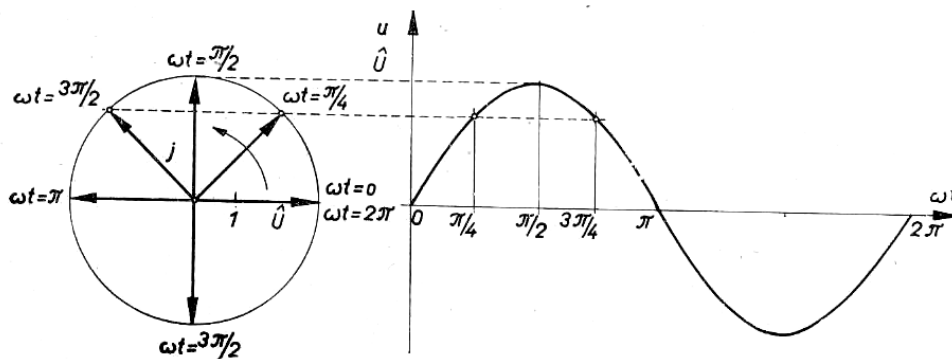
A váltakozó áramkörök áram- és feszültségviszonyainak szemléltetésében, ezen túlmenően a számítások elvégzésében leghathatósabb segítőnk a komplex áram- és feszültségvektor, valamint a komplex impedancia fogalma. Ezen fogalmak bevezetése céljából vizsgáljuk meg az

$$\bar{u} = \hat{U} \cdot e^{j\omega t} \quad (4.1)$$

komplex számot. (A hálózatok számítása során a felülvonás komplex számot jelent.) Ennek abszolút értéke \hat{U} , fázisszöge pedig ωt , vagyis ezen egyenletesen körbenforgó komplex szám szögsebessége éppen ω . Ennek képzetes része, tehát a körbenforgó komplex szám vetülete a képzetes tengelyre az

$$\bar{u} = \hat{U} \cdot e^{j\omega t} = \hat{U} \cos \omega t + j \hat{U} \sin \omega t \quad (4.2)$$

összefüggés szerint éppen $\hat{U} \sin \omega t$, így az minden időpillanatban megadja a periodikusan váltakozó feszültség értékét (4.1. ábra).



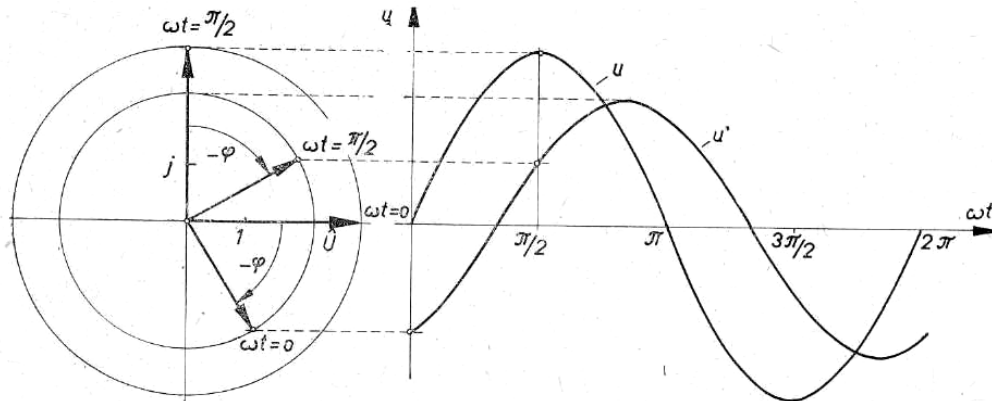
4.1. ábra: Szinuszos függvény előállítás egy forgó vektor vetületeként [7]

Az \bar{u} komplex időfüggvényről azt mondjuk, hogy reprezentálja az u valós időfüggvényt; ennek matematikai kifejezése:

$$u = \Im \bar{u} \quad (4.3.)$$

Könnyen beláthatjuk azt is, hogy az $u' = \hat{U}' \sin(\omega t - \varphi)$ feszültségnek, vagyis az előzőkhöz képest φ szöggel késő feszültségnek egy, az előzővel φ szöget bezáró vektor, vagyis komplex szám felel meg, tehát az ehhez tartozó komplex vektor (3.2. ábra):

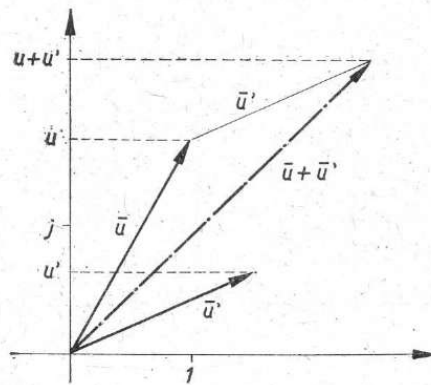
$$\bar{u}' = \hat{U}' \cdot e^{j(\omega t - \varphi)} = \hat{U}' \cdot e^{-j\varphi} \cdot e^{j\omega t}; \quad u' = \hat{U}' \sin(\omega t - \varphi) = \Im \bar{u}' \quad (4.4)$$



4.2. ábra: Fázisban eltolt feszültségfüggvényekhez tartozó forgó vektorok [7]

Adjuk most össze a komplex számok összeadási szabályai szerint egy adott időpillanatban a feszültségek pillanatnyi helyzetét ábrázoló komplex vektorokat, hogy a sorbakapcsolt feszültségek eredőjét meghatározzuk, akkor az így adódó eredő nagyságra is, fázisszögekre is helyesen képviseli az u és u' feszültség összegezéséből kiadódó eredő feszültséget. Az eredő feszültséget ugyanis úgy kapjuk meg, hogy minden pillanatban összeadjuk a feszültségek pillanatnyi értékét. Az 4.3. ábrára rátekintve azonban láthatjuk, hogy az eredő komplex feszültség képzetes része, ami közvetlenül az eredő feszültséget adja, éppen a két feszültséget ábrázoló komplex szám képzetes részeinek összegéként adódik:

$$u + u' = \Im \bar{u} + \Im \bar{u}' = \Im (\bar{u} + \bar{u}') \quad (4.5)$$



4.3. ábra: A komplex feszültségek vektor összege helyesen reprezentálja az eredeti feszültség függvények összegét [7]

Itt látjuk a komplex ábrázolási mód óriási előnyét. Ahelyett, hogy a feszültség- idő koordinátarendszerben dolgoznánk, és szinuszgörbéket adnánk össze, amelyek összegének maximuma igen nehezen volna megállapítható, egy-egy váltakozó feszültség egy forgó vektorral helyettesíthető, más feszültségekkel ez a vektorok összeadási szabályai szerint összeadható.

Eddig azt láttuk, hogy a komplex feszültség- vagy áramvektorok összege helyesen reprezentálja a két feszültség vagy áram összegét. Nézzük meg, igaz-e ez az állítás a differenciálásra, illetőleg az integrálásra vonatkozóan.

A kérdés tehát az, hogy ha az $u = \hat{U} \sin(\omega t - \varphi)$ feszültséget az $\bar{u} = \hat{U} \cdot e^{j(\omega t - \varphi)}$ vektor reprezentálja, vagyis $u = \Im \bar{u}$, akkor a

$$\frac{du}{dt} = \hat{U} \cdot \omega \cos(\omega t - \varphi) \quad (4.6)$$

mennyiségnek a

$$\frac{d\bar{u}}{dt} = \hat{U} \cdot j\omega e^{j(\omega t - \varphi)} \quad (4.7)$$

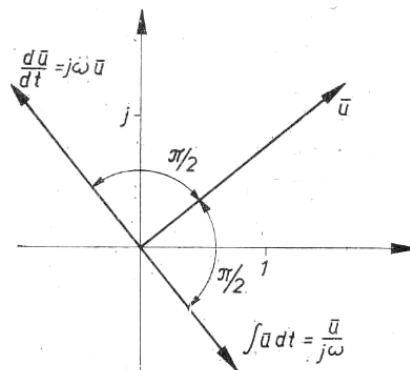
komplex vektor felel-e meg; vagyis igaz-e a következő összefüggés:

$$\frac{du}{dt} = \frac{d}{dt} \Im \bar{u} = \Im \frac{d\bar{u}}{dt} \quad (4.8)$$

Rögtön látható, akár az 3.4. ábrából, akár a

$$\frac{d\bar{u}}{dt} = \hat{U}\omega [j \cdot \cos(\omega t - \varphi) - \sin(\omega t - \varphi)] \quad (4.9)$$

összefüggésből, hogy ezen komplex függvény képzetes része valóban az $\omega \hat{U} \cos \omega t$ függvényt adja. A komplex síkon a differenciálás tehát $j\omega$ -val való szorzást, vagyis 90° -kal való előreforgatást és ω -val való nyújtást jelent.



