

# TEÓRIA A ZÁKLADY KONŠTRUKCIE ZVUKOVODOV

## ÚVOD

Zvukovody sú zariadenia, ktoré slúžia na účelné vedenie zvuku. Zvukovody konštantného prierezu sa používajú v akustickej meracej technike na meranie akustickej impedancie a pohltivosti rôznych akustických materiálov (Kundtove trubice). Úlohou zvukovodov plynule premenlivého prierezu je obyčajne výkonovo prispôbiť akustický zdroj na prostredie.

Steny zvukovodov sú pevné, aby svojim kmitaním nevyvolávali parazitné zvukové pole. Stena zvukovodu býva buď rotačne symetrická okolo osi zvukovodu, takže pričný prierez je kruhový, alebo je pričný prierez štvorhranný (hlavne u väčších zvukovodov pre nízke kmitočty, kde by realizácia symetrického rotačného telesa vzhľadom na veľké rozmery bola obtiažna). Os zvukovodu býva obyčajne priama, avšak v mnohých špeciálnych realizáciách zvukovodov sa hlavne kvôli ušetreniu miesta os zvukovodu jednoducho alebo niekoľkonásobne stáča.

Použitie zvukovodov na zlepšenie vysielania zvuku vyplýva z poznania vlastností akustických zdrojov a z determinovania príčin, ktoré znižujú efektívnosť vysielania zvuku hlavne pri nízkych kmitočtoch. Hlavnou príčinou nízkej efektívnosti vysielania zvuku pri nízkych kmitočtoch je skutočnosť, že akustický vysielateľ vysiela guľovú zvukovú vlnu, pre ktorú je charakteristický pokles hladiny akustického tlaku a intenzity so zvyšujúcou sa vzdialenosťou od zdroja. Tento pokles je zapríčinený tým, že zdrojom dodávaný akustický výkon sa okolitému prostrediu v smere od zdroja odovzdáva cez vždy väčšiu a väčšiu plochu.

Pokles akustickej intenzity zvukovej vlny so zväčšujúcou sa vzdialenosťou od zdroja je daný vzťahom:

$$I_A(x) = \frac{P_A}{S(x)} \quad [\text{Wm}^{-2}] \quad (1)$$

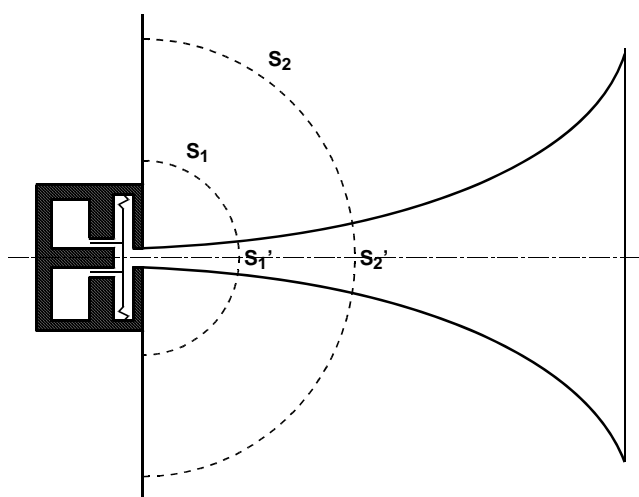
v ktorom:

- $P_A$  [W] je konštantný akustický výkon, dodávaný akustickým zdrojom;  
 $S(x)$  [ $\text{m}^2$ ] je plocha, cez ktorú je akustický výkon odovzdávaný do prostredia (v prípade guľovej zvukovej vlny je  $S(x) = 4\pi x^2$ );  
 $x$  [m] je vzdialenosť od akustického vysielateľa a  
 $I_A(x)$  [ $\text{Wm}^{-2}$ ] je akustická intenzita zvukovej vlny vo vzdialenosti  $x$  od zdroja.

