$$I = \frac{p_{eff}^2}{\rho c}\left[\mathrm{W\,m^{-2}}\right], \tag{31}$$

ahol p_{eff} az effektív hangnyomás (a továbbiakban index nélküli p) Pa-ban; ρ a közeg sűrűsége kg m^{-3}-ben; c a terjedési sebesség a kérdéses közegben m s^{-1}-ban.

A (30) nevezőjében lévő kifejezés a fajlagos akusztikai ellenállás vagy akusztikai keménység

$$Z_c = \rho c\left[\mathrm{Pa\,s\,m^{-1}}\right]. \tag{32}$$

Az intenzitás felírható az

$$I = c\frac{p^2}{\rho c^2} = E c \tag{33}$$

alakban is, ahol E a hangtér energiasűrűsége W s m^{-3}-ben. Az energiasűrűség az egységnyi térfogatban lévő közepes energia. Elsősorban a teremakusztikában használatos jellemző.

Az akusztikai teljesítmény (hangteljesítmény) a tetszőleges felületen merőlegesen átáramlott energiamennyiség az időegység alatt

$$P = \int_A I\,dA\left[\mathrm{W}\right]. \tag{34}$$

1.222 Gömbhullámok

A (24) szerinti hullámegyenlet polár koordináta rendszerben

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2}(r\varphi) = c^2\frac{\partial^2}{\partial r^2}(r\Phi)). \tag{35}$$

Harmonikus gerjesztésnél általános megoldása komplex alakban

$$\Phi = \frac{A}{r}\exp\left[\mathrm{j}\omega\left(t - \frac{r}{c}\right)\right], \tag{36}$$

amelyből

$$p = \mathrm{j}\rho\omega\Phi, \tag{37}$$

és

$$u = \Phi\left(\frac{1}{r} + \mathrm{j}\frac{\omega}{c}\right). \tag{38}$$

A síkhullámokhoz képest az eltérés abban jelentkezik, hogy a hangnyomás és a részecskesebesség nincs fázisban, s a kettő között nem áll fenn a (30) szerinti egyszerű összefüggés. Kis frekvenciákon a fáziskésés közel 90°, nagy értékeknél pedig megközelíti a 0°-ot, azaz a forrástól elég nagy távolságra gyakorlatilag síkhullámállapot alakul ki (pl. 1 kHz-en már 0,1,5 m távolságban). Az előző pontban tárgyaltak tehát ennek figyelembevételével alkalmazhatók gömbhullámokra is.

1.23 Intenzitásszint és hangnyomásszint

A hangteljesítmény és a hangnyomás között a hangintenzitás teremt kapcsolatot, amely (34) szerint az egységnyi felületen át közvetített hangteljesítmény. Egyszerűbb alakban

$$I = \frac{P}{A}\left[\mathrm{W\,m^{-2}}\right]. \tag{39}$$

A teljesítményszinthez hasonlóan – kiindulva az (1) szerinti összefüggésből –, (39) felhasználásával képezhető az intenzitásszint is

$$L_I = 10\cdot\lg\frac{I}{I_0}\left[\mathrm{dB}\right], \tag{40}$$

ahol I_0 = 1 pW m^{-2}, ill. I a hangtér kérdéses pontjában az intenzitás W m^{-2}-ben.

Mivel az intenzitás és a teljesítmény az előzőek szerint a hangnyomás négyzetével arányos, s a szintképzésnél a teljesítménnyel arányos mennyiségek viszonyát kell képezni, ezért a hangnyomásszint

$$L_p = 10 \cdot \lg \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \cdot \lg \frac{p}{p_0} \, [\mathrm{dB}], \tag{41}$$

ahol p a hangtér kérdéses pontjában a hangnyomás Pa-ban; p_0 a vonatkoztatási alap, amely – kiindulva P_0 = 1 pW-ból – célszerűen az 1 kHz-es hallásküszöb, értéke $2 \cdot 10^{-5}$ Pa.

A teljesítmény-, az intenzitás- és a hangnyomásszint vonatkoztatási alapjainak megválasztásánál úgy jártak el, hogy a megfelelő szintek dB értékei bizonyos körülmények között könnyen kezelhető kapcsolatban legyenek egymással. Így levegőben normál állapotot megközelítő esetben síkhullámokra (gömbhullámokra bizonyos korrekcióval) az intenzitás- és a hangnyomásszint közel egyenlő. Eltérő körülmények (pl. magas hőmérséklet) esetén ez nem áll fenn!

Az említettel megegyező feltételek mellett a teljesítmény- és a hangnyomásszint közötti összefüggés

$$L_p = L_W - 10 \cdot \lg \frac{A}{A_0} \, [\mathrm{dB}], \tag{42}$$

ahol A m^2-ben az a felület, amelyen a hangteljesítmény áthalad; A_0 = 1 m^2.

