

A hang mint mechanikai hullám

I. Célkitűzés

Hullámok alapvető jellemzőinek megismerése. A hanghullám fizikai tulajdonságai és a hangérzet közötti összefüggések bemutatása. Fourier-transzformáció alapjainak bemutatása, hangok spektrumának meghatározása.

II. Elméleti összefoglalás

A. Mechanikai hullámok

A mechanikai hullámban egy közegben zavar terjed, miközben a közeg részecskéi egy egyensúlyi helyzet körül rezegnek. A hullám létrejöttéhez szükséges egy közeg, melyben zavart lehet keltetni és egy fizikai folyamat, mely révén a közeg alkotóelemei egymást befolyásolni tudják, vagyis a zavar terjedéséhez a rezgésállapotot át tudják adni.

A mechanikai hullámok két fő csoportja

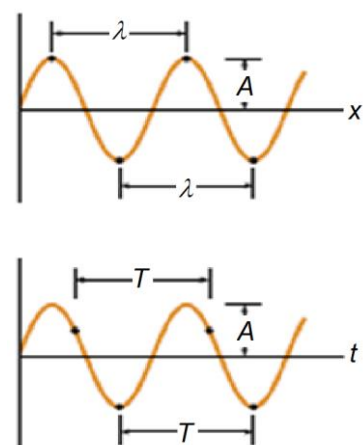
(1) *transzverzális hullámok*, mely esetben a közeg részecskéi a hullám terjedési irányára merőleges irányban mozognak. Ebbe a csoportba tartozik a kifeszített húron terjedő hullám.

(2) *longitudinális hullámok*, mely esetben a részecskék mozgásának iránya párhuzamos a hullám terjedési irányával. A hang is longitudinális hullám, a közegben terjedő zavar a részecskék sűrűsödéséből – ritkulásából, vagyis a közeg nyomásának változásából adódik. A hallás során a hanghullámok hatására dobhártyánk rezgéseket végez. E rezgéseket a hallócsontocskák átviszik az ovális ablakra, és a csiga folyadékja is rezgésbe jön. Adott frekvenciájú hang az alaphártyán elhelyezkedő szőrsejteknek csak egy kis csoportját hozza rezgésbe, így gerjesztve az idegvégződéseket, melyekről az ingerület az agyba jut.

B. Hullámok fizikai jellemzése

A hullámok jellemzésére használt paramétereket az ábrán jelöltük.

- (1) *hullámhossz* (λ): két azonos mozgásállapotú pont legrövidebb távolsága.
- (2) *amplitudó* (A): a közeg részecskéinek egyensúlyi helyzet-től mért maximális kitérése.
- (3) *periódusidő* (T): a tér egy adott pontjában a rezgésállapot maximumai között eltelt legrövidebb idő.
- (4) *frekvencia* (f): a periódusidő reciproka.
- (5) a hullám v *sebességén* a közegbeli zavar terjedésének sebességét értjük. Ez a sebesség a közeg tulajdonságaitól függ. Pl. hang sebessége normálállapotú levegőben 343 m/s, vízben 1493 m/s, vasban 5950 m/s.



Ezen mennyiségek között fennálló összefüggések:

$$f = \frac{1}{T}, \quad v = f \cdot \lambda = \frac{\lambda}{T}$$

A hullámban nem az anyagi részecskék terjednek tovább, hanem a rezgésállapot, illetve a rezgési energia. A hullám intenzitásán az egységnyi felületen (q) egységnyi idő (t) alatt áthaladt energia (E) mennyiségét értjük. A hullám intenzitása a részecskék rezgési amplitúdójának, illetve a nyomásamplitúdójának négyzetével arányos.

$$I = \frac{E}{q \cdot t} = \frac{1}{2} \cdot \frac{p_{\max}^2}{\rho c} = \frac{1}{2} \rho c A^2 \omega^2$$

C. A hang jellemzői

A hangok érzeteink alapján hangosság, magasság és színezet tekintetében különböznek, mely tulajdonságoknak az alábbi fizikai jellemzők felelnek meg:

(1) A *hangmagasság* a rezgés frekvenciájától függ, magasabb hangnak nagyobb frekvencia felel meg.

(2) Fizikai *hangerősségen*, vagy hangintenzitáson a hanghullám intenzitását értjük, mely a rezgések amplitúdójától függ. Az emberi fül nagyon széles tartományban (10^{-12} W/m^2 és 10^0 W/m^2 között) érzékel, ezért a hangerősséget egy logaritmikus skálán, az ún. decibelskálán mérjük. A viszonyítási alap az 1000 Hz-es hangnak megfelelő hallásküszöb, amely $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ -nek felel meg. A hang intenzitását decibelben az

