



TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT

**AUTOMATIZÁLT MÉRÉSI MÓDSZER
MEGVALÓSÍTÁSA ANSI/CEA-2010-A
SZABVÁNY SZERINT**

Szerző: **Kákonyi Balázs**
villamosmérnök BSc.
Infokommunikációs Technológiák,
III. évf.

Konzulensek: **Daniel Knobloch**
R&D Engineer – Klippel GmbH
Csanádi Bertalan
műszaki tanár

Budapest, 2014.

Tartalom

1 BEVEZETÉS.....	5
1.1 MÉRŐJEL ÚTJA A RENDSZERBEN	7
1.2 RÖVID IDŐTARTAMÚ GERJESZTÉS	7
1.3 HANG ABLAKOLÁS	8
1.4 TORZÍTÁS MÉRÉSE	9
1.4.1 DEFINÍCIÓ	9
1.4.1.1 LINEÁRIS TORZÍTÁS	10
1.4.1.2 NEMLINEÁRIS TORZÍTÁS	10
1.5 TORZÍTÁS LÉTREJÖTTE ELEKTRO-DINAMIKUS HANGSZÓRÓS HANGVISSZAADÁS ESETÉN .	11
1.6 GERJESZTÉS ÉS VÁLASZ	12
1.7 HARMONIKUS TORZÍTÁS ÉRTELMEZÉSE	14
1.7.1 PSZICHOAKUSZTIKA A HARMONIKUS TORZÍTÁS SZEMSZÖGÉBŐL.....	15
1.7.2 ELFEDÉS	16
1.8 MAXIMÁLIS HANGNYOMÁSSZINT MEGHATÁROZÁSA	16
2 ANSI/CEA-2010-A SZABVÁNY IMPLEMENTÁLÁSA	19
2.1 dB-LAB GRAFIKUS INTERFÉSZ.....	19
2.2 DA2 HARDWARE	20
2.3 MÉRÉSHEZ SZÜKSÉGES ESZKÖZÖK	21
2.4 SCRIPT BEMUTATÁSA	22
2.4.1 ADATBÁZIS FELÉPÍTÉSE	23
2.4.2 KIÉRTÉKELÉS	24
2.5 TONEBURST ANALÍZIS	24
2.6 ABLAKOLÁS	25
2.7 MAXIMÁLIS KÉSÉSI IDŐ	26
2.8 SÁVSZŰRÉS	27
2.9 MAXIMÁLIS HANGNYOMÁSSZINT	27
3 ÖSSZEGZÉS.....	28
TARTALOMJEGYZÉK	29

Köszönetnyilvánítás

A szerző ezúton szeretné megköszönni mindazok munkáját, akik a projektben segítséget nyújtottak. Köszönet a Klippel GmbH mérnökeinek, különösen Prof. Dr. Wolfgang Klippel-nek és Daniel Knobloch-nak a szakmai gyakorlat alatt nyújtott önzetlen segítségért. Hálás köszönet Csanádi Bertalannak, aki az Óbudai Egyetem részéről lektorálásban és további szakmai segítségnyújtásban nagylelkű támogatást adott.

Acknowledgements

The author hereby would like to give thanks for the work of all those who helped in the project. Thanks to the engineers of Klippel GmbH especially to Prof. Dr. Wolfgang Klippel and to Daniel Knobloch for his generous help given during the internship. I also give thanks to Bertalan Csanádi who gave an immense support in professional help and vetting on behalf of the University of Óbuda.

ABSZTRAKT

A dolgozat az amerikai ANSI/CEA-2010-A szabvány alapján automatizált maximális hangnyomás mérést mutat be aktív teljesítmény mélysugárzókra, egy speciális emelt-koszinuszos, Hann-ablakozott mérőjel alapján. Első részben a szükséges elméleti alapok kerülnek ismertetésre, második részben pedig a szerző által implementált automatizált mérési procedúra felépítése, működése kerül bemutatásra.

ABSTRACT

The following paper will discuss a standard implementation according to ANSI/CEA-2010-A standard, based on a shaped tone burst testing procedure in accordance with active powered subwoofers. In the first part the necessary theoretical basics are introduced while in the second part the operation and the way the automated measuring procedure is built up implemented by the author are described.

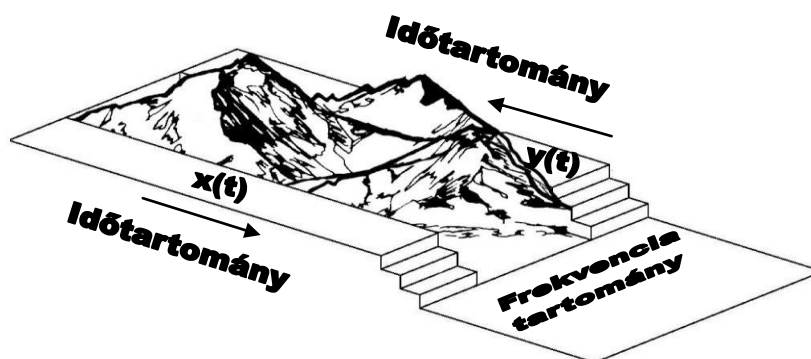
kulcsszavak: ANSI/CEA-2010-A, teljesítmény mélysugárzó, Hann-ablakozott mérőjel, automatizált procedúra, maximális hangnyomás mérés

keywords: ANSI/CEA-2010-A, active powered subwoofer, Hann-windowed tone burst, automated process, maximal sound pressure measurement

1 BEVEZETÉS

Az elektroakusztikai mérések során találkozhatunk az egyszerűbb, egy bemenetet és egy kimenetet igénylő mérési megoldásoktól egészen a több csatornát igénylő mérési összeállításokig. A jelfeldolgozás nehézsége nem minden esetben emelkedik a csatornaszám növekedésével, és fordítva. A továbbiakban egy bemenő jellel és egy kimenő jellel dolgozunk. [1]

Méréseink során célunk a rendszer bizonyos jellemzőinek meghatározása, a bemenet és kimenet ismeretében. Az adatok feldolgozását és kiértékelését különféle változók mentén tehetjük meg. Bizonyos feladatok időtartományban könnyen elvégezhetőek pl. amplitúdó szabályozás, még egyes számítások pl. szűrők kezelése a frekvencia tartományban egyszerűbb, szemléletesebb. Az adott feladat alapján kell eldöntenünk, mit választunk. Transzformációkat kell alkalmaznunk, hogy a feladathoz legjobban illő vizsgálati módszert megtaláljuk. Számításaink során a Fourier Transzformációt fogjuk használni, mely komplex frekvenciatartományi analízist tesz lehetővé. Az időtartományban rögzített jelből pl. mikrofon jele, frekvenciatartománybeli leírást kapunk. Az első ábra jól szemlélteti az időtartomány és a frekvenciatartomány közötti kapcsolatot.



1. ábra. Időtartomány és a transzformált sík kapcsolata.

A spektrumanalízis eredménye egy spektrum függvény, mely periodikus jelek esetén ún. Fourier sor. A művelet eredménye alapfüggvények súlyozott összegeiből áll. Ez könnyen tartalmazhat végtelen sok tagot is, így a valóságban közelítéseket kell alkalmazni. A számítógépes jelfeldolgozás során Diszkrét Fourier Transzformációt, valamint Gyors Fourier Transzformációt alkalmazunk (FFT). Rendszerek tervezésekor elméletben egy Dirac-delta impulzust használunk gerjesztésként. Jellemzője, hogy végtelenül rövid időlefolyással bír és végtelenül nagy energiát hordoz, területe egységnyi. A valóságban ez természetesen nem

valósítható meg, közelítést kell alkalmazni. A gerjesztésre adott választ súlyfüggvénynek, vagy más néven impulzusválasznak nevezzük. A rendszer időbeli válasza azonnal mérhető pl. egy mikrofon segítségével. A súlyfüggvény spektruma Fourier-transzformációval meghatározható, melynek általános képlete:

$$A(f) = \int_{-\infty}^{\infty} a(t)e^{-j2\pi ft} dt,$$

inverz változata pedig:

$$a(t) = \int_{-\infty}^{\infty} A(f)e^{j2\pi ft} df.$$

$A(f)$ általában abszolút érték és fázismenet viszonyaként adott. Az integrálás mínusz végtelen és plusz végtelen között természetesen nem lehetséges, ezért ablakoló függvényeket alkalmazunk, melyek az időtartományi jelből egy darabot kivágnak, és analízis alá bocsátanak. Ez hibát okoz a kiértékelésben, de egy jól megválasztott ablakoló függvény a transzformáció hibát minimalizálhatja. Ezzel azt feltételezzük, hogy a jel periodikus. A rendszer bemenő és kimenő jele közötti kapcsolatot szemlélteti Duhamel tétele alapján a konvolúció integrál:

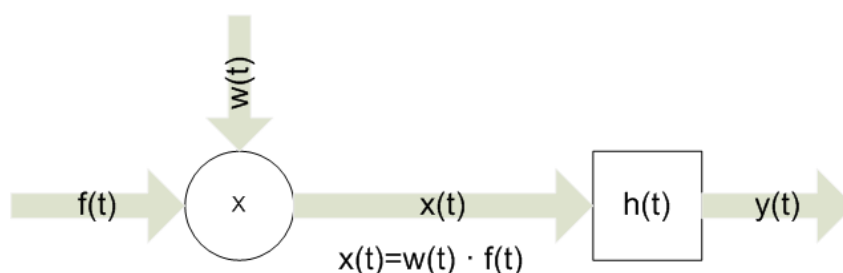
$$y(t) = x(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \cdot h(t - \tau) \cdot d\tau$$

Ezen összegző integrál jelentősége, hogy a kimenő jel időfüggvénye megkapható, ha a bemenő jelet a rendszer súlyfüggvényével konvolváljuk. Általában ezt a műveletet frekvenciatartományban végezzük. Ekkor a rendszer komplex átviteli függvényét csak meg kell szoroznunk a bemenő jel komplex spektrumával és máris megkaphatjuk a kimenő jel komplex spektrumát.

