

Szivacs hangelnyelésének mérése Kundt-csőben H09



Hangelnyelő anyagok, felületek, falburkolatok csillapítási tulajdonságai fontosak az akusztikai tervezők számára. Kétféle mérés tipikus a hanghullámok irányát illetően.

Az egyik, amikor mindenféle irányból érkeznek a szabálytalan hullámok (látszólag) véletlenszerűen, a másik —ez következik most— a szabályos hullámok merőleges beesése.

A szigorúan egyirányú, szabályos síkhullámokat egy hosszú, egyenes, (többnyire kör) keresztmetszetű, úgynevezett Kundt-csőben szokták kelteni. Mi most azt a változatát használjuk, amikor a cső egyik végéről indítjuk a hullámokat, a másik vége pedig keményen be van fenekelve. A lezáró felületre helyezük vizsgálandó anyagmintát, és a beérkező ill. visszaverődő hullámok amplitúdójának hányadosából következtetünk a minta

csillapítására.

Mi most azt a változatát használjuk, amikor a cső egyik végéről indítjuk a hullámokat, a másik vége pedig keményen be van fenekelve. A lezáró felületre helyezük vizsgálandó anyagmintát, és a beérkező ill. visszaverődő hullámok amplitúdójának hányadosából következtetünk a minta csillapítására.

A Kundt-csőben haladó hullámok szabályossága két okból is hasznos.

Jóldefiniált mérési körülményeket teremt. Így a vizsgált elnyelőt egyenes, egyirányú hang éri.

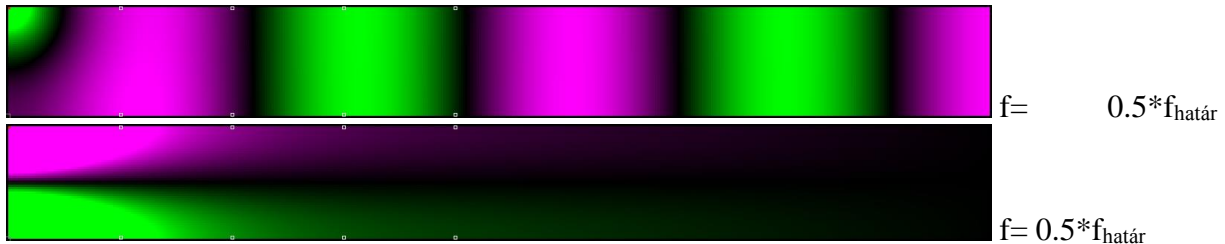
Másrészt meg akarjuk mérni a hangot egy mikrofonnal. Ha egy keresztmetszet mentén mindenhol azonos a nyomás, akkor az egyetlen mikrofonpozícióval megmérhető. Ellenkező esetben vesződhetünk az átlagolással.

A hullámok terjedése párhuzamos csövekben (Avagy mitől lesznek egy csőben szabályosak a hullámok?)

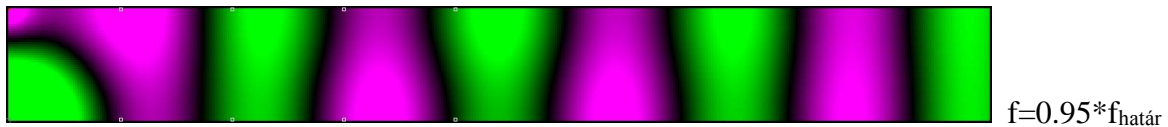
Ha egy hosszú, kör keresztmetszetű csőben a légoszlopot hangszóróval gerjesztjük, akkor csőben hullámok indulnak. A cső átmérőjéhez képest hosszú hullámok síkhullám formájában képesek a csőben terjedni.¹ Ha azonban a gerjesztési frekvenciával fölénk megyünk egy bizonyos határnak, akkor a hullámfrontok merőben megváltoznak. Az eddigi szép, szabályos hullámok közé mindenféle kacifántosak vegyülhetnek.

¹ Ettől csak a csőfal melletti 0.05...0.3mm-ben van eltérés, mert ott a viszkózus súrlódás akadályozza a levegő mozgását.

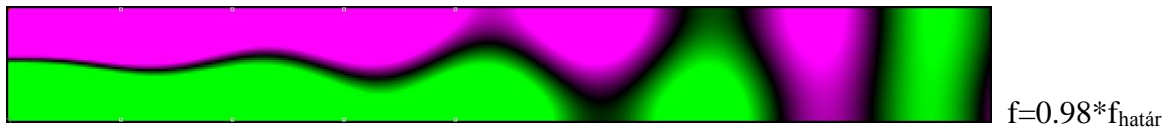
A frekvencia-kritérium egyszerűen fogalmazható meg: A vizsgálati frekvencia legyen kisebb, mint a csőnek a legalacsonyabb keresztirányú rezonanciája. Ez egy elméleti határ, amit be kell tartani egy Kundt-cső használata során. A gyakorlati határ ennél kicsit szigorúbb. Hogy miért, azt mindjárt megértjük. Lássuk a következő ábrákat!



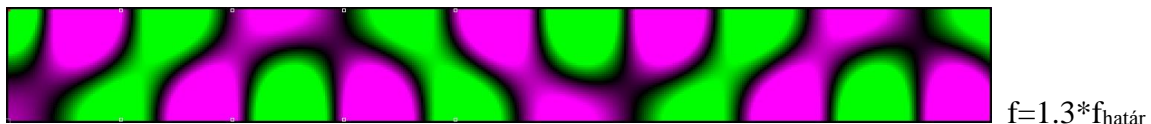
1. ábra Hullámok terjedése a Kundt-csőben balról jobbra. Békés, alacsony frekvencián a hullámfront azonnal kisimul féloldalas gerjesztés mellett is. (fent) Ugyanekkor antiszimmetrikus gerjesztéssel térben exponenciálisan lecsengő megoldást láthatunk (lent), ami nem szállít energiát.



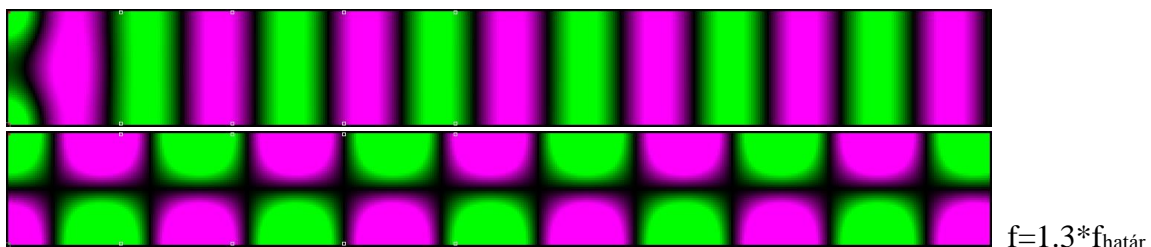
2. ábra A keresztirányú rezonancia közelében már lassabban igazodnak ki a hullámfrontok. (féloldalas gerjesztés) Az exponenciális tag itt erősebb, és hosszabban elnyúlik.



