

Zaj és rezgésvédelem

OMKT felsőfokú munkavédelmi szakirányú képzés
Rezgéstani és hangtani jegyzet

Szerkesztette:

Márkus Miklós
zaj- és rezgésvédelmi szakértő

Lektorálta:

Márkus Péter
zaj- és rezgésvédelmi szakértő

Budapest
2010. február

Tartalomjegyzék

Tartalomjegyzék.....	2
1. Rezgéstani alapfogalmak.....	3
2. Hangtani alapfogalmak	5
3. Szintek.....	7
4. Műveletek szintekkel	9
5. Frekvencia analízis	10
6. Az emberi hallás.....	11
7. Méréstechnikai alapfogalmak	13

1. Regzéstani alapfogalmak

Rezgés (def.): Egy pont akkor végez rezgőmozgást, ha egy adott koordinátájának $x(t)$ időfüggvénye felülről és alulról korlátos, és dx/dt sebessége legalább kétszer előjelet vált a vizsgált időintervallumban.

Magyarázat: A mechanikai rezgés időben lejátszódó jelenség. Egyensúlyi helyzetben lévő mechanikai rendszerbe (*tömeg-rugó rendszerbe*) külső erőhatás többletenergiát visz be, ennek következtében a rendszer az egyensúlyi helyzetből kibillen, a tömeg az egyensúlyi helyzet körül váltakozó irányú mozgást végez, vagyis *rezeg*. A bevitt energia (a csak elméletileg létező) **csillapítatlan szabad rezgés** esetén nem vész el (mozgási energia alakul át helyzeti energiává, és vissza), **csillapított szabad rezgés** esetén fokozatosan elvész (pl. súrlódás révén hővé alakul).

Szabad rezgés és kényszerrezgés (def.): *szabad rezgés* a kezdeti kitérés megszűnése után kialakult rezgőmozgás, míg *kényszerrezgés* az állandósult ismétlődő energia-bevitellel létrehozott rezgőmozgás. (A hangjelenségek egy jelentős része kényszerrezgés, ilyen a beszéd is.)

Egyszerű harmonikus (szinuszos) egydimenziós (egy szabadságfokú) periodikus csillapítatlan rezgés esetén a kitérés időfüggvénye az alábbi képlettel határozható meg:

$$x(t) = A \cdot \sin(\omega t + \varphi) \text{ [m]}$$

ahol:

A – kitérés amplitúdója (m)

t – idő (s)

ω – körfrekvencia (rad/s) = $2\pi f$

f – frekvencia, a másodpercenkénti rezgések (periódusok) száma (Hz)

φ – a fázisszög kezdeti értéke (rad)

Magyarázat: rezgés lehet **egyszerű** (pl. a zenei A hang) és **összetett**, lehet **harmonikus** (az időfüggvény alakja szinusz-görbe, vagyis *szinuszos*) és **véletlen** (*sztochasztikus*), lehet időben és térben **periodikus** (az időfüggvény alakja szabályosan ismétlődő) és **átmeneti** (*tranziens*, mint egy robbanás, vagy lökéshullám), csillapított és csillapítatlan (ld. fent). A merev test a térben **hat szabadságfok** szerint végezhet mozgást, tehát nem csak elmozdulhat, de *rotációs mozgást* is végezhet. Egy dimenziós a rezgés amikor a rendszer állapota bármely időpontban leírható egyetlen $x(t)$ mozgáskoordinátával az idő függvényében (eltekinthetünk a térbeli derékszögű koordinátarendszer szerinti három irányú rezgésösszetevő közül kettőtől és a három rotációs rezgéstől is).