Podobne, pre akustický tlak v akustickom poli zdroja guľovej zvukovej vlny bude platiť:

$$p_A(x) \approx \text{konšt} \cdot \sqrt{I_A(x)} = \text{konšt} \cdot \sqrt{\frac{P_A}{S(x)}} \quad [\text{Pa}] \quad (2)$$

Vzťahy (1) a (2) dokazujú, že akustický tlak a akustická intenzita klesajú s rastúcou veľkosťou plochy, cez ktorú akustický vysielač odovzdáva svoj výkon do okolia<sup>1</sup>. Ak ale pripojíme akustický zdroj na vstup zvukovodu, akustické pole sa bude udržiavať v oblasti vymedzenej pevným plášťom zvukovodu a plocha  $S(x)$  sa bude meniť podľa zmien prierečného rezu zvukovodu (porovnaj plochy  $S_1$  a  $S_2$  s plochami  $S_1'$  a  $S_2'$  na obr. 1). Takým spôsobom dosiahneme, že akustický výkon zdroja, ktorý by sa v prípade úplného polpriestorového uhla rozprestrel do polgul'ových objemov, sa teraz sústreďí do objemu vnútri zvukovodu.



Obr. 1. Náčrtok zvukovodu

Ďalším faktorom, ktorý determinuje veľkosť vyžiareného akustického výkonu vysielača je jeho vyžarovacia impedancia, najmä jej rezistívna časť, rozhodujúca pre činnú zložku akustického výkonu. Zvukovod zaťažuje membránu akustického zdroja vyžarovacou impedanciou, ktorá má rezistívny charakter pri nižších frekvenciách ako membrána vo voľnom prostredí, pri ktorých tak dokáže vyžiariť väčší činný akustický výkon. Zvukovod pôsobí vlastne ako akustický transformátor, ktorý transformuje malú vyžarovaciu plochu akustického vysielača na veľkú vyžarovaciu plochu ústia zvukovodu bez toho, aby dochádzalo ku skresleniu zvuku vlastnými rezonanciami, ako je to napr. u klasickej veľkoplošnej kuželovej membrány.

Aby sa vo zvukovode nevyskytovali nehomogenity, v ktorých by mohlo dochádzať k nežiadúcim odrazom vlnenia späť ku zdroju, stúpanie prierezu zvukovodu musí byť pomalé a plynulé. Pritom je výhodné, ak prierez stúpa v blízkosti zdroja pomalšie, zatiaľ čo vo väčšej vzdialenosti od zdroja môže byť stúpanie prierezu rýchlejšie. V teórii zvukovodov je zavedený pojem "miery stúpania zvukovodu"  $\gamma$  ako pomer elementárnej zmeny plochy prierečného rezu  $S(x)$  k prierezu pôvodnému, čo možno vyjadriť vzťahom:

$$\gamma = \frac{1}{S(x)} \cdot \frac{dS(x)}{dx} = \frac{d \ln[S(x)]}{dx}$$

<sup>1</sup> Pri zdvojnásobení vzdialenosti dochádza k poklesu akustického tlaku a/intenzity o 6 dB.

Miera stúpania má pre rôzne typy zvukovodov rôznu hodnotu. Ak chceme, aby prierez stúpala spočiatku pomalšie a potom rýchlejšie, žiadame vlastne, aby  $\gamma = \text{konšt.}$  To vedie ku exponenciálnej zmene prierezu a teda k tzv. exponenciálnemu zvukovodu.

## VLNOVÁ ROVNICA ZVUKOVODU

Je to tzv. Websterova vlnová rovnica. Má tvar:

$$\frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = \gamma \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2}$$

## ROZDELENIE ZVUKOVODOV

Valcový zvukovod:  $S = S_0$

Kónický zvukovod:  $S = S_0 \cdot x$

Parabolický zvukovod:  $S = S_0 \cdot x^2$

Exponenciálny zvukovod:  $S = S_0 \cdot e^{gx}$

## VALCOVÝ ZVUKOVOD

Pre  $S = S_0$  je  $\gamma = 0$ , takže Websterova rovnica bude mať tvar:

$$\frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2}$$

Ako vidíme, je to vlnová rovnica rovinatej zvukovej vlny. Znamená to, že zvukové vlnenie, šíriace sa valcovým zvukovodom, je rovinným zvukovým vlnením.

