

Klasszikus Transmission Line Tervező Táblázatok Martin J. King

Bevezető:

Mióta az első MathCad alapú TL munkalap először elérhetővé vált, a munkalap tárgya újra és újra felmerül. Sokféle okból; néhányaknak nehézkes a munkalap használata, mások szeretnék egy alap felépítéssel hozzáfogni a munkalap használatához. Ha az első TL dobozt tervezed a MathCad munkalap segítségével, nehézkes lehet az indulás. A MathCad használatának elsajátítása, egy új doboztípus tervezése senkinek sem egyszerű.

Az emberek általában szívesebben használnak táblázatokat zárt és reflex dobozok méretezéséhez. A doboz méret és a hangolási frekvencia a hangszóró T/S paramétereinek függvényében változik. Az ilyen táblázatok „receptek”, megjósolható eredménnyel. A tervezés során hasonló, TL-re vonatkozó általános táblázatok gyors vizsgálatokat tesznek lehetővé sok különböző hangszóró esetén. A közelítő számítások a végső terv alapjai lehetnek, vagy kiindulópont a további MathCad alapú optimalizáláshoz.

TL tervezési munkám során számos érdekes feljegyzést készítettem. Szem előtt tartva a táblázatok iránti igényt, azt hiszem kb. egy évvel ezelőtt vizsgáltam egy doboz meghatározási módszert a hangszóró T/S paramétereinek függvényeként. Kérlek, fogadd el, ez csak egy lehetséges módszer, számos más megközelítés létezik a TL doboz meghatározására, melyekre nem gondoltam.

Mostanában elkezdtem komolyan kutatni a TL táblázatok levezetését. Az eredő módszert leírtam az első TL témájú munkámban néhány hónappal ezelőtt. Miután az első táblázatot a honlapomon elérhetővé tettem, sokan kipróbálták, és elláttak konstruktív visszajelzésekkel, hogy hogyan tegyem a táblázatokat jobba és pontosabbá. A visszajelzésekre alapozva a második verziójú táblázatok néhol át lettek dolgozva. Azt hiszem, hogy ez a második verzió jobban megfelel a klasszikus TL méretezéshez, szélesebb hangszóró választék esetén.

A módszer levezetése:

A táblázatok a klasszikus TL geometriából származnak. A klasszikus geometriát egy csőként vagy labirintusként (táguló, egyenes, szűkülő) definiálom, ahol a hossz egybeesik a hangszóró rezonanciafrekvenciájának negyed hullámhosszával. A csillapító anyag az alaprezonancia felharmonikusainak csillapítását szolgálja. Ilyen geometriákra mutat példát az 1. ábra. Az lábbiak ezekre az elrendezésre vonatkoznak. Nem tárgyalom a tömegterhelt (mass loaded) kivitelezést, tehát ez kívül esik a cikk tárgyán.

A 2. és 3. ábra egyszerűsített akusztikus és elektronikus analógiákat modellez, ahol a hangszóró a zárt végen van felszerelve. Ezek a modellek átalakíthatóak zárt és reflex dobozok leírására, ha változtatjuk az impedanciát, Z_{al} és Z_{el} a TL doboz származtatott értékei. Az összetett rezonanciák nem köthetők bármely geometriához, az akusztikus és elektronikus impedanciáknak a frekvencia függvényében amplitúdójuk és fázisuk van - kiemelések és nullpontok sorozatát tartalmazzák. Például a gyengén csillapított TL akusztikus és elektronikus impedanciái láthatók a 4. és 5. ábrán. Az egyszerűsített modellen az impedancia hatása feltételezhető a 4. és 5. ábrából.

Az első csőrezonancián (30 Hz a 4. ábrán) az akusztikus impedancia (Z_{al}) maximumot ér el. Ez a nagy akusztikus impedancia sorosan a hangszóró akusztikus elemeivel (2. ábra), okozza az U_d nagyon kicsi értékét. A membrán mozgása jelentősen csökken, mint egy reflex doboznál a hangolási frekvencián. A nyomás a membrán hátulján itt maximumot ér el. Tehát a levegő sebessége a nyitott végen ekkor maximális. A rendszer majdnem teljes akusztikus kimenő teljesítménye a nyitott végből származik egy gyengén csillapított TL esetén.

Az 5. ábrán látható, hogy a TL akusztikus impedanciája (Z_{el}) minimális a rendszer első rezonanciáján. A minimális elektronikus impedancia kisöntöli (gyakorlatilag rövidre zárja) a hangszóró vele párhuzamos elektromos elemeit. (3. ábra) Grafikusan ez látható a 6. ábrán, ahol a hangszóró végtelen hangfalon mérhető elektromos impedanciája (kék görbe), és a TL elektromos impedanciája (barna görbe) látható. A 7. ábra mutatja a hangszóró végtelen hangfalon mérhető impedanciáját (kék görbe) és az egyesített TL impedanciáját (vörös görbe).

Figyelem, a 7. ábra kétpúpú impedancia görbéje (vörös) a gyengén csillapított TL-re jellemző. A 6. ábrán egy párhuzamos impedancia alkotja a 7. ábrán látható kétpúpú impedanciagörbét. Ez adja méretező táblázat kulcsát.

Ha a komplett TL rendszer impedancia görbéje metszi a hangszóró impedancia görbét, illetve a TL görbét, mint a 6. ábrán, az evidenssé teszi, hogy kézben tartható változók határozzák meg az első minimumot a TL impedancia görbéjén.

A hangszóró T/S paraméterei adottak, tehát a TL geometriája az, amin változtatni lehet. A frekvencia és az első minimum mélysége határozzák meg a klasszikus TL megfelelő geometriáját.

Egy nyitott végű TL akusztikus impedanciája látható - ahogy a „Transmission Line Theory” cikk 6. oldalán a „Method Derivation” részben van levezetve:

$$Z_{acoustic}(\omega) = \frac{I \rho c^2 (\alpha^2 + \beta^2) (e^{(IL\beta)} - e^{(-IL\beta)})}{\omega S_0 ((\alpha + I\beta) e^{(IL\beta)} - (\alpha - I\beta) e^{(-IL\beta)})}$$

Áthelyezve a sík hullám konkrét akusztikus impedanciáját (ρc), és a TL keresztmetszetét (S_0) az egyenlet bal oldalára, az akusztikus impedancia dimenzió nélküli alakja marad. Az akusztikus impedancia dimenzió nélküli kifejezése a frekvenciának, hosszának és a keresztmetszeti aránynak (S_L/S_0) a függvénye.

$$\frac{Z_{acoustic}(\omega) S_0}{\rho c} = \frac{I c (\alpha^2 + \beta^2) (e^{(IL\beta)} - e^{(-IL\beta)})}{\omega ((\alpha + I\beta) e^{(IL\beta)} - (\alpha - I\beta) e^{(-IL\beta)})}$$

A fenti egyenlet jobb oldala független a TL doboz abszolút keresztmetszetétől.

Az egyenlet jobb oldalára behelyettesítve a frekvenciát és a keresztmetszeti arányt (S_L/S_0), meghatározható az effektív hossz és csúcspont értéke. Az 1. és 2. táblázat tartalmazza a klasszikus TL-re értelmezett effektív hosszokat és a csúcsponti értékeket, 20-70 Hz közötti hangolási frekvenciák, illetve 0,1-10 S_L/S_0 arányok esetén.

Az előző egyenlet csúcsponti értékkel (DZ) való behelyettesítés általi egyszerűsítése, a 2. táblázatból, a jobb oldalon a következő eredményt hozza:

$$\frac{Z_{acoustic} S_0}{\rho c} = D_Z$$

Definíció szerint, az akusztikus impedancia kifejezhető elektromos impedanciaként, a következő általános kifejezés alapján:

$$Z_{electrical} = \frac{B^2 l^2}{Z_{acoustic} S_d^2}$$

Behelyettesítve az akusztikai impedancia származtatott értékét, az elektromos impedanciára a következő adódik:

$$Z_{electrical} = \frac{S_0 B^2 l^2}{\rho c D_Z S_d^2}$$

A 6. ábrán a TL ekvivalens elektromos impedanciájának minimál értéke meghatároz egy szorzótényezőt a lengőtekercs egyenáramú ellenállásához képest. Ez a szorzótényező az ellenállásfüggvény (**DR**).

$$D_R R_e = \frac{S_0 B^2 l^2}{\rho c D_Z S_d^2}$$

Végül határozzuk meg a TL zárt végén a keresztmetszetet (S_0) az egyenlet átrendezésével:

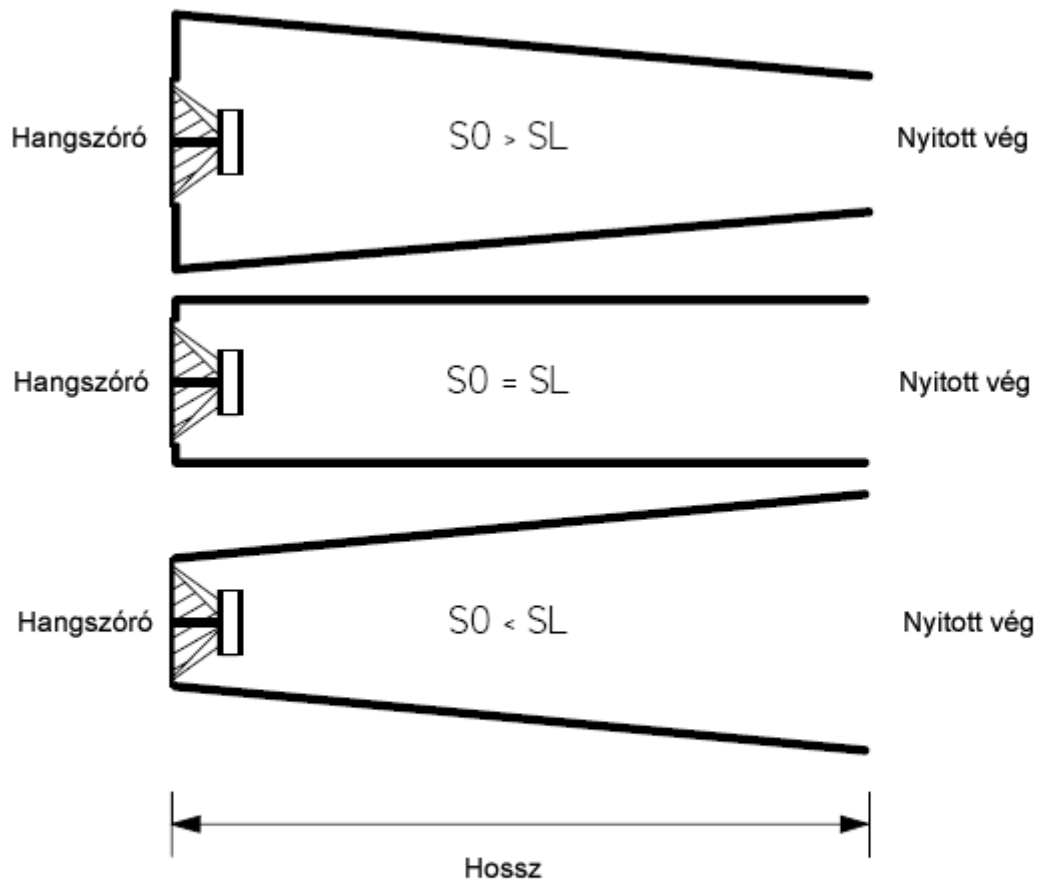
$$S_0 = \frac{\rho c S_d^2 D_Z D_R R_e}{B^2 l^2}$$

Ha a **DR** érték definiált, a TL zárt végének keresztmetszeti felülete kiszámítható. A 3. tábla tartalmazza a különböző Qts értékekhez javasolt ellenállási tényezőt (**DR**). A 6. táblázathoz visszatérve az impedancia első nullpontjának mélységét meghatározhatjuk a **DR Re** értékek kiszámításával. Ezen az intervallumon kívüli Qts értékeknél extrapolációval (kikövetkeztetéssel) határozható meg az elektromos impedancia helyes értéke. A 3. táblázatban található Qts tartomány alkalmazható leginkább a TL dobozokhoz.

Kiszámított S_0 , ismert S_l/S_0 , valamint az effektív hossz és adott geometria tökéletesen definiálja az adott TL-t. Ezen belül az egyetlen nyitott kérdés a hangszóró elhelyezése. Ha a hangszórót a zárt végre építjük, az alulfrekvencia felharmonikusai erősödnek. Ha a hangszórót eltoljuk a nyitott vég felé, a gerjesztés a felharmonikusokat csökkentheti, illetve kiolthatja.

A 4. táblázat tartalmazza a hangszóró javasolt eltolási értékét (Driver Offset). Ezeknél a hangszóró pozícióknál lehetséges a másodfajú (háromnegyed hullámhosszúságú) és egyéb magasabb rendű rezonanciák majdnem teljes elfojtása. A hangszóró eltolásának következménye a káros rezonanciák csökkenése, a hangolási frekvencián, illetve a mélytartományban tapasztalható gyengülés. Kompromisszum, ha a hangszórót valahova a minimális ($\xi = 0$) és a maximális (4. táblázat) eltolási érték közé helyezzük. Az általánosan javasolt érték $\xi = 0.2$.

