



Magyar Mérnöki Kamara Akusztika Tagozat

**Hőszivattyú - áldás vagy ártás - épületek korszerű hűtése
és fűtése a zajmérnök szemével**

Dr. Koscsó Gábor okl. gépészmérnök
ügyvezető igazgató (Hangmérnök Kft.)
címzetes egyetemi docens (BME Áramlástan Tanszék)

MMK AT és MMK EMT közös szakmai továbbképzés, 2023. november 28.



Tartalom:

1. Bevezetés

- 1.1. Általános áttekintés
- 1.2. Hőszivattyúk általános jellemzői, előnyök-hátrányok
- 1.3. Probléma felvetés

2. Hűtéstechnikai alapok

- 2.1. Alapfogalmak
- 2.2. Kultúrtörténeti mérföldkövek
- 2.3. Működési elv és elméleti alapok
- 2.4. Klímaberendezés típusok

3. Hőszivattyúk zajkeltése

- 3.1. Zajforrás összetevők
- 3.2. Konkrét zajkibocsátási adatok

4. Zajvédelmi előírások

- 4.1. Áttekintés
- 4.2. Rendelet, előírások
- 4.3. Rendelet vagy komfort határérték

5. Zaj- és rezgéscsökkentés

- 5.1. Általános áttekintés
- 5.2. Zajárnyékoló fal
- 5.3. Átszellőztetett tok és gépház
- 5.4. Csatorna hangtompítók
- 5.5. Rezgésszigetelés

6. Összegzés



1. Bevezetés

1.1. Általános áttekintés: Épületek fűtésére, technológiai folyamatok hőellátásának biztosítására napjainkban kazánok helyett számos esetben hőszivattyút alkalmaznak.

1.2. A hőszivattyúk általános jellemzői (előnyök és hátrányok):

Előnyök:

- A jósági fok javulásával **üzemeltetésük gazdaságos**. Hőszivattyú használatával megéri árammal fűteni, bizonyos feltételek teljesülése mellett több hőt termel, mintha az áram előállításához felhasznált földgázt elégetnénk. Jobb a hatásfoka, mint az elektromos áram szolgáltatásé (erőmű, elektromos hálózat, ...).
- A hőszivattyú **nyáron hűtési** feladatokat is elláthat.
- A működéséhez **elektromos áram** kell. Elektromos áram többféle módon előállítható, többek között megújuló energiaforrásokból és nincs kiszolgáltatva a földgáz ellátásnak.
- **Nincs füstgáz kibocsátás**. Városi, sűrűn lakott környezetben komoly környezetvédelmi előny (hasonlóan, mint az elektromos autózás).



Bevezetés (folytatás)

Hátrányok:

- Nagy zaj- és rezgés kibocsátás.

- A gazdaságosságot eredményező nagy jósági fok csak bizonyos hőmérséklet tartományban teljesül. A környezeti hőmérséklet csökkenésével az **üzemi jellemzők romlanak**.
- Nagy hidegben a **működés összeomlik**. Például a magyar téli viszonyok mellett alternatív fűtési megoldás szükséges (pl.: elektromos fűtőpatron, kazán, ...).
- Nagy levegő (vagy más hőforrás) szükséglet.
- Lokális környezeti **hőszennyezés** (télen hűti a külső környezetét).
- A földgáz kazánhoz képest **bonyolultabb berendezés**, összehasonlítva bonyolultabb tervezés és üzemeltetés, kedvezőtlenebb üzembiztonság.



1. Bevezetés (folytatás)

1.3. Probléma felvetés:

- A **probléma napjainkban időszerű**, hőszivattyúk használata az épületgépészetben általánosan elterjedt.
- A berendezések megbízhatósága sokat javult, így az **egészségügyi intézmények** korszerűsítésénél, építésénél is gyakran alkalmazzák
- A hőszivattyúk a közlekedési zajforrásokkal együtt környeztünk **erős és elterjedt meghatározó zajforrásai**.
- Egészségügyi intézményekben a helyzetet nehezítik a **szigorú zajvédelmi határértékek**.
- Újszerű, vagy ismert, de korábban ritkán alkalmazott zajvédelmi megoldások alkalmazása szükséges.



2. Hűtéstechnikai alapok:

2.1. Alapfogalmak:

- A hűtőgép vagy hőszivattyú egy olyan berendezés, amely munkavégzés árán **hidegebb helyről hőt szállít melegebb helyre.**
- A hűtőgép és hőszivattyú között a működési elv és a berendezés felépítés között érdemi különbség nincs, az eltérés a berendezések működésének célja. **A hűtőgép hűt, a hőszivattyú fűt.**



2. Hűtéstechnikai alapok (folytatás)

2.2. Kultúrtörténeti mérföldkövek:

Az elv régóta ismert, a megvalósításra a **gyártástechnológia fejlődésével** a megfelelően működő kompresszor megjelenéséig kellett várni. A gazdag kultúrtörténetből néhány fontosabb állomás címszavakban,

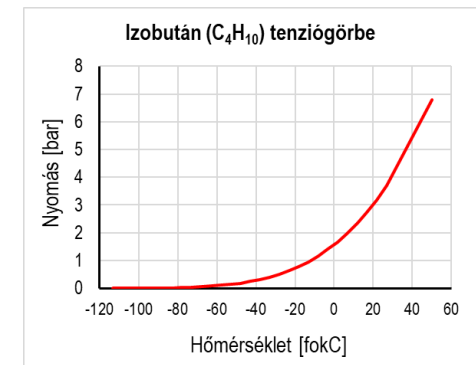
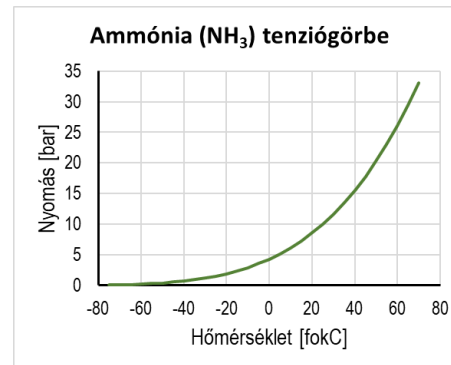
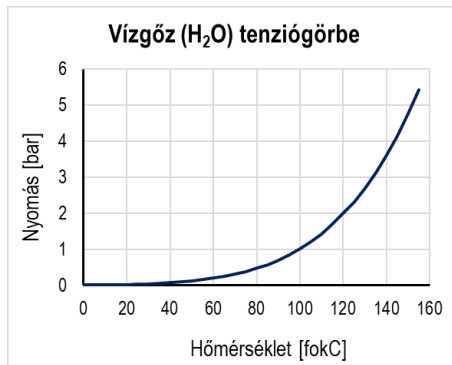
- 1805, Oliver Evans, **gőzzel működő hűtőgép terveinek elkészítése** (ez alapján működőképes berendezést 30 évvel később Jacob Perkins épített meg)
- 1856, James Harrison, **gőzkompressziós hűtés ipari jég előállításához** (háztartási hűtő még nincs)
- 1859, Ferdinand Carré, **ammóniás abszorpciós hűtőgép**
- 1913, Frederick William Wolf Jr., **háztartási hűtőgép kereskedelmi megjelenése** DOMELRE (Domestic Electric Refrigerator, Wolf's Mechanical Refrigerator Company, Chicago)



2. Hűtéstechnikai alapok (folytatás)

2.3. Működési elv és elméleti alapok:

- Általánosan ismert, a párolgás a környezetéből hőt von el, pl.: **izzadás élettani jelenség**, ...
- A hűtőgép működése a folyadékok azon tulajdonságán alapul, hogy a nyomás változásával változik a forrási hőmérsékletük. Ezt az összefüggést a hőmérséklet - telített gőznyomás diagram, a **tenzió-görbe** írja le.



Működési elv: Ha egy alkalmasan kiválasztott **cseppfolyós közeg nyomását lecsökkentjük**, a forráspontja nagyon kicsi lesz, így még egy **hideg helyről is képes hőt elvonni**, miközben elpárolog. Ha a keletkező **gőz nyomását megnöveljük**, a forrási (lecsapódási) hőmérséklet jelentősen megnő, amely lehetővé teszi, hogy egy **meleg helyen hőt adjon le**.