A bizonytalansági elvet figyelembe kell venni az ablakolás során. A számításokhoz véges időablakot veszünk figyelembe, ami hibát visz a számításokba. Minél rövidebb az integrálási idő annál pontatlanabb eredményt fogunk kapni. Minél pontosabb spektrumképet szeretnénk, annál hosszabb időablakot kell választani. Ez minden esetben kompromisszum. Az időablakok is rendelkeznek átviteli függvénnyel, melyet bizonyos alkalmazásokban ki tudunk használni.

1.1 MÉRŐJEL ÚTJA A RENDSZERBEN

Tekintsük meg egy mérőjel alakulásának útját rendszerszemléleti oldalról. A rendszer vizsgálatához jelen esetben használt gerjesztés $x(t)$ létrehozható egy folyamatos szinuszos jelforrás $f(t)$ és egy ablakoló függvény $w(t)$ szorzataként. Az így létrejött rövid idejű mérőjel $x(t)$, és a rendszer impulzus válaszána $h(t)$ konvolválta adja a rendszer időtartományi átvitelét $y(t)$. Frekvencia tartományban a rendszer átvitele $Y(f)$, pedig megkapható az állandósult frekvencia átvitel $H(f)$ és a gerjesztés spektrumának $X(f)$ szorzataként. A 2. ábra ennek folyamatát mutatja. A kimenő időfüggvény $y(t)$, pedig a korábbiakban bemutatott konvolúció integrál értékével egyezik meg.



2. ábra. Mérőjel létrehozásának folyamata, valamint a létrehozott gerjesztés útja a rendszerben

1.2 RÖVID IDŐTARTAMÚ GERJESZTÉS

Egy megfelelően formált mérőjel alkalmas lehet rendszerek dinamikai viselkedésének leírására, keskeny frekvencia tartományban. A rendszerek tranziens viselkedései a kimenő jel változásában rögzítettek, jól nyomon követhetőek.

A kellően rövid időtartama a gerjesztésnek megőrzi az időbeli információt és egy kissé simított frekvenciaválaszt ad. A rövid időlefolyásnak köszönhetően a jel időfüggvényéből a visszaverődések és egyéb zajok jól eltávolíthatóak a mérés kiértékelésének során. Ezen rövid időlefolyású mérőjelek alkalmasak lehetnek hangsugárzók bizonyos tulajdonságainak osztályozásához és karakterizálásához, bár az eredmények néhol vitatottak.

Ha a mérőjel kellően hosszú időtartamú, van idő a berezgésnél létrejött tranzienseknek csillapodni, az átvitelről megállapítható egy állandósult állapotot szemléltető frekvencia átvitel. [2]

Ahhoz, hogy kvázi szabadtéri (free-field) méréseket tudjunk végezni egy reflektív környezetben, az adatokat ki kell értékelni a mérési pontba beérkező első rögzített reflexió előtt. Ehhez a mérőjelnek rövid időtartammal kell rendelkeznie és jól kapuzott rögzítést kell elvégezni. Ezen eljárás megvalósítása egyszerűnek tűnhet a mérőjel egyszerűsége miatt, azonban a jelfeldolgozásnál és kiértékelésnél körültekintően kell eljárni.

1.3 HANN-ABLAKOLÁS

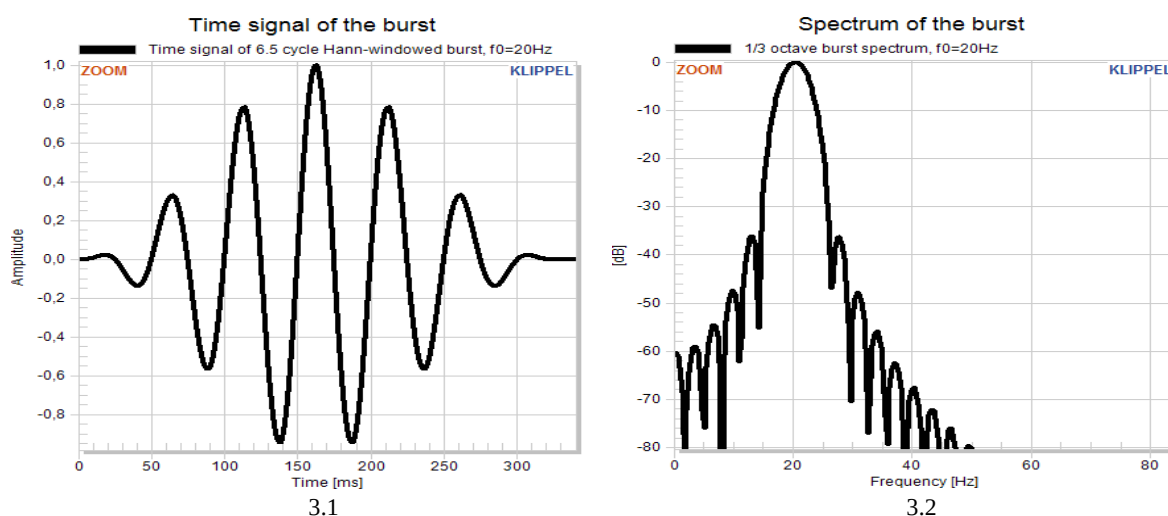
Az előzőekben megismert fogalmakra alapozva tekintsük át egy igen rövid időtartamú Hann-ablakozott gerjesztés létrehozásának folyamatát. Számos másik eltérő ablakoló függvény alkalmazható a spektrális komponensek változtatására. Legkézenfekvőbbnek a négyszög-ablakolás tűnhet, mely az eredeti szinuszos jelből különösebb formálás nélkül kivág egy darabot. Ezen mérőjelek f_0 frekvenciával és T időtartammal az időtartományban, egy olyan spektrummal karakterizálhatóak, melynek maximális energiája f_0 helyre összpontosított, $\frac{1}{T}$ sávszélességgel. A gond ott van, hogy spektrumukban alacsony frekvenciák felé jelentős fázis és amplitúdó torzítás lép fel, mely további jelentős hibákat okozhat a mérés során. A következőkben bemutatott Hann-ablakolás (emelt-koszinuszos ablakolás) egyik elterjedt változata a spektrumban korlátozott mérőjelek előállításának. A folyamatos szinuszos jelre ráülő koszoszuszos burkológörbe az alábbi egyenletbe integrált:

$$x(t) = \begin{cases} \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi f_0 t}{6.5}\right) \frac{\sin(2\pi f_0 t)}{2}\right) & \text{for } 0 \leq t \leq 6.5 / f_0 \\ 0 & , \text{ ahol} \end{cases}$$

$t = \text{idő [s]}$

$f_0 = \text{center frekvencia [f]}$

A teljes periódus 6,5 hullám. Minden tesz frekvencián konstans, így tartható a spektrumképben az azonos sávszélesség f_0 centerhez viszonyítva. A hullámforma középpontjához nézve szimmetrikus, maximális amplitúdója +1-hez normalizált, a középpontban ($t=3,25/f_0$). Legnagyobb negatív csúcs 0,994 (-0,5dB), szimmetrikus a középpont körül. A következő ábra a jel hullámformáját és spektrumát mutatja.



3.1 ábra. Egy 6,5 hullámú Hann-ablakozott szinuszos gerjesztés időfüggvényét mutatja, 3.2 ábra pedig a jel spektrumát ábrázolja.

Az alábbi teszt szignál lehetőséget nyújt számtalan vizsgálat elvégzésére. Frekvenciafüggő rövid idejű maximális SPL teszt, fázis-polaritás vizsgálat egyaránt lehetséges. A spektrum 1/3 oktáv szélességű, időtartama a frekvencia növekedésével csökken. Szubjektíve a Hann-ablakozott mérőjelek nem tűnnek olyan hangosnak, mint amennyire csúcsértékük jelzi. Ez fülünk integráló képessége miatt van, frekvencia függően 80-300ms időtartamra lenne szükség, hogy teljes hangerőként halljuk. Ezen mérőjelek sokkal halkabbak fülünk számára, mint egy folyamatos szinuszos gerjesztés azonos amplitúdóval. [3]

1.4 TORZÍTÁS MÉRÉSE

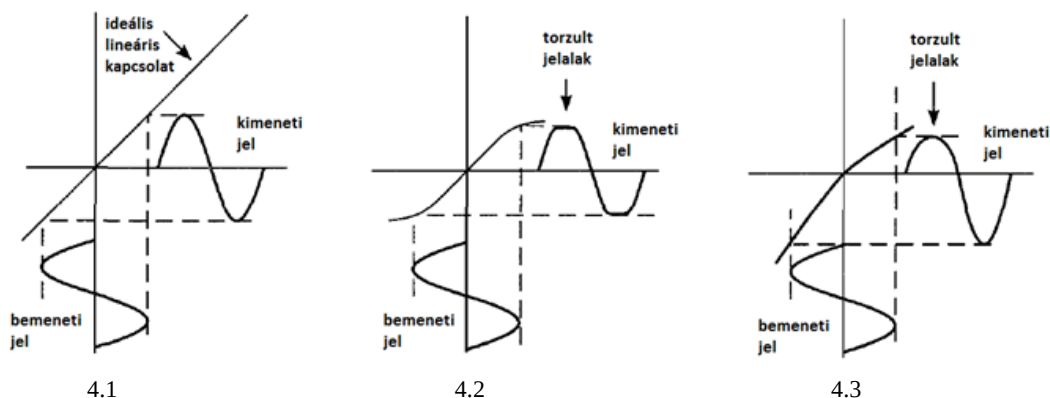
A soha el nem felejtett kérdés az átviteli, hangminőségi vizsgálatok során a torzítás mérése. Az elektroakusztikus átalakítókban a torzítás csak bizonyos mértékben megengedett, mérése sokszor nehézkes. Az átalakítók alapvető működésének megismerésével, valamint az emberi fül átvitelének vizsgálatával számos torzítási mérési módszer egyszerűbbé tehető, tisztázható. Minden átalakító rendelkezik valamilyen fizikai korláttal, fülünket beleértve. Működésük leírására számos eltérő módszert ismerünk. Objektív tesztek és szubjektív hallgatói vélemények egyaránt léteznek. A cél természetesen az, hogy meg tudjuk határozni mit hallunk és mit mérünk.