## KÓNICKÝ ZVUKOVOD

Pre  $S = S_0 x$  je  $\gamma = \frac{1}{x}$  a Websterova rovnica bude mať tvar:

$$\frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 (\phi x)}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 (\phi x)}{\partial x^2}$$

Ako vidíme, je to vlnová rovnica guľovej zvukovej vlny. Znamená to, že zvukové vlnenie, šíriace sa kónickým zvukovodom, je guľovým zvukovým vlnením.

## EXPONENCIÁLNY ZVUKOVOD

U exponenciálneho zvukovodu pre zmenu prierezu pozdĺž osi zvukovodu platí:

$$S = S_0 \cdot e^{gx}$$

a miera stúpania bude:

$$\gamma = \frac{1}{S} \cdot \frac{\partial S}{\partial x} = \frac{1}{S_0 \cdot e^{gx}} \cdot g \cdot S_0 \cdot e^{gx} = g$$

## HRANIČNÁ FREKVENCIA EXPONENCIÁLNEHO ZVUKOVODU

Akustická vstupná impedancia exponenciálneho zvukovodu:

$$Z_{A0} = \frac{c\rho}{S_0} \cdot (A + jB)$$

kde:

$$A = \sqrt{1 - \left(\frac{gc}{2\omega}\right)^2}$$

$$B = \frac{gc}{2\omega}$$

Akustická impedancia na vstupe zvukovodu má nenulovú reálnu zložku počnúc kmitočtom:

$$f_0 = \frac{gc}{4\pi}$$

čo tiež znamená, že:

$$g = \frac{4\pi f_0}{c} = \frac{2\omega_0}{c} = 2k_0$$

kde  $k_0$  je hraničné vlnové číslo zvukovodu, pre ktoré platí:

$$k_0 = \frac{\omega_0}{c} = \frac{2\pi f_0}{c} = \frac{2\pi}{\lambda_0}$$

a  $\lambda_0$  je hraničná vlnová dĺžka zvukovodu, daná vzťahom:

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_0}$$

Fyzikálne to znamená, že zvukové vlnenie s menšími frekvenciami ako  $f_0$  sa zvukovodom neprenáša. Pre tieto frekvencie je totiž vstupná impedancia čisto imaginárna.

Frekvencii  $f_0$  sa preto hovorí "hraničná frekvencia" exponenciálneho zvukovodu. Pri návrhu zvukovodov sa musí uvedená skutočnosť rešpektovať. Reprodukotor nesmie v oblasti pod hraničnou frekvenciou dostávať elektrický príkon, pretože ho nemôže ďalej odovzdávať do zvukovodu, ktorý v tejto frekvenčnej oblasti nepracuje. Ináč by mohlo dôjsť k zničeniu, prípadne poškodeniu mechanického systému reproduktora.

## KONŠTRUKČNÝ VÝPOČET EXPONENCIÁLNEHO ZVUKOVODU

Pri návrhu a konštrukčnom výpočte exponenciálneho zvukovodu vychádzame obyčajne zo šírky frekvenčného pásma, ktorú má zvukovod prenášať, a z plochy priečného rezu vstupného otvoru (hrdla) zvukovodu. Z požadovanej šírky frekvenčného pásma je pre návrh dôležitá dolná medzná frekvencia  $f_d$ , ktorá musí byť umiestnená vyššie ako hraničná frekvencia zvukovodu  $f_0$ . Z týchto vstupných požiadaviek sa potom určujú geometrické rozmery zvukovodu, a to jeho dĺžka a plocha prierezu jeho výstupného otvoru (ústia).

