

# Elektroakusztikai átalakítók vizsgálata

A mérési leírást kidolgozta: Firtha Gergely és Rucz Péter

Mérési leírás  
Akusztika és hangtechnika laboratórium

## 1. Bevezetés

A mérés az Akusztika c. tantárgy során megismert elektroakusztikai átalakítókrol szerzett ismeretek elmélyítésére szolgál egy dinamikus hangszóró jellemzőinek vizsgálatán keresztül. A mérés során a kisméretű hangszórókat alkalmazható koncentrált paraméterű helyettesítőképeleket vizsgáljuk, illetve azok hatását az átalakító elektromos és akusztikai oldali jellemzőire. Az egyes hangszórógyártók ezeket a paramétereket gyakran feltüntetik magasabb minőségű hangszórók közötti adatlapján, amelyek a jelen mérés során referenciaértékként szolgálnak. A mért paraméterek fontosságát jelzi, hogy adott hangszórótípushoz tervezett zárt, vagy reflexnyílással ellátott doboz méretezése során a dobozparamétereket ezekhez a jellemzőkhöz kell igazítani. Ezen méretezési kérdések nem képezik részét a jelen mérésnek, az interneten jelentős terjedelmű irodalom elérhető a témában.

## 2. Elméleti bevezető

### 2.1. Lesugárzás végtelen féltérbe

Az elektroakusztikai átalakítók tárgyalása előtt didaktikai okokból elkerülhetetlen egyszerű lesugárzási problémák megértése. Ezt legegyszerűbb esetben a végtelen térbe való lesugárzás esetén tárgyaljuk, amikor a megfigyelt térfogatban kizárólag a sugárzó felület által keltett hullámok terjedését mérjük, így a falakról történő visszaverődéseket nem tárgyaljuk. A feltételezés létjogosultságát alátámasztja, hogy rendszerint a hangszórógyártó cégek is végtelen falba ágyazott hangszóró átviteli karakterisztikáját teszik közzé az egyes hangszórók adatlapjaiban. A végtelen falba ágyazás koncepciója az, hogy így az akusztikai rövidzár jelenségét kizárjuk, amely egy szabadonálló hangszóró mélyátvitelét jelentősen rontaná,<sup>1</sup> azonban ebben az elrendezésben kizárólag a hangszóró által keltett direkt hangokat mérjük. A gyakorlatban ezeket a méréseket süketszobában végzik, a hangszórókat a legmélyebb mérendő frekvenciához tartozó hullámhossznál nagyobb kiterjedésű merev síklapba ágyazva.

Általános esetben egy rezgő test felületén a pillanatnyi hangnyomás vagy a felületre normális részecske sebesség ismeretében a térbe sugárzott hangnyomás a Kirchhoff–Helmholtz-integrál segítségével számítható. A probléma

meglehetősen komplex, a közelítő megoldás általában csak numerikus módszerekkel érhető el. Ha a rezgő felület egy végtelen síklap vagy annak valamely része, a feladat jelentősen egyszerűsíthető, megoldását a Rayleigh-integrálok szolgáltatják. Amennyiben egy rezgő síklap minden  $\mathbf{x}_0 \in S$  pontján ismert a sík normális irányú  $V_n$  részecske sebessége, a végtelen térben létrejövő  $P(\mathbf{x})$  hangnyomást a Rayleigh-I integrál adja meg, amely a frekvenciatartományban a következő alakú:

$$P(\mathbf{x}, \omega) = -2\rho_0 j \omega \iint_S V_n(\mathbf{x}_0, \omega) \frac{1}{4\pi} \frac{e^{-j\frac{\omega}{c}|\mathbf{x}-\mathbf{x}_0|}}{|\mathbf{x}-\mathbf{x}_0|} d\mathbf{x}_0, \quad (1)$$

ahol  $\rho_0 = 1,2 \text{ kg/m}^3$ ,  $c = 343,1 \text{ m/s}$  rendre a levegő sűrűsége és a hangsebesség szobahőmérsékleten. Inverz Fourier-transzformáció után az időtartományban:

$$p(\mathbf{x}, t) = \frac{\rho_0}{2\pi} \iint_S \frac{\partial}{\partial t} v_n(\mathbf{x}_0, t - \frac{|\mathbf{x}-\mathbf{x}_0|}{c}) \frac{1}{|\mathbf{x}-\mathbf{x}_0|} d\mathbf{x}_0. \quad (2)$$

Mivel egy hangszóró membránja a működési frekvenciatartományban jó közelítéssel síknak tekinthető – azaz a membránt egy merev falba ágyazott dugattyúként modellezzük –, ezért a Rayleigh-integrál jó becslést ad egy membrán által lesugárzott hangnyomás meghatározására. Ekkor  $\mathbf{x}_0 \in S$ , ahol  $S$  a membrán felülete.