A torzítás definíciójának meghatározása előtt néhány elméleti alapismeretet tisztázni kell. A rendszerek nemlineáris viselkedésének leírása és értelmezése csak lineáris alaptulajdonságokra építhető. Például egy elektro-dinamikus hangszóró *Thiele – Small* paraméterei, kisjelű áramkörü helyettesítő képe, frekvencia és fázis átvitele sokat elmondhat annak minőségi viselkedéséről.¹ A valóságban azonban, a működési tartomány nagy részében nemlineáris velejárók keletkeznek, melyeket definiálni, és ha lehetséges kontrollálni kell. A következő részben az aktuális projekthez kellő alapvető elvi ismereteket fogom tisztázni.

1.4.1 DEFINÍCIÓ

Torzításról akkor beszélhetünk, ha a rendszer kimeneti válasza eltér a bemenetre adott gerjesztéstől, zaj, interferencia, erősítés vagy éppen csillapítás keletkezik. Két fő csoportját különböztetjük meg, lineáris valamint nem lineáris torzítást. Az 4.2. és 4.3. ábra szemlélteti a tipikus nemlineáris átvitel karakterisztikáit.

¹Rendkívül hasznos elméleti bevezetést ad (angol nyelven) a téma iránt mélyebben érdeklődőknek az elektro-dinamikus hangszóró fizikai működésével, lineáris paraméter modellezésével, mérésével kapcsolatban az alábbi forrás első intenzív tréningje. [Online] <http://www.klippel.de/training/>



4. ábra. Bemenő és kimenő jel kapcsolata a torzítás szemszögéből. 4.1. ábra szemlélteti a lineáris kapcsolatot, 4.2. ábra szimmetrikus torzítás karakterisztikáját mutatja, 4.3. ábra aszimmetrikus torzítás átviteli karakterisztikáját mutatja.

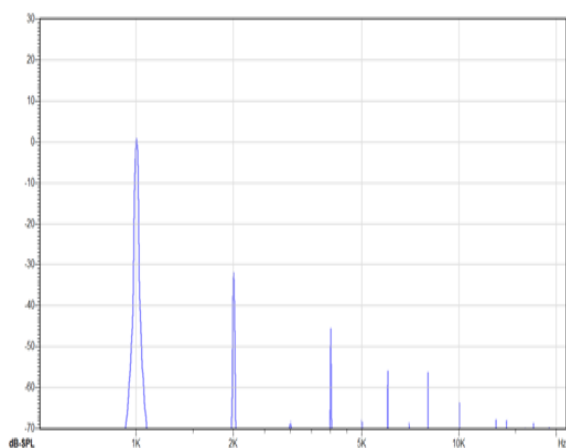
1.4.1.1 LINEÁRIS TORZÍTÁS

Idő és frekvenciafüggő karakterisztikája az amplitúdónak és fázisátvitelnek. Ilyen tulajdonságokkal rendelkezik pl. egy ideális hangszínszabályzó. Nem tesz változást a frekvencia tartalomban. Egy kitűntetett frekvencia a bemeneten csakis egy frekvenciaválasz lehet a kimeneten.

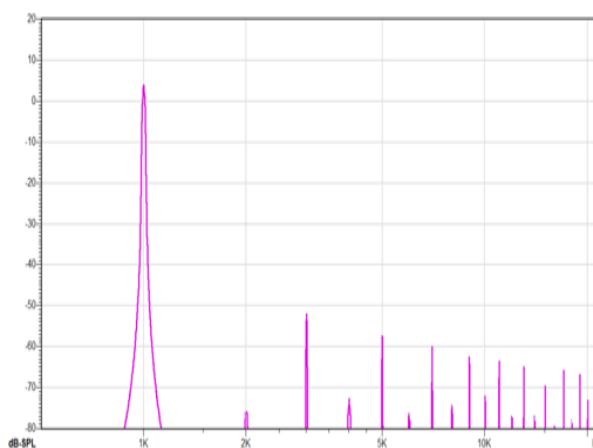
1.4.1.2 NEMLINEÁRIS TORZÍTÁS

A nemlineáris torzítás változást okoz a bemenetre került jel frekvencia tartalmában. Energiát transzformál át más frekvenciára, melyek a bemenő jelben nem voltak jelen. Általában a nemlineáris torzítás eredménye állandó frekvencia kapcsolattal rendelkezik. Legfontosabb tulajdonságai közé tartozik, hogy amplitúdó függő tényező. Az emberi fül rendkívül érzékeny a nemlineáris torzítások okozta eredményekre.

Az 4.2 ábrán látható szimmetrikus torzítás esetében, ha eléggé jelentős torzulása megy végbe a jelnek, pozitív és negatív félperiódusban is túlvezéreltté válik, annak spektrumában a páratlan felharmonikus komponensek fognak dominálni. Ellenkezőleg az 4.3 ábrán látható átviteli karakterisztikával, ahol kizárólag páros számú felharmonikus komponensek jönnek létre.



5.1

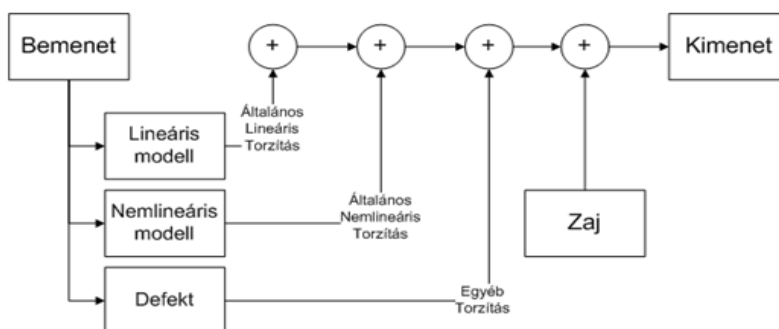


5.2

5.1 ábra. Pozitív félperiódusban túlzérelt 1kHz frekvenciájú szinusz jel spektruma. 5.2 ábra. Pozitív és negatív félperiódusban is túlzérelt 1kHz frekvenciájú szinusz jel spektruma. Látható, hogy a páratlan felharmónikusok dominálnak.

1.5 TORZÍTÁS LÉTREJÖTTE ELEKTRO-DINAMIKUS HANGSZÓRÓS HANGVISSZAADÁS ESETÉN

Az elektrodinamikus hangszórók teljesen eltérően viselkednek kisjelű és nagyjelű működési tartományban. Nagy amplitúdók esetében a nemlineáris torzítások a hang-reprodukció egyértelmű velejárói. Ezek a tulajdonságok szorosan összefüggenek a hangszórót alkotó erőforrásokkal pl. méret, mágnes súlya, tekercs magasságának valamint a fedlap légrés-magasságának aránya és sok más geometriai tényezője a felfüggesztő rendszernek. Így a lineáris modellezés során megállapított, villamos kapcsolási helyettesítő képből származtatott paraméterek (pl. merevség engedékenysége [C_{ms}], mozgó tömeg [M_{ms}], mechanikai ellenállás [R_{ms}], arányossági tényező [Bl]), nem állandóak. Ezen koncentrált paraméterek időbeli változása jeltorzulást okoz, új spektrális komponenseket létrehozva. Az így létrehozott torzítási komponenseket nevezzük harmonikus és intermodulációs termékeknek, melyek eredetileg a dinamikus hangszóró kapcsaira adott jelben nem voltak jelen. Amíg a lineáris modell az elektro-dinamikus hangszóró kisjelű viselkedését írja le, addig a nemlineáris modell jelen esetben vizsgálja a kimenet csillapításának, torzításának mértékét (különösen alacsony frekvenciákon), túlterhelési vizsgálatot tesz lehetővé, instabil viselkedést leírja és a hangszóró hatékonyságát vizsgálja. Az előbbieken felsorolt tulajdonságok mérésére két alapvető módszer, statikus és dinamikus mérési eljárás van kidolgozva. Egyéb torzítást befolyásoló tényezők előfordulhatnak. A gyártási procedúrából, öregedésből, túlterhelésből, klímái változásból és egyéb külső behatásból származó tulajdonságok szintén velejáró változásai az eszközöknek.

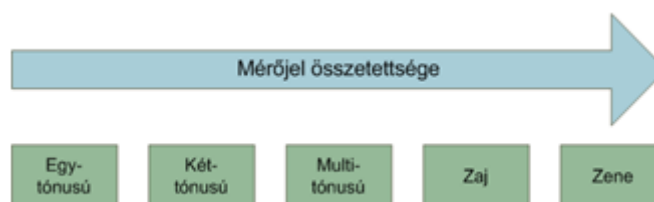


6. ábra. A jeltorzulás folyamata az audio láncban.

