

## **Műszaki akusztika és zajcsökkentés (önálló felkészülést segítő tananyag)**

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

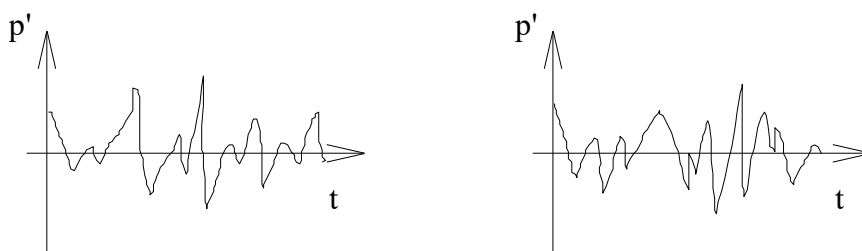
### 7. előadás

#### **Tartalom:**

- 7.1. Harmonikus analízis, hangspektrum (előadás vázlat)
- 7.2. Harmonikus analízis a mérés technikai gyakorlatban (előadás vázlat)
- 7.3. Hangok csoportosítása a spektrum alapján (előadás vázlat)
- 7.4. Hangmagasság, hangszín (előadás vázlat)
- 7.5. Mérőhangok az akusztikában (előadás vázlat)
- 7.6. Gyakorló feladatok

#### **7.1. Harmonikus analízis, hangspektrum**

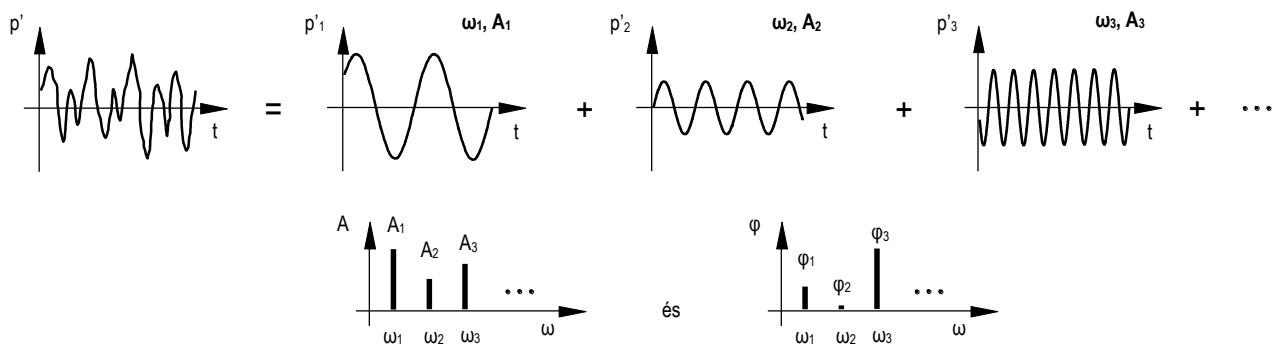
Első lépésben arra a kérdésre keressünk választ, mire alkalmazható a harmonikus analízis, miért fontos a hangszínkép az akusztikában és a mérnöki gyakorlatban. A hangtér tetszőleges pontjában a hangtéri változók időfüggvényei ( $p'(t)$ ,  $v'(t)$ , ...) a pontra vonatkozó összes alapvető információt tartalmazzák. Ennek ellenére számos esetben lényegesen eltérő hangterek között, közvetlenül az időfüggvényeik összehasonlításával alig lehet különbséget tenni. A következő ábrán a bal oldali diagram egy lánctalpas földmunkagéptől 50 m távol kialakuló hangtér hangnyomás-idő függvényét mutatja, a jobb oldalon egy kamarazenekar előadásán rögzített adatok láthatóak. A diagramokon az idő és hangnyomás skálák léptékei ugyanazok. Szemrevételezés alapján a két hangnyomás-idő függvény között érdemi különbség nincs, evvel szemben a hangforrások, a hang jellege, szubjektív hatása között lényeges különbség van. Kis túlzással úgy is fogalmazhatunk, hogy a hang, mint fizikai jelenség kivételével az erős dízel motor és a csikorgó lánctalpak kellemetlen zaja, illetve a hangszeres zene által keltett hangzás között semmilyen közös kapcsolódási pont nincs. Az időfüggvény annak ellenére, hogy a hangtérrel igen sok információt tartalmaz, közvetlen elemzésre, hangjelenségek vizsgálatára, tervezésére a műszaki gyakorlat szempontjából csak korlátozott jelentőséggel bír.