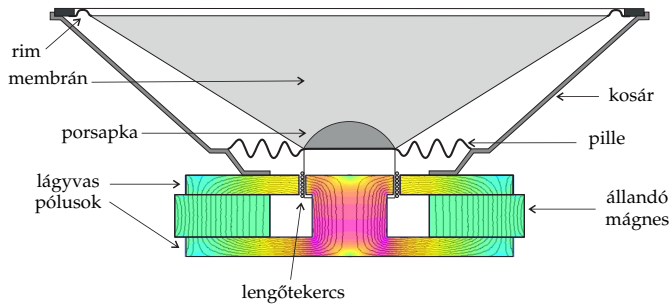
A Rayleigh-integrál szemléletes jelentése a következő: a  $\frac{1}{4\pi} \frac{e^{-j\frac{\omega}{c}|\mathbf{x}-\mathbf{x}_0|}}{|\mathbf{x}-\mathbf{x}_0|}$  függvény az ún. háromdimenziós Green-függvény, amely egy 3D pontforrás<sup>2</sup> által lesugárzott hangteret adja meg. Ez a terjedési útból adódó késleltetést és a terjedési úttal fordítottan arányos amplitúdócsökkenést foglalja magában. A Rayleigh-integrál alapján tehát a membrán minden egyes pontja elemi pontforrásként járul hozzá a teljes lesugárzott térhez, amelynek súlyozó tényezője a membrán pontjainak lokális normális irányú gyorsulása (a részecske sebesség idő szerinti deriváltja). Amennyiben tehát a membrán gyorsulása ismert, a végtelen falba ültetett membrán által lesugárzott nyomástér a Rayleigh-integrál szerint számítható. Relatív alacsony frekvenciákon – amíg a membrán modális viselkedése nem jelentős – a membrán minden pontjának kitérése, és így gyorsulása is azonos. Ezeket a frekvenciákat a hangszóró koncentrált paraméterű modellje érvényes. A következőekben ezt a leírási módot tárgyaljuk részletesen.

### 2.2. A dinamikus hangszóró működése

A leggyakrabban alkalmazott elektroakusztikai átalakító a dinamikus hangszóró, amely működését tekintve egy elektrodinamikus átalakító.

<sup>1</sup>Egy szabadon rezgő dinamikus membrán két oldalán azonos hangnyomás áll elő, egymáshoz képest ellenfázisban. Amennyiben a tér lassan változik – azaz mélyfrekvenciás komponens vizsgálunk –, a nyomáskülönbség lokálisan kiegyenlítődik anélkül, hogy számottevő energia elsugárzódhatna a térben. Ezt a jelenséget nevezzük akusztikai rövidzárnak.

<sup>2</sup>Pontforrás: forrás, melynek térbeli kiterjedése egy Dirac-delta.



1. ábra. A dinamikus hangszóró felépítése. Az ábra folytonos vonalakkal jelzi a mágneses kör indukcióvonalainak irányát, illetve különböző színekkel az indukcióvektor nagyságát az állandómágnes és a mágneses vezetők belsejében.

Az elektrodinamikus átalakítás működési elve egyszerű: adott egy állandó mágnessel és a mágneses erővonalak vezetésére szolgáló nagy relatív permeabilitású anyaggal (angolul *pole piece*, jellemzően lágúvas) létrehozott állandó mágneses kör, amely egy légrésben záródik. A légrésben a mágneses indukció jó közelítéssel homogénnek tekinthető, a mágneses indukcióvektor iránya és nagysága a légrés minden pontjában egyenlő. A légrésbe áramjárta vezetőt helyezve a mágneses tér hatására a vezetőre a Lorentz-erő hat, amelynek iránya a jobbkézszabály szerint merőleges mind a mágneses indukcióvonalakra, mind az áram irányára:

$$f(t) = i(t)l \times \mathbf{B}, \quad (3)$$

ahol  $i(t)$  a vezető árama,  $l$  a vezető irányába (azaz az áramsűrűségvektorral azonos irányba) mutató vektor, nagysága a vezető hosszával egyenlő.

A dinamikus hangszóró felépítését az 1. szemlélteti. Láthatjuk, hogy ebben az esetben az áramjárta vezető egy lengőtekerccs (angolul *voice coil*). A geometriából adódóan az áramsűrűségvektor minden pontban merőleges a mágneses indukcióvektorra, így a tekerccsre ható erő nagysága egyszerű szorzatként kifejezhető:

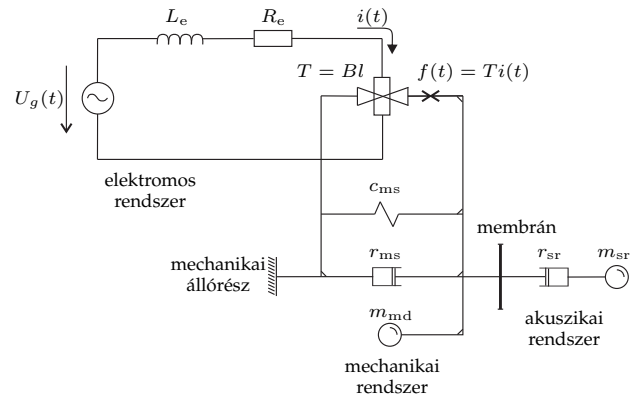
$$f(t) = i(t)Bl. \quad (4)$$

A membránhoz ragasztott lengőtekerccs a hangszóró állórészéhez, a kosárhoz (*frame*) oly módon van rögzítve, hogy a kosárhoz képest merőleges (azaz a Lorentz-erő irányában való) elmozdulásra képes, a membránon keresztül mozgásba hozva az előtte álló légtömeget. A rugalmas felfüggesztést a belső peremen a pille (*spider*), a külső peremen a rim (*surround*) valósítja meg.

Ugyanakkor, ha egy vezető  $v(t)$  sebességgel mozog állandó mágneses tér jelenlétében, a vezető által metszett erővonalak száma – így a mágneses fluxus – változik, amely változás hatására a Faraday-féle indukciós törvény értelmében a vezető két vége között potenciálkülönbség ébred. Ez a feszültség a jelenlegi egyszerű geometriára (a sebességvektor és a mágneses indukcióvektor egymásra merőlegesek) a következő alakban írható

$$u(t) = Blv(t). \quad (5)$$

Az így indukált feszültség hatására induló áram iránya olyan, hogy az őt létrehozó hatásokat csökkenteni próbálja, így a hangszóró elektromos impedanciáját növeli.