1.6 GERJESZTÉS ÉS VÁLASZ

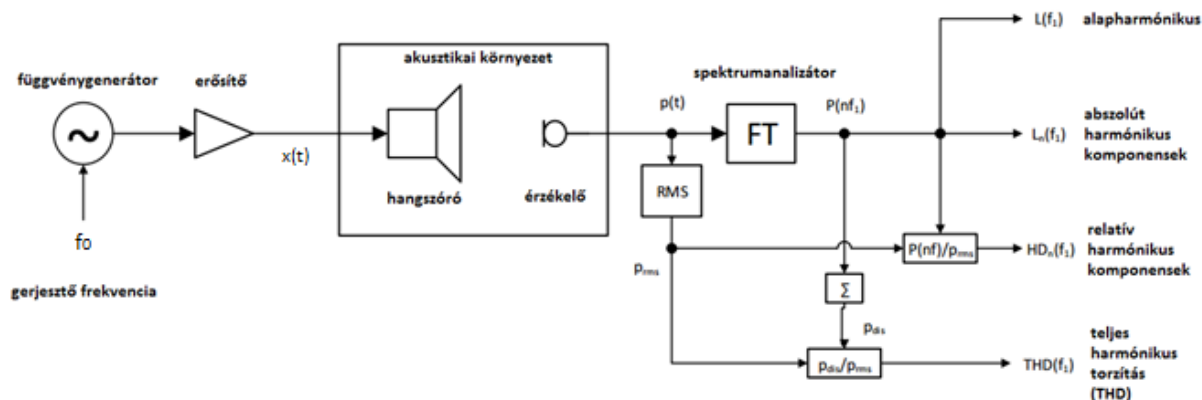
Minden valós rendszer a kimenetén a bemenetére adott jeltől eltérő választ ad. A kimeneten megjelenő eredmény erősen függ a bemenő jel összetettségétől.

A nemlineáris torzítás létrejötte egy komplex, többdimenziós folyamat. Egy egyszerű szinuszos gerjesztés nem feltétlenül fog aktiválni minden nemlineáris jellemzőt, ugyanakkor egy részhalmazuk mérhetővé válik. Másrészt, egy komplexebb mérőjel sokkal körültekintőbb kiértékelési módot kíván meg. Legkézenfekvőbb megoldás, ha eltérő mérőjelet használunk a különféle mérésekhez.



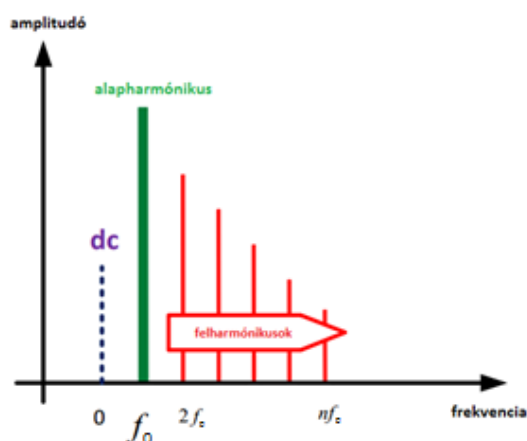
7. ábra A gerjesztő jelek bonyolultságát szemléltető diagram.

A 7. ábra alapján, a legegyszerűbb mérőjel egy szinuszos gerjesztés. A rendszer vizsgálható tehát egy meghatározott frekvencián (f_0), valamint további kitüntetett értékeken, vagy folyamatos pásztázás segítségével (sweep), az audio jeltartományon belül. Az akusztikus kimeneti válasz általában egy érzékelővel (tipikusan omnidirekcionális mikrofonnal) rögzítésre, továbbításra kerül jelfeldolgozásra, spektrális analízisre.



8. ábra Harmonikus torzítás mérése szinuszos gerjesztés segítségével.

A 9. ábra a mikrofonnal rögzített jel $p(f)$ spektrumát mutatja $P(f)$, melyet a rendszer $x(t)$ bemenő jel esetén produkált. Az alapharmónikus frekvenciája $P(f_0)$ a rendszert gerjesztő jel értékével egyezik meg. A felharmónikusok jelen esetben hozzáadott, nem kívánt komponensek $P(nf_0)$, melyek többszörösei az alapharmónikusnak (f_0).



9. ábra. Az akusztikus kimenet spektruma, mely f_0 frekvenciájú szinuszos gerjesztésre adott választ mutatja

A felharmónikusok amplitúdó értékei kifejezhetők abszolút és relatív formában. Az abszolút értékek általában dB -ben vannak megadva $Ln(f_0)$, melyek az emberi fül hallásküszöbének $Pascal$ -ban $[Pa]$ megadott értékéhez viszonyítottak, azaz $20\mu Pa$ -hoz.

A relatív formában megadott értékek szintén dB -ben számolhatóak, itt a referencia szint a négyzetes középértéke (rms) a teljes kimenő akusztikus teljesítménynek $p(t)$.

A teljes harmonikus torzítás (THD) értéke hányadosa az összes harmonikus torzítási komponens négyzetes középértékének, $P(nf)$, ahol $n \geq 2$, valamint a teljes kimenő jel rms értékének (p_{rms}).

A harmonikus torzítási komponensek tehát a rendszer kimenő jelének spektrumában jelen vannak és nemlineáris velejárói az eszközöknek. Másrészt megközelítve kijelenthető, hogy egy szinuszos gerjesztés esetén az eredmény nem ad átfogó leírást a vizsgált rendszer nemlineáris viselkedéséről.

Nagyjelű tartományban a hőmérsékleti és nemlineáris tulajdonságok további korlátokat jelentenek a hangszóró akusztikus kimenetét illetően. A lézeres érzékelővel mért membrán kitérés jelének amplitúdója csak kis jelek esetén nő lineárisan a hangszóró kapcsaira adott feszültséggel. Ebben a tartományban határozható meg a lineáris paraméterezés során megalkotott kisjelű villamos helyettesítő kép és származtatott egységei (Thiele-Small paraméterek). Az amplitúdó növekedést követően a felfüggesztő rendszer egyértelmű „limitere” lesz a hangkeltésnek.

További aszimmetriák a motorban (mágneskör, pólusvas, fedlap és a tekercs által alkotott rendszer) és a hangszóró felfüggesztésében egy DC komponenst hoznak létre, a tekercs helyzetét illetően, mely lézerral érzékelhető. Például az aszimmetrikus merevséget szemléltető $K_{ms}(x)$ karakterisztikája igazolja, hogy a tekercs folyamatosan a lágyabb felfüggesztés irányába kényszerül tolódni.

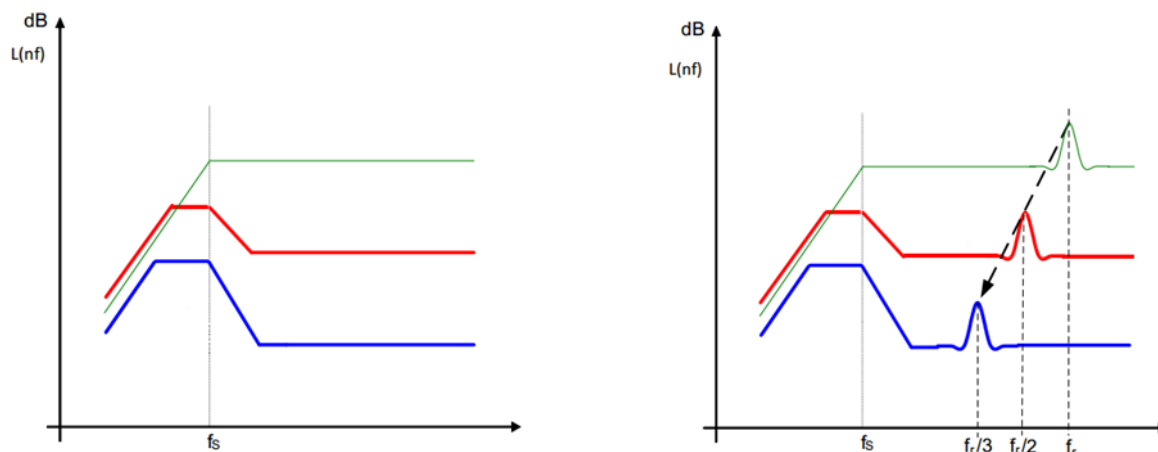
Az arányossági tényező $Bl(x)$, reprezentálja a csatolást az elektromos és mechanikus rész között, integrál értéke a mágneses indukciónak a tekercs teljes hosszán. Azonban ez az érték nem állandó. Kitérésfüggő tényezője a tekercs pillanatnyi helyzetének. Említést kell tenni a negatív irányban létrehozott elektromotoros erőről (EMF), mely a hangszóró villamos oldalán keletkezik és további nemlineáris csatolást hoz létre a membrán kitérése (x) és a kitérés sebessége (v) között.

Az egyen komponens nagyon kritikus eredmény, hiszen az összes kitérésfüggő nemlineáris tulajdonságot változtatja. Továbbá az így létrejött membrán eltolódás újabb nemlineáris tüneteket idéz elő. Különböző gyártók termékei tulajdonképpen kompromisszumok az előzőekben felsorolt problémák között.

1.7 HARMONIKUS TORZÍTÁS ÉRTELMEZÉSE

A harmonikus torzítás általában egy koordináta rendszerben kerül ábrázolásra az alapharmonikus f_0 görbéjével, azaz az átviteli karakterisztikával. Megadási mód a már korábban említett abszolút és relatív formában lehetséges. Példának okáért a mérés során megállapított 3. felharmónikus amplitúdója $3f_0$ helyen, mely f_0 gerjesztésre adott válasz, ábrázolható f_0 helyén a rendszer 3. felharmónikusaként. Meg kell jegyezni, hogy a kiértékelés nem minden esetben ilyen egyszerű.

A 10.1 ábra egy általános hangszóró abszolút formában megadott harmonikus torzításának 2. és 3. felharmonikus komponenseit szemlélteti. A mérés szabadtérben (süketszoba) let elvégezve.



10.1. ábra. Abszolút formában megadott harmonikus torzítás 2. és 3. felharmonikusa. 10.2. ábra. Abszolút formában ábrázolt harmonikus torzítás 2. és 3. felharmonikusa, utószobával rendelkező teremben.

A 10.2 ábra ugyanazon mérést mutatja, mely egy utószobával rendelkező teremben lett rögzítve. Jól látszik, hogy a terem tulajdonságai meghatározói lesznek az átvitelnek. Ezért a mérés elvégzése után a kapott eredményeket korrigálni kell a terem átvitelének megfelelően.