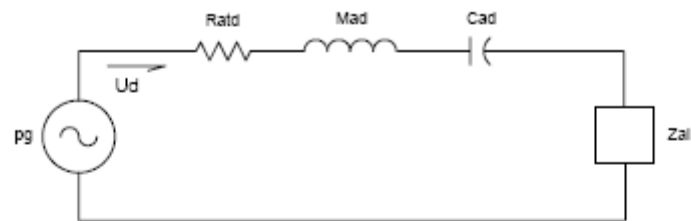
1. ábra: Klasszikus TL geometriák



Ahol:

S_0	=	Keresztmetszet a zárt végen
S_L	=	Keresztmetszet a nyitott végen
L	=	A cső hossza
D	=	A csillapító anyag sűrűsége

2. ábra: Az egyszerű TL akusztikus helyettesítő kapcsolása



Ahol:

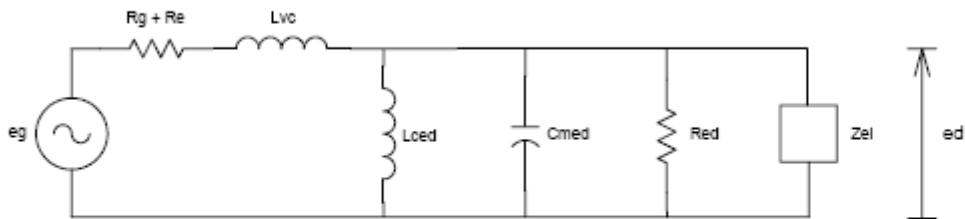
p_g	= pressure source = $(e_g Bl) / (S_d R_e)$	Forrás
R_{ad}	= driver acoustic resistance = $(Bl^2 / S_d^2) [Q_{ed} / ((R_g + R_e) Q_{md})]$	Hangszóró akusztikus ellenállása
R_{atd}	= total acoustic resistance = $R_{ad} + (Bl)^2 / [S_d^2 ((R_g + R_e) + j\omega L_{vc})]$	Teljes akusztikus ellenállás
C_{ad}	= driver acoustic compliance = $V_{ad} / (\rho_{air} c^2)$	A hangszóró engedékenysége*
M_{ad}	= driver acoustic mass = $(f_d^2 C_{ad})^{-1}$	Hangszóró akusztikus tömege
Z_{al}	= transmission line acoustic impedance	A TL akusztikus impedanciája
U_d	= driver volume velocity = $S_d u_d$	A hangszóró térfogatsebessége
u_d	= driver cone velocity	Membrán sebesség

Majd:

u_L	= terminus air velocity = εu_d	Levegő torkolati sebessége
ε	= u_L / u_d	

*a rugóállandó reciproka, minél nagyobb az érték, annál lágyabb a felfüggesztés

3. ábra: Az egyszerű TL elektromos helyettesítő kapcsolása

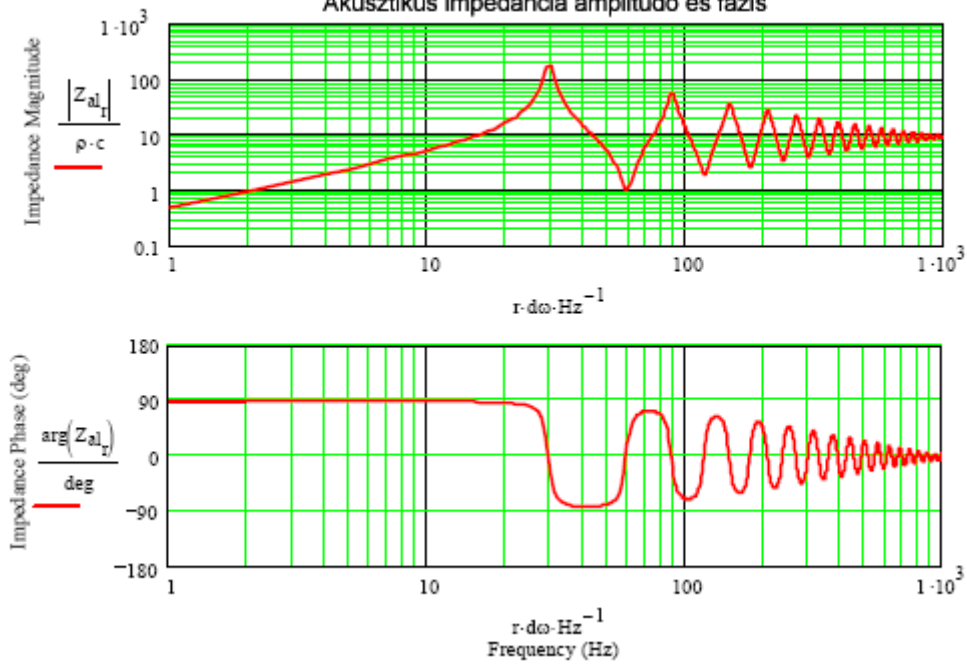


Ahol:

e_g	= voltage source = 2.8284 volt	* Feszültségforrás
$R_g + R_e$	= electrical resistance of the amplifier, cables, and voice coil	* Az erősítő, a kábel és a lengőtekercs ellenállása
L_{vc}	= voice coil inductance	* A lengőtekercs inductivitása
L_{ced}	= inductance due to the driver suspension compliance = $[C_{ad} (Bl)^2] / S_d^2$	* A hangszóró felfüggesztésének engedékenysége által okozott inductivitás
C_{med}	= capacitance due to the driver mass = $(M_{ad} S_d^2) / (Bl)^2$	* A mozgó tömeg kapacitása
R_{ed}	= resistance due to the driver suspension damping = $R_e (Q_{md} / Q_{ed})$	* A felfüggesztés csillapításának ellenállása
Z_{el}	= transmission line equivalent electrical impedance = $(Bl)^2 / (S_d^2 Z_{al})$	* A TL ekvivalens elektromos impedanciája
e_d	= $Bl u_d$	

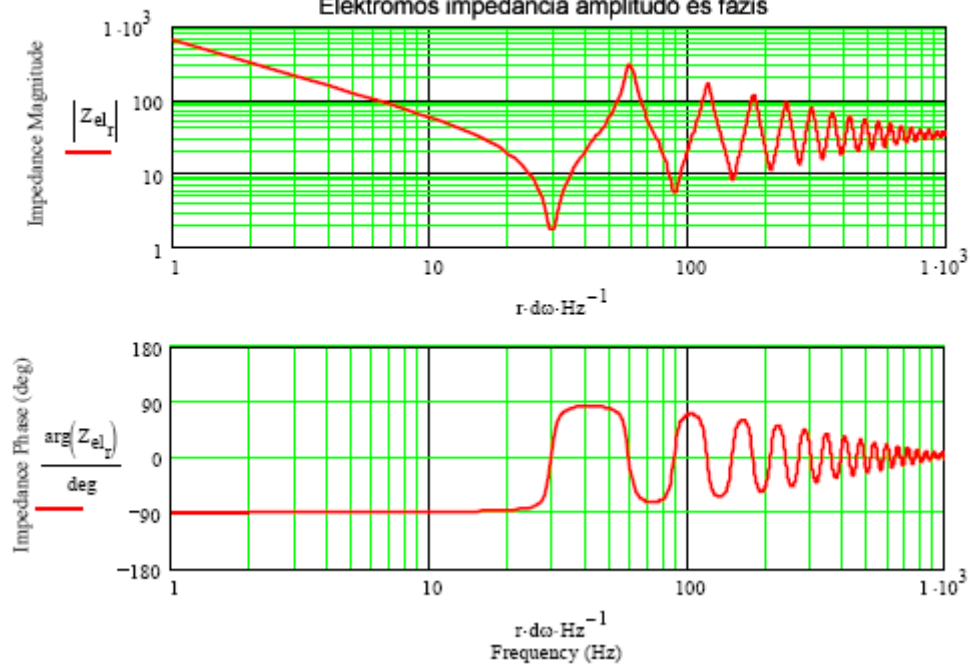
4. ábra: A TL akusztikus impedanciája

Akusztikus impedancia amplitúdó és fázis



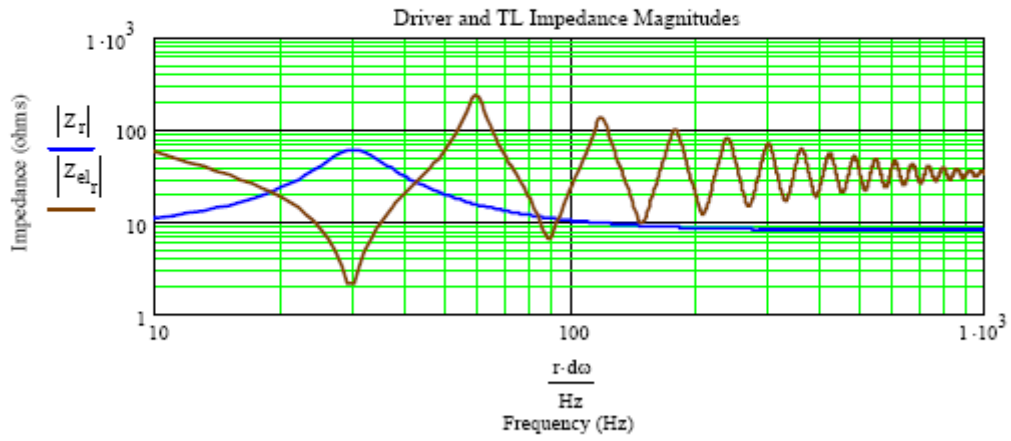
5. ábra: A TL elektromos impedanciája

Elektromos impedancia amplitúdó és fázis



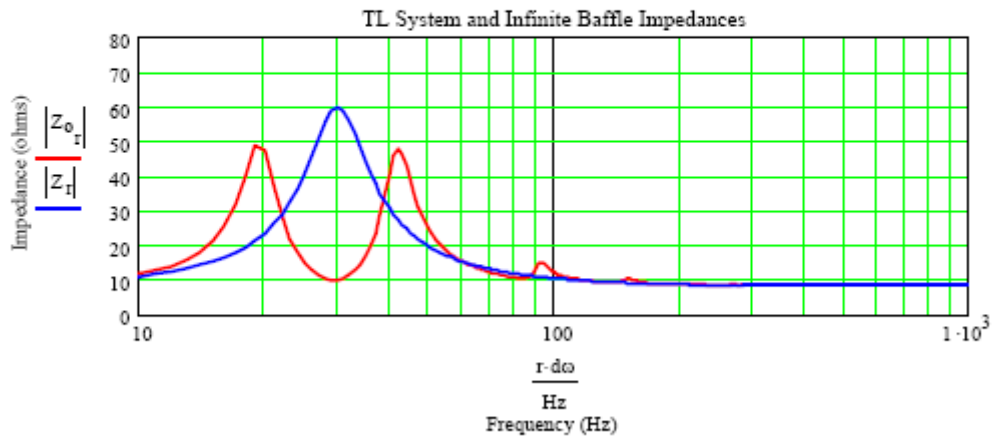
6. ábra: Elektromos impedancia amplitudók

Kék görbe - A hangszóró végtelen hangfalon mért impedanciája
Barna görbe - A TL saját impedanciája



7. ábra: A TL rendszer impedanciája

Kék görbe - A hangszóró végtelen hangfalon mért impedanciája
Vörös görbe - A hangszóró impedanciája TL rendszerben



1. táblázat: TL effektív hosszok (inchben!) a hangolási frekvencia és a geometria függvényében

SL/S0	Transmission Line Effective Length (inches)										
	Frequency (Hz)										
	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
10	238.8	191.0	159.2	136.5	119.4	106.1	95.5	86.8	79.6	73.5	68.2
5	221.4	177.1	147.6	126.5	110.7	98.4	88.6	80.5	73.8	68.1	63.3
3	205.7	164.6	137.1	117.5	102.9	91.4	82.3	74.8	68.6	63.3	58.8
2	192.1	153.7	120.1	109.0	96.1	85.4	76.0	69.9	64.0	59.1	54.9
1	168.0	134.4	112.0	96.0	84.0	74.7	67.2	61.1	56.0	51.7	48.0
0.5	145.5	115.4	97.0	83.1	72.8	64.7	58.2	52.9	48.5	44.8	41.6
0.333	133.5	105.8	89.0	76.3	65.8	59.3	53.4	48.5	44.5	41.1	38.1
0.2	119.9	95.9	79.9	68.5	60.0	53.3	48.0	43.6	40.0	36.9	34.3
0.1	103.4	82.7	68.9	59.1	51.7	46.0	41.4	37.6	34.5	31.8	29.5

2. táblázat: A Dz függvény csúcserő értéke frekvencia és a keresztmetszeti felület függvényében

SL/S0	Peak Value of Shape Function - D_z										
	Frequency (Hz)										
	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
10	4.392	5.490	6.588	7.686	8.784	9.882	10.980	12.078	13.176	14.274	15.372
5	7.766	9.708	11.649	13.591	15.532	17.474	19.415	21.357	23.298	25.240	27.181
3	11.059	13.824	16.589	19.353	22.118	24.883	27.648	30.412	33.177	35.942	38.707
2	14.025	17.531	21.038	24.544	28.050	31.556	35.063	38.569	42.075	45.581	49.088
1	19.429	24.286	29.144	34.001	38.858	43.715	48.573	53.430	58.287	63.144	68.002
0.5	24.794	30.999	37.191	43.390	49.588	55.787	61.985	68.184	74.382	80.581	86.779
0.333	27.620	34.775	41.730	48.685	55.640	62.595	69.550	76.505	83.460	90.415	97.370
0.2	31.494	39.368	47.241	55.115	62.988	70.862	78.735	86.609	94.482	102.356	110.229
0.1	36.482	45.803	54.723	63.844	72.964	82.085	91.205	100.326	109.446	118.567	127.687

3. táblázat: Ellenállási faktor D_R

Qtd	D_R
0.20	0.1858
0.30	0.1313
0.40	0.0950
0.50	0.0788
0.60	0.0688
0.70	0.0625

4. táblázat: A hangszóró zárt végtől számított távolsága

SL/S0	ξ
10	0.416
5	0.393
3	0.377
2	0.365
1	0.349
0.5	0.339
0.333	0.336
0.2	0.336
0.1	0.336

Egy konkrét tervezési példa:

A tervező táblázatok használatának példaként a kétutas Focal TL-em geometriáját vezettem le újból, és hasonlítom össze a megépített projekttel. Ehhez a tervhez a MathCad számítások és a mérési eredmények elérhetők. Ennek a tervnek a részletei Project #1 címszó alatt található a weboldalamon (www.quarter-wave.com).

1) Kezdjük a Focal 8V 4412 Thiele / Small paramétereivel.

Property	Average	Units
f_d	33.7	Hz
V_{ad}	66.9	liters
Q_{td}	0.38	
Q_{ed}	0.44	
Q_{md}	2.57	
R_e	7.7	ohm
S_d	0.022	m^2
$C_{ad} (10^{-7})$	4.83	m^5/N
M_{ad}	46.5	kg/m^4
R_{ad}	3829	$N \text{ sec}/m^5$
$C_{md} (10^{-3})$	0.98	m/N
M_{md}	22.8	gm
R_{md}	1.882	gm/sec
C_{med}	270.2	μF
L_{ced}	82.9	mH
R_{ed}	45.0	ohm
Bl	9.2	N/amp

2) Tegyük fel, hogy $S_L/S_0 = 1$. Az 1., 2. és 3. táblázatokból a következő értékek határozhatók meg 35 Hz-es hangolás esetén. A valódi terv 47 Hz-re hangol, ez rövidebb hosszú eredményez.

$$L_{\text{effective}} = 96 \text{ in} = 2.438 \text{ m}$$

$$DZ = 34.001$$

$$DR = 0.102$$

3) S_0/S_d arányának kiszámítása. A fenti táblázatban adott S_d -t használva S_0 számszerű értéke kiszámítható. A 3. oldal alján levő legutolsó, pirossal bekeretezett kifejezés használható ehhez a művelethez. Legyünk óvatosak a változók mértékegységeivel.

$$S_0/S_L = \rho c S_d DZ DR Re / (Bl)^2$$

$$S_0/S_d = (1.21 \text{ kg}/m^3)(342 \text{ m}/\text{sec})(0.022 \text{ m}^2)(34.00)(0.102)(7.7 \text{ ohm}) / (9.2 \text{ N}/\text{amp})^2$$

$$S_0/S_d = 2.872$$

$$S_0 = 2.872 S_d = 2.872 (0.022 \text{ m}^2) = 0.063 \text{ m}^2 \sim 98 \text{ in}^2 \text{ (} S_L/S_0 = 1, \text{ így } S_L = S_0 \text{)}$$

4) A valós hossz kiszámítása a torkolati korrekció figyelembevételével. (Valós hossz = Effektív hossz – korrekció) A MathCad szimulációhoz ez a pontos hosszérték. Az akusztikus impedancia a nyitott végen 0,085 méterrel (3,3 inch) növeli meg látszólagosan a mért fizikai hossz értékét az adott keresztmetszet esetén. (Ennek az oka az, hogy az áramlás nem szakad meg a cső végénél, hanem behatol az ott lévő térbe. A látszólagos hossznövekedés

vagyis a torkolati tényező értéke kör keresztmetszetű cső esetén $L' = (\pi/4)*r$, tetszőleges keresztmetszet esetén pedig átszámítva $0.6 (SL/\pi)^{1/2}$

$$L_{\text{actual}} = L_{\text{effective}} - 0.6 (SL/\pi)^{1/2}$$

$$L_{\text{actual}} = 2.438 \text{ m} - 0.6 [(0.063 \text{ m}^2) / \pi]^{1/2} = 2.438 \text{ m} - 0.085 \text{ m} = 2.353 \text{ m}$$

5) Összehasonlítva a tervező táblázatból kapott adatokat a valódi projekt értékeivel, némi eltérést vehetünk észre.

