

Műszaki akusztika és zajcsökkentés (önálló felkészülést segítő tananyag)

Összeállította: Dr. Koscsó Gábor c. egyetemi docens (BME Áramlástan Tanszék)

10. előadás

Tartalom:

- 10. Hangforrások (előadásvázlat)
- 10.1. Egyszerű hangforrás modellek (előadás vázlat)
 - 10.1.1. Pontszerű monopólus hangforrás (előadás vázlat)
 - 10.1.2. Vonalszerű hangforrás (előadás vázlat)
- 10.2. Gyakorló feladatok

10. Hangforrások

A gépészmérnöki zajvédelem egyik alapvető feladata hangforrások környezetében kialakuló zajterhelés meghatározása, szükség esetén a zajterhelés csökkentése. A zajterhelés csökkentésének egyik hatékony módja a zajforrás által kibocsátott hangteljesítmény csökkentése. A zajterhelés számításához, a kibocsátott hangteljesítmény csökkentéséhez a hangforrások, illetve a hangkeltés módjának ismerte fontos. Ez az előadás a hangforrásokra vonatkozó, a gépészmérnöki zajvédelem szempontjából fontos néhány alapvető ismeretet foglal össze. A téma bevezetéséhez csoportosítsuk a hangforrásokat a hangkeltés fizikai mechanizmusa, a geometriai kiterjedtség és a matematikai modelljük szerint.

Hangforrások a hangkeltés mechanizmusa szerint:

- Szilárd test rezgése által lesugárzott hang. (pl.: rezgő húr, vagy a hangszóró membránja által lesugárzott hang)
- Áramlás eredetű hang. (pl.: fűtőülő táviróvezeték, szabadsugár zaja)
- Termikus eredetű hang. (pl.: turbulens láng zaja.)
- Egyéb zajkeltés (pl.: opto-akusztikai hangkeltés, elektrosztatikus töltéskisülés zaja, ...)

Hangforrások a geometriai kiterjedtség szerint:

- Pontszerű. Egy hangforrás akkor tekinthető pontszerűnek, ha a geometriai mérete bármely térkoordináta irányában jóval kisebb, mint a megfigyelési pont és a hangforrás közti távolság.
- Vonal mentén megoszló. Vonalszerű hangforrás befoglaló mérete két térkoordináta irányában jóval kisebb, mint a hangforrás és a megfigyelési pont távolsága.
- Felület mentén megoszló. Egy hangforrás akkor tekinthető felületi sugárzónak, ha befoglaló mérete egy térkoordináta irányában jóval kisebb, mint a hangforrás és a megfigyelési pont távolsága.
- Térben megoszló. Egy hangforrás akkor térben megoszló, ha a geometriai mérete bármely térkoordináta irányában összehasonlítható nagyságú a megfigyelési pont és a hangforrás közti távolsággal.

Hangforrások a modelljük szerint

A hangforrásokat matematikai modelljük szerint monopólus, dipólus, illetve laterális és longitudinális kvadrupólus kategóriákba soroljuk. Az egyes hangforrás modellek legfontosabb tulajdonságait a következő táblázat foglalja össze.

Elemi hangforrás	Monopólus	Dipólus	Laterális kvadrupólus	Longitudinális kvadrupólus
Felépítés				
Hangkeltés módja	$\frac{\partial q_v}{\partial t} \neq 0 \left[\frac{m^3}{s} \right]$	$\frac{\partial F_f}{\partial t} \neq 0 \left[\frac{N}{s} \right]$	$\frac{\partial \tau_f}{\partial t} \neq 0 \left[\frac{Pa}{s} \right]$	$\frac{\partial \sigma_f}{\partial t} \neq 0 \left[\frac{Pa}{s} \right]$
Íránykarakterisztika				
Hangteljesítmény	$P_m = \frac{\hat{q}_m^2 \rho_0 \omega^2}{8\pi a}$	$P_d = \frac{\hat{q}_m^2 \rho_0 \omega^4}{6\pi a^3} d^2$	$P_{k\ lat} = \frac{2\hat{q}_m^2 \rho_0 \omega^6}{15\pi a^5} d^2 h^2$	$P_{k\ lon} = \frac{2\hat{q}_m^2 \rho_0 \omega^6}{5\pi a^5} d^2 h^2$
Modell törvény	$P_m \sim l_0^2 v_0^4$	$P_d \sim l_0^2 v_0^6$	$P_k \sim l_0^2 v_0^8$	
Áramlás jellege	Ingadozó térfogatáram	Szilárd test áramlásban	Nyíróréteg áramlás	
Példa	Puskalövés, motor kipufogó	Légbefúvórás, fuvola, pánsíp	Szabadsugár, áramlási nyom zaj	