Hangnyomás az idő függvényében egy földmunkagéptől 50 m távol (bal oldal) és egy kamarazenekar előadásán (jobb oldal)

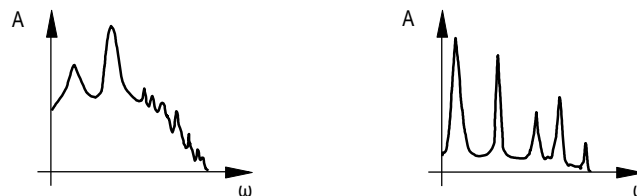
Emiatt szükség van egy olyan módszerre, amely az időfüggvényben rejtőző információt egyértelmű, világos formában tárja fel. Kiindulva abból a tényből, hogy egy adott pontban a hangtéri változók időfüggvényét egyensúlyi érték körüli (periodikus, vagy nem periodikus) ingadozás jellemezi, ígéretesnek tűnik egy olyan könnyen kezelhető, egyszerű matematikai alapfüggvényt keresni, amellyel középérték körüli ingadozás írható le. Sejthető, hogy a hang keletkezése, terjedése, elhalása és érzékelése során a hosszú ciklusok másként viselkednek, mint a rövidek. Így az eredeti függvényt különböző ciklusú periodikus elemekre bontva várhatóan hozzáférhetőek lesznek a korábban hiányolt információk és elemzési lehetőségek. A matematikában számos periodikus függvény ismert, de az esetünkben kitűzött cél figyelembevételével a túlnyomó többséggel valami gond van (nem analitikus, szakadása van, ...). A szinusz és koszinusz függvények viszont minden előző

feltételnek megfelelnek. Tovább növeli a szinusz és koszinusz függvények alkalmasságát, a harmonikus rezgések és -hullámok akusztikában betöltött fontos szerepe. Például véges méretű rugalmas testek szabad rezgései harmonikus rezgések, illetve ezek összetétele, továbbá ezek a harmonikus rezgések harmonikus hullámokat sugároznak le. Összefoglalva, a probléma megoldása érdekében ésszerűnek tűnik az eredeti hangtéri változó idő függvényt, különböző periódus idejű, amplitúdójú és kezdőfázisú harmonikus összetevőkre bontani. A következő ábra egy ilyen felbontás grafikonjait mutatja jelképesen.



Időfüggvény felbontása harmonikus összetevőkre

A szinusz és koszinusz periodikus függvények, így a teljes időfüggvényeik sok felesleges információt tartalmaznak. Egy tetszőleges időfüggvény előállításához éppen elegendő a szükséges számú harmonikus összetevő amplitúdó és kezdőfázis adatait ismerni a frekvencia függvényében. (Ez az adat tömörítés a harmonikus komponensekre bontás további előnye, amelynek az akusztikai jelek vizsgálatánál kevesebb, az adatátvitelben viszont nagy jelentősége van.) A frekvencia-amplitúdó és frekvencia-kezdőfázis függvényeket, az adott idő függvény amplitúdó- és fázisspektrumának (színképének) nevezzük. Az amplitúdó- és fázisspektrum együtt azonosítanak egy idő függvényt. A pontos matematikai meghatározást a következő részben mutatjuk meg. Gépészeti zajvédelemmel kapcsolatos problémák megoldásához sokszor elegendő az amplitúdóspektrum ismerete. A fázisspektrum használata gépészeti hibadiagnosztikában szokásos.



Hangnyomás amplitúdó spektrum a szögfrekvencia függvényében egy földmunkagéptől 50 m távol (bal oldalon) és egy kamarazenekar előadásán (jobb oldalon)