4.4. ábra: A differenciálás $+\pi/2$ -vel való elforgatást, majd ezt követő nyújtást, illetve zsugorítást jelent [7]

Ugyanúgy belátható, hogy az integrálás is elvégezhető komplex alakban: $j\omega$ -val osztással helyettesíthető. Ugyanis

$$\int u dt = \int \hat{U} \sin(\omega t - \varphi) dt = -\hat{U} \frac{1}{\omega} \cos(\omega t - \varphi) \quad (4.10)$$

$$\int \bar{u} dt = \int \hat{U} \cdot e^{j(\omega t - \varphi)} dt = \frac{1}{j\omega} \hat{U} \cdot e^{j(\omega t - \varphi)} = \frac{1}{\omega} [-j \cos(\omega t - \varphi) + \sin(\omega t - \varphi)] \quad (4.11)$$

Tehát igaz a következő összefüggés:

$$\int \Im \bar{u} dt = \Im \int \bar{u} dt \quad (4.12)$$

Megjegyezzük, hogy az

$$u = \hat{U} \cdot \sin(\omega t - \varphi) \quad (4.13)$$

feszültségnek megfelelő

$$\bar{u} = \hat{U} \cdot e^{j(\omega t - \varphi)} = \hat{U} \cdot e^{-j\varphi} \cdot e^{j\omega t} = \hat{U} \cdot e^{j\omega t} \quad (4.14)$$

kifejezést a feszültség komplex pillanatértékének nevezzük. Az ebben a kifejezésben szereplő

$$\hat{U} = \hat{U} \cdot e^{-j\varphi} \quad (4.15)$$

mennyiség neve: komplex amplitúdó. Ugyanezek a jelölések alkalmazhatók értelemszerűen az áramerősségre is.

A komplex csúcsérték helyett általában kényelmesebb az

$$\bar{U} = \frac{1}{\sqrt{2}} \hat{U} = \frac{1}{\sqrt{2}} \hat{U} \cdot e^{-j\varphi}, \quad \bar{I} = \frac{1}{\sqrt{2}} \hat{I} = \frac{1}{\sqrt{2}} \hat{I} \cdot e^{-j\varphi} \quad (4.16)$$

alakban definiált komplex effektív értékkel dolgozni. Látható, hogy ennek abszolút értéke megegyezik az előzőekben definiált effektív értékkel.

Vizsgáljuk most meg, hogy a komplex írásmódban milyen kapcsolat van az ellenállás, az induktivitás és a kapacitás sarkain fellépő feszültség és a rajtuk átfolyó áram között. Induljunk ki az ismert

$$u_R = Ri, \quad u_L = L \frac{di}{dt}, \quad i = C \frac{du_C}{dt} \quad (4.17)$$

összefüggésekből. A feszültséget és az áramot komplex pillanatértékeivel helyettesítve

$$\bar{u} = Ri, \quad \bar{u}_L = j\omega Li, \quad i = j\omega C \cdot \bar{u}_C \quad (4.18)$$

Legyen $\bar{u} = \sqrt{2}\bar{U} \cdot e^{j\omega t}$ és $\bar{i} = \sqrt{2}\bar{I} \cdot e^{j\omega t}$ akkor egyszerűsítés után a komplex effektív értékek kapcsolatára

$$\bar{U}_R = R\bar{I}, \bar{U}_L = j\omega L\bar{I}, \bar{U}_C = \frac{1}{j\omega C}\bar{I} \quad (4.19)$$

adódik. A komplex mennyiségek bevezetése tehát azzal az előnnyel jár, hogy az áram és a feszültség között egy, az Ohm-törvényhez hasonló egyszerű kapcsolat adódik, amelyet

$$\bar{U} = \bar{Z} \cdot \bar{I} \quad (4.20)$$

alakban szoktak megfogalmazni. Az ellenállás helyére most egy \bar{Z} komplex szám kerül, amelyet impedanciának neveznek. A fenti összefüggések összevetéséből látható, hogy az egyes elemek impedanciája

$$\bar{Z}_R = R, \bar{Z}_L = j\omega L, \bar{Z}_C = \frac{1}{j\omega C} \quad (4.21)$$

4.2. Akusztikus rezgések leírása [1; 3]

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. Ezekre közismert példa a hangszóró vagy a mikrofon, mely elektromos feszültség-hullámokat alakít hanggá illetve viszont.

4.2.1. Akusztikus rezgés terjedésének leírása

Az akusztikában az harmonikus rezgőmozgás alapegyenletét alkalmazzák a következő formában:

$$y(t) = A_0 + A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) \quad (4.22)$$

ahol

$y(t)$ a pillanatérték az idő függvényében,

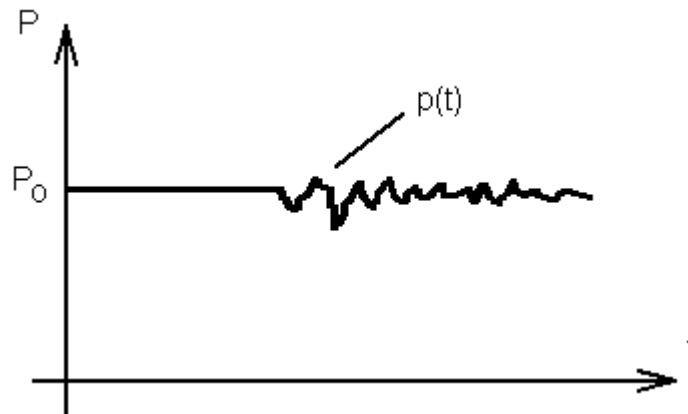
A_0 az amplitúdó egyenszintje,

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 esetén ez maga az atmoszféranyomás, értéke $A_0 \approx 10^5 \text{ [Pa]} = 1 \text{ [atm]}$. 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. (4.5. ábra)



4.5. ábra: 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, amely a lineáris akusztikai mozgásegyenletet (4) meghatározásában jelentős. E szerint a hangtéri jellemzőket bontunk fel egy időben állandó, egyensúlyi és egy időben változó, ingadozó összetevőre. Ennek megfelelően:

$$p = p_0 + p', \quad v = v_0 + v', \quad \rho = \rho_0 + \rho', \quad T = T_0 + T' \quad (4.23)$$

ahol:

p [Pa] a közegben mérhető nyomás.

v [m/s] a közeg áramlási sebessége

ρ [kg/m³] 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.

(Akusztikai szóhasználatnál p' -t hangnyomásnak, v' -t a részecske (kontinuum darab) sebességnek nevezzük.)

A nyomás, sűrűség és hőmérséklet értékekben a zavarás hatására létrejövő ingadozó komponensek az egyensúlyi értékeikhez képest jóval kisebbek, illetve a részecskesebesség általában a természetben megfigyelhető áramlási jelenségek sebességéhez képest jóval kisebb.

$$\frac{p'}{p_0} \ll 1, \frac{\rho'}{\rho_0} \ll 1, \frac{T'}{T_0} \ll 1 \quad (4.24)$$

(Hang esetében ezen a feltételezések a létjogosultsága mérésekkel bizonyítható.)

A hangterjedés során a közegben kialakuló kicsi összenyomódások és kitágulások olyan gyorsan alakulnak ki, illetve változnak, hogy emiatt az egymással szomszédos, az eltérő zavarási állapot miatt különböző hőmérsékletű rétegek között számottevő hőcsere nem alakulhat ki. Ezért a zavarásterjedés során a közegben létrejövő állapotváltozás termodinamikailag adiabatikusnak tekinthető.