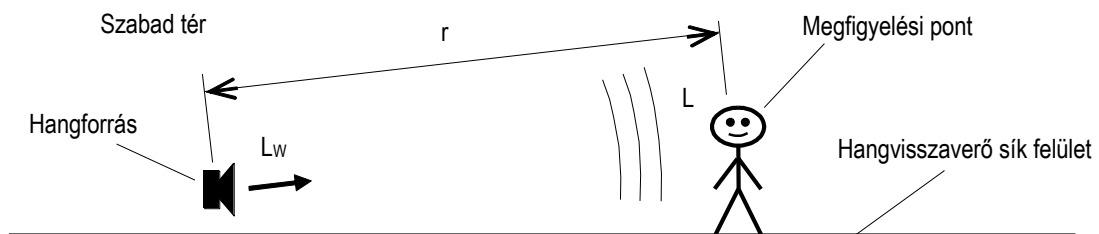
Elemi hangforrások legfontosabb tulajdonságai

10.1. Egyszerű hangforrás modellek

A hangforrás által létrehozott hangtér számítását első lépésben egyszerű hangforrások, a pontszerű monopólus, illetve a koherens és inkoherens vonalsugárzók esetére végezzük el.

10.1.1. Pontszerű monopólus hangforrás:

A számítások során egyik gyakran alkalmazott, egyszerű hangsugárzó a pontszerű hangforrás. A matematikai modell célja ismert hangteljesítményszint esetén szabad térben a hangforrástól megadott távolságra kialakuló hangnyomásszint meghatározása.



Pontszerű hangforrás hangterének számítása szabadtéri környezetben

A pontforrás hangterének számítása során a lineáris akusztikai modellnél alkalmazott egyszerűsítő feltételek (a vivőközeg homogén, sűrűdés- és hővezetésmentes, kontinuum, izentropikus állapotváltozás, nyugvó közeg és kis amplitúdók) mellett a hangforrás környezete szabad tér, a forrás pontszerű, minden irányban egyenletesen sugároz és a számítások a forrástéren kívül érvényesek. A következő sorokban részletezzük az egyszerűsítő feltételeket és ezek hatását a számításra.

- Homogén, nyugvó közegben a hangsugarak egyenesek. Pontforrás esetén a hangsugárcsatorna egy egyenes alkotójú, teljes kúp, a távolság függvényében a keresztmetszet növekedés a sugár négyzetével arányos.
- Akusztikai szabad tér a hangterjedést akadályozó objektumoktól mentes környezet.
- Sűrűdés- és hővezetésmentes közegben disszipatív hangterjedési veszteségek nem alakulnak ki.
- A hangtér számításához egy hangforrás geometriai szempontból pontszerű, ha befoglaló mérete bármely térkoordináta irányában jóval kisebb, mint a hangforrás és a megfigyelési pont közötti távolság.

- A hangforrás minden irányban egyenletesen sugároz, ha a hangforrástól állandó távolságban a hangforrás által létrehozott hangtér intenzitása független az iránytól. (A hangforrás körül koncentrikusan felvett gömbfelületen a hangintenzitás nagysága állandó.)

- Pontszerű hangforrás hangterében a hullámfrontok koncentrikus gömbfelületek. Elegendően távol a forrástól a gömbfelület ívtsége lecsökken, szűk környezetben közelítőleg síknak tekinthető, továbbá a hangnyomás és a részecskesebesség között a fáziskülönbség elhanyagolható. Így a pont forrástól távol felvett megfigyelési pontban kialakuló hangtér jó közelítéssel szabadon terjedő síkhullám hangtérnek tekinthető.

A hangforrás által kibocsátott hangteljesítmény (P), a hangintenzitás (I) és a sugárzási felület (A) szorzata, továbbá szabadon terjedő sík hullám esetén a hangintenzitás kifejezés felhasználásával,

$$P = IA = \frac{p_{eff}^2}{\rho_0 a} A$$

Az előző kifejezésben a hangintenzitás (I) pontosan az idő szerint átlagos hangintenzitást jelenti és korábban felülvonással (\bar{I}) jelöltük. A szakirodalommal összhangban a szövegezés és a jelölés egyszerűsítése érdekében az idő szerint átlagos hangintenzitás és az idő szerint átlagos hangteljesítmény esetében egyaránt a rövidebb hangintenzitás (intenzitás) és hangteljesítmény (teljesítmény) megnevezéseket, illetve felülvonás nélküli jelöléseket (I és P) alkalmazunk.