Rezonancia (def.): a gerjesztett rezgés során fellépő olyan állapot, amelyben a gerjesztés frekvenciájában (f_g) történő bármilyen mértékű változás a gerjesztett rendszer válaszában csökkenését eredményezi, vagyis itt *a rezgés-amplitúdónak maximuma van*. A **rezonanciafrekvencia** (sajátfrekvencia, f_0) a gerjesztett rendszer olyan jellemzője, melynél a rezonancia fellép.

$$f_0 = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{m \cdot C}} \text{ [Hz]}$$

ahol:

f_0 – a rendszer sajátfrekvenciája (Hz)

ω – körfrekvencia (rad/s)

m – rezgő tömeg (kg)

k – rugómerevség (N/m)

C – rugóengedékenység (m/N)

Rezgéssebesség (def.): a sebesség időfüggvénye a kitérés időfüggvényének deriváltja:

$$v(t) = \frac{dx}{dt} = A \cdot \omega \cdot \cos(\omega t) \text{ [m/s]}$$

ahol:

A – kitérés amplitúdója (m)

t – idő (s)

ω – körfrekvencia (rad/s)

Rezgésgyorsulás (def.): a gyorsulás időfüggvénye a sebesség időfüggvényének deriváltja, vagyis a kitérés időfüggvényének második deriváltja:

$$a(t) = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} = -A \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega t) \text{ [m/s}^2\text{]}$$

ahol:

A – kitérés amplitúdója (m)

t – idő (s)

ω – körfrekvencia (rad/s)

2. Hangtani alapfogalmak

Mechanikai hullám (def.): időben és térben (rugalmas közegben) lejátszódó jelenség, melynek során a közeg részecskéinek rezgése a részecskék közötti mechanikai kölcsönhatás révén tovább terjed a szomszédos részecskékre is. Rezgésről lévén szó tömegáramlás nem jön létre a közegben, azonban *a mechanikai energia terjed.*

Hang (def.): valamilyen *rugalmas közegben nyomáshullám* (mechanikai hullám) formájában terjedő rezgés. A rugalmas közeg részecskéit az egyensúlyi állapotukból kimozdító energiaforrás a **hangforrás**. A hangforrások által gerjesztett hangok terjedhetnek levegőben **léghang** formájában, szilárd közegben **testhang** formájában és folyékony közegben **folyadékhang** formájában.

Megjegyzés: a háromdimenziós térben lejátszódó hangterjedés bonyolult fizikai jelenség, mely matematikailag összetett differenciálegyenletekkel, illetve hullámegyenlettel írható le. Ez alól alapvetően kivételt képez a levegőben terjedő síkhullám, melynek leírására alkalmas az egy dimenziós rezgés egyenlete. Az egy dimenziós (*Jean Le Rond d'Alembert*) hullámegyenlet formája a következő:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}$$

Zaj (def.): *szubjektív* megítélés szerint nem kívánt/kellemetlen/zavaró/káros hatású hang. A zaj *pszichés hatása*, zavaró jellege nem kapcsolható egyértelműen a zaj fizikai paramétereire, rendkívül nagy szerepe van az *egyéni érzékenységnek*, az érintett személy zajforráshoz fűződő kapcsolatának. Sok esetben a zaj megítélésében meghatározó szerepe van a zaj *információtartalmának* is.

Hangnyomás (def.): a hangforrás folyamatosan mechanikai energiát ad át a körülötte lévő közegnek, így *a közegben nyomásingadozást okoz* (tehát hangot kelt), ennek következtében a $p_{\text{lég}}$ légköri nyomáshoz egy kismértékű nyomásingadozás adódik, melyet **hangnyomásnak** nevezünk. A hangnyomás jele: p , mértékegysége: Pascal [Pa], ami 1 Newton [N] erőhatást jelent 1 m² felületen. A normál légköri nyomás: $p_{\text{lég}} = 10^5$ Pa, míg az éppen meghallható hangnyomás: $p_0 = 2 \times 10^{-5}$ Pa. A 100 Pa nagyságrendű hangnyomás már fájdalomérzetet kelthet a fülben.

A hangnyomás effektív értéke (def.): a hang fizikai jellemzésére leggyakrabban használt érték, mely a hangnyomás $p(t)$ időfüggvényének négyzetes középértéke (*RMS értéke*):

$$p_{\text{eff}} = \sqrt{p^2(t)} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt} \quad [\text{Pa}]$$

Szinuszosan változó hangnyomás esetén fennáll a következő azonosság:

$$\int_0^T \hat{p}^2(t) dt = T \frac{\hat{p}^2}{2} \text{ mely alapján } p_{eff} = \frac{\hat{p}}{\sqrt{2}} = 0,707 \hat{p} \text{ [Pa]}$$

Hullámhossz (def.): a hullám azonos fázisú pontjainak távolsága, térbeli terjedés esetén az azonos hangnyomású közegrészecskéinek távolsága, a *térbeli periodicitás* jellemzője. Jele: λ , mértékegysége: méter [m].