3. ábra Elkezd a levegő keresztben rezonálni. A cső elején a levegő főleg a csőtengelyre merőlegesen mozog. (féloldalas gerjesztés).



4. ábra Itt már megjelenik egy új hullámforma, és együtt utazik a régivel. Mindkettő képes messzire hatolni, energiát szállítani.



5. ábra Az előző ábra kétféle hulláma — a gerjesztés módjával különválasztva. Felül szimmetrikus, alul antiszimmetrikus a gerjesztés.

Eleg alacsony frekvencián útnak indított hullám utazás közben a csőben kisimul, csak elegendő helyet kell a számára biztosítani. A gyakorlat szempontjából annyi lényeges, hogy

milyen hosszú csőszakaszt kell erre szálni. (avagy adott esetben milyen mértékű maradék egyenetlenségre kell számítani).

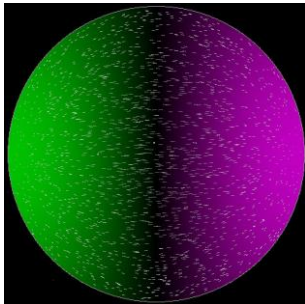
A hullámok terjedése más megközelítésben

A hullámegyenletnek többféle megoldása lehet egy párhuzamos falú csőben.

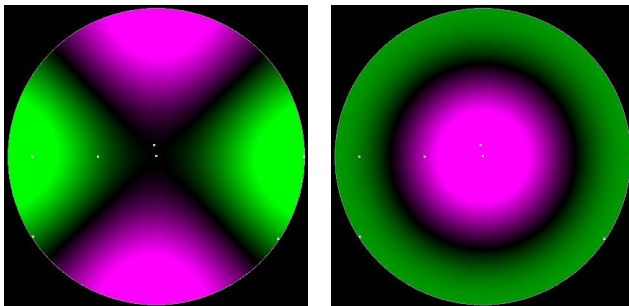
Az alapmegoldás az, ami minden frekvencián energiát tud a csőben továbbítani, a síkhullám. Ezzel szeretnénk majd mérni. És vannak további megoldások is, amelyeknél kell egy bizonyos frekvencia, hogy beindulhasson az energiaterjedés.

A síkhullámú megoldást az jellemzi, hogy minden részecske csőirányban mozog, és a nyomás egy keresztmetszetben nem függ a helytől.

A többi megoldás bonyolultabb, de legalább mind egy kaptafára mennek. Érdekes a csőnek az egyik keresztirányú rezonanciájából, rezgési módusából kiindulni. Egy csőnek megszámlálhatóan sok keresztirányú rezonanciája van.² Minél cifrább, kacifántosabb a módus alakja (mintázata), annál magasabb a frekvencián rezeg. Ilyen módusok láthatók a 6. és 7. ábrákon.



6. ábra Kör keresztmetszetű csőben a levegő első keresztirányú módusa. A színek a nyomást, a kis pálcikák pedig a rezgéssebességet jelenítik meg. Ez a módus zavarhatja leginkább a Kundt-csőves méréseket.



7. ábra Két további módus, amelyek már kevésbé zavaróak, mert magasabb frekvenciájuk miatt még távolabb vannak a mérési frekvenciától, így még rövidebb a térbeli lecsengésük.

Minden ilyen rezonanciában a mozgás csak a keresztmetszet síkjában történik, és a végtelen cső mentén a levegő mindenhol azonos fázisban táncol. Ez tulajdonképpen végtelen hullámhossznak, azaz nulla hullámszámnak³ felel meg csőirányban.

² Az nem számít, hogy a keresztmetszet milyen alakú. Kör, téglalap, háromszög, de akár Magyarország formájú is lehet. Persze a rezgésalakok és a frekvenciák mások lesznek.

³ A hullámszám hasznos fogalom. A szerepe ugyanaz a térben, mint a körfrekvenciának az időben. A képlete: $k=\omega/c$.

Ha a frekvenciát kissé növeljük, akkor a csőirányú hullámszám fölfelé mozdul a nulláról, és a csőben energiát szállító hullámok indulnak.

Úgy fogható fel, hogy egy bizonyos alap-hullámszám „be van építve” a hullamba a keresztmetszet síkjában végzett mozgások miatt. Ez a (féligmeddig hipotetikus) k_x hullámszám frekvenciából a $k_x = \omega_x / c$ képet segítségével számolható. (c : a hangsebesség, ω_x : az illető keresztrezonancia körfrekvenciája.)

Ha a frekvenciát ω_x fölé növeljük, akkor a hullának lesz „ereje” megindulni. A vonatkozó összefüggés: $k = \sqrt{k_x^2 + k_-^2}$, ahol $k = \omega / c$ a teljes hullámszám, k_- pedig a hullámszámnak a csőtengellyel párhuzamos összetevője, ami a haladásért felelős. Ha a frekvencia elég magas, k_- képes pozitív lenni, és terjedni kezd az energia. Ha $k_- = 0$, akkor az éppen a keresztrezonancia, ha pedig a frekvencia túl alacsony, akkor az összefüggés k_- -re imaginárius értéket ír elő. Az imaginárius hullámszám azt jelenti, hogy a mozgás a gerjesztés helyétől távolodva a cső mentén exponenciálisan lecseng. (Ez kézzelfogható valóság: $k_- = \pm i \text{ m}^{-1}$ esetén a mozgás méterenként csökken az e -ad részére.)

Minden egyes keresztrezonanciához egy „hullámosztály” tartozik. Adott frekvenciával gerjesztve egy cső végét egyes módusok el tudnak indulni, a túl cifrák pedig exponenciálisan lepusztulnak. Ha a gerjesztési frekvenciát a legalacsonyabb módus alá választjuk, akkor már mind lepusztul, és a síkhullámú megoldás egyedül marad. Nekünk most ez a cél.

A működés elvei után a konkrét számok...

A Kundt-csővünk 103mm belső átmérőjű, benne a normálállapotú levegő 1900Hz-en kezd rezonálni keresztirányban. A maximális mérési frekvencia így kb. 1800Hz. Ekkor a hullám-alakhiba (tkp. az első módus) lecsengésének e -adolódási hossza 83mm.⁴

A magasabb keresztrezonanciáknak (7. ábra) megfelelő cizelláltabb egyenletlenségek lecsengése még gyorsabb: 15 és 12mm alatt csökkenek az e -ad részükre.