A terem egy utólagos szűrőként funkcionál, és saját frekvenciája (f_r) körüli tartományt felerősíti. Ez láthatóan egy csúcsot idéz elő az átvitelben $f_0 = f_r$ helyen. A felharmonikusok görbéjén szintén látható ez a ráemelés, de lentebbi frekvenciákon $f_0 = f_r/n$. Ennek oka, hogy az " n "-dik felharmonikus, ($n \geq 2$) lineáris szűrő tulajdonságán áthaladnak f_0 többszörösekként. Az ábra tehát egy terem általános átviteli tulajdonságát mutatja, mely az eredeti mérés kiértékelését egyértelműen bonyolítja. Különösen ajánlott a mikrofont a hangforráshoz minél közelebb elhelyezni, hogy a terem tulajdonságait a lehető legjobban minimalizáljuk. Így elegendő jel-zaj viszony érhető el (SNR).

1.7.1 PSZICHOAKUSZTIKA A HARMONIKUS TORZÍTÁS SZEMSZÖGÉBŐL

Fülünk szintén nemlineáris tulajdonságokkal rendelkezik, érzékenysége frekvenciában és amplitúdóban változik, felbontóképessége korlátozott. A Fletcher-Munson görbék szemléltetik, ezen kapcsolatot. Megállapítható, hogy azon zenei hangok, melyek a hallható tartomány szélein helyezkednek el (alacsony vagy magas frekvenciákon) kevésbé zeneiek, ellenkezőleg közép tartományban. Ez egyaránt igaz a torzítási komponensekre. Moir kísérlete szerint harmonikus torzítási komponenst 400Hz alatt sokkal nehezebb detektálni, mint felette.

A torzítás „zeneisége” meghatározója tartalmának, időalapú tényező. Kísérlettel megállapították, hogy egy 4ms időtartamú szinuszos mérőjel esetén a jel 10% torzítottsága esetén volt csak detektálható. Később a jel időtartamát 20ms-ra változtatták. Ekkor már 0.3% torzítás is hallható volt. [4]

1.7.2 ELFEDÉS

Az elfedés, más szóval maszkolás frekvenciában és időben is értelmezett. Okozhatja zaj is. A harmonikus torzítás esetében az effektus jobban érvényesül a második felharmonikusra, mint a harmadik felharmonikus komponensre. Az elfedés küszöbszintje kiszélesedik alacsony és magas frekvenciákon, valamint hangnyomásszint emelkedése esetén. Az elfedést kihasználják például a bitsebesség csökkentő forráskódolók (Dolby Digital).

A hangszerek által keltett hangok spektrumában jelenlevő harmonikusok felépítése egyaránt okozhat elfedést. A fuvola kevesebb és alacsonyabb frekvencia felharmonikusokkal rendelkezik, mint egy akusztikus gitár. A fuvola hangja inkább „tisztá”, a gitár hangja pedig „gazdag” felharmonikusok tekintetében.

Sokak szerint a vákuum csöves erősítők is gazdagabban, melegebben szólnak. Ez a nemlineáris torzításnak köszönhető. Tipikusan inkább aszimmetrikus torzításról beszélhetünk, mint szimmetrikusról. Magasabb 2. felharmonikus tartalommal rendelkezik, mint 3. felharmonikussal. A fül számára pedig az alapfrekvencia egész számú többszörösei (2,4,8,16) felharmonikusok egybeesnek a zenei oktáv távolságával, melyek jobban tolerálhatóak, kellemesebbek hallórendszerünk számára. [5]

Szimmetrikus torzításból származó páratlan felharmonikus komponensek a fül számára kevésbé tolerálhatóak. Erősebb túlvezéreltség esetén többszörös felharmonikusok (13-15) elkezdenek külön életet élni a jel zenei tartalmában, hallhatóan külön tartalomként megjelennek a kimeneten.

Egy elektro-dinamikus hangszóró esetében ezt a jelenséget vizsgálja, az ún. Rob n Buzz mérés.

1.8 MAXIMÁLIS HANGNYOMÁSSZINT MEGHATÁROZÁSA

Általában egy hangszóró által elérhető maximális hangnyomásszintet rövid idejű, nagy energiát hordozó gerjesztéssel határozzák meg. Ez a tényező idő és frekvenciafüggő mérőszám. Szimulálva ezzel egy zenei terhelés dinamikai karakterét, megelőzve a teszt alatt levő eszköz hőmérsékleti korlátait, tekercsének felmelegítését.

Számos definícióval találkozhatunk: „maximális hangnyomásszint” ($\max \text{ SPL}^2$), „folyamatos hangnyomásszint” (continuous SPL), „csúcs hangnyomásszint” (peak SPL). Végignézve a pro audio termékek adatlapját, a legtöbb gyártó ezen érték meghatározásához az ún. „kalkulált maximális hangnyomásszintet” adja meg, melyet a következőképpen számolhatunk:

$$M_{SPL} = N_0 + 10 \log P_{MAX} \quad (2)$$

ahol:

N_0 : a hangszóró $\frac{1W}{1M}$ érzékenysége
 P_{MAX} : maximális teljesítmény kapacitás, valamely szabványra hivatkozva (általában EIA vagy AES szabványok)

Könnyedén belátható, hogy a fentiekben említett kalkuláció nem adja vissza a hangszóró által rövid időintervallumon belül kelthető maximális értéket, melyet a zenei terhelés csúcsai előidéznek.

Egy hangszóróval kezelhető maximális teljesítmény értékének meghatározása tulajdonképpen a hosszúidejű túlterhelés megelőzésén alapul. Az elérhető maximális hangnyomásszint pedig azt írja le, hogy mekkora értékkel tudja az eszköz a zenei csúcsokat reprodukálni azon időintervallumon belül, mely terhelésekre a hőmérsékleti időállandó elegendően kicsi. Itt természetesen definiálni kell egy még elfogadható torzítási értéket. Ezért a maximális hangnyomásszint értéke, minden bizonnyal el fog térni a (2) képlet alapján számolt adattól.

Egyetlen rendszert jellemző (SPL_{MAX}) érték bevett gyakorlat. Jelen esetben feltételeztem, hogy a rendszer képes kiadni a rövid idejű gerjesztést. A maximális mérőszám a hangszóró nemlineáris korlátaitól, mögöttes elektronikai áramkörtől fog függeni. Ez lehet mechanikai limit, tekercs kitérés, levegő torzulása kompressziós driverben egyaránt. Meg kell jegyezni, hogy a torzítás pl. egy mélyközép hangszóróban nem csak a bemenő jeltől függ. Szűrők (alul-, felüláteresztő szűrő) tulajdonságai, meredeksége is meghatározója.

Ezen objektív tesztek elvégzésére leginkább szinuszos típusú gerjesztés, valamint az ún. Hann-kapuzott szinuszos jel használható. Kiértékeléséhez az időtartománybeli információt Fourier Transzformáció segítségével át kell transzformálni frekvencia tartományba, így számítható harmónikus torzítás, teljes harmónikus torzítás (THD) egyaránt.

A domináns intermodulációs termékek mérése nélkül azonban itt is meg kell jegyezni, hogy a rendszerről nem kapunk átfogó képet. Ez a mérési eljárás nagyobb frekvencia felbontás esetén időigényessé válhat. Az egyszerre több frekvencia komponens tartalmazó mérőjel (multitone, Gauss-zaj) következetes kalkulációja alternatívája lehet a koherens (inkoherens) jellemzők számításának.

²SPL: Sound Pressure Level (hangnyomásszint)

Mi a lényege a rövid idejű maximális akusztikus kimenet mérésének? Két eszköz összehasonlítása esetén egyértelműen döntő mérőszám lehet. Összevethető a maximális produkált hangnyomásszint és a bemenő teljesítmény szintje, mely frekvencia átviteli tulajdonságokkal szorosan összefügg. Átviteli oldalról vizsgálva jól alkalmas lineáris rendszerek tervezésére. Itt nem a lineáris frekvencia átvitelt értjük, hanem dinamikatartománybeli lineáris növekedést![6] Döntő adat keresztezési frekvencia választásánál, és végezetül választ ad arról, hogy „A” hangsugárzó volt hangosabb vagy „B”, illetve, melyik a jobb összeállítás „2X”, esetleg „3Y”?

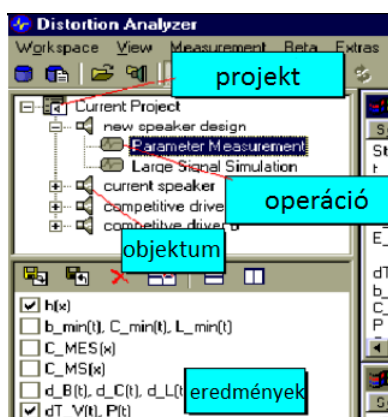
2. ANSI/CEA-2010-A SZABVÁNY IMPLEMENTÁLÁSA

A Consumer Electronics Association (CEA), 2012-ben vezetett be egy új mérési eljárást teljesítmény mélysugárzókra.[7] A szabvány célja, hogy egységes és megbízható mérési módszert biztosítson, segítséget nyújtva a gyártóknak és a végfelhasználóknak. Ezen CEA szabvány egy rövid idejű mérőjelen alapszik, mely az előző részben bemutatásra került. Hat különböző frekvencián vizsgálja a mélysugárzót 20Hz-63Hz között. Ugyanazon mérőjelek folyamatos amplitudó emeléssel kerülnek lesugárzásra mindaddig, még az átvitel spektrumában a felharmonikus komponensek át nem lépnek egy előre meghatározott küszöb szintet (threshold). Még a mérési eljárás aktív teljesítmény mélysugárzókra definiált, a módszer természetesen alkalmazható passzív hangsugárzók esetében is.

A megvalósított automatizált mérési módszer a német Klippel GmbH multifunkciós audio analízátorainak és számítógépes vezérlő eszközeinek erőforrásain alapszik. A következőkben egy alapfokú áttekintést, bemutatást teszek a felhasznált eszközökről.