2. ábra. A dinamikus hangszóró koncentrált paraméterű helyettesítő képe

Az elektromos és mechanikai mennyiségek között tehát ugyanaz a mennyiség teremt összefüggést, ez a hangszóró  $T = Bl$  *transzmissziós tényezője* (angolul *force factor*, mértékegysége  $[T \cdot m]$ , vagy  $[\frac{N}{A}]$ ) a hangszóró egyik legfontosabb jellemzője.

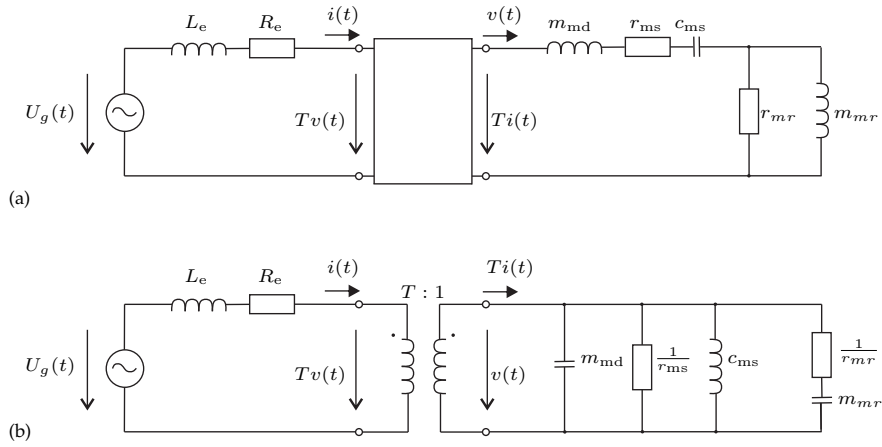
A végtelen falban rögzített dinamikus hangszóró koncentrált paraméterű modellje a 2. ábrán látható. A modell három fő szerkezeti egységből áll.

- Az elektromos oldalon a lengőtekerccs induktivitása ( $L_e$ ) és soros ohmos ellenállása ( $R_e$ ) található. Az  $e$  alsó index az „electrical”-ra utal. Egyes modellekben a tekerccsinduktivitás örvényáramok okozta frekvenciafüggését további soros LR tagokkal reprezentálják.
- A mechanikai oldalon a lengőrendszer paramétereit láthatjuk, amely a membrán és a lengőtekerccs tömegéből ( $m_{md}$ ), a pille és a rim engedékenységből ( $c_{ms}$ ) valamint a súrlódásból (felfüggesztések veszteségéből) származó veszteségi ellenállásból ( $r_{ms}$ ) áll. Az  $m$  alsó index a mechanical, a  $d$  a diaphragm, az  $s$  pedig a suspension (felfüggesztés) rövidítése. Mivel ezek együtt mozognak a mechanikai állórészhez képest, így modellünkben ezen elemek közös sebességre vannak kapcsolva. A két oldal közötti kapcsolatot, a mechanikai oldal erőgerjesztését az elektromechanikai átalakító végzi el.
- Az akusztikai oldal a membránt terhelő levegőt modellezi annak sugárzási impedanciájával. Ez a membránnal *együttrezgő levegőtömegből* és a *sugárzási ellenállásból* áll, amelyek értékére különböző membránalakok esetén összetett képletek állnak rendelkezésre. Jó közelítéssel a membrán egy végtelen falba ágyazott sík dugattyúként modellezhető, amelynek  $z_s$  specifikus impedanciája a fal egy oldalára számítva

$$z_s = \frac{p}{v} = 1,44\rho_0 c \times j\omega 0,85r\rho_0 = r_{sr} \times j\omega m_{sr}, \quad (6)$$

ahol  $r$  a membrán sugara. Az elektromos szempontból párhuzamos impedanciák közös nyomásra kapcsolt specifikus impedanciákként jelennek meg<sup>3</sup>.

<sup>3</sup>Az akusztikai rövidzár jelensége szabadonálló hangszóró esetén a sugárzási impedancia drasztikus csökkenéseként fogalmazható meg. Ekkor a kisfrekvenciás közelítés  $z_s = 0,03\omega^4 r^4 \rho_0 / c^3 + j\omega 0,425r\rho_0$



3. ábra. A dinamikus hangszóró koncentrált paraméterű helyettesítő kapcsolása

Megjegyzendő, hogy kisfrekvencián közös sebességre kapcsolt impedanciákkal is kifejezhető a specifikus impedancia<sup>4</sup>, ekkor

$$z'_s = 0,5\omega^2 r^2 \rho_0 / c + j\omega 0,85r \rho_0 = r'_{sr} + j\omega m_{sr}. \quad (8)$$

A mechano-akusztikai átalakítást a membrán végzi el, amely hatására a specifikus impedanciák a mechanikai oldalról  $S_d$ -szeresen látszanak, ahol  $S_d$  a membrán hatásos felülete (nyomás-erő átalakítás), így a mechanikai sugárzási terhelés  $z_m = S_d z_s = r_{mr} \times j\omega m_{mr}$  lesz.