A Kundt-csővünk mérőterének hossza 1m, ez a csőnek a párhuzamos része. A féloldalas hangszóró ennél még távolabb van 15cm-rel. 1800Hz-en a hullámhossz 17cm. Ilyenkor a mikrofon a lezárt vég 2-3 félhullámhosszynyi körzetében mozog. Így durván 80 cm áll rendelkezésre a hullám kisimulásához. A kezdeti nyomásegyenletlenség így az $e^{(-800/83)} = 67$ milliomod részére csökken.

Ha viszont 100Hz-e mérünk, akkor a mikrofonnal a lezárt végtől az első minimumhelyet kell mérjünk, ami attól negyed hullámhosszra, azaz cca. 84cm-re van. Akkor a hiba e -adolódási hossza: 23mm. A kezdeti hiba 20cm alatt csökken az ezredrészére. Ez elég is, mert kezdetben is elég egyenletes volt. (alacsony frekvencián szinte képtelenség szabálytalan hullámfrontot kelteni) Ráadásul a tolómikrofon is középen van, vagyis nem érzékeli az első keresztirányú módust. Annak ugyanis középen éppen csomóvonala van.

Megvizsgáltuk tehát a legnagyobb és a legkisebb frekvenciát, amin a Kundt-csővünket használni tudjuk. Azt látjuk, hogy a hullámfrontok szinte tökéletesek lesznek benne. Ha lesz mérési hiba, az biztosan nem ebből fog származni.

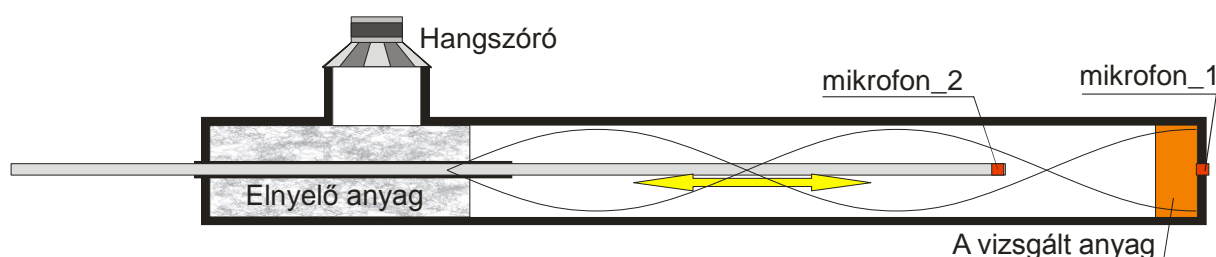
⁴ A pontos összefüggés az e -adolódási hossza: $l = \frac{c}{2\pi \sqrt{f_x^2 - f_{meas}^2}}$, ahol c a hang terjedési sebessége,

f_x a keresztrezonancia és f_{meas} a mérés frekvenciája.

Mérés a Kundt-csővel

A Kundt-csővet az egyik végén gerjesztjük, benne szinuszhullámokat küldünk a másik vége felé. A cső túlsó végét fallal lezártunk, onnan a hullámok visszaverődnek.⁵ Ha vizsgálandó hangelnyelő anyagot viszünk fel a falra, a hullámok csak részlegesen verődnek vissza. A cső végét lezáró dugóba épített mikrofonnal megmérjük az ottani nyomást, ami lényegében a nyomásmaximumnak felel meg, vagy ahhoz közeli, tehát minden frekvencián egy stabil referenciajelet szolgáltat, aminek a fázisához és az amplitúdójához lehet viszonyítani a tolómicrofon jelét.

A hangszórával gerjesztett végen elnyelő anyag csillapítja a cső rezonanciáit. Erre főleg akkor van szükség, amikor a csövet üresen mérjük. A túl éles rezonanciák zavaróak lennének, a levegőoszlop nagyon szélsőségesen viselkedne a frekvencia függvényében.



8. ábra A Kundt-cső vázlata. A tolómicrofon végén levő mikrofonnal a hangtér letapogatható.

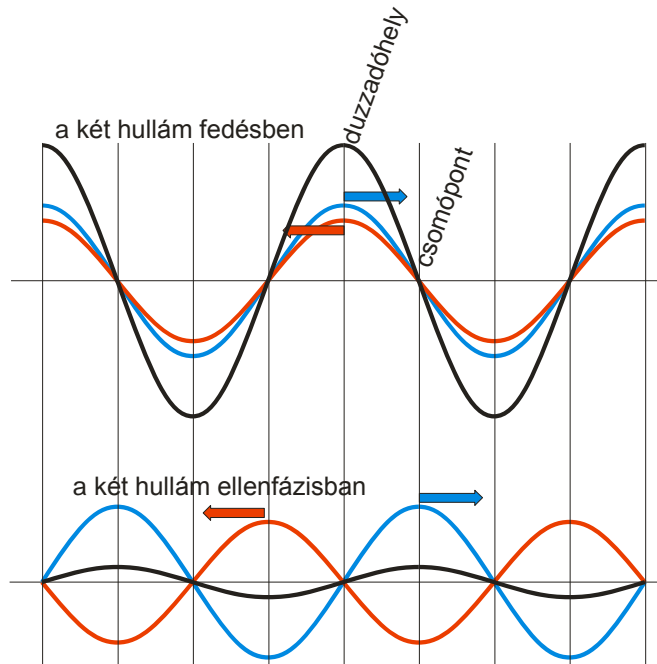
Egy szivacs fajta hangelnyelését fogjuk mérni szilárd végfalra helyezve. Ehhez meg kell határoznunk a beeső és a visszavert hullám amplitúdójának a hányadosát.

Az állóhullám-arány

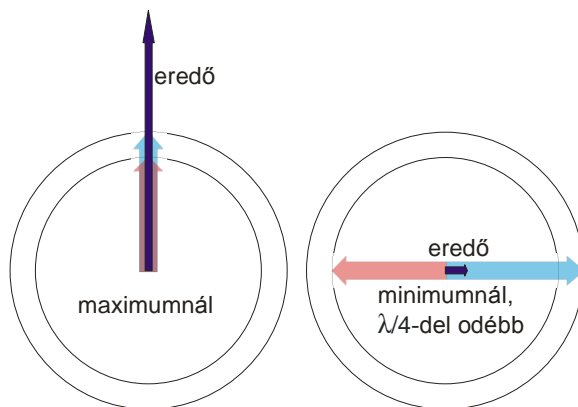
Ha két szembe haladó azonos frekvenciájú szinuszhullámnak azonos az amplitúdója, akkor tökéletes állóhullámról beszélünk. Ekkor a csőben nincsen hosszútávon energiaterjedés,⁶ mert a két szembe haladó hullám energiaárama kioltja egymást. Ha egy tökéletes állóhullámot végigszondázunk egy mikrofonnal a cső mentén, akkor félhullámonként éles minimumhelyre bukkanunk. Minél pontosabban egyezik a két szembe haladó amplitúdó, annál mélyebb és élesebb a minimumhely.

