



Elektroakustika

L09: Reproduktor v basreflexovej ozvučnici

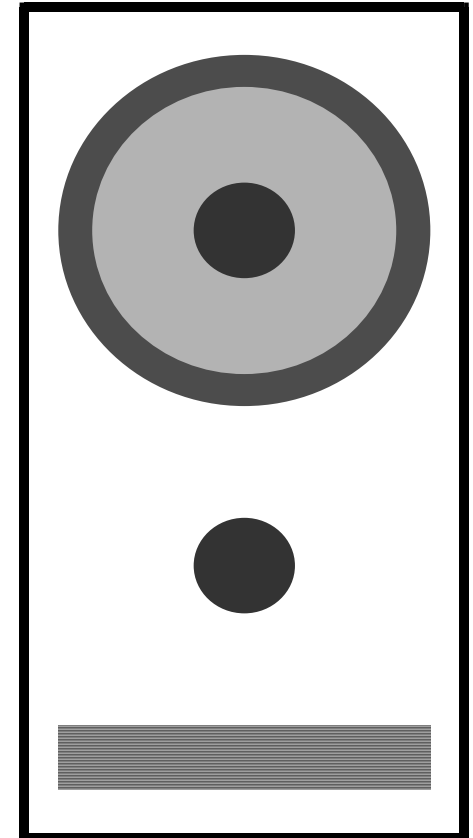
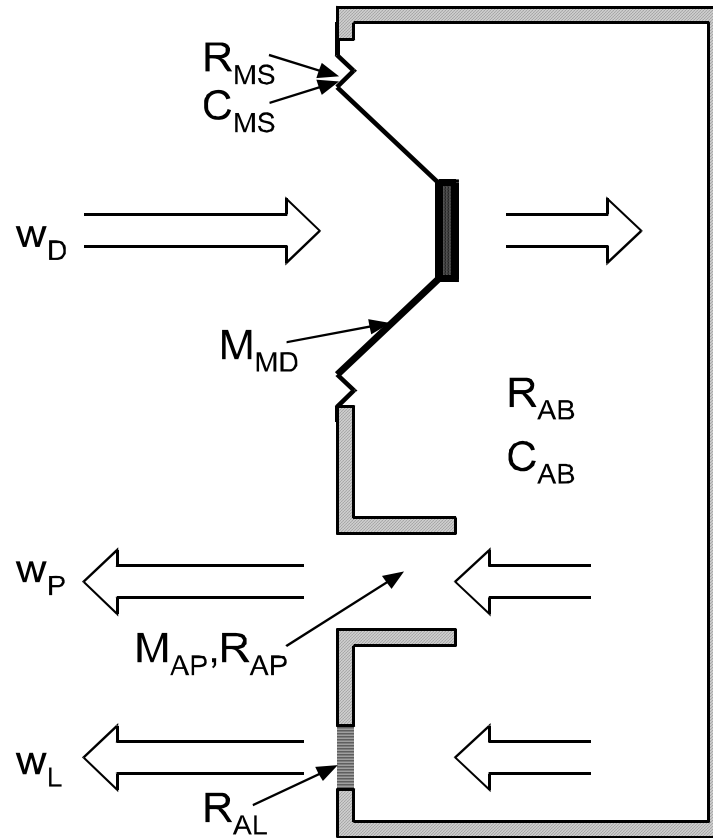
doc. Ing. Jozef Juhár, PhD.

<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 vysielajú 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 termíny na označenie basreflexovej ozvučnice
 - Vented Box Enclosure
 - Ported Box

Náčrtok sústavy a objemové rýchlosti v akustickom poli



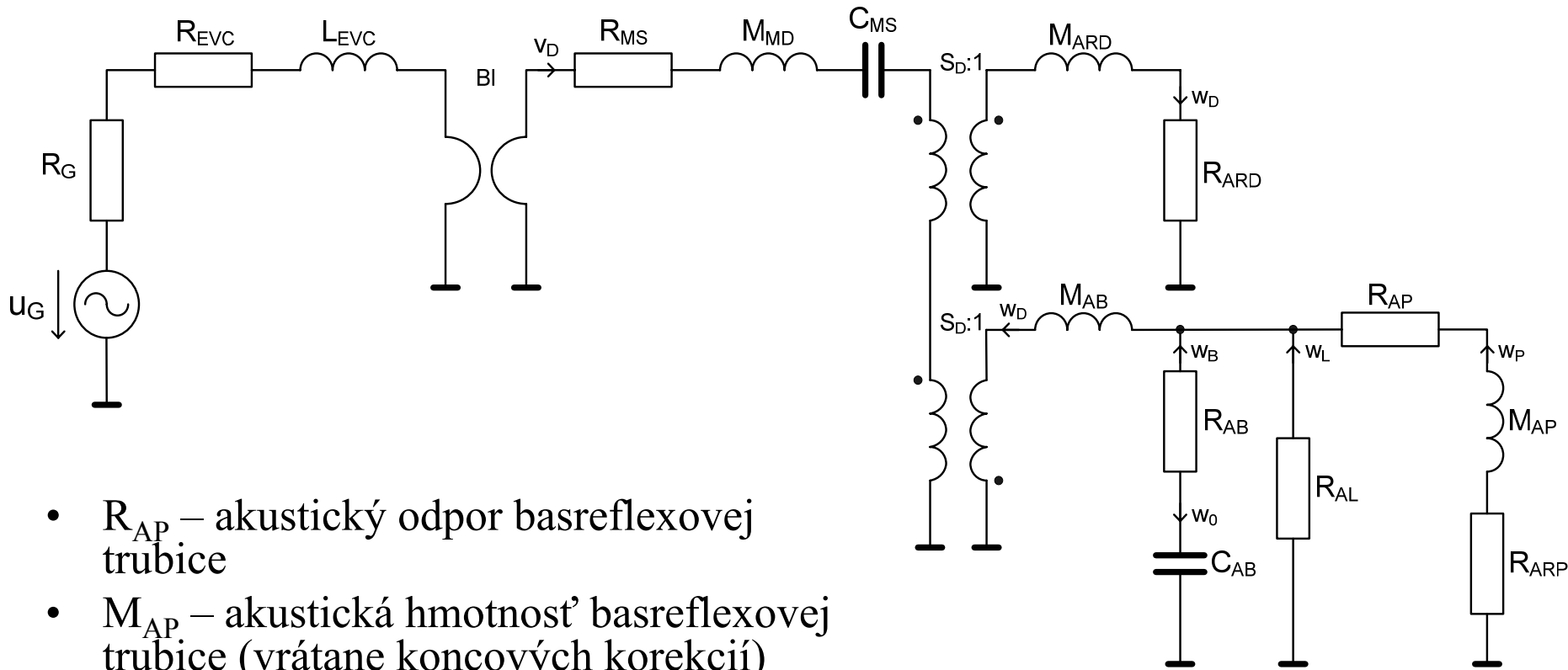
Celková objemová rýchlosť, generovaná sústavou do akustického priestoru