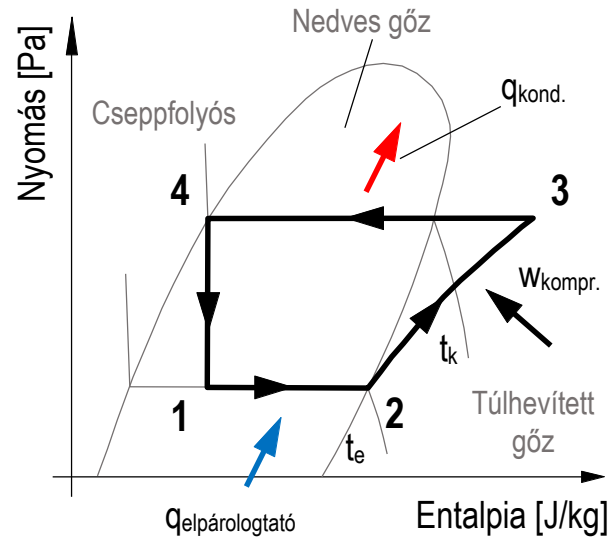
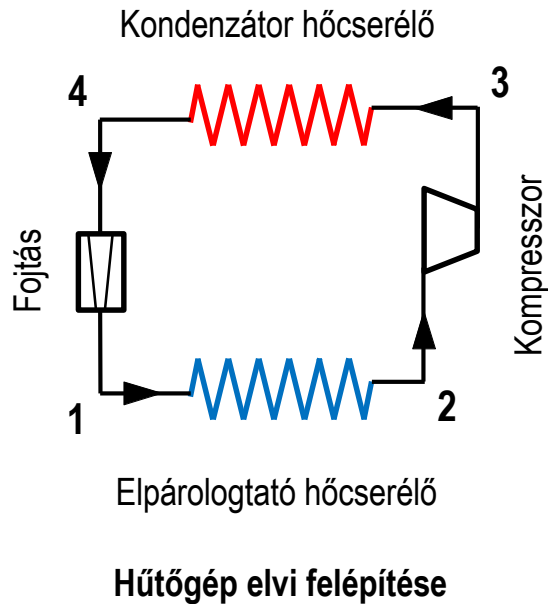
2. Hűtéstechnikai alapok (folytatás)

Példák megfelelő tenzió-görbével rendelkező hűtőközegekre:

- **Ammónia** (R717, irritáló, mérgező, enyhén gyúlékony és korrozív, vizes oldata maró, engedélyezett)
- **Széndioxid** (R744, nagy üzemi nyomás, **zajos üzem!**, környezetbarát, nem gyúlékony, engedélyezett)
- **Izobután** (R600a, kis üzemi nyomás, **halk üzem!**, nem mérgező, tűz- és robbanás veszélyes, engedélyezett)
- **Propán** (R290, nem mérgező, környezetbarát, tűz- és robbanás veszélyes, engedélyezett)
- **Difluor-diklórmetán** (R12 vagy Freon-12, fokozottan ózonréteg károsító, **nem engedélyezett**)
- **Tetrafluor-etán** (R134a, nem mérgező, nem gyúlékony, üvegház hatású, korrozív lehet, engedélyezett)
- **R410A keverék** (R32 és R125 keveréke, nagy üzemi nyomású, **zajos üzem!**, engedély visszavonás alatt)
- **Difluor-metán** (R32, környezetkímélőbb, kismértékben éghető és mérgező, **halk üzem!**, megtűrt)

2. Hűtéstechnikai alapok (folytatás) **Hűtőgép részei és egyszerűsített körfolyamat:**

A hűtőgép működési elvét a **hűtőkörfolyamattal** (fordított Rankine-ciklus) lehet bemutatni.



Gőzközegű kompresszoros hűtőkörfolyamat

- 1-2 Izobár hőcsere.** A hűtőközeg elpárolog, hőt von el a környezetéből (p és T állandó, h nő).
- 2-3 Izentropikus kompresszió.** A kompresszor munkát végez közegeen (p , T és h nő).
- 3-4 Izobár hőcsere.** A hűtőközeg kondenzálódik, hőt ad le a környezetébe (p és T állandó, h csökken).
- 4-1 Adiabatus expanzió.** Hasznos munkavégzés nélkül expanzió (p és T csökken, h állandó).



2. Hűtéstechnikai alapok (folytatás)

Hőszivattyú üzemben a körfolyamat elvi jósági foka:
$$\Phi_e = \frac{q_{kondenzátor}}{w_{kompresszor}}$$

Ahol:

- $q_{kondenzátor}$ [J/kg] a kondenzátor által leadott tömegegységre vonatkozó fajlagos hő
- $w_{kompresszor}$ [J/kg] a kompresszor által a közeg tömegegységén elvégzett munka

Gyakorlatban a hőszivattyú jósági foka, COP (coefficient of performance) :

$$COP = \frac{\dot{Q}_{hasznos}}{P_{\text{összes elektromos}}}$$

Ahol:

- $\dot{Q}_{hasznos}$ [W] megadott üzemi hőmérséklet viszonyok mellett a fűtött környezetbe leadott hőteljesítmény
- $P_{\text{összes elektromos}}$ [W] a teljes hőszivattyú berendezés (kompresszor, ventilátorok, vezérlés, ...) működéséhez szükséges elektromos teljesítmény.



2. Hűtéstechnikai alapok (folytatás)

- A **COP értékét befolyásolja az üzemi hőmérséklet viszony** (milyen hőmérsékletről, milyen hőmérsékletre kell szállítani a hőt), **a hűtőközeg tulajdonságai és berendezés kialakítása.**
- Két hőszivattyú COP értéke csak azonos hőmérséklet viszony és hűtőközeg esetén hasonlítható össze.
- Egy mai, modern levegő hőforrású hőszivattyú, pl.: Alpha innotec, LW 140A-LUX 2.0 berendezés, 20°C beltéri hőmérséklet esetében a jellemző COP értékek:

$T_{\text{külső környezeti}} [^{\circ}\text{C}]$	COP
-7	2,16
2	3,1
7	4,28
12	5,27

2. Hűtéstechnikai alapok (folytatás)

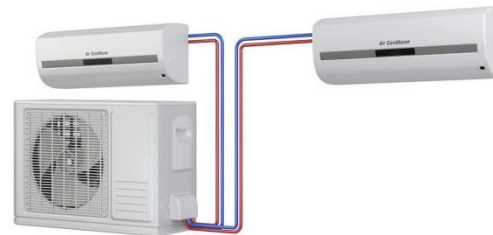
2.4. Klímaberendezés típusok:

- **Kompakt („ablak”) klíma:** A hűtőgép, hőszivattyú minden egysége egy dobozban van, ténylegesen az ablakba beépíthető, jellemzően kis teljesítményű (0,5...1,5kW)



- **Split klíma:** A hűtőgép vagy hőszivattyú egy beltéri és egy kültéri egységre bontható. Hőszivattyú üzemben a kondenzátor egység hosszú csővel csatlakozik a berendezés többi részéhez, de a hőkötő közeg maga a hűtőkörfolyamat munkaközeg. Jellemzően kis-közepes teljesítményű (1...10kW).

- **Multi-split klíma:** Lényegét tekintve egy split klíma, amelynél egy kültéri egység több beltéri egységet szolgál ki. Jellemzően közepes teljesítményű (10...30kW).



2. Hűtéstechnikai alapok (folytatás)

- **Roof-top klíma:** Felépítését tekintve a kompakt klímához hasonló berendezés, a hűtőgép, hőszivattyú minden egysége egy dobozban van, jellemzően közepes teljesítményű (5...30kW). A kiszolgált helyiséghez légcsatornákon keresztül csatlakozik.



- **Folyadékűtő vagy hőszivattyú mono-blokk kültéri egység:** Felépítését tekintve a kompakt klímához hasonló berendezés, a hűtőgép, hőszivattyú minden egysége egy dobozban van, jellemzően nagy teljesítményű (100...1000kW). A kiszolgált térhez vagy berendezéshez közvetítő közegen (pl.: sós víz, monoetilén-glikol) keresztül csatlakozik.



2. Hűtéstechnikai alapok (folytatás)

- **Megosztott kültéri egység** folyadékűtő vagy hőszivattyú kültéri egység: Lényegét tekintve egy mono-blokk kültéri egység, amelyben a kompresszor és a fojtás (zajos egységek), illetve a pl.: hőszivattyú esetében az elpárologtató (méretezéstől függően csendes egység) két egységet képez. **Külső térben az elpárologtatót kell elhelyezni. A zajos kompresszor zárt gépházba telepíthető**, amely zajvédelmi szempontból kedvező.
- **VRF (Variable Refrigerant Flow) klíma**: A VRF berendezéseknél a kompresszor fordulatszám- vagy löket szabályozásával, jó hatásfokkal pontos üzemi pont beállítására nyílik lehetőség. Az ilyen berendezéseket jó hatásfok, bonyolult vezérlés és „**általában**” **csendes** üzem jellemez. **Zajkibocsátásuk** a berendezést vezérlő „belső” utasítástól függően szokatlanul **megnő**, méretezés katalógus adat alapján!