$$n = 10 \cdot \lg \frac{I}{I_0}$$

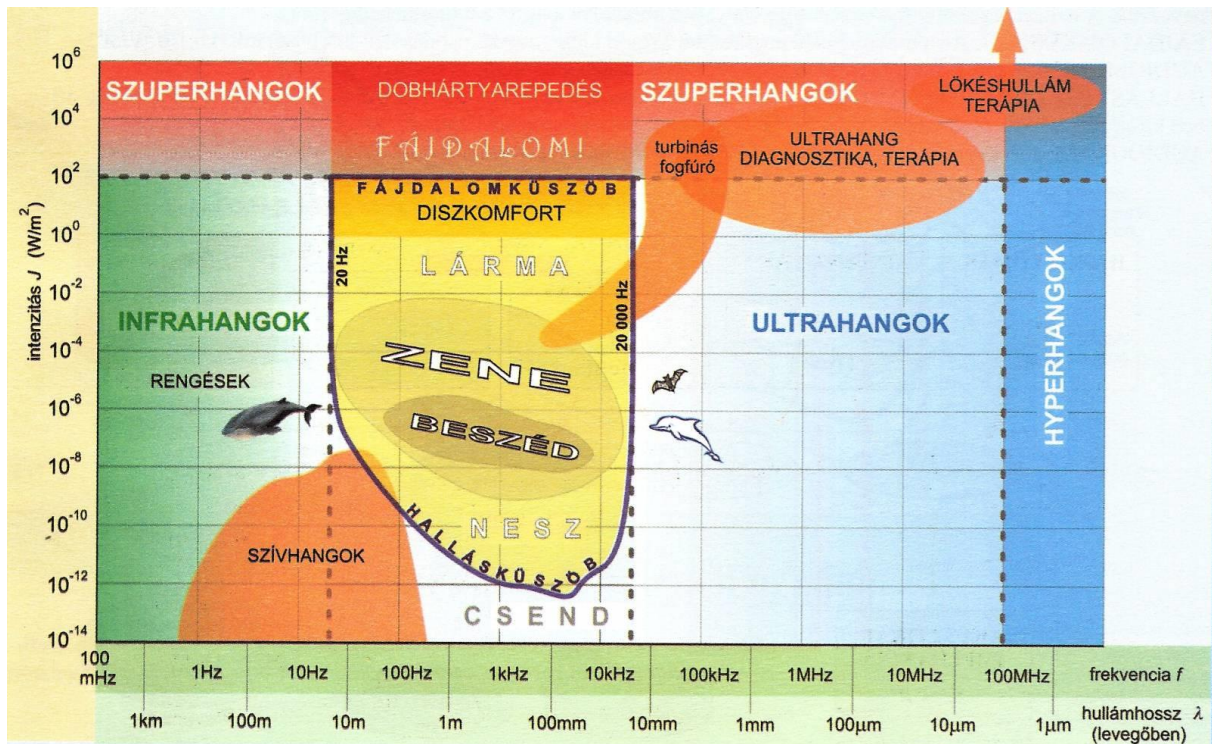
összefüggés adja meg. Mivel az intenzitás a nyomás négyzetével arányos, ez az összefüggés az

$$n = 10 \cdot \lg \left(\frac{p}{p_0} \right)^2 = 20 \cdot \lg \frac{p}{p_0}$$

alakban is felírható.

Ezen a skálán a hallásküszöbnek $n = 10 \cdot \lg \frac{10^{-12} \text{ W/m}^2}{10^{-12} \text{ W/m}^2} = 0 \text{ dB}$, a fájdalomküszöbnek $n = 10 \cdot \lg \frac{10^0 \text{ W/m}^2}{10^{-12} \text{ W/m}^2} = 120 \text{ dB}$ felel meg. A hangosság (érzet, szubjektív) függ a hangintenzitástól (inger, objektív), de a hang frekvenciájától is (1. ábra).

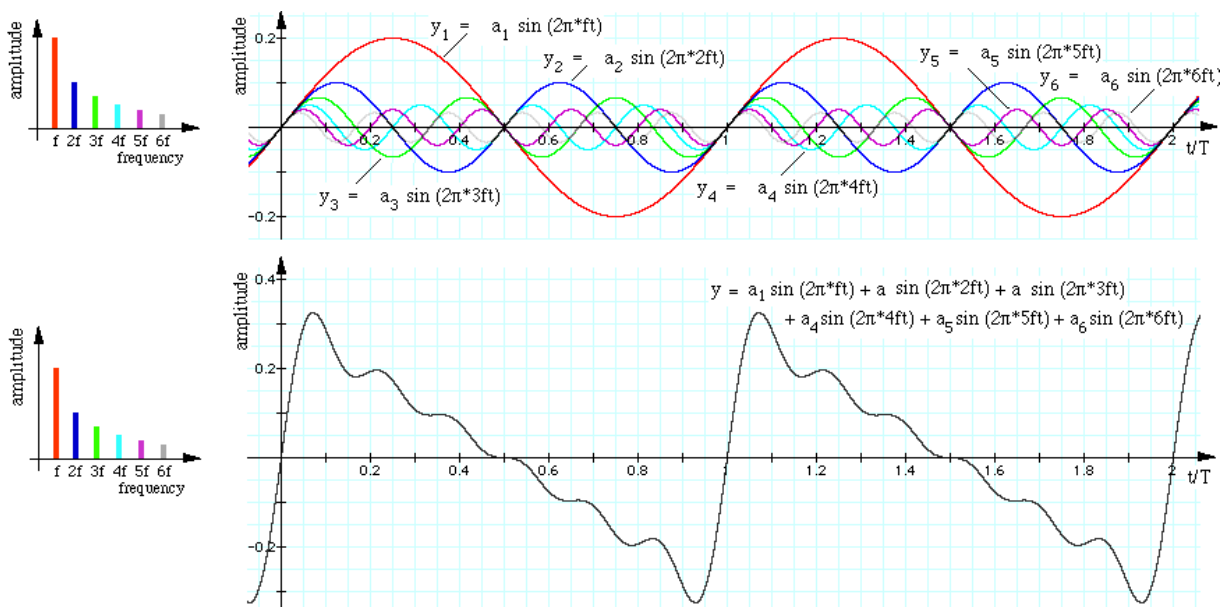
(3) A *hangszínezet* az alaphanghoz csatlakozó felhangok frekvenciája és viszonylagos erőssége, vagyis a hang frekvenciaspektruma határozza meg, melyet Fourier-transzformációval állítunk elő.