Hangsebesség (def.): a hullámterjedés sebessége a közegben, mely alapvetően a *közeg sűrűségének a függvénye*. Nem keverendő össze a közeg részecskéinek pillanatnyi rezgésebbességével (v)! Jele: c , mértékegysége: [m/s]. A közeg sűrűsége függ a hőmérséklettől, így a hangsebesség a hőmérséklet függvénye is egyben, levegő esetén pedig a páratartalom kis mértékben befolyásolja a hangsebességet. A hangsebesség standard állapotú levegőben $c_{levegő} = c_0 = 340 \text{ m/s}$, acélban $c_{acél} = 5100 \text{ m/s}$, míg betonban $c_{beton} = 3300 \text{ m/s}$.

A hullámhossz és a frekvencia között a hangsebesség teremt kapcsolatot:

$$\lambda = \frac{c}{f} \text{ [m]}$$

Fajlagos akusztikai impedancia (def.): terjedő síkhullámban a p hangnyomás és a v részecskesebesség hányadosa az adott közeg hullámmellenállása (*akusztikai keménysége*), mely térben és időben állandó. Jele: Z_s , mértékegysége: [Ns/m³].

$$Z_s = \frac{p(t)}{v(t)} = \rho_0 \cdot c_0 \text{ [Ns/m}^3\text{]}$$

ahol:

Z_s – fajlagos akusztikai impedancia (Ns/m³)

$p(t)$ – a hangnyomás pillanatnyi értéke (Pa)

$v(t)$ – a részecskesebesség pillanatnyi értéke (m/s)

ρ_0 – a standard állapotú levegő sűrűsége (kg/m³) $\rho_0 \approx 1,21 \text{ kg/m}^3$

c_0 – a hangsebesség standard állapotú levegőben (m/s) $c_0 \approx 340 \text{ m/s}$

Megjegyzés: A fenti összefüggés a síkhullámú hangtér mellett a gömbhullámú hangtérben is jó közelítéssel érvényes, azonban a sugárzó köztérben nem, mivel ott a részecskesebesség nagyobb (jelen van az ún. *meddő energia*).

Hangintenzitás (def.): a hanghullám akusztikai energiát szállít terjedésének irányában, az egységnyi idő alatt egységnyi felületen merőlegesen átáramló hangenergia a hangintenzitás (vektormennyiség). Jele: I , mértékegysége: $[W/m^2]$.

$$I = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \cdot \int_0^T p \cdot v \cdot dt = \overline{p(t) \cdot v(t)} = \frac{p_{eff}^2}{\rho_0 \cdot c_0} [W/m^2] \text{ vagyis } I \sim p_{eff}^2$$

Hangteljesítmény (def.): a hangforrás energiát, vagyis teljesítményt ad át a környező közegnek. A kibocsátott teljesítményt, miután hangot kelt, hangteljesítménynek nevezzük. Valamely hangforrás hangteljesítménye a hangforrás által az időegység alatt minden irányban kisugárzott hangenergia. Jele: P , mértékegysége: Watt $[W]$. A hangteljesítmény *forrásjellemző (zajemisszió)*, mely nem távolságfüggő.

$$P = \oint_S I_n \cdot dS [W] \text{ vagyis } P = \frac{p_{eff}^2}{\rho_0 \cdot c_0} \cdot S$$

3. Szintek

Szint (def.): két mennyiség arányának *logaritmus* mértéke, amit széles körben használnak az akusztika, a fizika és az elektronika területén. Jele: L , alapvetően *dimenzió nélküli mennyiség*, azonban a *tíz*es *alapú logaritmussal* meghatározott szint mértékegysége: bel $[B]$, ennek tízszerese a **decibel** $[dB]$. A decibel nem önálló mértékegység, ezért használatakor tudatosítani kell, hogy milyen mennyiséget adunk meg decibelben, illetve mi az alapérték. A mennyiség típusát a szintérték indexében adjuk meg (pl. L_W), azonban az akusztikában hagyományosan a *hangnyomásszint* jele külön jelölés nélküli (L).