Objemová rýchlosť, generovaná membránou do ozvučnice sa rozkladá na tri zložky

$$\left. \begin{aligned} w_0 &= -w_D + w_P + w_L \\ w_D &= w_B + w_P + w_L \end{aligned} \right\} \Rightarrow w_0 = -w_B$$

Celková objemová rýchlosť, generovaná sústavou do akustického priestoru, je identická s objemovou rýchlosťou, absorbovanou v dutine ozvučnice!!!

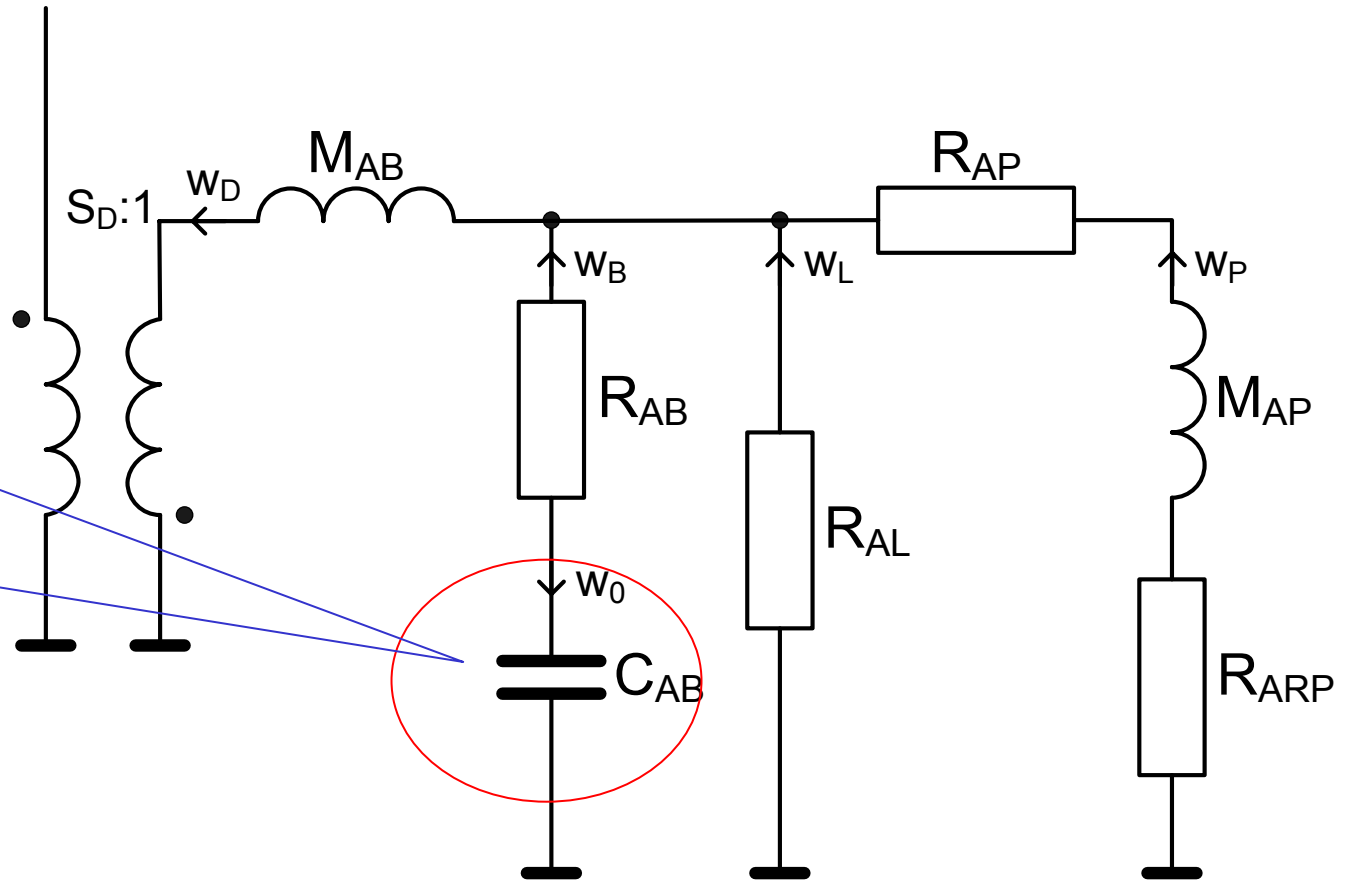
Náhradná schéma sústavy VB (Vented Box)