3. A hűtő vagy hőszivattyú berendezések zajkeltése

3.1. Zajforrás összetevők

- **Elpárologtató hőcserélő:** Kisebb berendezéseknél az elpárologtató zajforrásai a hűtőközeg oldali **elforrás és áramlás**, illetve a **levegő oldali természetes áramlás**. Általában nem jelentős zajösszetevők (buborékos forrás?) Nagyobb gépeknél általában az elpárologtató hőcserélő szekunder oldalán **hűtőventilátor** van, méretezésétől függően **erős léghang zajforrás, nem elhanyagolható testhang forrás**.
- **Kompresszor:** Kisebb berendezéseknél általában **térfogat kiszorítás elvű** (pl.: alternáló dugattyús), nagyobbaknál térfogat kiszorítás elvű (alternáló dugattyús illetve forgódugattyús csavar (screw) vagy spirál (scroll), ...) vagy örvény elvű (radiális) gép. A nyomásviszony: 1/10...1/40, **erős léghang és testhang zajforrás**.
- **Kondenzátor hőcserélő:** Kisebb berendezéseknél a kondenzátor zajforrásai a hűtőközeg oldali **lecsapódás és áramlás**, illetve a levegő oldali **természetes áramlás**, általában egyik sem jelentős zajforrás. Nagyobb gépeknél a kondenzátor hőcserélő szekunder oldalán **hűtőventilátor** van, méretezésétől függően **erős léghang zajforrás, nem elhanyagolható testhang forrás**.
- **Fojtás vagy szabályozó:** Kisebb gépeknél a fojtás egy kapilláris cső (átmérő 0,5-2mm, hossza 0,5-2m), a benne kialakuló **lamináris áramlás** általában nem kelt erős zajt (buborékos forrás). Nagyobb gépeknél a **fojtószelep** hűtőközegtől és szelep konstrukciótól függően zajos lehet.



3. A hűtő vagy hőszivattyú berendezések zajkeltése (folytatás)

3.2. Konkrét hőszivattyú kültéri egység zajkibocsátási adatok:

Gyártó	Típus	Kültéri egység [db]	$P_{\text{össz h}}$ [kW]	$L_{\text{WA}} \text{össz}$ [dB(A)]
HIDROS	LHA/4004/PI380	2	566	92
TRANE	CXAF 180 SE XLN	1	525	92
AERMEC	NRB2006XH E J AF + P8	1	480	90
YORK	YSSC 620 EVO H EC S S1PT	1	538	88
DAIKIN	EWYT600B-XRA2+OP204	1	482	87
AERMEC	NRK0700 H E J 01	4	529	83



4. Zajvédelmi előírások

4.1. Áttekintés

- **Immissziós (besugárzási) zajvédelmi határérték** (egy vagy több zajforrás működése miatt a zajtól védett területen megengedett legnagyobb zajterhelés, rendelet szabályozza)
- **Emissziós (kisugárzási) zajvédelmi határérték** (egy zajforrás működése miatt a zajtól védett területen megengedett legnagyobb zajterhelés, rendelet szabályozza)
- **Komfort határérték** (az akusztikai komfort növelése érdekében, a rendeletben meghatározott zajterhelési határértékhez képest szigorúbb (kisebb) határérték, tervezői és megrendelői hatáskör)
- **Tervezési határérték** (tervezési célkitűzés)

4.2. Rendeletek, előírások:

- 27/2008. (XII. 3.) KvVM-EüM együttes rendelete „A környezeti zaj- és rezgésterhelési határértékek megállapításáról”
- 284/2007.(X.29.) Korm. rendelet „A környezeti zaj és rezgés elleni védelem egyes szabályairól”
- 93/2007.(XII.18.) KvVM rendelet „A zajkibocsátási határértékek megállapításának, valamint a zaj- és rezgés kibocsátás ellenőrzésének módjáról”



4. Zajvédelmi előírások (folytatás)

Előírások külső szabadtéri környezetben:

Zajtól védendő terület	Határérték (L_{TH}) dB(A)]	
	Nappal 06–22 óra	Éjjel 22–06 óra
Üdülőterület, különleges területek közül az egészségügyi terület	45	35
Lakóterület (kisvárosias, kertvárosias, falusias, telepszerű), különleges területek közül az oktatási létesítmények területe, temetők, zöldterület	50	40
Lakóterület (nagyvárosias), a vegyes terület	55	45
Gazdasági terület	60	50

Üzemi és szabadidős zajforrások zajterhelési határértékei zajtól védendő területeken (27/2008. (XII. 3.) KvVM–EüM együttes rendelet 1. melléklet)

A 284/2007. (X. 29.) korm. rend. a magánszemélyek háztartási célt szolgáló tevékenységét és berendezéseit kiemeli a zajvédelmi rendelet hatásköre alól, ugyanakkor máshol nem ad rá értéket



4. Zajvédelmi előírások (folytatás)

Zajvédelmi határértékek épületek belső helyiségeiben:

Zajtól védendő helyiség	Határérték (L_{TH}) [dB(A)]	
	Nappal 06–22 óra	Éjjel 22–06 óra
Kórtermek és betegszobák	35	30
Tantermek, előadótermek oktatási intézményekben	40	-
Lakószobák lakóépületekben	40	30
Lakószobák szállodákban	45	35
Étkezőkonyha, étkezőhelyiség lakóépületekben	45	-
Szállodák, közösségi lakóépületek közös helyiségei	50	-
Éttermek, eszpresszók	55	-
Keresk. eladótér, vendéglátó helyiség, váróterem	60	-

Zajterhelési határértékek épületek zajtól védendő helyiségeiben
(27/2008. (XII. 3.) KvVM–EüM együttes rendelet 4. melléklet)



4. Zajvédelmi előírások (folytatás)

A zajvédelmi határérték (L_{TH}) nagyságát az L_{AM} megítélési szinttel hasonlítjuk össze.

$$L_{AM} = L_{Aeq} + K_{imp} + K_{ton} \quad \text{ahol: } L_{Aeq} = L_{Aeqü+a} + K_a + K_b$$

L_{AM} meghatározása a MSZ 18150-1:1998 "Környezeti zaj vizsgálata és értékelése" magyar szabvány alapján.

4.3. Rendelet vagy komfort határérték:

A zajvédelmi tervezés során indokolt esetben, az akusztikai komfort növelése érdekében, a rendeletben meghatározott zajterhelési határértékhez képest **kisebb tervezési határérték** választható. Például csendes környéken, ahol az alapzaj kisebb, mint a rendeleti határérték.

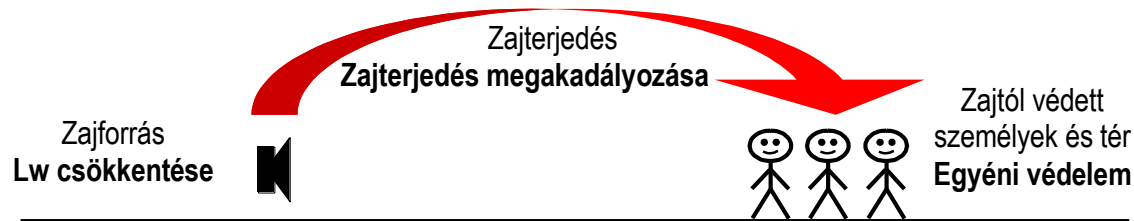


5. Zaj- és rezgés csökkentés

Feladatok: A zajvédelem alapvető feladatai a **zajterhelés meghatározása, minősítése** és indokolt esetben, lehetőség szerint a **zaj megszüntetése vagy elfogadható szintre csökkentése**.

5.1. Általános áttekintés:

Általános zajcsökkentési módszertani elvek áttekintése a hőszivattyúkra alkalmazva.