⁵ Megjegyezzük, hogy akkor is visszaverődnének, ha ott szabad vég lenne, csak ellenkező fázissal és egy kicsit rosszabbul, mert a szabad végnél az energia egy kis hányada szétsugárzódik.

⁶ Az energia ekkor is fel-alá lötyög a csőben negyed periódusonként önmagával szembefordulva.



9. ábra A szemben haladó nyomáshullámok fedésben, és negyedperiódusnyi idővel később.



10. ábra A jövő és a menő hullámból származó komplex amplitúdók duzzadóhelyen és csomópontban. A minimum fázisa merőleges a maximumra.

Ha a két amplitúdó nem egyezik, akkor duzzadóhelyeken a kettőnek az összegét, negyed hullámhosszal odébb pedig a különbségét méri.

Amikor a két szemben haladó szinusz éppen fedésben van, akkor mérhető a két amplitúdó összege a csúcson, és ott lesz a duzzadóhely. Negyedperiódusnyi idő múlva az egyik szinusz $\lambda/4$ -nyit elmozdul jobbra a másik pedig balra, ezért a két szinusz ellenfázisban lesz. Ekkor az amplitúdójuk különbségét mérhetjük meg, de nem ott, hanem $\lambda/4$ -del eltolt mikrofonnal. Ezt hívjuk csomópontnak.

Általános esetben jobbra és a balra haladó hullám amplitúdója:

$$P_{\max} = P_{\text{incident}} + P_{\text{reflected}}$$

és

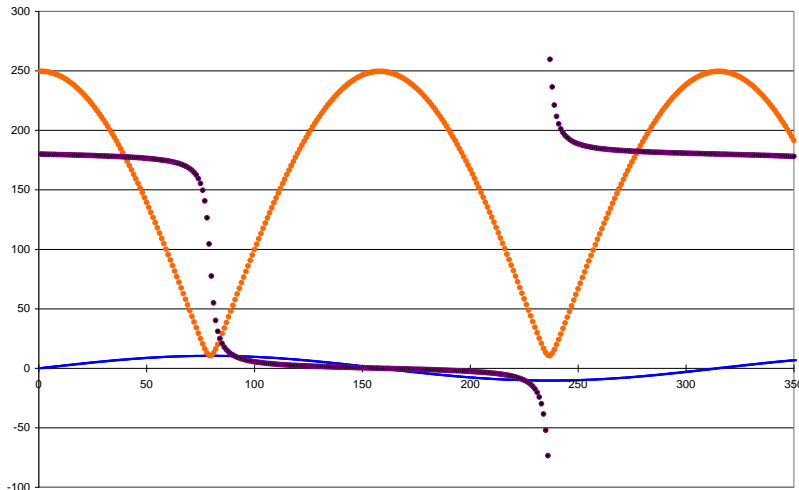
$$P_{\min} = P_{\text{incident}} - P_{\text{reflected}}$$

Átrendezve:

$$P_{\text{incident}} = \frac{P_{\text{max}} + P_{\text{min}}}{2}$$

$$P_{\text{reflected}} = \frac{P_{\text{max}} - P_{\text{min}}}{2}$$

A duzzadóhelyen a nyomás elég lapos maximumot mutat, és a fázisa is stabil. Annak a mérésével nincs különösebb gond. De ha éles a minimumhely, azt nehéz a mikrofonnal pontosan eltalálni. Segíthet viszont az okos jelfeldolgozás. (Ld. az 11. és 11. ábrákat!) Ha **fázishelyesen** mérünk, vagyis a tolórúd mikrofonjelét mindig a végfalba épített mikrofon jeléhez viszonyítjuk, akkor a fázis nem ugrál véletlenszerűen. Így megjegyezhetjük, hogy milyen volt a fázis a duzzadóhelyen. A minimum környékén pedig az amplitúdónak csak a megjegyzetthez képest **90°-os összetevőjét** mérjük. Az ugyanannyi lesz, mint a pontos nyomásminimum, csak nem annyira helyfüggő. (A 0°-os összetevő megléte arra utal, hogy nem találtuk el pontosan a minimumhelyet, az előjele pedig segít, hogy milyen irányban célszerű keresni.)



11. ábra Jellemző nyomás-hely függvények a Kundt-cső mentén.
 piros: A nyomás abszolútértéke.
 fekete: A fázis valamilyen referenciához képest fok egységben. Duzzadóhelyeken lassan változik, ezért ott jó viszonyítási fázist mérhetünk.
 kék: Az amplitúdónak a duzzadóhely fázisára merőleges komponense.

Ami minket érdekel, az a beeső és a visszavert hangenergia aránya. A csővég energianyelő képessége avagy elnyelési tényezője, az elnyelt energiának a beeső energiának a hányadosa:

$$\alpha = \frac{E_{\text{dissipated}}}{E_{\text{incident}}} = \frac{E_{\text{incident}} - E_{\text{reflected}}}{E_{\text{incident}}}$$

Egy hullámban terjedő energia mindig a hullám amplitúdójának a négyzetével arányos. (Miért? ⁷) Mivel csak az arányok érdekesek számunkra, írhatjuk:

$$\alpha = \frac{P_{\text{incident}}^2 - P_{\text{reflected}}^2}{P_{\text{incident}}^2}$$

Felhasználva a korábbi összefüggést p_{incident} -re és $p_{\text{reflected}}$ -ra:

$$\alpha = \frac{(p_{\text{max}} + p_{\text{min}})^2 - (p_{\text{max}} - p_{\text{min}})^2}{(p_{\text{max}} + p_{\text{min}})^2}$$

Egyszerűsítés után:

$$\alpha = \frac{4 p_{\text{max}} p_{\text{min}}}{(p_{\text{max}} + p_{\text{min}})^2}$$

Célszerű ezt a $R = p_{\text{min}}/p_{\text{max}}$ hányadossal is felírni. Rövidebb, és kifejezésre juttatja, hogy a végeredmény csak a nyomások arányától függ.

$$\alpha = \frac{4R}{(R+1)^2}$$

Ellenőrizzük: $R=1$ esetén (tiszta haladó hullám) $\alpha \rightarrow 1$,

$R=0$ esetén (tiszta állóhullám) $\alpha \rightarrow 0$.