$$L = 10 \cdot \lg \frac{\text{paraméter}}{\text{alapérték}} = 10 \cdot \lg \frac{x}{x_0} [dB]$$

Megjegyzés: a szint fogalmát a **Bell Telephone Laboratory** mérnökei hozták létre, a szabványos telefonkábel 1 mérföld (1,6 km) hosszú darabja okozta hangerősség-csökkenés mértékének meghatározásához. Eredetileg *transmission unit* vagy *TU* (*átviteli egység*, illetve *ÁE*) volt a neve, de 1924-ben, a laboratórium alapítójának, **Alexander Graham Bell** tiszteletére átnevezték a ma ismert névre.

Magyarázat: fülünk rendkívül nagy hangerőtartományt tud feldolgozni, nyomásingadozás tekintetében 10^6 az arány a legkisebb hallható hang és a már fájdalmat okozó erősségű hang között, míg hangintenzitás tekintetében ez az arány már 10^{12} szerez. A hangerő érzékelése tekintetében fülünk közelítőleg logaritmus jellegű, vagyis durván azt mondhatjuk, hogy a hangintenzitás azonos értékkel történő *többszörözése* azonos hangosságérzet *növekedést* okoz.

A számítások során tehát nem közvetlenül az alapvető fizikai mennyiségeket (hangnyomás, hangteljesítmény) használjuk, hanem azoknak egy alkalmasan megválasztott alapmennyiségre vonatkozó *mérőszámát*, ami megmutatja, hogy a vizsgált mennyiség hányszorosa a választott alapértéknek.

A fenti okok miatt a hangjelenségek nagyságát a hangnyomásból származtatott **hangnyomásszinttel** jellemezzük. A hangnyomásszint jele: L , mértékegysége: decibel [dB]. Definícióját az alábbi képlet fejezi ki:

$$L = 10 \cdot \lg \frac{\overline{p^2(t)}}{p_0^2} = 20 \cdot \lg \frac{p_{eff}}{p_0} \text{ [dB]}$$

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

Ugyancsak hasonló gyakorlati okok miatt a hangforrások hangteljesítményét is logaritmikus egységben, **hangteljesítményszintben** adjuk meg az alábbi összefüggés alapján. A hangteljesítményszint jele: L_W , mértékegysége: decibel [dB].

$$L_W = 10 \cdot \lg \frac{P}{P_0} \text{ [dB]}$$

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

A fentiekhez hasonlóan a hangforrások hangintenzitását is ki lehet fejezni logaritmikus egységben, **hangintenzitás-szintben** adjuk meg az alábbi összefüggés alapján. A hangintenzitás-szint jele: L_I , mértékegysége: decibel [dB].

$$L_I = 10 \cdot \lg \frac{I}{I_0} \text{ [dB]}$$

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

4. Műveletek szintekkel

Mérőszám visszaszámítása:

$$L = 10 \cdot \lg 10^{0,1L} \text{ [dB]}$$

Szintek összeadása:

$$L_{\Sigma} = 10 \cdot \lg(10^{0,1L_1} + 10^{0,1L_2} + \dots + 10^{0,1L_n}) = 10 \cdot \lg \sum_{i=1}^n 10^{0,1L_i} \text{ [dB]}$$

Az összegzést alábbiak figyelembe vételével kell elvégezni:

- minden szint azonos jellegű és súlyozású (teljesítményszint nyomásszinttel nem összegezhető)
- együttesen üzemelő zajforrások (a vizsgált időszakban folyamatosan, egy időben működnek)
- összegzendő két szint különbsége kisebb, mint 10 dB (egyébként nem domináns a zajforrás)

Könnyen belátható, hogy amennyiben azonos típusú, vagy azonos zajkibocsátású zajforrásokról van szó, vagyis $L_1 = L_2 \dots L_i$, ez esetben **szintek többszöröséről** van szó, mely n darabszámú azonos hangnyomásszintű zajforrás esetén az alábbi képlettel számítható:

$$L_{\Sigma} = 10 \cdot \lg(n \cdot 10^{0,1L_1}) = L_1 + 10 \cdot \lg n \text{ [dB]}$$

