



## **Elektroakustika**

# **L09: Reproduktor v basreflexovej ozvučnici**

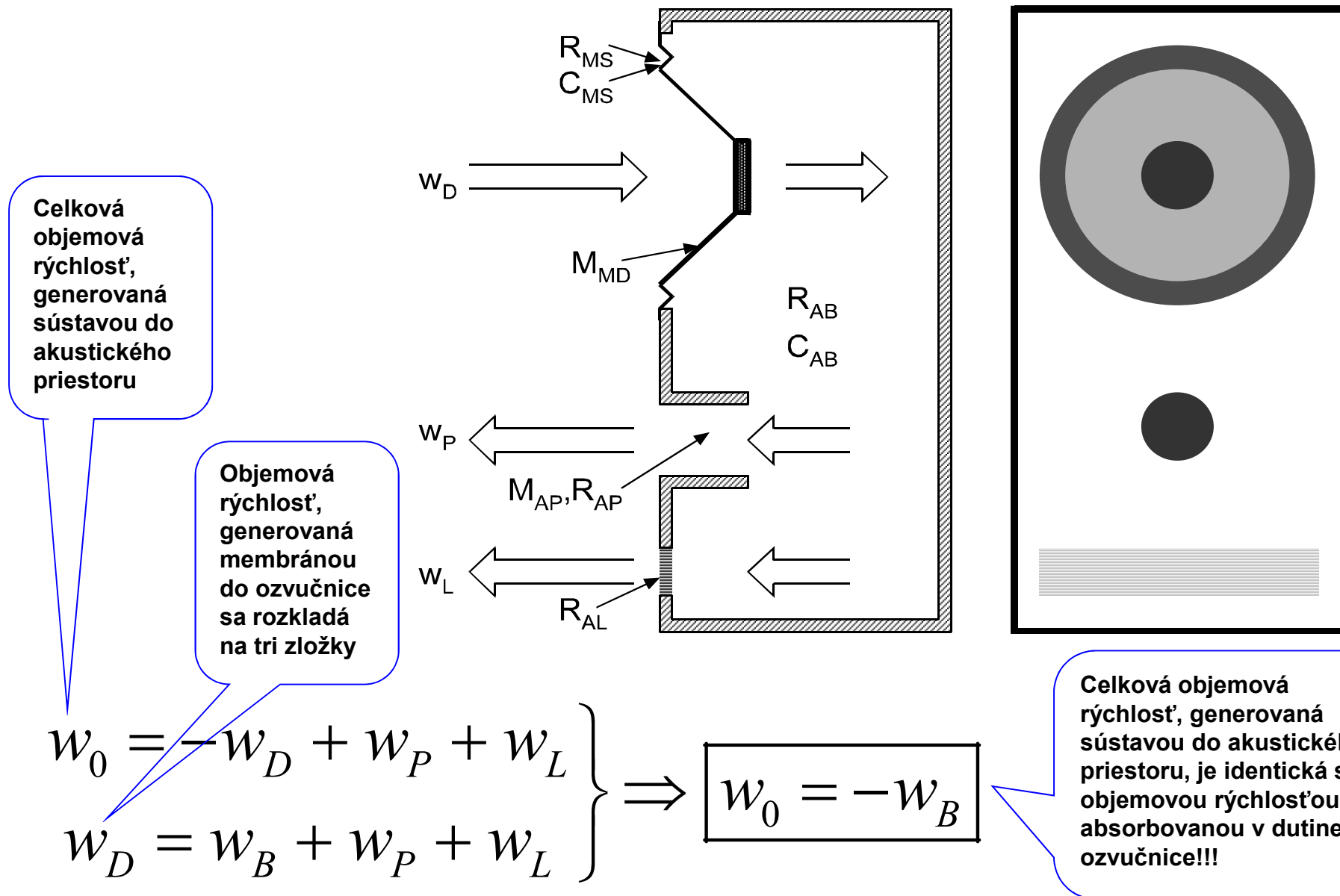
**doc. Ing. Jozef Juhár, PhD.**

**<http://voice.kemt.fei.tuke.sk>**

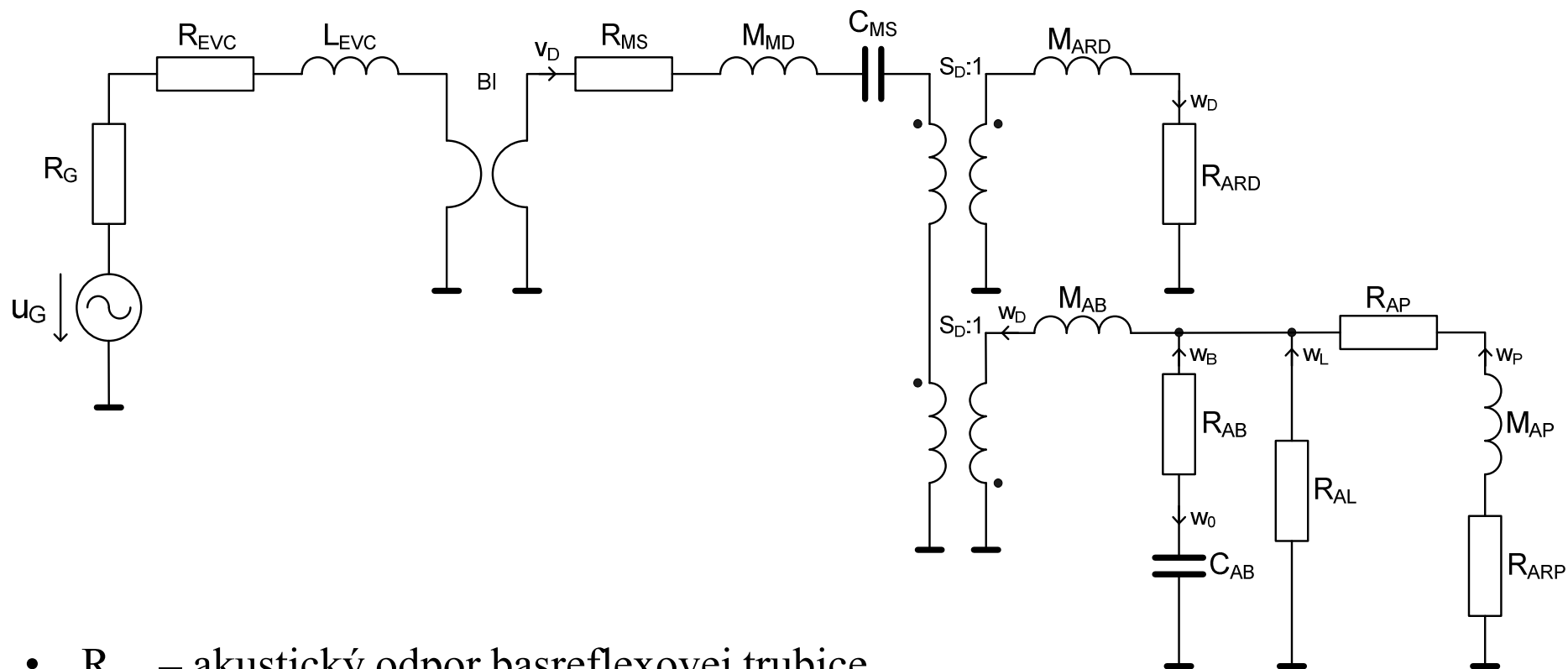
# Reproduktor v basreflexovej ozvučnici

- Je to sústava s dvoma zdrojmi zvuku:
  - aktívnym zdrojom zvuku je reproduktor, vysielajúci akustickú energiu prednou stranou membrány
  - pasívnym zdrojom zvuku je basreflexový otvor (port, vent), ktorým sa vysieľa časť akustickej energie zadnej strany membrány
- Basreflex môže byť realizovaný ako:
  - jednoduchý otvor v stene ozvučnice,
  - trubica, ktorá spája dutinu ozvučnice s vonkajším priestorom
- Pri vhodne zvolenom reproduktore a správne navrhnutej a skonštruovanej ozvučnici môže basreflexový otvor
  - zvýšením celkovej akustickej energie, vyžiarenej v okolí dolnej medznej frekvencie, výrazne prispieť k rozšíreniu prenášaného pásma smerom k nízkym frekvenciám
  - zároveň zmenšením výchylky reproduktora znížiť celkové nelineárne skreslenie reproduktora
- anglické termín na označenie basreflexovej ozvučnice
  - Vented Box Enclosure
  - Ported Box

# Náčrtok sústavy a objemové rýchlosti v akustickom poli



# Náhradná schéma sústavy VB (Vented Box)

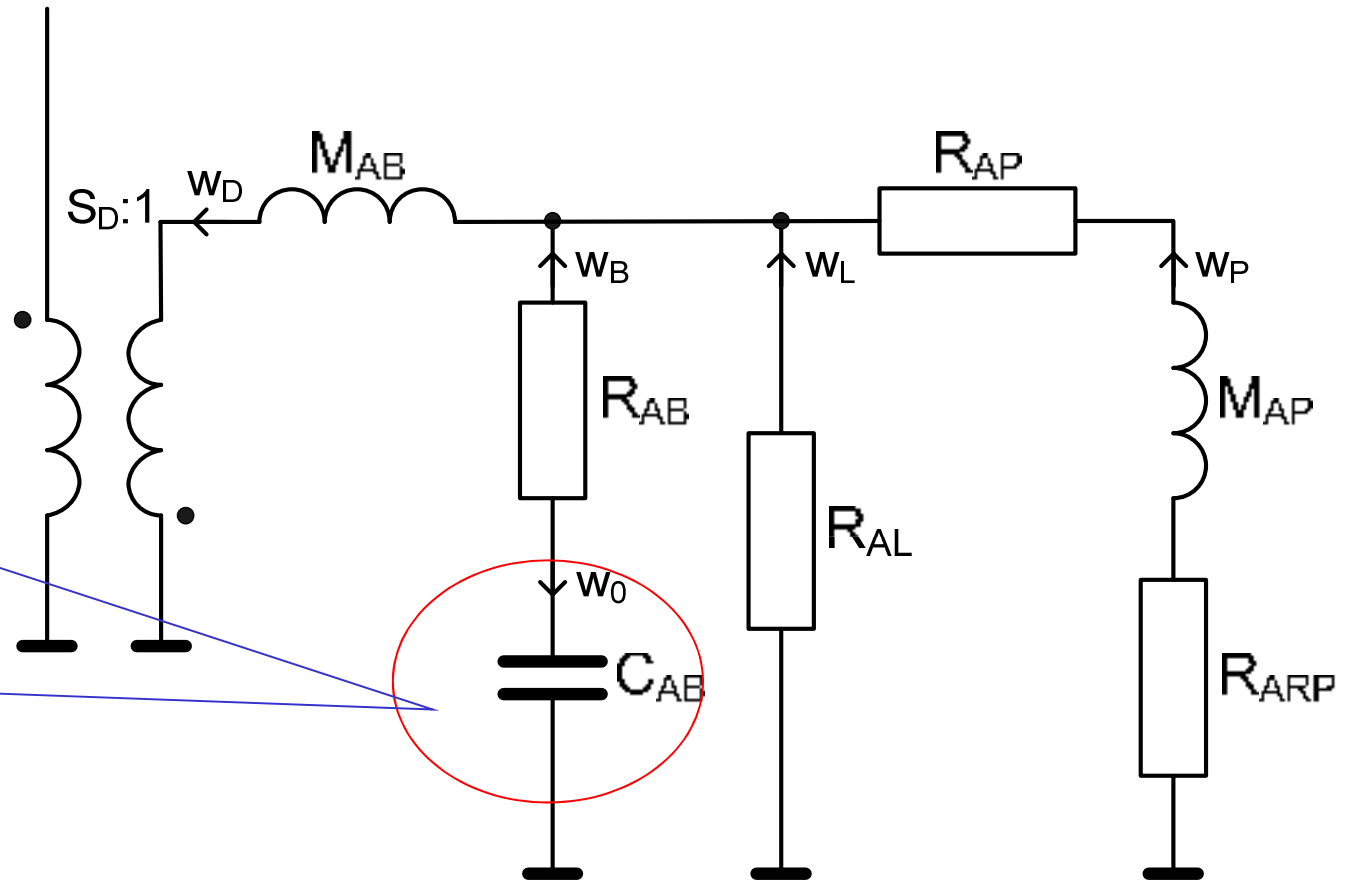


- $R_{AP}$  – akustický odpor basreflexovej trubice
- $M_{AP}$  – akustická hmotnosť basreflexovej trubice (vrátane koncových korekcií)
- $R_{ARP}$  – akustický vysielač odpor akustickej trubice
- akustická vysielač hmotnosť je súčasťou hmotnosti  $M_{AP}$



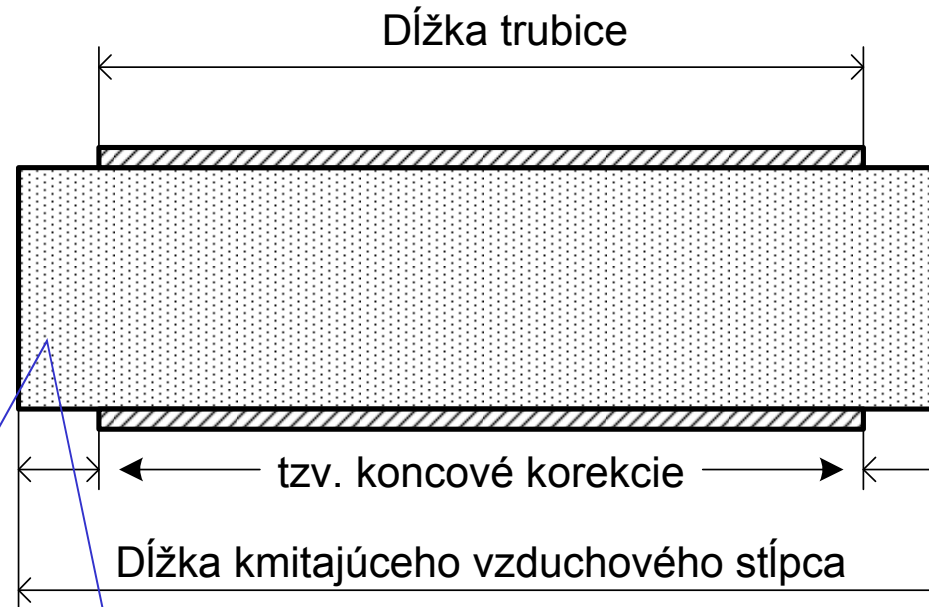
# Náhradná schéma ozvučnice (VB)

Objemová rýchlosť  $w_B$  je (až na fázu) rovnaká, ako objemová rýchlosť  $w_0$ , generovaná sústavou do priestoru. Dostaneme ju z náhradnej schémy.



$$M_{AP} = \frac{\rho_0}{S_P} \cdot \left( l_P + \frac{8d_P}{3\pi} \right) = \frac{\rho_0}{S_P} \cdot \left( l_P + \frac{4d_P}{3\pi} \right) + M_{ARP} \Rightarrow M_{ARP} = \frac{\rho_0}{S_P} \cdot \frac{4d_P}{3\pi}$$

# Akustická hmotnosť versus akustická vysielacia hmotnosť trubice



Ak cez akustickú trubicu prúdi do priestoru akustické vlnenie, trubica je zároveň akustickým vysielateľom - koniec trubice je považovaný za akustický vysielateľ typu „kmitajúci piest“ v nekonečnej ozvučnici, alebo voľne kmitajúci (závisí od spôsobu konštrukčného umiestnenia trubice). Vtedy je tzv. koncová korekcia považovaná za súčasť vysielacej impedancie – je to vlastne vysielacia hmotnosť trubice