Aby sa dolná medzná frekvencia zvukovodom efektívne prenášala, musíme  $f_0$  zvoliť tak, aby  $f_d$  bola niekoľkokrát väčšia ako  $f_0$ . Tým zabezpečíme, že pri  $f_d$  už bude reálna zložka akustickej vyžarovacej impedancie ustálená (blízka k svojej limitnej hodnote) a prenos kmitočtov v blízkych  $f_d$  bude už dostatočne účinný. V praxi sa podľa plánovaného zvukovodu použitia volí pomer (pozri tab.1):

$$\alpha = \frac{f_d}{f_0} = 1,2 \div 4$$

Čím je tento pomer väčší, tým je situácia priaznivejšia a zvukovod môže byť kvalitnejší. Ku kompromisu nás však obyčajne budú tlačiť ekonomické kritériá, súvisiace s rozmermi zvukovodu, ktoré budú tým väčšie, čím menšia bude požadovaná dolná medzná frekvencia a čím väčší bude požadovaný pomer  $\alpha$ .

Tab.1

Použitie zvukovodu	$\alpha$
Vysokotónový reproduktor pre kiná	2÷4
Nízkotónový reproduktor pre kiná	1,2÷1,8
Vysokotónová časť koaxiálnych reproduktorov	2
Tlakové reproduktory pre miestny rozhlas	1,4

Ak máme zvolené  $\alpha$  a poznáme tak  $f_0$ , môžeme určiť mieru stúpania prierezu:

$$g = \frac{4\pi f_0}{c} = \frac{4\pi f_d}{\alpha c}$$

Teraz už môžeme nakresliť priebeh stúpania prierezu, príp. polomeru prierezu v závislosti od  $x$ . Pritom platia rovnice:

$$S = S_0 \cdot e^{gx} = S_0 \cdot e^{2k_0x} = S_0 \cdot e^{\frac{4\pi f_0}{c}x} = S_0 \cdot e^{\frac{4\pi}{\lambda_0}x}$$

$$R = R_0 \cdot e^{gx} = R_0 \cdot e^{2k_0x} = R_0 \cdot e^{\frac{4\pi f_0}{c}x} = R_0 \cdot e^{\frac{4\pi}{\lambda_0}x}$$

Výstupný polomer stanovíme z požiadavky, aby v mieste výstupného prierezu nastali minimálne odrazy. Dá sa odvodiť, že u exponenciálneho zvukovodu je v mieste výstupného prierezu pomer medzi postupujúcou a odrazenou zložkou akustického tlaku daný vzťahom:

$$\left| \frac{P_{A,p}}{P_{A,r}} \right| = \left| \frac{A+1-j\left(\frac{1}{kR_2}-B\right)}{A-1+j\left(\frac{1}{kR_2}-B\right)} \right|$$

Optimálne podmienky pre akustické vyžarovanie nastanú vtedy, ak imaginárne členy v tomto vzťahu vymiznú. To nastane vtedy, ak:

$$\frac{1}{kR_2} - B = 0$$

a po úprave

$$R_2 = \frac{2}{g} = \frac{\lambda_0}{2\pi} \Rightarrow 2\pi R_2 = \lambda_0$$

Ako vidíme, polomer výstupného prierezu dostaneme z podmienky, podľa ktorej obvod výstupného prierezu by sa mal rovnať hraničnej vlnovej dĺžke  $\lambda_0$ .

Dĺžku zvukovodu určíme z rovnice:

$$S_2 = S_0 \cdot e^{gL} = S_0 \cdot e^{2k_0L}$$

odkiaľ:

$$L = \frac{1}{g} \ln\left(\frac{S_2}{S_0}\right) = \frac{1}{k_0} \ln\left(\frac{R_2}{R_0}\right) = R_2 \ln\left(\frac{R_2}{R_0}\right) = \frac{\lambda_0}{2\pi} \ln\left(\frac{\lambda_0}{2\pi R_0}\right)$$

Tým je vlastne výpočet exponenciálneho zvukovodu vykonaný. Ak sa realizuje zvukovod s nekruhovým prierezom, musí sa výpočet vykonať pre kruhový prierez a ten sa prepočíta na ekvivalentný prierez iného typu.

## PRÍKLAD 1

Chceme navrhnúť zvukovod pre stredopásmový tlakový reproduktor, ktorý by mal prenášať zvukové vlnenie počnúc frekvenciou  $f_d = 300 \text{ Hz}$  a jeho vstupný otvor by mal mať polomer  $R_0 = 0,9 \text{ cm}$ .