Pusztán a membrán tömege, vesztesége, illetve az együttmozgó légtömeg és a sugárzási veszteség nehezen mérhető mennyiségek, előbbieket mérés vákuumban végezhető el. Helyette a hangszórógyártók az adatlapokon a membrán és az együttmozgó légtömeg eredőjét  $m_{ms} = m_{md} + m_{mr}$  adják meg. Emellett alacsony frekvenciákon a felfüggesztések vesztesége gyakran több, mint ezerszerese a sugárzási veszteségnek, így a gyakorlati számítások során a teljes veszteséget  $r_{ms}$  adja meg. Ezen jellemzők ( $Bl$ ,  $L_e$ ,  $R_e$ ,  $c_{ms}$ ,  $m_{ms}$ ,  $r_{ms}$ ,  $S_d$ ) a hangszórók *Thiele/Small paramétereit*, kiegészítve néhány később tárgyalt mennyiséggel. A felfüggesztések rugóengedékenységet az adatlapokon gyakran az ún. ekvivalens térfogat  $V_{as}$  TS-paraméter adja meg, amely az a levegőtér, amely egy  $S_d$  hatásos felületű membránnal szemben azonos rugóengedékenységet mutat a membránfelfüggesztéssel. A két mennyiség között az összefüggést  $V_{as} = \rho_0 c^2 S_d^2 c_{ms}$  adja meg.

A koncentrált paraméterű kép alapján felrajzolhatjuk a hangszóró ekvivalens villamos helyettesítő képét. Az átalakítási szabályokat követve a közös sebességre kapcsolt elemek a villamos képben közös áramra – így sorosan kapcsolva –, a közös erőn lévő

elemek közös feszültségre, párhuzamosan kerülnek. A mechanikai, ill. akusztikai változók mozgásegyenletük alapján tömegből induktivitásba, rugóengedékenységből kapacitásba képződnek le.

A 3(a). ábrán látható modell már lehetőséget ad vilamos hálózati analízisre. Láthatjuk azonban, hogy az elektro-mechanikai átalakító ideális girátort valósít meg: primer feszültséget szekunder áramra képez le, és fordítva. Ahhoz, hogy a négy-pólus által megvalósított lineáris leképezés a primer állapotváltozókat azonos szekunder változóba képezzen le, célszerű a szekunder oldalon egy impedancia–admittancia konverziót végrehajtani, azaz az állapotváltozók szerepét megcserélni, így az átalakító egy  $T = Bl$  áttételű ideális transzformátorral helyettesíthető. A szakirodalomban ezt gyakorta az impedanciaelemek helyett mobilitáselemek alkalmazásaként hivatkozzák, amelyeken a sebesség az „eső” az erő a „folyó” változó. Az így kapott modell kapcsolása a 3(b). ábrán látható.

A transzformátor ezután a hálózatban elhagyható, ha a megfelelő állapotváltozók és impedanciák transzformációját elvégezzük, azaz a kapcsolást vagy a primer (elektromos), vagy a szekunder (mechanikai) oldalra redukáljuk.

Az elektromos oldalra való redukcióhoz a sugárzási impedancia kisfrekvenciás, közös sebességű modelljét ( $z'_s$ -t) használjuk. A 3(b). kapcsolást a primer oldalra redukálva megkapjuk a hangszóró elektromos oldalra redukált modelljét, amelyet a 4. ábrán láthatunk.

A szekunder oldalra való redukció során elvégezzük a feszültségforrás és az impedanciák transzformációját  $U_g \rightarrow \frac{U_g}{T}$ ,  $L_e \rightarrow \frac{L_e}{T^2}$ , valamint  $R_e \rightarrow \frac{R_e}{T^2}$  helyettesítéssel. Ezután Norton – Thévenin-átalakítással az elektromos oldalt  $I_g = \frac{U_g T}{R_e + j\omega L_e}$  áramú áramforrással és párhuzamosan kapcsolt  $\frac{R_e + j\omega L_e}{T^2}$  impedanciákkal helyettesítjük. Végül az áramkör duálisát képezve (impedancia–admittancia átalakítás) megkapjuk a hangszóró 4(b). ábrán látható, mechanikai oldalra redukált helyettesítő képét.

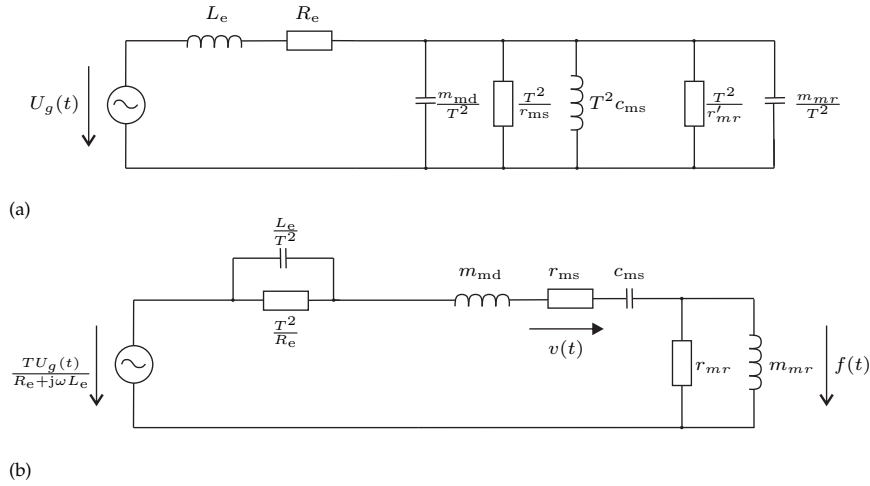
A redukált helyettesítő képek alapján a hangszóró két fontos frekvenciafüggő tulajdonságát tudjuk megbecsülni.