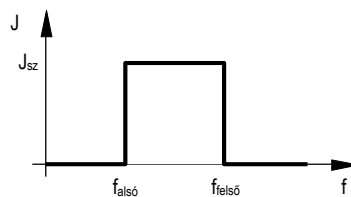
Visszatérve a kiinduló felvetéshez (földmunkagép és kamarazenekar hangterek összehasonítása), az ábra a földmunkagéptől 50 m távol és a kamarazenekar előadásán felvett időfüggvények amplitúdóspektrumát mutatja. Az ábra bal oldalán, a földmunkagép szélessávú spektruma zörej hangra utal. A szélessávú spektrum, nagy frekvencia tartományban nagy amplitúdójú összetevők folytonos megoszlása (ld.: az ábra bal oldalán a „domb” amiből a „tűskék” kinőnek). A kis frekvencián kimutatott nagy amplitúdójú összetevőket a dízelmotor hozza létre (fordulatszám arányos rezgések és kipufogás). A spektrumból kiolvasható pontos frekvencia és amplitúdó érték fontos alapadat például a motor füstgáz kipufogó hangtompító megtervezéséhez. Nagyobb frekvencián a rendszertelen kiugró összetevők sorozata a csikorgó lánctalp kellemetlen nagy frekvenciás zaja. Az ábra jobb oldali részén keskenysávú összetevőket tartalmazó spektrum látható, a szélessávú összetevő amplitúdója kicsi. A keskenysávú spektrum összetevő, kis frekvencia tartományban nagy amplitúdójú spektrum elemekből álló megoszlás (ld.: az ábra jobb oldalán a kiemelkedő csúcsok). (A vonalas spektrum, egy vagy több nagy amplitúdójú, diszkrét (elkülönített, egyedi) elemből álló megoszlás. Vonalas spektrumot hoz létre például az elektromos transzformátor. Vonalas spektrum előfordulása mechanikai hangkeltés esetén ritka.) A kis alapszámból kiemelkedő nagy amplitúdójú összetevők jelenléte valamilyen mechanikus, áramlási eredetű rezonáns

hangkeltésre utal. Ha számszerűen vizsgáljuk a spektrum összetevőket, hamar kiderül, hogy zenei hangról van szó. Az egymás után megszólaló hangok frekvenciája alapján az előadás hangfekvése, a frekvenciák viszonya alapján a darab hangneme, illetve egy hangszer szóló elhangzása alapján a felharmonikus összetevők jellegéből kis szerencsével még a megszólaló hangszerek fajtája (fafúvós vagy rézfúvós, ...) is kikövetkeztethető. Az említett két eset és az elemzési szempontok csak kiragadott példák, a harmonikus analízis használata a hangtani, illetve általában a mérnöki gyakorlatban (rezgésstan, optika, ...) számos további előnnyel jár. Jelezzük, hogy a hang keltése, terjedése szilárd közeg határán, csillapodása és érzékelése (szubjektív és műszeres) egyaránt frekvencia függő.

Tetszőleges, periodikus időfüggvény harmonikus összetevőit a függvény Fourier-sorával kaphatjuk meg. Tetszőleges, nem periodikus (aperiodikus) időfüggvény harmonikus összetevőinek meghatározásához a Fourier-integrált használjuk. A periodikus függvények spektruma általános esetben végtelen számú diszkrét összetevőt tartalmaz, a nem periodikus függvények spektruma folytonos megoszlású.

## 7.2. Harmonikus analízis a mérés technikai gyakorlatban

A mai mérés technikai gyakorlatban az időfüggvény spektrumát rendszerint digitális jelfeldolgozással határozzuk meg. A digitális jelfeldolgozás első lépése a digitális mintavételezés, amely során egy speciális elektronikai egység (adatgyűjtő) a vizsgált időben változó elektromos jelet (pl.: egy mikrofon kimenő jelét) időben egymás után nagyon gyorsan és sokszor megméri, és a mért értékeket eltárolja. A digitális mintasorozatból a digitális spektrum az előző részben említett elméleti háttér alapján kidolgozott numerikus DFT (Discrete Fourier Transform), illetve ennek gyorsított változatával FFT (Fast Fourier Transform) algoritmussal határozható meg. A harmonikus analízis numerikus alapműveleteiből (DFT, FFT) kiindulva számos további jelfeldolgozási módszer ismert. Az STFT (Short Time Fourier Transform), order tracking, és envelop detection módszereket a gépészmérnöki gyakorlat vonatkozásában a gépészeti zaj- és rezgésvédelem, illetve hiba diagnosztika területeken alkalmazzuk. Alkalmazási előnyei miatt a harmonikus analízist már jóval a numerikus jelfeldolgozás térhódítása előtt is széles körben használták az akusztikában. Ebben az időszakban az időfüggvény harmonikus komponensekre bontását sáváteresztő szűrősorozattal végezték el. A sáváteresztő szűrő az adott jelet ( $J$ ) csak meghatározott alsó és felső határfrekvencia között engedi át, ezen a tartományon kívül nem. A következő ábra egy elméleti szűrő karakterisztikát mutat a frekvencia függvényében.