Az energiaáram

A teljesség kedvéért jegyezzük meg, hogy a duzzadóhelyen és a csomópontban mérhető nyomások igen szoros kapcsolatban vannak az energiaárammal:

- Két szomszédos duzzadóhely között félúton nagy a nyomásgradiens.
- A szinuszosan változó gradiens fel és alá gyorsítgatja a levegőt.
- A gyorsulás sebességet okoz — 90° fáziskéséssel.
- A sebesség ezáltal éppen fázisban lesz a csomóponti nyomással.
- A nyomásnak és a sebességnek a szorzata pedig az energiaáram.

A nyomásamplitúdó mérése a cső mentén.

Egy tolórúd végébe kicsiny mikrofon van beragasztva. A mikrofonrudat tologatva a cső tengelye mentén le tudjuk tapogatni a hangnyomást. Érdeemes először szerezni egy kis tapasztalatot a rúd tologatásával. Ehhez olyan frekvenciát célszerű választani, amelynél több minimumhely is belefér a csőbe. 1200Hz megfelelő, és kevés csillapítóval szebben látszik a lényeg.

Az is tanulságos, hogy ha egyszerre sok frekvencián (zajgerjesztéssel) megmérjük, $p_{\text{tolórúd}}/p_{\text{vég}}$ hányadost. Ez jellegre olyan eredmény ad, mintha finom lépésekben hely függvényében mérnénk egyetlen frekvencián.

⁷ Kétszeres amplitúdónál négyszeres a potenciális energia, és négyszeres a kinetikus energia is. A tárolt energia a közegben félhullámhossznyi méretű, elkülönül adagokban, a hangnak megfelelő sebességgel „vonul”.

Kalibrálás

Mivel az energianyeléshez dimenziótlan hányadosokat mérünk, a mikrofonok kalibrálására szükségtelen. Csak annyi kell, hogy a mérőcsatornák lineárisan viselkedjenek, azaz kétszeres amplitúdó esetén kétszer akkora jelet adjanak. Ez a szokásos mérési amplitúdókon nem szokott gond lenni. (hacsak nincs túlerősítve a mikrofonjel, és bele nem ütközik az overload-plafonba) Lehet ellenőrizni a jelalakot is, és ki is lehet próbálni, hogy ugyanazt a mérést fele amplitúdón elvégezve ugyanazt az eredményt adja-e.

A mérési amplitúdó megválasztása

Két szempont van:

1. Túl nagy, ha nagyon torzít a hangszóró, vagy a mérőcsatornák túlterhelődnek. A hangszóró torzítása hibát nem okoz, csak szenved a hangszó. A torzítási felharmonikusokat a frekvenciaelemzés úgyis elválasztja a mérés frekvenciájától. Ha viszont ha egyszerű voltmérővel mérnénk az amplitúdót, akkor ez igen fontossá válna.
2. Túl kicsi az amplitúdó, ha a mérési eredmények nagyon szórnak, ugrálnak. Ez azonban meglehetősen kis amplitúdók mellett kezd zavaró lenni.

Tipikus az, hogy széles amplitúdó-tartomány áll a rendelkezésünkre. A legnagyobb megengedhető amplitúdónak még a századrésznél is jól lehet mérni. Ez a szabadság a frekvenciaelemzés jótéteményei közé sorolható.

A jelfeldolgozás módja

A mikrofonok jelében a hangnyomásból származó (legerősebb) komponensen kívül vannak zavaró elemek is. Pl. a mikronok (és az erősítő) zaja, az esetleges brumm (a hálózati 50Hz és felharmonikusai). És behallatszik a szomszédos mérőcsoportok beszélgetése, vagy az asztal vagy a cső lökdöséséből, a tolórúd kezeléséből származó rezgések is. Ez azonban sok gondot nem okoz, mert a frekvenciaelemzés csak a mérési frekvenciát figyeli, és a zavaroké ezzel rendszerint nem esik egybe.

A jó jelfeldolgozáshoz tehát az kell, hogy a zavart jelből kiválasszunk a gerjesztésnek megfelelő szinuszt és megállapítsuk annak amplitúdóját és kezdőfázisát. A módszer:

- Bemérünk egy adott hosszúságú (pl. 1 sec) jelet (zajos szinuszt).
- Megszorozzuk egy ún. Hanning ablakkal, hogy az elején és a végén a durva vágást lesimítsuk. (ez jól tesz a frekvenciaelemzés szelektivitásának)
- Készítünk a mérési frekvenciának megfelelő tiszta szinuszt ill. koszinuszt jelet is ugyanolyan idősor formájában.
- Mindkettővel külön beszorozzuk az Hanning-elt időjelet és felösszegezzük. Ezzel megkapjuk a komplex amplitúdónak a reális és az imaginárius részét. (a koszinuszos összeg a reális rész)
- A két szummából a jel amplitúdója és kezdőfázisa kiszámítható.⁸

Amikor egy szinuszos folyamatból véletlenszerűen kiemelünk egy darabot, annak a kezdőfázisa teljesen bizonytalan. Viszont a két mikrofon jelének fáziskülönbsége már állandó.⁹ A mérésünk során a mozgatott mikrofon jelének fázisát mindig a végfalba épített referencia-mikrofonéhoz viszonyítjuk.

⁸ A dolog mindössze áttérés a komplex szám polár-koordinátás ábrázolására. A helyes amplitúdó-méréshez egyéb is kell, pl. figyelembe kell venni az időjel hosszát is. Minket azonban ez most nem érdekel, mert az amplitúdóknak csak a hányadosa a fontos. Mi pedig ugyanazzal az algoritmussal számoljuk mindkét csatornát.

⁹ Persze csak, ha nem nyúlunk közben semmihez.

Sőt, nem csak a fázisával, de az amplitúdójával is így teszünk. Azért, mert ha valami okból megváltozik a csőben a hullámok amplitúdója, (pl. azért, mert elmozdítottuk a tolórudat) akkor az ne okozzon mérési hibát. Abban nagyjából biztosak lehetünk, hogy a csőben a jövő és a menő hullámok aránya állandó, és abban is, hogy ezekkel arányos amplitúdót mér a végfalba épített mikrofon. Ezért használhatjuk az referenciaként. (Máshová is tehetnénk, de a végfal a célszerű választás. Ott minden frekvencián erős jelekre lehet számítani: a zárt végnél mindig nyomásmaximum van.