2.1 dB-Lab GRAFIKUS INTERFÉSZ

A dB-Lab szoftver egy projekt orientált Microsoft Windows alkalmazás. A cég fizikai mérőeszközei (DA2 – distortion analyzer, lézeres szkennerek, near-field szkennerek) és a felhasználó között teremti meg a kapcsolatot. Egységes interfész az összes mérési modul számára. Egy adatbázis összegző alkalmazás, melyben a felhasználó szabadon rendezheti korábbi méréseit, és új mérések előkészítését szabhatja meg. Mérési adatok exportálása és importálása széles körűen lehetséges. Egy egységes keretet alkot a Klippel R&D (research and developement) rendszeréhez. A mérési adatok exportálása HTML-fájlokban tárolt, összegzi a mérési adatokat egy nagyon egyszerű formában. A következőkben a dB-Lab szotverben alkalmazott struktúrát mutatom be négy fontos fogalom alapján, melyet a 11. ábra szemléltet.



11. ábra dB-Lab grafikus interfészben alkalmazott struktúra

A szoftver az objektum-orientált programozási nyelvekben alkalmazott struktúrát követi. A **projekt** a környezet alapjaként szolgál. Lehetőséget nyújt, hogy egyszerre több objektumot jelenítsen meg a felhasználó, akár több mappából. Bármely teszt alatt lévő eszköz (elektrodinamikus átalakító, áramkör) a dB-Lab szoftverben **objektumként** szerepel, és egy felhasználó által definiált névvel menthető el. Az objektumok az operációkban tárolt mérési adatokat gyűjtik össze. A felhasználók szabadon menthetik el, készíthetnek elő további mérési procedúrákat. Az **operáció** művelete mérési eljárást hajt végre, legyen szó analízisről, szimulációról, kalibrációról, összehasonlításról, adat exportálásról. Végezetül az **eredmények** szolgálnak az operációk kimeneteként. Általában numerikus vagy grafikus formában tárolt eredményekről beszélünk. Ezen információk kerülnek kijelzésre a számítógépen, vagy éppen tárolásra, nyomtatásra, utó-processzállásra (Scilab, Matlab).

2.2 DA2 HARDWARE

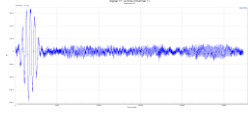
A torzításmérő (DA2) egy precíziós fizikai mérőeszköz, mely a mérési modulok elvégzését teszi lehetővé, valós idejű digitális jelfeldolgozó egységével együtt. A készülék önálló működésre is képes, a készülékházon elhelyezett vezérlők segítségével. Számítógépre való csatlakoztatás után USB-interfészen keresztül a korábbiakban említett dB-Lab szoftver a készülék teljes körű vezérlésére alkalmas. A hardware egy magas minőségű két csatornás AD/DA konverterrel rendelkezik, egészen 96kHz-es mintavételező frekvenciáig. Két teljesítmény vonallal rendelkezik, melyen keresztül hangsugárzót közvetlenül meghajthat. Ezen csatornák áram és feszültség szenzorral vannak ellátva egészen 240V/ 50A-ig. Számtalan típusú kitérést mérő szenzor (lézeres szenzor) csatlakoztatható az analízátorhoz, párhuzamosan az áram és feszültség mérések mellett.

A torzításmérő beépített mikrofón tápegységgel rendelkezik, így közvetlenül csatlakoztathatóak fantom (+48V) segéd feszültséget igénylő eszközök, vagy IEPE áramgenerátoros meghajtást igénylő érzékelők.

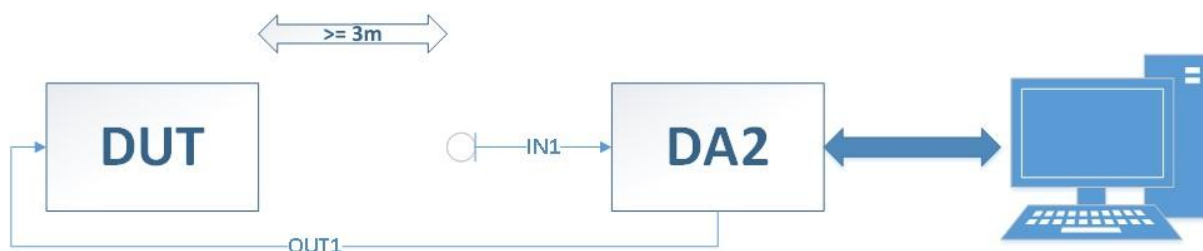


12. ábra Klippel DA2 hardware interfész előlnézetből.

2.3 MÉRÉSHEZ SZÜKSÉGES ESZKÖZÖK

MÉRÉS ELVÉGZÉSÉHEZ SZÜKSÉGES ESZKÖZÖK		
Mérendő eszköz (DUT ³)		Aktív teljesítmény mélysugárzó, mely mélyfrekvenciás hangvisszaadásra tervezett 120Hz alatt.
DA2		Klippel DA2 torzításmérő eszköz
dB-Lab TRF MODUL		Átviteli karakterisztikát vizsgáló modul
Mikrofon		Omnidirekcionális kalibrált mérőmikrofon

Fizikai összeállítás:



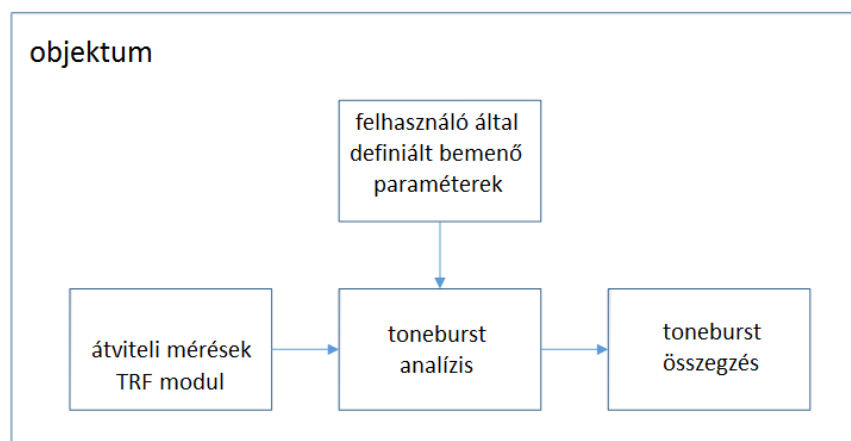
13. ábra. Mérési összeállítást szemléltető diagram.

A 13.ábra alapján a minta adatbázis ki- és bemenetei előre definiáltak. A torzításmérő 1. bemenetére csatlakoztathatjuk az irányfüggetlen mérőmikrofont, 1. vonalszintű kimenetre pedig a mérendő eszköz csatlakoztatható. Szükség van természetesen egy számítógépre a dB- Lab szoftver legújabb verziójával. Ezután a szabványban definiált hangsugárzó és mikrofon távolság beállítható.

Fontos megjegyezni, hogy a halláskárosodás megelőzésének érdekében a mérést végző személynek ajánlott fülugót, egyéb védőeszközt viselnie.

³DUT: Device Under Test (mérendő eszköz)