TL jellemző	Táblázat eredménye	Valós projekt	Mértékegység
Hossz	2.353	1.819	(m)
S_0/S_d	2.872	3.000	---

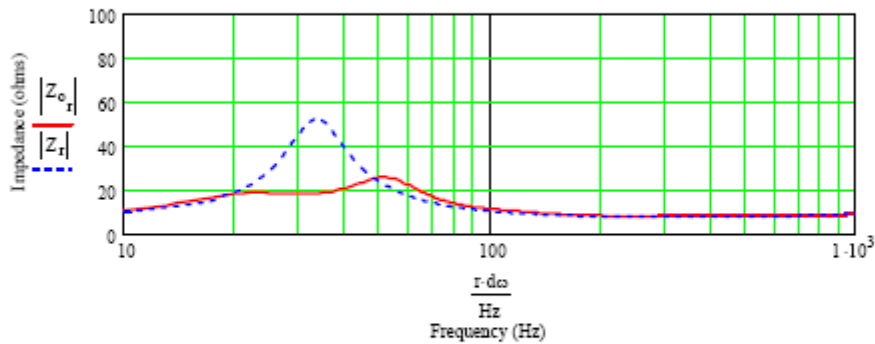
A fenti táblázatban látható - valós és a táblázatból levezetett projekt - adatokat betápláltuk a „TL Offset Driver” MathCad munkalapba, az eredményeket a 8. és 9. ábra szemlélteti. A hangszórókat 15,24 centiméterre (6 inch) helyeztük el a zárt végtől, a csillapítás mértéke 8 g/dm^3 (0,5 font/köbláb), a cső teljes hosszában.

A tervező táblázatok arra a feltételre épülnek, hogy a hangszóró rezonanciafrekvenciájára hangoljuk a TL-t. A 8. és 9. ábrát összehasonlítva látható, hogy valódi projekt hangolási frekvenciája magasabb a hangszóró rezonanciafrekvenciájánál. Ha a csillapítást csak a cső első $3/4$ részébe tesszük, a táblázatból számított TL viselkedése közel egyezik a valódi projekt viselkedésével. Ez a szimuláció látható a 10. ábrán.

8. ábra: Focal 8V 4412 hangszóró TL rendszerben - Valós projekt

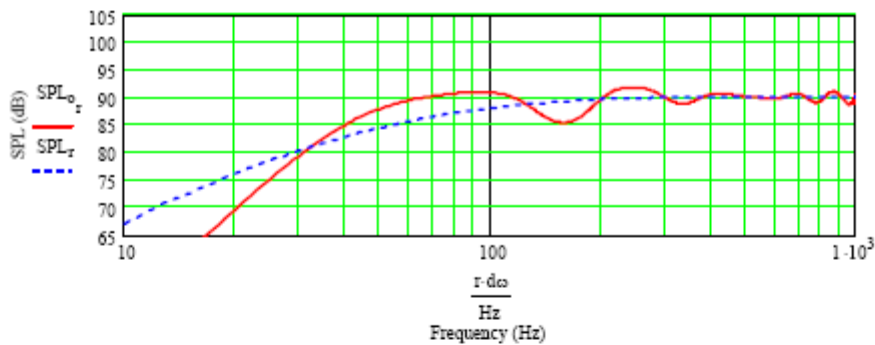
A TL rendszer - végtelen hangfalon mért impedanciák

Csillapítás sűrűsége: 8 g/liter
Vörös - TL rendszer, Kék - végtelen fal



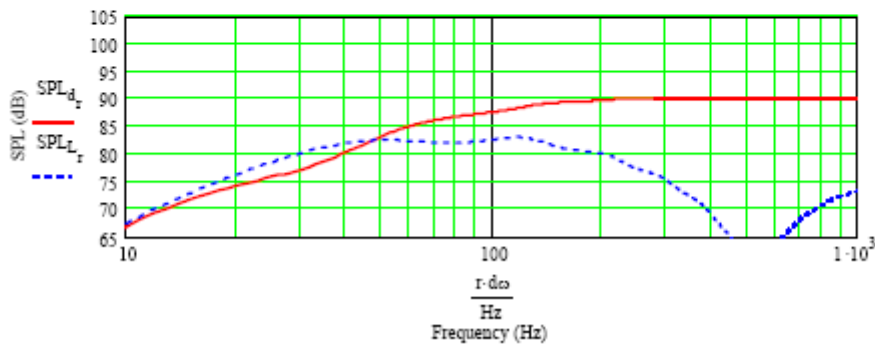
A TL rendszer távolról mért hangnyomásgörbéje

Csillapítás sűrűsége: 8 g/liter
Vörös - TL rendszer, Kék - végtelen fal



A hangszóró és a nyitott vég távolról mért hangnyomásgörbéje

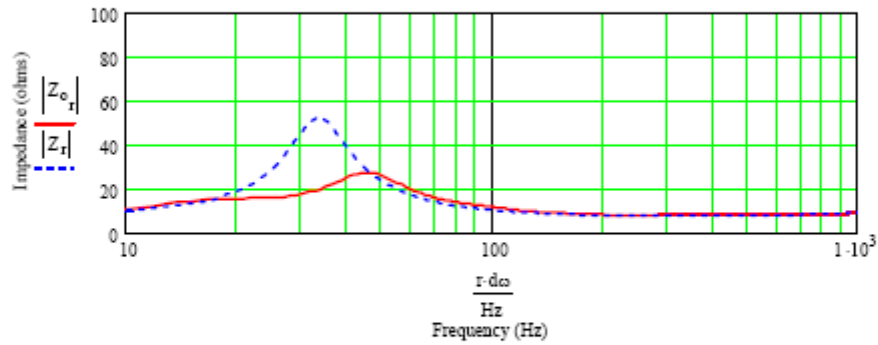
Csillapítás sűrűsége: 8 g/liter
Vörös - hangszóró, Kék - nyitott vég



9. ábra: Focal 8V 4412 hangszóró TL rendszerben - Táblázatból levezetett projekt

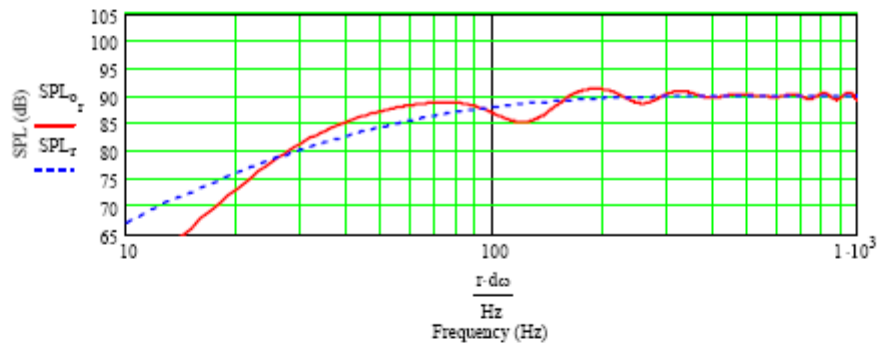
A TL rendszer - végtelen hangfalon mért impedanciák

Csillapítás sűrűsége: 8 g/liter
Vörös - TL rendszer, Kék - végtelen fal



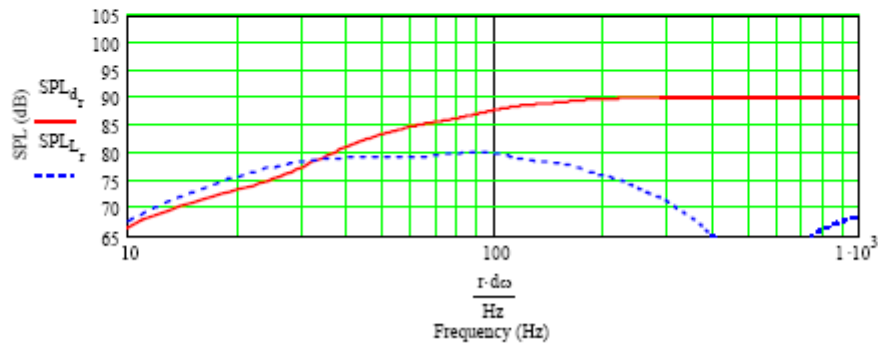
A TL rendszer távolról mért hangnyomásgörbéje

Csillapítás sűrűsége: 8 g/liter
Vörös - TL rendszer, Kék - végtelen fal



A hangszóró és a nyitott vég távolról mért hangnyomásgörbéje

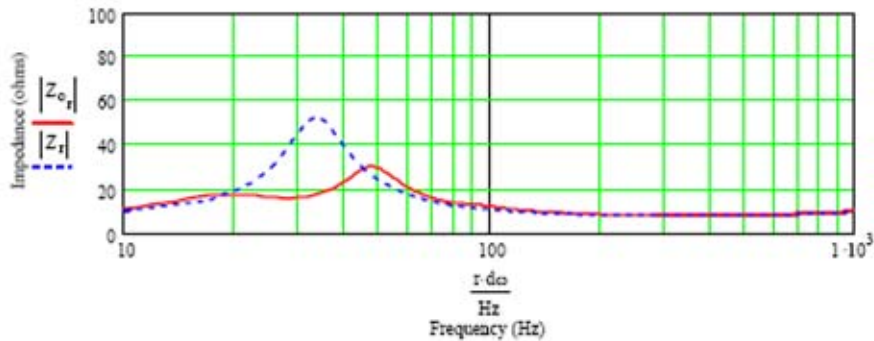
Csillapítás sűrűsége: 8 g/liter
Vörös - hangszóró, Kék - nyitott vég



10. ábra: Focal 8V 4412 hangszóró TL rendszerben - Táblázatból levezetett projekt /
Optimalizált elhelyezésű csillapítás

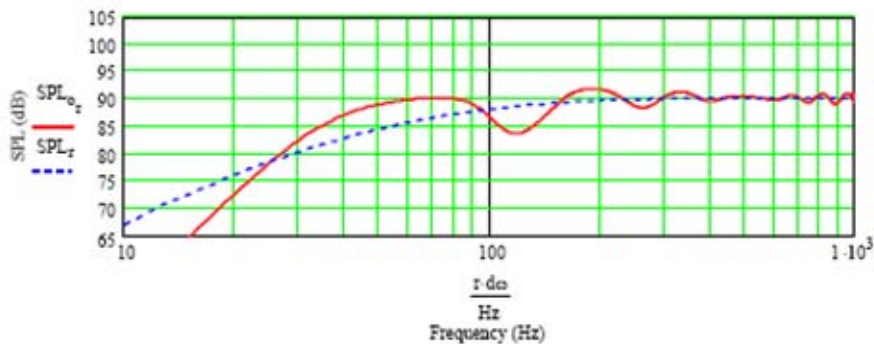
A TL rendszer - végtelen hangfalon mért impedanciák

Csillapítás sűrűsége: 8 g/liter
Vörös - TL rendszer, Kék - végtelen fal



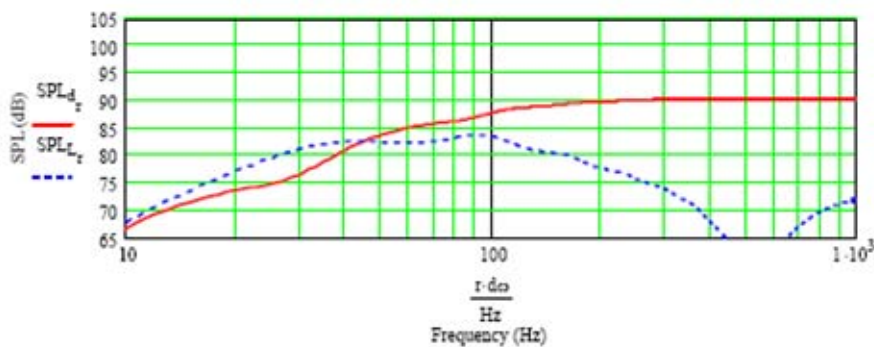
A TL rendszer távolról mért hangnyomásgörbéje

Csillapítás sűrűsége: 8 g/liter
Vörös - TL rendszer, Kék - végtelen fal



A hangszóró és a nyitott vég távolról mért hangnyomásgörbéje

Csillapítás sűrűsége: 8 g/liter
Vörös - hangszóró, Kék - nyitott vég



Konklúzió:

A klasszikus TL tervező táblázatok a következő Thiele / Small paraméterek és keresztmetszet-arányok tartományát fedik le.

$$20 \text{ Hz} < f_d < 70 \text{ Hz}$$

$$0.2 < Q_{td} < 0.7$$

$$0.1 < S_L/S_0 < 10$$

A táblázatokból levezetett eredmények olyan klasszikus TL geometriai esetekre vonatkoznak, ahol a keresztmetszetben nincs hirtelen változás. A nyitott végen tömegterhelt („mass loaded”) TL esete kívül esik a táblázatok értelmezési tartományán. A TL geometriájának egyenletesen kell változni a zárt (S_0) és nyitott (S_L) vég közti teljes hosszban. (1. ábra)

Ezekkel a tervező táblázatokkal az alap geometria meghatározható, mely alapja lehet egy TL megépítésének, vagy a további MathCad-es optimalizálásnak. A tervező táblázatok használata után erősen ajánlott a „TL Offset Driver” MathCad munkalapba betáplált Thiele /Small paraméterek, és a számított geometria ellenőrzése. További optimalizálás lehetséges.

A tervező táblázatot sok különböző, általános hangszóró esetén kipróbáltam. A Thiele / Small paramétereket minimális számú feltételezésre alapoztam. Az R_e , Q_{td} , Q_{ed} , f_d , S_d , és SPL (1 m/1 W) változókhöz különböző értékeket rendeltem hozzá, melyeket a táblázatok tartalmaznak. Az egyedüli problémát az okozhatja, ha a táblázat használata közben a kifejezések mértékegysége nem konzisztens, ez hibás eredményt okoz. Figyelem, újra ellenőrizzük a használt mértékegységeket, és ellenőrizzük, hogy a számított értéket milyen mértékegységben kapjuk! Mellékelem további 4 eset leírását, a módszer további szemléltetéseként, és hogy bepillantást nyújtsak a rendszer viselkedésébe.