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

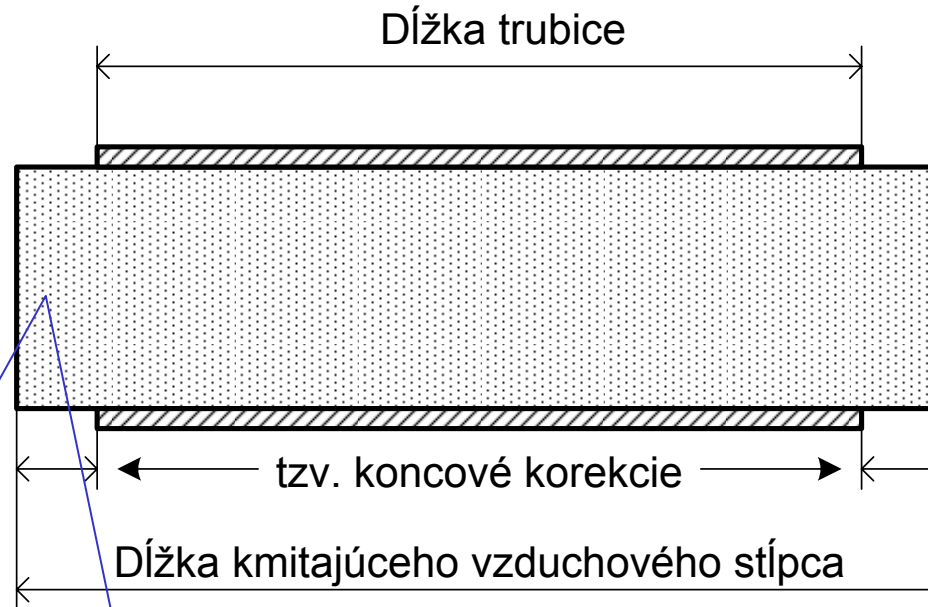
Náhradná schéma ozvučnice (VB)

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 piesť“ 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=136cm²
| 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 'Gy1' 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={({roh*w^2)/(2*pi*c0)}
```

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