Pontszerű, minden irányban egyenletesen sugárzó hangforrás gömbszimmetrikus hangterében a sugárzási felületek koncentrikus gömbfelületek. A hangforrástól r távolságban a sugárzási felület egy r sugarú gömbfelület. A gyakorlatban a hangforrások környezetében, néhány fontos eset kivételével (pl.: repülőgép felszállást követően), a teljes szabad tér feltétel nem teljesül. Az esetek többségében a zajforrások szabadtéri környezetét részben hangvisszaverő felület határolja (pl.: egy betonozott útfelületen haladó gépjármű). Ekkor a zajforrásból a határoló felületre eső hangsugarak visszaverődnek és a maradék szabad tér irányában haladnak tovább. A teljes szabad hangtér ilyen leszűkítése a sugárakusztikai modell alkalmazhatóságát nem korlátozza. A hangterjedés számára a szabad keresztmetszet csökkenését, illetve az emiatt kialakuló hangintenzitás növekedést a sugárzási felületszűkítési tényezővel (D) vesszük figyelembe. A pontszerű hangforrás által kibocsátott hangteljesítmény (P), a hangintenzitás (I) és effektív hangnyomás (p_{eff}), illetve a hangforrás és megfigyelési pont közötti távolság (r), és a sugárzási felületszűkítési tényező (D) közötti kapcsolat,

$$P = I \frac{4\pi r^2}{D} = \frac{p_{eff}^2}{\rho_0 a} \frac{4\pi r^2}{D} \quad \text{ahol,} \quad D = \frac{A_{gömb\ teljes}}{A_{gömb\ valós}}$$

A (D) sugárzási felületszűkítési tényező értéke teljes szabad térben 1 (teljes gömbfelület), sík feletti féltérben 2 (fél gömbfelület), merőleges síkok élében 4 (negyed gömbfelület) és merőleges síkok sarkában 8 (nyolcad gömbfelület), amennyiben a határoló felületek hangvisszaverő tulajdonságúak. Ha a zajforrás környezetét hangelnyelő felület határolja a felületre beeső hangsugarak elnyelődnek, hangintenzitás növekedés nem alakul ki, és a szabad részen a hangtér a teljes szabad térrel megegyező lesz. Például egy füves, porózus (hangelnyelő) talaj felületére helyezett zajforrás esetén a sugárzási felületszűkítési tényező (az elnyelő képesség függvényében) közelítőleg 1 marad. A gyakorlati számításokhoz térjünk át szintes írásmódra, osszuk el a kifejezés mindkét oldalát 10^{-12} -el (ez a jobb oldalon $400/(2 \cdot 10^{-5})^2$), vegyük a 10 alapú logaritmusát és szorozzuk meg tízzel,

$$10 \lg \frac{P}{10^{-12}} = 10 \lg \frac{p_{eff}^2}{(2 \cdot 10^{-5})^2} + 10 \lg \frac{400}{\rho_0 a} + 10 \lg r^2 - 10 \lg D + 10 \lg 4\pi$$

A bal oldalon található kifejezés a hangteljesítményszint, a jobb oldal első tagja a hangnyomásszint. Technikai normál állapotú levegőben ($t_0 = 20$ °C, $p_0 = 1$ bar) az egyensúlyi sűrűség és hangsebesség szorzata egészre kerekítve 408 [kg/m²s], a jobb oldalon a második tag értéke tizedesre kerekítve -0,1 dB, közelítőleg elhanyagolható. Normál állapotú levegőben a hangforrástól (r) távolságban kialakuló hangnyomásszint (L),

$$L = L_W - 10 \lg r^2 + 10 \lg D - 11 \text{ [dB]}$$

Megjegyzések:

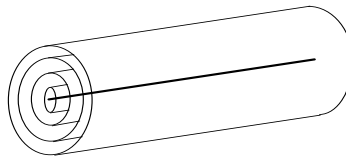
- Hangvisszaverő felületekkel részlegesen határolt szabad térben pontszerű hangforrástól távol kialakuló hangtér hangnyomásszintje (L) a hangforrás által kibocsátott hangteljesítményszint (L_W), a hangforrás és a megfigyelési pont közötti távolság (r) és a sugárzási felületszűkítési tényező (D) függvénye.
- A hangteljesítmény duplázása 3 dB hangnyomásszint növekedést okoz. Ha viszont tíz egyforma hangforrás mellé állítunk be további egy ugyanolyat, a hangnyomásszint növekmény $10 \lg(11/10) \approx 0,4$ dB, a változás hallás alapján alig megkülönböztethető, gyakorlatilag elhanyagolható.
- Ha a hangteljesítményszint állandó, a távolság kétszerezése esetén a hangnyomásszint csökkenés nagysága 6 dB, távolság felezés esetén a hangnyomásszint növekedés mértéke 6 dB.
- Szabad térben a hangforrástól kis és közepes távolságban, a távolság növekedése miatti hangnyomásszint csökkenés alapvető oka nem a disszipáció, hanem az, hogy a hangteljesítmény növekvő távolsággal egyre nagyobb gömbfelületen oszlik meg és emiatt a hangintenzitás lecsökken.
- A „zöld mezős” ipari beruházások egyik hatékony zajcsökkentési módja a megfelelő védőtávolság tartása.
- A sugárzási felületszűkítési tényező (D) duplázása 3 dB hangnyomásszint növekedést eredményez. Ha a hangterjedést korlátozó határoló felület hangelnyelő tulajdonságú, hangnyomásszint növekedés nem alakul ki.
- A hangterjedés során fellépő disszipatív veszteségek miatt a hang munkavégző képességének egy része visszafordíthatatlan módon belsőenergia növekedéssé alakul. A hanghullámok emiatt kialakuló amplitúdó csökkenése a csillapítás, amely más változók mellett a frekvencia függvénye. A gépészeti zajvédelem szempontjából érdekes frekvencia tartomány figyelembe vételével a csillapító hatás általában néhány száz 100 m-nél nagyobb távolságban válik jelentőssé.
- Az esetek többségében a zajtól védett tér a zajforrástól több méter távol van, illetve szokásos hangteljesítményű zajforrás hangja párszor 100 m távolságban a háttérzajban elenyészik. Ennek megfelelően a gépészeti zajvédelemi számítások szempontjából fontos távolság tartomány a hangforrástól számított néhány méterrel párszor 100 méterig tart, amely tartományban a levezetett összefüggés jól használható.
- Az előző összefüggés alapján a szabad térben működő zajforrások esetén hatásos zajcsökkentési módszerek: a zajforrás által kibocsátott hangteljesítményszint (L_W) csökkentése (technológia megoldása csendesebb berendezéssel, zajárnyékoló fal, burkolat vagy tok alkalmazása), a hangforrástól mért távolság (r) növelése, sugárzási felületszűkítési tényező (D) csökkentése. A zajcsökkentési módszerekről a 12. fejezetben részletesen lesz szó.

10.1.2. Vonalszerű hangforrás:

Végtelen hosszú egyenes mentén szorosan egymás mellé felfűzött pontforrások sorozatát vonalszerű hangforrásnak nevezzük. Alkalmasság koordinátarendszerekből nézve a vonalszerű hangforrás befoglaló mérete két térkoordináta irányában jóval kisebb, mint a hangforrás és a megfigyelési pont távolsága, a harmadik irány mentén ez nem teljesül. A számítás célja a vonalsugárzó által hosszegységen kibocsátott hangteljesítményszint függvényében a vonalforrástól r távolságban kialakuló hangnyomásszint meghatározása. A forrás geometriai meghatározása és a létrehozott hangtér szimmetriája kivételével a vonalszerű hangforrás számítási modelljénél bevezetett egyszerűsítések a pontszerű hangforrásnál bevezetett egyszerűsítő feltételekkel egyeznek meg. A vonalsugárzót létrehozó pontforrások összehangoltsága alapján koherens (egységesen viselkedő) és inkoherens (nem egységesen viselkedő) vonalforrásokat különböztetünk meg.

Koherens vonalforrás: Végtelen hosszú egyenes mentén szorosan egymás mellé felfűzött, egyforma (azonos frekvencia, amplitúdó és kezdőfázis értékű), minden irányban egyenletesen sugárzó pontforrások sorozata

koherens vonalsugárzót alkot. Koherens vonalszerű hangforrás hengerszimmetrikus hangteret hoz létre, amelyben a sugárzási felületek koncentrikus henger felületek (ld.: következő ábra).