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

- Frekvencia, azaz a másodpercenként rezgések száma, $[f] = \text{Hz}, 1/\text{s}, \text{ciklus/sec}, f=c/\lambda$
- Amplitúdó, azaz a kitérés maximuma, $[A] = \text{általában méter},$
- Periódusidő, azaz mennyi ideig tart egy teljes periódus, $[T] = \text{sec}, T = 1/f$
- Körfrekvencia, $[\omega] = \text{rad/sec}, \omega = 2\pi f$
- Hullámhossz, azaz egy periódus méterben mért hossza, a maximumok (az azonos amplitúdójú pontok) távolsága, $[\lambda] = \text{méter}$
- Hullámszám, $[k] = 1/\text{m}, k = \omega/c$
- Terjedési sebesség, azaz a kitérés idő szerinti deriváltja, $[c] = \text{m/s}, c = \lambda f$

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

$$c = \sqrt{\kappa \frac{p}{\rho}}, \text{ azaz levegőre (ideális gázt feltételezve): } c = \sqrt{\frac{1,4p_0}{\rho}} \quad (4.25)$$

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

$$c(T) = 332 \sqrt{1 + \frac{T}{273}} = 332 \cdot 0,6\Delta T \quad (4.26)$$

4.2.2. Harmonikus hullámok az akusztikában és ezek leírása (komplex írásmód)

Harmonikus gerjesztés hatására harmonikus, más néven monokromatikus hullám keletkezik. A harmonikus hullám a szinusz illetve koszinusz függvénnyel írható le. A hullámegyenlet megoldásai közül a harmonikus hullámoknak egyfelől azért van kiemelkedő jelentőségük, mert a harmonikus hullám a spektrális elemzés alapeleme. Másfelől a véges méretű testek szabad rezgései jó közelítéssel harmonikus rezgések, vagy legalábbis ezek kombinációjából összeálló mozgások, így az általuk létrehozott zavarás harmonikus hullám lesz.

A harmonikus mozgások leírására alkalmas szinusz és koszinusz függvény bevezetése miatt az idő mértékegységű argumentumról célszerű áttérni a szög mértékegységűre. Hasonlóan a harmonikus rezgő mozgásokhoz a harmonikus hullámoknál is található egy olyan egyenletes ω szögsebességgel forgó vektor, amelynek az adott irány mentén leképzett vetületi értékének változása éppen az adott hullámtéri változóival egyenlő. Amíg azonban rezgések esetében a forgó vektor szöghelyzete, fázisszöge csupán a rezgő mozgás idő változójával volt

összeköthető, addig hullámok esetében a forgóvektor fázisszögét a hullámmozgás idő és tér változójával együtt kell összekapcsolni. Miközben a hullám egy periódusa lezajlik, vagyis állapota éppen a legutóbbi hasonló állapotába kerül vissza, a forgóvektor egy teljes körfordulást végez, vagyis 2π fázisszöget tesz meg. Ezek alapján könnyen előállítható egy olyan argumentum, amely az idő és távolság növekedését megfelelően összehangolja a fázisszög változásával. Például egy, a pozitív x tengely irányába haladó harmonikus hullám:

Például egy, a pozitív x tengely irányába haladó harmonikus hullám:

$$p'(x, t) = \hat{p} \cos(\omega t - kx + \varphi_0) \quad (4.27)$$

ahol

$p'(x, t)$ [Pa]: hangnyomás tér- és időbeli változását leíró hullámfüggvény

\hat{p} [Pa]: hangnyomás amplitúdója

$\omega t - kx + \varphi_0$ [rad]: hullám fázisszöge

$\omega = \frac{2\pi}{T}$ [1/sec]: szögsebesség, vagyis az időegység alatt megtett fázisszög nagysága radiánban (A szögsebesség az ω t meghatározó hányadossal biztosítja, hogy a teljes hullám periódus megtételéhez szükséges T idő elteltével a hullámfüggvény argumentuma is 2π fázisszöggel növekedjen.)

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$ [1/m]: hullámszám, vagyis a hosszegységre jutó fázisszög nagysága radiánban (A hullámszám az ω t meghatározó hányadossal biztosítja, hogy a teljes hullám periódus megtételéhez szükséges λ távolság megtétele után a hullámfüggvény argumentuma is 2π fázisszöggel növekedjen.)

φ_0 [rad]: hullámmozgás kezdő, $t=0$ sec időponthoz és $x=0$ m helyzethez tartozó fázisszöge

Harmonikus hullámoknál az azonos zavarási állapotot elszenvedő részecskéket tartalmazó felületet a hozzájuk tartozó forgóvektor helyzet azonos fázisszöge miatt fázisfelületnek nevezik.

A harmonikus hullámok szinusz és koszinusz függvényekkel írják le, így a komplex számok trigonometrikus alakján keresztül a harmonikus hullámoknál bevezetett hangtéri változók komplex számokkal írhatóak le:

$$\begin{aligned} \mathbf{p}'(x, t) &= \hat{p}(\cos(\omega t - kx + \varphi_0) + i \cdot \sin(\omega t - kx + \varphi_0)) = \hat{p} \cdot e^{i(\omega t - kx + \varphi_0)} = \\ &= \hat{p} \cdot e^{i\varphi_0} \cdot e^{i(\omega t - kx)} = \hat{\mathbf{p}} \cdot e^{i(\omega t - kx)} \end{aligned} \quad (4.28)$$

ahol

$\mathbf{p}'(x, t)$ [Pa]: a komplex hangnyomás

$\hat{\mathbf{p}}$ [Pa]: a komplex amplitúdó

i: a képzetes egység

Természetesen a valós fizikai tartalommal a komplex hangnyomásnak csak a valós része bír. Úgy is fogalmazhatunk, hogy a hangnyomás a komplex számsíkra helyezett forgóvektor valós tengelyre leképzett vetületének felel meg.

$$p'(x, t) = \mathbf{Re}(\mathbf{p}'(x, t)) \quad (4.29)$$

A komplex írásmód bevezetését a komplex algebra nyújtotta előnyök kihasználásának lehetősége indokolja. Tényleges fizikai tartalommal bíró hullámtéri jellemzőnek azonban mindig csak valós szám felel meg.

5. Akusztika, akusztikus hullámok kialakulása [4, 1]

Az akusztika vagy más néven hangtan valamely folytonos közegben kialakuló, terjedő és elhaló mechanikai zavarások leírásával foglalkozik. Attól függően, hogy a keltett zavarás levegőben, vagy más gázban, vízben vagy ettől eltérő folyadékban illetve szilárd halmazállapotú, de rugalmas közegben hat, léghang-akusztikáról, hidro-akusztikáról illetve testhang-akusztikáról beszélünk. Az akusztika a természettudományok közül a fizikán belül első sorban a mechanika és termodinamika fejezetekkel áll szorosabb kapcsolatban. Tágabb értelemben, a hang hatását, létrehozó rendszerét és módosulásának körülményeit is figyelembe véve számos más szakterülettel áll kapcsolatban. Így például a szabadtéri hangterjedésen keresztül a légkör fizikával, a hangkeltő és érzékelő berendezések révén az elektroakusztika az elktrotechnikával, a víz alatti hangterjedés révén a hidroakusztika az oceanográfiával, a zaj keletkezésével és a zajvédelemmel kapcsolatban főként a gépészettel, az előadótermek és részben a zajvédelem kapcsán az épület- és teremakusztika az építészettel, illetve a hangszerek révén a zenei akusztika a zenével. Ebbe a kapcsolat rendszerbe helyezhető be a kommunikációban fontos szerepet játszó beszéd és hallás akusztikája, a hang illetve zaj élő szervezetre, kiemelten az emberre kifejtett hatását vizsgáló fiziológiai és pszichoakusztika, vagy az emberi szervek által lesugárzott zörejek elemzése és az ultrahang felhasználása, betegségek diagnosztizálásához, a bioakusztika.

Az alábbiakban néhány, az akusztikában fontos alapfogalmat vezetünk be, illetve csoportosítást végzünk el, amely segít elhelyezni az akusztikában előforduló jelenségeket a mechanika fejezetén belül: [4]

Homogén (azaz egynemű) kontinuum, vagyis a teret folytonosan kitöltő olyan közeg, amelyet akármilyen kicsiny részekre bonthatunk, mindig az eredeti közeghez hasonló anyagi tulajdonságokkal rendelkező elemet kapunk. Ez azt jelenti, hogy például nem vesszük figyelembe a folyadék molekuláris szerkezetét. Ez a közelítés az esetek többségében azért engedhető meg, mert bár a mozgások elemzése során sokszor a finom térbeli részletek is érdekesek lehetnek, azonban ezek mérete az esetek többségében még mindig jóval nagyobb, mint a folyadék molekuláris szerkezetének jellemző mérete.

A gázok és folyadékok összenyomhatóak, a szilárd de rugalmas testek pedig deformálhatóak. Ha ez a feltétel nem teljesül, úgy a közeg egy adott pontját érő zavarás bármely más pontban azonnal megfigyelhető, és így véges nagyságú zavarás terjedési sebesség hiányában hullámtér eleve nem alakulhat ki.

