

Mérési jegyzőkönyv

Sujbert László, Fiala Péter

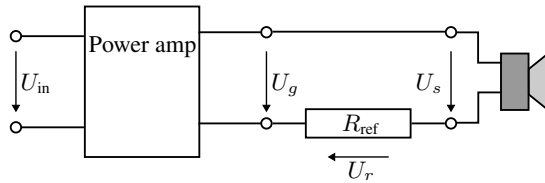
2024. február 6.

1. Bevezetés

2. Kábelátvitel-mérés

3. Bemenőimpedancia-mérés

A hangsugárzó bemenő impedanciájának méréséhez az 1. ábrán látható elrendezést alkalmaztuk. Az alkalmazott műszerek adatait az 1. táblázat tartalmazza.



1. ábra. Az impedanciaméréshez használt mérési elrendezés

A Yamaha HIFI teljesítményerősítő bemenetére 1 V amplitúdójú seprt szinusz (sweep) jelet kapcsoltunk, melynek frekvenciája 1 Hz és 25 kHz között változott, időben exponenciális frekvenciakarakterisztika szerint, ezzel biztosítva, hogy minden oktávsávban azonos időt töltsön. Az ábrán ezt a gerjesztést U_{in} jelöli. A teljes sweep jel időtartama 10.2 s volt.

A HIFI teljesítményerősítő hangerőszabályozóját úgy állítottuk, hogy az erősítő U_g kimenetét a ± 5 V mérés-határú adatrögzítő műszerrel megfelelő kivezélés mellett vissza tudjuk mérni.

A teljesítményerősítő kimenetén a hangsugárzóval sorba kapcsoltunk egy nagy pontossággal ismert R_{ref} ellenállást, és szimultán mértük az erősítő kimenő U_g feszültségét és az ellenálláson eső U_r feszültséget. A hangsugárzó bemenő U_s feszültsége a kettő különbségeként adódik: $U_s = U_g - U_r$, a hangsugárzó bemenő áramerősségét pedig $I_s = U_r / R_{ref}$ összefüggés alapján számíthatjuk.

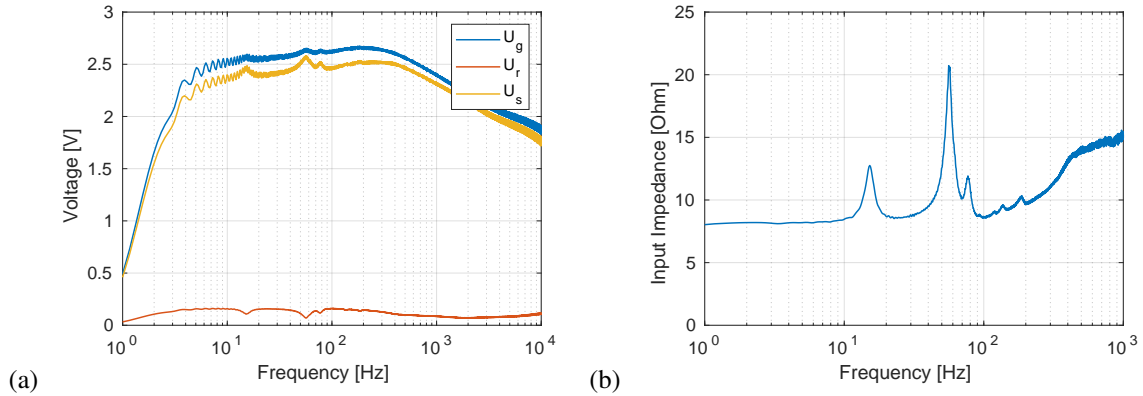
Az U_s feszültség és I_s áramerősség ismeretében felvehető a hangsugárzó frekvenciafüggő komplex bemenő impedanciája $Z_s = U_s / I_s$ formában.