```
SD={Sd} |Piston
```

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

```
AcouResistance 'Rab' Node=21=22 Ra=1Pas/m3
```

```
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={({roh*w^2)/(2*pi*c0)}
```

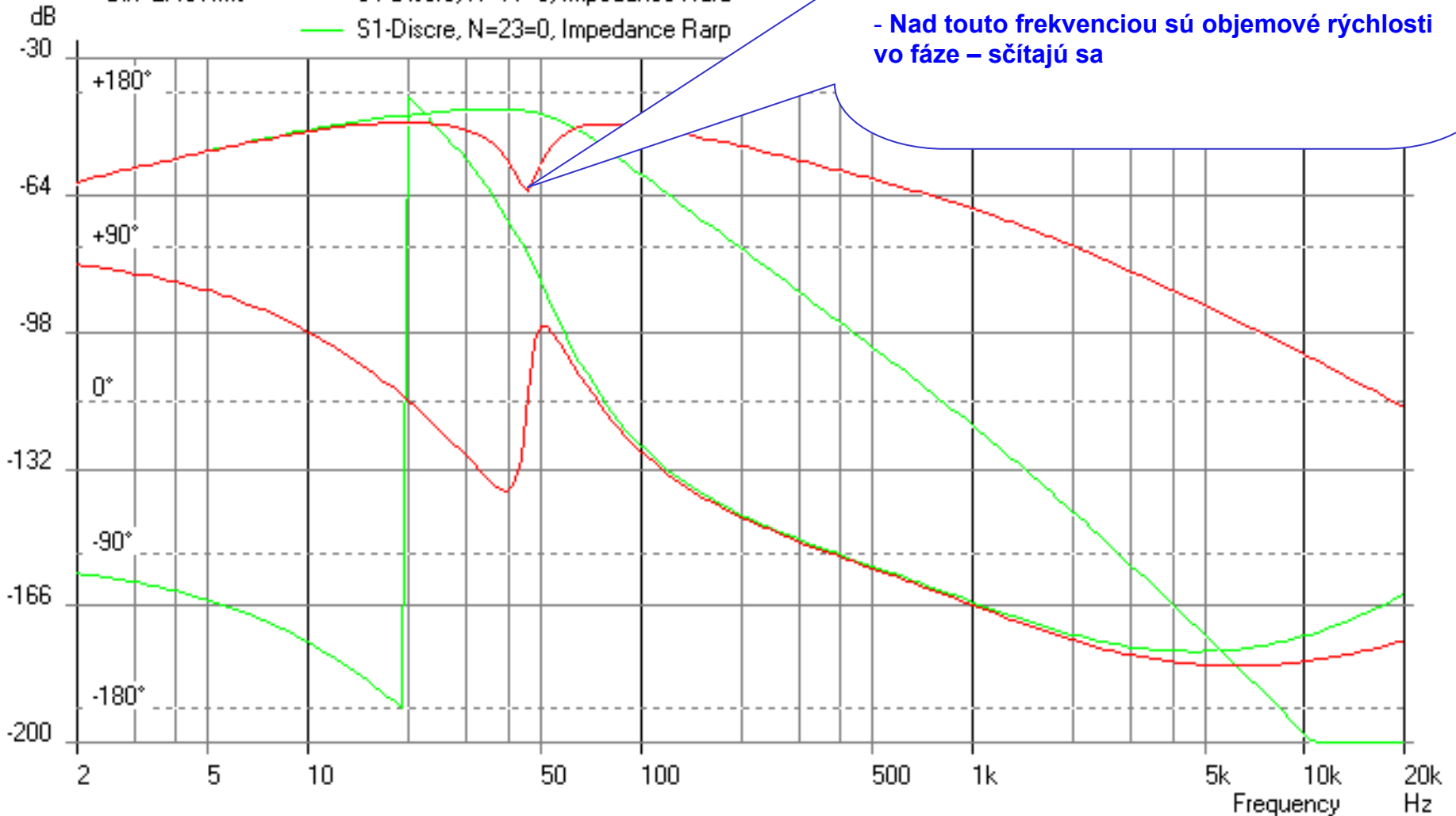
Objemové rýchlosti w_{AD} a w_{AP}

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

$U_{in}=2.43V_{rms}$

— S1-Discre, N=11=0, Impedance Rarp

— S1-Discre, N=23=0, Impedance Rarp



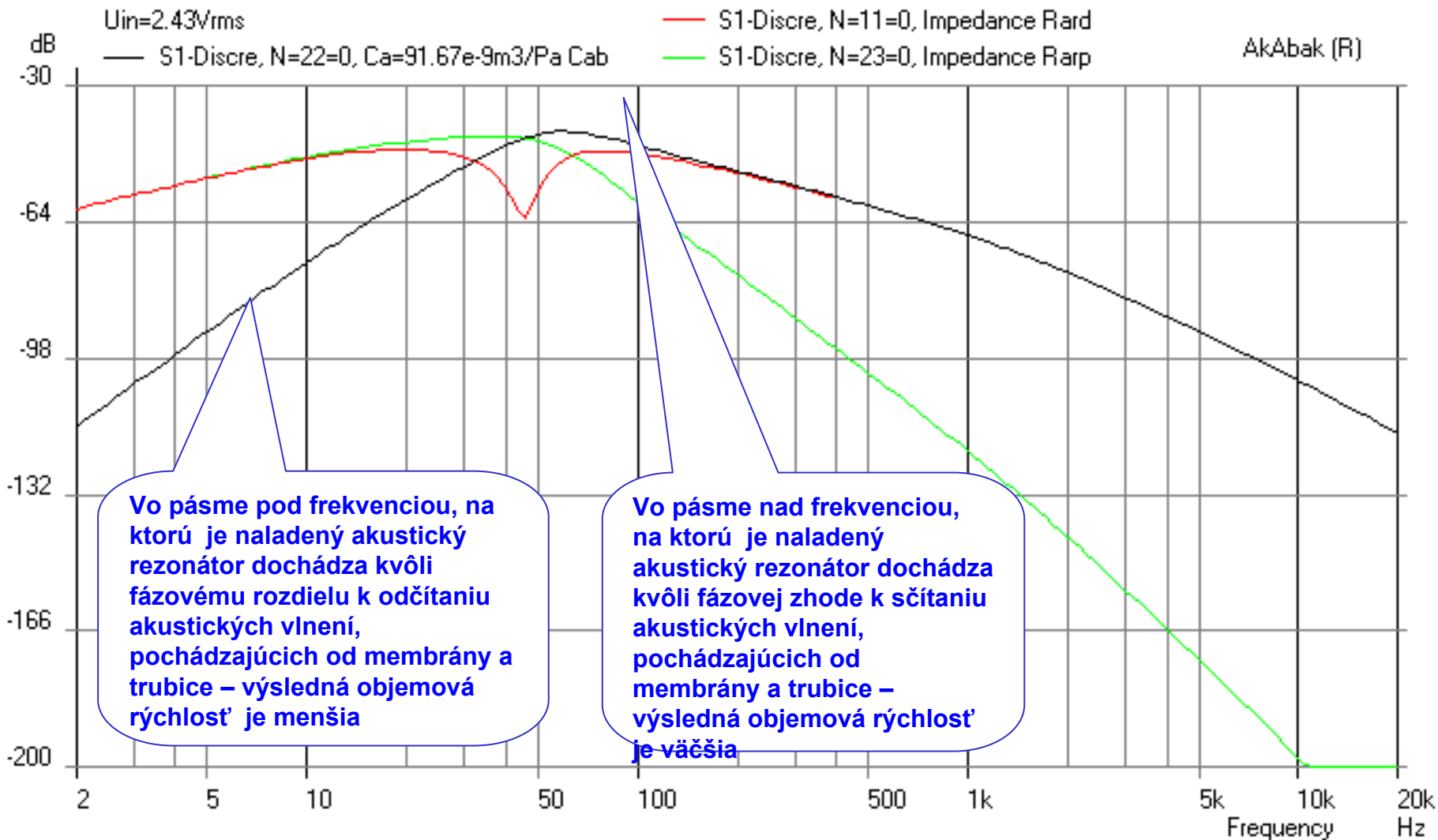