Elméleti szűrő jelleggörbe (átmenő jel nagyság a frekvencia függvényében)

Ha ilyen szűrőkből a teljes vizsgált frekvencia tartományon úgy építünk sorozatot, hogy két szomszédos szűrő közül az alsó szűrő felső határértéke megegyezik a felette elhelyezkedő szűrő alsó határértékével, akkor a szűrőket egyenként beiktatva az időfüggvény sávós spektrumát kapjuk. A spektrum felbontását az alkalmazott szűrő sáv szélessége határozza meg. A sáváteresztő szűrőket a felső és alsó frekvencia határértékek viszonya alapján állandó abszolút és állandó relatív sáv szélességű kategóriákba soroljuk.

**Állandó abszolút sáv szélesség** esetén:  $f_{felső} - f_{alsó} = áll.$

**Állandó relatív sáv szélesség** esetén:  $\frac{f_{felső}}{f_{alsó}} = áll.$

Állandó abszolút sáv szélesség esetén a frekvencia felbontás értéke tetszőleges lehet, kitüntetett érték az egységnyi frekvencia (amplitúdó- és teljesítmény spektrum sűrűség). Állandó relatív sáv szélességnél gyakran

használt felbontás az oktávsváv és a tercsváv (harmad-oktávsváv), de ismertek további tört oktávsvávok is.

**Az oktávsvávot** meghatározó határfrekvenciák és a középfrekvencia (az alsó és felső határértékek mértani átlaga),

$$f_{okt f} = 2 f_{okt a} \quad f_{okt k} = \sqrt{f_{okt a} f_{okt f}} = \sqrt{2} f_{okt a} = f_{okt f} / \sqrt{2}$$

Szabványos oktávsváv középfrekvenciák pl., a ... 31,5 63 125 250 500 1k 2k 4k 8k 16k ... [Hz].

Az oktávsváv felbontás előnye, hogy a teljes hallható frekvencia tartományt 10 értékkel lefedi. Ez néhány spektrum esetén még kézzel is feljegyezhető mennyiségű adat. Hátrány viszont, hogy 500Hz-től felfelé a felbontás sáv szélessége kHz-es nagyságrendű, ami bizonyos esetekben (nagy frekvencián megjelenő vonalas spektrum összetevő jelenléte esetén) az alkalmazhatóságot erősen korlátozza. A problémát részben orvosolja az oktávsváv mértani haladvány szerinti 3 egyenlő részre bontása, a tercsváv bevezetése.

**A tercsvávot** meghatározó határfrekvenciák és a középfrekvencia,

$$f_{terc f} = \sqrt[3]{2} f_{terc a} \quad f_{terc k} = \sqrt{f_{terc a} f_{terc f}} = \sqrt[6]{2} f_{terc a} = f_{terc f} / \sqrt[6]{2}$$

Szabványos tercsváv középfrekvenciák pl., a ... 31,5 40 50 63 80 100 125 160 200 ... [Hz].

Az FFT közvetlen számítási eredménye állandó abszolút sáv szélességű felbontás, alkalmazása manapság teljesen általánossá vált. Megfelelően keskeny abszolút sáv szélességű felbontásból előállítható oktáv- illetve tercsváv spektrum, fordítva, főleg a magasabb frekvencia tartományokban nem. Ennek ellenére az oktáv- és tercsváv felbontás jelentősége töretlen. A szabványok ilyen felbontásban adják meg a zajok minősítésére szolgáló súlyozó értékeket, a szakkönyvek az akusztikai tervezési adatokat (hangelnyelési tényező, hanggátlás, ...) szintén oktáv- (esetleg tercsváv) középfrekvenciák függvényében közlik. Továbbá a műszaki gyakorlatban előforduló mechanikus berendezések (pl.: belsőégésű motor, ventilátor) spektruma kis frekvencia tartományban erősen tagolt, nagyobb frekvenciákon inkább egyenletes, így ezek vizsgálatánál az állandó relatív sáv szélességű felbontás használata, ha a kisebb adatmennyiség szempont, akár előnyös is lehet. Ezért az analizátorok, jelfeldolgozó szoftverek számos más lehetőség mellett általában az oktáv- és tercsváv felbontást is tartalmazzák.