1. ábra. A hangosság függése a hang intenzitásától és a frekvenciától

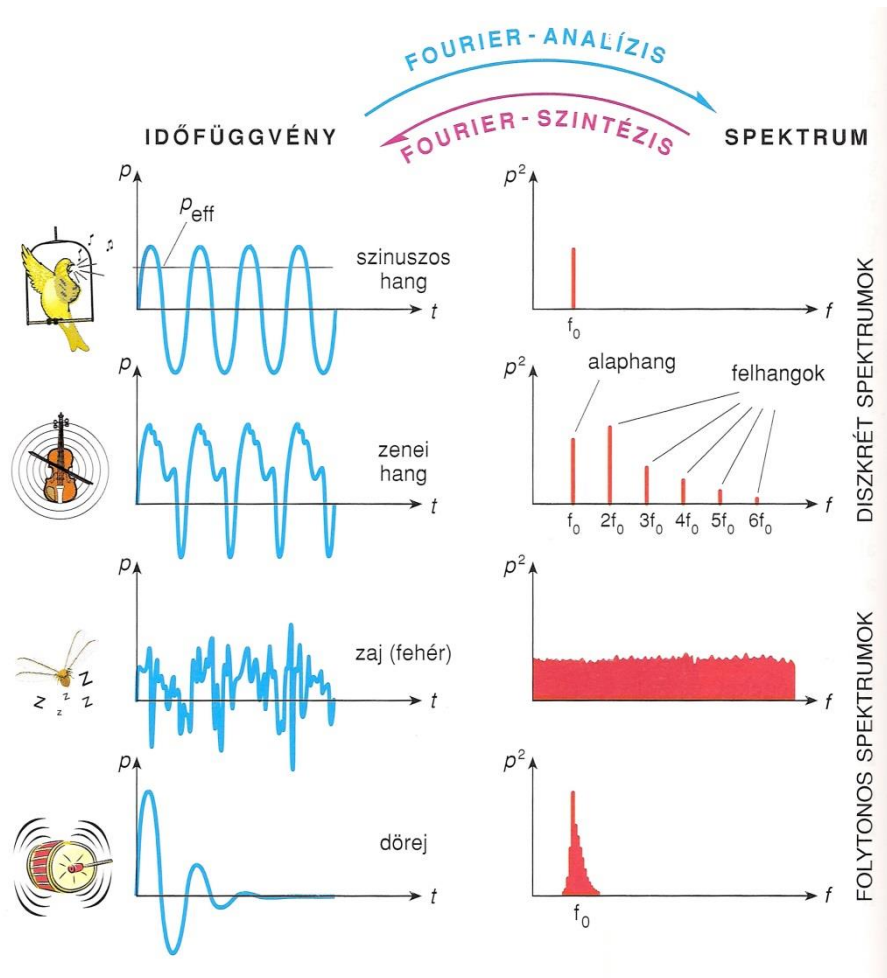
D. Fourier-transzformáció

Időben változó jeleket előállíthatunk szinuszos rezgések összegeként. Ha a jel periodikus, akkor a periódusnak megfelelő felharmonikusok alkotják a Fourier-komponenseket (2. ábra). Tetszőleges függvény esetén a komponensekre bontást a Fourier-transzformáció szolgáltatja. Az egyes komponensek nagyságát és egymáshoz viszonyított fázisát a jel spektruma adja.



2. ábra. Fourier-analízis: egy periodikus jel fölbontása szinuszos komponensekre

A hanghullámok többsége nem szinuszos lefutású. A 3. ábra különböző hangok időbeli képét és spektrumát mutatja.