## Skript - náhradná schéma s diskrétnymi prvkami

| Seas Prestige ER18RNX  
| Revc=5.9Ohms; Levc=0.67mH; Bl=7.2N/A;  
| Mmd=14g; Mmrd=0.92g;  
| Rms=2.2Ns/m; Cms=1.3mm/N; Sd=136cm<sup>2</sup>  
| Fs=37Hz; Qts=0.32; Qms=1.58; Qes=0.39; Vas=32lit.  
| ymax=6mm; sens=88.5dB; Pe(lt)=80W

### Def\_Const

```
{roh=1.18; c0=344; Sd=0.0136; Rd=sqrt(Sd/pi);  
Mard=(roh*8*Rd)/(3*pi*Sd);  
Vas=0.032; Qts=0.32;Fs=37;  
QL=10; alfa=2.5;h=1.25;  
Vab=Vas/alfa; Cab=Vab/(roh*c0^2);  
Fb=Fs*h;Lp=0.18;Rp=0.025;Sp=pi*Rp^2;  
Map=(roh/Sp)*(Lp+(16*Rp)/(3*pi));  
RaL=QL*sqrt(Map/Cab);  
}
```

\* diskretne prvky

### System 'S1-Discrete'

```
Resistor 'Rg' Node=1=2 R=0.001ohm  
Resistor 'Revc' Node=2=3 R=5.9ohm  
Coil 'Levc' Node=3=4 L=0.67mH  
  
Gyrator 'Gyl' Node=4=0=5=0 Bl=7.2Tm
```

MechResistance 'Rms' Node=5=6 Rm=2.2Ns/m

MechMass 'Mms' Node=6=7 Mm=15.84g

MechCompliance 'Cms' Node=7=8 Cm=1.3e-3m/N

Coupler 'front' Node=8=9=10

SD={Sd} |Piston

AcouMass 'Mard1' Node=10=11 Ma={Mard}

Impedance 'Rard' Node=11

$Z=\{(\text{roh} \cdot \omega^2)/(2 \cdot \pi \cdot c_0)\}$

Coupler 'back' Node=9=0=0=20

SD={Sd} |Piston

AcouMass 'Mab' Node=20=21 Ma={Mard}

AcouResistance 'Rab' Node=21=22 Ra=1Pas/m<sup>3</sup>

AcouCompliance 'Cab' Node=22=0 Ca={Cab}

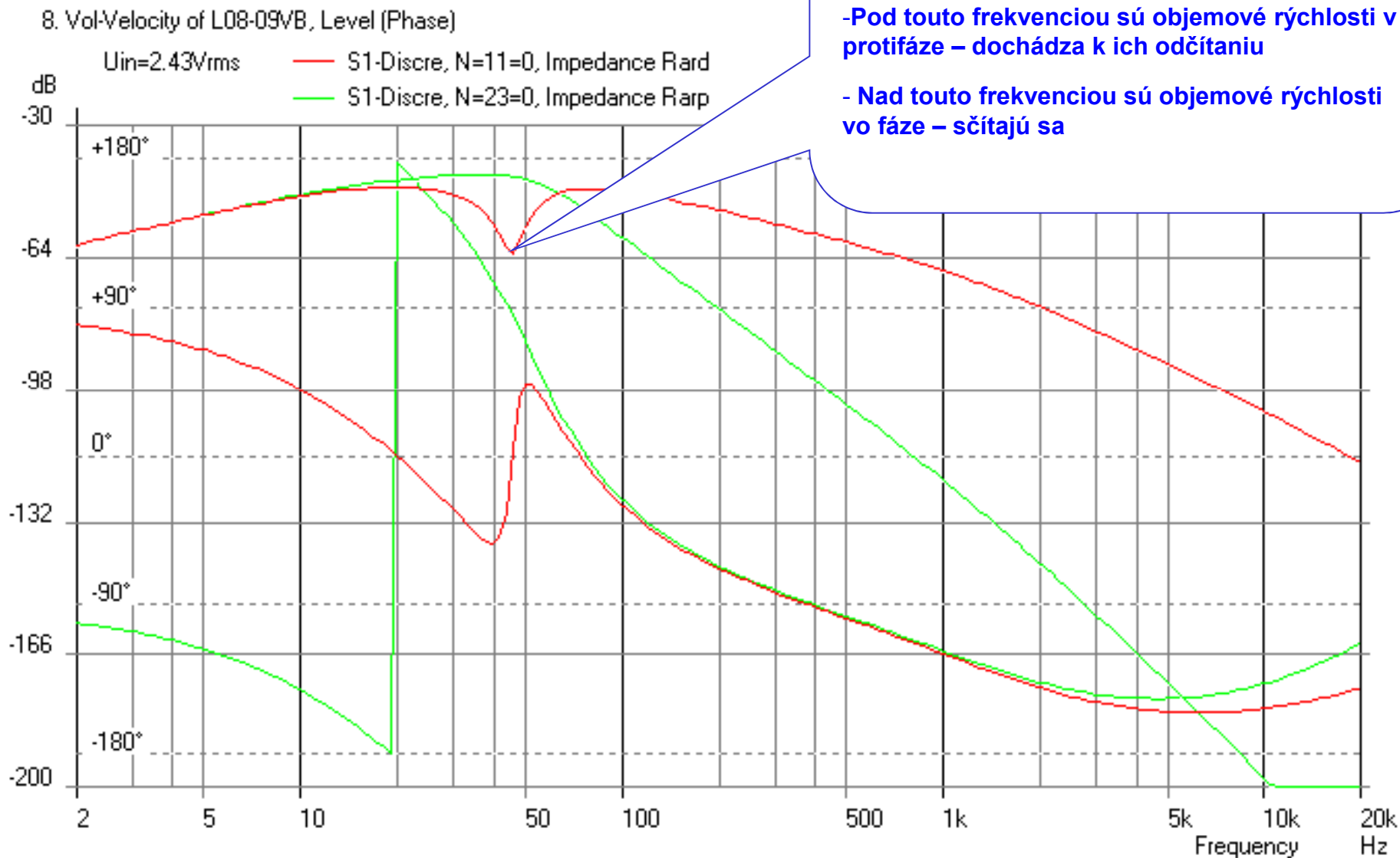
AcouResistance 'RaL' Node=21=0 Ra={RaL}

AcouMass 'Map' Node=21=23 Ma={Map}

Impedance 'Rarp' Node=23=0

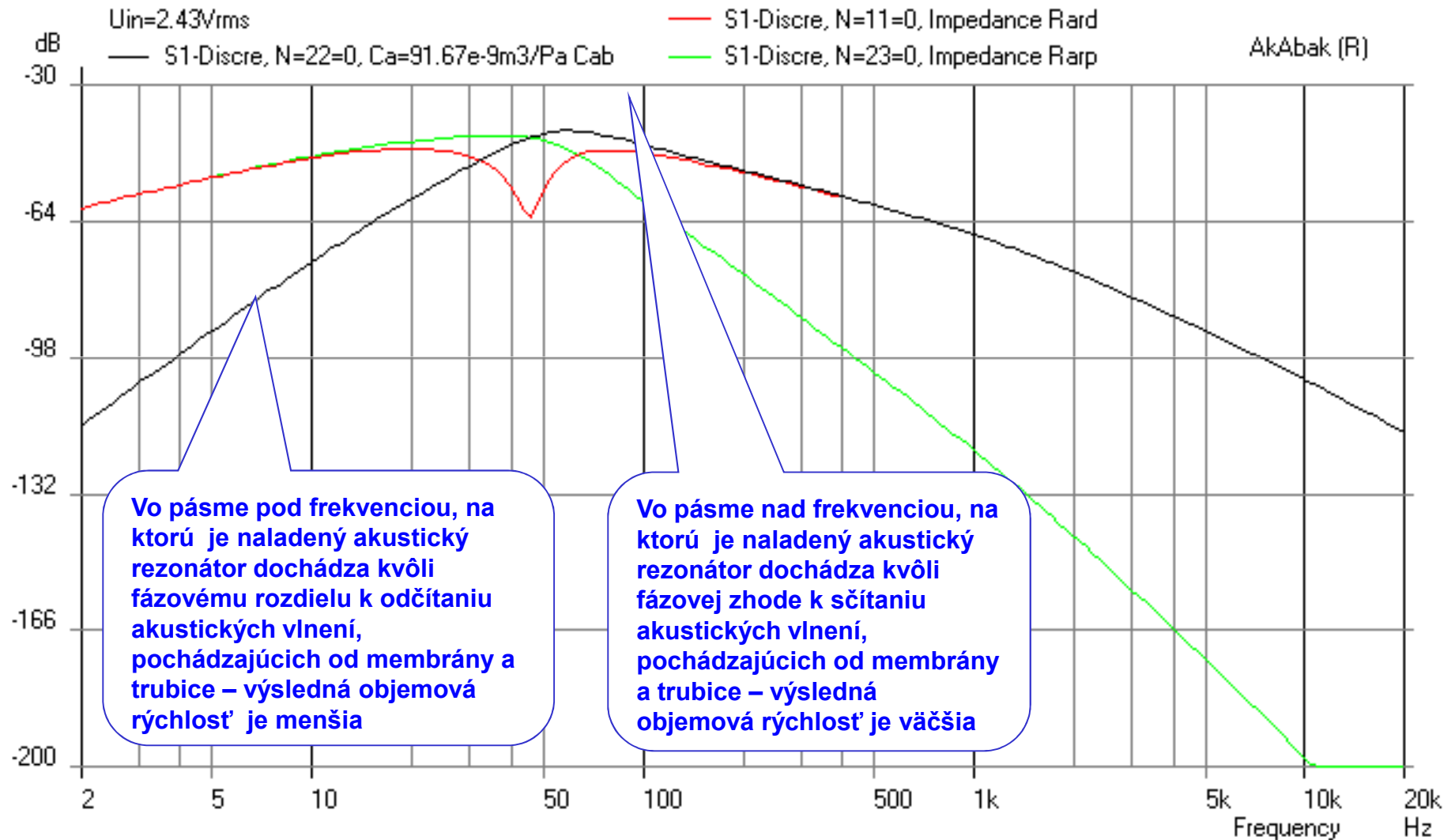
$Z=\{(\text{roh} \cdot \omega^2)/(2 \cdot \pi \cdot c_0)\}$

# Objemové rýchlosti $w_{AD}$ a $w_{AP}$

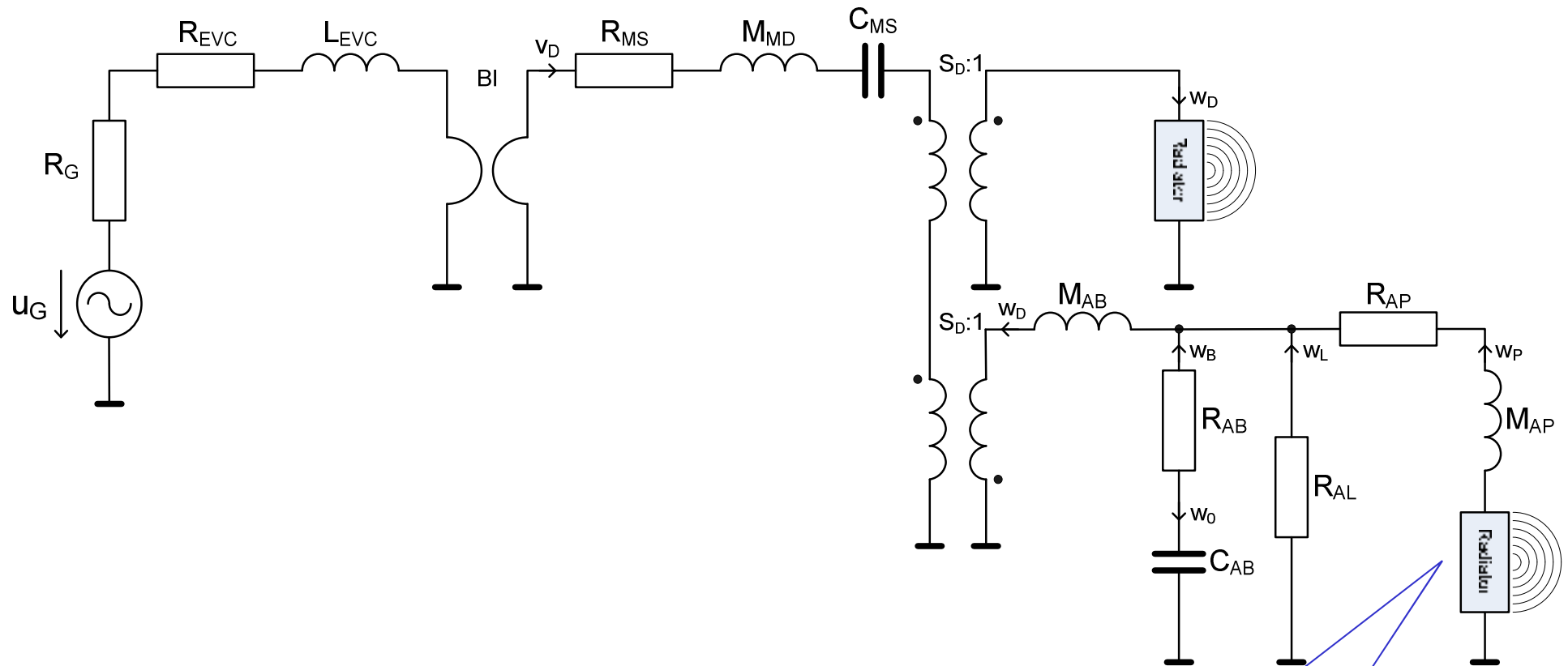


# Objemové rýchlosti $w_{AD}$ , $w_{AP}$ a $w_{AB}$

7. Vol-Velocity of L08-09VB, Level (Phase)



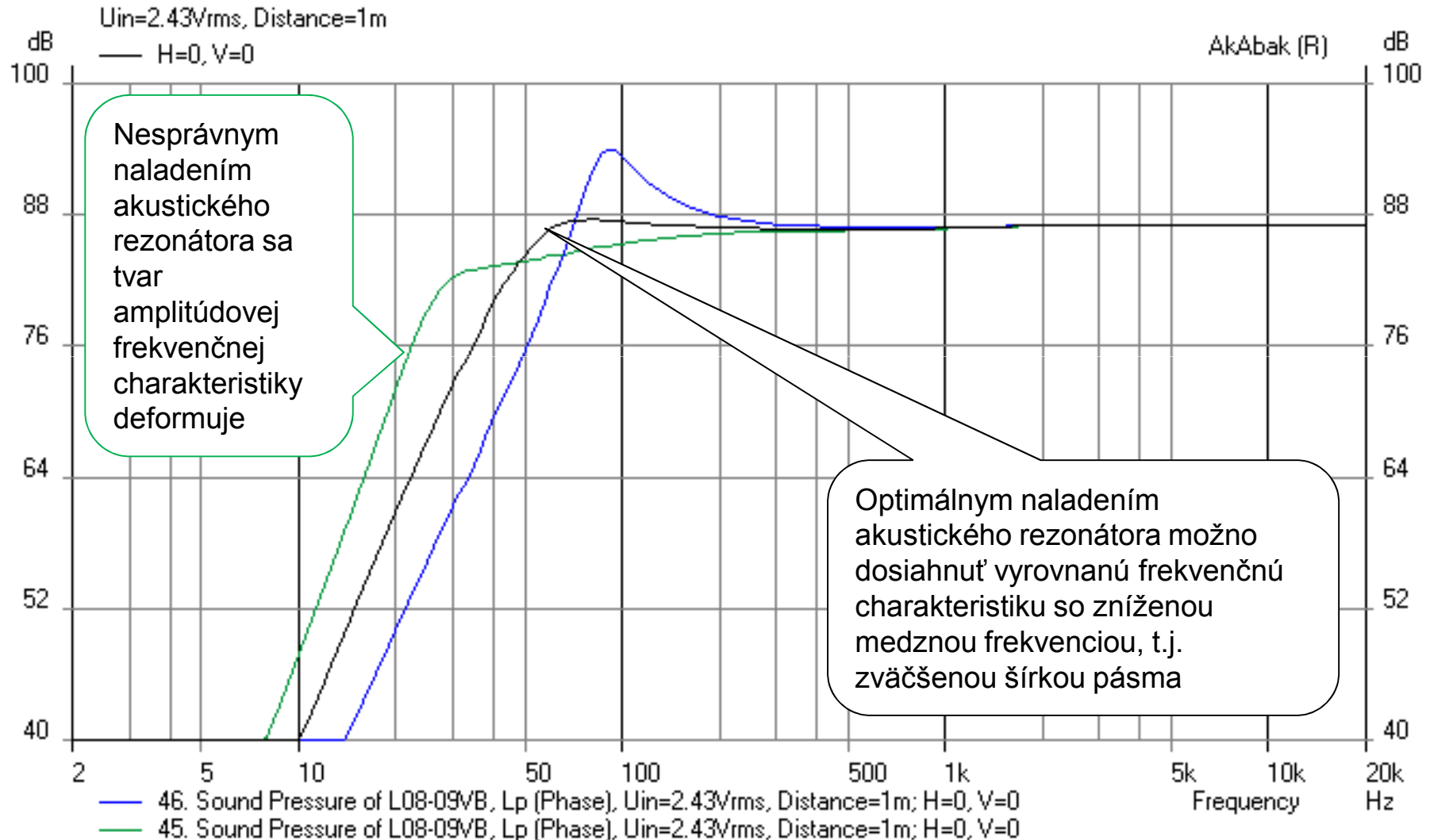
# Náhradná schéma sústavy VB, upravená pre simuláciu v programe AkAbak