Frekvencia, pri ktorej sa mení fáza medzi objemovými rýchlosťami membrány reproduktora a akustickej (basreflexovej) trubice:

- Pod touto frekvenciou sú objemové rýchlosti v protifáze – dochádza k ich odčítaniu

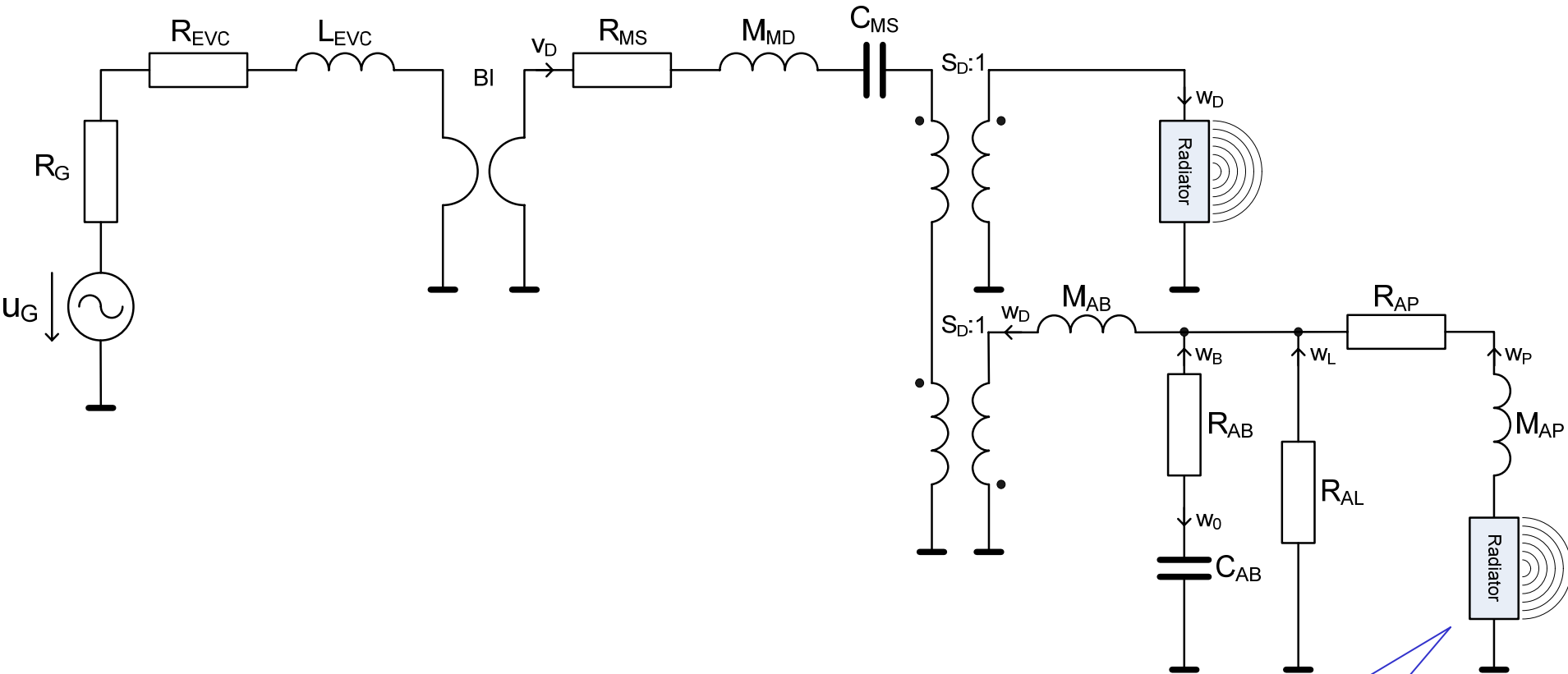
- Nad touto frekvenciou sú objemové rýchlosti vo fáze – sčítajú sa

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

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

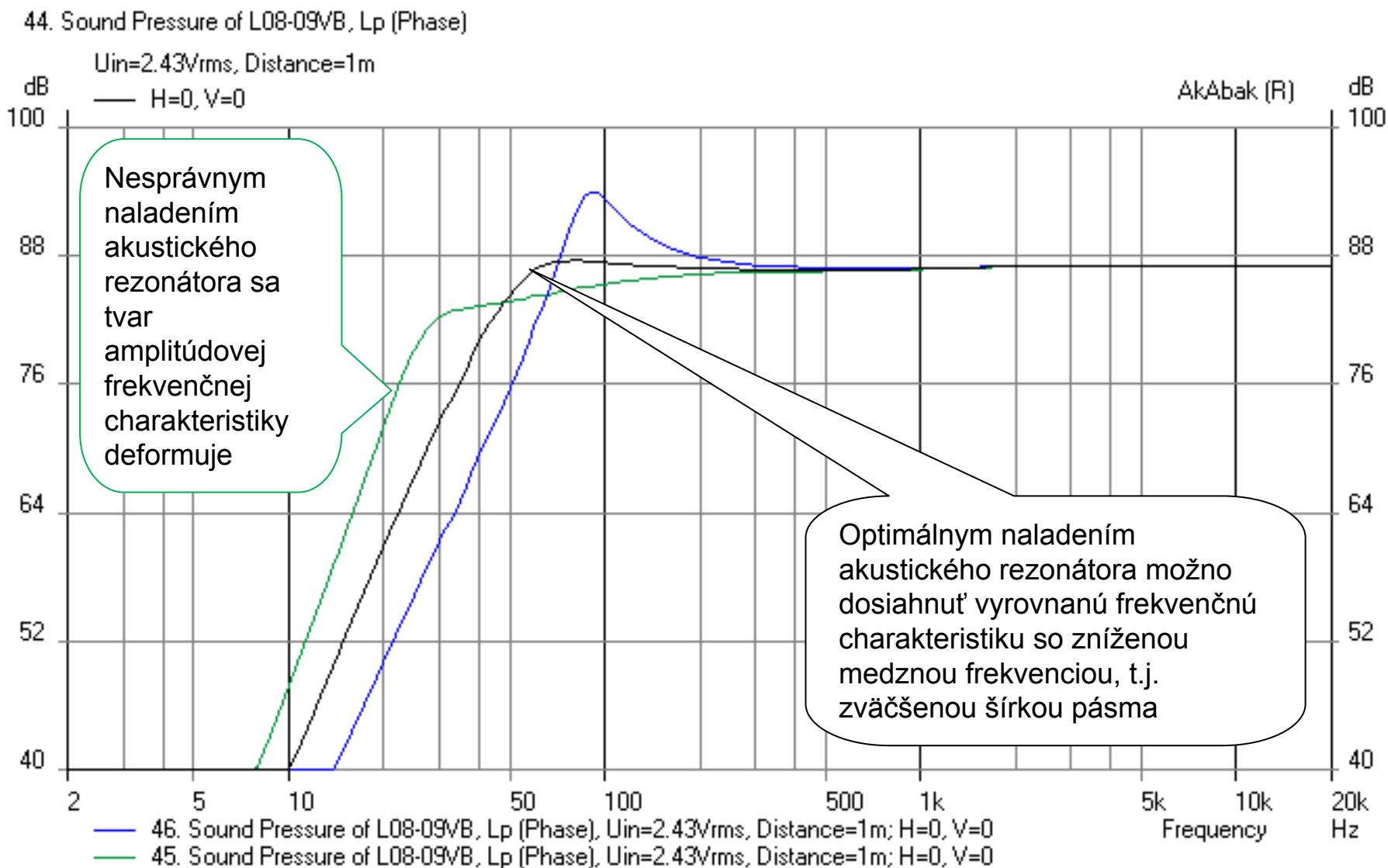


Náhradná schéma sústavy VB, upravená pre simuláciu v programe AkAbak