3. ábra. Hangok időbeli képe és spektruma

III. Feladatok:

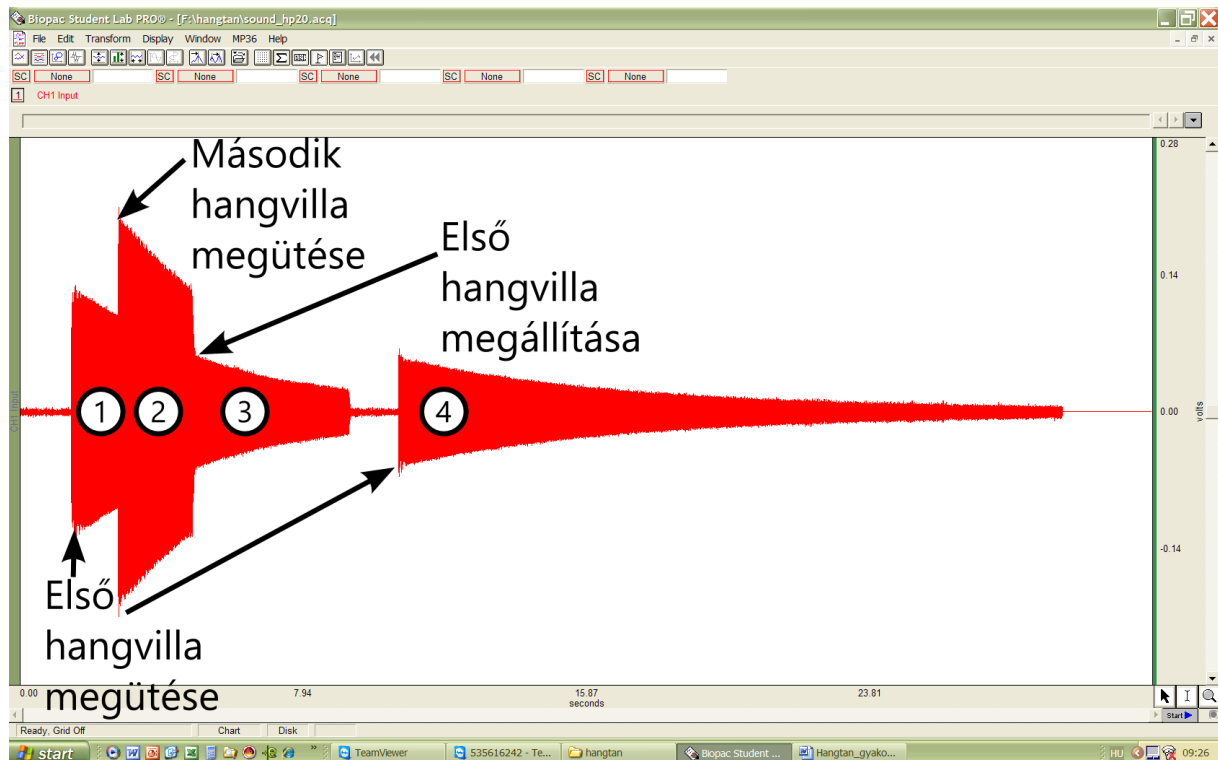
A BSL Pro program elindítása után nyissa meg a *sound.acq* nevű regisztrátumot:

A. Időbeli vizsgálatok

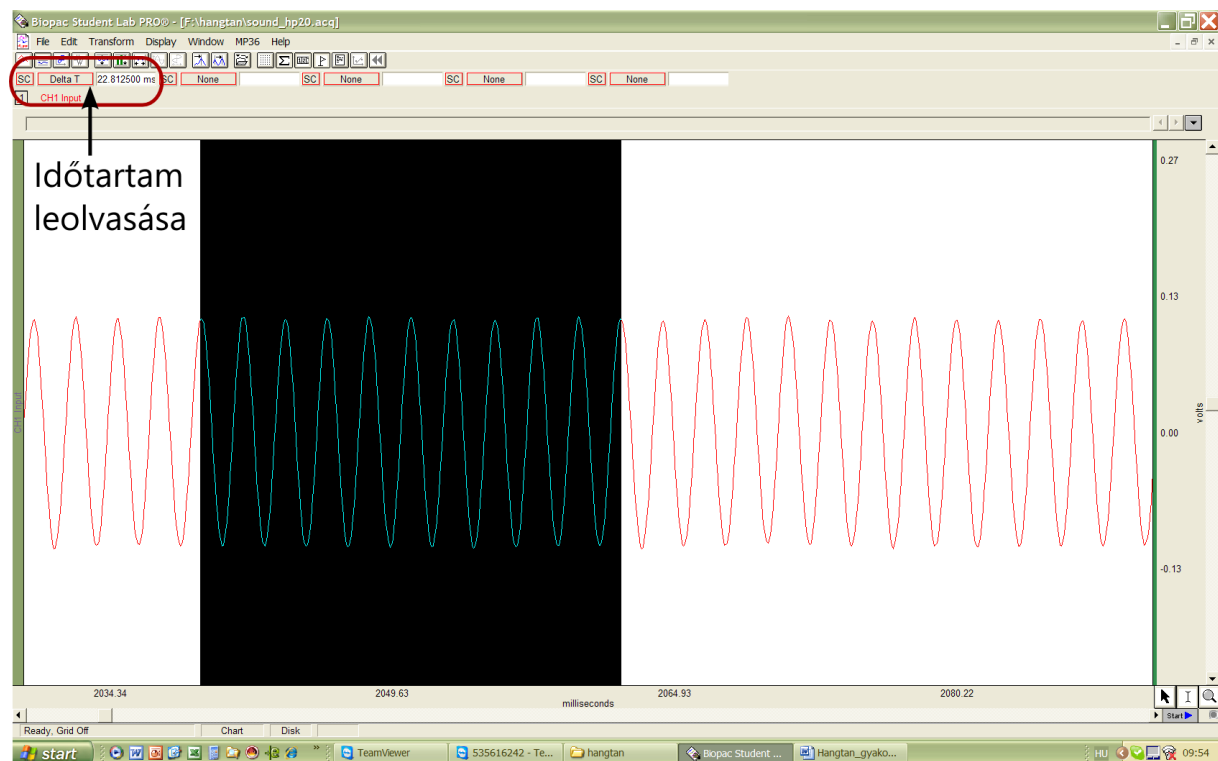
A felvételen a jelölt tartományokban (4. ábra): (1) csak az 1-es hangvilla szól; (2) mindkét hangvilla szól; (3) csak a 2-es hangvilla szól; (4) csak az 1-es hangvilla szól.