A klasszikus TL-ek hangnyomásgörbéje a mély szekcióban hullámos. Ez a tervezés sajátosságaitól függ, és csillapítható a hangszóró eltolásával (Driver Offset Ratio) és a csillapítóanyag sűrűségével, elhelyezésével. A csillapító anyag optimális mennyiségének és helyének megtalálásával csökkenthető a hullámosság, de csak a mélyátvitel rovására. Egy csillapítási séma, ha a szűrni kívánt magasabb frekvenciák hanghullámának sebességmaximumához helyezünk csillapítást. Ez általában azt jelenti, hogy a hossz első kétharmad - háromnegyed részét csillapítjuk, a fennmaradó részt pedig nem. Általában a csillapítás növelésével – csökkentésével hangolható a rendszer a lehallgató helyiséghez, az egyéni ízléshez.

Köszönetnyilvánítás:

A bevezető részben említettem, hogy sok embertől érkezett konstruktív visszajelzés, miután kipróbálták a tervező táblázatok első verzióját. Köszönetet nyilvánítok ezeknek a visszajelzéseknek az információ, az elmélet és a tervek tekintetében, valamint a MathCad programnak a weboldalamon. Minden megjegyzést fontolóra veszek, és a tőlem telhető módon igyekszem válaszolni mindenkinek.

Egy ember különösen sok időt töltött az első verzió elemzésével, később pedig három részletes levélben dokumentálta felfedezéseit. George Augspurger úr ellátott konstruktív megjegyzésekkel, a táblázatok ellenőrzésének módjával, és szimulációs példákkal, mely összehasonlítja az ő programját az én MathCad munkalapommal. Ráadásul türelmesen adott magyarázatokat a megjegyzéseire vonatkozó kérdéseimre. Ez a levelezés rendkívül értékes volt, a legfontosabb indokok egyike, amiért felülvizsgáltam és javítottam a TL tervező táblázatokat.

A) melléklet: A TL viselkedése a hangszóró Thiele / Small paramétereinek függvényében.

Az a táblázat használatának első ellenőrző tanulmánya az üres TL viselkedése a hangszóró Thiele / Small paramétereinek függvényében. A számítások végrehajtásához, az általános hangszórót határoztam meg az f_d , R_e , Q_{md} , V_{ad} , és S_d paraméterek definiálásával. A Q_{td} érték meghatározása után a fennmaradó BI és SPL (1W/1m) értékeket kiszámítottam. Aztán a táblázat segítségével meghatároztam a geometriát, és MathCad szimulációt végeztem a „TL Open End” munkalap segítségével. Az A1 táblázat tartalmazza a tanulmányban felhasznált általános hangszóró adatait. Az A2 táblázat tartalmazza a táblázatok által számított TL geometriai adatait.

A1 táblázat: Az általános hangszóró Thiele / Small paramétere

T/S Parameter	Hangszóró adatok						Mérték- egység
	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	
f_d	30	30	30	30	30	30	Hz
R_e	8	8	8	8	8	8	ohm
Q_{ed}	0.207	0.316	0.429	0.545	0.667	0.792	--
Q_{md}	6	6	6	6	6	6	--
Q_{td}	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	--
S_d	0.0205	0.0205	0.0205	0.0205	0.0205	0.0205	m ²
V_{ad}	83.7	83.7	83.7	83.7	83.7	83.7	liter
BL	12.075	9.774	8.39	7.437	6.726	6.17	N/Amp
SPL	92.3	90.5	89.2	88.1	87.2	86.5	dB 1m/1w

A2 táblázat: TL geometria

Cső geometria	Hangszóró adatok						Mérték- egység
	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	
L_{eff}	2.845	2.845	2.845	2.845	2.845	2.845	m
L	2.768	2.767	2.766	2.763	2.761	2.757	m
SL/S0	1	1	1	1	1	1	--
S0/Sd	2.520	2.588	2.669	2.816	3.005	3.247	--

Az A1-A6 ábrák szemléltetik a szimulált viselkedést az A1 és A2 táblázat minden egyes oszlopa alapján. Ezen a táblázatok és ábrák alapján számos érdekes megfigyelés végezhető.

1. A különböző hangszórókra vonatkozó impedanciagörbék (felső grafikon) összehasonlításával felfedezhető, hogy az alacsonyabb Q_{ts} (magasabb BI és SPL) értékekkel rendelkező hangszórók impedanciája szorosan összefügg a membrán mozgásával, és a hangszóró illetve a TL rezonanciák magas, keskeny csúcserőértékeket produkálnak az impedancia görbén. A Q_{ts} növekedésével a csatlós erőssége csökken, és a csúcserőértékek szélsőértékei is csökkennek.
2. Alacsony Q_{ts} értékű hangszóróknál egy nyereg képződik az átviteli görbén (középső ábra, vörös görbe) a 30 Hz-es a hangolási frekvencia és a következő rezonáns frekvencia (kb. 90 Hz) között. A Q_{ts} növelésével a nyereg mélysége csökken, végül egy széles kidomborodás keletkezik. Ennek okát példázza a hangszóró végtelen hangfalon mérhető átviteli görbéje (középső ábra, kék görbe). Az alacsonyabb Q_{ts} értékű hangszórók hangnyomás esése magasabb frekvencián kezd jelentkezni, mint a magasabb Q_{ts} értékűeké. Ahogy a hangszóró átvitele a rezonanciafrekvencia felett növekszik (növekvő Q_{ts}), úgy javul a nyitott vég átvitele (alsó ábra, vörös és kék görbe).

A két átvitel összegződése kitölti a nyeret és végül egy kis kidomborodást formál (középső ábra, vörös görbe). Egy módszer a két átvitel kisimítására, ha a TL-t alacsony Q_{ts} esetén 5 vagy 10 Hz-cel a hangszóró rezonanciapontja fölé, magas Q_{ts} esetén 5-10 Hz-cel a rezonanciapontja alá hangoljuk. Ezt az effektív hossz és az alakfüggvény (D_z) megválasztásával érhetjük el. Az ellenállási tényező (D_R) változatlan marad.

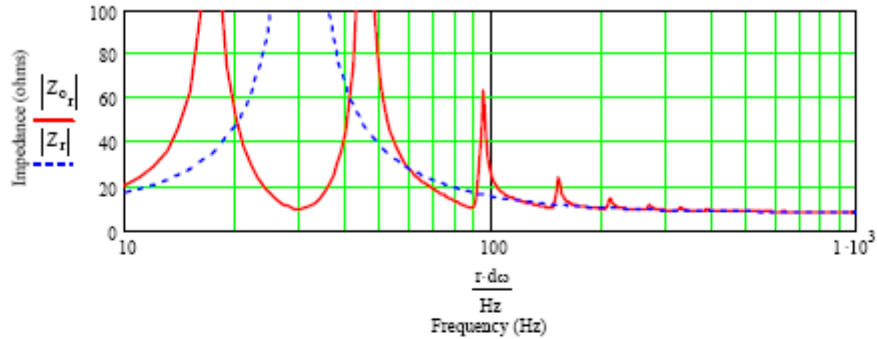
3. Ahogy a hangszóró Q_{ts} értéke növekszik, úgy növekszik a szükséges dobozméret is. Ez nekem egyrészt némi meglepetést okozott, másrészt lehetőséget kínál kisebb TL doboz tervezésére alacsonyabb Q_{ts} értékű hangszórók felhasználásával.
4. Szűkülő és táguló geometriák esetén az átvitel alakí trendje hasonlít az A1-A6 ábrán ábrázolthoz. Mindamelllett a TL rezonanciák sűrűsége változik. Ezt mutatja be a C melléklet.

Az A1-A6 ábrák görbéi lényeges fontosságú bepillantást nyújtanak a TL-ek teljesítményére és viselkedésére vonatkozólag különböző Thiele / Small paraméterekkel rendelkező hangszórók esetén. Ezek a görbék a táblázatok alapján méretezett TL-be épített hangszóró tervezett átvitelét hivatottak érzékeltetni.

A-1 ábra: Általános hangszóró állandó keresztmetszetű, csillapítatlan TL-ben
 $Q_{ts} = 0.2$

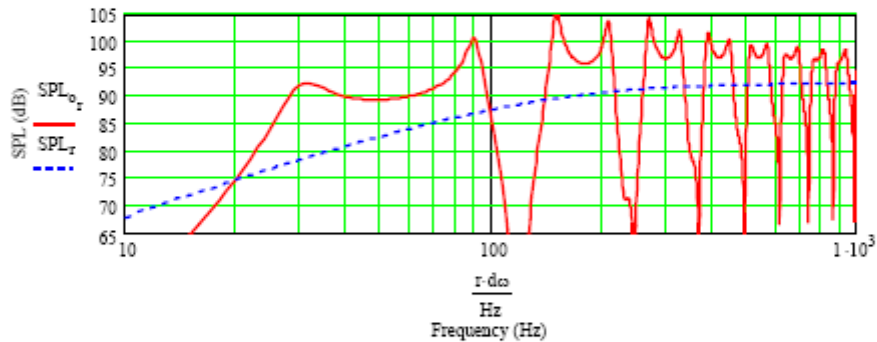
TL rendszeren és végtelen hangfalon mért impedancia

Csillapítás mennyisége: 0g/liter
 Vörös - TL rendszer, Kék - végtelen fal



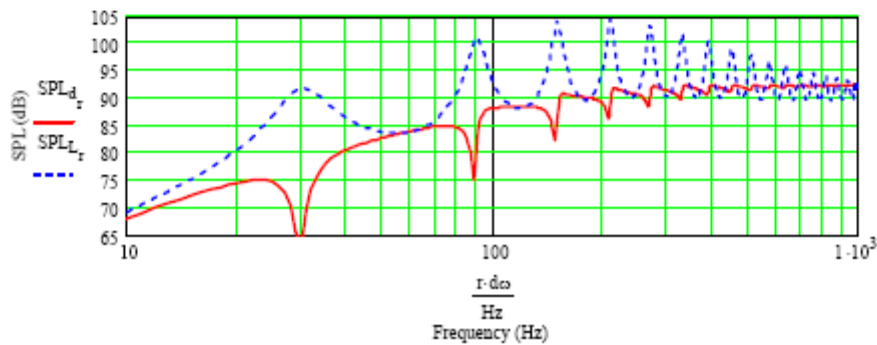
TL távolról mért hangnyomásgörbe

Csillapítás mennyisége: 0 g/liter
 Vörös - TL rendszer, Kék - végtelen fal



A hangszóró és a nyitott vég távolról mért hangnyomásgörbéje

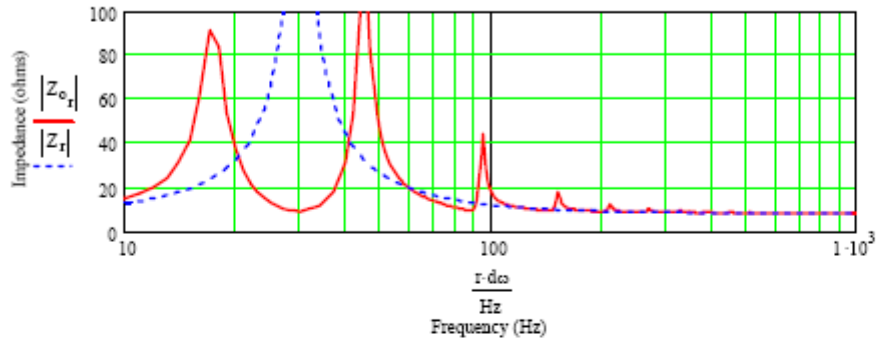
Csillapítás mennyisége: 0 g/liter
 Vörös - hangszóró, Kék - nyitott vég



A-2 : ábra: Általános hangszóró állandó keresztmetszetű, csillapítatlan TL-ben
 $Q_{ts} = 0.3$

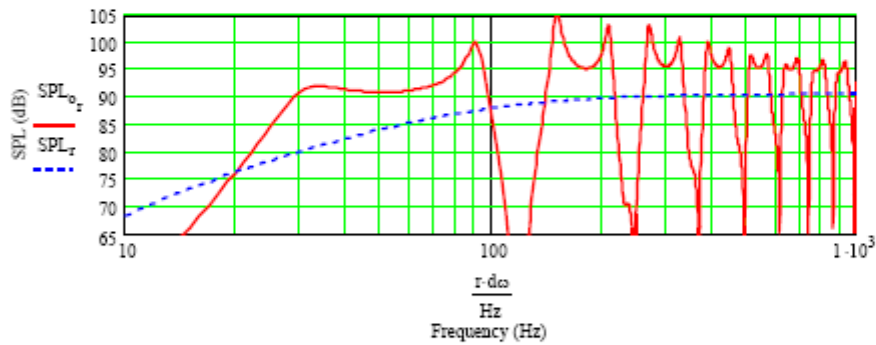
TL rendszeren és végtelen hangfalon mért impedancia

Csillapítás mennyisége: 0 g/liter
 Vörös - TL rendszer, Kék - végtelen fal



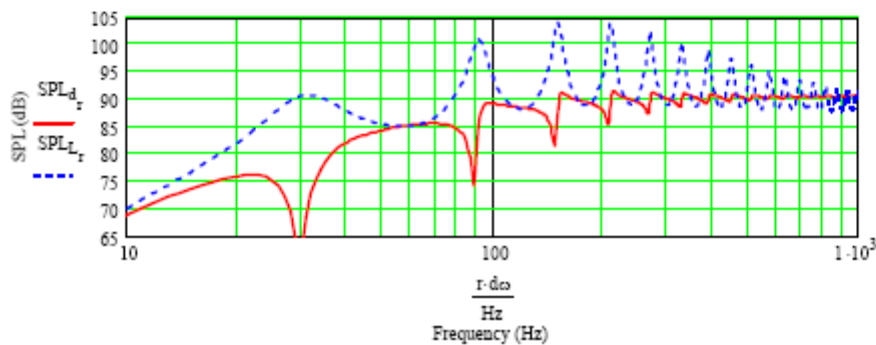
TL távolról mért hangnyomásgörbe

Csillapítás mennyisége: 0 g/liter
 Vörös - TL rendszer, Kék - végtelen fal



A hangszóró és a nyitott vég távolról mért hangnyomásgörbéje

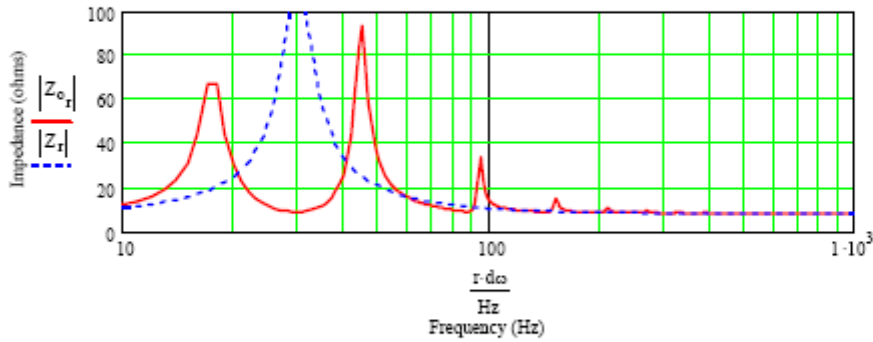
Csillapítás mennyisége: 0 g/liter
 Vörös - hangszóró, Kék - nyitott vég