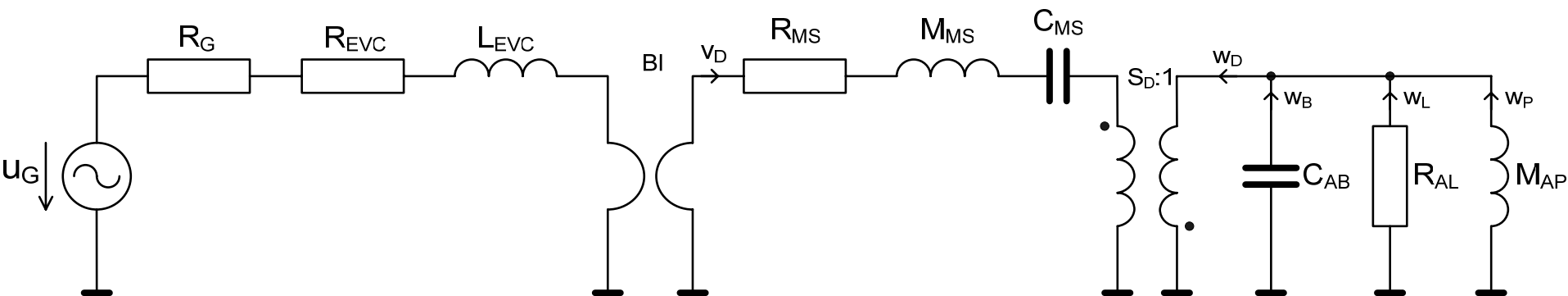


Radiator „zabezpečí“
vysielanie akustickej vlny z
ústia basreflexovej trubice

Rôzne „naladenie“ sústavy (VB)



Upravená a zjednodušená náhradná schéma sústavy VB



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

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

$$R_{AB} = 0; \quad R_{AP} = 0; \quad R_{ARD} \rightarrow 0; \quad R_{ARP} \rightarrow 0$$

TS parametre basreflexovej ozvučnice

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