Ha az 1-es, illetve 3-as tartományokat kinagyítja, akkor szinuszos hullámot lát (5. ábra). 10 periódus kijelöléséből határozza meg a szinuszhullám periódusidejét! Az értéket rögzítse a jegyzőkönyvben! A periódusidő inverze a frekvencia, ezeket az értékeket is rögzítse a jegyzőkönyvben (figyeljen a mértékegységekre: ms, Hz)!

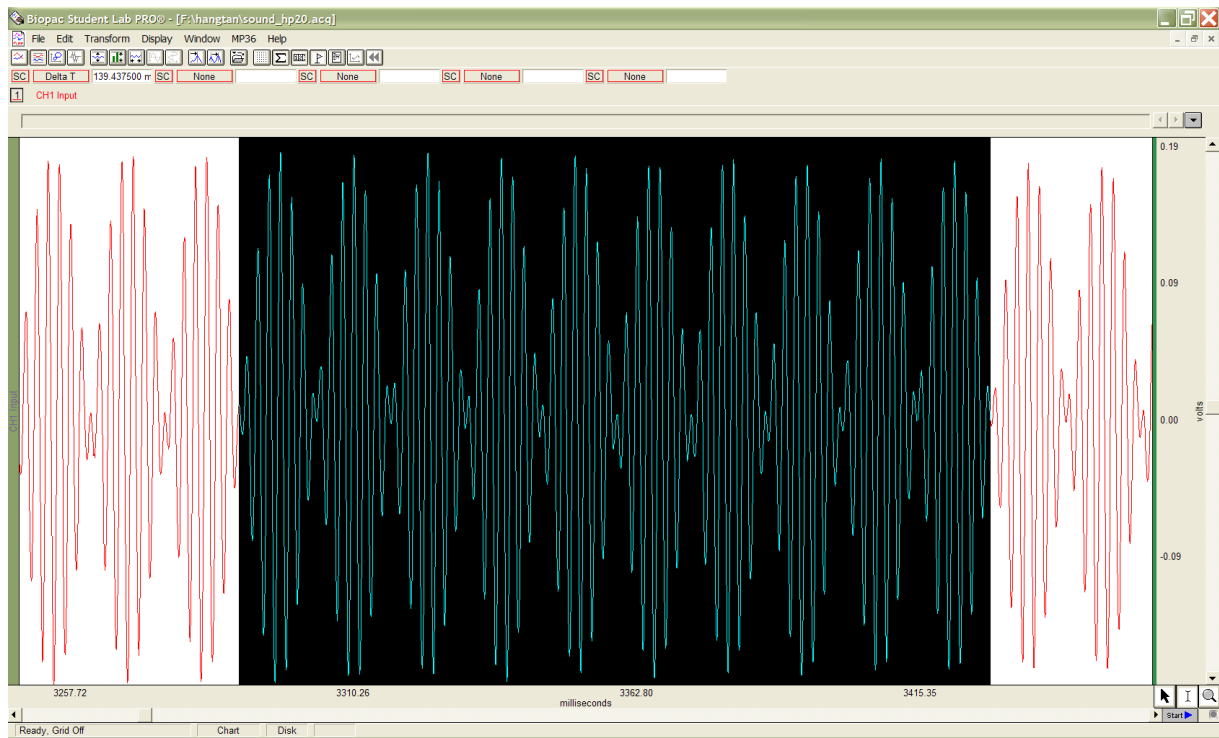
Amikor mindkét hangvilla szól (2-es tartomány), a két hullám összeadódik, és a lebegés jelenségét figyelhetjük meg (6. ábra). Határozza meg a lebegés periódusidejét (ismét 10 periódus kijelöléséből), illetve frekvenciáját. Az értékeket rögzítse a jegyzőkönyvben! Milyen kapcsolatot lát a lebegés frekvenciája, illetve az egyes hangvillák frekvenciája között?