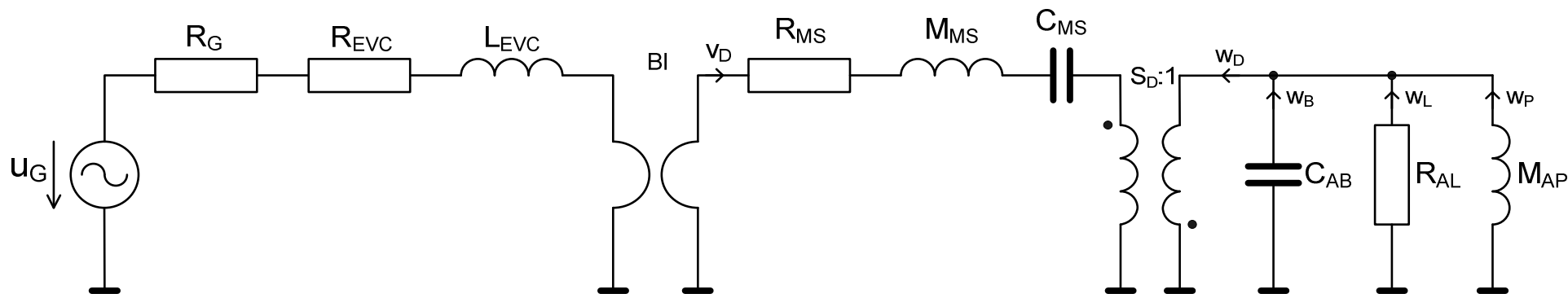
„Radiator“ „zabezpečí“  
vysielanie akustickej vlny z  
ústia (výstupu) basreflexovej  
trubice

# Rôzne „naladenie“ sústavy (VB)

44. Sound Pressure of L08-09VB, Lp (Phase)



## Upravená a zjednodušená náhradná schéma sústavy VB



Podstatou zjednodušenia náhradnej schémy je zlúčenie mechanickej hmotnosti kmitacieho systému reproduktora s vysielačimi hmotnosťami membrány a zanedbanie vplyvu stratových odporov skrinky a trubice a vysielačích odporov membrány a ústia trubice.

$$M_{ARD} = M_{AB} \quad \Rightarrow \quad M_{MS} = M_{MD} + (M_{ARD} + M_{AB}) S_D^2$$

$$R_{AB} = 0;$$

$$R_{AP} = 0;$$

$$R_{ARD} \rightarrow 0;$$

$$R_{ARP} \rightarrow 0$$



# TS parametre basreflexovej ozvučnice

Rezonančná frekvencia basreflexovej ozvučnice (tzv. Helmholtzovho rezonátora) závisí od akustickej poddajnosti dutiny skrinky a akustickej hmotnosti trubice.

rezonančná frekvencia: 
$$f_B = \frac{l}{2\pi\sqrt{M_{AP}C_{AB}}}$$

činiteľ kvality: 
$$Q_L = R_{AL}\sqrt{\frac{C_{AB}}{M_{AP}}}$$

Činiteľ kvality basreflexovej ozvučnice závisí najmä od akustického odporu, ktorý reprezentuje straty netesnosťami v konštrukcii ozvučnice. Je to v podstate „výrobný parameter“, pretože závisí v konečnom dôsledku od kvality výroby ozvučnice a kvality „pripevnenia“ reproduktora k ozvučnici.

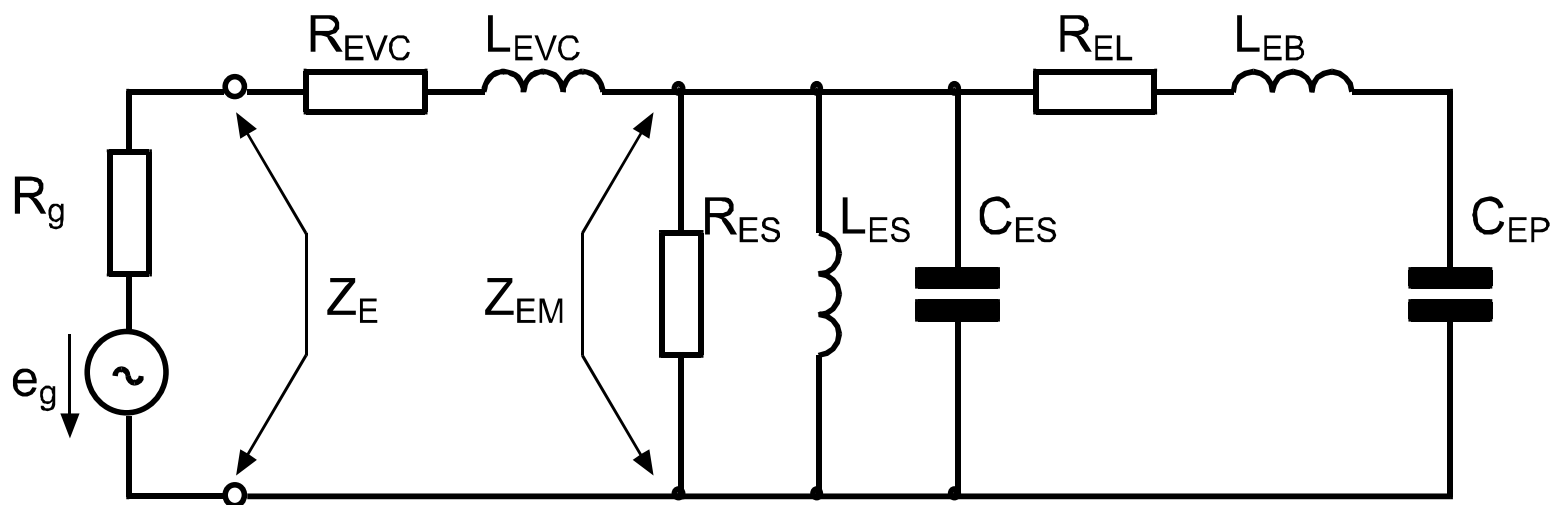
## Konštanty, používané pri návrhu sústavy VB

$$\alpha = \frac{C_{AS}}{C_{AB}} = \frac{V_{AS}}{V_{AB}}$$

$$h = \frac{f_B}{f_S}$$

$$q = \frac{f_{-3dB}}{f_S}$$

## Náhradná elektrická schéma sústavy VB



$$R_{ES} = \frac{(Bl)^2}{R_{MS}}$$

$$L_{ES} = (Bl)^2 \cdot C_{MS}$$

$$C_{ES} = \frac{M_{MS}}{(Bl)^2}$$

$$R_{EL} = \frac{(Bl)^2}{S_D^2 \cdot R_{AL}}$$

$$L_{EB} = \frac{(Bl)^2 \cdot C_{AB}}{S_D^2}$$

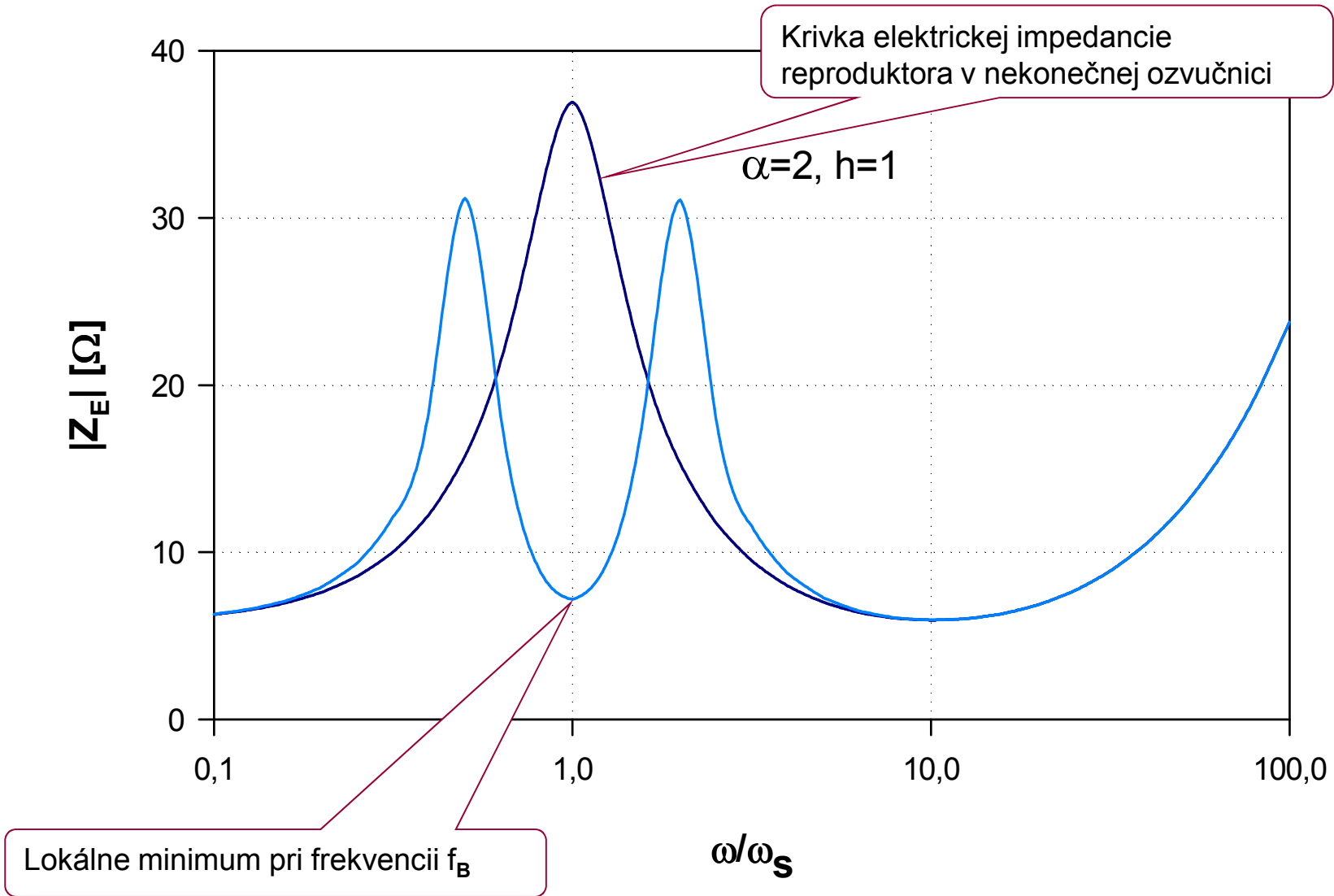
$$C_{EP} = \frac{S_D^2 \cdot M_{AP}}{(Bl)^2}$$

# Elektrická impedancia sústavy VB

$$Z_E = R_{EVC} + sL_{EVC} + \underbrace{\frac{1}{\frac{1}{R_{ES}} + \frac{1}{sL_{ES}} + sC_{ES}} + \frac{1}{R_{EL} + sL_{EB} + \frac{1}{sC_{EP}}}}_{Z_{EM}}$$

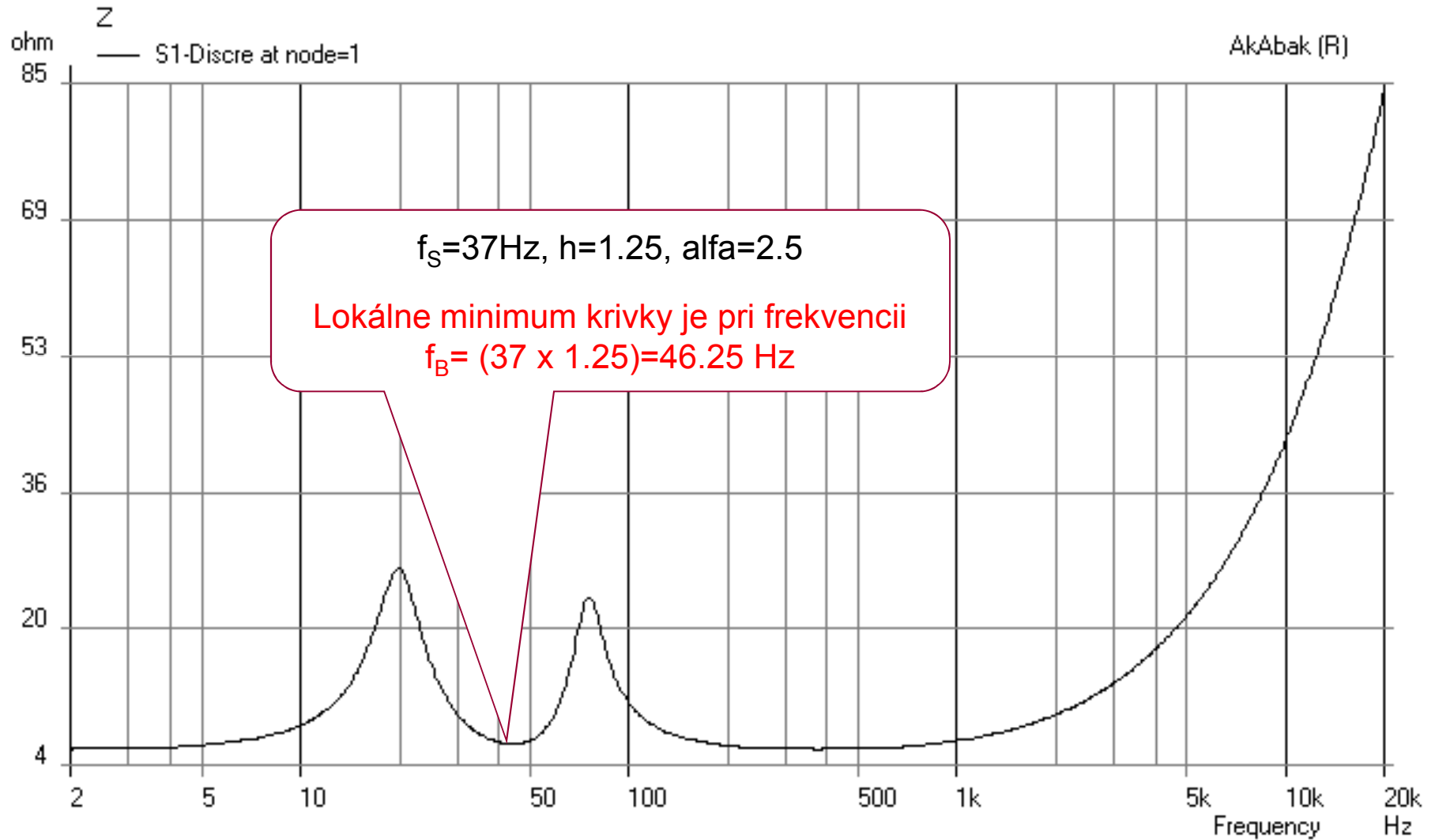
Elektrická impedancia obsahuje dva rezonančné obvody (paralelný a sériový), ktoré sú zapojené kaskádne. Na impedančnej krivke sa dá očakávať minimálne jedno lokálne maximum, spôsobené paralelným rezonančným obvodom a jedno lokálne minimum, spôsobené sériovým rezonančným obvodom. V skutočnosti bude mať rezonančná krivka dve lokálne maximá a jedno lokálne minimum. **Lokálne minimum je vždy v mieste rezonančnej frekvencie akustického rezonátora (t.j. sériového elektrického rezonančného obvodu).** Na rozdiel od reproduktora v nekonečnej resp. zatvorenej ozvučnici, lokálne maximá nie sú (číselne) totožné so žiadnou z mechanických rezonančných frekvencií)