A feszültségek frekvenciafüggő komplex csúcsait a mért seprt szinusz időfüggvényekből Fourier-elemzéssel határoztuk meg. A mintavételi frekvencia $f_s = 51.2$ kHz, a mintaszám $N = 524288$, így a frekvenciafelbontás $\Delta f \approx 0.1$ Hz. A mérési zajok csökkentése érdekében az U_{in} mérőjelet hatszor ismételtük, és az U_g és U_r válaszokat H_1 -becslővel átlagoltuk.

Az így mért feszültségek amplitúdómenetét a 2(a). ábra mutatja. A kisfrekvenciás letörés a teljesítményerősítő karakterisztikája, ez nem enged alacsony frekvenciás jelet a hangsugárzóra a nagy amplitúdójú

1. táblázat. A méréshez használt műszerek adatai

Yamaha RxV800RDS	HIFI teljesítményerősítő	
Hameg HM8115	teljesítménymérő	
NI 9234A	4-csatornás mérési adatgyűjtő	24 bit, 51.2 kHz
BK 4188 SN1901746	kondenzátor mérőmikrofon	30 mV/Pa
BK 4188 SN1901747	kondenzátor mérőmikrofon	28 mV/Pa
NiHu.Lab	mérőszoftver	



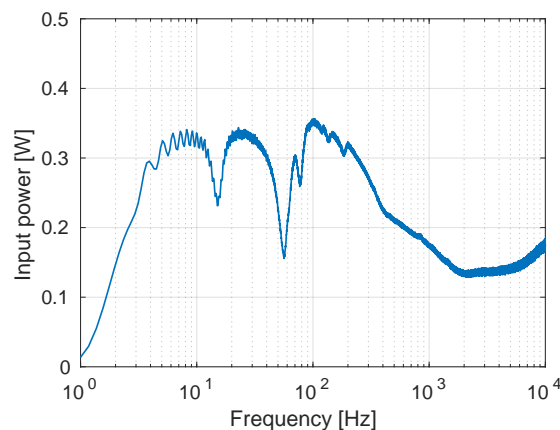
2. ábra. (a) Az erősítő kimenő U_g feszültsége, illetve az ellenálláson és a hangsugárzón eső U_r és U_s feszültségkomponensek amplitúdóinak frekvenciamenetei. (b) Az erősítő bemenő impedanciájának frekvenciamenete

membránkitérések elkerülése érdekében. A nagyfrekvenciás letörés abból adódik, hogy a teljesítményerősítő kimenő impedanciája véges. A kis- és nagyfrekvenciás letörés nem befolyásolja a mért impedanciát, csak annak jel-zaj viszonyát, de a vizsgált frekvenciatartományon azt is csak elhanyagolható mértékben.

A Z_s bemenő impedancia amplitúdómenetét a 2(b). ábra mutatja. Az impedanciagörbéről leolvasható, hogy a hangsugárzó kisfrekvenciás (közel DC) „névleges” impedanciája $8\ \Omega$. Az ábrán három határozott csúcs fedezhető fel, ezek három mélysugárzó rezonanciafrekvenciái: $15\ \text{Hz}$ -en jelenik meg az első rezonanciacsúcs, ennek értéke $12\ \Omega$, majd $57\ \text{Hz}$ és $77\ \text{Hz}$ frekvenciákon jelentkezik a következő két csúcs, rendre $20\ \Omega$ és $12\ \Omega$ csúcserősséggel. Egy-két apró kiemelkedés felfedezhető a nagyobb frekvenciás tartományban, ezek a magassugárzó rezonanciafrekvenciái. A kHz környéki tartományban a bemenő impedanciában az induktív tagok dominálnak, ezek emelik a bemenő impedancia abszolút értékét. Az egyes sugárzó rezonanciacsúcsai a hangszórók alsó törésponti frekvenciái: ezen frekvenciahatárok alatt a hangszórók által lesugárzott hangnyomás az elméleti $-12\ \text{dB/oct}$ meredekséggel csökken.