Zajkonfliktus kialakulása és alapvető zajcsökkentési módok



5. Zaj- és rezgéscsökkentés (folytatás)

+ Kibocsátott hangteljesítmény csökkentése

- **Csendes berendezés** gyártása (hűtőközeg, kompresszor típus, ... , gyártó hatásköre)
- **Csendes gyártmány** (gyártó, típus) kiválasztása (tervező, beruházó hatásköre)
- Gyárilag **zajcsökkentett gép** választása (tervező, beruházó hatásköre).
- Felesleges **kalorikus túlméretezés** elkerülése (tervező hatásköre)
- Szükséges **karbantartások** elvégzése (üzemeltető hatásköre), például:
 - Mechanikai zajok: (forgó alkatrészek kiegyensúlyozása, kenőanyagok, ...)
 - Áramlási zajok csökkentése (hőcserélők tisztítása,)



5. Zaj- és rezgéscsökkentés (folytatás)

+ Zajterjedés megakadályozása

Szabad térben:

- Hangforrástól mért **védőtávolság** növelése
- Kedvező (kis intenzitású) **sugárzási irány** kiválasztása
- **Sugárzási felület szűkítés** csökkentése (hangforrásnál a hangvisszaverő felületek)
- **Zajárnyékolás** (mesterséges fallal, természetes objektummal, növény sávval)
- Zajvédő burkolat, **tokozás, zajvédő gépház**, üzemépület alkalmazása (szellőzés!)

Falakkal határolt térben külső zajforrás esetén:

- A helyiséget határoló fal hanggátlásának növelése
- Teremállandó növelése a vevő és (ha van) az adó helyiségben

+ Egyéni (személyes) zajvédelem (elsősorban a kezelő személyzet részére):

- Egyéni zajvédő felszerelés (füldugó, fülvédő tok)
- Munkaidő beosztás, személyes zajexpozíció korlátozása
- Zajszigetelt kezelőfülke, vezérlőterem és pihenő helyiség építése



5. Zaj- és rezgéscsökkentés (folytatás)

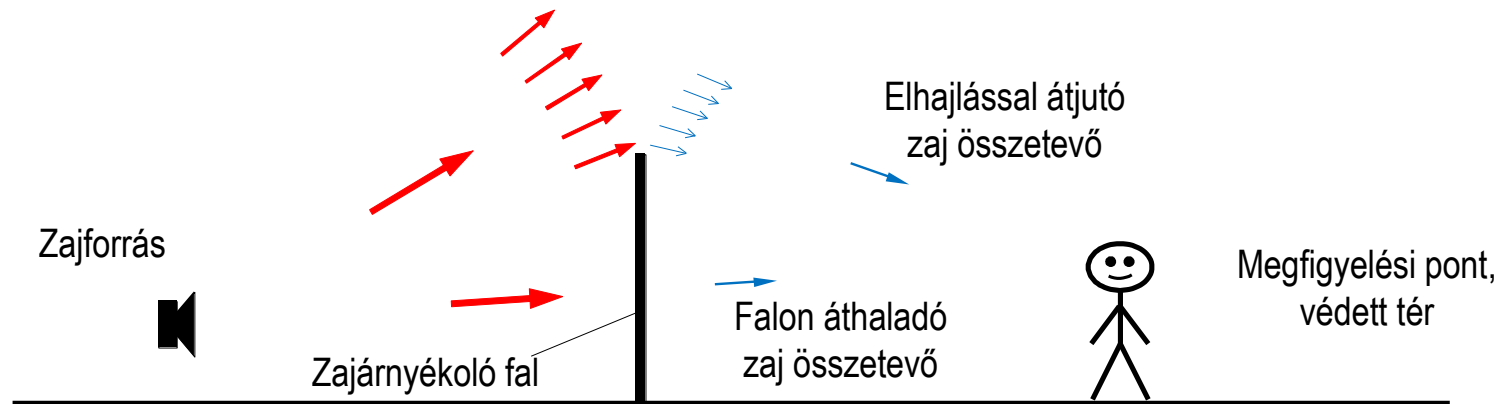
5.2. Zajárnyékoló fal:

A zajforrás és a védett tér között elhelyezett, az **optikai átláthatóságot megakadályozó** hanggátló fal.

- **Kismértékű zajhatárérték túllépés** esetén (0...10dB(A)) hatékony megoldás.
- Közepes zajhatárérték túllépés esetén (10...15dB(A)) a zajvédő falat kilépő oldali **hangtompítóval** kell kiegészíteni.
- Zajárnyékolás **meglévő tereptárggyal** (épület, tömör vasbeton kerítés, töltés, ...) is létrehozható

5. Zaj- és rezgéscsökkentés (folytatás)

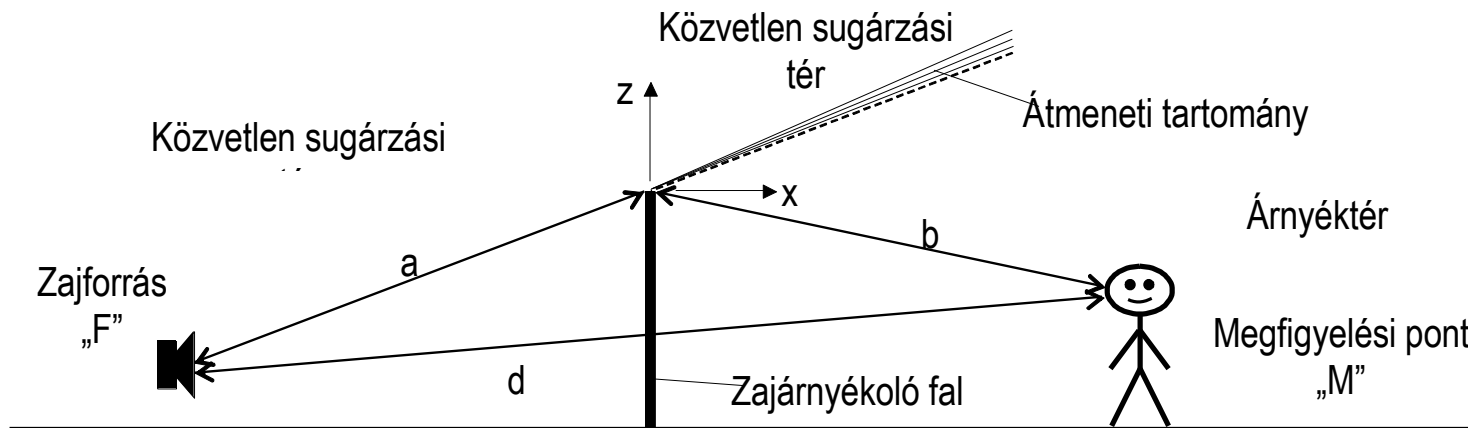
- A zajárnyékoló fal jellemzője a **beiktatási veszteség** (ΔL_f) (fal nélkül és fal jelenlétében ugyanabban a megfigyelési pontban meghatározott hangnyomásszintek különbsége)
- A beiktatási veszteséget a hangelhajlás és a fali átterjedés határozzák meg.



Zajárnyékoló fal, a védett részre elhajlással és fali átvezetéssel átjutó hangösszetevők

5. Zaj- és rezgéscsökkentés (folytatás)

- **Elhajlással átjutó zaj összetevő** beiktatási vesztesége (ΔL_{fh}) nagyságát a Helmholtz-Kirchoff diffrakciós integrál megoldásával határozzuk meg.
- **Egyszerűsítő feltételek:** szabad tér, pontszerű zajforrás, falréteg hanggátlása végtelen, zajárnyékoló fal végtelen hosszú.
- A beiktatási veszteség a védett pont helyzetének függvénye, így a tartomány: **árnyéktér, átmeneti tartomány vagy a közvetlen sugárzási tér.**



Zajárnyékoló fal mögött a védett oldalon kialakuló jellemző sugárzási terek



5. Zaj- és rezgéscsökkentés (folytatás)

Zajárnyékoló fal beiktatási vesztesége (ΔL_{fh}),

Árnyéktérben, $\frac{Z_F}{X_F} \geq \frac{Z_M}{X_M}$ $\Delta L_{fh} = 20 \lg \frac{\sqrt{2\pi N}}{\operatorname{tgh} \sqrt{2\pi N}} + 5$ [dB]

Átmeneti tartományban, $\frac{Z_F}{X_F} < \frac{Z_M}{X_M}$ és $0 < N \leq 0,2$ $\Delta L_{fh} = 20 \lg \frac{\sqrt{2\pi N}}{\operatorname{tg} \sqrt{2\pi N}} + 5$ [dB]

Közvetlen besugárzási tartományban, ha $\frac{Z_F}{X_F} < \frac{Z_M}{X_M}$ és $N > 0,2$ $\Delta L_{fh} = 0$ [dB]

Ahol a Fresnel-szám: $N = \frac{2}{\lambda} (a + b - d)$



5. Zaj- és rezgéscsökkentés (folytatás)

Megjegyzések:

- A beiktatási veszteség, ΔL_{fh} a **Fresnel-szám** (N) függvénye. Növekvő Fresnel-számhoz növekvő beiktatási veszteség tartozik.
- A Fresnel-szám a **hangterjedési úthossz különbség** (a+b-d) és a **hullámhossz** (λ) függvénye. Nagy a Fresnel-szám ha nagy az úthossz különbség és kicsi a hullámhossz.
- Reális fal méretek és zaj spektrum esetén $\Delta L_{fh} < 20$ dB.
- Fal hanggátlása $R_{fal} \approx \Delta L_{fh} + 10$ [dB] (gazdaságossági szempontok)
- A valós fal hossza (vízszintes síkban a fal elején és végén hangelhajlással átjutó zaj összetevő csökkentésére a **beiktatási veszteség** $> \Delta L_{fh} + 5$ dB.
- A zajárnyékoló fal zajforrás felőli oldala **hangelnyelő kialakítású**.