A jelek amplitúdó- és fázismérését és a két komplex amplitúdó hányadosának kiszámítását a mérőprogram folyamatosan elvégzi. Nekünk viszont nem árt tudni, hogy mi történik a háttérben.

Hányados hányados hátán...

Gyakran fordul elő a méréstechnikában a pontosság hajszolása során, hogy nem egy mennyiséget mérünk, hanem kettőt, és az eredmény a kettőnek a hányadosa. De a dolog fokozható, a hányadosok hányadosa is tipikus, sőt, a háromszoros hányadosképzés sem ritka. A mi esetünkben mérjük a két mikrofonjel komplex amplitúdóját, aminek egyből a hányadosát vesszük, hogy kiejtsük a hangnyomás esetleges megváltozásának a hatását, és stabil fázist kapjunk.

Két ilyen hányadost mérünk, egyet a duzzadóhelyen, egyet a csomópontban és ezek hányadosából számoljuk a jövő-menő hullámok teljesítményarányát.

Szeretjük a hányadosokat! Az ilyen méréseket sokkal nehezebb elrontani, és gyakorta még a mérőeszközök, mérési eljárások kalibrálására sincs szükség, mert az érzékenységük a végeredményből úgyis kiesne. Mint például most is.

A mérési hiba forrásai

Egy ilyen mérésnek több hibaforrása van.

- Áthallás, átszórás lehet a mikrofoncsatornákra egymásról, vagy a hangszóró erősítőjéről. Ez könnyen kimérhető, és itt most nem számottevő.
- Nem tökéletesen merev a cső fala. A hangoktól rezgésbe jöhet, egyes helyein felveszi, máshol pedig esetleg leadja a hangot. Ráadásul a mechanikai rezgésekre a mikrofonok is érzékenyek. A problémán vastagabb falú csővel, vagy a meglévőnek, homokba, betonba ágyazásával lehetne segíteni. Ez a hiba nagyon erősen frekvenciafüggő, ami nehezíti a becslését.

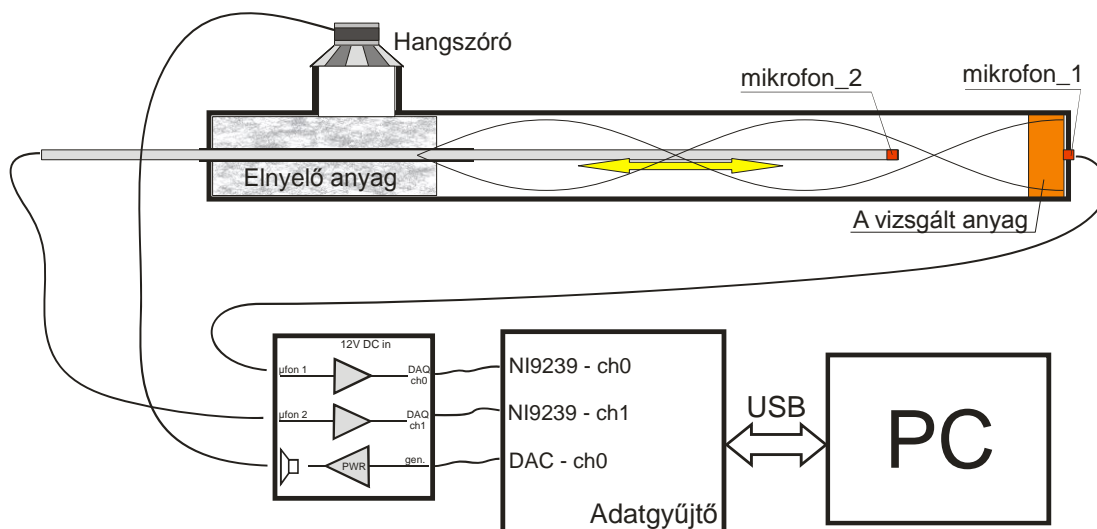
Ezek a hibák nehezen számolhatóak, nehezen becsülhetőek meg. A legjobb módszer az, hogy használjuk a mérőeszközt, megfigyeljük az eredmények szórását. Egy duzzadóhely előtti és utáni minimumon mérve körülbelül ugyanazt az elnyelési tényezőt kell kapjunk. Annyi különbséggel, hogy a két pont között a levegő is nyel, a fallal való súrlódás is. Ezek azonban minimálisak. Ha eltérőt mérünk, pláne összevisszát, az bizonyára mérési hiba.

Az is jó megközelítés, hogy egy szivacsot finom frekvencialépésekben megmérünk. Ha az eredmény hektikusan változik, akkor inkább a mérésünk hibázik, mert a szivacsok viselkedése a frekvencia függvényében általában lankás, „unalmas” függvény.

Az is jó kísérlet, hogy a cső mechanikai viselkedését (pl. kívülről hozzá érintett tömegekkel) megváltoztatjuk. Ha ez megváltoztatja a mérési eredményt, akkor egyrészt igazolást nyert, hogy valóban nem elég merev a csőfal, másrészt az eltérésekből némi is hibabecslést kaphatunk.

Nem árt, ha tudjuk: Egy mérési eljáráshoz alapos hibabecslést készíteni körülbelül 3-szor annyi munkát igényel, mint a mérőrendszer létrehozása. Az alól az akusztika sem kivétel.

A mérési összeállítás



12. ábra A teljes mérési összeállítás vázlata. Az adatgyűjtőnek az analóg kimenete szolgáltatja a szinuszos jelet, amit teljesítményerősítés után a hangszóróba vezetünk. Az analóg bemenetekre a mikrofon-jeleket kötjük: a hátfalét a 0-ás, a tolórúdét az 1-es csatornába.

A mérés végrehajtása

Szereljük össze a csövet, először csillapítóanyaggal! Helyezzük bele csőbe a tolórudat is a mikrofonnal! Kábelezük össze a mérőeszközöket a leírt módon! Indítsuk el a mérőprogramot! (kezelése a függelékben)

Szinuszos gerjesztést adunk a hangszóróra és mikrofont tologatva megkeressük a legnagyobb amplitúdót. Ez a duzzadó hely. Kézzel is feljegyezhetjük, de célszerűbb használni a „set loop (ref.)” jelű gombot (lásd a függelékben). A mérőprogram az aktuális amplitúdót megjegyzi, és viszonyítási alapnak használja.

Ezután megkeressük a mikrofonnal a csomópontot, hogy megtudjuk, mennyiszor kisebb az ottani nyomás a maximumhoz képest. Vagy a nyomást, vagy a belőle számított elnyelési tényezőt feljegyezzük (a frekvenciával együtt).