A-3 : ábra: Általános hangszóró állandó keresztmetszetű, csillapítatlan TL-ben
 $Q_{ts} = 0.4$

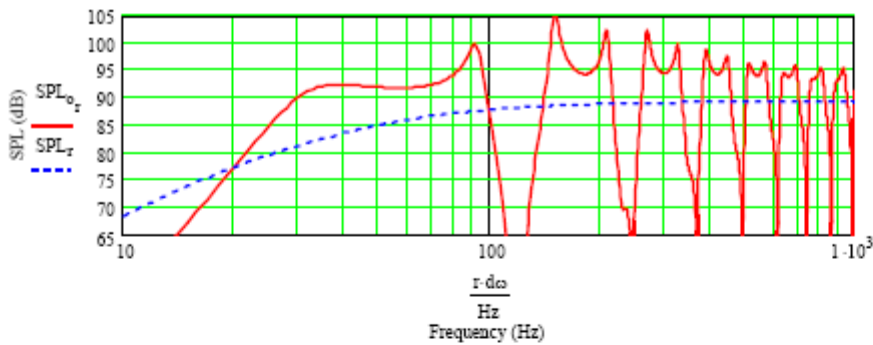
TL rendszeren és végtelen hangfalon mért impedancia

Csillapítás mennyisége: 0 g/liter
 Vörös - TL rendszer, Kék - végtelen fal



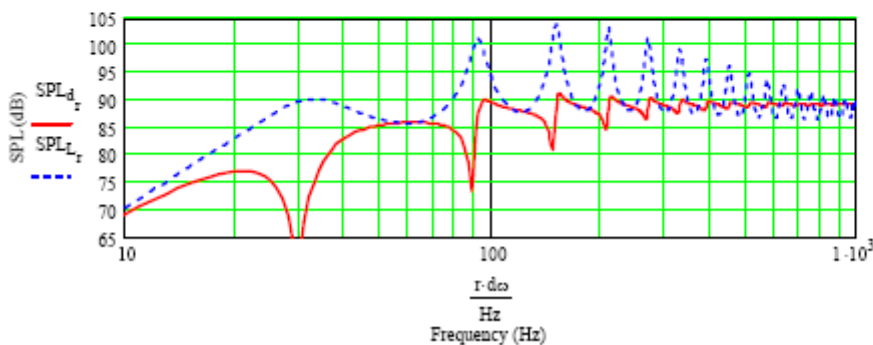
TL távolról mért hangnyomásgörbe

Csillapítás mennyisége: 0 g/liter
 Vörös - TL rendszer, Kék - végtelen fal



A hangszóró és a nyitott vég távolról mért hangnyomásgörbéje

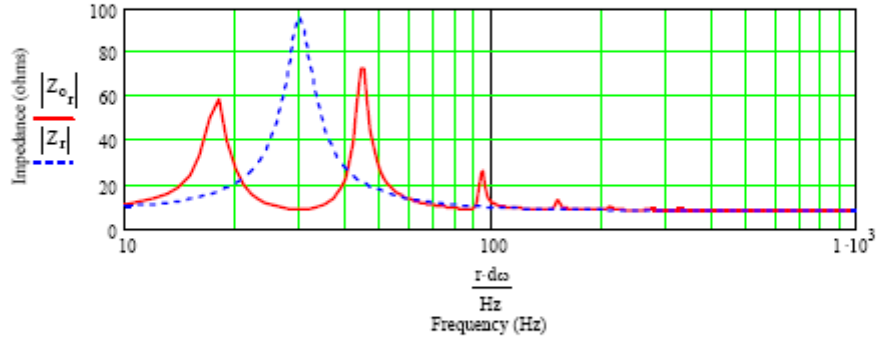
Csillapítás mennyisége: 0 g/liter
 Vörös - hangszóró, Kék - nyitott vég



A-4 : ábra: Általános hangszóró állandó keresztmetszetű, csillapítatlan TL-ben
 $Q_{ts} = 0.5$

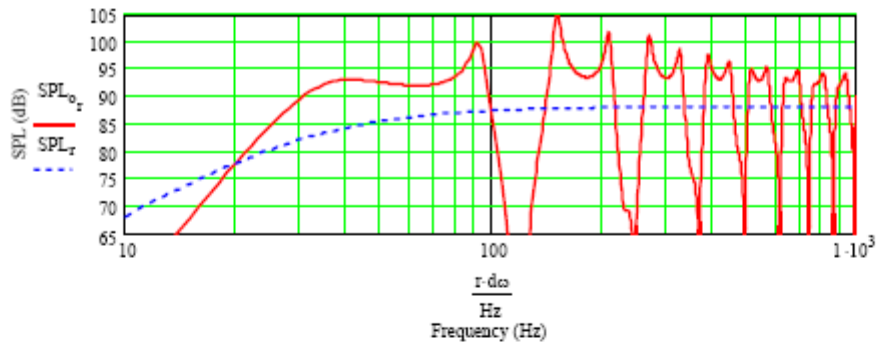
TL rendszeren és végtelen hangfalon mért impedancia

Csillapítás mennyisége: 0 g/liter
 Vörös - TL rendszer, Kék - végtelen fal



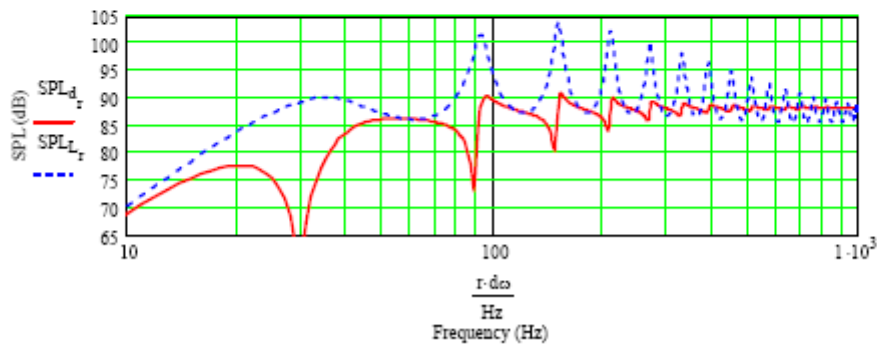
TL távolról mért hangnyomásgörbe

Csillapítás mennyisége: 0 g/liter
 Vörös - TL rendszer, Kék - végtelen fal



A hangszóró és a nyitott vég távolról mért hangnyomásgörbéje

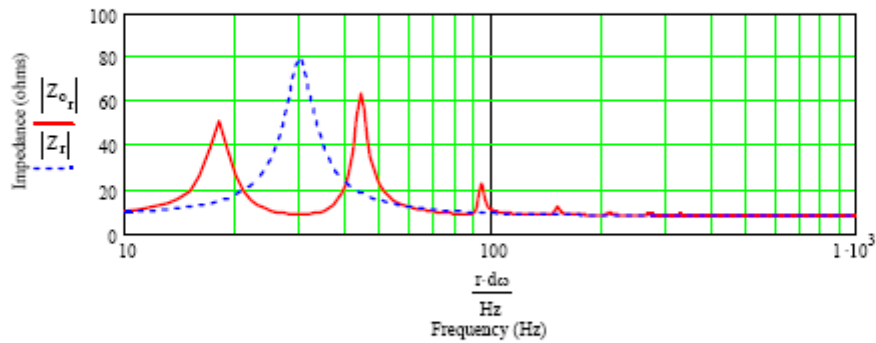
Csillapítás mennyisége: 0 g/liter
 Vörös - hangszóró, Kék - nyitott vég



A-5 : ábra: Általános hangszóró állandó keresztmetszetű, csillapítatlan TL-ben
 $Q_{ts} = 0.6$

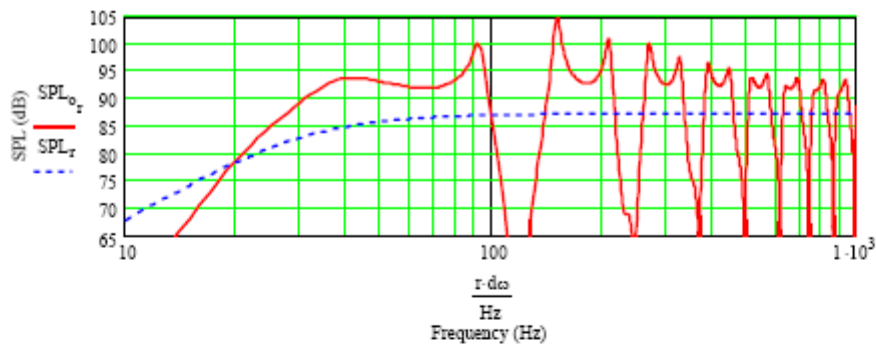
TL rendszeren és végtelen hangfalon mért impedancia

Csillapítás mennyisége: 0 g/liter
 Vörös - TL rendszer, Kék - végtelen fal



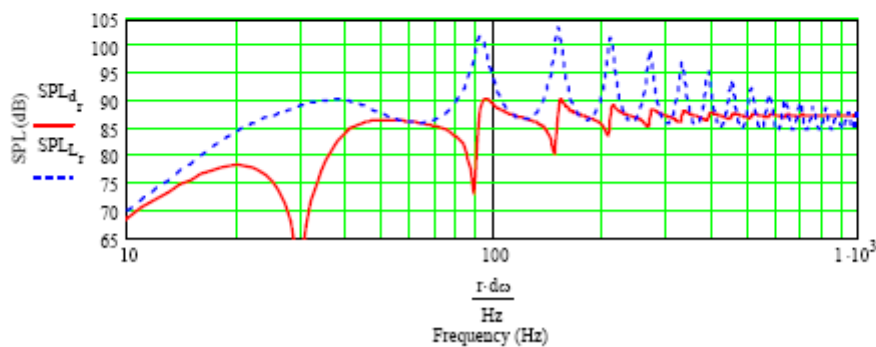
TL távolról mért hangnyomásgörbe

Csillapítás mennyisége: 0 g/liter
 Vörös - TL rendszer, Kék - végtelen fal



A hangszóró és a nyitott vég távolról mért hangnyomásgörbéje

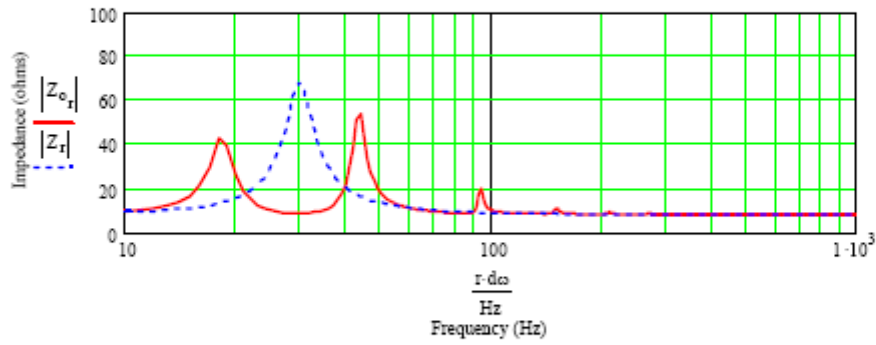
Csillapítás mennyisége: 0 g/liter
 Vörös - hangszóró, Kék - nyitott vég



A-6 : ábra: Általános hangszóró állandó keresztmetszetű, csillapítatlan TL-ben
 $Q_{es} = 0.7$

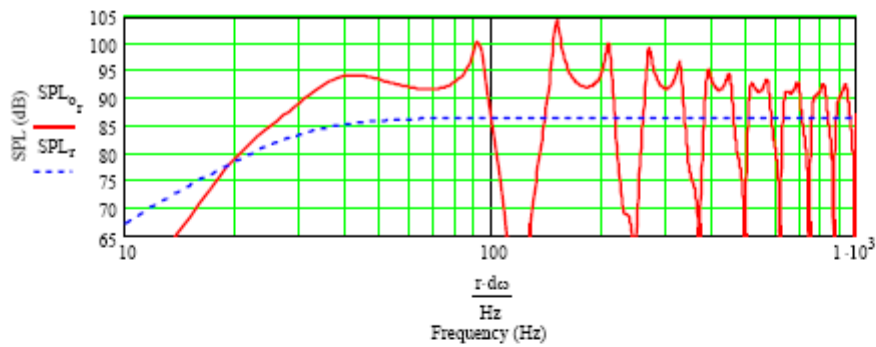
TL rendszeren és végtelen hangfalon mért impedancia

Csillapítás mennyisége: 0 g/liter
 Vörös - TL rendszer, Kék - végtelen fal



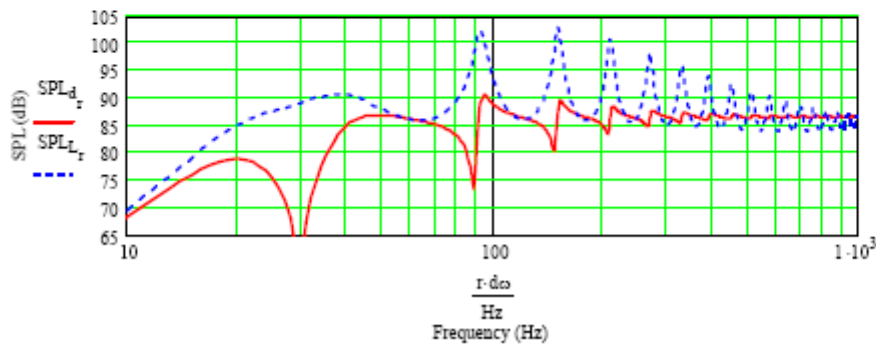
TL távolról mért hangnyomásgörbe

Csillapítás mennyisége: 0 g/liter
 Vörös - TL rendszer, Kék - végtelen fal



A hangszóró és a nyitott vég távolról mért hangnyomásgörbéje

Csillapítás mennyisége: 0 g/liter
 Vörös - hangszóró, Kék - nyitott vég



B) melléklet: A TL átvitele a hangszóró elhelyezésének függvényeként.

A 4. táblázat felsorolja a maximálisan ajánlott hangszóró eltolásokat (Driver Offset) a keresztmetszeti arány (S_L/S_0) függvényében. Ha a hangszórót a TL zárt végére helyezzük, az alulfrekvencia felharmonikusai is a maximális gerjesztést kapják. A hangszóró eltolásával az összes ilyen frekvencia gerjesztése gyengül. A hangszórót a végpont és a 4. táblázat által javasolt maximális eltolási érték között célszerű beépíteni.