5. Zaj- és rezgéscsökkentés (folytatás)

Gyakorlati szempontok:

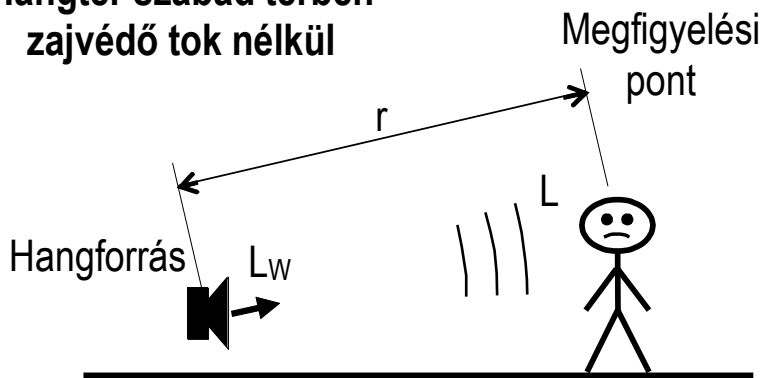
- Zajvédő fal tervezésénél az **atmoszférikus szél terhelés** és talajmechanikai körülmények figyelembe vétele.
- A szabad térben felállított zajvédő fal **kültéri környezetálló legyen**, felül esővédelem, hangelnyelő anyag mechanikai védelemmel, alul vízálló lábazat pl.: tetőn elfolyókkal.
- A beépített üveg- vagy kőzetgyapot **hidrofób** anyaggal impregnált legyen.
- **Légtechnikai rövidzár elkerülése** (légbeszívó- és kifúvó oldal keveredésének elhárítása, gyártó által megadott oldaltávolságok betartása)
- **Alsó rés-szellőző** nyílások kialakítása esetén zajárnyékoló segédfalat kell készíteni.
- A zajvédő fal beiktatási vesztesége **kilépő oldali hangtompítóval javítható**. $\Delta L_t \approx \Delta L_{fh}$
A hangtompító csökkenti a légtechnikai rövidzár kockázatát, viszont növeli a rendszer légoldali ellenállását.

5. Zaj- és rezgéscsökkentés (folytatás)

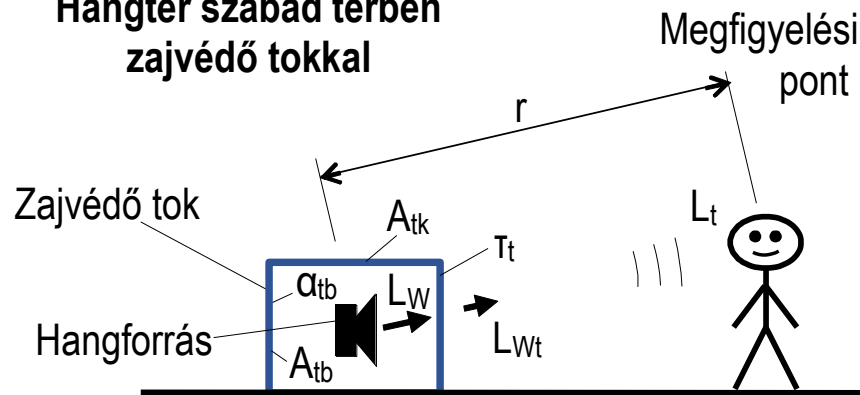
5.3. Zajcsökkentő tok, gépház:

- A zajforrás köré épített, hanggátló falú, a zajforrást teljesen körbe foglalo kialakítás.
- Mérete párszor tíz centiméteres doboztól, a több tíz méteres zajvédő gépházig terjedhet.
- Közepes- és nagymértékű zajhatárérték túllépés esetén (15...30dB(A))) hatékony megoldás.
- A tok zajcsökkentő hatását a beiktatási veszteség (ΔL_t) fejezi ki (tok nélkül és tok jelenlétében ugyanabban a mérési pontban meghatározott hangnyomásszintek különbsége).

Hangtér szabad térben zajvédő tok nélkül



Hangtér szabad térben zajvédő tokkal



Zajcsökkentés zajvédő tokkal szabadtéri környezetben



5. Zaj- és rezgéscsökkentés (folytatás)

Hangtér számítása tok nélkül:

Tok nélkül r távolságban a hangtér effektív hangnyomás négyzete, $p_{eff}^2 = P \frac{\rho_0 a D}{4\pi r^2}$

Hangtér számítása a tok jelenlétében:

A zajforrás bekapcsolása és az állandósult állapot kialakulását követően a tok belső terében,

$$P_{vtbe} = P_{vtki} \quad P(1 - \bar{\alpha}_{tb}) = I_{tb} A_{tb} \bar{\alpha}_{tb}$$

A tok külső felületéről a külső térbe kibocsátott hangteljesítmény, $P_{tk} = I_{tk} A_{tk} = \bar{\tau} \frac{P A_{tk}}{R_{Tt}}$

Ahol a tok teremállandó, $R_{Tt} = \frac{A_{tb} \bar{\alpha}_{tb}}{(1 - \bar{\alpha}_{tb})}$

A tok jelenlétében r távolságban a hangtér effektív hangnyomás négyzete,

$$p_{efft}^2 = P_{tk} \frac{\rho_0 a D}{4\pi r^2} = \bar{\tau} \frac{P A_{tk} \rho_0 a D}{R_{Tt} 4\pi r^2}$$

A zajvédő tok beiktatási veszteség,

$$\Delta L_t = L - L_t = 10 \lg \frac{p_{eff}^2}{p_{efft}^2} = 10 \lg \frac{R_{Tt}}{\bar{\tau} A_{tk}} = 10 \lg \frac{1}{\bar{\tau}} + 10 \lg \frac{R_{Tt}}{A_{tk}} = \mathbf{R} + \mathbf{10 \lg \frac{R_{Tt}}{A_{tk}}} \text{ [dB]}$$



5. Zaj- és rezgéscsökkentés (folytatás)

Megjegyzések:

- ΔL_t a tok fal **hanggátlás** (R), tok **teremállandó** (R_{Tt}) és a **tok külső felület** (A_{tk}) függvénye.
- A tok fal hanggátlás (R) és a tok teremállandó (R_{Tt}) a **frekvencia függvénye**.
- A beiktatási veszteség **hangvisszaverő falakkal határolt térben** ugyanekkora.
- Nagy a tok beiktatási vesztesége (ΔL_t), ha **nagy a tok fal hanggátlás** (R), **nagy a tok teremállandó** (R_{Tt}) és **kicsi a tok szabad térrel határos külső felülete** (A_{tk}).
- Ha az $(\bar{\alpha}_{tb})$ nagy és $(\bar{\tau})$ kicsi, ez azt jelenti, hogy a falban **nagy belső terjedési veszteség** alakul ki (többrétegű falszerkezet, amiben mindig legyen disszipatív réteg).
- A levezetett összefüggés alapja energetikai akusztikai modell, amely a **hullám akusztikai viselkedés vizsgálatára nem alkalmas**.