# Elektrická impedancia sústavy VB

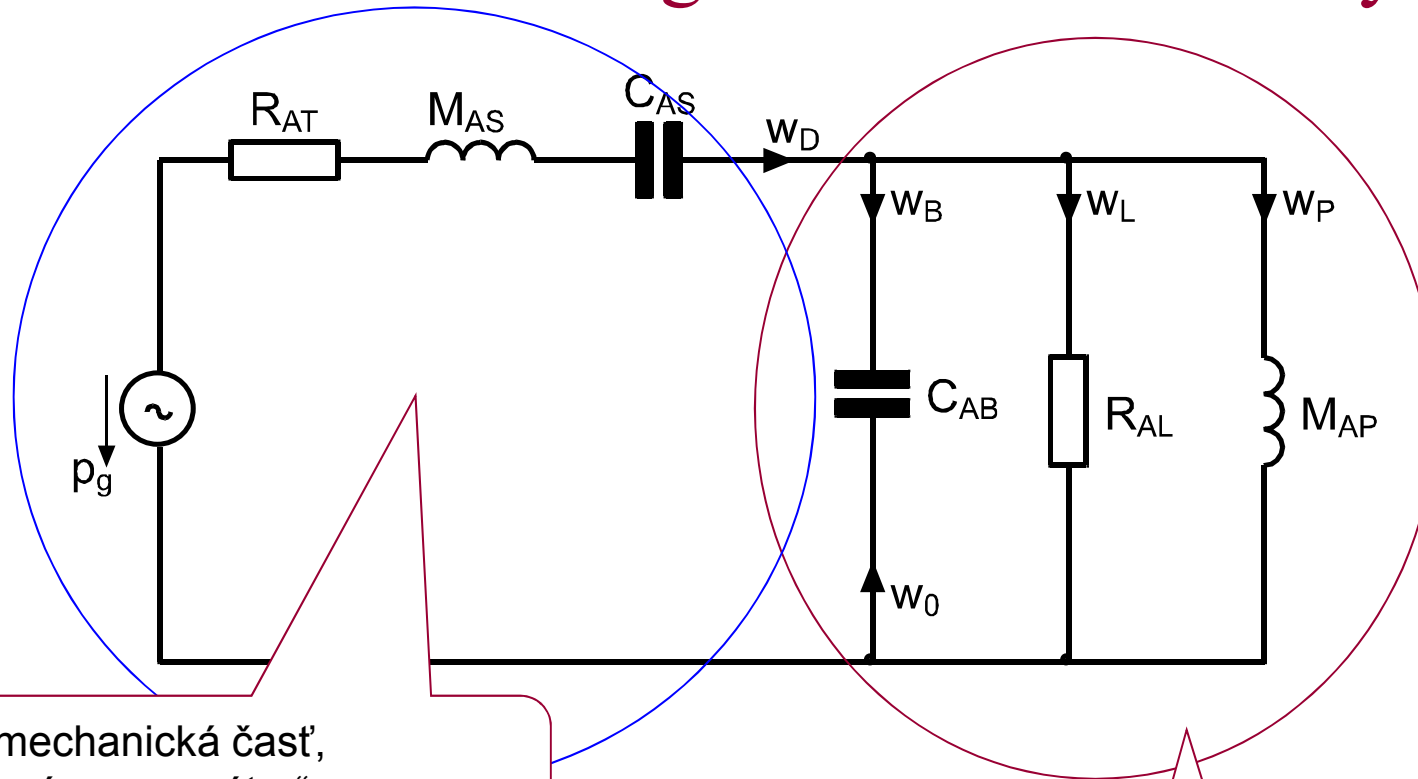


# Elektrická impedancia sústavy VB pri simulácii v programe AkAbak

1. Impedance of L08-09VB, Amplitude (Phase)



# Akustická analogická schéma sústavy



Elektromechanická časť,  
zobrazená cez „gyrátor“ a  
„coupler“ do akustickej domény

$$p_G = \frac{u_G \cdot (Bl)}{(R_G + R_{EVC}) \cdot S_D}$$

$$R_{AT} = \frac{1}{(R_G + R_{EVC})} \cdot \frac{(Bl)^2}{S_D^2} + \frac{R_{MS}}{S_D^2}$$

$$M_{AS} = \frac{M_{MS}}{S_D^2}$$

$$C_{AS} = S_D^2 \cdot C_{MS}$$

Pôvodná akustická časť,  
reprezentujúca akustický  
rezonančný obvod (ozvučnicu)

## Objemová rýchlosť v ozvučnici

$$\begin{aligned}
 w_B(s) &= p_G \cdot \frac{\frac{s \cdot C_{AB}}{\frac{1}{R_{AL}} + \frac{1}{s \cdot M_{AP}} + s \cdot C_{AB}}}{R_{AT} + s \cdot M_{AS} + \frac{1}{s \cdot C_{AS}} + \frac{1}{\frac{1}{R_{AL}} + \frac{1}{s \cdot M_{AP}} + s \cdot C_{AB}}} \\
 &= \frac{U_G \cdot (Bl)}{(R_G + R_{EVC}) \cdot S_D} \cdot \frac{\frac{s \cdot C_{AB}}{\frac{1}{R_{AL}} + \frac{1}{s \cdot M_{AP}} + s \cdot C_{AB}}}{R_{AT} + s \cdot M_{AS} + \frac{1}{s \cdot C_{AS}} + \frac{1}{\frac{1}{R_{AL}} + \frac{1}{s \cdot M_{AP}} + s \cdot C_{AB}}}
 \end{aligned}$$



# Akustický tlak v akustickom poli sústavy

$$p_0(s) = \frac{\rho_0}{2\pi r} \cdot s \cdot w_B(s)$$

$$p_0(s) = \frac{\rho_0}{2\pi r} \cdot \underbrace{u_G \cdot (Bl)}_{p_m} \cdot \frac{1}{(R_G + R_{EVC}) \cdot S_D \cdot M_{AS}} \cdot \underbrace{\frac{M_{AS} \cdot \frac{s \cdot C_{AB}}{\frac{1}{R_{AL}} + \frac{1}{s \cdot M_{AP}} + s \cdot C_{AB}}}{R_{AT} + s \cdot M_{AS} + \frac{1}{s \cdot C_{AS}} + \frac{1}{\frac{1}{R_{AL}} + \frac{1}{s \cdot M_{AP}} + s \cdot C_{AB}}}}_{G_{VB}(s) = \frac{N(s)}{D(s)}}$$

## Amplitúda akustického tlak v akustickom poli sústavy (VB)

$$p_{m(IB)} = p_{m(CB)} = p_{m(VB)} = \frac{\rho_0}{2\pi r} \cdot \frac{u_G \cdot (Bl) \cdot S_D}{(R_G + R_{EVC}) \cdot M_{MS}} \quad [\text{Pa}]$$

$$\sigma_{p(IB)|_{1W,1m}} = \sigma_{p(CB)|_{1W,1m}} = \sigma_{p(VB)|_{1W,1m}} = 7.9 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{\frac{f_S^3 V_{AS}}{Q_{ES}}} \quad [\text{PaW}^{-1/2}\text{m}]$$

Porovnaním amplitúd akustických tlakov všetkých troch základných kombinácií reproduktora a ozvučnice (IB = nekonečná ozvučnica, CB = zatvorená ozvučnica, VB = basreflexová ozvučnica) môžeme zistiť, že sú rovnaké. Znamená to zároveň, že citlivosť je tiež rovnaká.

# Menovitá účinnosť basreflexovej sústavy

- Teoreticky je menovitá účinnosť basreflexovej sústavy identická s účinnosťou samotného reproduktora;
- Prakticky však účinnosť basreflexovej sústavy závisí aj od spôsobu konštrukcie ozvučnice a z toho vyplývajúcich celkových strát
- Skutočná účinnosť môže byť väčšia ale aj menšia, než teoreticky predpokladaná

$$\eta_{N(VB)} = \eta_{N(CB)} = \eta_{N(IB)} = \frac{4 \cdot \pi^2}{c_0^3} \cdot \frac{f_S^3 \cdot V_{AS}}{Q_{ES}} \cong 9.6 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{f_S^3 \cdot V_{AS}}{Q_{ES}}$$

## Prenosová funkcia sústavy (VB)

$$\begin{aligned}
 G_{VB}(s) &= \frac{M_{AS} \cdot \frac{s \cdot C_{AB}}{\frac{1}{R_{AL}} + \frac{1}{s \cdot M_{AP}} + s \cdot C_{AB}}}{R_{AT} + s \cdot M_{AS} + \frac{1}{s \cdot C_{AS}} + \frac{1}{\frac{1}{R_{AL}} + \frac{1}{s \cdot M_{AP}} + s \cdot C_{AB}}} = \\
 &= \frac{s^4 M_{AS} C_{AS} M_{AP} C_{AB}}{s^4 M_{AS} C_{AS} M_{AP} C_{AB} + s^3 (R_{AT} C_{AS} M_{AP} C_{AB} + M_{AS} C_{AS} M_{AP} / R_{AL}) + \dots} \\
 &\dots \frac{\dots}{+s^2 (M_{AP} C_{AB} + R_{AT} C_{AS} M_{AP} / R_{AL} + M_{AP} C_{AS} + M_{AS} C_{AS}) + \dots} \\
 &\dots \frac{\dots}{+s (M_{AP} / R_{AL} + R_{AT} / C_{AS}) + 1}
 \end{aligned}$$

# Prenosová funkcia sústavy (VB) ako hornopriepustný filter 4. rádu)

$$G_{VB}(s) = \frac{s_0^4}{s_0^4 + a_1 s_0^3 + a_2 s_0^2 + a_3 s_0 + 1} \quad s_0 = \frac{s}{\omega_0}$$

$$a_1 = \frac{Q_L + h \cdot Q_T}{\sqrt{h} \cdot Q_L \cdot Q_T}$$

Prenosová funkcia (filter) je „nastaviteľná“ koeficientami  $a_1$ ,  $a_2$  a  $a_3$ , ktoré závisia od parametrov reproduktora aj ozvučnice

$$a_2 = \frac{h + (\alpha + 1 + h^2) \cdot Q_L \cdot Q_T}{\sqrt{h} \cdot Q_L \cdot Q_T}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\omega_B \omega_S}$$

Charakteristická frekvencia „filtra“

$$a_3 = \frac{h \cdot Q_L + Q_T}{\sqrt{h} \cdot Q_L \cdot Q_T}$$

Návrh sústavy VB je otázkou riešenia sústavy troch nelineárnych rovníc o 4 neznámých a aproximácie AFCH sústavy a takých HP filtrov, ktoré vedú k realizovateľným sústavám VB

# Lineárna výchylka membrány

$$x_D(s) = \underbrace{\sqrt{2P_E} \cdot \sigma_{x(VB)}}_{\text{amplitúda výchylky}} \cdot \underbrace{X_{(VB)}(s)}_{\text{prenosová funkcia výchylky}}$$

$$\sigma_{x(VB)} = \sigma_{x(IB)} = \frac{C_{MS} \cdot (Bl)}{\sqrt{R_{EVC}}} = \frac{10.65 \cdot 10^{-4}}{S_D} \sqrt{\frac{V_{AS}}{f_S Q_{ES}}} \quad [\text{mW}^{-1/2}]$$

výchylková citlivosť reproduktora v basreflexovej ozvučnici je rovnaká, ako výchylková citlivosť reproduktora v nekonečnej ozvučnici

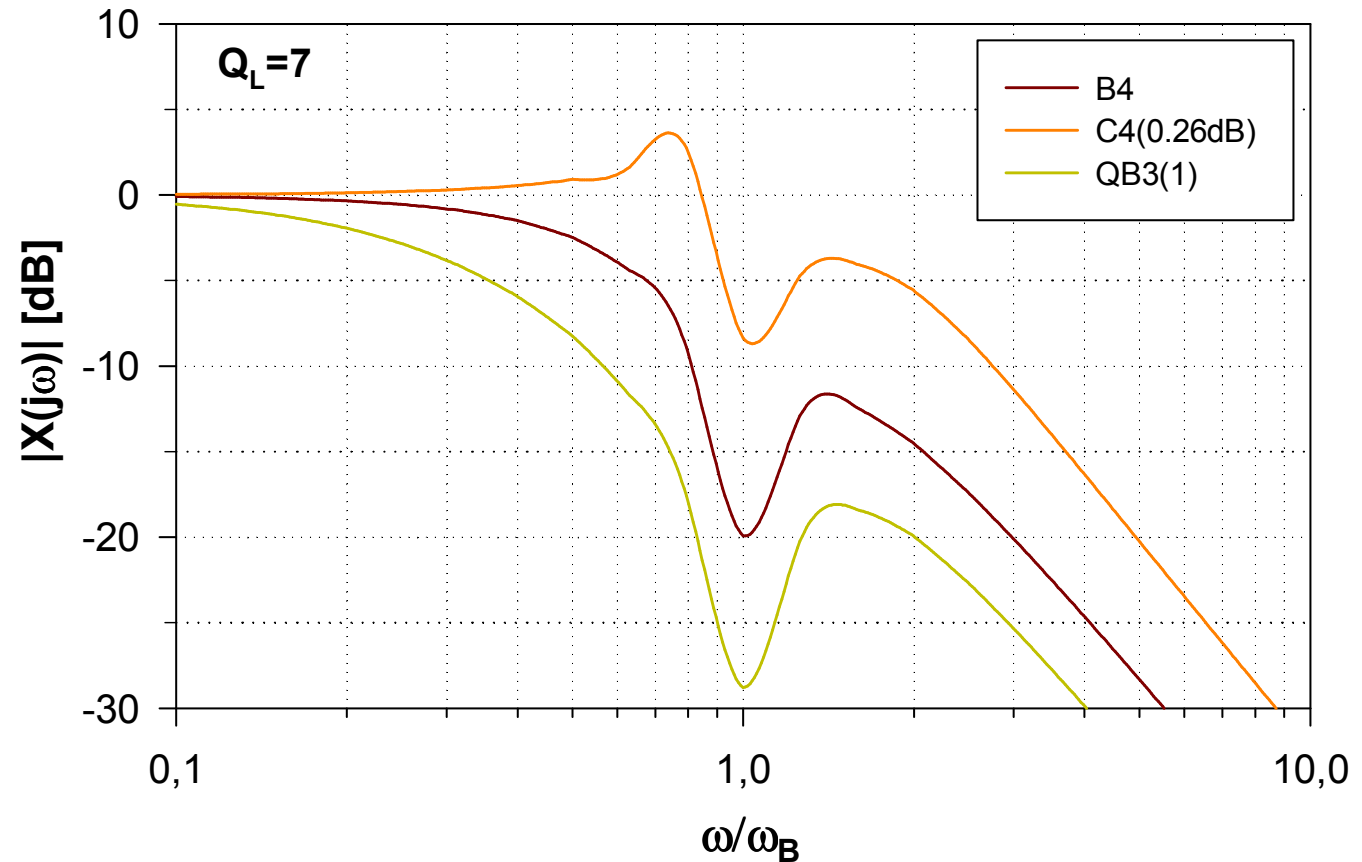
to znamená, že reproduktor nie je basreflexovou ozvučnicou vôbec tlmený (na rozdiel od reproduktora v zatvorenej ozvučnici)