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

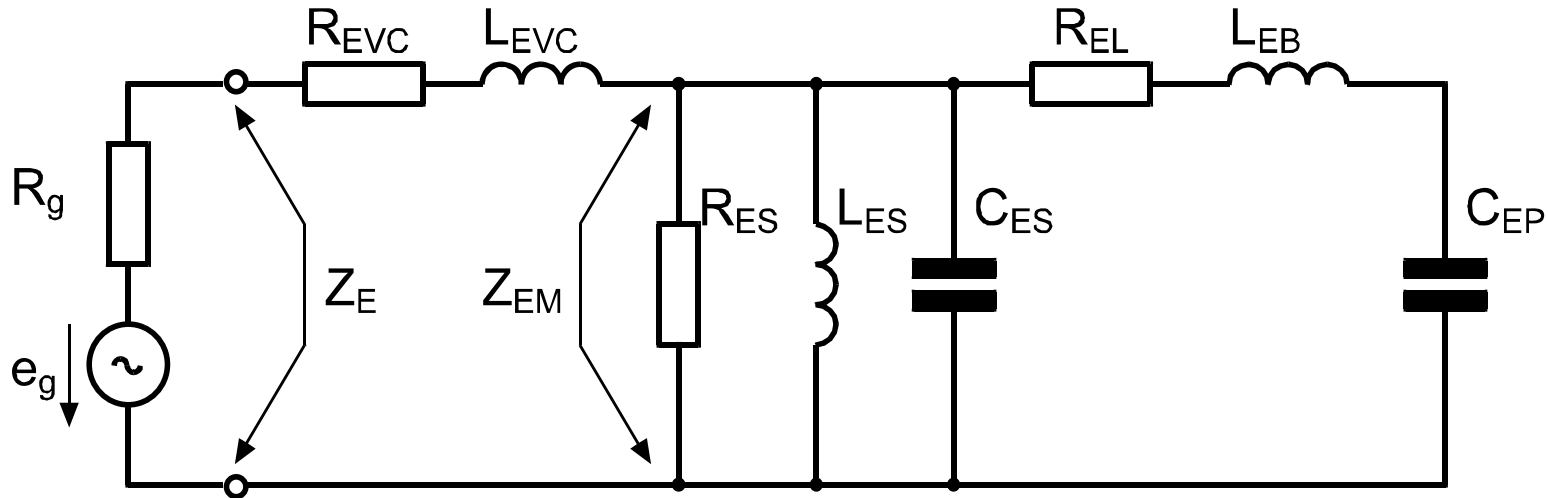
Konštanty, používané pri návrhu sústavy VB

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

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

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

Náhradná elektrická schéma sústavy VB



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

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

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