Az áramló közeg mikroszkópikus részének a közeg mozgás szempontjából még fontos legkisebb alkotóelemet, a molekulát tekintjük. Az igen nagy számú mikroszkópikus egységet magába foglaló nagyobb közeg részt makroszkópikus elemnek nevezzük. A geometriai felbontás tekintetében kétféle megközelítés szerint a közeg illetve a közeg részecskék mozgását vizsgálva az alábbi csoportosítást végezhetjük el:

Diffúzió: a diffúzió a makroszkópikusan nyugalomban lévő közeg molekuláinak rendezetlen, Bown-féle mozgásának következtében kialakuló helyzetváltoztatása. A molekulák diffúziós mozgásuk során kellő idő elteltével eredeti helyzetükhöz képest jelentősen eltávolodhatnak, egymáshoz képesti helyzetük pedig teljesen megváltozik. Jelentős diffúziós mozgással csak gázok esetében kell számolnunk.

Szilárd test mozgása térben, gáz és folyadék halmazállapotú közeg áramlása (konvekció): a hétköznapi értelemben vett mozgás, vagyis a közeget alkotó molekulák rendezett,

makroszkópikus mozgása. Az ilyen mozgás során a molekulák eredeti helyzetükhöz képest jelentősen eltávolodhatnak, evvel szemben szűk környezetüket tekintve egymáshoz képesti helyzetüket általában csak kis mértékben változtatják.

Akusztikai hullám: a közeg illetve az őt alkotó molekulák rendezett mozgási állapotában bekövetkezett zavarás továbbterjedése. A hullámterjedés során a közeget alkotó molekulák végeznek ugyan összerendezett makroszkópikus mozgást, de nyugalmi helyzetüktől, legalábbis a hullámterjedés geometriai méreteihez képest, soha nem távolodnak el jelentősen. Ennek megfelelően rendszerint egymáshoz képesti helyzetüket is csak kis mértékben változtatják meg.

Természetesen a különböző mozgás formák egyidejűleg is felléphetnek ugyanabban a közegben, sőt valóságos közeg mozgásoknál az esetek többségében mindhárom egyszerre is megtalálható.

Rezgés: általánosságban rezgésnek nevezünk minden olyan fizikai jelenséget, amelynél a rendszert leíró jellemzők egy egyensúlyi érték körüli ingadozást mutatnak. Rezgés olyan rendszerben alakul ki, amelynek van tehetetlensége, és az egyensúlyi állapotából történő kitérésre mindig az eredeti állapotának visszaállítására törekszik. Hétköznapi értelemben rezgés alatt általában mechanikai rezgéseket értünk. Ebben az esetben ha a visszatérítő erő arányos a rezgést végző tömeg kitérésével harmonikus rezgés alakul ki. A harmonikus rezgés jellemzőit szinusz függvény írja le.

Hullám: A hullám egy zavarási állapot továbbterjedés. Alapvetően akusztikai (hang) és elektromágneses hullámokat különböztetünk meg. A harmonikus rezgés által létrehozott zavarás továbbterjedése esetén harmonikus hullám alakul ki.

5.1. Az akusztikai hullámok csoportosítása (a zavarás közegben létrehozott deformációja alapján) [4]

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 kompressziós hullám:

A longitudinális vagy hosszanti kompressziós hullámokban a közeg részecskék mindig a hullámterjedés irányával párhuzamosan mozognak el. Az azonos zavarási állapotokat elszenvedő, nyugalmi helyzetükben egymással párhuzamos egymástól egyenletes távolságban elhelyezkedő síkokban helyet foglaló közeg részecskék a zavarás hatására továbbra is egymással párhuzamos síkokban helyezkednek el, de a síkok egymástól mért távolsága folyamatosan nő vagy csökken. Longitudinális hullámok gázokban, folyadékokban és szilárd rugalmas testekben egyaránt kialakulhatnak.

2. Transzverzális vagy nyírási hullám:

A transzverzális vagy nyírási hullámokban a közeg részecskék mindig a hullámterjedés irányára merőlegesen mozognak el. A nyugalmi helyzetükben egymással párhuzamos, egymástól egyenletes távolságban elhelyezkedő síkok a zavarás hatására továbbra is egymástól azonos távolságban, párhuzamosan de a hullámterjedésre merőleges irány mentén

elcsúszva helyezkednek el. Transzverzális hullámok csak szilárd rugalmas testekben alakulhatnak ki, hiszen gázokban és folyadékokban az egymással párhuzamos közeg rétegek nyíró elmozdulásával szemben nem ébred rugalmas visszatérítő erő.

3. Hajlítási hullám:

A hajlítási hullámokban a közeg részecskék döntően a hullámterjedés irányával párhuzamosan mozognak el. Azonban a longitudinális hullámokkal szemben, az azonos zavarási állapotokat elszenvedő, eredően egymással párhuzamos, egyenlő távolságban elhelyezkedő síkok a zavarás hatására a síkok párhuzamossága megszűnik és a hajlítás alakváltozási állapotának megfelelő elrendeződést vesznek fel. Hajlító hullámok szilárd rugalmas anyagból készült rudakban és véges vastagságú lapokban alakulhatnak ki.

4. Torziós hullám:

A torziós hullámokban a közeg részecskék mindig a hullámterjedés irányára merőlegesen mozognak el. Az azonos zavarási állapotokat elszenvedő, nyugalmi helyzetükben egymástól egyenletes távolságban elhelyezkedő, párhuzamos közegek síkok a zavarás hatására továbbra is egymással párhuzamosan, egyenlő távolságban helyezkednek el, de a síkok a hullámterjedéssel párhuzamos irány mentén egymáshoz képest elfordultak. Torziós hullámok szilárd rugalmas anyagból készült rudakban alakulhatnak ki.

5. Rayleigh-féle hullám:

A Rayleigh-féle hullámokban a közeg részecskék mozgásuk során ellipszis alakú pályát futnak be. A Rayleigh hullámokra jellemző, hogy a vívőközeg felületétől az anyag belseje felé távolodva a zavarás hatására bekövetkező mozgás amplitúdója egyre csökken. Rayleigh-féle hullámok szilárd rugalmas testek felületén alakulnak ki. (A Rayleigh hullámok hasonlítanak, de nem egyeznek meg a folyadékok felszíni hullámaival.)

A hullámmozgás nem egyéb tehát, mint az anyagi közegben történő vezetési impulzus- és energiaáramlás. A vezetési áramlás azt jelenti, hogy a részecskéről részecskére történik az elemi állapotváltozás terjedése, ami tehát a részecskék rezgésének a rugalmas közegben, hullámmozgás formájában történő terjedését jelenti. A hullám-mozgás a terjedési sebességgel párhuzamosan, vagy arra merőlegesen rezgő részecskék alapján longitudinális illetve transzverzális lehet. Szilárd közegben mindkét terjedési mód lehetséges, míg folyadékok és gázok esetén csak longitudinális hullámmozgás lehetséges, mivel a folyadékok és gázok nyírási feszültséget nem tudnak átvinni.

5.2. Hangterjedés levegőben és folyadékokban [6]

Hanghullámok esetén tehát az eredetileg nyugalomban levő levegőrészecskék a szomszédos nagyobb nyomású levegőrészecskéktől impulzust vesznek át, összenyomódva ezt az impulzust tovább adják a kisebb nyomású szomszédoknak, vagyis a levegőben hullám terjed. Természetesen a kinetikus gázelmélet szerint tudjuk, hogy a levegőmolekulák minden irányban mozognak, így a levegő tulajdonságainak leírásánál nem az egyes molekulákból kell kiindulni, hanem a levegő térfogatelemének a viselkedését írjuk le. Hang csak akkor keletkezik, ha az a távolság, ahol a sűrűség és a nyomás észrevehetően megváltozik sokkal nagyobb, mint a molekulák átlagos szabad úthossza. Elmozduláson e térfogatelem tömegközpontjának elmozdulását értjük, és a nyomás és sűrűség is e térfogatelemre vonatkozik.

Folyadékok és gázok nem képesek semmiféle nyíróerőket felvenni. Ezért ezekben csak longitudinális hullámok tudnak nagyobb távolságra terjedni, tranzverzális hullámok csak a közvetlenül tranzverzális rezgést végző gerjesztő felületek határán alakulhatnak ki, és attól távolodva exponenciális gyorsasággal elhalnak.

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

$$\kappa = \frac{1}{K} = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad (5.1)$$

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

$$\frac{\Delta L}{L} = -\frac{\Delta V}{V} = \kappa dp = \kappa \frac{F}{A} = \frac{1}{K} \frac{F}{A} \quad (5.2)$$

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

$$c_f = \sqrt{\frac{K}{\rho}} = \sqrt{\frac{1}{\kappa \rho}} \quad (5.3)$$

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.

A gázokban történő akusztikus hullámterjedést példaként a 4.3. Akusztikus hullámok leírása [1; 3] fejezetünkben részletezzük.