## 2.2.1. A bemeneti impedancia

A hangszóró elektromos oldali bemeneti impedanciája fontos tervezési szempont a hangszórót meghajtó végfok

<sup>4</sup>Az átalakítás alapja:

$$\begin{aligned} \rho_0 (1.44c \times j\omega 0.85r) &= \rho_0 \frac{1.44c \cdot j\omega 0.85r}{1.44c + j\omega 0.85r} \\ &= \rho_0 \frac{1.44c \cdot j\omega 0.85r (1.44c - j\omega 0.85r)}{1.44^2 c^2 + \omega^2 0.85^2 r^2} \\ &\approx \rho_0 \frac{1.44c \cdot j\omega 0.85r (1.44c - j\omega 0.85r)}{1.44^2 c^2} \\ &= \rho_0 \left( j\omega 0.85r + \frac{0.85^2 r^2 \omega^2}{1.44c} \right) \end{aligned} \quad (7)$$



4. ábra. A dinamikus hangszóró elektromos (a) és mechanikai (b) oldalra redukált helyettesítő képe

kimeneti impedanciájának méretezése során. Egyrészt a hangszóró impedanciájának kellően nagyoknak kell lennie az erősítő kimenő impedanciájához képest, hogy feszültséggenerátoros meghajtást feltételezhessünk,<sup>5</sup> másrészt elkerüljük a túl nagy áramok esetén az erősítő túlmelegedését. Emellett a rezonanciafrekvencia környezetében a gyorsan változó fázisviszonyok hatására túl nagy lehet a meghajtó áramkörön disszipálódó teljesítmény, így a tervezés során ezeket a hatásokat is figyelembe kell venni. Emellett a hangszóró impedanciagörbéje fontos mechanikai jellemzőket tükröz.

A hangszóró impedanciagörbét a 4(a). elektromos oldalra redukált helyettesítő kép bemeneti impedanciaként tudjuk meghatározni. Vegyük észre, hogy a mechanikai oldali veszteségi tagokra relatíve alacsony frekvenciákon  $r_{ms} > r'_{mr}$  (amíg  $\omega < \sqrt{\frac{c}{S_d 0.5 r^2 \rho_0 / c}}$  addig  $r'_{mr} \ll 1$ ), így  $\frac{T^2}{r'_{mr}}$  sugárzási veszteségi tag hatása elhanyagolható. A bemeneti impedancia  $\omega$  körfrekvencián

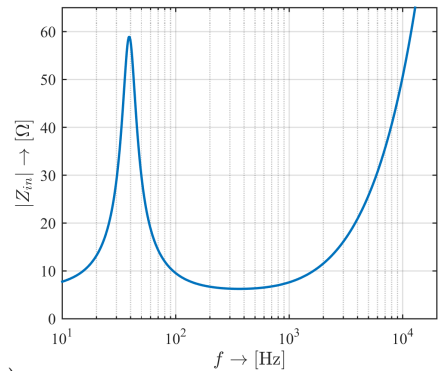
$$Z_{in}(\omega) = R_e + j\omega L_e + \left( \frac{T^2}{j\omega(m_{md} + m_{mr})} \times \frac{T^2}{r_{ms}} \times j\omega T^2 c_{ms} \right). \quad (9)$$

A repluszokat kifejtve, illetve  $m_{ms} = m_{md} + m_{mr}$  TS-paramétert használva a bemeneti impedancia alakja

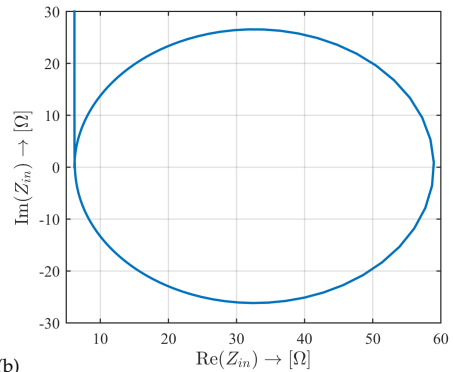
$$Z_{in}(\omega) = R_e + j\omega L_e + T^2 \frac{j\omega c_{ms}}{1 + j\omega r_{ms} c_{ms} - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}}, \quad (10)$$

ahol  $\omega_0 = \frac{1}{m_{ms} c_{ms}}$  a hangszóró adatlapon is megadott mechanikai rezonanciafrekvenciája. A mechanikai rendszer tehát a tekercs impedanciájára szuperponálódva egy másodfokú tagot, párhuzamos rezgőkör impedanciáját hozza be a bemeneti impedanciába. A rezgőkör rezonanciafrekvenciája a mechanikai lengőtag sajátfrekvenciája (a rezgés állapotegyenletének sajátértéke), csillapítás nélkül ezen a frekvencián a rezgés gerjesztés nélkül is fennmaradhat. A rezonanciafrekvencián a maximális visszaindult feszültség miatt az impedanciának maximuma van.

<sup>5</sup>Hagyományosan az erősítőt ideális feszültséggenerátornak tekintjük, amelynél minél kisebb kimenő impedancia az optimális. Ez tranzistoros erősítőkkel könnyen elérhető, klasszikus elektroncsöves kapcsolások esetén pedig impedanciaillesztésre szolgáló kimenő transzformátorral valósítható meg. Ennek ellenére manapság gyakran felmerülő kérdés a feszültséggenerátoros meghajtás létjogosultsága az áramgenerátoros vezérléssel szemben.



(a)



(b)

5. ábra. A dinamikus hangszóró impedanciájának abszolút értéke (a) és helygörbéje (b)

A csúcs nagyságát kizárólag az  $r_{ms}$  veszteségi tag korlátozza, hiszen a mechanikai oldalt jelképező soros impedancia tag értéke itt

$$\frac{j\omega T^2 c_{ms}}{1 + j\omega r_{ms} c_{ms} - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}} \Bigg|_{\omega=\omega_0} = \frac{T^2}{r_{ms}} \quad (11)$$

Az 5. ábra a mérendő Visaton BG20 típusú szélessávú hangszóró impedanciagörbét ábrázolja a hangszóró adatlapján megadott Thielé-Small paraméterek alapján számítva. Az ábra (a) része az impedancia abszolútértékének Bode-diagramját, a (b) része a Nyquist-diagramját/helygörbét ábrázolja. Látható, hogy kisfrekvencián a hangszóró impedanciáját a soros ohmos ellenálláshoz adódó mechanikai rezgőkör impedanciája, nagyfrekvencián pedig a lengőtekercs inductivitása be-

follyásolja leginkább.