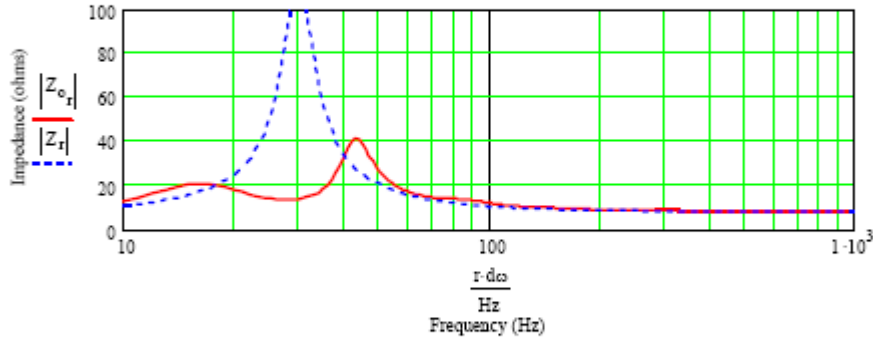
Az általános hangszóró és TL geometria viselkedését - az **A)** melléklet $Q_{ts} = 0,4$ oszlopának alapján - három különböző tengely menti elhelyezés modellezése szemlélteti. A TL csillapítása 8 g/liter, az első kétharmad hosszban. Az utolsó egyharmad rész nincsen csillapítva. A B1 ábra mutatja a számított viselkedést a zárt végre helyezett hangszóró esetén. A B2 és B3 ábra mutatja a számított viselkedést a hangszóró $\xi = 0.2$ és $\xi = 0.349$ értékű eltolásánál.

A B1 ábrán a középső grafikonon jól látható a hullámos átvitel 70 Hz felett. A hangszóró $\xi = 0.2$ értékű eltolása (B2 ábra) nem küszöböli ki a hullámosságot, de csökkenti a kiterjedését a rendszer átvitelében (középső grafikon, vörös görbe). A hangszóró $\xi = 0.349$ értékű eltolása (B3 ábra) kiküszöböli a másodlagos rezonanciákat, és minden más magasabb rezonanciát. De a hangszóró $\xi = 0.349$ értékű eltolása nem csökkenti jobban a rendszer átvitel hullámosságának amplitúdóját (középső grafikon, vörös görbe), mint a $\xi = 0.2$ értékű eltolás.

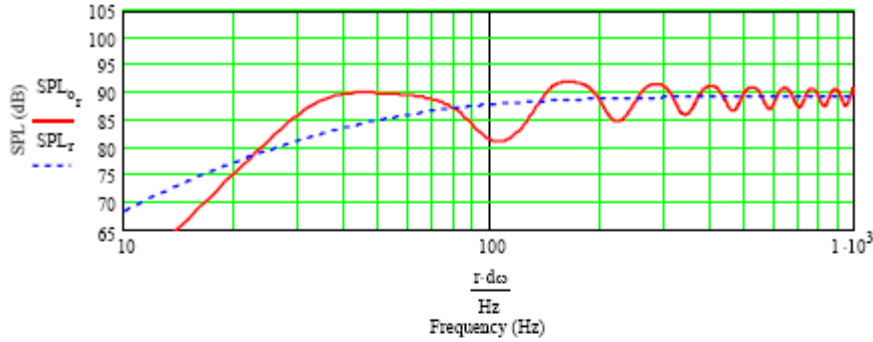
Tehát ezekből a 3 ábrából tisztán látszik, hogy a mélyátvitel kiterjedése csökken a hangszóró eltolásának növelésével. A tervezőtől függ, hogy az átvitel hullámossága, vagy a mélyátvitel kiterjesztése közt válasszon. Tökéletes megoldás sajnos nincs.

B-1 : Általános hangszóró állandó keresztmetszetű TL -ben
 $\xi = 0$

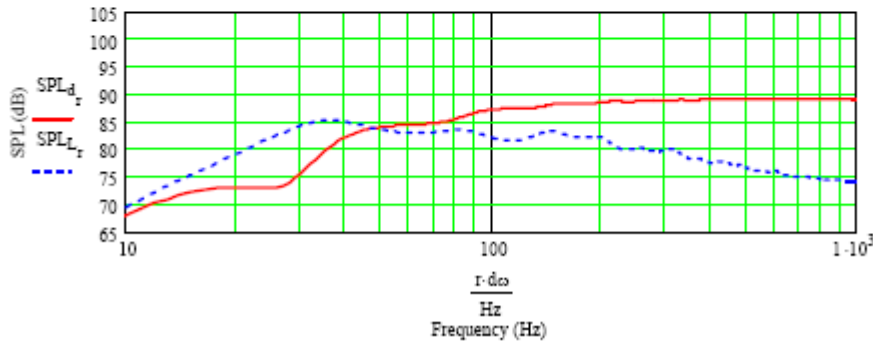
TL rendszeren és végtelen hangfalon mért impedancia
 Csillapítás mennyisége: 8 g/liter



A TL rendszer távolról mért hangnyomásgörbéje
 Csillapítás mennyisége: 8 g/liter
 Vörös - TL rendszer, Kék - végtelen fal

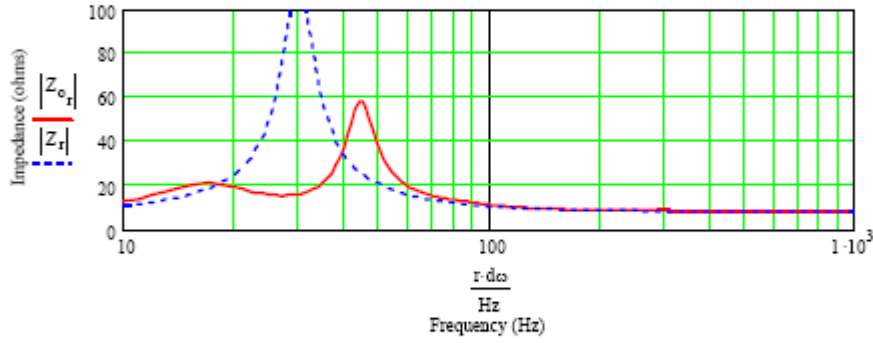


A hangszóró és a nyitott vég távolról mért hangnyomásgörbéje
 Csillapítás mennyisége: 8 g/liter
 Vörös - hangszóró, Kék - nyitott vég

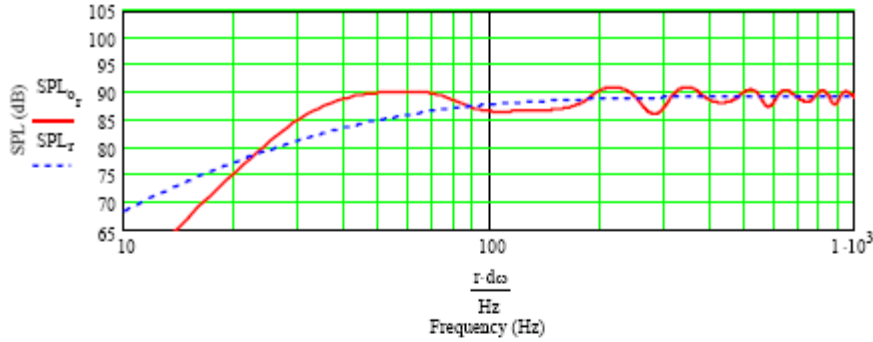


B-2 : Általános hangszóró állandó keresztmetszetű TL -ben
 $\xi = 0.2$

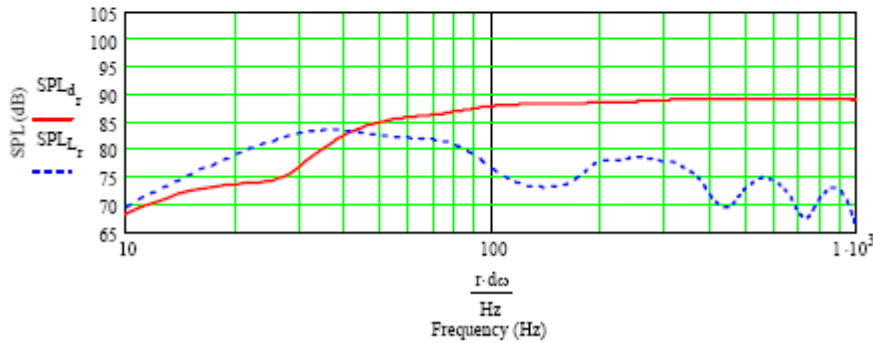
TL rendszeren és végtelen hangfalon mért impedancia
 Csillapítás mennyisége: 8 g/liter



A TL rendszer távolról mért hangnyomásgörbéje
 Csillapítás mennyisége: 8 g/liter
 Vörös - TL rendszer, Kék - végtelen fal

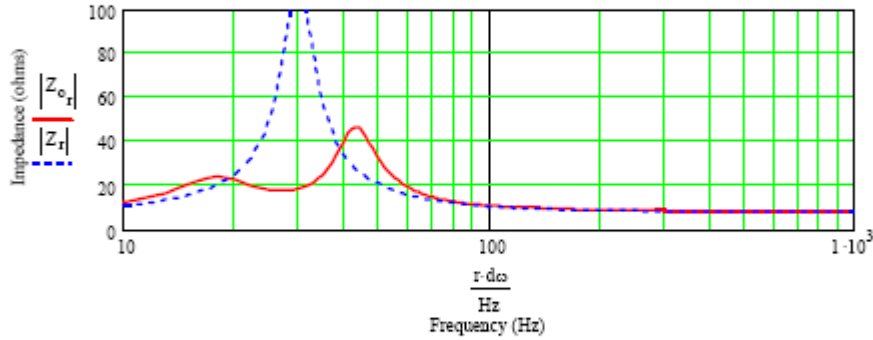


A hangszóró és a nyitott vég távolról mért hangnyomásgörbéje
 Csillapítás mennyisége: 8 g/liter
 Vörös - hangszóró, Kék - nyitott vég

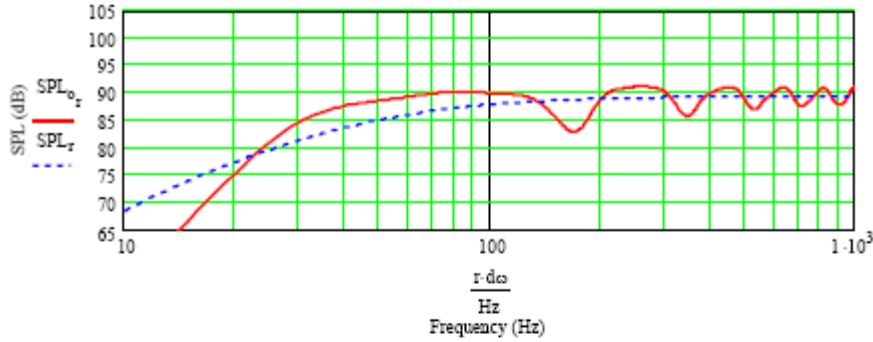


B-3 : Általános hangszóró állandó keresztmetszetű TL -ben
 $\xi = 0.349$

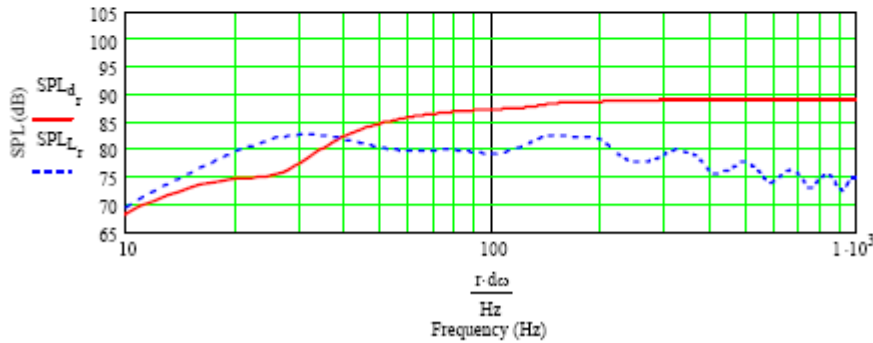
TL rendszeren és végtelen hangfalon mért impedancia
 Csillapítás mennyisége: 8 g/liter



A TL rendszer távolról mért hangnyomásgörbéje
 Csillapítás mennyisége: 8 g/liter
 Vörös - TL rendszer, Kék - végtelen fal



A hangszóró és a nyitott vég távolról mért hangnyomásgörbéje
 Csillapítás mennyisége: 8 g/liter
 Vörös - hangszóró, Kék - nyitott vég



C) melléklet: A TL átvitele a doboz alakjának függvényében

Az általános hangszóró különböző geometriájú TL-ben való viselkedését a tervező táblázat a cső hosszával és a keresztmetszeti arányokkal (S_L/S_0 értéke 0.1, 1.0, és 10.0) definiálja. A szimulált általános hangszóró újfent az **A)** melléklet $Q_{ts} = 0.4$ oszlopa által megadott értékekkel bír. A C1 táblázat tartalmazza a kijelölt geometriákat. Figyelembe kell venni, hogy a szimulált TL 30 Hz-re van hangolva mindhárom esetben.

C-1 táblázat: TL geometria

Geometria	$S_L/S_0 = 0.1$	$S_L/S_0 = 1.0$	$S_L/S_0 = 10.0$	Mértékegység
Hossz	1.716	2.766	3.925	(m)
S_0/S_d	5.012	2.669	0.603	--
S_L/S_d	0.501	2.669	6.034	--

A C1, C2 és C3 ábrák szemléltetik a MathCad „TL Open End” munkalap szimulációjának eredményeit $S_L/S_0 = 0.1, 1.0, 10.0$ esetekre. Az alábbiakban néhány érdekes észrevétel:

1. Az előző bekezdés meghatározásait ismételve, a C1 táblázatban feltüntetett csőhosszokat nézve az S_L/S_0 változik 0,1-től 10,0-ig. Mindhárom eset hangolási frekvenciája 30 Hz, de az ehhez szükséges hosszok drámaian különböznek.
2. A nyitott végek átviteleit összehasonlítva (alsó grafikon, kék görbe), látható, hogy a szűkülő elrendezés sokkal jobban csillapítja a magasabb rezonanciákat az állandó keresztmetszetű, vagy táguló elrendezéshez képest.
3. A másodlagos TL rezonanciák helyének nincs jelentősége. Mindhárom elrendezés hangolási frekvenciája 30 Hz. Az másodlagos rezonanciák hozzávetőlegesen 130 Hz-nél, 90 Hz-nél és 74 Hz-nél jelentkeznek rendre a 0,1; 1,0; 10,0 S_L/S_0 értékek esetén. Ahogy az S_L/S_0 érték csökken, a csökken a csőhossz, és csökkennek a másodlagos rezonanciák. Ahogy az S_L/S_0 érték növekszik, úgy nő a csőhossz, a másodlagos rezonanciák frekvenciája csökken, míg mértékük növekszik. Ez a magyarázata a misztikus TQWT elrendezés átvitelének, ahol $S_L/S_0 > 1,0$.
4. Az állandó keresztmetszet, illetve a szűkülő elrendezés kompakt dobozt eredményez nagyon egyenletes mélyátvitellel. Ha csak a táblázatokat használjuk a TL tervezéséhez, a szűkülő elrendezés nagyobb eséllyel lehet sikeres. A táblázatokkal tervezett táguló, illetve TQWT elrendezések elég nagy kockázatot hordoznak magukban.