5.3. Hangterjedés szilárd anyagokban [6]

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):

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{1}{E} \sigma \quad (5.4)$$

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:

$$dp = -E \frac{\Delta l}{l} = E \frac{\partial \rho}{\rho} \quad (5.5)$$

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

$$c_l = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (5.6)$$

Szilárd testekben nemcsak longitudinális, hanem tranzverzális hullámok is kialakulhatnak, mert a szilárd testek tangenciális nyíróerőket is képesek felvenni. Nyírásakor 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 nyírásán alapulnak):

$$c_t = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (5.7)$$

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

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (5.8)$$

ahol:

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

$$\varepsilon_y = \varepsilon_z = -\mu \varepsilon_x \quad (5.9)$$

6. Akusztikai jellemzők és tipikus értékei, analógiák [1]

Amikor hangkeltésről vagy hangrögzítésről beszélünk, három különböző világ között teremtünk kapcsolatot. Az első világ értelemszerűen az akusztikai, hiszen pld. fülünk akusztikai hullámokat fog fel, alakít át. A kiindulás az elektronikus világ, egy lejátszó berendezés, illetve a hangszóró kapcsaira jutó feszültség. Ez az elektromos rezgés mechanikai mozgássá alakul, amikor a membrán mozgásba jön (a feszültséggel arányosan), majd megmozgatja a levegő részecskéit, amelyek a dobhártyán alakulnak újból mechanikai rezgéssé. Így a három világ között műszaki, matematikai kapcsolatot tudunk létesíteni, majd egy közös platformra transzformálva az egyenleteket egyszerű számításokat végezhetünk. Ez a közös világ bármelyik lehet a három közül, azonban mérnökként az elektronikai rész a legkellemesebb számunkra.

Az elektromos (szinuszos, váltakozó áramú) jelenségek leírására használt mennyiségek és ezek relációi jól alkalmazhatók az akusztikai mérések kiértékelése során. Ebben a fejezetben ezeket a mennyiségeket kívánjuk címszavakban összefoglalni, majd megadjuk egyesek tipikus értékeit is.

A gerjesztés kiindulási alapja a rezgőmozgás alapegyenlete:

$$y(t) = A_0 + A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) \quad (6.1)$$

Jellemző neve	Elektromos megfelelő	Akusztikus megfelelő
Intenzív mennyiség	Elektromos térerősség, potenciál $U(t)$ [V]	Nyomáskülönbség $p(t)$ [Pa]
Extenzív mennyiség	Áramerősség $I(t)$ [A]	Részecskesebesség $v'(t)$
Időtől független mennyiség (amplitúdó, A_0)	DC szint U [V], I [A]	Időtől független mennyiségek: Pl. atmoszférikus nyomás: p_0 [Pa]
Körfrekvencia, frekvencia ω [rad/sec], f [Hz] = $\omega/2\pi$	$U(t)$ frekvenciája, amely $I(t)$ -t hozza létre valamekkora impedancián	$p(t)$ frekvenciája, amely $v'(t)$ -t hozza létre valamekkora impedancián
Terjedési sebesség	Elektronok vándorlásának sebessége. Állandónak tekintjük, nem számolunk vele	A hang, extenzív megváltozásának terjedési sebessége: $c = \lambda \cdot f$, anyagfüggő: $c = \sqrt{\kappa \frac{p}{\rho}}$ hőmérsékletfüggő: $c(T) = 332 \sqrt{1 + \frac{T}{273}} = 332 \cdot 0,6\Delta T$
Impedancia	Váltakozóáramú ellenállás, szinuszos hálózatban a komplex feszültség és áram hányadosa, amely maga is komplex szám	Impedancia formák és megadásaik

Komplex mennyiségek alkalmazása	Váltóáramú hálózatoknál, időben váltakozó jellemzők megadása (U, I, Z)	Komplex nyomás Komplex impedancia
---------------------------------	--	--------------------------------------

Az előző táblázatban bemutatott, kiemelendő mennyiségek jellemző értékei:

1. Alkalmazott frekvenciák



6.1. ábra: 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.

2. Terjedési sebességek

A hang terjedési sebessége anyagfüggő. Levegő esetében függ a közeg hőmérsékletétől, sűrűségétől és nyomásától (a táblázatban megadott képlet alapján). Ha a nyomás helyére behelyettesítjük a 10^5 Pa-t és a sűrűség helyére az $1,3 \text{ kg/m}^3$ adatokat, $c = 328 \text{ m/s}$ érték jön ki a hangsebességre. Ettől azonban lényegesen is eltérhet a valóságos érték, különösen a hőmérséklet függvényében. Szobahőmérsékleten (20°C) a 344 m/s átlagos értékkel számolhatunk, ha más nincs megadva. Ettől eltérő hőmérsékleten a táblázatban szereplő képlettel módosíthatunk. Levegőben, a hangsebesség a 1°C hőmérséklet emelkedés esetén $0,6 \text{ m/s}$ -al megnő. Ez $+20^\circ\text{C}$ esetén már 12 m/s , ezért néha találkozhatunk a $328+12=340 \text{ m/s}$ átlagsebességgel is, holott a pontosabb érték 332 m/s -t ad meg a nulla fokos levegőre, és így jön ki a pontosabb 344 m/s .

A hang terjedési sebességét folyadékokban, illetve szilárd anyagokban a hasonlóképpen adható meg, mint a levegő esetében: [5]

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (6.2)$$

ahol

K a folyadék, vagy szilárd anyag rugalmassági modulusa

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

Anyag neve	Hőmérséklete [$^\circ\text{C}$]	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

6.1 táblázat: a hang terjedési sebessége, különböző anyagokban

6.1.1. 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:

$$Z = \frac{p}{c} \quad (6.3)$$

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]

$$Z_{\text{síkhullám}} = \rho \cdot c \quad (6.4)$$

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:

$$Z_{\text{síkhullám, levegő}} = \frac{p}{c} = \rho_0 \cdot c = 415 \frac{\text{Ns}}{\text{m}^3} \quad (6.5)$$

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 impedanciát természetesen értelmezhetjük elektronikus, akusztikus és mechanikus vonatkozásban. Az impedancia az ellenállás frekvenciafüggését tartalmazza, és közös számítási alapokat nyújt a valós (ellenállás) és a frekvenciafüggő (komplex) elemek kezeléséhez.

Periodikus jelek esetén a mechanikai impedancia:

$$Z = \frac{f}{c} \text{ [Ns/m]} \quad (6.6)$$

Ez általános esetben komplex, csak a mechanikai ellenállás esetén valós. Az analógia már érezhető az elektronikai elemekkel, az impedanciák viszont azonnal megmutatják, mely elemekről van szó: [1]

$$Z_r = r, Z_m = j\omega m, Z_c = \frac{1}{j\omega c}, v = j\omega x, a = j\omega v \quad (6.7)$$

Látható, hogy a tömeg elektronikai megfelelője az induktivitás, amit egyébként is elektronikai tehetetlenségnek tekintünk, a tömeg pedig a tehetetlenség mértéke. Egy elektromos hálózatban működő tekercs, úgy viselkedik, mint egy tömeg a mechanikai hálózatban. Hasonlóan, a kapacitás rugalmasságnak, a rugónak felel meg a mechanikai hálózatban. Tekintettel a kapacitás ismert $1/j\omega C$ impedanciájára, választható a rugóengedékenység a rugóállandó helyett, hogy az impedanciák megegyezzenek.

Összefoglalva az elektromechanikai és az akusztika világában milyen impedanciákkal találkozhatunk:

Mechanikai impedancia: $Z = \frac{f}{c} \text{ [Ns/m]}$

Specifikus impedancia: $Z_{\text{spec}} = \frac{p}{c}$

Ahol a p nyomásra $f = p \cdot A$.

Akusztikus impedancia: $Z_a = \frac{p}{A \cdot v}$

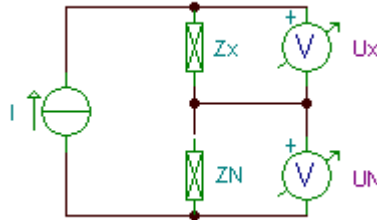
Ahol az Av -szorzatot térfogatsebességnek nevezzük.