Megjegyzés: a fenti műveletek hangteljesítményszintek és hangnyomásszintek esetén azonosak, tehát elvégezhetők más jellegű szintértékekkel is, azonban csak azonos jellegű és súlyozású szintekkel végezhetők! A fentiek alapján az is könnyen belátható, hogy amennyiben két azonos hangteljesítményszintű zajforrást üzemeltetünk (pl. két egyforma ventilátort), az eredő szint **3 dB** értékkel növekszik, míg ha a zajforrások számát megfelezzük, az eredő szint 3 decibellel csökken, illetve ha a hangenergia a tízszeresére nő, az 10 decibeles növekedést jelent.

Szintek átlaga:

$$\bar{L}_{\Sigma} = 10 \cdot \lg \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{0,1L_i} \text{ [dB]}$$

5. Frekvencia analízis

Hangszínkép (def.): az összetett hang (nem szinuszos *tisztahang*) részhangjainak jellemzésére használatos eljárás, mely a részhangok energiájának frekvencia szerinti megadása, gyakori megnevezése a *spektrum*. Megkülönböztetünk **vonalas** (diszkrét részhangokat tartalmazó) és **folytonos** (folytonosan eloszló részhangokat tartalmazó) hangszínképet.

Fourier-transzformáció (def.): az idő függvényében adott jelet harmonikus összetevőire bontja, így a frekvencia függvényébe képezi le (csak szinuszos jeleket tartalmazó összetett hullámforma esetén *Fourier-sorfejtés*). Elviekben bármilyen (nem periodikus sztochasztikus) jel közelíthető diszkrét szinuszos jelek valamilyen variációjával. A *diszkrét Fourier-transzformáció* nem periodikus függvények (impulzusok, véletlenszerű függvények) analizálására is alkalmas. A számítógépek (így a mai zajszintmérő műszerek is) a *gyors Fourier-transzformáció (FFT)* ablakfüggvényes változatával végzik ezeket a számításokat. A jel közelítése és leképezése annál pontosabb minél több Fourier-sorral számol az FFT (ma-napság elterjedtek a több mint 2000 soros FFT feldolgozó modulok is). A mintavételezés frekvenciáját úgy kell választani, hogy legalább kétszer akkora legyen, mint a maximális feldolgozandó frekvencia (*Shannon-tétel*), így egy 20.000 Hz-es jel feldolgozásához 44.100 Hz-es mintavételi frekvencia szükséges (ez ismerős lehet a számítógépes jelfeldolgozásból, a hangdigitalizálásból is).

Magyarázat: a gyakorlatban előforduló hangok és rezgések általában nem írhatók le tiszta szinuszos időfüggvénnyel, ezért a megoldást az jelenti, hogy az időfüggvény elemzése helyett azt adjuk meg, hogy a hang vagy rezgésjelenség energiatartalma milyen frekvenciatartományban jelenik meg, illetve a teljes érzékelhető frekvenciaskála sávokra való felosztása esetén mennyi energia van az egyes frekvenciasávokban.

Oktávsávós és tercsávós spektrum: egy *oktáv* a frekvenciaköz (hangköz) akkor, ha az f_f felső frekvencia az f_a alsófrekvencia kétszerese, vagyis $f_f = 2 \cdot f_a$. Az oktávsáv f_{ko} *középfrekvenciája* a mértani középértékként értelmezett frekvencia, vagyis $f_{ko} = 1,41 \cdot f_a$. Amennyiben az alsó frekvencia $f_a = 22,4$ Hz, az első oktávsáv középfrekvenciája $f_{ko} = 31,5$ Hz. A tercsáv (harmad-oktávsáv) f_{kt} középfrekvenciája az oktávsáv egyharmadának megfelelő sávköz, vagyis $f_{kt} = 2^{1/3} \cdot f_a$. Amennyiben az alsó frekvencia $f_a = 22,4$ Hz, az első tercsáv középfrekvenciája $f_{kt} = 25$ Hz, a második tercsáv középfrekvenciája $f_{kt} = 31,5$ Hz, végül a harmadik tercsáv középfrekvenciája $f_{kt} = 40$ Hz.