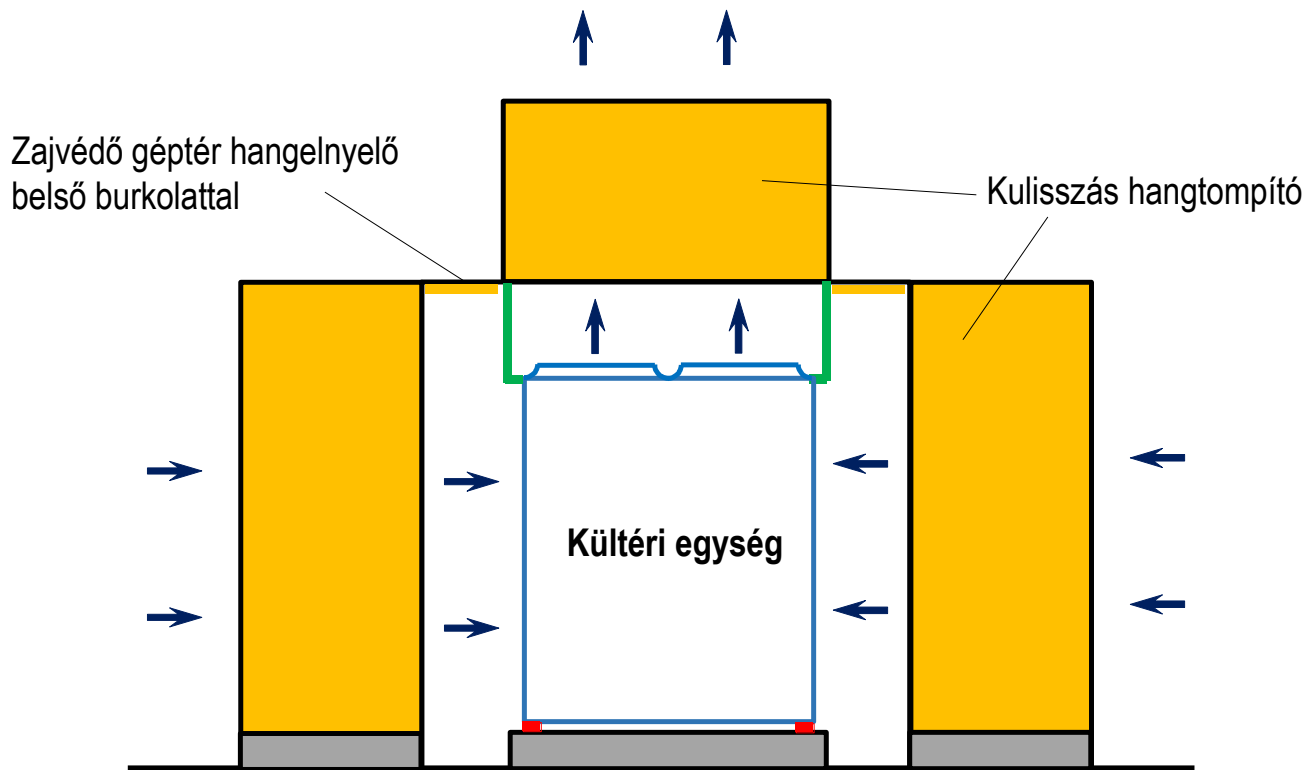


5. Zaj- és rezgéscsökkentés (folytatás)

Gyakorlati szempontok:

- Zajcsökkentő **tok belső felület és a zajforrás között megfelelő távolság legyen**. Kis távolság esetén nő a légrés rugómerevség és hangátvezető képesség, csökken a beiktatási veszteség (zajvédő burkolat).
- A tok fal és az alapszint között **hézagmentes kapcsolat** legyen.
- A zajforrás és a tok fal között rezgés átvezetésére alkalmas **mechanikai kapcsolat ne legyen**.
- A tok falán keresztül a levegő be- és elvezetését **hangtompított csatornaszakaszon** keresztül kell megoldani. A hangtompítók és a zajvédő tok beiktatási vesztesége egyenlő legyen.
- Karbantartáshoz a tok méretétől függően a zajforrásról leemelhető konstrukciót, szereléssel megbontható fal elemeket vagy ajtót kell kialakítani.

5. Zaj- és rezgéscsökkentés (folytatás)



Hangszigetelt átszellőztetett gépészeti tér kialakítása a hőszivattyú kültéri egység zajcsökkentésére

5. Zaj- és rezgéscsökkentés (folytatás)

5.4. Csatorna hangtompítók:

- Csövekben, csatornáknban a **zaj terjedését hangtompító beépítésével csökkentjük.**
- A hangtompító egy csatornaszakasz, amelyet **kis áramlási ellenállás és nagy akusztikai ellenállás** (beiktatási veszteség) jellemez.
- Két fő típusa, az **abszorberes és a reaktív** hangtompítók
- Hőszivattyú berendezések esetében a (zaj spektrum, geometriai méret) általában abszorberes hangtompítót alkalmazunk.
- Az abszorberes hangtompítók két típusa a **kulisszás** (tábla lemezes) és **gyűrűs hangtompító.**



Abszorberes kulisszás (bal oldalon) és abszorberes gyűrűs (jobb oldalon) csatorna hangtompítók



5. Zaj- és rezgéscsökkentés (folytatás)

- A hangtompító fontos jellemzője a **beiktatási veszteség** (ΔL_t), és az áramlási veszteséget kifejező **nyomásesés** ($\Delta p'_t$).
- A beiktatási veszteség (ΔL_t), a belépő és kilépő oldalakon mért hangnyomásszintek különbsége.
- Az áramlási veszteség ($\Delta p'_t$), a belépő és kilépő oldalakon mért össznyomások különbsége.
- Hőszivattyú kültéri egységek levegő oldali hűtése általában többlet áramlási veszteséggel nem terhelhető (nem csatornázható), ezért a hangtompítókat úgy kell méretezni, hogy azok **ellenállása a lehető legkisebb legyen**.
- Sorozatban gyártott termékek beiktatási vesztesége és nyomásvesztesége **katalógus adat**.
- Egyedi kialakítás esetén beiktatási veszteség és nyomásveszteség **modell mérések alapján számolható**.

Gyakorlati szempontok:

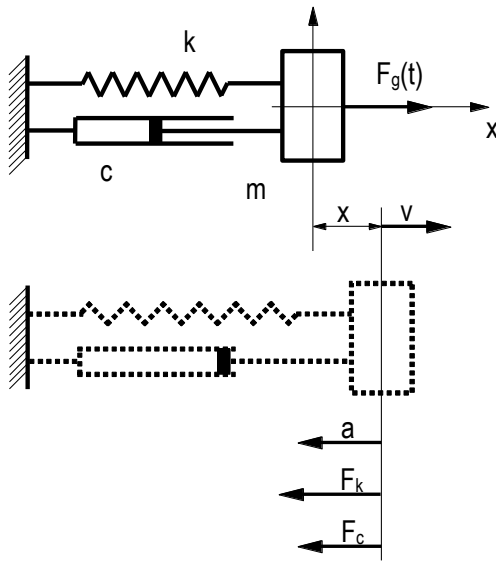
- A beépített üveg- vagy kőzetgyapot hidrofób anyaggal impregnált legyen.
- Az elnyelő réteg mechanikai védelmét üvegfátyol és perforált lemez borítás biztosítja.
- Csatlakoztatás a géphez (kilépő oldal) rugalmas csatornaelemen keresztül (csőkompenzátor)
- Eső ellen védelem és villámvédelem.

5. Zaj- és rezgéscsökkentés (folytatás)

5.5. Rezgésszigetelés:

A zajárnyékoló fal és a zajvédő tok a léghang lesugárzás ellen hatásos. A hőszivattyú működési elvéből kifolyólag **erős rezgésforrás**, ezért a teljes védelemhez **rezgés- (testhang) szigetelés is szükséges.**

Viszkózus erővel csillapított egyszabadságfokú gerjesztett rezgés



Ahol:

m	[kg]	tömeg
x	[m]	elmozdulás x irányban
v	[m/s]	sebesség x irányban
a	[m/s ²]	gyorsulás x irányban
F_k	[N]	rugóerő
F_c	[N]	viszkózus csillapítóerő
F_g	[N]	gerjesztőerő
k	[N/m]	rugómerevség
c	[kg/s]	viszkózus csillapítási tényező



5. Zaj- és rezgéscsökkentés (folytatás)

Mozgásegyenlet (x irányban) harmonikus gerjesztés esetén:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = \hat{F}_g \cos(\omega t)$$

Az állandósult állapothoz tartozó megoldást, a szokásos trigonometrikus alakra átírva,

$$x(t) = x_p(t) = \hat{x} \cos(\omega t - \varphi_0)$$

$$\text{Ahol: } \hat{x} = \frac{\hat{F}_g}{\sqrt{\omega^2 c^2 + (k - \omega^2 m)^2}} \quad \text{és} \quad \varphi_0 = \arctg\left(\frac{\omega c}{k - \omega^2 m}\right)$$

A kitérés amplitúdó erősítési tényező, $N_x = \frac{\hat{x}}{\Delta x_{st}} = \left(\Omega^2 \frac{c^2}{mk} + (1 - \Omega^2)^2\right)^{-0,5}$