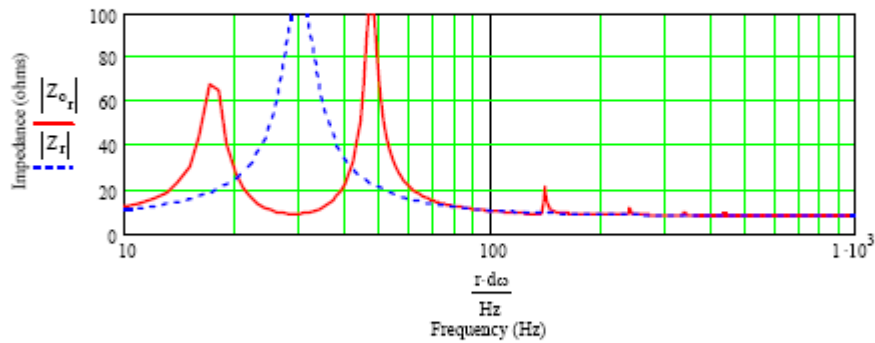
A geometria szűkülésének foka nagy mértékben befolyásolja a cső hosszát, és a rendszer átvitelét. Ha csak a tervező táblázatokat használjuk a TL megtervezésére, és nem alkalmazunk további MathCad optimalizálást, érdemes szűkülő, vagy állandó keresztmetszetű rendszert tervezni. Ha egy kicsit rámenősebbek vagyunk, és TQWT dobozt építünk, erősen ajánlott a táblázatok által levezetett elrendezés adatainak további optimalizálása a „TL Offset Driver” MathCad munkalap használatával, hogy megtaláljuk a hangszóró optimális beépítési helyét, illetve a csillapítás mennyiségét és helyét.

C-1 : Általános hangszóró szűkülő keresztmetszetű TL-ben
 $S_L/S_0 = 0.1$

TL rendszeren és végtelen hangfalon mért impedancia

Csillapítás mennyisége: 0 g/liter

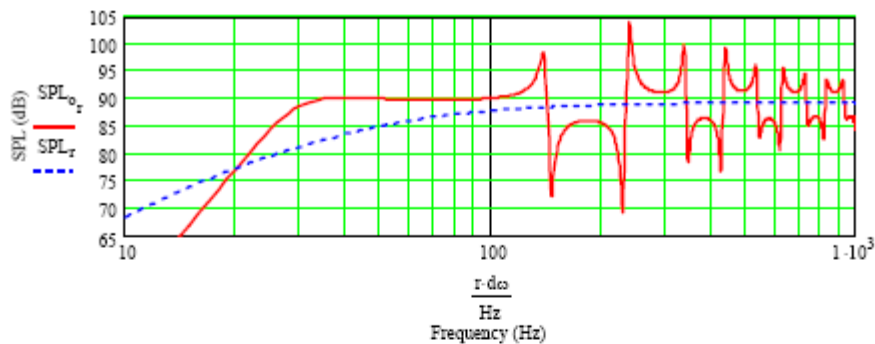
Vörös - TL rendszer, Kék - végtelen fal



A TL rendszer távolról mért hangnyomásgörbéje

Csillapítás mennyisége: 0 g/liter

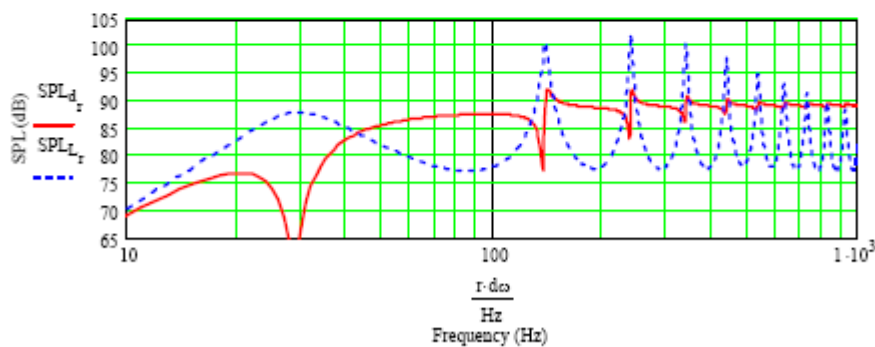
Vörös - TL rendszer, Kék - végtelen fal



A hangszóró és a nyitott vég távolról mért hangnyomásgörbéje

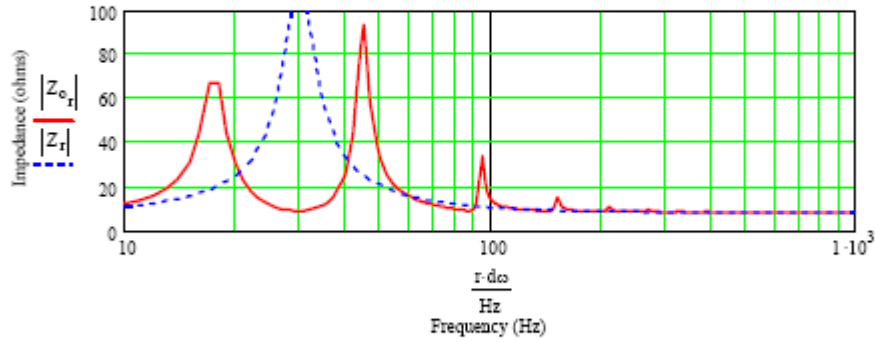
Csillapítás mennyisége: 0 g/liter

Vörös - hangszóró, Kék - nyitott vég



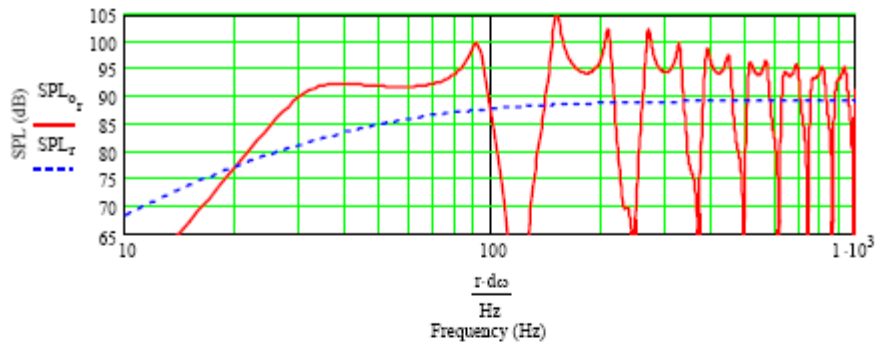
C-2 : Általános hangszóró állandó keresztmetszetű TL-ben
 $S_L/S_0 = 1.0$

TL rendszeren és végtelen hangfalon mért impedancia
 Csillapítás mennyisége: 0 g/liter
 Vörös - TL rendszer, Kék - végtelen fal



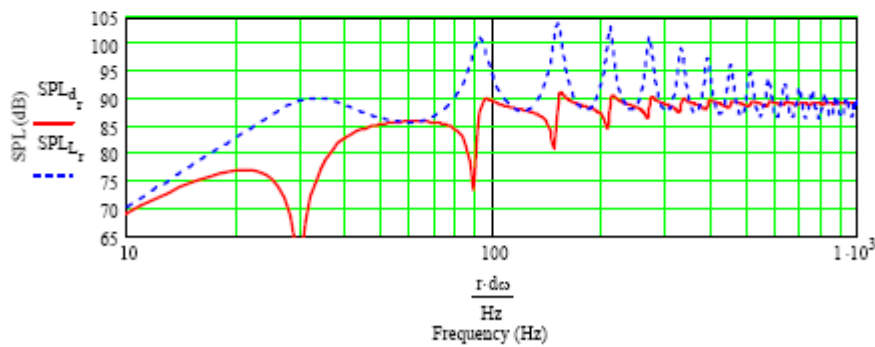
A TL rendszer távolról mért hangnyomásgörbéje

Csillapítás mennyisége: 0 g/liter
 Vörös - TL rendszer, Kék - végtelen fal



A hangszóró és a nyitott vég távolról mért hangnyomásgörbéje

Csillapítás mennyisége: 0 g/liter
 Vörös - hangszóró, Kék - nyitott vég

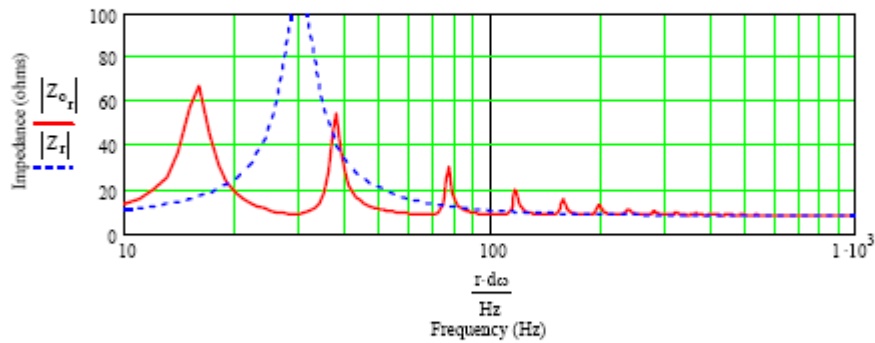


C-3 : Általános hangszóró növekvő keresztmetszetű TL-ben
 $S_L/S_0 = 10.0$

TL rendszeren és végtelen hangfalon mért impedancia

Csillapítás mennyisége: 0 g/liter

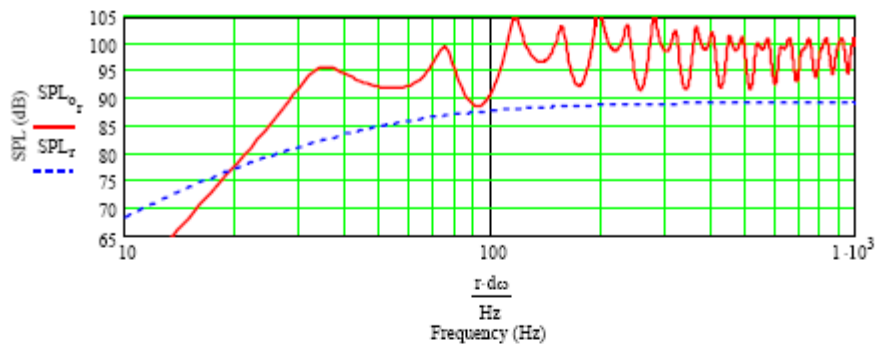
Vörös - TL rendszer, Kék - végtelen fal



A TL rendszer távolról mért hangnyomásgörbéje

Csillapítás mennyisége: 0 g/liter

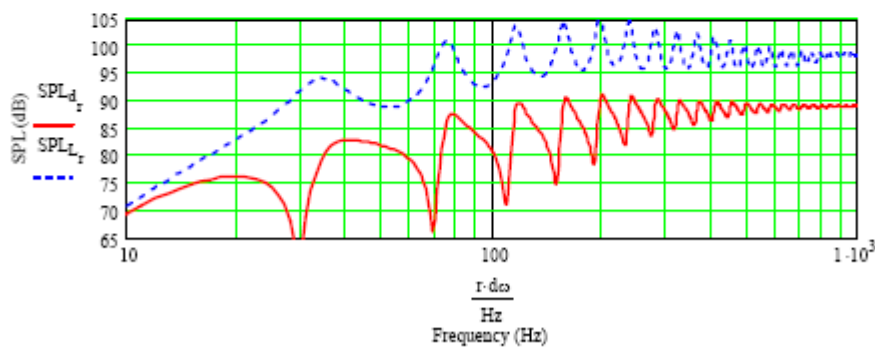
Vörös - TL rendszer, Kék - végtelen fal



A hangszóró és a nyitott vég távolról mért hangnyomásgörbéje

Csillapítás mennyisége: 0 g/liter

Vörös - hangszóró, Kék - nyitott vég



D) melléklet: A TL rendszer átvitele a csillapítás mennyiségének függvényében

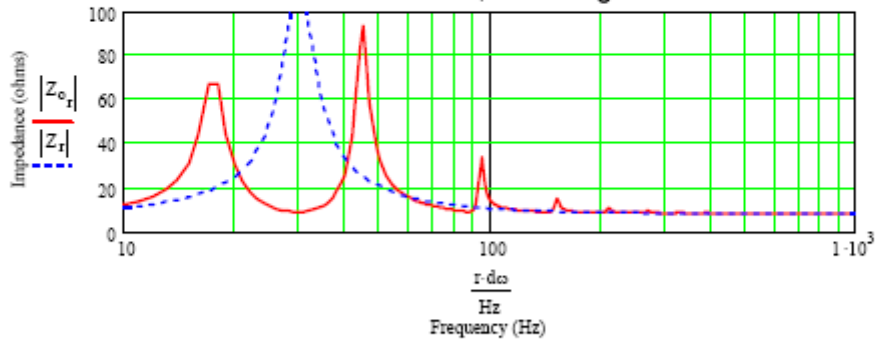
Az utolsó vizsgálat tárgya a különböző mennyiségű csillapítás hatása a TL átvitelére. A szimulált általános hangszóró most is az **A)** melléklet $Q_{ts} = 0.4$ oszlopa által megadott értékekkel bír. A TL első kétharmad hossza tartalmaz csillapítást, a további egyharmad hossz nincsen csillapítva. A D1 ábra mutatja a rendszer szimulált viselkedését a zárt végre helyezett, csillapítatlan hangszóró esetén. A D2, D3, D4 és D5 ábrák ugyanezen geometria átvitelét ábrázolják rendre 4, 8, 12, illetve 16 g/liter (0.25 lb/ft^3 , 0.5 lb/ft^3 , 0.75 lb/ft^3 , 1.0 lb/ft^3) csillapítás esetén. Néhány érdekes megfigyelés az ábrák alapján:

1. A csillapítás növelésével csökken a hullámosság, de egyidejűleg növekszik az alsó határfrekvencia.
2. A kétpúpú impedanciagörbe (felső grafikon, vörös görbe) a csillapítatlan TL sajátossága, tehát csillapítással elnyomható. Pontosabban a csillapítás növelése hatására az első púp erősen csökken, és egészen kisimul, annyira, hogy az impedancia görbe egypúpúnak tűnik.
3. A hangolási frekvencia alatt a hangnyomás 24 dB/oktáv meredekséggel esik, ez nyilvánvaló a csillapítatlan TL hangnyomásgörbéje alapján (középső grafikon, vörös görbe), csillapítás hatására a lefutás lankásodik. Az átmenet simítottabb az átmeneti és a valós 24 dB/oktávú esés között.

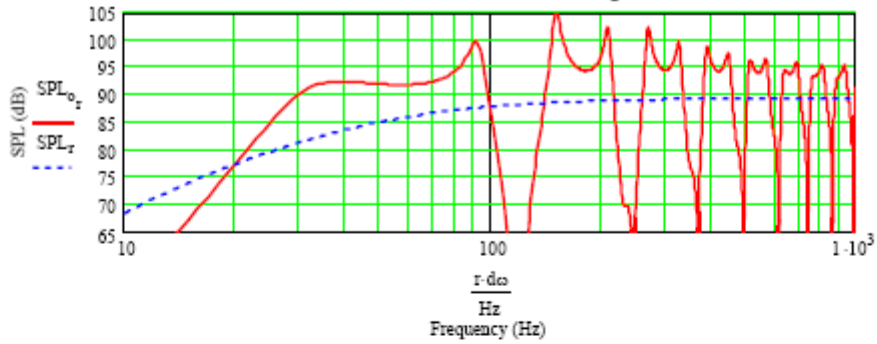
A második és a harmadik megjegyzés a kiindulópontja az ismétlődő vitának különböző DIY fórumokon. Purista érv, hogy a klasszikus csillapított TL viselkedése hasonló a kritikusan csillapított zárt doboz viselkedéséhez, ahol $Q_{tc}=0,5$. Az összekapcsoló láncszem az egypúpú impedanciagörbe, és a lankás (~12 dB/oktáv) hangnyomáscsökkenés a hangolási frekvencia környékén. Remélhetőleg ezen melléklet ábrái demonstrálják a TL természetes kétpúpú impedanciagörbét, és a csillapítás hatását az impedanciamenetre, és hangnyomásgörbére.