Megjegyzés: Az alsó tercsáv középfrekvenciák ismeretében meghatározható az összes tercsáv középfrekvencia a teljes hallástartomány spektrumán egy oktáv frekvenciaközökkel számolva (minden alsó frekvenciának a kétszeresét véve), vagyis: $2:25 = 50$ Hz, $2:31,5 = 63$ Hz és $2:40 = 80$ Hz, majd ezek alkalmazásával $2:50 = 100$ Hz, $2:63 = 125$ Hz és $2:80 = 160$ Hz, stb.

6. Az emberi hallás

Az emberi fül egy rendkívül érzékeny, bonyolult szerkezetű biológiai műszer, melynek paramétereit a műszaki életben megszokott precizitással meghatározni illetve leírni nem lehetséges. Az emberi hallás igen széles dinamikartománnyal rendelkezik, vagyis a fület érő legnagyobb (már fájdalmat okozó) és legkisebb (még éppen meghallható) hangenergiák aránya billiószoros:

- **fájdalomküszöb:** a már fájdalmat okozó hangenergia
 - $P_{max} \approx 10^0 \text{ W}$
 - $L_{Wmax} \approx 120 \text{ dB}$
 - $p_{max} \approx 2 \cdot 10^1 \text{ Pa}$
 - $L_{max} \approx 120 \text{ dB}$
- **hallásküszöb:** a még éppen meghallható hangenergia
 - $P_0 = W$
 - $L_{W0} = 0 \text{ dB}$
 - $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$
 - $L_0 = 0 \text{ dB}$

Ugyanakkor a füllel érzékelhető legmélyebb és legmagasabb hang frekvenciájának aránya csaknem ezerszeres lehet, hiszen fülünk közelítőleg a 20 Hz – 16 kHz frekvenciájú hangokat képes érzékelni. A 20 Hz alatti (füllel már nem érzékelhető) hangokat **infrahangoknak**, a 16(20) kHz fölötti hangokat pedig **ultrahangoknak** nevezzük. Mindezek mellett fülünk képes felismerni a hangok forrását, sőt a két füllel történő hallás révén képes a hangforrás irányát is meghatározni.

Tovább bonyolítja képet, hogy az élettani körülmények például az életkor, a pillanatnyi egészségi állapot, esetleg korábbi betegségek, vagy a fül korábbi valamilyen károsodásai a normálistól jelentősen eltérő hallási paramétereket eredményezhetnek.

Az emberi hallás jellegzetessége, hogy azonos intenzitású, de különböző frekvenciájú hangok különböző hangerősség érzetet keltenek.

Phon (def.): az ember által érzékelt *szubjektív hangosság*, vagyis a hangérzet erősségének mérőszáma. Jele: L_N , mértékegysége: phon [phon]. Az 1000 Hz frekvenciájú tisztahang hangosságának mérőszáma (1 phon) azonos a hangérzetet okozó hangforrás hangnyomásszintjével (1 dB). Más frekvenciájú és erősségű hangok phon-hangosság szintjét kísérleti úton határozták meg.

Megjegyzés: A phon kifejezést elsőként **H. Barkhausen** használta, aki 1926-ban fejlesztett mérőműszert a hangosság mérése céljából. A berendezés egy 800 Hz alaphangfrekvenciájú „zümmögőből” (Stecksummer), egy potenciométerrel szabályozható teljesítményerősítőből és egy fülhallgatóból állt. A hangok szubjektív hangosság szintjét úgy határozták meg, hogy a vizsgált személy az egyik füléhez szorította a fülhallgatót, a másik fülével pedig a vizsgált hangot érzékelt, a hangerősséget addig állították, amíg a vizsgált személy jelezte, hogy a két hangot ugyanolyan hangosságúnak észleli. A potenciométerről leolvasott fizikai hangerősséghez tartozó érzetet phon-hangosságnak nevezték.

Fletcher-Munson egyenlő hangosság-szint görbéi: Harvey Fletcher és W. A. Munson 1933-ban kísérletekkel igazolták, hogy a hangosság-érzet bármilyen hangnyomásszintű hang esetén függ a frekvenciától. A vizsgálat során váltakozó tiszta hangokat alkalmaztak és vizsgálták, hogy azonos hangosság-érzethez különböző frekvencián milyen intenzitás értékek tartoznak. A vizsgálat eredménye egy görbesereglet, melyen minden egyes görbéhez tartozik egy meghatározott hangerősség-érzet *phon*-ban kifejezve.