4. A bemenő elektromos teljesítmény mérése

Az 1. ábrán mutatott elrendezés alkalmas a bemenő elektromos teljesítmény mérésére is, ezt $S = \frac{1}{2} \Re \{ I_s^* U_s \}$ alakban fejezhetjük ki, ahol $*$ a komplex csúcs komplex konjugáltját jelöli, \Re pedig a valósrészt képező operátora.



3. ábra. A hangsugárzó által felvett elektromos teljesítmény frekvenciamenete

A hangsugárzó által felvett elektromos teljesítmény frekvenciamenetét a 3. ábra mutatja. Természetesen ez a görbe függ a teljesítményerősítő frekvenciamenététől és hangerő-beállításától. A mérésben alkalmazott beállítások mellett a felvett elektromos teljesítmény kicsi, a pár száz mW nagyságrendben mozog. Mivel a használt digitalizáló mérőműszer nem alkalmas arra, hogy a teljesítményerősítő magasabb kimeneti szintjei mellett visszamérje annak kimenő feszültségét és ezen keresztül a hangsugárzó bemenő teljesítményét, az 1 elrendezés csak kis

jelszintek mellett használható. Nagy jelszintű mérések esetén az elrendezést kiegészítettük egy közvetlen teljesítménymérő műszerrel, mely a nagy feszültségtartományban is képes meghatározni a hangsugárzó bemenő teljesítményét tisztán monokromatikus harmonikus gerjesztés esetén. A kétféle teljesítménymérési módszerrel adódó teljesítményeket a kis jelszintű tartományban összehasonlítottuk, és megfelelő egyezést tapasztaltunk.

5. Érzékenységmérés

A hangsugárzó dB-ben kifejezett érzékenysége definíció szerint az a hangnyomásszint, melyet a sugárzó főirányában, a membrántól 1 m távolságban mérünk, amennyiben a sugárzó bemenetére 1 kHz frekvenciájú, 1 W teljesítményű harmonikus jelet kapcsolunk. Az érzékenység frekvenciamenetének definíciója analóg, de nem 1 kHz frekvencián, hanem a frekvencia függvényében.



4. ábra. A hangnyomásmérés mérési elrendezése

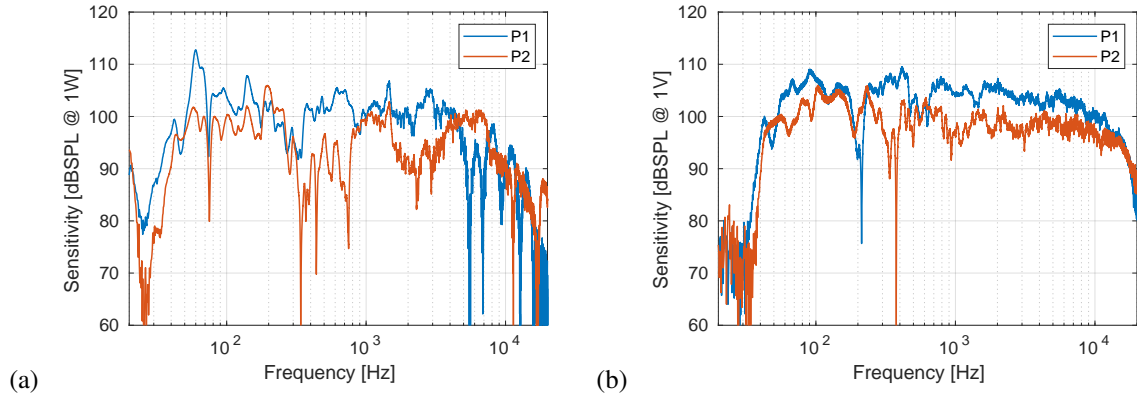
A hangsugárzó érzékenységét a kis jelszintű tartományban mértük, eszerint az 1. ábra elrendezését bővítettük a lesugárzott hangnyomás méréseivel. A hangsugárzót az Akusztikai Laboratórium félszabad hangterű mérőszobájában helyeztük el, és a lesugárzott hangnyomást két pozícióban, kondenzátor mérőmikrofonokkal mértük. A P1 pont a sugárzótól szabványos 1 m távolságra helyezkedik el, a padlószinttől 0.8 m magasságban. A P2 pont távolabb, a membránok síkjától 2.5 m távolságra helyezkedik el, szintén 0.8 m magasságban. Annak érdekében, hogy a padlóról érkező reflexiók hatását csökkentsük, a hangsugárzó és a mikrofonok között a padlót hangelnyelő szivaccsal fedtük le. Az elnyelő szivacs csak a nagyfrekvenciás tartományban csillapítja a visszaverődéseket a megfelelő mértékben, a kisfrekvenciás tartományban a padlóról érkező reflexiók interferálnak a direkt hanggal, és befolyásolják a mérés eredményét.