4. ábra. A főlvetel szakaszai



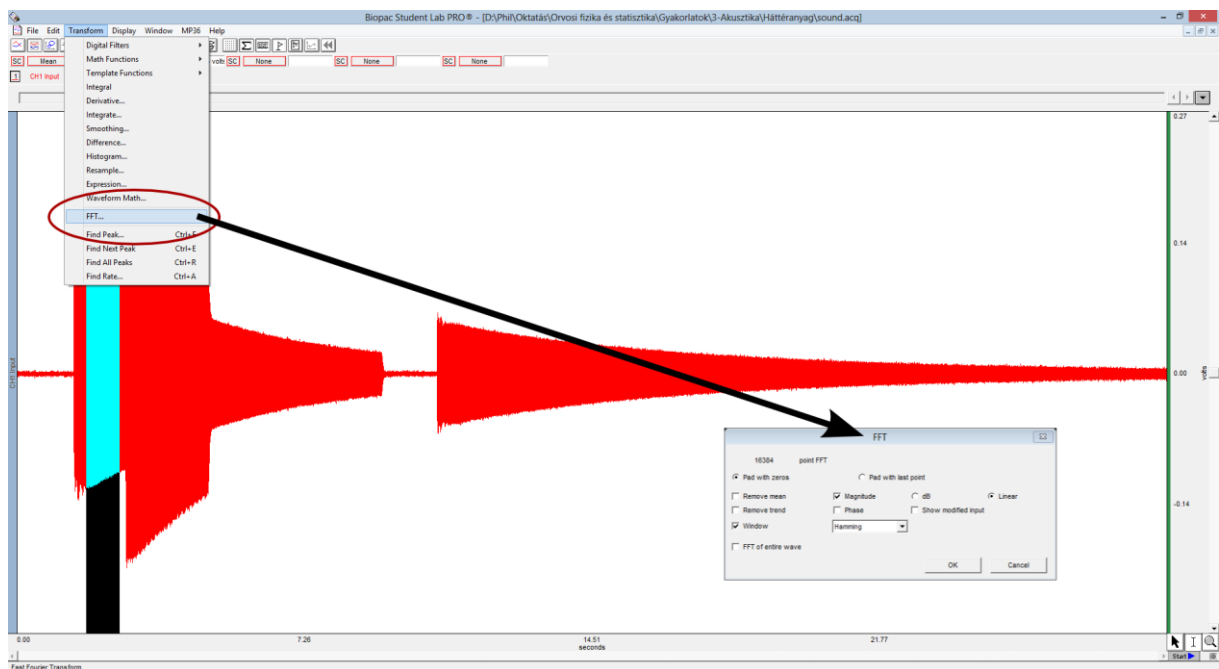
5. ábra. A periódusidő meghatározása



6. ábra. A lebegés jelensége

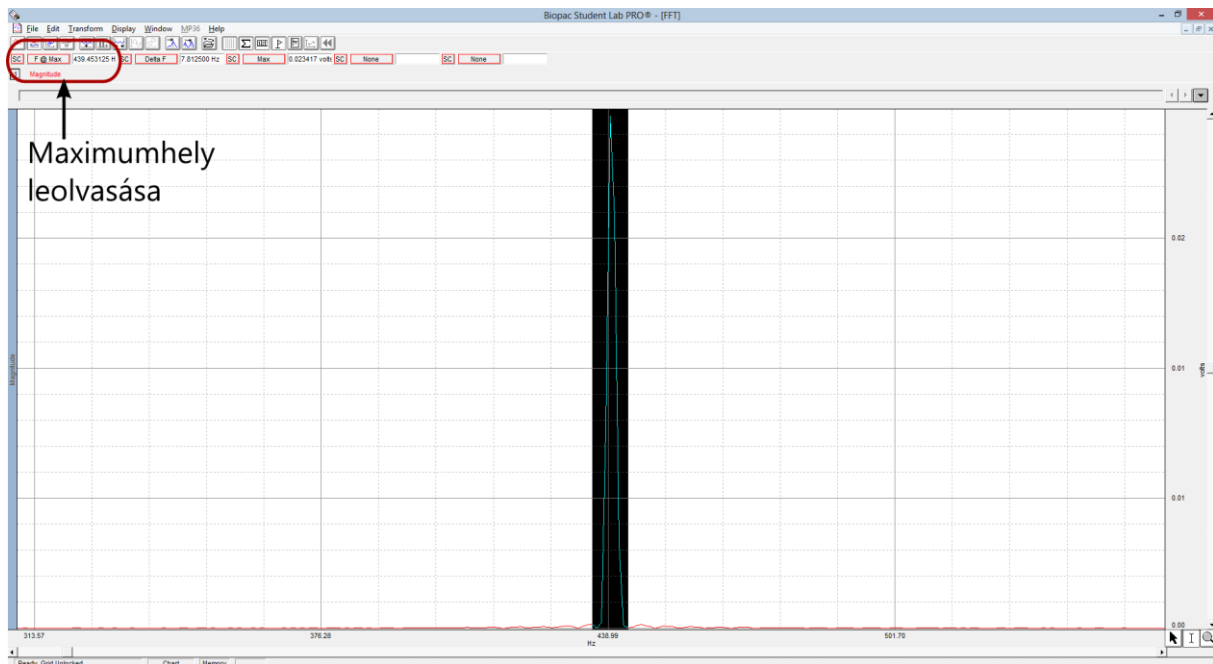
B. Spektrumvizsgálatok (Fourier-transzformált)

Az egyes tartományok spektrumát (frekvencia-összetevőit) a Fourier-transzformáció (FFT) segítségével állítjuk elő. Jelöljön ki egy tartományt, majd a *Transform » FFT* paranccsal előállíthatja az adott tartomány Fourier-transzformáltját (7. ábra). A felugró ablakban állítsa be, hogy az ábrázolás lineáris skálán történjen.