1.24 Műveletek szintekkel

A gyakorlati számítások során gyakran előforduló feladat, hogy szintek összegzését kell elvégezni, legtöbbször azért, mert a hangteret több, egyidőben üzemelő hangforrás hozza létre. Szükség lehet erre mérési eredmények ellenőrzésénél is.

A műveletek elvégzése során arra kell ügyelni, hogy a dB mértékegységű szint logaritmikus viszonyt jelent. Ezért az egyes feladatoknál célszerű az (1) összefüggésre visszatérni, s abból kiindulva a logaritmikus mennyiségekkel történő számítások szabályait betartva meghatározni a keresett értéket.

Az egyszerűség kedvéért először határozzuk meg a tér azonos pontjában egyidejűleg üzemelő P_1, P_2,...P_i hangteljesítményű, eltérő frekvenciájú tisztahang források eredő teljesítményszintjét. Mivel ezek a teljesítmények közvetlenül összeadhatók, ezért (1) értelmében az eredő szint

$$L_{W\Sigma} = 10 \cdot \lg \frac{P_1 + P_2 + \ldots + P_i}{P_0} = 10 \cdot \lg \frac{\sum_{i=1}^{n} P_i}{P_0} \; [\mathrm{dB}].$$

Ha viszont az egyes források szintként adottak (L_{W1}, L_{W2},...L_{Wi}), akkor vissza kell térni a

$$P_i = P_0 \, 10^{0{,}1 \cdot L_{Wi}},$$

teljesítményre, amelyeket az előző öszefüggésbe visszahelyettesítve

$$L_{W\Sigma} = 10 \cdot \lg \sum_{i=1}^{n} 10^{0{,}1 \cdot L_{Wi}} \; [\mathrm{dB}] \tag{43}$$

adódik. Két azonos L_{W1} szintértékű forrás eredője ezek szerint

$$L_{W\Sigma} = 10 \cdot \lg\left(10^{0{,}1 \cdot L_{W1}} + 10^{0{,}1 \cdot L_{W1}}\right) = 10 \cdot \lg\left(2 \cdot 10^{0{,}1 \cdot L_{W1}}\right) \approx L_{W1} + 3 \, [\mathrm{dB}]$$

és nem 2 L_{W1}, azaz két azonos szintértékű, de eltérő frekvenciájú forrás eredője az összetevők értékénél 3 dB-lel nagyobb!

Legtöbbször hangnyomásszintek összeadását kell elvégezni. Az előzőek szerint eljárva, azaz az intenzitásokat összegezve, (43)-hoz alakilag hasonló összefüggést kapunk:

$$L_{p\Sigma} = 10\lg\sum_{i=1}^{n} 10^{0,1 \cdot L_{pi}} \ [\text{dB}]. \qquad (44)$$

(Tisztahang források összegzésénél a fázisszöget is figyelembe kell venni!)

1.2 példa

Egy hangteret négy zajforrás hoz létre. A hangtér egy tetszőleges pontjában ekkor 77 dB hangnyomásszint mérhető. Külön-külön ezek a források ugyanitt 62 – 65 – 68 dB hangnyomásszintet keltenek. Mekkora a negyedik jelentette terhelés?

Az eredő szint (44) szerint

$$L_{p\Sigma} = 10 \cdot \lg\sum_{i=1}^{n} 10^{0,1 \cdot L_{pi}} .$$

Ezt felhasználva a keresett összetevő

$$L_p = 10 \cdot \lg\left(10^{0,1 \cdot 77} - 10^{0,1 \cdot 62} - 10^{0,1 \cdot 65} - 10^{0,1 \cdot 68}\right) \approx 75,9 \approx 76 \text{ dB}.$$

1.3 példa

Valamely gépteremben három zajforrás van. Ezeket teljes terheléssel külön-külön működtetve a terem ugyanazon pontjában 82 – 79 – 86 dB hangnyomásszintet hoznak létre. Mekkora lesz együttes üzemeltetés esetén a kialakuló hangnyomásszint, ha a legerősebb csak félterheléssel (15 %-os teljesítménnyel) üzemel?

A legerősebb zajforrás okozta hangnyomásszint 86 dB, tehát ez módosul. Az új érték a teljesítményre visszavezethetően az akusztikai áttétel állandóságát feltételezve

$$L_p' = 10 \cdot \lg\left(\frac{p'}{p_0}\right)^2 = 10 \cdot \lg\left[0,15\left(\frac{p}{p_0}\right)^2\right] = 10\left[\lg 0,15 + \lg\left(\frac{p}{p_0}\right)^2\right] \approx$$

$$\approx 10\left[-0,82 + L_p\right] = -8,2 + 86 \approx 78 \text{ dB}.$$

Ezzel az eredő hangnyomásszint (44) szerint

$$L_{p\Sigma} = 10 \cdot \lg\sum_{i=1}^{n} 10^{0,1 \cdot L_{pi}} = 10 \cdot \lg\left(10^{0,1 \cdot 82} + 10^{0,1 \cdot 79} + 10^{0,1 \cdot 78}\right) \approx 84,8 \approx 85 \text{ dB}.$$