A koherens vonalsugárzó körül kialakuló hengerszimmetrikus sugárzási felületek

A hangforrás által kibocsátott hosszegységre jutó hangteljesítmény (P'), a vonalforrás és a megfigyelési pont közötti távolság (r), a sugárzási felületszűkítési tényező (D), illetve a végtelen hosszú koherens vonalsugárzó hangterében kialakuló intenzitás (I) közötti kapcsolat,

$$P'l = IA = I \frac{2\pi r l}{D} \quad \text{ahol,} \quad D = \frac{A_{\text{henger teljes}}}{A_{\text{henger valós}}}$$

A vonalforrás esetén a sugárzási felületszűkítési tényező (D) teljes szabad térben 1, sík feletti feltérben 2, merőleges síkok élében 4 (hangvisszaverő határoló felületek esetén). Elegendően távol a vonalforrástól a megfigyelési pont szűk térségében a henger felület közelítőleg síknak tekinthető, illetve a hangnyomás és részecskesebesség közötti fáziskülönbség elhanyagolható. Így a vonalforrás által létrehozott hangtér a megfigyelési pontban jó közelítéssel szabadon terjedő síkhullámnak tekinthető. A szabadon terjedő síkhullámok intenzitása (I) és az effektív hangnyomás (p_{eff}) közötti összefüggés felhasználásával,

$$P' = \frac{p_{\text{eff}}^2}{\rho_0 a} \frac{2\pi r}{D}$$

Szintes írásmódra áttérve (a kifejezés mindkét oldalát osszuk el 10^{-12} -el és vegyük a 10 alapú logaritmusának a tízszeresét),

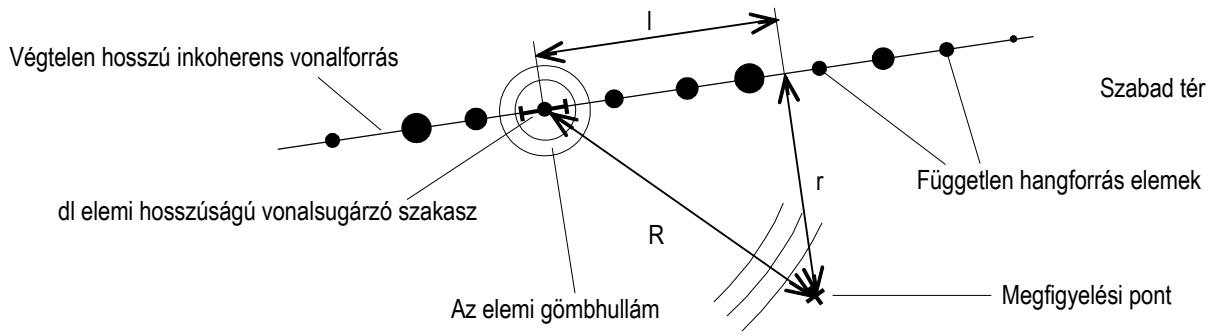
$$10 \lg \frac{P'}{10^{-12}} = 10 \lg \frac{p_{\text{eff}}^2}{(2 \cdot 10^{-5})^2} + 10 \lg \frac{400}{\rho_0 a} + 10 \lg r - 10 \lg D + 10 \lg 2\pi$$

Technikai normál állapotú levegőben ($\rho_0 a \approx 408$ [kg/m²s]), L'_W hosszegységre jutó kibocsátott hangteljesítményszint esetén, a koherens vonalforrástól r távolságban kialakuló hangnyomásszint (L_{kv}),

$$L_{kv} = L'_W - 10 \lg r + 10 \lg D - 8 \text{ [dB]}$$

A koherens vonalsugárzó fizikailag könnyen értelmezhető, matematikai levezetése egyszerű, a hangnyomásszint és távolság közötti kapcsolatra fontos szabály, de a gyakorlatban nehéz rá példát találni, sőt megalkotása komoly mérnöki kihívás, így a jelentősége műszaki akusztikában csekély.