# Prenosová funkcia výchylky membrány reproduktora v br. ozvučnici

$$X_{(VB)}(s) = \frac{b_1 s_0^2 + b_2 s_0 + 1}{s_0^4 + a_1 s_0^3 + a_2 s_0^2 + a_3 s_0 + 1}$$

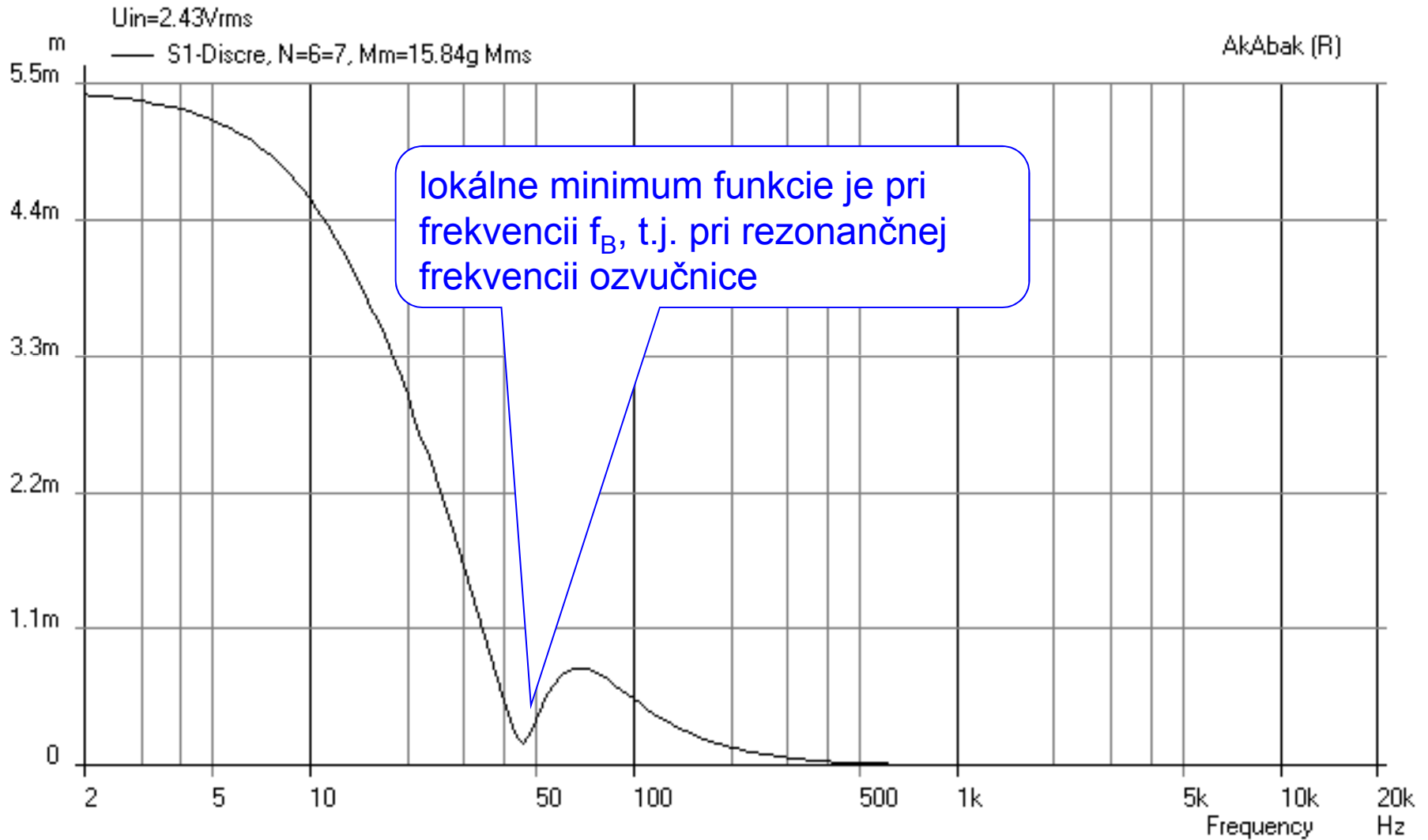
$$b_1 = \frac{1}{h}$$

$$b_2 = \frac{1}{\sqrt{h} \cdot Q_L}$$



# Výchylka membrány reproduktora (AkAbak/Inspec/Excursion)

2. Excursion of L08-09VB, Amplitude (Phase)





# Návrh basreflexovej sústavy (VB)

1. Návrh vhodnej ozvučnice pre zvolený reproduktor a cieľové kritérium, ktorým je obyčajne tvar AFCH (medzná frekvencia, zvlnenie charakteristiky a pod.)
    - Vstup: TS parametre reproduktora,  $f_{-3dB}$ ,  $R_{dB}$
    - Výstup: objem ozvučnice, rozmery br. trubice ( $V_{AB}$ ,  $l_p$ ,  $d_p$ )
  2. Návrh vhodného reproduktora pre zvolenú ozvučnicu a cieľové kritérium - tvar AFCH (medzná frekvencia, zvlnenie charakteristiky a pod.)
    - Vstup: objem ozvučnice, rozmery br. trubice ( $V_{AB}$ ,  $l_p$ ,  $d_p$ ),  $f_{-3dB}$ ,  $R_{dB}$
    - Výstup: TS parametre reproduktora
  3. Návrh vhodného reproduktora a ozvučnice pre zvolené cieľové kritérium – tvar AFCH (medzná frekvencia, zvlnenie charakteristiky a pod.)
    - Vstup:  $f_{-3dB}$ ,  $R_{dB}$
    - Výstup: TS parametre reproduktora, objem ozvučnice, rozmery br. trubice ( $V_{AB}$ ,  $l_p$ ,  $d_p$ )
- Pozn: pre zvolený vstup nenájdeme vhodný výstup – nutná korekcia požiadaviek!

# Návrh basreflexovej sústavy (VB)

1. manuálny numerický výpočet – prácny a časovo náročný postup
2. grafická resp. tabuľková metóda – čiastočná automatizácia rutinných výpočtov
3. použitie špecializovaných programových (softvérových) prostriedkov - CAD

# Aproximácie prenosovej funkcie sústavy

V súčasnosti existuje asi 15 typov aproximácií, ktoré vedú k realizovateľným basreflexovým reproduktorovým sústavám. Princiipiálne ich môžeme rozdeliť do dvoch základných kategórií:

1. aproximácie s elektronickou podporou, ktoré sú charakteristické tým, že na dosiahnutie požadovanej frekvenčnej charakteristiky sa reproduktorová sústava kombinuje s predradeným elektrickým filtrom;
2. aproximácií bez elektronickej podpory, u ktorých predradený elektrický filter nie je potrebný.

Ďalej sa budeme zaoberať aproximáciami bez elektronickej podpory, ktoré sú medzi výrobcami obľúbenejšie. Tieto možno rozdeliť taktiež do dvoch skupín:

- a) s optimálne plochou charakteristikou
- b) so zvlnenou charakteristikou v pásme prepúšťania (charakteristikou čebyševovského typu)

Aproximácie s optimálne plochou frekvenčnou charakteristikou sú reprezentované šiestimi kategóriami:

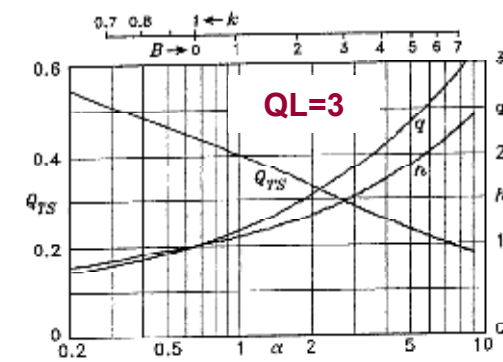
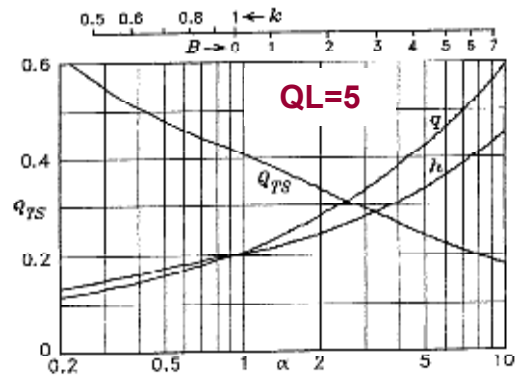
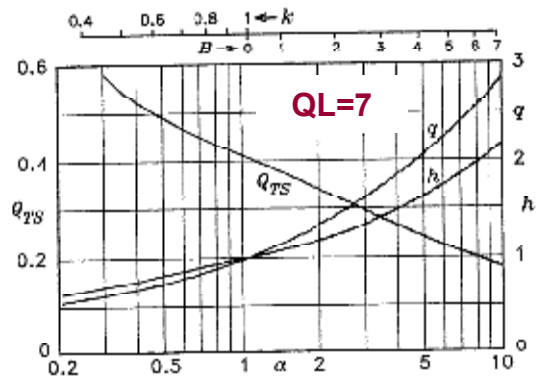
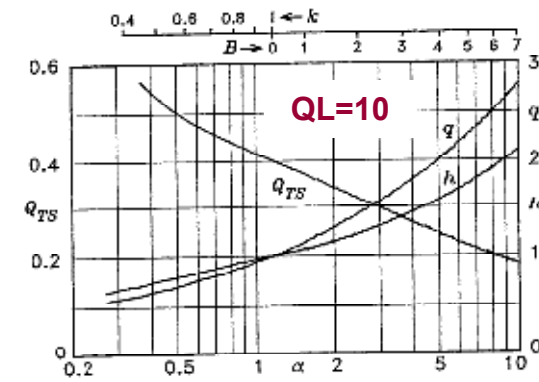
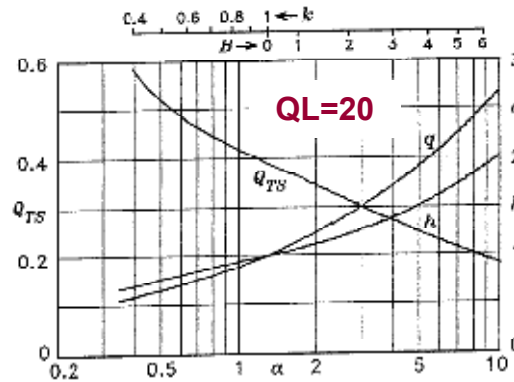
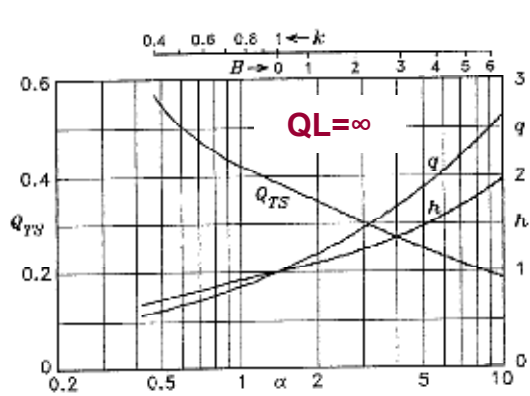
- A) SBB4 (Super Fourth-Order Boom Box) []
- B) SC4 (Fourth-Order Sub-Chebychev)
- C) QB3 (Quasi Third-Order Butterworth)
- D) Diskrétné aproximácie, ktoré sa tak nazývajú preto, že existujú len pre jednu hodnotu  $Q_{TS}$  :
  - B4 (Fourth-Order Butterworth)
  - BE4 (Fourth-Order Bessel)
  - IB4 (Butterworth Inter-Order)

Najznámejšie aproximácie čebyševovského typu sú reprezentované troma typmi:

- E) C4 (Fourth-Order Chebychev)
- F) BB4 (Fourth-Order Boom Box)
- G) SQB3 (Super Third-Order Quasi-Butterworth)

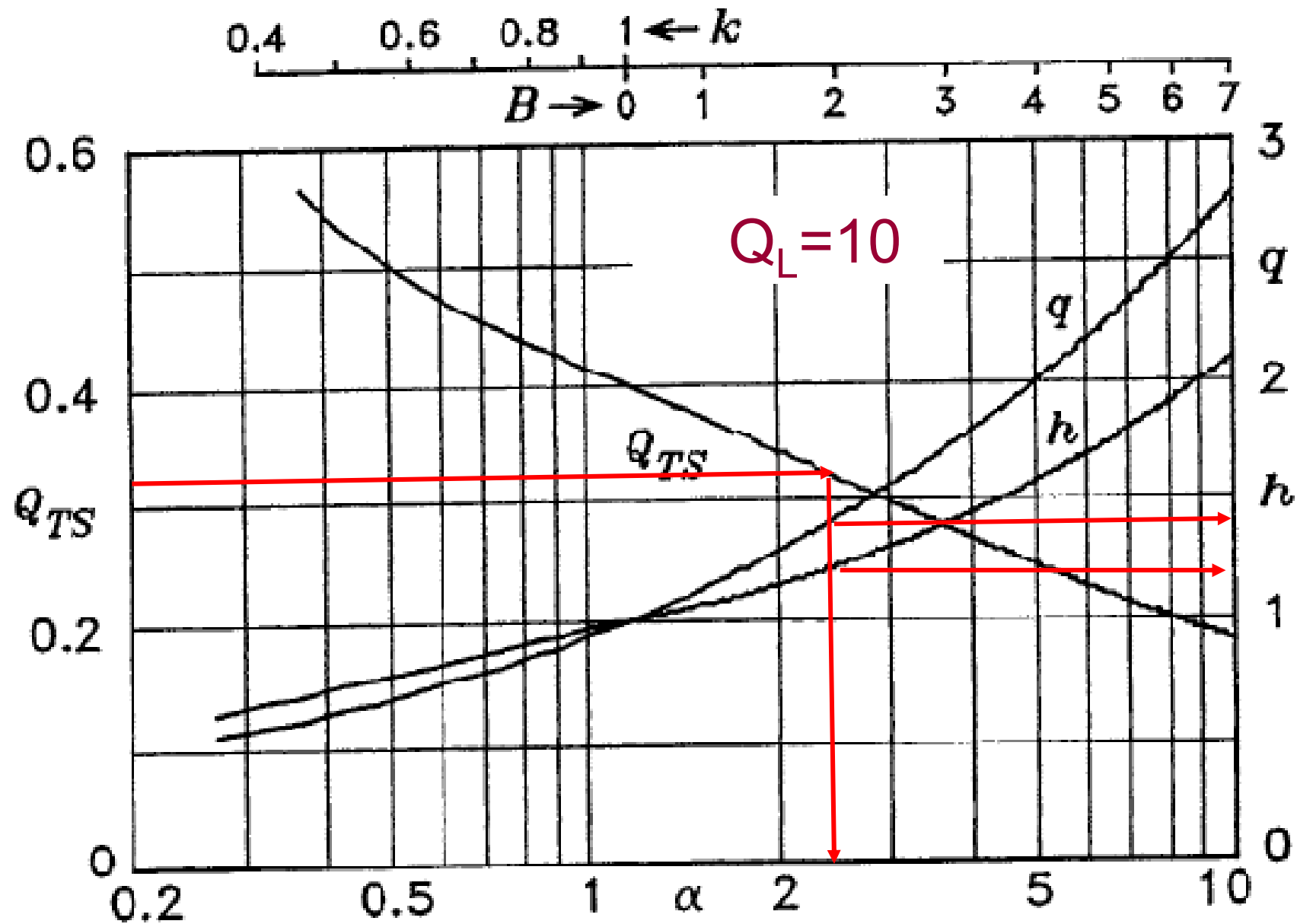
Jednotlivé aproximačné kategórie sa líšia napr. typom reproduktora, pre ktorý sú realizovateľné (požiadavka na  $Q_{TS}$ ), dosiahnuteľnou dolnou medznou frekvenciou, potrebným ladením ozvučnice (Helmholtzovho rezonátora) a z toho vyplývajúcej požiadavky na objem skrinky a veľkosť trubice.