Zvolíme  $\alpha=1.5$ , takže hraničná frekvencia zvukovodu bude:

$$f_0 = \frac{f_d}{\alpha} = \frac{300}{1.5} = 200 \text{ Hz}$$

a hraničná vlnová dĺžka:

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_0} = \frac{344}{200} = 1.72 \text{ m}$$

Vypočítame mieru stúpania prierezu:

$$g = \frac{4\pi f_0}{c} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 200}{344} \doteq 7.306 \text{ m}^{-1}$$

Polomer výstupného prierezu:

$$R_2 = \frac{2}{g} = \frac{\lambda_0}{2\pi} \doteq 0.274 \text{ m}$$

Požadovaná dĺžka zvukovodu bude:

$$l = R_2 \ln\left(\frac{R_2}{R_0}\right) = 0.274 \cdot \ln\left(\frac{0.274}{0,009}\right) = 0.935 \text{ m}$$

## Simulácia zvukovodu v programe AkAbak:

Skript (makromodel Horn)

System 'S1'

Horn 'Ho1' Node=1

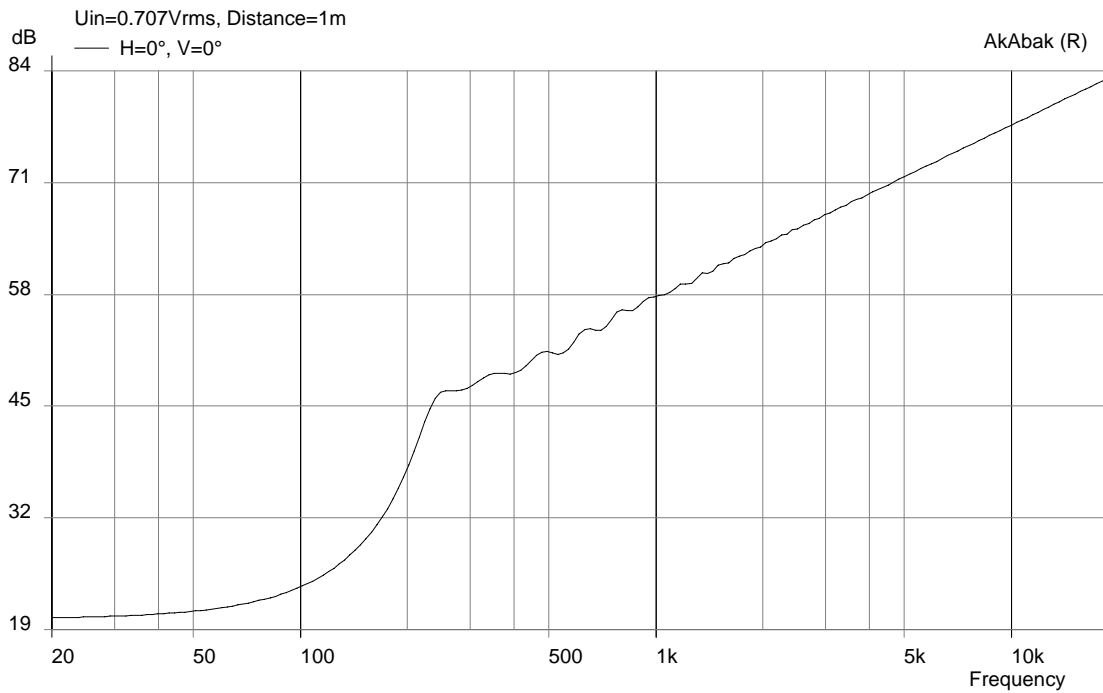
dTh=1.8cm dMo=52.8cm

Len=0.935m T=1

x=0 y=0 z=0 HAngle=0 VAngle=0

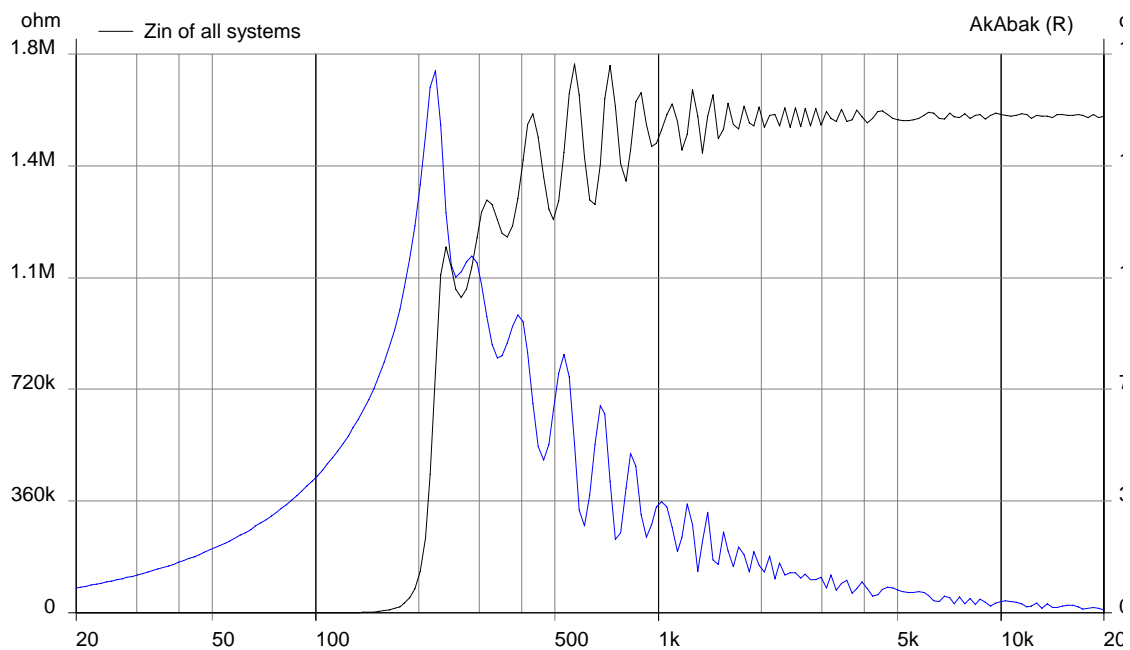