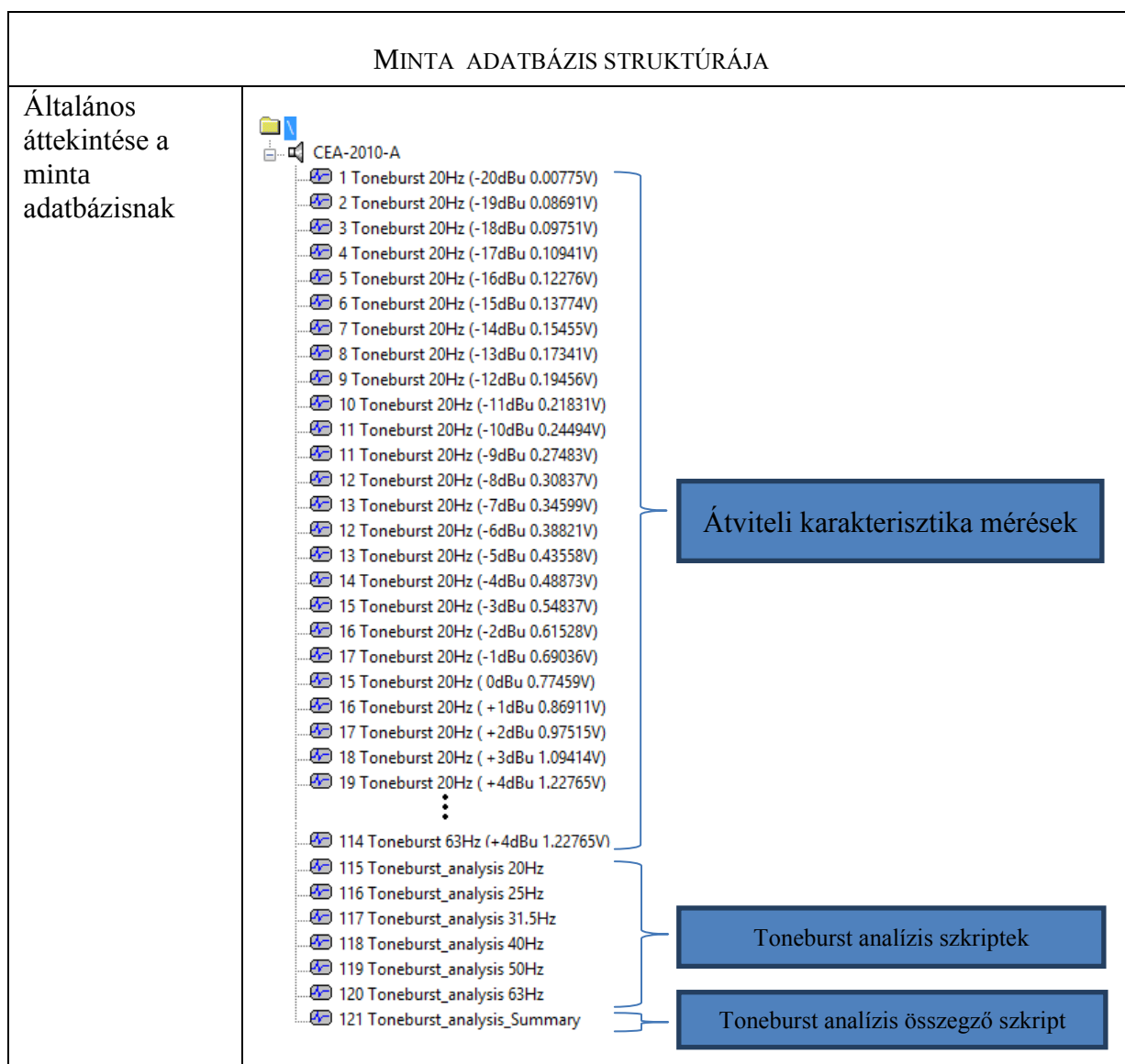
2.4 SCRIPT BEMUTATÁSA



13. ábra. A megvalósított program általános blokkvázlata

modulok segítségével hajtható végre. Ekkor az átvitel időfüggvénye, mely egy kalibrált mikrofonnal kerül rögzítésre, tárolásra kerül. Ez a folyamat megismétlődik minden egyes teszt frekvenciával, a felhasználó által előre definiált különböző feszültség értékekkel. A rögzített adatok ezután kiértékelés és utó-processzálas alá kerülnek. A Toneburst analízis szkriptek összegyűjtik az azonos teszt frekvenciához tartozó különböző amplitudójú méréseket és kiértékelik azokat. Összesen hat különböző teszt frekvencia van, tehát hat különböző Toneburst analízis szkript foglal helyet a minta adatbázisban. Végezetül az ún. Toneburst analízis összegző szkrip összegyűjti a szabvány szempontjából hasznos mérési adatokat és elkészíti az ott előírt végleges táblázatot, beilleszti az eredményeket.

2.4.1 ADATBÁZIS FELÉPÍTÉSE



A minta adatbázis alapján jól látszik a három részből álló strukturált felépítés. A szoftver felépítésének köszönhetően csoportos mérés indítása lehetséges, ezért a mérési folyamat, adatok kiértékelése automatikus módon, külső beavatkozás nélkül elvégezhető.

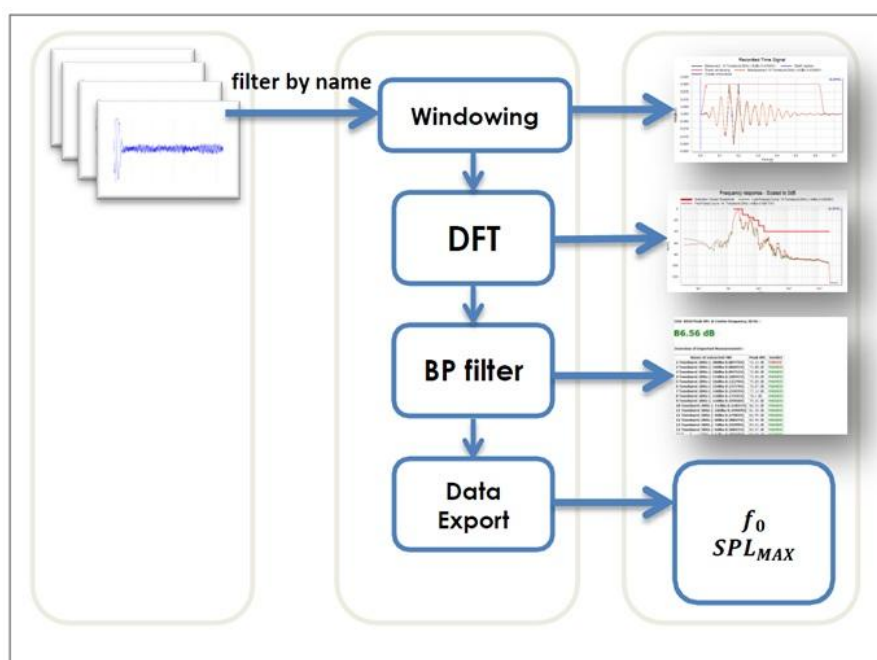
2.4.2 KIÉRTÉKELÉS

EREDMÉNYEK				
Minta táblázat	Tone Burst Center Frequency (Hz)	Maximum SPL	CEA-2010 Rating	Az alábbi táblázat a szabvány leírásában definiált. Az első oszlop a mérés közép-frekvenciáját mutatja. A második oszlopban a maximális hangnyomásszint mért értéke olvasható, ahol a referenciaszint 1Pa = 94 dBSPL. Az alábbi SPL adatokból az abszolút hangnyomás számítható, majd átlagolható ún. ultra- mély tartományban, valamint mély tartományban. Az átlagolt hangnyomás értékek a szabványban előírt módon átlagoltak, és kerekítettek. A végleges mérőszámok egysége dB SPL.
	20	65	78	
	25	74		
	31.5	77		
	40	81	117	
	50	89		
	63	95		

Számos mérési helyiség, félsüket szoba átviteli karakterisztikája módosíthatja a mérési eredményeket. Ebben az esetben korrigálni kell a mért adatokat az ún. terem-korrektációs tényező alapján, melyet a mérési helyiség kalibrálásakor kaphatunk.

2.5 TONEBURST ANALÍZIS SZKRIPT

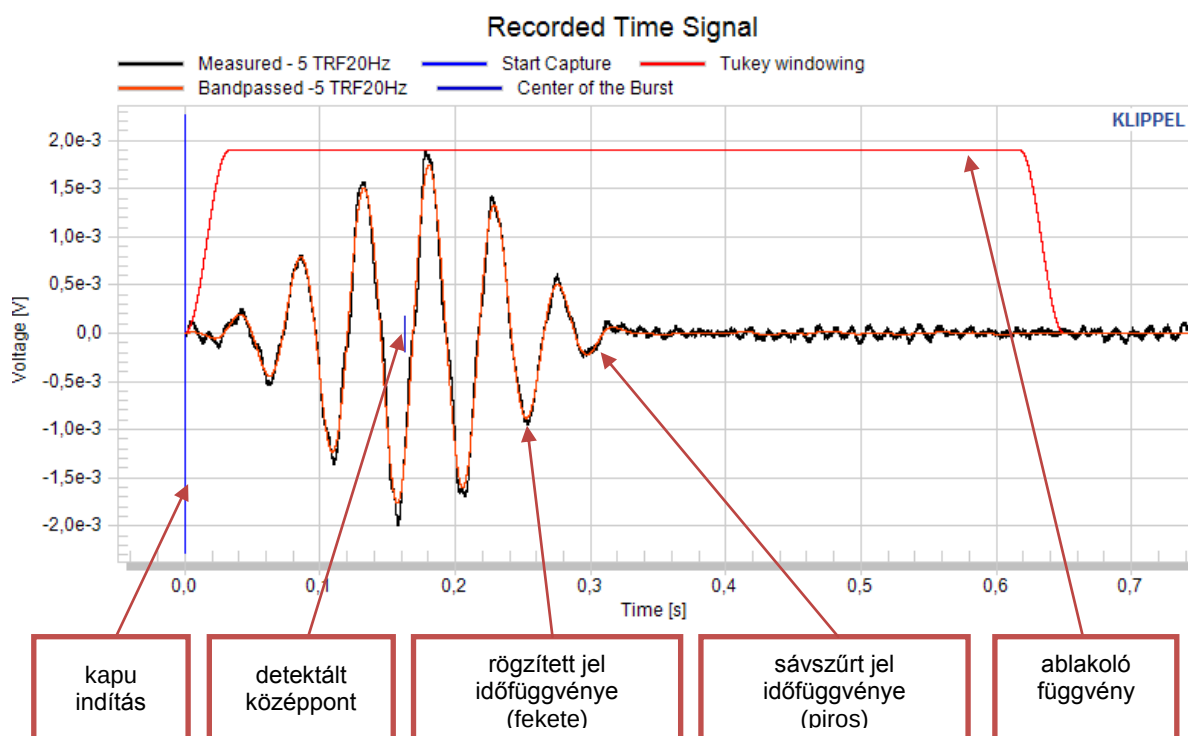
A következőkben az utó-processzálas mérőföldköveit mutatom be. A 14. ábra a jelfeldolgozás lényeges állomásainak folyamatait szemlélteti.



14. ábra. Az utó-processzálas folyamatát mutatja a Toneburst analízis szkriptekben

A rögzített jel időfüggvénye az időtartományban egy ablakoló függvény segítségével súlyozásra kerül. Ezt követően Diszkrét Fourier Transzformációval a jel spektrális összetevői megjeleníthetők lesznek, további részszámítások elvégezhetők. Komplex-frekvencia tartományban egy ún. sávszűrőn keresztül (band-pass filter) bizonyos spektrum komponensek elnyomásra kerülnek, összpontosítva a mérőjel középponti frekvenciájára. Végezetül részeredmények továbbításra kerülnek az összegző szkript számára. A továbbiakban részletesebben bemutatom a 14. ábrán megjelölt folyamatokat.

2.6 ABLAKOLÁS



15. ábra. Az ablakolás folyamatát szemléltető kép.