# Grafická metoda návrhu VB



# Príklad 1:

- Uvažujeme reproduktor s nasledovnými parametrami:
  - $f_S=37\text{Hz}$
  - $Q_{TS}=0.32$
  - $V_{AS}=32\text{lit.}$
  - $S_D=136\text{cm}^2$
  - $x_{\max}=6\text{mm}$
- Chceme navrhnuť basreflexovú ozvučnicu tak, aby sústava VB mala potenciálne činiteľ kvality  $Q_L=10$
- Z grafických závislostí (vid' nasl. slajd) odčítame pre  $Q_{TS}=0.32$  hodnoty:
  - $\alpha = 2.5$
  - $h = 1.2$
  - $q = 1.4$
  - $B = 2$
- Z odčítaných hodnôt vypočítame:
  - Objem skrinky  $V_{AB}=V_{AS}/\alpha=12.8\text{lit.}$
  - Rezonančnú frekvenciu skrinky  $f_B=f_S*h=44.4\text{Hz}$
  - Medznú frekvenciu  $f_{-3\text{dB}}=f_S*q=51.8\text{Hz}$
  - Hodnota  $B=2$  hovorí o tom, že sústava bude realizovaná aproximáciou QB3



# Minimálna vysielacia plocha basreflexovej trubice

Membrána reproduktora „tlačí“ objem vzduchu  $V_D$  cez akustickú trubicu, ktorá má spravidla menšiu plochu než membrána. Vzduch prúdi cez trubicu väčšou rýchlosťou, než v skrinke a jeho prúdenie môže byť počuteľné („dýchanie basreflexu“). Aby k tomu nedošlo, odporúča sa maximálna rýchlosť prúdenia vzduchu, z ktorej je odvodená podmienka minimálneho prierezu trubice. Podmienka má charakter odporúčania – rôzni autori odporúčajú rôzne, ale len mierne sa odlišujúce hodnoty.

$$1. \quad D_{P,\min} \geq \sqrt{f_B \cdot V_D} \quad [\text{m}; \text{Hz}, \text{m}^3]$$

$$2. \quad D_{P,\min} \geq \sqrt{411.25 \frac{V_D}{N_P \sqrt{f_B}}} \quad [\text{m}; \text{Hz}, \text{m}^3]$$

*kde:*

$$V_D = S_D \cdot x_{\max, p-p} \quad [\text{m}^3] \quad - \quad \text{maximálna objemová výchylka reproduktora}$$

hodnota maximálnej výchylky z katalógového listu reproduktora

# Výpočet dĺžky basreflexovej trubice

• ...

$$M_{AP} = \frac{\rho_0}{N_p \cdot S_p} \cdot (l_p + k_{end} \cdot D_p)$$



$$l_p = \frac{c_0^2}{16\pi} \cdot \frac{D_p^2}{f_B^2 V_{AB}} \cdot N_p - k_{end} \cdot D_p$$

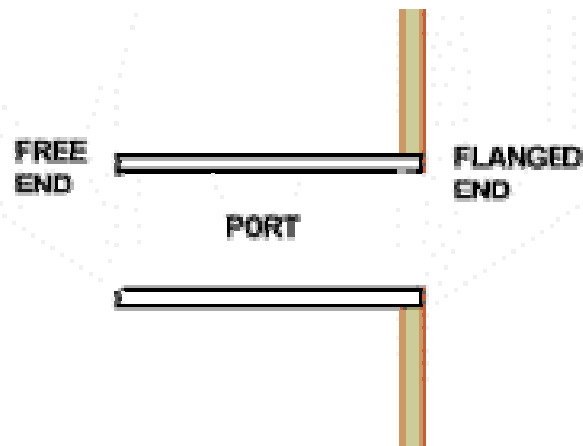
kde:

$D_p$  – priemer trubice

$l_p$  – dĺžka trubice

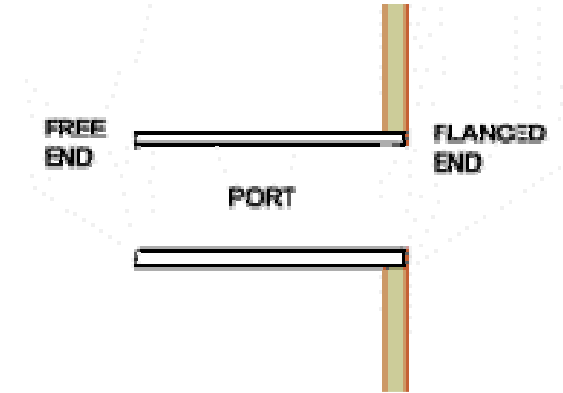
$N_p$  – počet trubíc

$k_{end}$  – tzv. koncová korekcia





# Konštanta koncových korekcií



Flanged End:  $k_{\text{flanged}} = 0.425$

Free End:  $k_{\text{free}} = 0.307$

Napr:

- Oba konce sú „flanged“:  $k_{\text{end}} = 0.425 + 0.425 = 0.850$
- Jeden koniec je „flanged“ a jeden je „free“:  $k_{\text{end}} = 0.425 + 0.307 = 0.732$
- Oba konce sú „free“:  $k_{\text{end}} = 0.307 + 0.307 = 0.614$

**Najčastejšie sa používa hodnota:  $k_{\text{end}} = 0.732$**

Rozmery akustickej trubice (priemer a dĺžku) možno určiť aj pomocou nomogramu na obrázku. Postupujeme pri tom tak, že na kolmici „ $V_B$ “ určíme bod, zodpovedajúci vypočítanej hodnote objemu skrinky, na kolmici „ $f_B$ “ určíme bod, zodpovedajúci vypočítanej hodnote rezonančnej frekvencie  $f_B$ , spojíme oba body úsečkou, ktorú predĺžime na kolmicu „ $L_V/S_V$ “. Z priesečníka tejto kolmice s úsečkou nakreslíme vodorovnú priamku a nájdeme priesečník s krivkou, zodpovedajúcou najvhodnejšiemu priemeru trubice. Kolmica, prechádzajúca týmto bodom, bude definovať zodpovedajúcu dĺžku trubice.

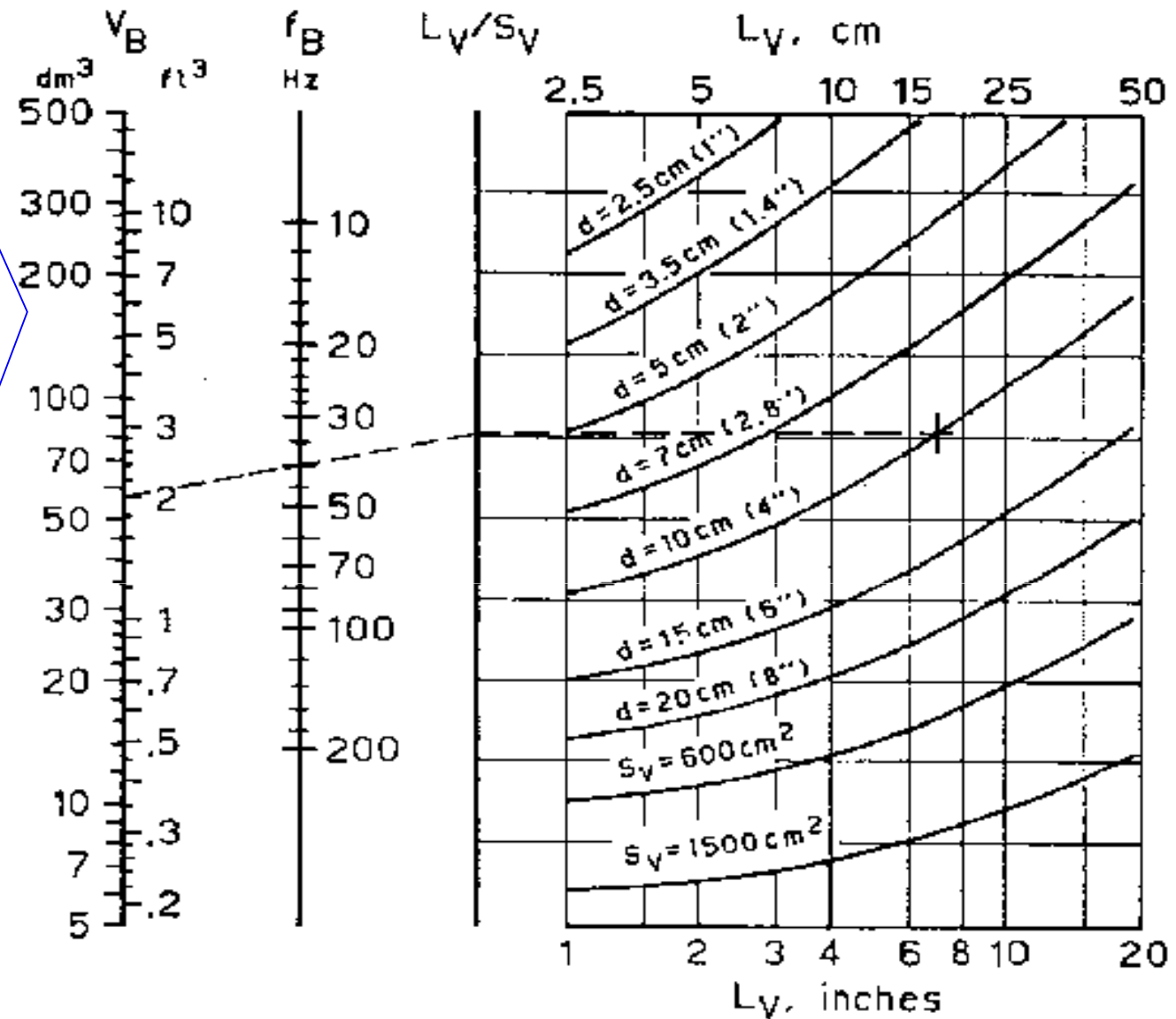


Fig. 21. Nomogram and chart for design of ducted vents.

# Príklad 1: pokračovanie

- Určíme minimálnu priemer akustickej trubice:

$$D_{p,\min} = \text{SQRT}(f_B \cdot S_D \cdot 2 \cdot x_{\max}) = 8.5 \text{ cm}$$

- Zvolíme najbližšiu vyššiu hodnotu priemeru akustickej trubice:

$$D_p = 10 \text{ cm}$$

- Zvolíme počet trubíc:

$$N_p = 1$$

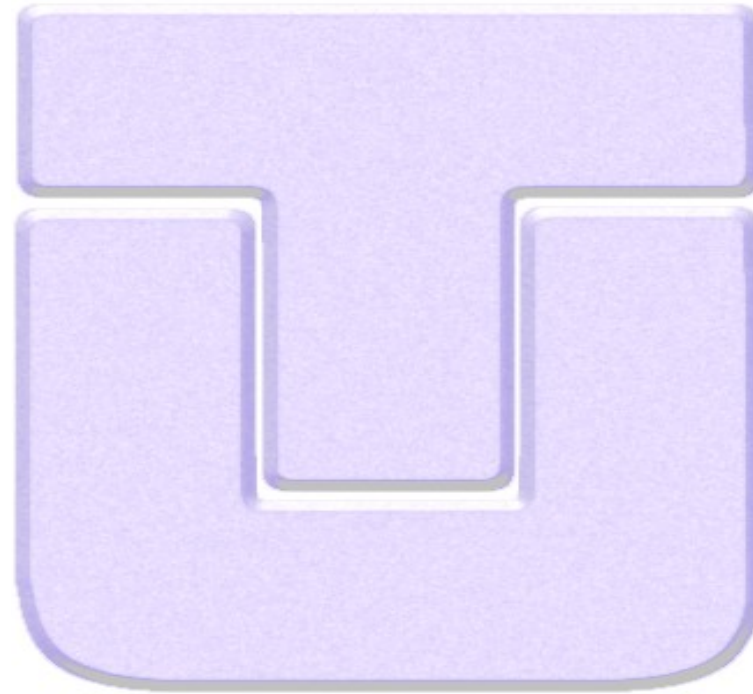
- Zvolíme konštantu koncových korekcií:

$$k_{\text{end}} = 0.425 + 0.307 = 0.732$$

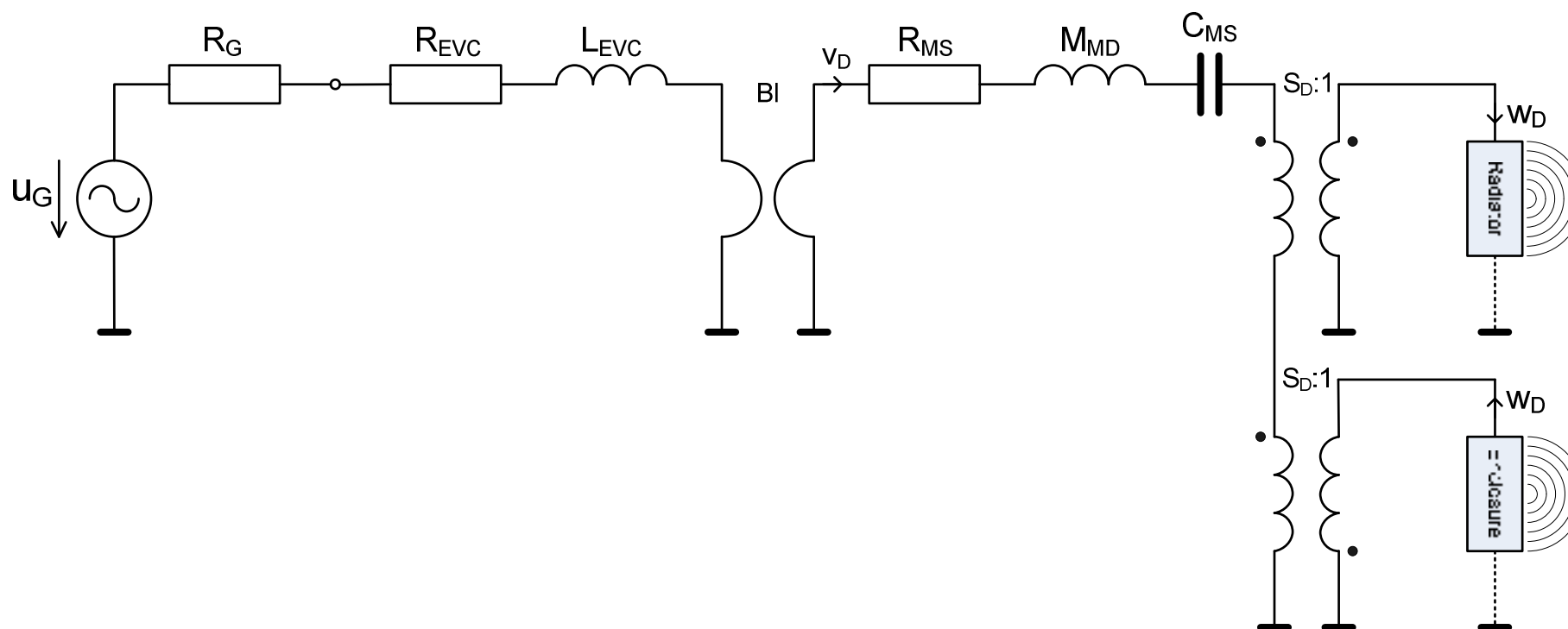
- Vypočítame potrebnú dĺžku akustickej trubice:

$$l_p = \frac{c_0^2}{16\pi} \cdot \frac{D_p^2}{f_B^2 V_{AB}} \cdot N_p - k_{\text{end}} \cdot D_p = \frac{344^2}{16\pi} \cdot \frac{0.1^2}{44.4^2 \cdot 12.8 \cdot 10^{-3}} \cdot 1 - 0.732 \cdot 0.1 \doteq 86 \text{ cm}$$

- Záver: Akustická trubica je prídlhá – sústava je realizovateľná len teoreticky. V prípade praktickej realizácie bude potrebné nájsť inú aproximáciu !!!