### 7.3. Hangok csoportosítása a spektrum alapján

Egyféle csoportosítás szerint a különböző hangokat a spektrum alapján tisztahang, zenei hang és zöreij hang kategóriákba sorolhatjuk.

**Tisztahang:** Egyetlen  $\omega$  szögfrekvenciájú harmonikus összetevőből álló hanghullám. A tisztahang spektruma egy függőleges szakasz  $\omega$  szögfrekvencián (ld. ábra bal oldali része). Szubjektív megfigyelés alapján a tiszta hang fütyülő, bűgő jellegű.

**Zenei hang:** Tisztahangok kellemes együtt hangzást (konszonanciát) létesítő összetétele. Két tiszta hang együttes megszólalása szubjektív megítélés szerint akkor kellemes, ha a hangfrekvenciák aránya meghatározott értékekkel egyenlő. A zenei akusztikában a kellemes együtt hangzás jóságának megítélésére négy kategóriát (abszolút-, teljes-, közepes- és tökéletlen konszonanciák) vezettek be,

Abszolút konszonancia: oktáv (2:1), duodecim (3:1)

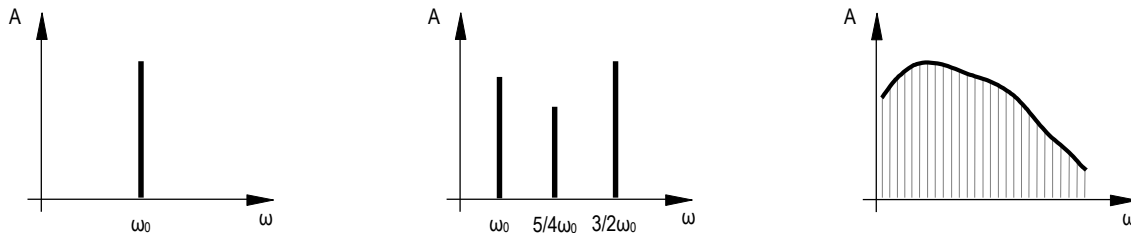
Teljes konszonancia: kvart (4:3), kvint (3:2)

Közepes konszonancia: nagy terc (5:4), nagy szext (5:3)

Tökéletlen konszonancia: kis terc (6:5), kis szext (8:5)

A zenei hang spektruma kettő vagy több függőleges szakasz meghatározott frekvenciákon. A következő ábra középső része egy dúr hármashangzat (prím (1:1), nagy-terc (5:4) és kvint (3:2)) összetevőit mutatja.

**Zörej hang:** Tisztahangok kellemetlen együtt hangzást (disszonanciát) okozó összetétele. Gyakorlatilag a tiszta hangok és a zenei hangok kivételével minden más hang. A zörej hang spektruma általában folytonos, az esetleges tiszta hangú összetevők frekvencia viszonya konzonancia feltételt nem teljesít. Zörej hang például egy ventilátor burkolatán lesugárzott zaj (ld.: ábra jobb oldali rész).



Hang spektrumok, tiszta hang (bal oldalon), dúr hármashangzat zenei hang (középen), ventilátor zörej hang (jobb oldalon)

#### 7.4. Hangmagasság, hangszín

A szubjektív akusztikai jellemzők a hangérzet és az objektív fizikai mennyiségek között határoznak meg kapcsolatot. Később ezekről a mennyiségekről részletesen lesz szó. Ebben a fejezetben a hangspektrummal kapcsolatban két szubjektív akusztikai fogalmat mutatunk be.

**Hangmagasság:** Egy hang magassága tiszta hang esetén a hang frekvenciája, összetett hang esetén a meghatározó összetevő frekvenciája. Érdekességként megemlíjtük, hogy abszolút hallással rendelkező személy pusztán a hallása segítségével tudja azonosítani egy megszólaló hang frekvenciáját. Ez feltételezhetően veleszületett tulajdonság, és a népesség elenyésző százaléka rendelkezik vele. A relatív hallás két hangfrekvencia viszonyának érzékelése, például egy kvint hangköz hallása. Az emberek nagy részének jó a relatív hallása, amelyre elmélyült zenei képzettség nélkül is szert lehet tenni.

**Hangszín:** Egy hang hangszínét a meghatározó frekvencia összetevő mellé társuló további összetevők száma és ezek egymáshoz viszonyított frekvencia és amplitúdó aránya határozza meg. A hangszín teszi lehetővé, hogy ugyanazt a hangmagasságot (frekvenciát) megszólaltató hegedű, klarinét és harsona hangját akkor is meg tudjuk különböztetni, ha a megszólaló hangszer és játékosát nem látjuk.