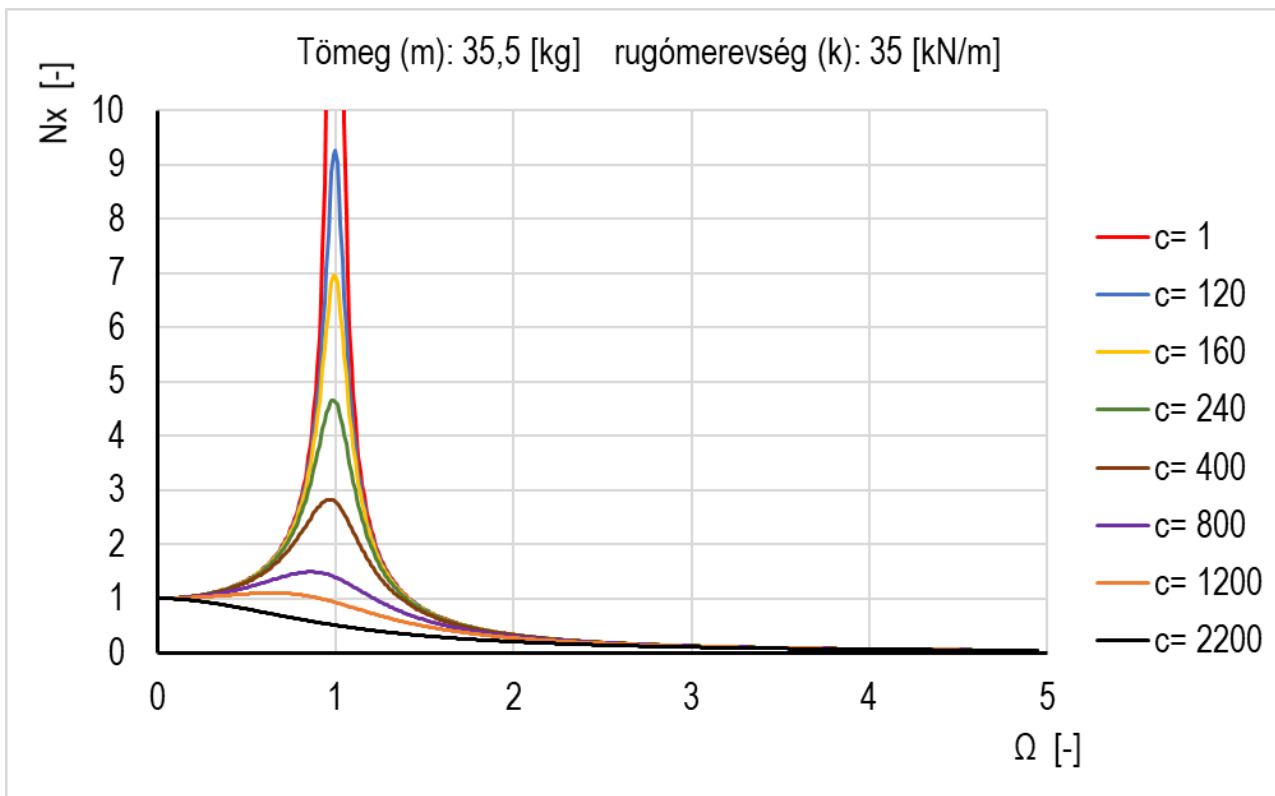
és a

fáziskülönbség a gerjesztés és a rezgő tömeg kitérése között, $\varphi_0 = \arctg\left(\frac{\Omega \sqrt{\frac{c^2}{mk}}}{1 - \Omega^2}\right)$

Ahol a statikus deformáció, $\Delta x_{st} = \frac{\hat{F}_g}{k}$ és a frekvencia viszony, $\Omega = \frac{\omega}{\omega_s}$



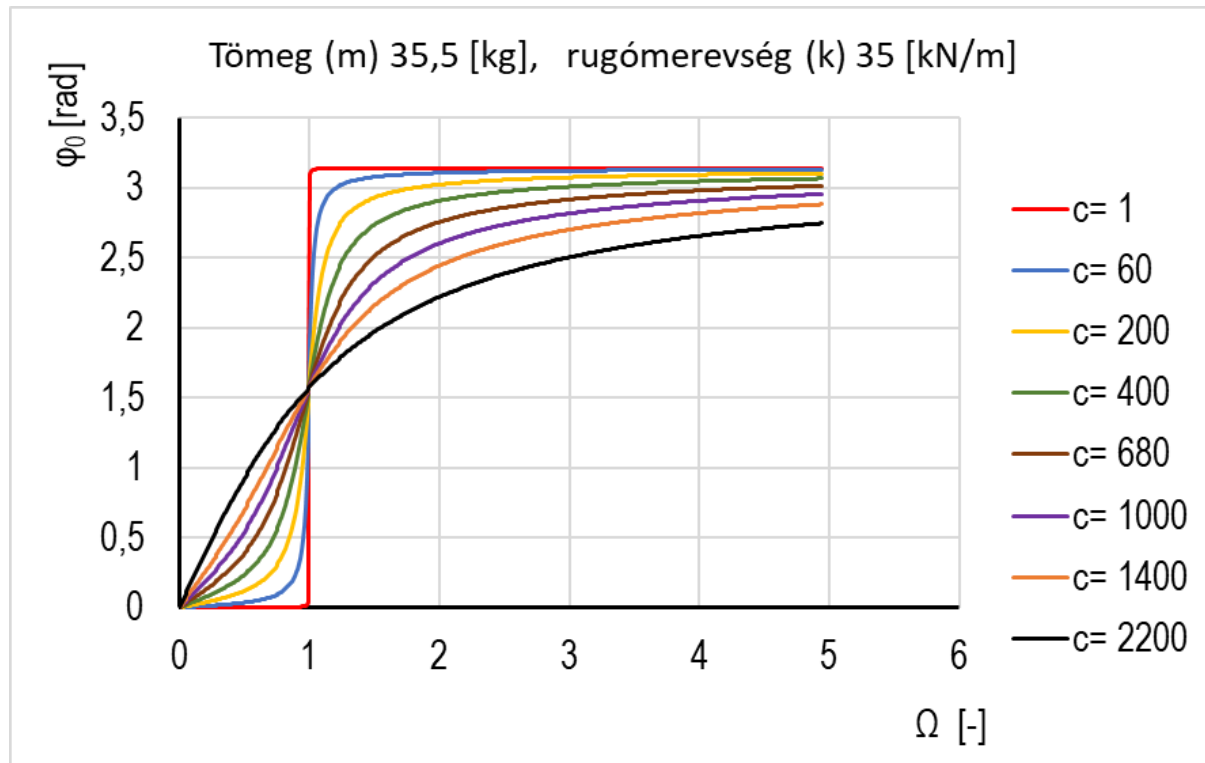
5. Zaj- és rezgés csökkentés (folytatás)



Kitérés amplitúdó erősítési tényező (N_x) a dimenzióatlan frekvencia (Ω) függvényében



5. Zaj- és rezgéscsökkentés (folytatás)



Fáziskülönbség a gerjesztés és a rezgő tömeg kitérése között (φ_0)
a dimenziótlan frekvencia (Ω) függvényében



5. Zaj- és rezgés csökkentés (folytatás)

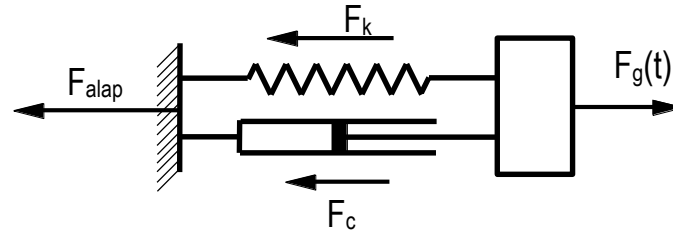
Megjegyzések:

- Állandósult állapotban ω szögfrekvenciájú gerjesztésre **ω szögfrekvenciájú rezgés** (válasz) alakul ki.
- Csillapítás hiányában ω_s saját szögfrekvenciájú gerjesztés hatására **végtelen nagy kitérés amplitúdó** (rezonancia) alakul ki.
- Csillapítás esetében a rezonancia frekvencián kialakuló **kitérés amplitúdó nagysága korlátos**, és növekvő csillapítás esetén a kitérés amplitúdók csökkenő mértékűek.
- Példa: Egy kis méretű radiális szivattyú (WILO, BM-B32/130, **m= 35,5kg**) lágy megtámasztás (**$c \approx 35\text{kN/m}$**) és **40N** gerjesztőerő amplitúdó (0,1mm egytengelyűségi hiba a forgórészeknél) és 1,15mm statikus deformáció esetén:
 - $\Omega = 1$ és $c = 1$ [Ns/m]** (rezonancia) esetén a kitérés amplitúdó **$\sim 1,3\text{m}$** ,
 - $\Omega = 1$ és $c = 120$ [Ns/m]** (rezonancia) esetén a kitérés amplitúdó **$\sim 11\text{mm}$**
 - $\Omega = 8,4$ és $c = 120$ [Ns/m]** (aláhangelés) esetén a kitérés amplitúdó **$\sim 0,017\text{mm}$**
- A fáziskülönbség a gerjesztés és a rezgő tömeg kitérése kis frekvencián közelítőleg nulla, **azonos fázisban vannak**, illetve nagy frekvencián a fáziskülönbség π , **ellentett fázisban vannak**.