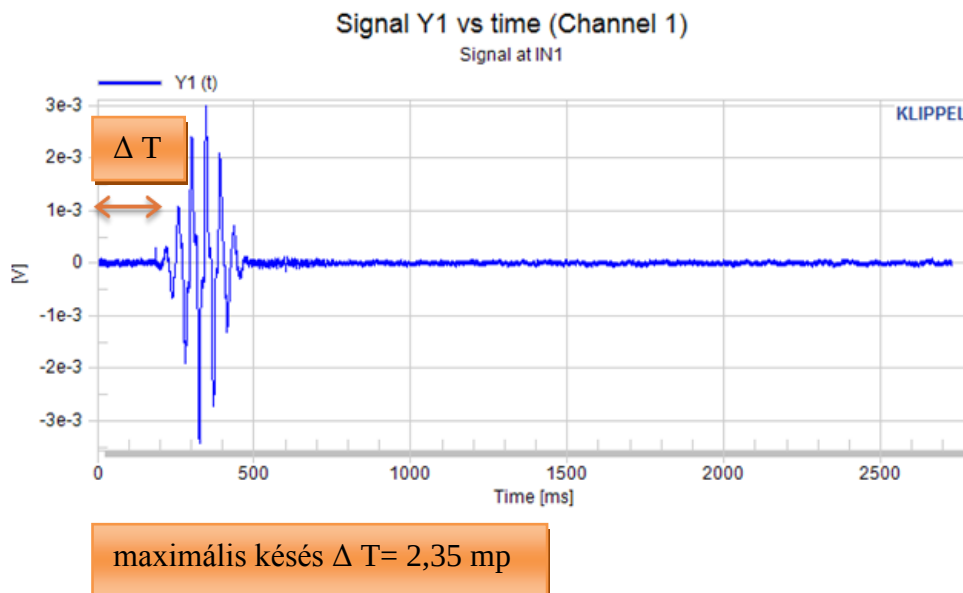
Az időtartományban közvetlenül a rögzítés után egy ablakoló függvény segítségével súlyozásra kerülnek a minták. A folyamat közben a rögzített jelet korreláltatom az eredeti mérőjellel, mely a szkriptben újra generálásra kerül. Ennek eredményeként a rögzített mérőjel középpontja jól meghatározható. A középpont alapján a jel késleltetése, mely a rendszer által létrehozott, előre ismeretlen szám, meghatározható. A középpontra építve egy négyszögablak kezdő és végső pontja könnyen definiálható, számítható. Ezen pontok adják az itt használt Tukey ablakoló függvény kezdő és végpontjait. Az ablakoló függvény kezdete a teljes mérőjel periódusidejének felével korábban történik, még a végpont másfél periódusidővel később helyezkedik el a detektált középponthoz képest. A felfutó és lefutó él (fade in / fade out) ideje az ablakoló függvénynek 10%-a a teljes ablakolt időtartamnak. Ezen eljárás segítségével a

spektrumban előforduló négyszög ablakolásból származó zajok, ugrások minimalizálhatóak. Teljes mértékben dinamikus ablakoló függvényről van szó, nem függ a rendszer által keltett késleltetéstől (latency).

2.7 MAXIMÁLIS KÉSÉSI IDŐ

A mérés a rögzítési oldalról egy kitüntetett maximális értékű késésig (latency) képes működni. Ez az érték 2,35 másodperc. Amennyiben ennél nagyobb értékről van szó, a rögzített gerjesztés időfüggvénye csonkolásra kerül. Ennek oka, hogy az átviteli karakterisztikát mérő modul 2,7 másodperces rögzítést tud elvégezni. A leghosszabb mérőjel ($f_0 = 20\text{Hz}$) 350ms időtartammal rendelkezik. Egyszerű számolás után megállapítható a 2,35 mp tartalék idő.

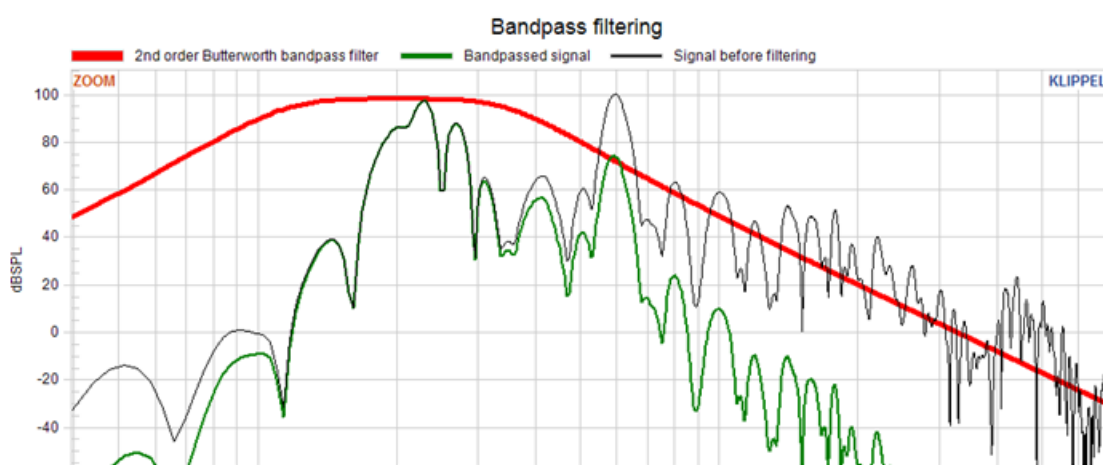
Késés származhat az elektronikus eszközök válaszüdejéből (analóg áramkörök, DSP művelet elvégzési idő), valamint a hanghullám levegőbeli terjedéséből. Ugyanakkor fontos megemlíteni ezt a mérőszámot, hiszen a legújabb aktív teljesítmény mélysugárzók legtöbbször saját digitális jelfeldolgozó egységgel rendelkeznek. A 16. ábra egy rögzített mérőjel időfüggvényét mutatja 200ms késéssel.



16. ábra. 200ms-os időkésést szemléltető diagram.

2.8 SÁVSZŰRÉS

A Diszkrét Fourier Transzformáció (DFT) után a rögzített jelet egy nullfázisú másodrendű Butterworth sávszűrővel konvolváljuk (12dB/oktáv meredekség). Ezzel az eljárással a magas frekvenciás zajok, csúcsok a felharmónikus tartományban elnyomásra kerülnek, összpontosítva a középponti frekvenciára. Így az aktuális mérőjel frekvenciájához tartozó maximális csúcs számítható. A sávszűrő függvény maximuma az aktuális rögzített jel f_0 frekvenciájánál lévő maximumhoz normalizált minden esetben. A 17. ábra szemlélteti a sávszűrő görbáját (piros), az eredeti jelet (fekete), valamint a sávszűrt jelet (zöld).



17. ábra. A kép szemlélteti a másodrendű Butterworth szűrő átvitelét.

2 MAXIMÁLIS HANGNYOMÁSSZINT

A hangnyomásszint maximális értéke, mely $f_0 \pm 3\text{Hz}$ tartományban helyezkedik el az alábbi összefüggés alapján számítható:

$$SPL_{max} = 20 \log_{10} \left(\frac{U_{csúcs}}{U_{ref}} \right) + 94 \text{ dB}$$

ahol:

$U_{csúcs}$: mikrofonnal rögzített jel csúcserőteljesítménye

U_{ref} : a mikrofon kalibrációból származó feszültség referencia (pl.: 50mV = 94 dB SPL)

3 ÖSSZEGZÉS

Mit jelent a CEA-2010-A szabvány valójában az ipar számára? Beszállítói oldalról nézve egy hangszóró tervezése során sokkal körültekintőbben kell eljárni a motor és a membrán felfüggesztés tervezését illetően. A torzítási komponensek befolyásolják a mérési eredményeket így erősítők terén kW nagyságrendű teljesítményre szükség lesz. Gyártói oldalról tekintve a „Wattok versenyét” megállító mérőszám lehet, hiszen itt nem csak az a fontos milyen hangos a hangsugárzó, hanem az is, hogy hogyan. Másrészt egy egyszerű mérőszám lehet, melynek segítségével különböző gyártók teljesen eltérő típusait össze tudjuk hasonlítani. Kiskereskedők számára a CEA-2010-A mérőszám mint egy értékesítési eszköz szolgálhat. A végfelhasználók tekintetében pedig egyszerű, intuitív módon való összehasonlítást kínál, hiszen a végleges mérőszámok a torzítás függvényében, jó középutat kínálnak a szubjektív és objektív paraméterek között, melyre korábban nem volt példa.

Munkám során a Klippel GmbH fizikai mérőrendszerére készítettem egy automatizált mérési módszert. Objektumorientált programozási ismereteimet jelentősen fejlesztettem. Az elméletben megtanult elektroakusztikai alapokat a projekt megvalósítása során gyakorlatban is alkalmaztam. Az eredmények kiértékelése során különös hangsúlyt kellett fektetnem a hibadetektálásra, problémák kiküszöbölésére, melyek a mérés technika és jelfeldolgozás mélyebb megértését tették lehetővé.

A program kódrészletei teljes mértékben dinamikusak, könnyen módosíthatóak, így további szabvány implementálás alapját képezhetik. Számos további szűrő, mintavételező függvény párhuzamosan megvalósításra került, így a jövőben csak paraméterezni kell, gyorsabb átállást biztosítva hasonló szabványokhoz (THX Ultra, Ultra2).

TARTALOMJEGYZÉK

- [1] Wersényi György, Pszichoakusztika és az emberi térhallás alapjai, 4. fejezet, Jelfeldolgozás és transzformációk
- [2] Siegfried Linkwitz, "Shaped Tone-Burst Testing", JAES, Vol. 28, No. 4, April 1980
- [3] Keele D., "Development of Test Signals for the EIA-426-B Loudspeaker Power Rating Compact Disc", presented at the 111th Convention of the Audio Engineering Society, New York (Sept. 2001).
- [4] D. B. Keele "Low Frequency Loudspeaker Assessment by Nearfield Sound-Pressure Measurement", J. of the Audio Eng. Soc., April 1974, Vol. 22, No. 3
- [5] Steve Temme, Audio Distortion Measurements, Bruel Kjaer Application Note 1992
- [6] John Meyer, „Linear Cinema Sound: A foundation for Emerging Sound formats”, Cinema Technology Magazine 2012
- [7] ANSI/CEA Standard, "Standard Method of Measurement for Powered Subwoofers ANSI/CEA-2010", November 2012.