Az érzékenységmérés elrendezésével kapcsolatban megjegyezzük, hogy a nagy kiterjedésű, tízutas hangsugárzó érzékenységének mérése több elvi kérdést is felvet. Egyrészt jelen tízhangszórós sugárzó esetében nem egyértelmű a sugárzó főirányában, a membrántól 1 m távolságban elhelyezkedő pont pozíciója (magassága). Másrészt az egyes hangszórókból kiadott hangjelek is interferálnak egymással, és az interferencia eredménye a hangszóró közelterében természetesen erősen helyfüggő. Ez azt jelenti, hogy a mért érzékenység frekvenciamenetet a közel térben a többutas terjedésből adódó erős leszívások és kiemelések színezik, melyeket egyrészt teljesen szabad hangterű mérőszobában, illetve a sugárzótól nagy távolságban végzett mérésekkel lehetne kiküszöbölni.

Annak érdekében, hogy az érzékenységmérés szobafüggésének hatását egyszerűbb mérési elrendezéssel is tudjuk vizsgálni, azonos elrendezéssel párhuzamosan megmértük egy Genelec 1030A stúdiómonitor hangszóró frekvenciamenetét is. Ez egy lényegesen kisebb méretű, kétutas hangsugárzó, mely esetén az egyes hangszórókból érkező jelek interferenciája a kisfrekvenciás tartományban elhanyagolható, és a padlóreflexiók hatása is könnyebben értelmezhető. A vizsgált tízutas sugárzó és a Genelec stúdiómonitor közti további lényeges különbség, hogy a Genelec stúdiómonitor aktív, vagyis bemenő impedanciája és bemenő elektromos teljesítménye nem értelmezhető. Ezért a Genelec stúdiómonitor „érzékenységét” nem 1 W bemenő teljesítmény, hanem 1 V bemenő feszültség esetén mértük.

A két mért érzékegység frekvenciamenetet az 5. ábra mutatja. A stúdiómonitor esetén a két éles leszívás jól azonosítható a 0.8 m magasságban elhelyezkedő hangsugárzóból érkező padlóreflexió destruktív interferenciájaként. A destruktív interferencia frekvenciája

$$f_0 = \frac{c}{2\Delta l}, \quad (1)$$



5. ábra. A hangsugárzó érzékenységének frekvenciamenete (a) tízutas hangsugárzó, (b) Genelec 1030A stúdiómonitor

ahol c a hangsebesség, Δl pedig a direkt és reflektált hangutak úthosszkülönbsége. Jelen mérési beállításnál a P1 pont esetén $f_0 = 203$ Hz, a P2 pont esetén pedig $f_0 = 366$ Hz, ami az 5(b) ábra görbéivel összhangban van. A magasabb frekvenciás interferenciákat a padlóra fektetett elnyelő már csillapítja. Megjegyezzük, hogy a stúdió monitor mért frekvenciamenete összhangban van annak specifikációjával, mely szerint frekvenciaválasza a 55 Hz–18 kHz frekvenciatartományon ± 2.5 dB-en belül egyenletes.