Találkozhatunk még a sugárzási impedancia elnevezéssel, ami teljes értékű mechanikai impedancia, amely mozgó felülethez kapcsolódó légterhelésre vonatkozik. Tehát membránhoz kapcsolódó légterhelés, az a tömeg és veszteségi ellenállás, ami mechanikai impedancia nevezhető sugárzási impedanciának. A három impedancia a membrán A -felületén keresztül kapcsolódik egymáshoz: [1]

$$Z_m = Z_{\text{spec}} \cdot A = Z_a \cdot A^2 \quad (6.8)$$

7. Méréstechnikai megoldások

Az általunk korábban kifejlesztett Digital Signal Processor (DSP) alapú elektromos impedancia mérő eszközök esetében a következő mérési elvet alkalmaztuk:



7.1. ábra: Impedancia mérés elvének magyarázatához

Az ábrán láthatjuk, hogy ha az ismeretlen impedanciával (Z_x) sorba kapcsolunk egy etalon (ismert értékű) impedanciát (Z_N) és ezt a két áramköri elemet áramgenerátorral kapcsoljuk össze, akkor meghatározhatjuk az ismeretlen impedancia értékét. Ugyanis az impedanciák egy egyszerű feszültségosztót alkotnak. Az ismeretlen, valamint az etalon impedancia által létrehozott feszültségesés a következőképpen számítható:

$$U_x = I \cdot Z_x \text{ és } U_N = I \cdot Z_N. \quad (7.1)$$

Ha a két egyenletet egymással elosztjuk a következőt kapjuk:

$$\frac{U_x}{U_N} = \frac{Z_x}{Z_N}. \quad (7.2)$$

Látható, hogy mivel áramgenerátoros meghajtásról beszélünk, az áramerősség kiesik a képletből. Így az ismeretlen impedancia értéke:

$$Z_x = \frac{U_x}{U_N} \cdot Z_N. \quad (7.3)$$

7.1. Hangszintmérés [1]

A hangszintmérés során a feladat, hogy szubjektív hangérzetet objektív mérőszámmal adhassunk meg. Alacsony és magas frekvenciákon az emberi fül érzéketlenebb, azaz kevésbé zavarható, mint közepes frekvenciákon. Ez az állítás egyre kevésbé igaz, ahogy a jelszintet növeljük. Amikor a hangnyomásszintet mérjük, négy alapvető üzemmódja közül kell választanunk:

1. lineáris (LIN): lineáris üzemmódban semmiféle frekvenciasúlyozást nem alkalmazunk, a műszer a mikrofon membránján fellépő nyomás (RMS) értékét méri, az eredményeket dB-ben kapjuk meg. Az angol szakirodalom az effektív értéket root mean square-nek nevezi és RMS-nek rövidíti. Egy jel effektív értéke közvetlen kapcsolatban áll annak energiataralmával:

$$A_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) dt} \quad (7.4)$$

ahol

$a(t)$ a hangjel időfüggvénye. A legegyszerűbb szinuszos esetben az effektív érték a csúcserték gyököttes része.

A további három üzemmód nemzetközileg szabványosított súlyozó görbéket használ. Ezek közelítik a hallás érzékenységét, és aszerint súlyozzák a frekvenciakomponenseket.

2. dB(A) súlyozás: a leggyakrabban használt dB(A) súlyozó görbe a kis frekvenciák felé közelítve egyre kisebb súllyal veszi figyelembe a mélyfrekvenciás komponenseket. Ez egyrészt helyes, hiszen ott érzéketlenebb a fül, és az ott lévő zavarok kevésbé zavaróak. Járulékos következmény, hogy az eredmények jobbak, mint lineáris esetben (amennyiben zajmérésről van szó), ezért gépállapotfelügyelethez, környezetvédelemhez előszeretettel alkalmazzák, mert ugyanazon körülmények között mérve alacsonyabb számértéket ad a lineárisnál. Kis hangnyomásszinteknél használható.
3. dB(B) súlyozás: hasonló célú és lefutású görbe, de közepes hangnyomásszinteknél használható.
4. dB(C) súlyozás: nagy hangnyomásszinteknél használandó, amikor már a nagyszintű azonos hangosságú görbéket kell közelíteni. Utóbbi kettőt tiszta hangú mérésekre tervezték, zajokra nem pontos az eredményük. Létezik egy ritkán használatos dB(D) skála is repülőgépmérésekhez. A Súlyozott méréseknél is dB a mértékegység, de zárójelben utána írjuk a görbe jelét is.

7.2. A logaritmus bevezetése, a szintes írásmód [4]

Definíció szerint minden teljesítményszerű, teljesítménnyel arányos vagy hatványkitevős alakban avval arányossá tehető fizikai mennyiség kifejezhető szintekben. Egy adott ξ mennyiség L szintben kifejezett értékét az alábbi módon határozzuk meg:

$$L_{\xi} = 10 \cdot \lg \frac{\xi}{\xi_0} \text{ [dB]} \quad (7.5)$$

ahol

L_{ξ} [dB] a ξ mennyiség szintben (angolul Level) kifejezett értéke,

ξ_0 [] a ξ mennyiséghez tartozó viszonyítási érték.

Akusztikában a vizsgált jellemzők széles átfogott tartománya miatt, illetve a hangérzéketünk logaritmikushoz közelebb álló jellege miatt széles körben használnak szinteket a hangnyomás, intenzitás és teljesítmény mennyiségek leírására. Az említett mennyiségek szintjeinek kifejezését a nemzetközileg elfogadott viszonyítási értékekkel (G. Bell tiszteletére bel-ben, ill. annak tized részével decibel-ben) az alábbiak szerint adjuk meg:

Hangnyomásszint:

$$L_p = 10 \lg \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \lg \frac{p}{p_0} \quad (7.6)$$

ahol

$$p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$$

Hangintenzitás szint:

$$L_I = 10 \lg \frac{I}{I_0} \quad (7.7)$$

ahol

$$I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$$

Hangteljesítményszint:

$$L_w = 10 \lg \frac{P}{P_0} \quad (7.8)$$

ahol

$$P_0 = 10^{-12} \text{ W}$$

7.3. Hangforrások [1]

A legegyszerűbb (pontosugárzó) hangforrást, mely harmonikus gömbhullámokat hoz létre, monopól sugárzónak nevezzük. A közeget homogénnek és izotrópnak feltételezzük. A valóságban ilyen ideális sugárzó nincs, de kezelhető így egy, ha a forrás mérete jóval kisebb, mint a hullámhossz. A monopól sugárzó intenzitása:

$$I = \frac{W}{4\pi \cdot r^2} \quad (7.9)$$

ahol

W a hangteljesítmény [W],

r a forrástól mért távolság [m].

Az intenzitás kifejezhető a már megismert összefüggéssel is:

$$I = \frac{P^2}{\rho \cdot c} \quad (7.10)$$

A hangnyomásszint 6 dB-lel csökken a távolság duplázódásával. A dobozba helyezett kisméretű hangszóró tekinthető ilyennek.

A dipól sugárzó két monopól sugárzóból áll 180 fokos ellenfázisban. A sugárzóhoz közel a hangnyomásszint $1/r^2$ -el csökken (közeltér), távolabb csak $1/r$ -el (távoltér). Az előző () képlet itt is érvényes. Alacsonyabb frekvenciákon a dipól nem olyan jó hatásfokú, mint a monopól. Dipólsugárzónak foghatjuk fel a szabadon lévő (dobozva vagy végtelen falba nem helyezett) hangszórót.

A sugárzókat a polár diagrammal, vagy más néven iránykarakterisztikával jellemezzük. Az iránykarakterisztika az érzékenység (átviteli függvény) térbeli eloszlása. Az azonos hangnyomásszintű pontok felülete, amelyeket a térképekhez hasonlóan szintvonalakkal ábrázolunk.

Az érzékenység egy pontban, egy frekvencián (általában 1 kHz-en) értelmezett, az átviteli függvény ennek frekvenciamenete. Általában a magas frekvenciák jobban irányítottak, mint a mélyek. A d irányítási tényező:

$$d = 10 \cdot \lg \frac{I}{I_{\text{ref}}} \quad (7.11)$$

ahol

I tetszőleges irányban megmért intenzitás, és $I_{\text{ref}} = \frac{W}{4\pi \cdot r^2}$.

A gömbsugárzónál (gömbhullámoknál) a levezetést mellőzve felírjuk a specifikus impedanciát:

$$Z_{\text{spec}} = \rho_0 c \cdot (1 + jkr) \quad (7.12)$$

A sugárzási impedancia ennek egyszerűen az A -szorososa, ahol A a membrán felülete:

$$Z_{\text{sug}} = Z_{\text{spec}} \cdot A = \left[\rho_0 c \left(\frac{jkr}{1 + jkr} \right) \right] = \frac{A \rho_0 c \cdot jkr}{1 + jkr} \quad (7.13)$$

Illetve

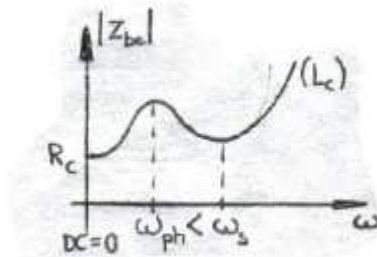
$$Z_{\text{sug}} = Z_{\text{spec}} \cdot A = [\rho_0 c \cdot (1 + jkr)] \cdot A = (A \rho_0 c) \times (A \rho_0 c jkr) = r_r \times j\omega m_r \quad (7.14)$$

Erről megállapíthatjuk, hogy a sugárzási impedancia párhuzamos alakú, repluszos, egy valósvesztés ellenállásból és egy tömegből áll.