# Simulácia skrinky pomocou prvku „Enclosure“



# Skript – náhradná schéma sústavy VB s makromodelmi Radiator a Enclosure

| Seas Prestige ER18RNX  
| Revc=5.9Ohms; Levc=0.67mH; Bl=7.2N/A;  
| Mmd=14g; Mmrd=0.92g;  
| Rms=2.2Ns/m; Cms=1.3mm/N; Sd=136cm<sup>2</sup>  
| Fs=37Hz; Qts=0.32; Qms=1.58; Qes=0.39;  
Vas=32lit.  
| xmax=6mm; sens=88.5dB; Pe(lt)=80W

Def\_Const  
{roh=1.18; c0=344; Sd=0.0136; Rd=sqrt(Sd/pi);  
Vas=0.032; Qts=0.32;Fs=37;  
QL=10; alfa=2.5;h=1.25;  
Vab=Vas/alfa; Fb=Fs\*h;Lp=0.18;Rp=0.025; }

System 'S3-Enclosure' |Enclosure a Radiator  
Resistor 'Rg' Node=1=2 R=10mohm  
Resistor 'Revc' Node=2=3 R=5.9ohm  
Coil 'Levc' Node=3=4 L=0.67mH

Gyrator 'Gy1' Node=4=0=5=0 Bl=7.2Tm

MechResistance 'Rms' Node=5=6 Rm=2.2Ns/m  
MechMass 'Mmd' Node=6=7 Mm=14g  
MechCompliance 'Cms' Node=7=8 Cm=1.3e-3m/N

Coupler 'front' Node=8=9=10

SD={Sd} |Piston

Radiator 'Rad1' Def='front' Node=10

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

Coupler 'back' Node=9=0=0=20

SD={Sd} |Piston

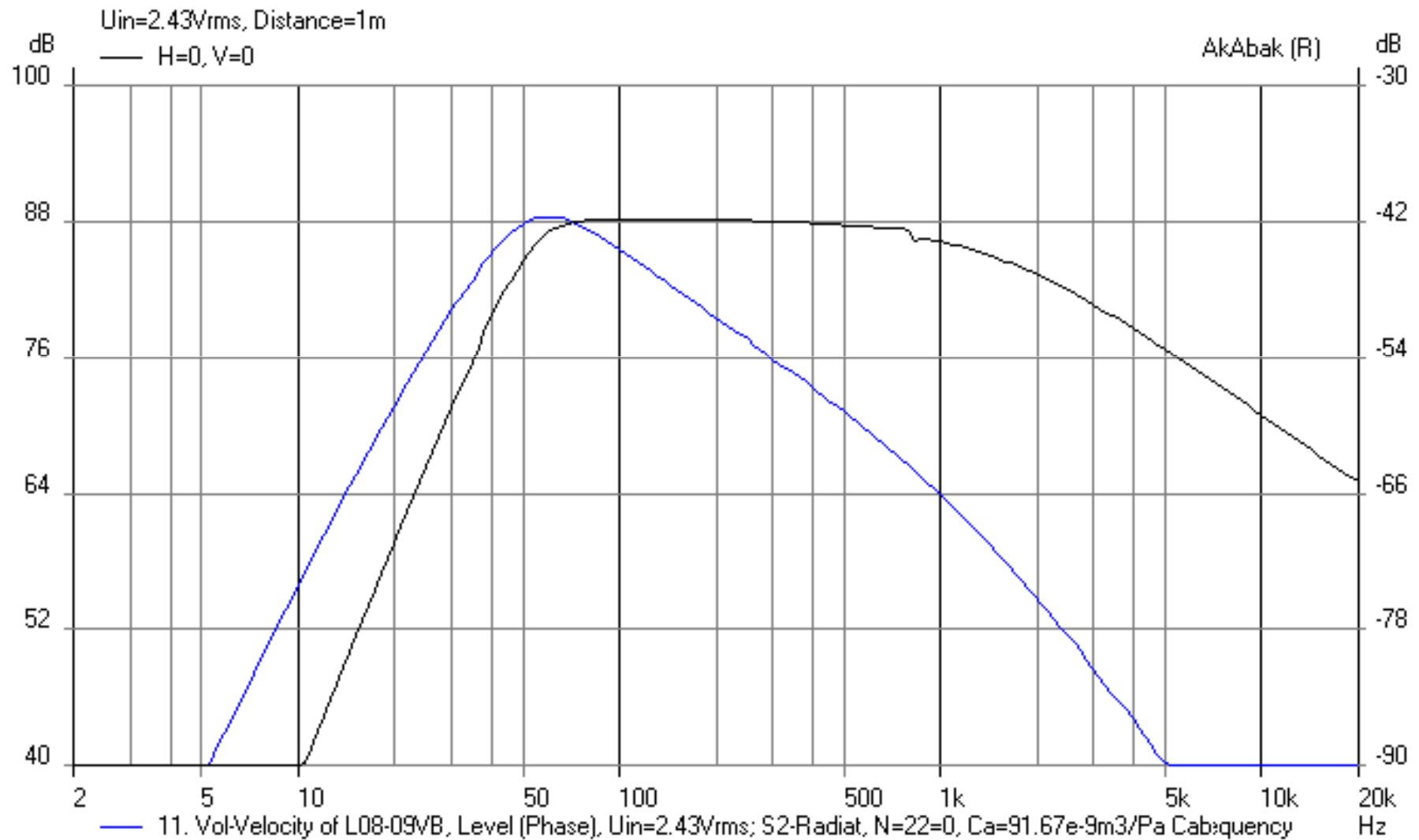
Enclosure 'E1' Node=20

Vb=12.8L Sb={Sd}

fb=46Hz dD=5cm QD/fo=0.2 Visc=0

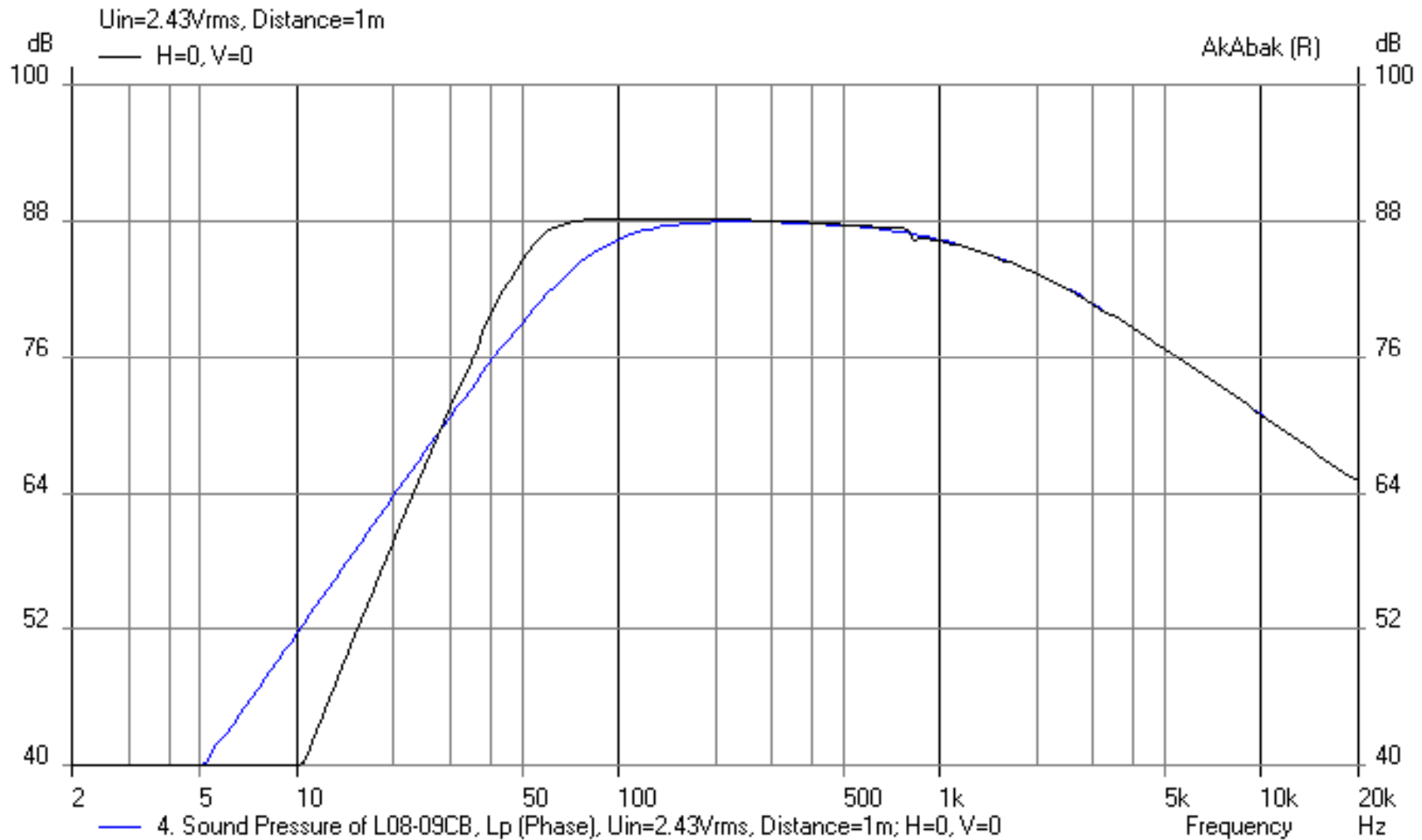
x=0 y=0 z=0 HAngle=0 VAngle=0

21. Sound Pressure of L08-09VB, Lp (Phase)



# Porovnanie CB a VB

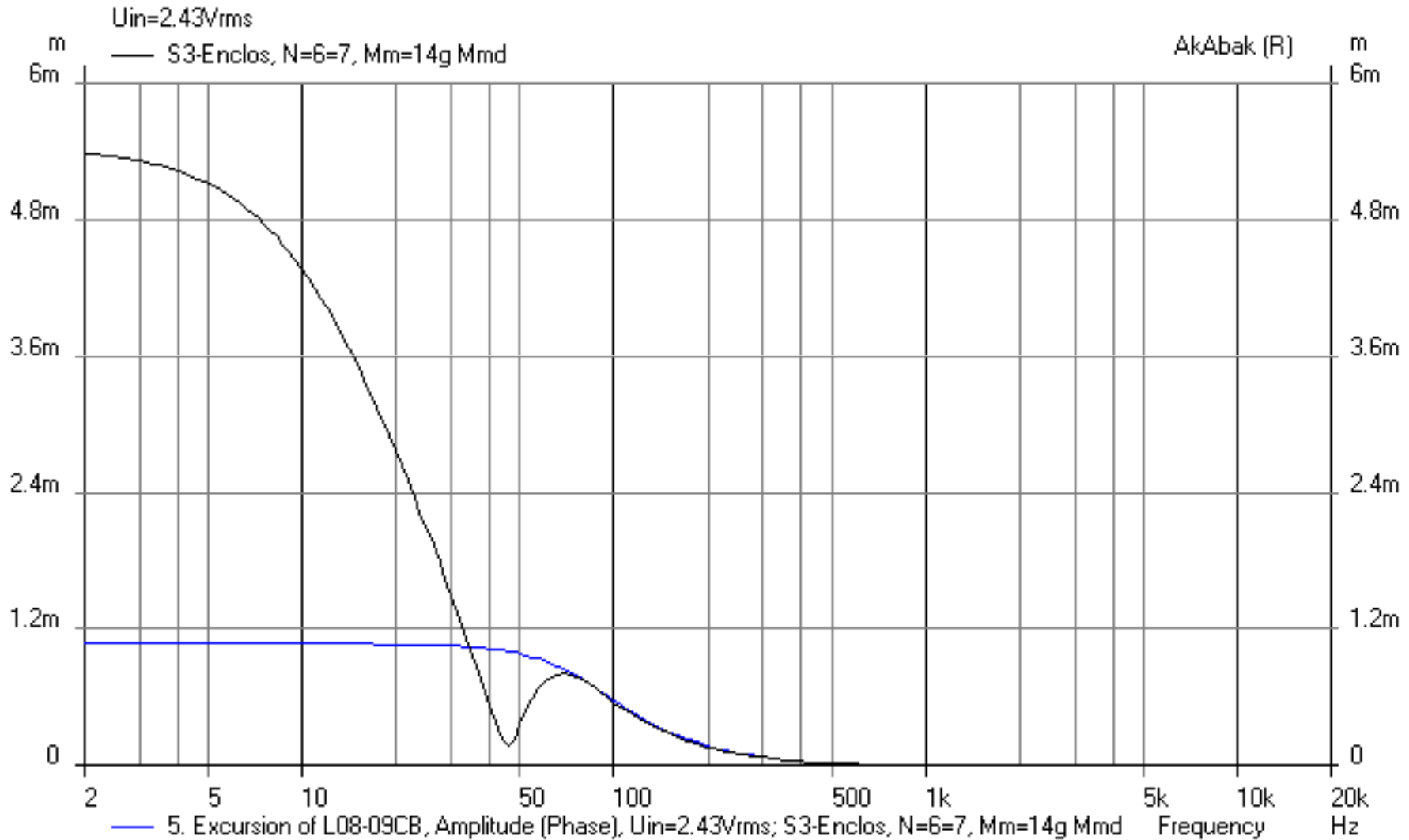
21. Sound Pressure of L08-09VB, Lp (Phase)