1.25 Hangterjedés szabad térben

1.251 Pontsugárzók

A legegyszerűbb sugárzó a pontszerű, minden irányban egyenletes teljesítményt leadó forrás. Ha a térben akadályoztatás nincs, úgy a hullámfrontok koncentrikus gömbfelületen helyezkednek el. Ekkor az intenzitás a forrástól r távolságban P forrásteljesítmény esetén (39) alapján

$$I = \frac{P}{4 r^2 \pi} = \frac{p^2}{\rho c},$$

amelyből a hangnyomásszint átalakítások után

$$L_p = L_W - 20 \cdot \lg\frac{r}{r_0} - 11 \,[\text{dB}]. \qquad (45)$$

(Az összefüggésben r_0 = 1 m.) A távolság megkétszerezése tehát 6 dB csökkenést okoz ($20 \cdot \lg 2 \approx 6$).

1.4 példa

2,5 mW hangteljesítményű zajforrástól 5 m távolságban mekkora az intenzitás, az intenzitásszint, a hangnyomásszint, továbbá a hangnyomás effektív és csúcsértéke gömbsugárzó feltételezéssel? Mekkora a forrás abszolút teljesítményszintje?

Az intenzitás

$$I = \frac{P}{A} = \frac{P}{4r^2\pi} = \frac{2{,}5 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{W}}{4 \cdot (5\mathrm{m})^2 \cdot \pi} \approx 7{,}96 \cdot 10^{-6}\,\mathrm{Wm}^{-2}.$$

Az intenzitásszint

$$I_\mathrm{I} = 10 \cdot \lg \frac{I}{I_0} = 10 \cdot \lg \frac{7{,}96 \cdot 10^{-6}\,\mathrm{Wm}^{-2}}{10^{-12}\,\mathrm{Wm}^{-2}} \approx 69{,}01 \approx 69\mathrm{dB}.$$

A hangnyomásszint megegyezik az intenzitásszinttel, azaz

$$L_\mathrm{p} = L_\mathrm{I} = 69\,\mathrm{dB}.$$

A hangnyomás effektív értéke (41) alapján

$$p = p_0 \cdot 10^{L_\mathrm{p}/20} = 2 \cdot 10^{-5}\mathrm{Pa} \cdot 10^{69/20} \approx 0{,}564\ \mathrm{Pa},$$

ill. a hangnyomás csúcsértéke

$$\hat{p} = p \cdot \sqrt{2} = 0{,}564 \cdot \sqrt{2}\mathrm{Pa} \approx 0{,}798\mathrm{Pa}.$$

Az abszolút teljesítményszint

$$L_\mathrm{W} = 10 \cdot \lg \frac{P}{P_0} = 10 \cdot \lg \frac{2{,}5 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{W}}{10^{-12}\,\mathrm{W}} \approx 94\,\mathrm{dB}.$$

1.5 példa

Egy hangtérben a forrástól számított r_1 = 8 m távolságban az intenzitásszint 82 dB. Mekkora lesz a hangnyomásszint r_2 = 24 m távolságban?

A intenzitás a forrástól 8 m távolságban

$$I = I_0 \cdot 10^{0{,}1 \cdot L_\mathrm{I}} = 10^{-12}\,\mathrm{W\,m}^{-2} \cdot 10^{0{,}1 \cdot 82} = 10^{-3{,}8}\,\mathrm{W\,m}^{-2}.$$

Mivel az intenzitás a távolság négyzetével fordítva arányos, ezért

$$\frac{I(r_1)}{I(r_2)} = \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2,$$

amelyből

$$I(r_2) = I(r_1) \cdot \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 = 10^{-3{,}8}\,\mathrm{W\,m}^{-2}\left(\frac{8\,\mathrm{m}}{24\,\mathrm{m}}\right)^2 \approx 1{,}761 \cdot 10^{-5}\,\mathrm{W\,m}^{-2}.$$

A keresett hangnyomásszint

$$L_\mathrm{p} = L_\mathrm{I}$$

felhasználásával

$$L_\mathrm{p} = 10 \cdot \lg \frac{I}{I_0} = 10 \cdot \lg \frac{1{,}761 \cdot 10^{-5}\,\mathrm{W\,m}^{-2}}{10^{-12}\,\mathrm{W\,m}^{-2}} \approx 72{,}46 \approx 72\ \mathrm{dB}$$

vagy más úton

$$L_\mathrm{p}(r_2) = L_\mathrm{p}(r_1) - 10 \cdot \lg \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2 = 82 - 10 \cdot \lg \left(\frac{24\,\mathrm{m}}{8\,\mathrm{m}}\right)^2 \approx 72{,}46 \approx 72\ \mathrm{dB}.$$