Akustický tlak na výstupe zvukovodu

3. Sound Pressure of SCRIPT1, Lp (Phase)



Akustická impedancia na vstupe zvukovodu:

5. Total Input Impedance of SCRIPT1, Real



## PRÍKLAD 2

Chceme navrhnúť zvukovod pre nízkotónový elektrodynamický reproduktor, ktorý by mal prenášať zvukové vlnenie počnúc frekvenciou  $f_d = 66 \text{ Hz}$  a jeho vstupný otvor by mal mať polomer  $R_0 = 17 \text{ cm}$ .

Zvolíme  $\alpha=1.2$ , takže hraničná frekvencia zvukovodu bude:

$$f_0 = \frac{f_d}{\alpha} = \frac{66}{1.2} = 55 \text{ Hz}$$

a hraničná vlnová dĺžka:

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_0} = \frac{344}{55} = 6.255 \text{ m}$$

Vypočítame mieru stúpania prierezu:

$$g = \frac{4\pi f_0}{c} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 55}{344} \doteq 2.009 \text{ m}^{-1}$$

Polomer výstupného prierezu:

$$R_2 = \frac{2}{g} = \frac{\lambda_0}{2\pi} \doteq 1 \text{ m}$$

Požadovaná dĺžka zvukovodu bude:

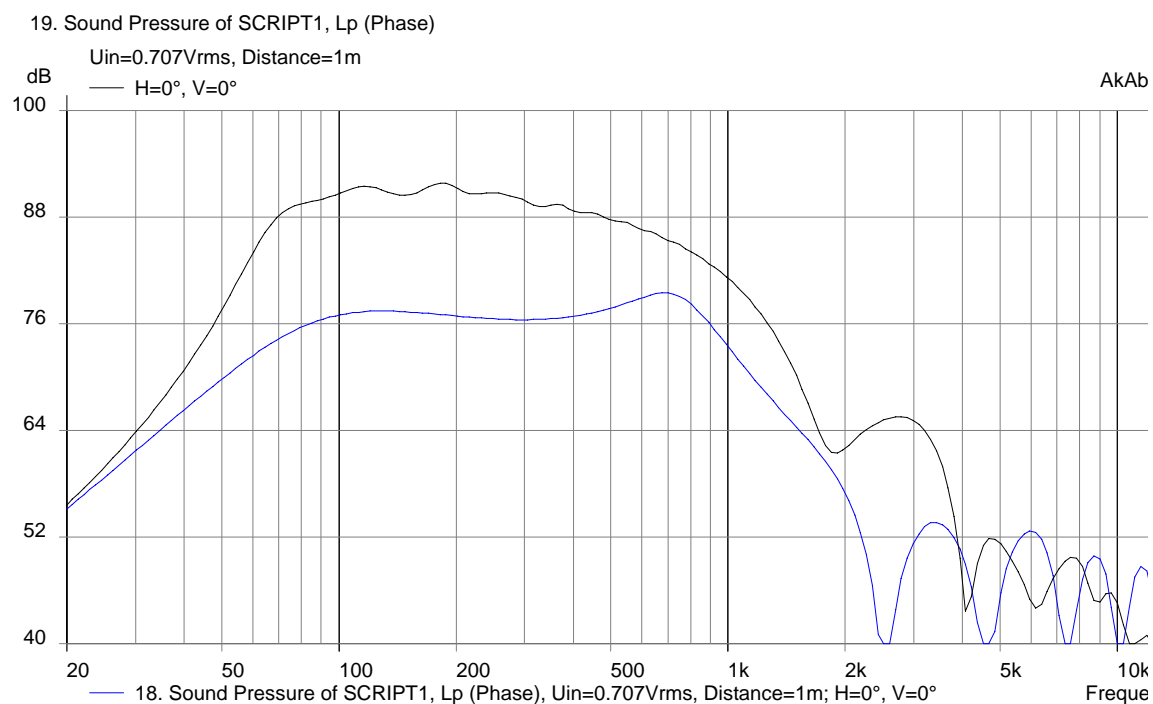
$$l = R_2 \ln\left(\frac{R_2}{R_0}\right) = 1 \cdot \ln\left(\frac{1}{0.17}\right) = 1.77 \text{ m}$$

Skript programu AkAbak

```
Def_Driver 'CD22RN4X-H1192'  
SD=230cm2 dD1=8cm tD1=6cm |Cone  
fs=20Hz Vas=108L Qms=3.28  
Qes=0.26 Re=6.1ohm Le=3.47mH ExpoLe=0.628  
  
System 'S1'  
Driver 'D1' Def='CD22RN4X-H1192' Node=1=0=2=3  
Enclosure 'E1' Node=3  
Vb=11L Qb/fo=0.1 Sb=400cm2  
Horn 'Ho1' Node=2  
dTh=34cm dMo=2m  
Vf=1L Len=1.77m T=1  
x=0 y=0 z=0 HAngle=0 VAngle=0  
  
off System 'S2'  
Driver 'D1' Def='CD22RN4X-H1192' Node=1=0=2=3  
Enclosure 'E1' Node=3  
Vb=11L Qb/fo=0.1 Sb=400cm2  
Radiator 'Rad1' Def='D1' Node=2  
x=0 y=0 z=0 HAngle=0 VAngle=0
```



Výstupný akustický tlak nízkotónového reproduktor, zaťaženého zvukovodom, je 10 až 15dB vyšší v porovnaní s akustickým tlakom reproduktora, vysielajúceho priamo do prostredia



## LITERATÚRA

- [1] Ducko, A.: Elektroakustika. ES SVŠT, Bratislava, 1983.
- [2] Merhaut, J.: Zvuková technika. ES ČVUT, Praha, 1983.