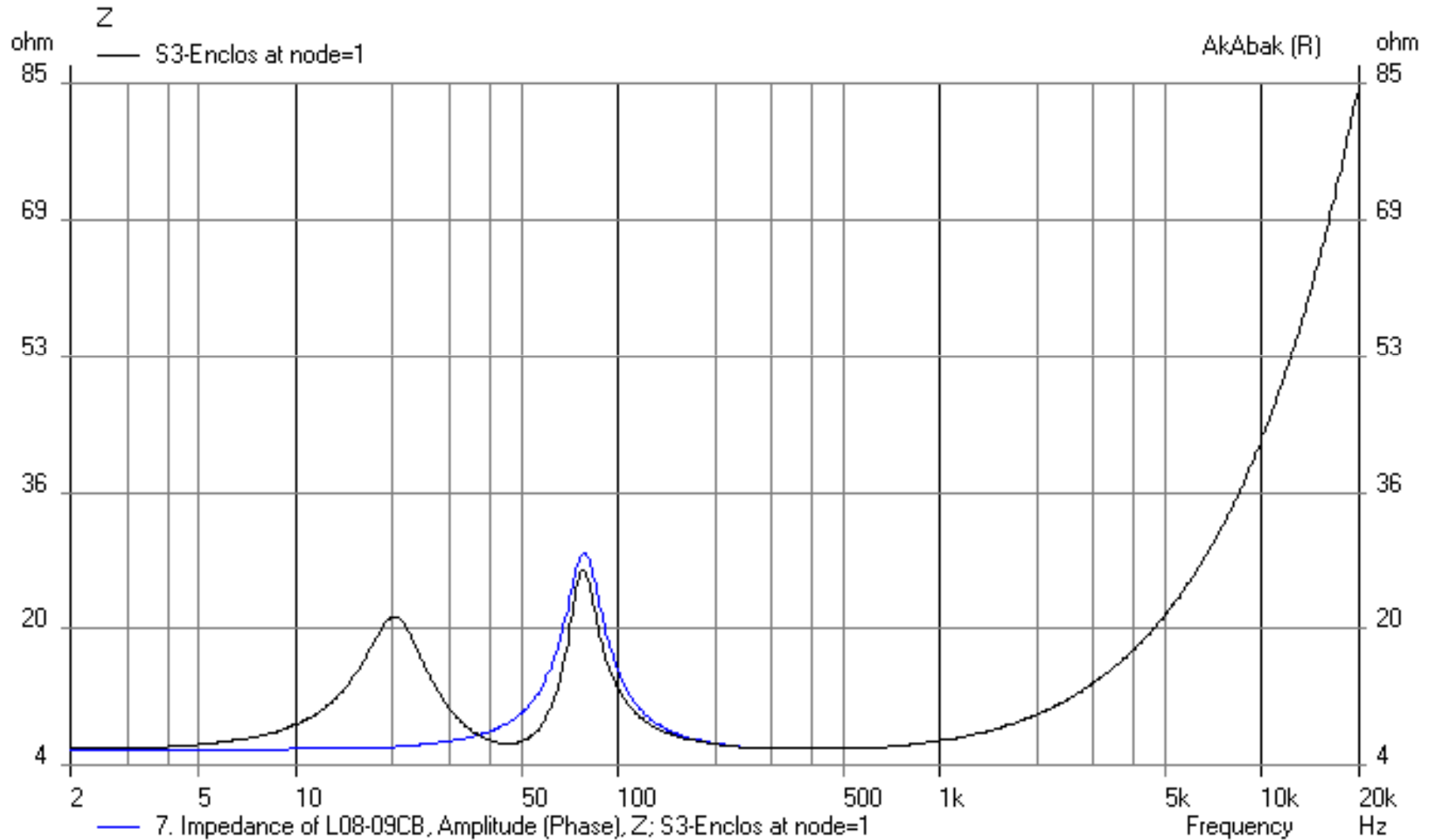
# Porovnanie CB a VB

23. Excursion of L08-09VB, Amplitude (Phase)



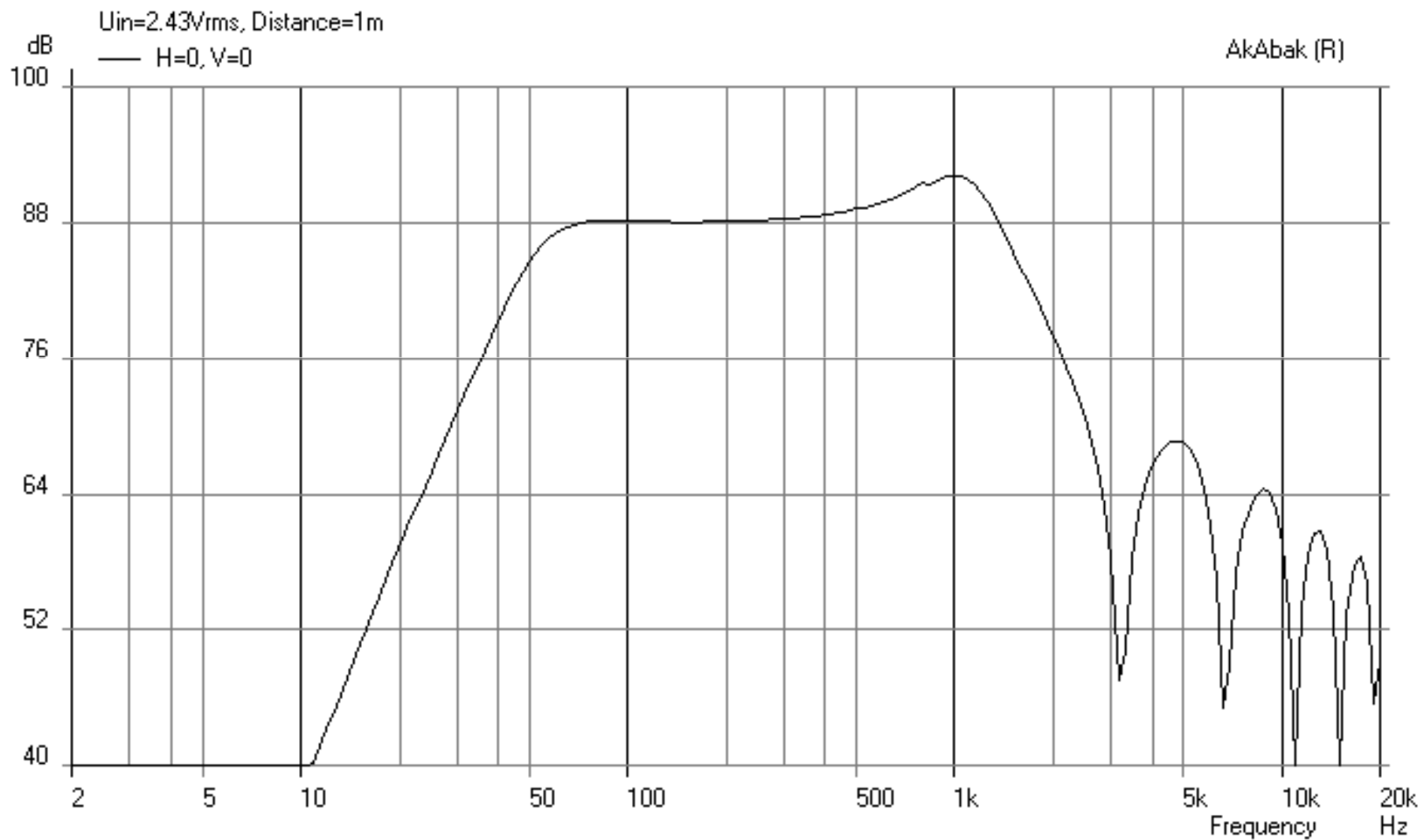
# Porovnanie CB a VB

24. Impedance of L08-09VB, Amplitude (Phase)



# Hladina akustického tlaku pri kónickej membráne

30. Sound Pressure of L08-09VB, Lp (Phase)



# Makromodel „BassUnit“

Def Net Filter Sum Inspect Calc

Diaphragm...  
Radiation position...  
Helmholtz...

1. Def\_Import...  
2. Def\_ListeningPoint...  
3. Def\_Reflector...

4. Def\_OpAmp...  
5. Def\_Transistor...  
6. Def\_Element (dll)...

7. Def\_Driver...  
8. Def\_TwoCoilsDriver...  
9. Def\_PiezoDriver...  
A. Def\_MeasRadiator...  
B. Def\_BassUnit... **Ctrl + B**  
C. Def\_Speaker...

**Definition Def\_BassUnit / Calculator**

<b>Resonance frequency</b> fs... 37Hz ...Hz...	<b>Electrical quality</b> Qes... 0.39	<b>Mechanical quality</b> Qms... 1.58	<b>Voice coil resistance</b> Re... 5.9ohm ..ohm.. fre=2.0kHz	<b>Voice coil inductance</b> Le... 0.67mH H... ExpoLe=0.618	<b>Equ. vol. to compliance</b> Vas... 32L m3,...in3	<b>Diaphragm dimension</b> SD... 136cm2 m2,...in2 Cone
<b>Excursion max.</b> Xms 6mm m,...in	<b>Generator resistance</b> Rg ..ohm..	<b>Mass-load factor</b> mb 1 0.95...1	<b>Enclosure volume</b> Vb 12.8L m3,...in3,L	<b>Quality factor/frequency</b> Qb/fo 1000 <input checked="" type="checkbox"/> <b>Vented</b>	<b>Helmholtz resonance</b> fb... 46Hz ..Hz..	

**Reflex Box System**

fsb	Qtr	Directivity frequ. fD	f3	
37Hz	0.313	830Hz	49Hz	
Lw max. 4-pi-sr	Pel max.	Uo max. rms	Reverb. -60dB	Ripple
86.38dB	1.32W	2.79V	58.3ms	95.34mdB

**HP-Filter** on/off  
Quality factor Qe  
Pole - frequency fe  
..Hz..

**Identification**  
BU1

Alignments...  Diagram...  Evaluate  From script  Copy to clipboard and close

# Zoznam možných realizácií VB z ponuky „Alignments“

### Definition Def\_BassUnit / Calculator

Resonance Electrical Mechanical Voice coil Voice coil Equ. vol. to Diaphragm

#### Vented Cabinet Alignments

Alignment table fsb: 37Hz Qtsbg: 0.313 Qb/fo: --- QB4 a2 = 4.476

Qb/fb	Vb [L]	f3 [Hz]	Lwmax [dB]	Qe	fe [Hz]	fb [Hz]	t60 [ms]	Ripple [dB]
0.691	12	52	86.4			44.6	45	
0.181	12.5	54	86.4			46.3	43	
0.101	13.1	57	86.4			48.2	41	
0.069	13.7	59	86.4			50.3	39	
0.051	14.4	62	86.4			52.7	37	
0.04	15.2	65	86.4			55.3	35	
0.033	16.3	68	86.4			58.3	34	
0.027	17.5	71	86.4			61.6	32	

Query (Select only alignments with...)

Enclosure volume Vb	HP-filter quality factor Qe	Cut-off frequency f3	Max. SPL 1m, 4-pi-sr SPLmax	Enclosure quality/ fb Qb/fo
<	<	<	<	<

Alignment family

- Quasi-Butterworth
- Chebyshev
- Butterworth-Thomson
- High-pass filtered

Def\_BassUnit Calculator / Diagram

QB4 a2 = 4.476

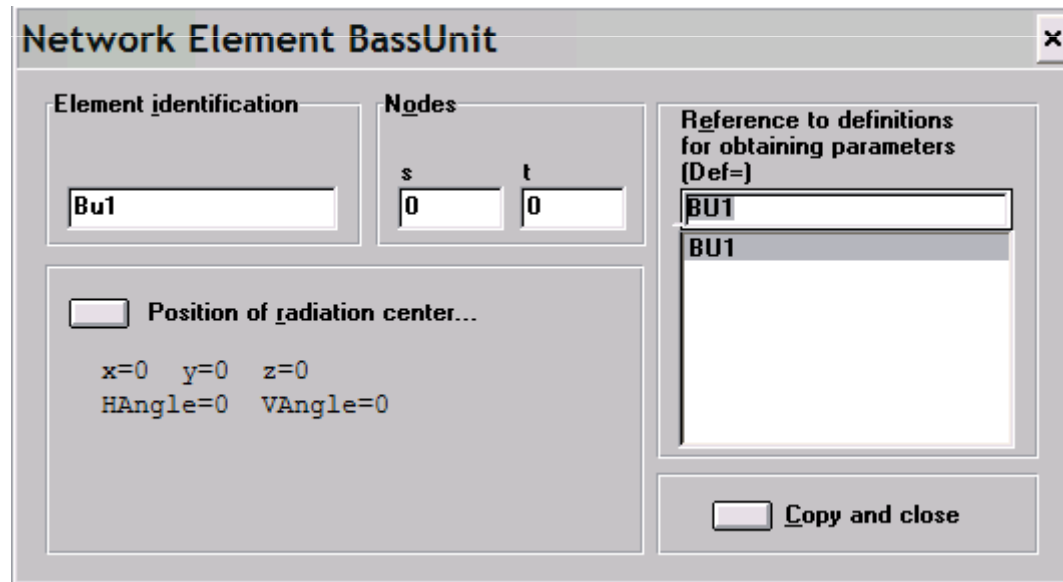
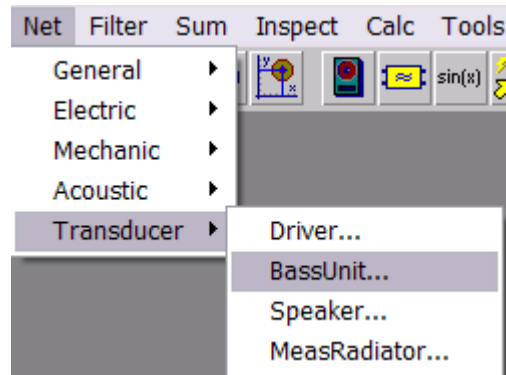
Reflections on/off:  Left wall,  Right wall,  Floor

Repaint  Zoom

```

fb=46.0Hz
ance in vented enclosure:
z   Qtr   fD   f3
    0.313 830.4Hz 48.8Hz
    Pelmax UoRms t60 Ripple
R   1 3W   2 79V   58.3ms 95.3mdB
    
```

# Makromodel BassUnit ako obvodový prvok



# BassUnit

| Seas Prestige ER18RNX  
| Revc=5.9Ohms; LevC=0.67mH; Bl=7.2N/A; Mmd=14g; Mmrd=0.92g;  
| Rms=2.2Ns/m; Cms=1.3mm/N; Sd=136cm<sup>2</sup>  
| Fs=37Hz; Qts=0.32; Qms=1.58; Qes=0.39; Vas=32lit.  
| ymax=6mm; sens=88.5dB; Pe(lt)=80W

Def\_BassUnit 'BU1'

SD=136cm<sup>2</sup> dD1=6cm tD1=4cm |Cone

fp=1.5kHz

fs=37Hz Vas=32L Qms=1.58

Qes=0.39 Re=5.9ohm fre=2.0kHz ExpoRe=1 Le=0.67mH ExpoLe=0.618

Xms=6mm

Vb=12.8L fb=46.0Hz

|Performance in vented enclosure:

| fsb Qtr fD f3

| 37.0Hz 0.313 830.4Hz 48.8Hz

| Lwmax Pelmax UoRms t60 Ripple

| 86.4dB 1.3W 2.79V 58.3ms95.3mdB

System 'vb-BassUnit'

BassUnit 'Bu1' Def='BU1' Node=1=0

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

# BassUnit

32. Sound Pressure of L08-09VB, Lp (Phase)

Uin=2.43Vrms, Distance=1m

— H=0, V=0

AkAbak (R)