Egy csillapítóanyag mintának (3 cm vastag „memória” szivacs¹⁰) kell meghatározni az elnyelő-képességét 6 frekvencián a 120...1800 Hz tartományban.¹¹ Ehhez megmérjük a szivacsot és az üres csövet is (ugyanazon 6 frekvencián).

Végül (a jegyzőkönyv-készítés során) az üres cső elnyelési tényezőjét a csillapítottéból levonjuk.

Idő és kedv esetén:

Megismételhető a mérés, két réteg szivaccsal. (az üres csövet nyilván nem kell újra mérni) Kipróbálható mérés úgy, hogy ugyanazt az anyagdarabot betoljuk a csőben beljebb, oda, ahol egy kiszemelt mérési frekvencia alapján éppen nyomásminimum, azaz sebességmaximum van.¹² Ezzel ki lehet tapasztalni, hogy az anyag milyen mechanizmus alapján nyel inkább. A

¹⁰ Ez egy nyílt, de apró cellás, anyagában nagy belső csillapítású szivacs. A deformáció után lassan nyeri vissza az alakját (→memória), de a hangelnyelése nem azon múlik.

¹¹ 100Hz alatt nem elég hosszú a cső, 1800Hz felett pedig már közeleg az első kereszt-rezonancia.

¹² Vagyis a csővégtől $\lambda/4$ távolságra. Ehhez a hang terjedési sebességére szükségünk lesz. Kb. 335m/s.

nyomás pulzálása, vagy a részecskesebesség okozza-e (a viszkozitáson keresztül) az erősebb disszipációt?

Aki akar, hozhat saját szivacsot vagy más csillapítót megmérni. A cső belső átmérője pontosan 103mm. Vastagabb anyagnál az a jó, ha ebben finoman szorul, vékonyabb anyagot viszont máshogyan (pl ragasztópöttyel vagy gombostűvel) tudunk a véglapra erősíteni.

Tipppek:

Magas frekvencián, ahol több hullám is elfér az 1 méteres mérőtérbe, érdemes több csomóponton is méréseket végezni. Ebből derül ki, hogy a mérés mennyire megbízható. De 200Hz alatt ez már nem lehetséges. Pl. 100Hz-en úgy lehet mérni, ha a mikrofont betoljuk egészen közel a falhoz, azt tekintjük maximumnak (ami kb. igaz is), és csak 1 csomópontunk van a végtől negyed hullámhosszra, azaz 100Hz esetén kb. 84 cm -re

A mérési jegyzőkönyv tartalma

A mérési metódus vázlatos ismertetése.

A 2x6 csillapítási adatból a csillapító szivacs elnyelésének kiszámítása és ábrázolása a frekvencia függvényében.

Esetleg további mérési adatok ismertetése, ábrázolása. (beljebb tolt szivacs, két réteg szivacs, vagy ami még adódik ötletként)

Függelék**A****mérőrendszer****1
részei**

Kundt-cső

mikrofon tolórúd

fehér PVC „végfal” , beépítve egy mikrofon

3 db szivacskorong

Cél hardver a mikrofonok táplálására és a jel erősítésére a hangszóró meghajtásához

12V DC tápegység

4 db BNC-BNC kábel

National Instruments adatgyűjtő

NI 9263 jelgenerátor 100kHz-es, 4 csatornás (ebből egyet használunk)

NI 9215 100kHz, 4 csatorna, $\pm 10V$, 16bit, szinkron mintavételezésű ADC (2 csatornát használunk)

NI cDAQ 9174 keret

NI tápegység

Laptop + táp

Mérésvezérlő szoftver



13. ábra Balra: a végfal műanyagkorongja közepén a mikrofonnal, körbe fekete O-gyűrűs tömítéssel; egy szivacskorong; Kundt-cső mérő vége, amiben a mikrofon tolórúd is látszik

Jobbra: a Kundt-cső gerjesztett vége (a hangszóró a narancssárga végdugó mögött van) ; a mikrofon tolórúd; a cél hardver benne három erősítővel.

Függelék

2

A mérőrendszer kezeléséről

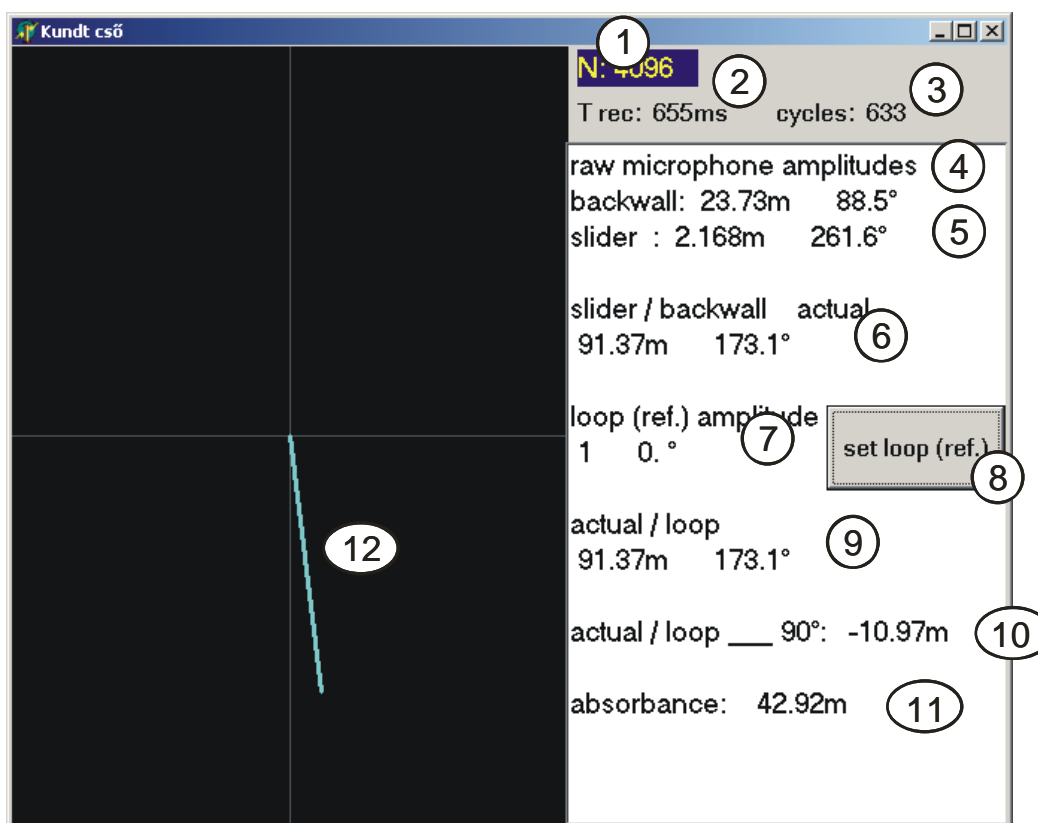
A mérőprogramot a laptop asztalán lévő **pulse_root.exe** parancsikonnal indíthatjuk. (a mérésvezető jelen lesz, és segíti az első lépéseket)

Az AD koverterek folyamatosan 50kHz-cel mérik a mikrofonjeleket. A digitális szűrők kidobják a túl magas frekvenciákat. A megsimított jelsort megritkítjuk (újrámintavételezzük): minden 8 régi mintára esik 1 új. A új jelfolyamat figyel a Kundt_mérő algoritmus, ami a „Kundt_cső” nevű ablak (14.ábra) mögött dolgozik. Időnként kivesz a mikrofonok jelfolyamából 8192 mintányi idősort, és belőlük amplitúdót, fázist stb, számol.