A tízutas hangsugárzó esetén a frekvenciamenet összetettebb, nagyobb ingadozásokat mutat. A sugárzó érzékenysége a középfrekvenciás tartományban magas, 100 dB körül mozog. A 80 Hz környéki leszívás mérési pozíciótól független, ez nagy valószínűséggel a sugárzó sajátja. A közeli P1 pontban mérhető nagyfrekvenciás fésűszűrő-hatás az egyes magassugárzókból érkező jelek interferenciájának köszönhető. A nagyfrekvenciás letörés viszonylag hamar, már 7 kHz-en jelentkezik.

6. Torzításmérés

Mérésekkel meghatároztuk a hangsugárzó harmonikus torzítását. A harmonikus torzítás azt határozza meg, hogy a hangsugárzó a bemenetire adott harmonikus jelek alakját mennyire torzítja. Ha az átvitel tökéletesen lineáris, úgy a kimeneti hangnyomásjel is tökéletesen szinuszos. Eltérő esetben a kimenő hangnyomásjel alakja torzul, és ez abban nyilvánul meg, hogy spektrumában megjelennek az alaphfrekvencia egész számú többszörösein is komponensek.

Ezt a jelenséget demonstrálja a 6. ábra. Az ábra bal oldalán a (majdnem) tisztán harmonikus feszültséggerjesztés időfüggvénye és spektruma látható. A jobb oldalon a nyomásválasz időfüggvényét és spektrumát mutatja. Az ábra szándékosan olyan esetet mutat (kis frekvencia és nagy teljesítményszint), ahol a harmonikus torzítás nagy. Ez megfigyelhető a jelalak torzulásában és a spektrumban a felharmonikusok megjelenésében is.

A torzításmérés elrendezése egyszerű. A mérőerősítő bemenetére adott f_1 frekvenciájú digitálisan generált szinuszjelet kapcsoltunk, és mértük a hangsugárzó által lesugárzott nyomásjelet. Noha a torzításmérés szempontjából a többutas terjedés (reflexiók és interferenciák) nem releváns, a mérést a félszabad hangterű mérőszobában végeztük.

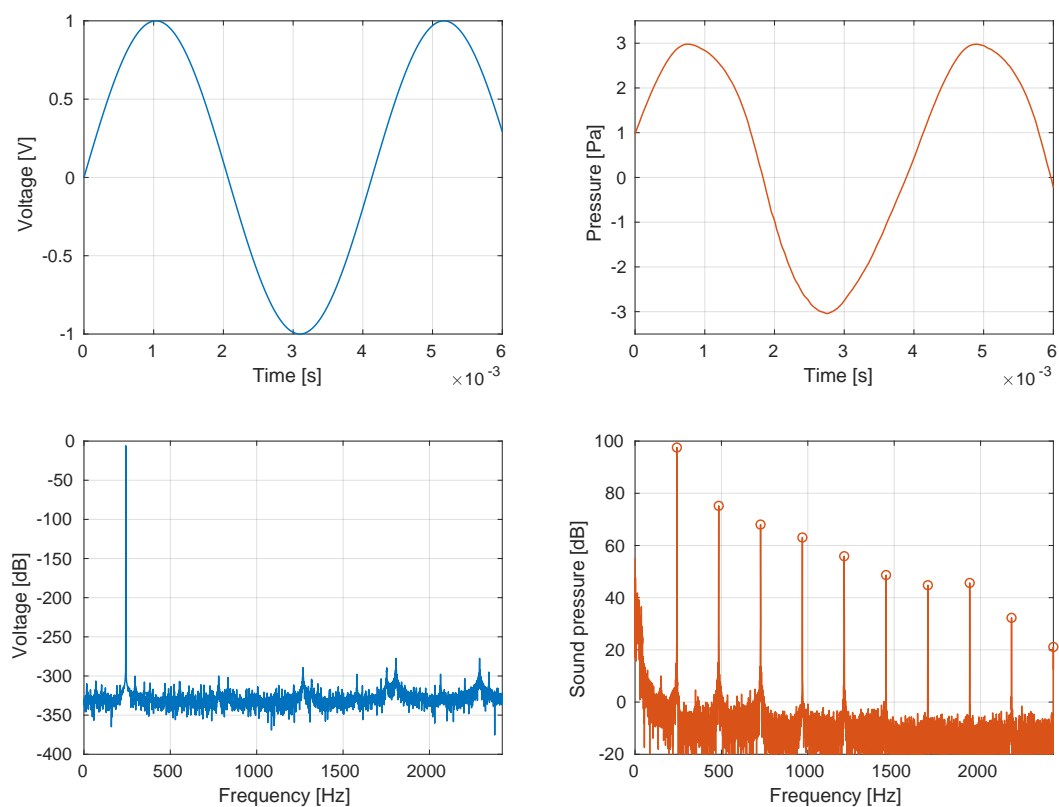
A d_h harmonikus torzítást a nyomásjel spektrális elemzésével határoztuk meg