Egy-egy görbéhez egy-egy *phon* hangosság értéket rendelünk, amelynek mértéke azonos az 1 kHz-en rögzített decibel értékkel. Látható, hogy a *hallásküszöb* frekvenciafüggő, tehát mély hangok esetében fizikailag nagyobb intenzitás tartozik az éppen meghallható hanghoz, mint magasabb hangok esetében. Az egyes embereknél a hallásküszöb görbéjének tényleges menete a hallás épségének jellemzője. Halláscsökkenés esetén a hallásküszöb görbe a nagyobb intenzitások tartományába tolódik el.

Megjegyzés: Fletcher és Munson felismerését követően a kutatók és műszergyártók olyan mérőműszer kialakítására törekedtek, amely figyelembe veszi a hangosság-érzet frekvenciafüggő tulajdonságait is és nem támaszkodik az emberek esetenként ténylegesen eltérő szubjektív ítéletére. A **Német Akusztikai Társaság** először 1940-ben adta ki egy ilyen műszer kialakításának irányelveit. Ennek megvalósításához három, a hallás frekvenciafüggő tulajdonságait utánzó *sávszűrő* (fülszűrő) beiktatására volt szükség. E szűrők frekvenciafüggő csillapítási görbéi a *phon*-görbék tükörképei (inverzei). A *DIN 5045:1940 irányelv* praktikus okok miatt csökkentette háromra a fülszűrők számát oly módon, hogy a hallásterületet három részre osztotta és átlagolta e területek csillapítási görbéit. Fletcher és Munson egyenlő hangosság-szint-görbéit **Robinson** és **Dadson** 1957-ben pontosította, az **ISO** pedig 1961-ben szabványosította (jelenleg az *ISO 226:2003 szabvány* rögzíti). Az *IEC 651:1979 szabvány* véglegesítette és a jelenleg is érvényben levő *IEC 61672:2003 szabvány* rögzíti a három *A-, B- és C-jelű fülszűrő* – a '60-as évek óta **súlyozó szűrő** – relatív csillapításának adatait.

Súlyozó szűrő (def.): a teljes vizsgált frekvenciatartományon alkalmazott sávszűrő, amelynek használatával mért hangnyomásszintek jó közelítéssel fejezik ki az érzékelt hangosság-szintet. Az A-jelű súlyozó szűrővel kis (kb. 40 phon), a B-jelű szűrővel közepes (kb. 80 phon), a C-jelű szűrővel pedig nagy (kb. 100 phon) hangosság-szinteket mérünk.

A-hangnyomásszint (def.): a zajmérő készülékbe iktatott *IEC 651:1979 szabvány* szerinti A-jelű súlyozó szűrővel (egy elektromos alkatrészekből felépített sávszűrővel, vagyis „hangszínszabályzóval”) mért hangnyomásszint. Jele: L_A , mértékegysége: decibel(A) [dB(A)].

Az A-jelű súlyozó szűrő utánozza a fülünknek azt a tulajdonságát, hogy a mély hangokra kevésbé érzékeny, mint a magas hangokra, vagyis a mély hangokat elnyomja. A fentieknek megfelelően az A-súlyozó szűrő a szabványos 40 phon egyenlő hangosságú görbe inverzét közelíti, vagyis megközelítőleg annak a tükörképe.

7. Méréstechnikai alapfogalmak

A zaj *időbeli lefutása* szerint lehet:

- folytonos
- periodikus
- szakaszos
- egyszeri

A zaj *időtartama* szerint lehet:

- impulzusos
 - egyedi hangenergia-csomagok (szünetek időtartama > 0,2 s)
 - kváziimpulzusos (szünetek időtartama < 0,2 s)
- tartós (< 60 s)
- hosszú idejű (> 60 s)

A zaj *szintje* szerint lehet:

- állandó
- ingadozó (fluktuáló)
- intermittáló (szaggatott)