A mérési frekvenciát, amplitúdót a hanggenerátor ablak (16. ábra) mezőin keresztül tudjuk megválasztani. A kék mezőkre klikkelve (bal-jobb) a mező tartalma föl-le lépked durván. Ctrl-lel, alt-tal együtt klikkelve a lépkedés finomabb. Shifttel klikkelés után a szám kézzel beírható.

A számok kijelzése a μ , m, k M, G stb. prefixek segítségével történik. Pl. 123m jelentése nem 123 méter, hanem 123milli, azaz $123E-3$. Csak a 123m-et kényelmesebb leolvasni. 0.1

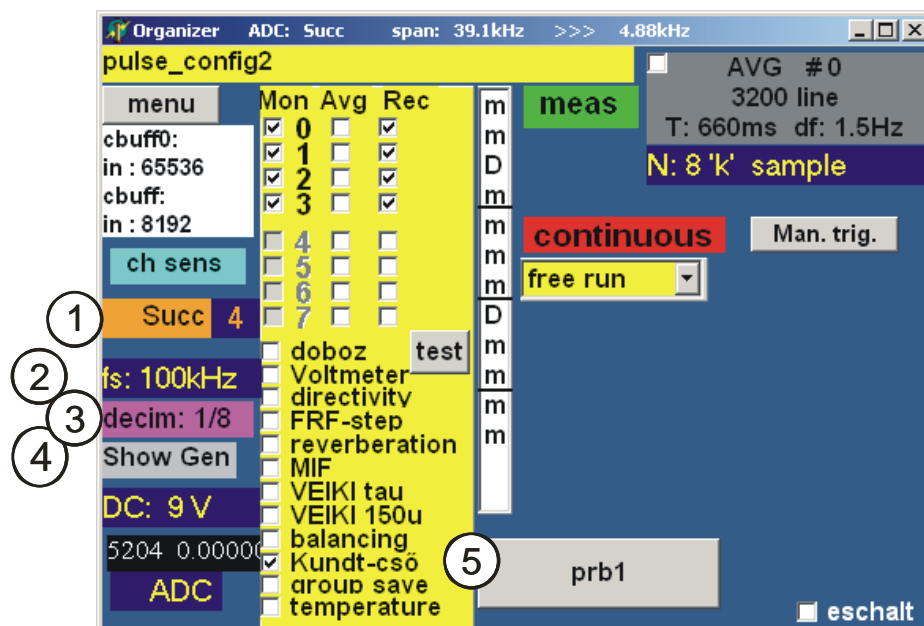
A 15. ábrán az alkalmazás fő ablaka látható, ezt bezárva a mérés leáll.



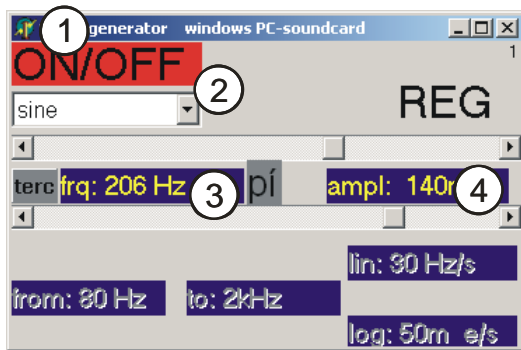
14. ábra A Kundt-csőes méréshez szükséges fő ablak.

A Kundt-ablak részei, a szereplő mennyiségek:
 1) egy elemi mérésben szereplő minták száma.

- 2) az adódó idősor hossza
- 3) az abba beleférő periódusok száma a mérési frekvencia alapján. A megjelenő amplitúdóadatokat mindig ilyen hosszú időjelből számolja a rendszer.
- 4), 5) a hátfalba épített mikrofon és a tolómikrofon jelének nyers amplitúdója és fázisa. A fázis ugrál össze vissza attól függően, hogy az idősorba milyen fázissal került a szinusz. Változhat az amplitúdó is, ha pl a gerjesztést változtatjuk.
- 6) A két (komplex) mikrofonamplitúdó hányadosának amplitúdója és fázisa. Itt a fázis már nem ugrándozik a nyers jelek kezdőfázisa szerint. És a gerjesztési amplitúdóra sem mutat különösebb érzékenységet. (kétszeres gerjesztés mindkét jelet duplázza, így a hányadosuk marad.
- 7), 8) ide tároljuk a duzzadóhelyen mérhető amplitúdót és fázist a gomb megnyomásával. A további mennyiségek már mind ehhez lesznek viszonyítva.
- 9) a tolómikrofon aktuális amplitúdója a duzzadóhelyen megjegyezetthez képest.
- 10) ugyanennek a duzzadóhely-fázisra merőleges komponense
- 11) az így számítható elnyelési tényező.
- 12) a (9) megjelenítése vektoralakban. (Ha nagyon kicsivé válik, akkor „méréshatárt” vált, miközben a színe megváltozik.)



15. ábra A mérésvezérlő fő ablaka. Ami most fontos számunkra:
- 1) az alkalmazott AD konverter
 - 2) az elsődleges mintavételi frekvencia. (50kHz a megfelelő)
 - 3) a mintafolyam digitális szűrés utáni ritkítása (1/8 a jó)
 - 4) ha a hanggenerátor vezérlő ablaka „elbújt”, ezzel lehet előcsalni
 - 5) a Kundt-csónél kell legyen egy pipa. Akkor jelenik meg a megfelelő ablak.



16. ábra A

- 1) ki-be
 - 2) hanggenerátor.
 - 3) kapcsoló
 - 4) jelalak.
- 4) amplitúdó (0...1), de nem kell 0.2, azaz 200m fölé menni.
- frekvencia