Utóbbi tartományban az elméleti lineáris növekedés helyett az itt nem részletezett örvényáramú veszteségek miatt a gyakorlatban az impedancia abszolút értéke  $\sqrt{\omega}$  szerint nő. Ez a lassabb növekedés a meghajtó erősítő szempontjából kedvező.

## 2.2.2. A hangszóró átvitele

Természetesen alkalmazás szempontból fontos jellemző a hangszóró frekvencia-átvitele, azaz tetszőleges frekvencián egységnyi amplitúdójú gerjesztésre adott válasz amplitúdója. A hangszóró válaszának jellemzően a tőle 1 m-re előálló hangnyomást tekintjük, ami az (1)-ben megadott Rayleigh-integrál alapján a hangszóró membránjának gyorsulásával egyenesen arányos. A hangszóró 4(b). ábrán látható mechanikai oldalra redukált helyettesítő képében így kimeneti változóként a membrán  $v(t)$  sebességét célszerű választani, amelyből a frekvenciatarományban a gyorsulás egyszerűen számítható:  $A(\omega) = \mathcal{F}\left(\frac{\partial}{\partial t}v(t)\right) = j\omega V(\omega)$ . Definiáljuk tehát a hangszóró frekvenciaátvitelét

$$H(\omega) = j\omega \frac{V(\omega)}{U_g(\omega)} \quad (12)$$

szerint. A kapcsolás feszültséggenerátor felőli bemeneti impedanciáját  $Z_{m,in}(\omega)$ -val jelölve az átvitel a következő alakban írható fel

$$H(\omega) = \frac{j\omega T}{(R_e + j\omega L_e)Z_{m,in}}. \quad (13)$$

Végezzük el az átvitelvizsgálatot most csak mély- és középfrekvencián. Mélyfrekvencián a lengőtekercs induktivitásának hatása jó közelítéssel elhanyagolható ( $\omega L_e \approx 0$ ). Az akusztikai oldalon  $S_d m_r$  mozgó tömeg sőtöli a veszteségi ellenállást, így  $S_d r_r$  elhagyható. Az így kapott bemenő impedancia  $m_{ms} = m_{md} + S_d m_r$  helyettesítéssel  $Z_{m,in} = \frac{T^2}{R_e} + r_{ms} + j\omega m_{ms} + \frac{1}{j\omega c_{ms}}$  és az átviteli függvény

$$H(\omega) = K \frac{(j\omega)^2}{(j\omega)^2 + \left(\frac{\omega_0}{Q_{ts}}\right)j\omega + \omega_0^2} \quad (14)$$

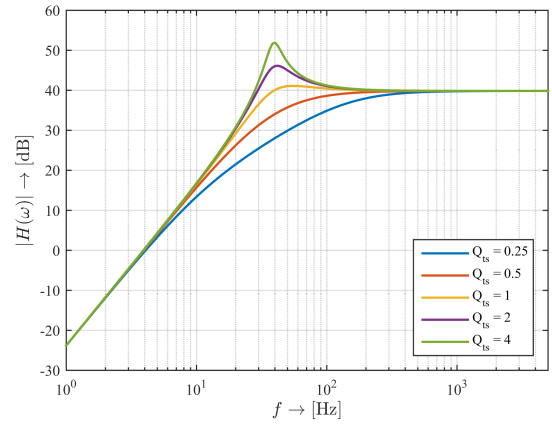
alakban írható, ahol

$$K = \frac{T}{R_e m_{ms}}, \quad (15a)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{m_{ms} c_{ms}}}, \quad (15b)$$

$$Q_{ts} = \frac{1}{2\xi} = \frac{1}{\omega_0 c_{ms} \left(\frac{T^2}{R_e} + r_{ms}\right)} \quad (15c)$$

rendre a nagyfrekvenciás erősítés, a már ismert mechanikai rezonanciafrekvencia és a teljes rendszer jósági tényezője (illetve  $\xi$  a csillapítási tényezője). Az átviteli függvény alapján a hangszóró egy másodfokú felüláteresztő szűrőt valósít meg, melynek amplitúdóátvitele a töréspontja alatt +40 dB/dekád meredekséggel nő. A törésponti frekvencia a mechanikai rendszer  $f_0$  rezonanciafrekvenciája (valójában a közelítések során elhagyott tagok hatására a rezonanciafrekvencia enyhén nő). A rezonanciafrekvencia környezetében az átvitelt a jósági tényező határozza meg ( $H(\omega_0) = -\frac{T}{R_e} \frac{\omega}{\frac{T^2}{R_e} + r_{ms}}$ ).



6. ábra. A dinamikus hangszóró átviteli függvénye különböző jósági tényezők mellett. A csillapítási tényezők rendre  $\xi = 2, 1, 0.5, 0.25, 0.125$ . A  $Q_{ts} = 0.5$  az ún. kritikus csillapítású rendszer. Az előlötti  $Q_{ts}$  alulcsillapítást, ez alatti pedig túlcillapítást jelent.