7.3.1. Dinamikus hangszóró

A dinamikus hangszóró a léghang-akusztikában a leggyakrabban használt hangsugárzó. Önmagában keskenysávú, ezért dobozba építjük. Állandó légrésű mágneskör található benne, melyben sugárirányú (kifelé mutató) erőtér alakul ki. A lengőcséve, a tekercs ebben tengelyirányú mozgást végez, így a hozzá kapcsolt membrán is. A membrán általában papír, műanyag anyagú. Az állandó mágnes alul és felül lágyvas lemezek tartják, melyek

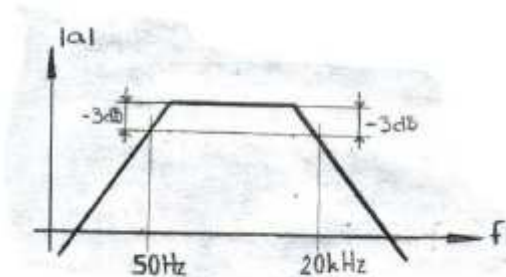
mágnesesen vezetők. Ehhez van rögzítve a vas kosár, amelyhez a membránt rugalmasan rögzítjük: felül a rim, alul a pille biztosítja a rugalmas elmozdulást. Ez általában hajlított papír vagy gumi. A lengőcséve kivezetéseire kerül az elektromos gerjesztés, a kivezetések általában a membránra vannak ragasztva.



7.2. ábra: Hangszóró elektromos impedancia menete [1]

A bemeneti impedancia helygörbéje az abszolútérték frekvenciamenete. DC esetén a hangszóró csak a cséveellenállását mutatja, innen indul a görbe. A két előjelváltási pontot párhuzamos és soros rezonanciának nevezzük, előbbi a kisebb frekvenciájú érték, de a nagyobb csúcs, utóbbi nagyobb frekvenciához tartozó bevágás. A frekvencia növelésével, ismét dominál a lengőcséve induktivitása és ettől „elszáll” a görbe.

Az átviteli tartomány a fenti megismert átviteli függvény -3 dB-es pontjai között értelmezett. A dinamikus hangszóró alapjában felüláteresztő jellegű, és a Bode-közelítésben csak az alsó ω_0 törésponti frekvenciát adjuk meg. Azonban az átvitel a felső töréspont után esik, így gyakorlatilag sáváteresztővé válik: az átviteli függvény sávközépvitelétől számított -3 dB-es pontok között értelmezzük az átvitelt.



7.3. ábra: Hangszóró átviteli függvénye [1]

Másik fontos paraméter a névleges impedancia. Definíció szerint ez az 1 kHz-en mutatott impedancia abszolút értékének 4 , 6 , 8 , 16Ω -ra kerekített értéke. Ha tehát egy hangszóró „négy ohmos”, akkor az a fenti impedancia görbe alapján 1 kHz-nél 3 - 5Ω körüli értéket mutat. Jegyezzük meg, hogy az impedancia az erősítővel összhangban kell legyen. A mai modern erősítőkre elég széles tartományban 4 - 16Ω közötti hangsugárzókat lehet kapcsolni, és garantált mindkét eszköz biztonsága. A mai hangszórók általában 4 vagy 6 ohmosak. Ha az erősítő 8 ohmon ad le 100 Wattot, akkor ha oda négy ohmos hangsugárzót kapcsolunk, annak kapcsaira ennél lényegesen nagyobb teljesítmény is juthat.

A hangszórók, mivel korlátozott tartományban sugároznak, nem alkalmasak a teljes 20 Hz-20 kHz-es tartomány lesugárzására. A többutas hangsugárzók ezért rendszerint két vagy három hangszórót tartalmaznak, esetleg reflexnyílással. A hangsávot általában egyszerű, passzív elemekből álló analóg váltósűrővel választják szét, és vezetik rá az egyes „utakra”.

A kónusz-sugárzók általában kis teljesítménnyel dolgoznak. A magas frekvenciákhoz dóm-sugárzókat (kalotta) használnak, jellemzően fémből készült, merev felfüggesztésű, szemmel nem látható módon rezgő membránt alkalmaznak.

Általában a magas frekvenciák sugárzása nem probléma, könnyedén tudunk 50-100 kHz magasságban sugárzó eszközt gyártani, de a mélyeknél a helyzet sokkal nehezebb. Tipikus alsó határfrekvenciájuk 80-120 Hz környékén van, az 50 Hz-et is lesugározni képesek már a drágább kategóriába tartoznak, 30 Hz alatt pedig szinte lehetetlen hangot kicsikarni egy hangszóróból.

7.4. Detektorok

A léghang akusztikában mikrofonok a hangszórók ellentétei. Feladatuk, hogy a levegő rezgéseit a membránjukkal felfogják és azzal arányos kimenő feszültséget hozzanak létre kapcsaikon. A bemenő mennyiség tehát a membránon fellépő hangnyomás (időfüggvénye), a kimenő pedig az üresjárás (terheletlen) feszültség.

Az átviteli függvény itt az érzékenység frekvenciamenten. Az iránykarakterisztika az átviteli függvény térbeli leírása, eloszlása.

$$é(f) = \frac{u_{\text{kiüresjárás}}}{p} \quad (7.15)$$

Az érzékenységet a főtengelyben mérjük, szokásos mértékegységei a [mV/μbar] vagy a [mV/Pa].

Az érzékenységnek két fajtáját szokták megadni:

1. nyomás: a membránon mért nyomás
2. szabadtéri: hangnyomás értéke a membrán helyén, de a mikrofon nélkül.

Utóbbinak az értelme, hogy a frekvencia növekedésével, csökken a hullámhossz, a membrán átmérője összemérhetővé válik a hullámhosszal. Így maga a membrán zavarja a teret, nagyobb lesz rajta a nyomás, ha ott van. Márpedig ez meghamisítja az eredményeket, mert nagyobb értéket fog mutatni a valóságosnál (kompenzálásra van szükség).

Az iránykarakterisztikák legfontosabbika az alábbi három:

1. gömbi (irányfüggetlen)

A nyomásmikrofonok tipikus karakterisztikája, legfontosabb jellemzője, hogy az átviteli függvény, az érzékenység minden irányból egyforma. Ezért is nevezzük irányfüggetlennek, mert mindegy, miként helyezük el a térben. Ez mérési céloknál lehet fontos.

2. nyolcas (gradiens)

Tipikusan a szalagmikrofonok rendelkeznek ilyen karakterisztikával. Két gömb együttese, középen a membránnal. Ezeknek a legjobb „vétel” iránya a membránra merőlegesen, annak szimmetriatengelyében van, mindkét oldalról. Párbeszédmikrofonnak is nevezik, mert kiválóan alkalmas egymással szemben ülő beszélők számára. Ekkor a hasznos jelet maximális érzékenységgel veszi, ugyanakkor a membránra a másik két irányból érkező hangokra nulla az érzékenysége. Ebből az irányból érkező hangokat zajnak tételezzük fel, tehát természetes jel/zaj viszony javító konstrukció.

3. kardioid (vese)

A leggyakoribb konstrukció. Nevét alakjáról kapta, az emberi veséhez hasonlít. Előre-irányban maximális érzékenyséffű, de oldalról is csökkentett, hátulról pedig szabályozható. Attól függően, mekkora a hátsó irányból az érzékenység beszélünk különböző alcsoportokról (szuperkardioid, hiperkardioid). Egyes mikrofonoknál a gömbi és a kardioid kapcsolható. A mikrofonok általános jellemzője, hogy két részből állnak: egy „nyélből”, ami az erősítőt, elektronikát tartalmazza; illetve a kapszulából, ami a membránt és a karakterisztikát szabja meg. Ezek könnyen cserélhetők, így elég egy nyelet vásárolni, azon pillanatok alatt lehet kapszulát cserélni.