7. ábra. A Fourier-transzformált előállítása

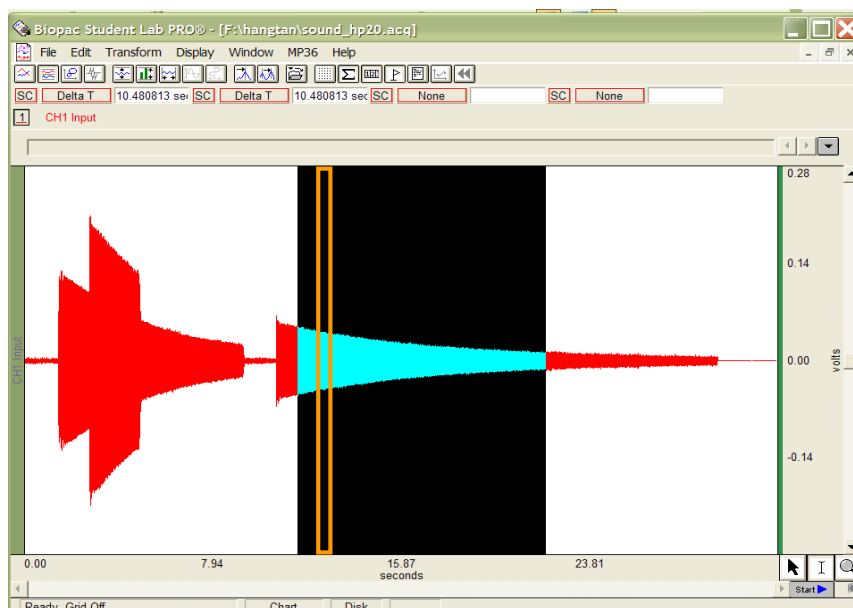
A spektrumban egy csúcsot fog látni (hiszen egy hangvilla szól, egy szinuszos hullám van jelen), olvassa le, hogy mely frekvenciaértéknél van a maximum (mérőablak, $F @ Max$ – lásd 8. ábra) és az értéket rögzítse a jegyzőkönyvbe! Hasonló eljárással vizsgálja meg a 2-es és 3-as tartomány spektrumát is!



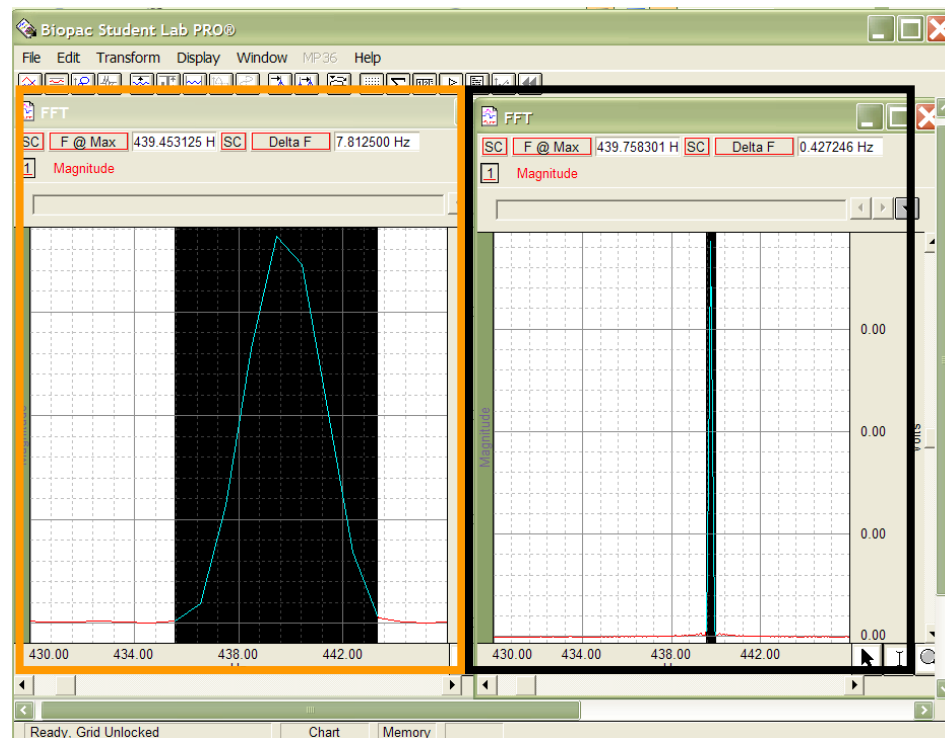
8. ábra. A csúcs frekvenciájának leolvasása a spektrumban

A Fourier-transzformáció által meghatározott spektrumban a frekvenciafeloldás (a csúcsok szélessége) az időbeli jel hosszától függ.

A 4-es tartománybeli jelből készítsen Fourier-transzformáltat, ha a kijelölt szakasz hossza 0,5 s, illetve ha 10 s (9. ábra). Hasonlítsa össze a két spektrumot (lásd 10. ábra – a csúcs helyét és szélességét rögzítse a jegyzőkönyvben)!