Látható, hogy a jósági tényező két tagból áll, az elektromos oldali és mechanikai oldali veszteségek által meghatározott tagokból:

$$Q_{ts} = \frac{Q_{ms} Q_{es}}{Q_{ms} + Q_{es}} = \frac{R_e}{\omega_0 c_{ms} T^2} \times \frac{1}{\omega_0 c_{ms} r_{ms}}. \quad (16)$$

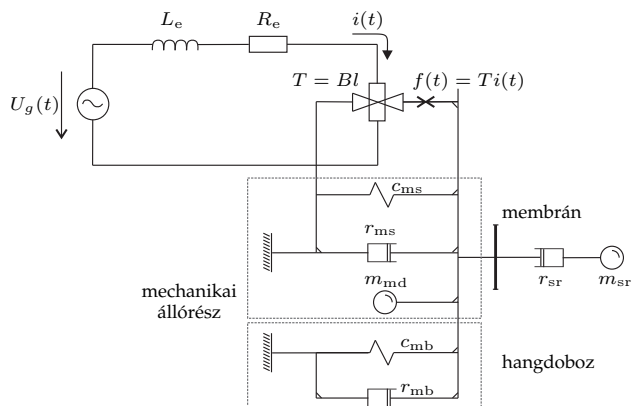
$Q_{es}$  és  $Q_{ms}$  rendre a rendszer elektromos, illetve mechanikai jósági tényezői. Mindhárom jósági tényező a hangszóró egy-egy TS-paramétere, amelyet a hangszóró-adatlapokon közölnek. Összehasonlítva a (16) kifejezést a hangszóró (10) impedanciájával látható, hogy a mechanikai jósági tényező határozza meg az elektromos oldalon mért impedancia viselkedését a rezonanciafrekvencia környezetében. A jósági tényező klasszikus definíciója alapján egy rezonáns rendszer sávzélességét határozza meg

$$Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega} \quad (17)$$

szerint, ahol  $\Delta\omega$  sávzélesség a rezonanciafrekvencia körül a két -3 dB-es pont távolsága, azaz azok a pontok távolsága, ahol az átviteli függvény a rezonanciafrekvencián mért átvitel  $1/\sqrt{2}$ -szerese. Mivel ez  $1/2$ -szeres teljesítményt jelent, a  $\Delta\omega$  sávzélességet *half-power bandwidth* néven is nevezik.

A 6. ábrán látható, hogy növekvő jósági tényező hatására a hangszóró  $f_{3dB}$  alsó 3dB-es ponthoz tartozó törésponti frekvenciája csökken, azonban a rezonanciafrekvencián növekvő kiemelést okoz az eredő átvitelben, amely a tranzienst viselkedést rontja. A két veszteségi tag a kiemelés nagyságát ellentétes irányba változtatja: növekvő  $R_e$  hatására a rezonanciacsúcs nagysága nő, azonban a teljes átvitel amplitúdója csökken. A mechanikai veszteség növekedése hatására a kiemelés csökken. Emellett növekvő  $T = Bl$  faktor erőteljes csillapítást visz be a rendszerbe a teljes erősítés növelése mellett.

Fontos megjegyezni, hogy amennyiben a meghajtó erősítő kimeneti ellenállása nem zérus, az sorosan adódik hozzá  $R_e$  ellenálláshoz, így az átvitelt és  $Q_{es}$  értékét is erősen befolyásolja: nagy kimenő impedanciájú meghajtó nem képes elegendő csillapítást biztosítani.



7. ábra. A dobozolt dinamikus hangszóró koncentrált paraméterű helyettesítő képe

### 2.2.3. A dobozolás hatása

Ezidáig végtelen falba ágyazott hangszórók viselkedését vizsgáltuk. A gyakorlatban a hangszóróra a végtelen falat „ráhajtogatjuk”, azaz dobozoljuk, így mögötte légüregget hozunk létre. Ennek számos hatása lesz a teljes rendszer tulajdonságaira. Nagyfrekvencián az üreg rezonáns (modális) viselkedése jelentősen módosítja a rendszer átvitelét azokon a frekvenciákon, melyen az akusztikai félhullámhossz egész számú többszöröse a doboz valamely dimenziójával egyenlő. A modális viselkedést általában a dobozban elhelyezett akusztikus elnyelő anyagokkal csillapítják.

Kis frekvenciákon a bezárt levegő ideálisan légrugóként funkcionál, amely egyik vége a membránnal azonos sebességgel mozog, másik végén a dobozhoz mint mechanikai állórészhez kapcsolódik, így a membránt „megfogja”, merevségét növeli. A légrugó emellett súrlódásos veszteséggel is rendelkezik. Ez a veszteségi tag a dobozban csillapítóanyagot elhelyezve növelhető.

A koncentrált paraméterű képből a dobozolás hatása a 7. ábrán látható. Mind a dobozban lévő levegő  $c_{mb}$  engedékenysége, mind az  $r_{mb}$  vesztesége a membránnal azonos sebességre kerül, így a 3.(a) ábra villamos helyettesítő képében az elemek a membránelemekkel sorosan kapcsolt kondenzátorral és ellenállással helyettesíthetők. Ennek eredményeképp a membrán és a doboz együttes engedékenysége  $c'_{ms} = c_{ms} \times c_{mb}$  szerint csökken, míg az eredő veszteség  $r'_{ms} = r_{ms} + r_{mb}$  szerint nő. A légrugó-engedékenységek természetesen a doboz térfogatával egyenesen arányos.  $V_b$  térfogatú levegő akusztikai engedékenysége

$$c_{ab} = \frac{V_b}{\rho_0 c^2}, \quad (18)$$

amely a membrán  $S_d$  hatásos felületével kapcsolódik – általánosan az akusztikai és mechanikai impedanciák között a kapcsolat  $Z_m = S^2 Z_a$  –, így a doboz mechanikai engedékenysége

$$c_{mb} = \frac{V_b}{\rho_0 c^2 S_d^2}. \quad (19)$$

A dobozolás hatására tehát a rugóengedékenységek csökken, amely a teljes rendszer rezonanciafrekvenciáját és jóssági tényezőjét is növeli a végtelen fal esetéhez képest (15) alapján. Ez természetesen gyakorlati szempontból előnytelen. A veszteségi tag hozzáadott csillapítóanyag

nélkül elhanyagolható, azonban a dobozolás hatása  $r_{mb}$  növelésével, a doboz „tömésével” csökkenthető.