$$d_h = \frac{\sum_{k=2}^K |P_k|^2}{\sum_{k=1}^K |P_k|^2} \quad (2)$$

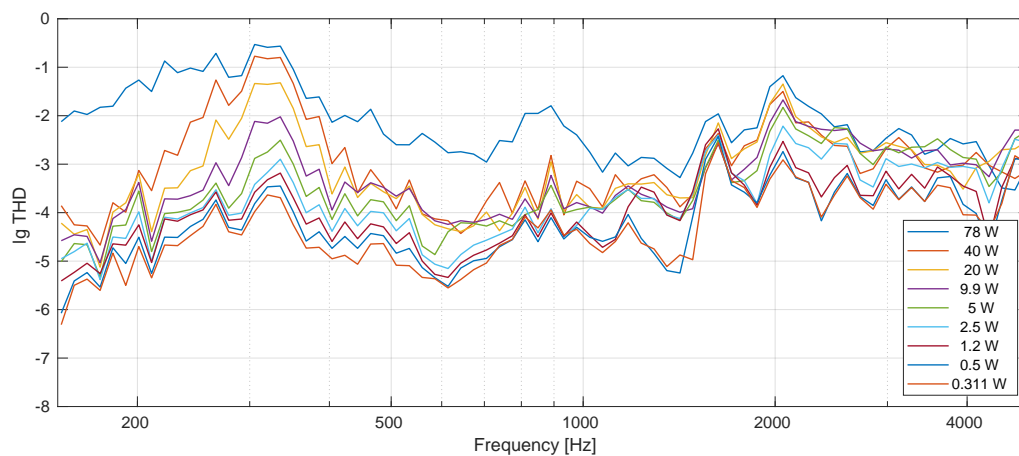
alakban, ahol P_k a $k \times f_1$ frekvenciájú, k -adik felharmonikus amplitúdója ($k = 1$ az alapharmonikust jelenti). Ezeket a felhang-amplitúdókat a hangnyomásjel gyors Fourier-elemzésével állítottuk elő. Ügyeltünk arra, hogy a mintavételezés koherens legyen (az alapharmonikusra egész számú minta essen), így küszöbölve ki a diszkrétizálásból származó spektrumszivárgás hatását.

A harmonikus torzítást száz, logaritmikusan elosztott diszkrét frekvenciaértéken mértük 100 Hz és 10 kHz között. A torzításmérést megismételtük számos különböző teljesítményszinten.

Az összes mérés eredményét a 7 ábra foglalja össze.



6. ábra. A harmonikus torzítás jelensége. A felső sor a jelalakokat az időtartományban mutatja, az alsó sorban a frekvenciátartalmuk látható. A bal oldal a feszültséggerjesztést, a jobb oldal a nyomásválaszt ábrázolja egy, a példa kedvéért kiválasztott magas torzítású esetre. Itt a teljesítményszint 40 W, a mérési frekvencia pedig 240 Hz.



7. ábra. A harmonikustorzítás-mérés eredménye

7. Összefoglalás