D-1 : Általános hangszóró állandó keresztmetszetű TL-ben
csillapítás: 0 g/liter

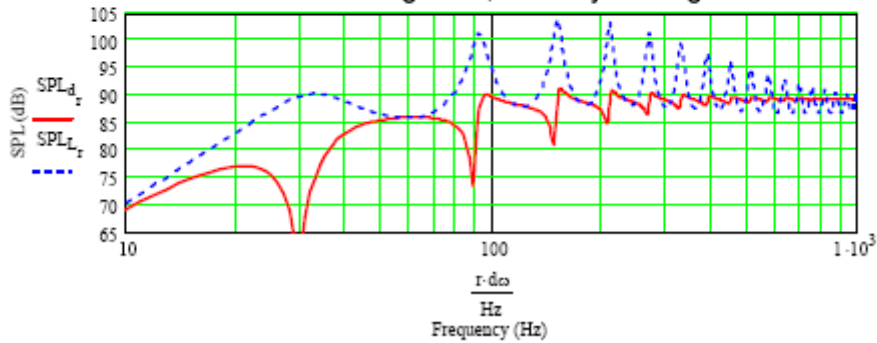
TL rendszeren és végtelen hangfalon mért impedancia
Vörös - TL rendszer, Kék - végtelen fal



A TL távolról mért hangnyomásgörbéje
Vörös - TL rendszer, Kék - végtelen fal

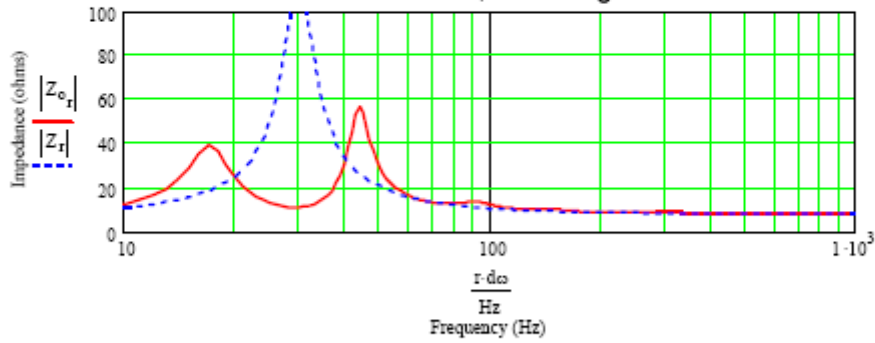


A hangszóró és a nyitott vég távolról mért hangnyomásgörbéje
Vörös - hangszóró, Kék - nyitott vég

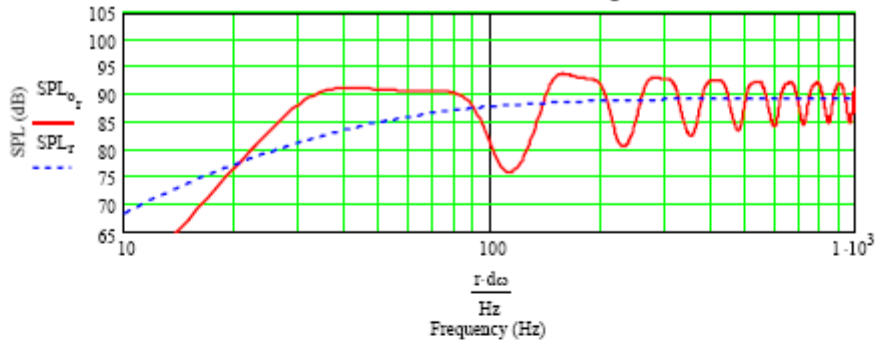


D-2 : Általános hangszóró állandó keresztmetszetű TL-ben
csillapítás: 4 g/liter

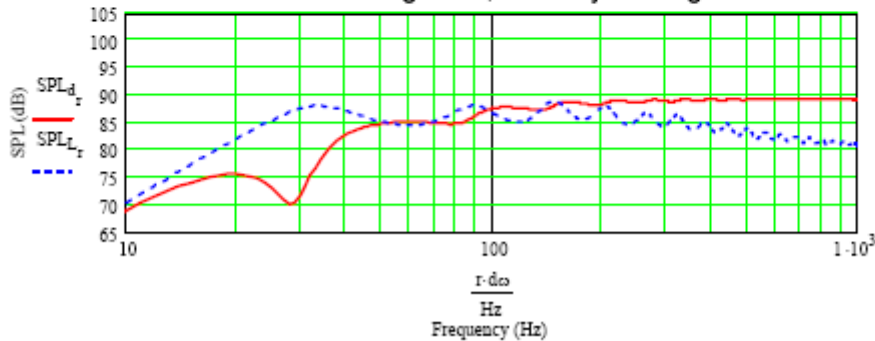
TL rendszeren és végtelen hangfalon mért impedancia
Vörös - TL rendszer, Kék - végtelen fal



A TL távolról mért hangnyomásgörbéje
Vörös - TL rendszer, Kék - végtelen fal

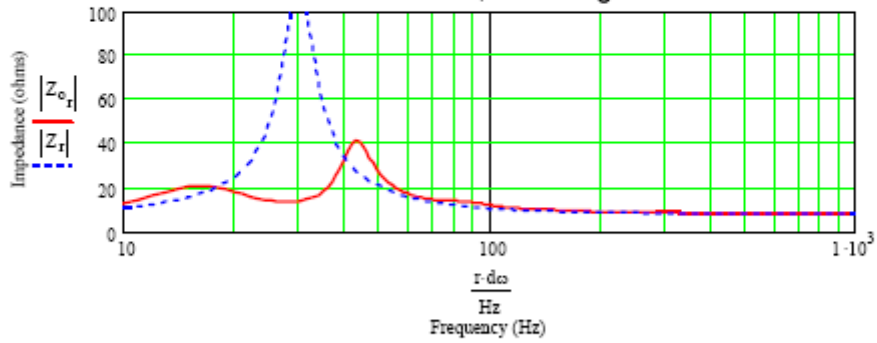


A hangszóró és a nyitott vég távolról mérhető hangnyomásgörbéje
Vörös - hangszóró, Kék - nyitott vég

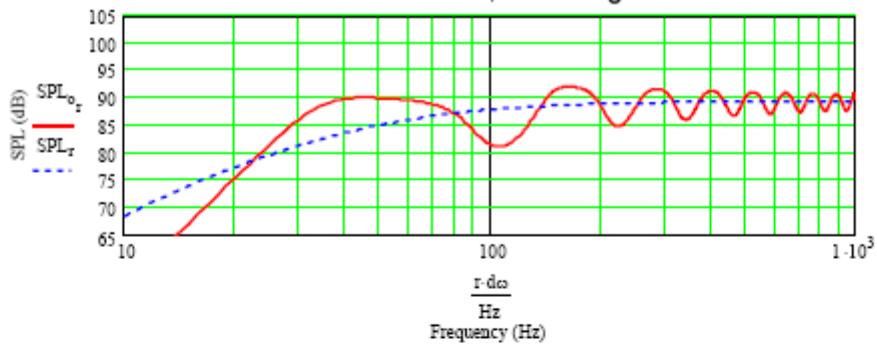


D-3 : Általános hangszóró állandó keresztmetszetű TL-ben
csillapítás: 8 g/liter

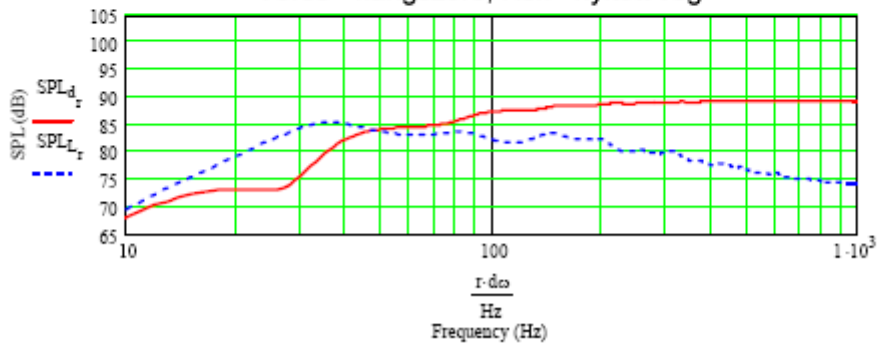
TL rendszeren és végtelen hangfalon mért impedancia
Vörös - TL rendszer, Kék - végtelen fal



A TL távolról mért hangnyomásgörbéje
Vörös - TL rendszer, Kék - végtelen fal

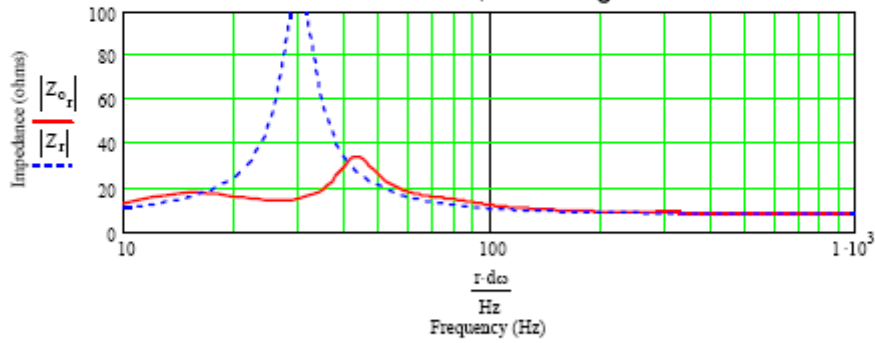


A hangszóró és a nyitott vég távolról mért hangnyomásgörbéje
Vörös - hangszóró, Kék - nyitott vég

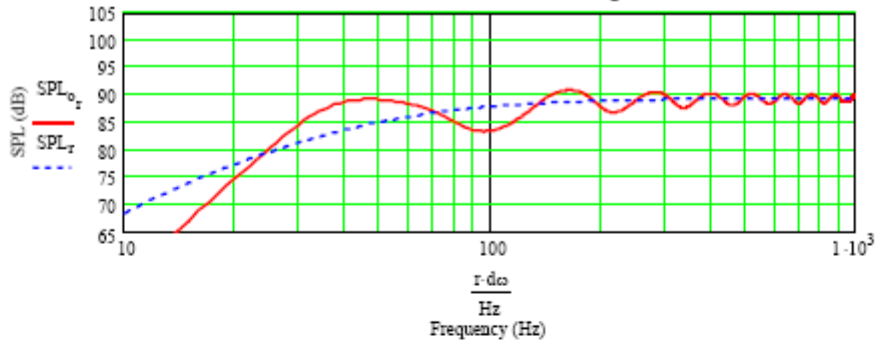


D-4 : Általános hangszóró állandó keresztmetszetű TL-ben
csillapítás: 12 g/liter

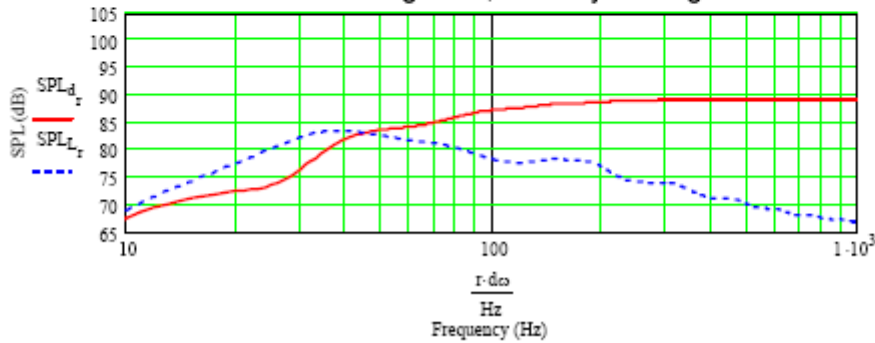
TL rendszeren és végtelen hangfalon mért impedancia
Vörös - TL rendszer, Kék - végtelen fal



A TL távolról mért hangnyomásgörbéje
Vörös - TL rendszer, Kék - végtelen fal

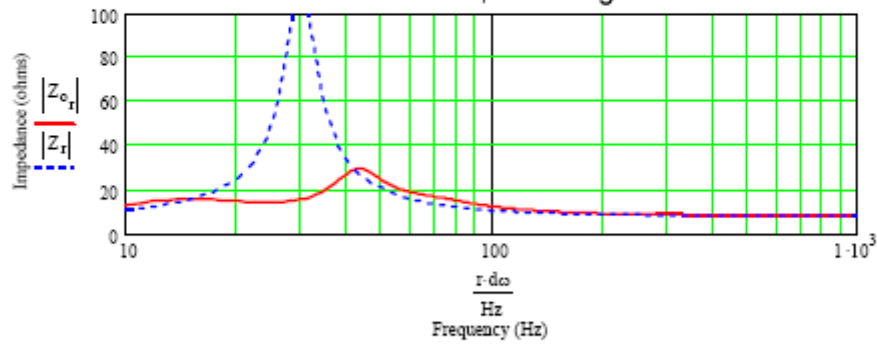


A hangszóró és a nyitott vég távolról mért hangnyomásgörbéje
Vörös - hangszóró, Kék - nyitott vég

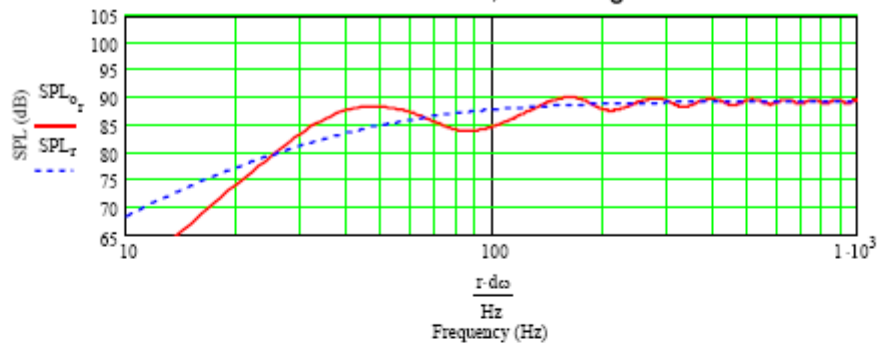


D-5 : Általános hangszóró állandó keresztmetszetű TL-ben
csillapítás: 16 g/liter

TL rendszeren és végtelen hangfalon mért impedancia
Vörös - TL rendszer, Kék - végtelen fal



A TL távolról mért hangnyomásgörbéje
Vörös - TL rendszer, Kék - végtelen fal



A hangszóró és a nyitott vég távolról mért hangnyomásgörbéje
Vörös - hangszóró, Kék - nyitott vég