#### 7.5. Mérőhangok az akusztikában

Akusztikai jelenségek, eszközök, hangterek vizsgálata során speciális mérőhangokat használunk.

**Tisztahang:** Az egyik legfontosabb, alapvető mérőhang az akusztikában a kitarított tisztahang. Alkalmazásával nagy jel-zaj viszony érhető el, viszont ha például a teljes hallható tartomány vizsgálatára van szükség, a mérés hosszú időt igényel. (Jel-zaj viszony, a mérés szempontjából hasznos jel és a mérést zavaró zaj hányadosa általában szintben kifejezve. Szint fogalmát ld. később.)

**Sepert szinus:** A sepert szinus mérőhang egy olyan tisztahang, amelynek a frekvenciája a vizsgálati tartomány mentén folyamatosan változik. Sepert szinus használatával nagy jel-zaj viszony érhető el, és a mérési idő nagy frekvencia tartomány esetén sem lesz hosszú. Használata azonban adatgyűjtős mérőrendszert igényel, illetve nagy időállandójú akusztikai rendszer vizsgálatánál a rövid mérőjel időtartam mérési hibát okozhat.

**Fehérzaj:** A fehérzaj egy olyan véletlenszerűen változó hangjel, amely spektrumában megfelelő átlagolási idő figyelembe vételével minden egyes frekvencia összetevő nagysága ugyanakkora. Az elnevezés a fénytárból származik, ahol a fehér az összes szín keveréke. A fehérzaj spektruma a frekvencia tengellyel párhuzamos

egyenes. Fehérzaj jellegű hang az időben kitarított események közül például a nagy nyomású levegő lefúvatás során keletkező zaj (szubjektív hangérzet alapján a sístergő jellegű hangok), illetve impulzusos események közül a taps. Fehérzaj gerjesztés esetén a hangrendszer korlátozott átviteli képessége miatt általában a kis és nagy frekvenciák esetén kisebb lesz a jel-zaj viszony, viszont a mérési idő rövid, és kitarított jel esetén a berezgési idővel sem lesz gond. A jel-zaj viszony javítása érdekében szokásos még a fehérzaj oktáv, illetve tercsáv szűrt változatának használata.

**Rózsaszínű zaj:** A rózsaszínű zaj egy olyan szélessávú hangjel, amelynél a frekvencia növekedésével a spektrum összetevők nagysága csökken. A zajspektrum alakja állandó abszolút sáv szélességű frekvencia felbontásban negatív meredekségű egyenes, állandó relatív sáv szélességű felbontásban vízszintes egyenes. A megnevezés a fénytárból kölcsönzött analógia, a fehér és piros (nagy hullámhosszú, kis frekvenciájú) színek keveréke rózsaszínű. A kis frekvencián az összetevők kiemelésével, a hangmérés jel-zaj viszonya javítható.

**Impulzusos zaj:** Rövid ideig tartó (~10ms, vagy rövidebb), nagy amplitúdójú mérőhang alkalmazásával lehetővé válik a hangterjedés időbeli követése, az impulzusos zaj akusztikai szempontból értékes vizsgálatok végzésére alkalmas. Így például teremakusztikában hangvisszaverődési folyamatok, vagy elektroakusztikai hangrendszerek fázis helyességének vizsgálatánál használják. Az elméleti egységimpulzus spektruma vízszintes vonal, de a valóságos impulzusos zajkeltők (pl.: taps, puskalövés) spektruma is szélessávú. Hátrány, a kis időtartam miatt, a mérés során rendszerbe bevihető kis hangenergia (rossz jel-zaj viszony), és praktikusán nehéz impulzusos zajforrást előállítani. A gyakorlatban alkalmazható, veszélytelen hangforrások zaj impulzusa túl hosszú és kicsi az amplitúdója. Alkalmazási előnyei miatt az impulzus választ az akusztikai méréstechnikában ma már inkább folyamatos fehérzaj gerjesztéssel és statisztikus jelfeldolgozási módszerek alkalmazásával állítjuk elő.

## 7.2. Gyakorló feladatok

Gy.1. Írja fel az oktáv- és tercsáv definícióját, és adja meg az adott sávhoz tartozó középfrekvencia értékét!

-----