Felhasználásnak előnye, hogy irányfüggő, azaz bizonyos irányokból „halkabb”. Így alkalmas sztereó felvételekhez, amikor két darabot elhelyezve, azok iránykarakterisztikája szabja meg a vételt, különböző irányokból eltérően. A szokásos gömb-kapszulát ha hátulról megfúrjuk és nyílást hozunk létre, akkor kardioid mikrofont hozhatunk létre. Egyenlete: $e = e_0(1 + \cos(\theta))$. Két vese karakterisztikából ún. multi-pattern eszközt lehet létrehozni: ekkor külön használva őket kardioid eszközt, együtt a kettőt háttal befordítva pedig közel gömbkarakterisztikát kapunk.

Az elektrodinamikus mikrofon általános hangfelvételi célra készül, mérésekre nem alkalmas. Sáváteresztő jellegű és önmagában elég keskenysávú is. A sáv szélesség és az érzékenység szorzata konstans.

Karakterisztikája általában gömb, érzékenysége 0,1-0,2 mV/Pa körüli, névleges impedancia párszáz ohmos, induktív jellegű. Az állandó mágneskör légrésébe helyezett lengőtekercs kivezetéseinek jelenik meg az indukált feszültség. A tekercs a membránnal együtt mozog, a hangnyomásnak megfelelően.

A kondenzátor mikrofonok a legjobb minőségűek. Nem csak hangfelvételi célra, de mérésekre is alkalmasak. A jobb minőségű mérőmikrofonok általában fél collosak, áruk az előerősítővel a fél millió forintot is elérheti. A membrán méretétől erősen függ az érzékenység és a sáv szélesség. Minél nagyobb a membrán, annál jobb az érzékenység, annál kisebb tartományban működik az eszköz. Mérésekhez a negyed collos és az egy collos is előfordul. A kondenzátor mikrofonok tápfeszültséget igényelnek. A mérőerősítők (mikrofonerősítők) feladata, hogy a beledugott mikrofonokat tápfeszültséggel lássa el, valamint a kilépő feszültséget erősítse, ezek ugyanis elég alacsony értékek. A tápfeszültség pár volttól, 48 V-ig (DC) terjed a manapság használatos eszközök esetében. A mérőmikrofonok egy része kisebb feszültséggel is elbír, így telepről is működtethető. A kondenzátor mikrofonban kapacitív átalakító van, a kondenzátor mozgó fegyverzete a membrán maga. A membrán tehát fémfóliából készül (nikkel, titán), ez a negatív elektróda. A pozitív elektróda rögzített, a nyél részre. Közöttük a nyugalmi légrés 10 mikron körüli, ennek nagysága változik a membrán mozgásakor. Így ez egy „negatív rugót” alkotva jelképezi azt az állapotot, amikor nyugalomban a membrán nem ér össze az ellenelektrodával (ami vonzza). A fémház kellően

szigetelt, földelt, az ellenelektrodával azonos anyagból készül a hőágulás miatt. A házat a légköri nyomás kiegyenlítésének céljából vékonyan megfúrják. A belső ellenállás a kondenzátor miatt nagy, gigaohm nagyságrendű. Érzékenysége egy nagyságrenddel nagyobb a dinamikusnál, 1-2 mV/Pa. Néveleges impedanciája pF nagyságú, kapacitív jellegű.

Átviteli függvénye, az érzékenység menete aluláteresztő jellegű. A fejhallgatók mellett a kondenzátor mikrofonok nem szenvednek a kisfrekvenciás problémától ideális esetben.

Találkozhatunk ún. gomblyuk-mikrofonokkal is. Ezek csiptetősek, kisméretűek és általában nem túl jó minőségűek, leginkább beszédhez alkalmasak. Bennük piezó átalakító van (elektrét mikrofon), tehát kapacitív impedancia és átalakítás tartozik hozzá. Gömbkarakterisztika mellett az érzékenységük 0,1-2 mV/Pa körüli.

A másik, korábban elterjedt dinamikus fajta a szalagmikrofon, melynek érzékenysége 0,1-0,2 mV/Pa körüli. Néveleges impedanciája kicsi, tizedohm nagyságrendű, így impedancia-illesztésre (200 ohm) szükség van, ehhez transzformátort kapcsolnak. Átviteli függvénye feluláteresztő jellegű.

8. Komplex elektromos impedancia mérőrendszerek alkalmazhatósága akusztikus mérésekhez

A Komplex elektromos impedancia mérőeszközeinek tulajdonságait figyelembe véve áttekintjük, hogy az az akusztikus mérések szempontjából milyen alkalmazási lehetőségeket nyújt:

1. Alkalmazott mérési elv: áram- vagy feszültséggenerátoros gerjesztés, feszültségmérés
2. Detektálás lock-in erősítővel: alkalmazása csak a szinuszos jelű gerjesztést és ennek hatására beállt állandósul állapot mérését teszi lehetővé (impulzus mérés végrehajtása nem lehetséges ezzel a módszerrel)
3. Mérőeszközök felépítése: max. 8 csatornás modulokból: akusztikus mérésekhez, különösképpen a tomográfiás mérésekhez ezen csatornaszámot növelni kell, kiindulásként a 8 csatornás mérések javasoltak
4. Mérési tartomány:
 - a. 1 Ohm-100 MOhm:
 - b. 0-90 fok: a 90 fokos fázis az előzetes szakirodalmi kutatások alapján szűk tartománynak tekinthető, erről a kísérleti mérések alkalmával bizonyosodhatunk meg.
5. Rendszer pontosság (mérési paraméterektől függően)
 - a. minimum: 1 ppm (impedancia abszolút érték)
 - b. +/-0,01 fok
6. Mérő frekvencia tartomány: 0,01 Hz – 90 kHz: a méréstartomány magában foglalja az emberi hallás frekvencia tartományát (20 Hz – 20 kHz), de ezen kívül az infrahang, illetve az ultrahang tartományt is, ami teremakusztikai mérések során is hordozhat információt, de az infrahang tartomány a geofizikában, az ultrahang tartomány pedig az egyén tomográfiás méréseknél jelenthet információforrást
7. Kimenő feszültség (feszültséggenerátor): $10\text{mV}_{\text{p-p}}-10\text{V}_{\text{p-p}}$: 4 Ω -os hangszórót feltételezve (teremakusztikai mérésekhez) a maximális kimenő feszültséggel számolva a maximális teljesítmény $10^2/4 = 25 \text{ W}$
8. Lehetőség van egy időben két csatornán mért jel FFT spektrumának mérésére: a vizsgált rendszer nemlineáris torzításának, illetve az interferencia során létrejövő komponensek vizsgálatára alkalmazható

9. Összefoglalás

A Karotázs Kft. által kifejlesztett Komplex elektromos impedancia mérőeszközök által alkalmazott mérési elv (lock-in elv) alkalmas akusztikus mérések végrehajtására. Az eszköz jelenleg elektromos mérésekhez alkalmazható. Az elektromos impedancia mérésének egyik lehetséges elvét tanulmányunkban bemutattuk.

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, majd áttekintettük az akusztikai mérés technikában alkalmazott hullámkeltőket és a detektorokat.

Ezen alapinformációk alapján összeállíthatóak a kezdeti kísérleti és mérési tervek, melyekkel elkezdhető a gyakorlati munka. A mérés alapját az impedancia mérés analógiája képezi: feszültség és áram méréssel meghatározható a vizsgált rendszer impedanciája (7. Mérés technikai megoldások). Ezt kihasználva és a 6.3 képlet alapján, mi szerint:

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

az akusztikus, specifikus impedancia nyomás és részecskesebesség mérésével előállítható.

A léghang akusztikában ez kivitelezhető nyomásmikrofon és sebességmikrofon használatával, egy pontban mérve mindkettővel. 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 rezgékeltől kiválasztását, illetve az ehhez tartozó illesztő interfészek tervezését és kivitelezését. A általunk kifejlesztett komplex elektromos impedancia mérő eszközök akusztikai alkalmazásához a generátor kimenteket a rezgékeltőkhöz, míg a bementi csatornákat az érzékelőkhöz illeszteni kell. A generátor kimenetekhez teljesítményillesztés, míg a bementi csatornákhöz impedancia illesztés szükséges.

Szakirodalomjegyzék

- [1] Dr. Wersényi György: Műszaki akusztika, egyetemi jegyzet, 2010.
- [2] Angol nyelvű (a geofizikai, karotázs könyv)
- [3] <http://oktatas.ch.bme.hu/oktatas/konyvek/fizkem/kerevf/FK2/TR1.pdf>
- [4] <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>
- [5] http://www.ett.bme.hu/upload/1293143305631.7_9e6c14ab5c180d9d728ca695ef3aa441/MHA_05_SAM.pdf
- [6] <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>
- [7] Simonyi Károly: Elméleti Villamosságtan, Tankönyvkiadó, 1991