9. ábra. A spektrumhoz kiválasztandó szakasz

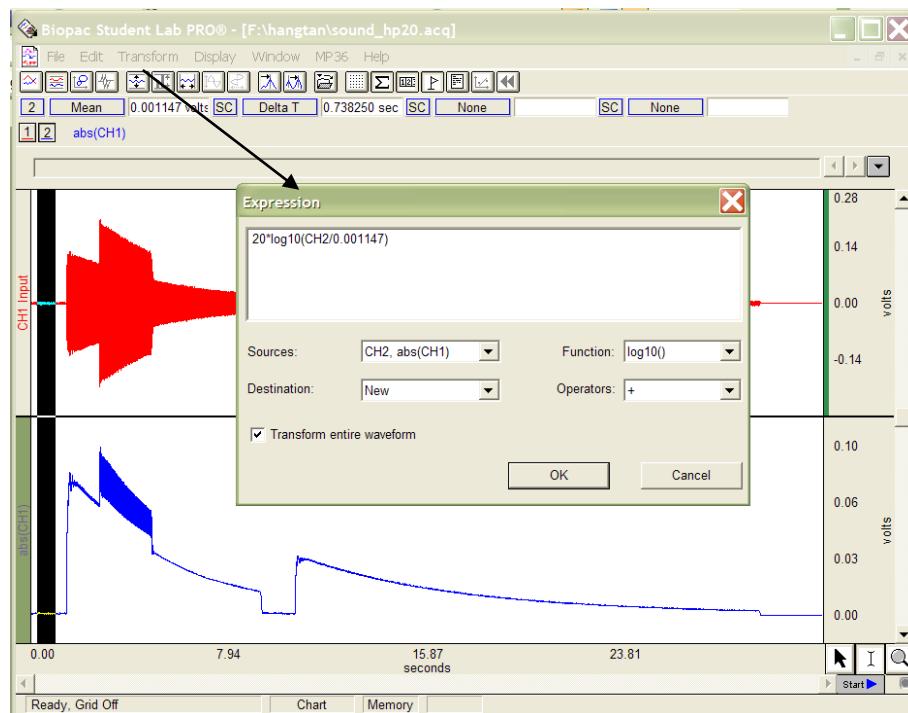


10. ábra. A különböző hosszúságú (0,5 s és 10 s) mintákból kapott spektrumok összehasonlítása

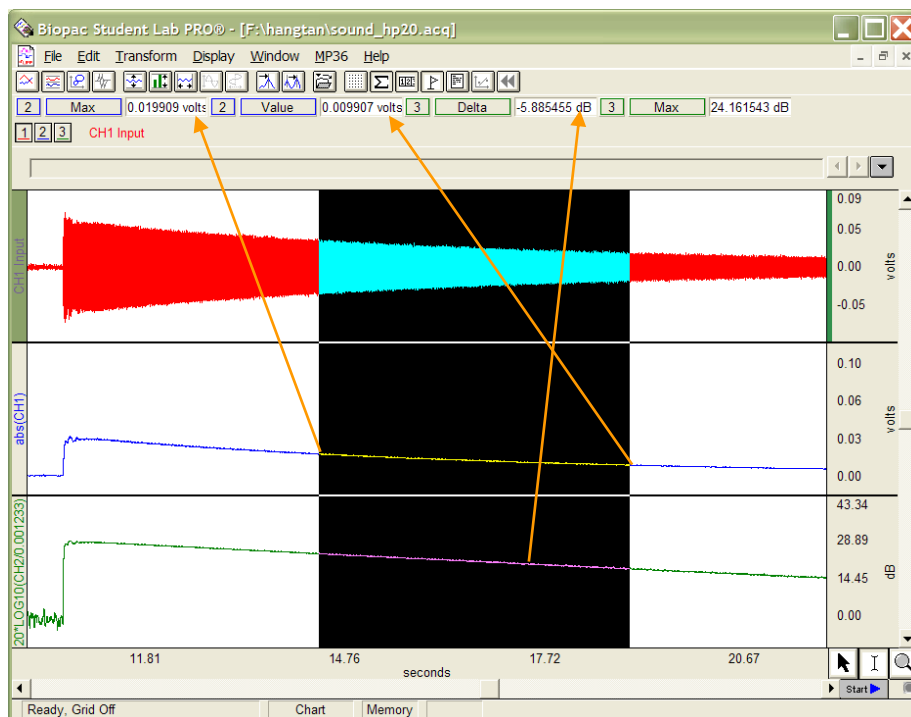
C. Csillapodó rezgés vizsgálata

A 4-es tartományban csak az 1-es hangvilla szól, a hangvilla rezgésének csillapodása miatt egyre gyengülő hangon. A további feladatokhoz előállítottuk a 2. csatornára a hanghullám nyomásgörbéjének burkolóját abszolútértékképzéssel és simítással.

Határozza meg a háttérnek megfelelő jel értékét egy olyan szakaszból, ahol nem szól hangvilla (11. ábra). A hangvilla relatív hangerősségét a dB skálán ehhez a háttérértékhez viszonyítjuk. A *Transform » Expressions* paranccsal állítsa elő a jel hangerősségét a 3. csatornára (11. ábra). Ebből hangerősség-grafikonból határozza meg a csillapodó manőver legnagyobb értékét (dB-ben). A 2-es csatorna jeléből határozza meg a jel amplitúdójának felére csökkenéséhez szükséges időt (lásd 12. ábra). Határozza meg azt is, hogy amíg az amplitúdó felére csökken, hány dB-lel csökken közben a jel. (A legutóbbi kérdésre akár a Biopac program grafikonjaiból, akár az elméleti formulából is meghatározhatja a választ.)



11. ábra. A háttérnyomás meghatározása és a hangerősség kiszámítása



12. ábra. A csillapodás vizsgálata