Egyes modellek figyelembe veszik a dobozolás nem ideális voltát: megfelelő merevítés hiányában a doboz oldalfala nem tekinthető tökéletesen merevnek, elmozdulásra képes. A részletesebb modellek így tartalmazhatják a doboz falainak tömegét, súrlódásos veszteségét.

## 3. Ellenőrző kérdések

1. Mi a hangszóró  $Bl$  paramétere, és mit határoz meg egy végtelen falba ültetett hangszóró frekvenciaátvitelen?
2. Mit értünk akusztikai rövidzár alatt? Hol jelenhet meg ez az effektus egy dinamikus hangszóró mérésakor?
3. Rajzolja fel egy dinamikus hangszóró koncentrált paraméterű helyettesítő képét, megjelölve az elektromos, mechanikai és akusztikai részrendszerek elemeit!
4. Egy végtelen falba épített hangszóró membránjának saját és a vele együttmozgó levegő együttes tömege 10 g, rugóengedékenysége 1.6 mm/N, elektromos ohmos ellenállása 6 Ω. Rajzolja fel a hangszóró impedanciagörbéjének amplitúdóját jellegre helyesen a megadott paraméterekkel, illetve abban az esetben, ha a hangszóróhoz egy 10 g tömegű póttömeget erősítünk! A lengőtekercs inuktivitását hanyagoljuk el!
5. Hogyan befolyásolja a hangszóró frekvenciaátvitelét a dobozolás, a végtelen síkban elhelyezett hangszóró átviteléhez képest?
6. Hogyan befolyásolja a hangszórót meghajtó erősítő végfok kimenő impedanciája egy dobozba rögzített hangszóró frekvenciaátvitelét?

## 4. Mérési feladatok

A mérés során egy Visaton BG20 8 Ω névleges impedanciájú szélessávú hangszóró<sup>6</sup> az elméleti összefoglalóban bemutatott tulajdonságait vizsgáljuk. A koncentrált paraméterek könnyebb vizsgálatának érdekében a hangszóró porsapkájára egy 1,279 g tömegű alumíniumgyűrű lett erősítve, amelyre egy 10,971 g tömegű póttömeg szerelhető. A dobozolt hangszóró jellemzőinek vizsgálatához egy 67 × 37 × 31 cm nagyságú doboz áll a rendelkezésre. A méréshez használt műszerek és szenzorok a következők

- Maxwell MX-25 304 kézimultiméter
- National Instruments cDAQ-9184 alapú mérőhardver 1 db 4 csatornás DA és 2 db egyenként 4 csatornás A/D modul
- Castone CPA 100H végfokerősítő
- Brüel & Kjær 8307 gyorsulásérzékelő

<sup>6</sup>[http://www.visaton.com/pdfexport/de/servicestr.form?pid=/pdfexport/pdf/bg20\\_8.html](http://www.visaton.com/pdfexport/de/servicestr.form?pid=/pdfexport/pdf/bg20_8.html)

- Larson Davis SN-16004 rezgéskalibrátor
- Brüel-Kjaer 4188 kondenzátor mikrofon

## 4.1. A mérés menete

### 1. Mérés előkészítése

- Állítson össze mérési elrendezést egy szabadon álló hangszóró elektromos oldali impedanciájának és membrányorsulásának mérésére!
- Kalibrálja a gyorsulásmérőt!

### 2. Hangszóró impedanciamérése

- Mérje meg a hangszóró elektromos oldali impedanciáját a frekvencia függvényében a hangszóróra erősített póttömeggel együtt, és nélküle. Hasonlítsa össze és értelmezze az eredményeket!
- A mért impedanciagörbék alapján határozza meg a póttömeg nélküli hangszóró
  - $f_0$  rezonanciafrekvenciáját
  - $m_{ms}$  és  $c_{ms}$  tömegét és rugóengedékenységet
  - $Q_{ms}$  mechanikai jósági tényezőt és  $r_{ms}$  veszteség paramétereit!
- Kézi multiméter segítségével mérje meg a hangszóró  $R_e$  veszteségi DC ellenállását!
- Mérje meg a sugárzási impedancia változását merev falba ültetett hangszóró esetén a szabadonálló esethez képest!

### 3. A $Bl$ transzmissziós tényező mérése

- A transzmissziós tényező definíciója alapján mérje meg a  $Bl$  átviteli tényező frekvenciafüggését és értelmezze az eredményeket!
- Hasonlítsa össze az így alkotott modell impedanciagörbáját a mérési eredményekkel!
- A hangszóró átvitelének mérése
  - Mérje meg a hangszóró átviteli függvényét!
  - Hasonlítsa össze a koncentrált paraméteres modelltől számított átviteli függvénnyel!
- A dobozolás hatásának vizsgálata
  - Mérje meg a dobozba épített hangszóró impedanciagörbáját! Értékelje az eredményeket!
  - A doboz térfogatának ismeretében becsülje meg a membrán  $S_d$  hatásos felületét!
  - A hatásos felület ismeretében határozza meg a sugárzási impedancia tagjait, illetve a membrán saját tömegét!
  - Mérje meg a hangszóró által keltett hangnyomást és hasonlítsa össze a membrán gyorsulására vonatkozó számított átvitel-lel!