Inkoherens vonalforrás: Végtelen hosszú egyenes mentén egymás mellett szorosan felfűzött, egymástól független (eltérő frekvenciájú, amplitúdójú és kezdőfázisú) minden irányban egyenletesen sugárzó pontforrások sorozata inkoherens vonalsugárzót alkot. Jó közelítéssel a zsúfolt autóút, hosszú vonatszerelvény vagy nagy nyomású gőzvezeték fojtás utáni szakasza inkoherens vonalsugárzónak tekinthető. Az inkoherens vonalszerű hangforrás hengerszimmetrikus hangterét az egyes független forráselemeket reprezentáló, elemi hosszúságú vonalsugárzók által a megfigyelési pontban létrehozott elemi gömbhullám intenzitások összegzésével állíthatjuk elő (ld.: következő ábra).



Az inkoherens vonalsugárzó elemi hosszúságú szakasza (független pontforrása) által létrehozott elemi gömbhullám és hatása a megfigyelési pontra

A pontszerűnek tekinthető, dl elemi hosszúságú vonalsugárzó szakasz által kisugárzott elemi hangteljesítmény ($P'dl$) hatására az R távolságban lévő megfigyelési pontban létrehozott elemi hangintenzitás (dI),

$$dI = \frac{P'dlD}{4\pi R^2} \quad \text{ahol,} \quad R^2 = r^2 + l^2$$

A változók számának csökkentése érdekében helyettesítsük be az elemi vonalforrás és a megfigyelési pont közötti távolság (R) kifejezését az elemi hangintenzitás képletébe,

$$dI = \frac{P'D}{4\pi} \frac{dl}{r^2 + l^2}$$

A változók szerint szétválasztott differenciálegyenlet megoldása a két oldal integrálásával kapható. Ennek megkönnyítése érdekében bővítsük az egyenlet jobb oldalán a törtkifejezést $1/r^2$ -el és tételezzük fel, hogy a P' hosszegységre jutó kisugárzott hangteljesítmény és D sugárzási felületszűkítési tényező a vonalsugárzó hossza mentén nem változik,

$$I = \int_0^l dI = \frac{P'D}{4\pi r} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\left(\frac{l}{r}\right)}{1 + \left(\frac{l}{r}\right)^2} = \frac{P'D}{4\pi r} \left[\arctg\left(\frac{l}{r}\right) \right]_{-\infty}^{\infty} = \frac{P'D}{4\pi r} \left(\frac{\pi}{2} - \left(-\frac{\pi}{2}\right) \right) = \frac{P'D}{4r}$$

Elegendően távol a vonalsugárzót alkotó elemi hangforrásoktól a megfigyelési pontba befutó hullámok jó közelítéssel szabadon terjedő síkhullámok. Az elemi hangforrások által a megfigyelési pontban létrehozott eredő hangintenzitás (I) és az effektív hangnyomás (p_{eff}) közötti kapcsolat a szabadon terjedő síkhullámokra vonatkozó összefüggés felhasználásával,

$$\frac{p_{eff}^2}{\rho_0 a} = I = \frac{P'D}{4r}$$

Az effektív hangnyomás (p_{eff}) és a hosszegységre jutó kibocsátott hangteljesítmény közötti összefüggést szintes írásmódra átvéve (a kifejezés mindkét oldalát osszuk el 10^{-12} -el és vegyük a 10 alapú logaritmusának a tízszeresét),

$$10 \lg \frac{p_{eff}^2}{(2 \cdot 10^{-5})^2} + 10 \lg \frac{400}{\rho_0 a} = 10 \lg \frac{P'}{10^{-12}} + 10 \lg D - 10 \lg r - 10 \lg 4$$

Technikai normál állapotú levegőben ($\rho_0 a \approx 408$ [kg/m²s]), a hosszegységre jutó kibocsátott hangteljesítményszint (L'_w), az inkoherens vonalforrástól mért távolság (r) és a sugárzási felületszűkítési tényező (D) függvényében a kialakuló hangnyomásszint (L_{iv}),

$$L_{iv} = L'_w - 10 \lg r + 10 \lg D - 6 \text{ [dB]}$$

Megjegyzések:

- A pontszerű hangforrás hangterére levezetett összefüggéssel kapcsolatban összefoglalt megjegyzések a távolságfüggés kivételével a koherens és inkoherens vonalsugárzókra is érvényesek.
- Mindkét vonalsugárzó esetén a hangnyomásszint változás nagysága a hangforrástól mért távolság duplázása esetén 3 dB csökkenés, illetve felezése esetén 3 dB növekedés.
- Ugyanolyan hosszegységre jutó kisugárzott hangteljesítmény és egyéb sugárzási feltételek mellett az inkoherens vonalforrás 2dB-el nagyobb hangnyomásszintet hoz létre, mint a koherens vonalforrás.
- A térben nagyobb kiterjedésű vonalsugárzók esetében a távolság növelés nem olyan hatékony zajcsökkentési módszer, mint a pontszerű hangforrásoknál (v.ö.: a hangforrásokra levezetett képletek jobb oldalán a második tagokat).