5. Zaj- és rezgés csökkentés (folytatás)

Rezgésszigetelés szempontjából fontos az alapnak átadott erő,

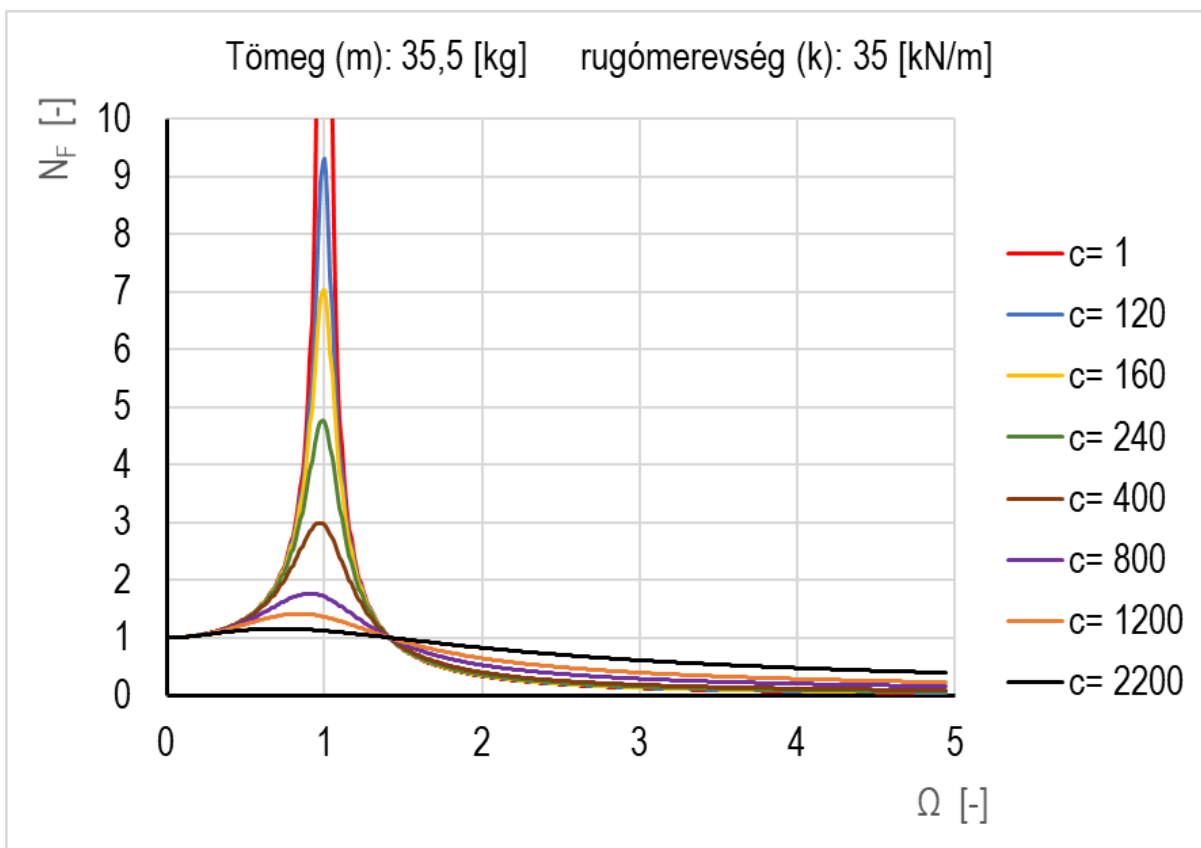


$$F_{alap} = F_c + F_k = c \frac{dx}{dt} + kx = \dots = \hat{F}_{alap} \sin(\omega t + \Phi_0) \quad \text{ahol} \quad \hat{F}_{alap} = \hat{x} \sqrt{k^2 + c^2 \omega^2}$$

Amelyből az erő amplitúdó erősítési tényező (N_F) a dimenziótlan frekvencia (Ω) függvényében,

$$N_F = \frac{\hat{F}_{alap}}{\hat{F}_g} = \frac{\sqrt{1 + \frac{c^2}{mk} \Omega^2}}{\sqrt{(1 - \Omega^2)^2 + \frac{c^2}{mk} \Omega^2}}$$

5. Zaj- és rezgéscsökkentés (folytatás)



Erő amplitúdó erősítési tényező (N_F) a dimenziótlan frekvencia (Ω) függvényében



5. Zaj- és rezgéscsökkentés (folytatás)

Megjegyzések:

- N_F a **dimenziótlan frekvencia (Ω)** illetve **c , m és k függvénye.**
- N_F értéke kicsi, **jó a rezgésszigetelés, ha a rezonancia frekvencia kisebb, mint a gerjesztési frekvencia (aláhangelés).**
- Érdemi csillapítás, a csillapítási tényező (c) értékétől függően, **$\Omega > 3 \dots 5$.érték esetén alakul ki.**
- Kis rezonancia frekvencia kis rugóállandó (k) és nagy tömeg (m) esetén biztosítható.
- Rezonancia felett ($\Omega > 1$) ha **nő c , nő N_F** , romlik a rezgésszigetelés.
- **Jó rezgésszigetelés: nagy m , lágy felfüggesztés (kis k), kis c és erős aláhangelés ($\omega_g > \omega_r$).**
- Túl kicsi c a felpörgés és leállás alatt kialakuló **tranziens amplitúdók nagy növekedését okozhatják.**
- Példa: Egy kis méretű radiális szivattyú (WILO, BM-B32/130, **$m = 35,5\text{kg}$**) lágy megtámasztás (**$c \approx 35\text{kN/m}$**) és **40N** gerjesztőerő amplitúdó) és 1,15mm statikus deformáció esetén:
 - $\Omega = 1$ és $c = 1$ [Ns/m] (rezonancia) esetén az erő amplitúdó $\sim 44,5\text{kN}$**
 - $\Omega = 1$ és $c = 120$ [Ns/m] (rezonancia) esetén az erő amplitúdó $\sim 373\text{N}$**
 - $\Omega = 8,4$ és $c = 120$ [Ns/m] (aláhangelés) esetén az erő amplitúdó $\sim 0,8\text{N}$ (34dB csillapítás)**
- Lakásokban a lépéshangszigeteléshez az úsztatott földem rezonancia frekvencia alap követelménye 60...80Hz, magasabb komfort 40...50Hz. A gépházban működő forgógép gerjesztési frekvenciák figyelembe vételével, **ez a feltétel gépház földem rezgésszigetelésére nem alkalmas.**



6. Összegzés

- A zajvédelmi tervezés során az **épületgépészet által diktált trendeket el kell fogadni.**
- A rendelkezésre álló zajcsökkentési módszerek alkalmasak a **legszigorúbb akusztikai elvárások teljesítésére.**
- A gyártóknak figyelembe kell venni az új elvárásokat, és az „ímmel-ámmal” felkínált zajcsökkentett berendezések helyett **rendes zajcsökkentett gépeket gyártani.** Fontos szempontok: hűtőközeg, kompresszor típus, kompresszor hatékony tokozása, léghűtők méretezése csendes üzemre (kis ventilátor fordulatszám, kis közeg sebesség, nagy hűtőfelület), megosztott kültéri egység (kompresszor zárt gépházban) konstrukciók kiterjesztése szélsőségesebb üzemi körülményekre.
- A zajvédelmi rendeleteket és határértékeket hozzá kell igazítani a változó körülményekhez. A **háztartások is zajos gépi berendezés felhasználók lettek.**
- A tervező jelenlegi eszköze a **komfort határérték** alkalmazása.
- Lakóépületekben működő gépházakban a jó rezgésszigetelés érdekében a **rezonancia frekvencia tervezési értéke 3...5 Hz.**
- A szigorúbb zaj és rezgésszigetelési elvárások teljesítése a **beruházás költségét jelentősen megnöveli,** amelyet a beruházónak kell tudomásul venni.

Köszönöm a figyelmet!