Egyenértékű A-hangnyomásszint (def.): az időben változó zajok egyszámjegyű jellemzője, olyan mérőszám, amellyel jól jellemezhető a zaj emberre gyakorolt hatása, mivel négyzetes középértéke azonos a $T = t_2 - t_1$ időtartam alatt változó zaj négyzetes középértékével, vagyis *energetikailag egyenértékű* vele, az emberre gyakorolt hatása azonos. Más szóval a *zajimmisszió* $T = t_2 - t_1$ időtartam alatt mért *hosszúidejű átlagértéke*, melyet a T mérési időtartamon alkalmazott (futó) integrállal képezünk. Jele: L_{Aeq} , mértékegysége decibel(A) [dB(A)]. A fentiek okán *integráló zajszintmérő műszerrel* mérhető.

MSZ 18150-1:1998 szabvány 1. összefüggés, illetve MSZ 18150-2:1984 szabvány 2. összefüggés:

$$L_{Aeq} = 10 \cdot \lg \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \int_{t_1}^{t_2} \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right] = 10 \cdot \lg \left[\frac{1}{T} \cdot \int_{t_1}^{t_2} \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right] \text{ [dB(A)]}$$

ahol:

$p_A(t)$ – az A-szűrővel súlyozott hangnyomás időfüggvény (Pa)

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

$T = t_2 - t_1$ – a mérés időtartama (s)

Egyenértékű C-hangnyomásszint (def.): a fentiek alapján a $T = t_2 - t_1$ időtartam alatt változó, *C-jelű súlyozó szűrővel* mért hangnyomás négyzetes középértéke. Jele: L_{Ceq} , mértékegysége decibel(C) [dB(C)]. A fentiek okán *integráló zajszintmérő műszerrel* mérhető, általában az L_{Aeq} értékkel együtt, azonos időben (amennyiben a mérőrendszer ezt lehetővé teszi).

Szakaszosan állandó zaj esetén: a T_M megítélési, vagy τ értékelési időtartamot olyan t_i szakaszokra bontjuk, amelyekben a vizsgált zajforrás(ok) hangnyomásszintje gyakorlatilag állandó, majd ezek energetikai (logaritmikus) összegzését és idő szerint súlyozott átlagolását végezzük el az alábbi összefüggéssel:

$$L_{A(C)eqT_M} = 10 \cdot \lg \left[\frac{1}{T_M} \cdot \sum_{i=1}^n t_i \cdot 10^{0,1 \cdot L_{A(C)i}} \right] \text{ [dB]}$$

ahol:

$L_{A(C)eqT_M}$ – a T_M megítélési időre vonatkoztatott egyenértékű A(C)-hangnyomásszint (dB)

T_M – megítélési idő (s)

t_i – az állandó zajhatások időtartama (s)

$L_{A(C)i}$ – A(C)-hangnyomásszint az i -edik időtartamban (dB)

Munkahelyi zajexpozíció meghatározása (def.): a 66/2005. (XII. 22.) EüM rendelet (a munkavállalókat érő zajexpozícióra vonatkozó minimális egészségi és biztonsági követelményekről) alapján a *zajexpozíció idővel súlyozott átlaga egy nyolcórás munkanapra vonatkoztatva*. Jele: $L_{EX,8h}$, mértékegysége: decibel (dB).

A T_M megítélési idő: 8 óra a műszak, illetve a zajhatás időtartamától függetlenül. Amennyiben a T mérési idő megegyezik a T_M megítélési idővel, úgy $L_{Aeq} = L_{EX,8h}$.

Amennyiben a τ értékelési idő eltér a T_M megítélési időtől, úgy a következő összefüggéssel számítjuk a napi zajexpozíció mértékét:

$$L_{EX,8h} = 10 \cdot \lg \left[\frac{\tau}{T_M} \cdot 10^{0,1 \cdot L_{Aeq}} \right] \text{ [dB]}$$

ahol:

L_{Aeq} – a τ értékelési időre vonatkoztatott egyenértékű A-hangnyomásszint (dB)

τ – értékelési idő (s)

T_M – megítélési idő (s)

Megjegyzés: a munkavállalót érő zajexpozíció meghatározható **munkahétre** is 5 munkanappal, vagy heti 40 óra munkaidővel számolva.