10.2. Gyakorló feladatok

Gy.1. Vezesse le a végtelen hosszú inkoherens vonalszerű hangforrás távolfélté közelítése alapján a forrás által kisugárzott hosszegységre jutó hangteljesítményszint és az ennek hatására a környezetében r távolságban kialakuló hangtér hangnyomásszintje közötti összefüggést! Adja meg az összefüggés alkalmazási korlátait! Írjon példát az akusztikai szempontból végtelen hosszú vonalsugárzóra!

Gy.2. Hangelnyelő sikkal határolt fél-térben működő pontszerű hangforrást hangvisszaverő síkok merőleges sarkába helyezünk, miközben a hangforrástól mért távolságot a négyszeresére növeljük és a hangforrás teljesítményét megduplázzuk. Adja meg az eredő hangnyomásszint változást!

$$\Delta L = L_2 - L_1 = L_{W2} - L_{W1} - 10 \lg r_2^2 + 10 \lg r_1^2 + 10 \lg D_2 - 10 \lg D_1 - 11 + 11 =$$

$$10 \lg P_2/P_1 - 20 \lg r_2/r_1 + 10 \lg D_2/D_1 = 10 \lg 2 - 20 \lg 4 + 10 \lg 8 = 0 \text{ dB}$$

Gy.3. Egy 320m hosszú, 10 emelet magas lakótelepi épülettömb középső részén elhelyezkedő földszinti helyiségből két közvetlenül egymás mellett elhelyezett szellőztető ventilátor levegőt szállít a külső szabad térbe. Határozza meg a ventilátoroktól 55m távolságban, azokkal pontosan szemben a hangvisszaverő talaj felszínén, szabad térben elhelyezkedő megfigyelési pontban kialakuló A-hangnyomásszint értékét, ha a zajforrások és a megfigyelési pont között hangterjedést akadályozó garázsépület helyezkedik el. A ventilátorok nyomócsonkjából kisugárzott hangteljesítmény ($P_{1\text{okt}}$, $P_{2\text{okt}}$), a garázsépület beiktatási vesztesége (ΔL_{bokt}), illetve az A-súlyozás relatív szintjei (ΔL_{Aokt}) az oktáv-sáv-középfrekvenciák (f_{okt}) függvényében a következő táblázatban találhatóak.

f_{okt} [Hz]	250	500	1k	2k	4k
$P_{1\text{okt}}$ [W]	0,1	0,5	0,1	0,01	0,001
$P_{2\text{okt}}$ [W]	0,5	0,1	0,05	0,01	0,005
ΔL_{bokt}	6	8	11	15	19
ΔL_{Aokt} [dB]	-8,6	-3,2	0	1,2	1

Megoldás:

f_{okt} [Hz]	250	500	1k	2k	4k
$P_{1+2\text{okt}} = P_{1\text{okt}} + P_{2\text{okt}}$ [W]	0,6	0,6	0,15	0,02	0,006
$L_{W1+2\text{okt}} = 10 \lg(P_{1+2\text{okt}}/P_0)$ [dB] ahol: $P_0 = 10^{-12}$ W	117,8	117,8	111,8	103	97,8
$L_{\text{okt}} = L_{W1+2\text{okt}} - 10 \lg r^2 + 10 \lg D - 11 = L_{W1+2\text{okt}} - 10 \lg 55^2 + 10 \lg 4 - 11 =$ [dB]	78	78	72	63,2	58
$L_{\text{okt}} - \Delta L_{\text{b garázs}}$ [dB]	72	70	61	48,2	39
$L_{\text{okt}} - \Delta L_{\text{b garázs}} + \Delta L_{\text{Aokt}}$ [dB]	63,4	66,8	61	49,4	40

$$L_A = 10 \lg(10^{6,34} + 10^{6,68} + 10^{6,1} + 10^{4,94} + 10^4) \approx \mathbf{69,2} \text{ [dB(A)]}$$