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

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

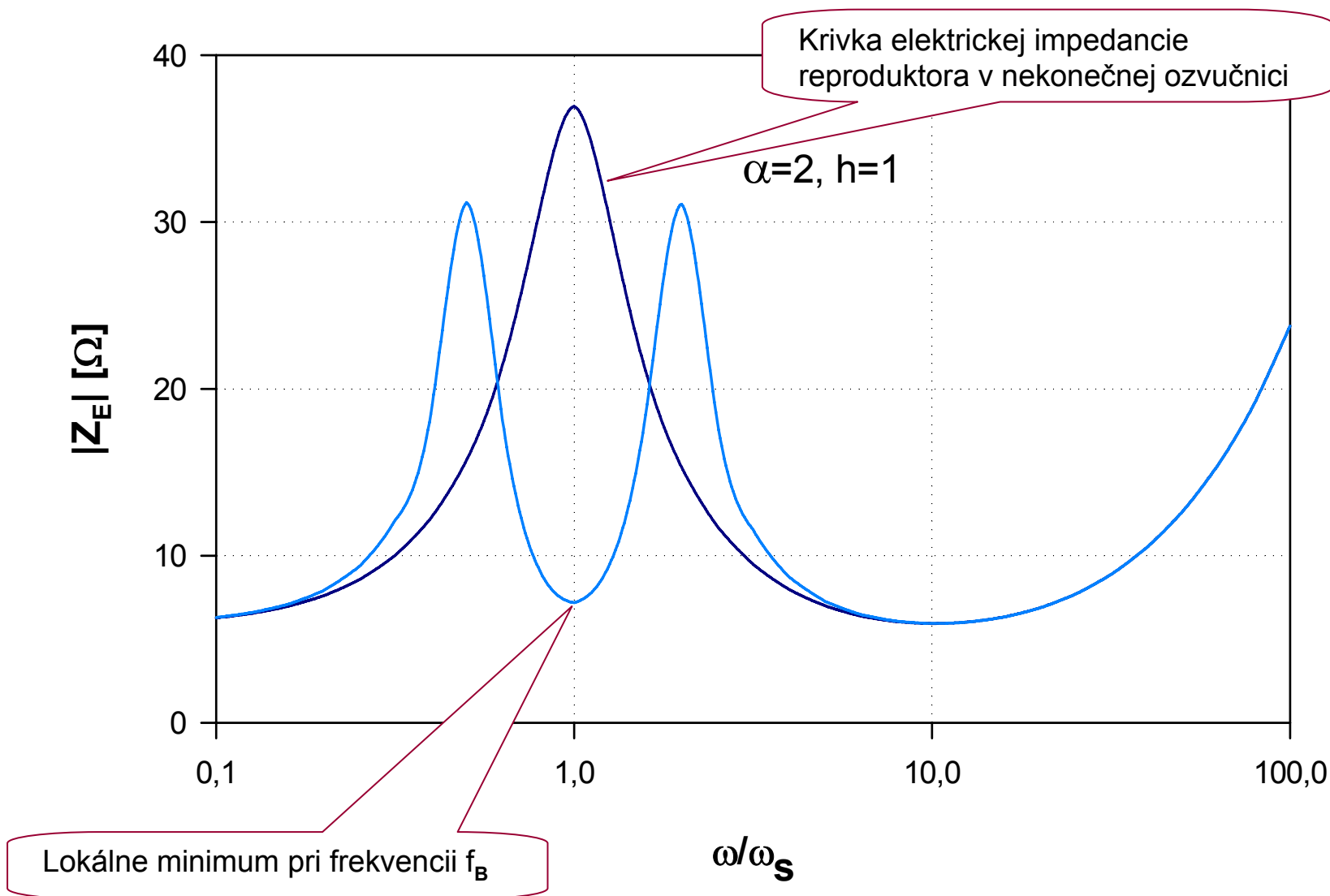
$$C_{EP} = \frac{S_D^2 \cdot M_{AP}}{(Bl)^2}$$

Elektrická impedancia sústavy VB

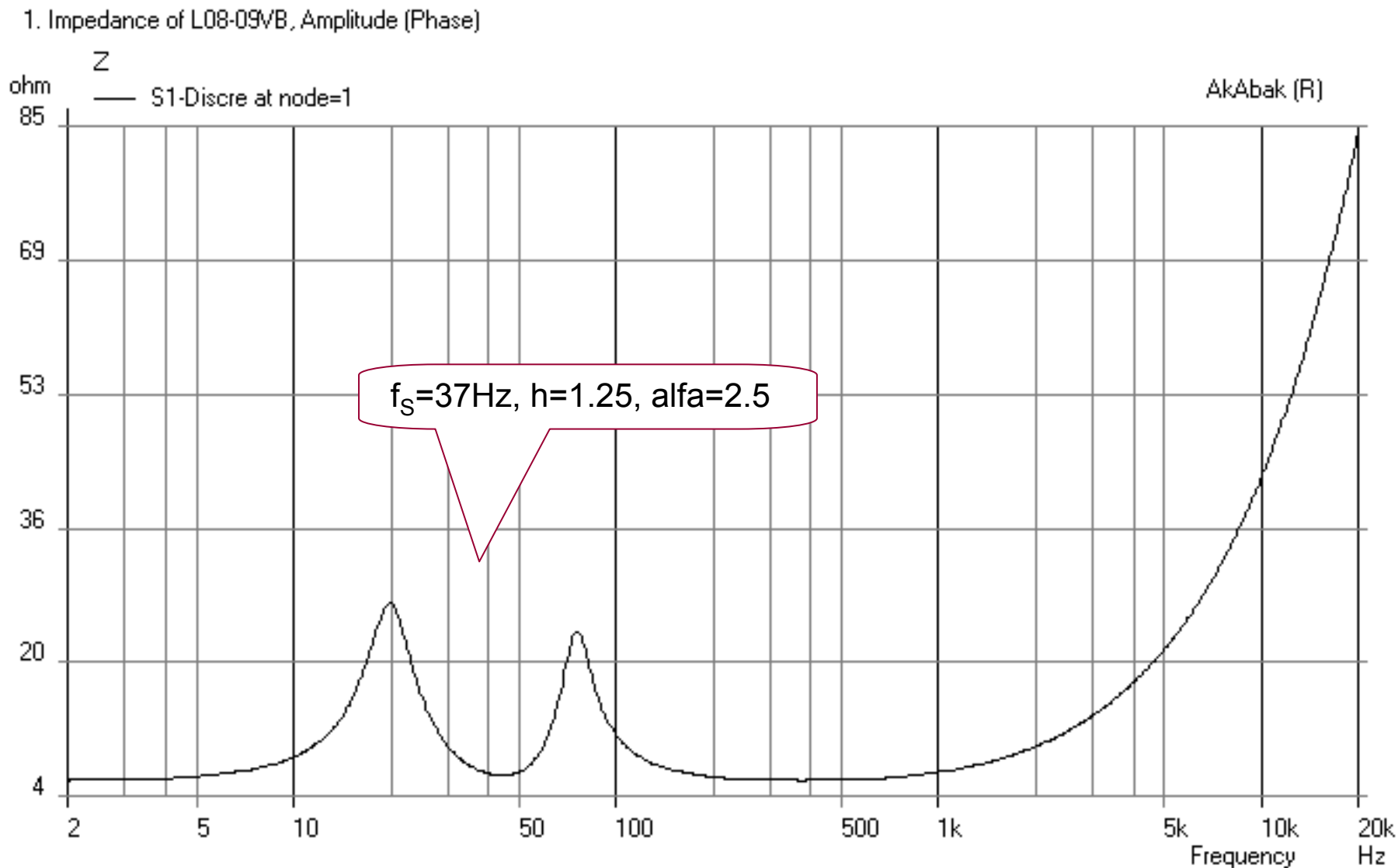
$$Z_E = R_{EVC} + sL_{EVC} + \frac{1}{\underbrace{\frac{1}{R_{ES}} + \frac{1}{sL_{ES}} + sC_{ES}}_{Z_{EM}} + \frac{1}{R_{EL} + sL_{EB} + \frac{1}{sC_{EP}}}}$$

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

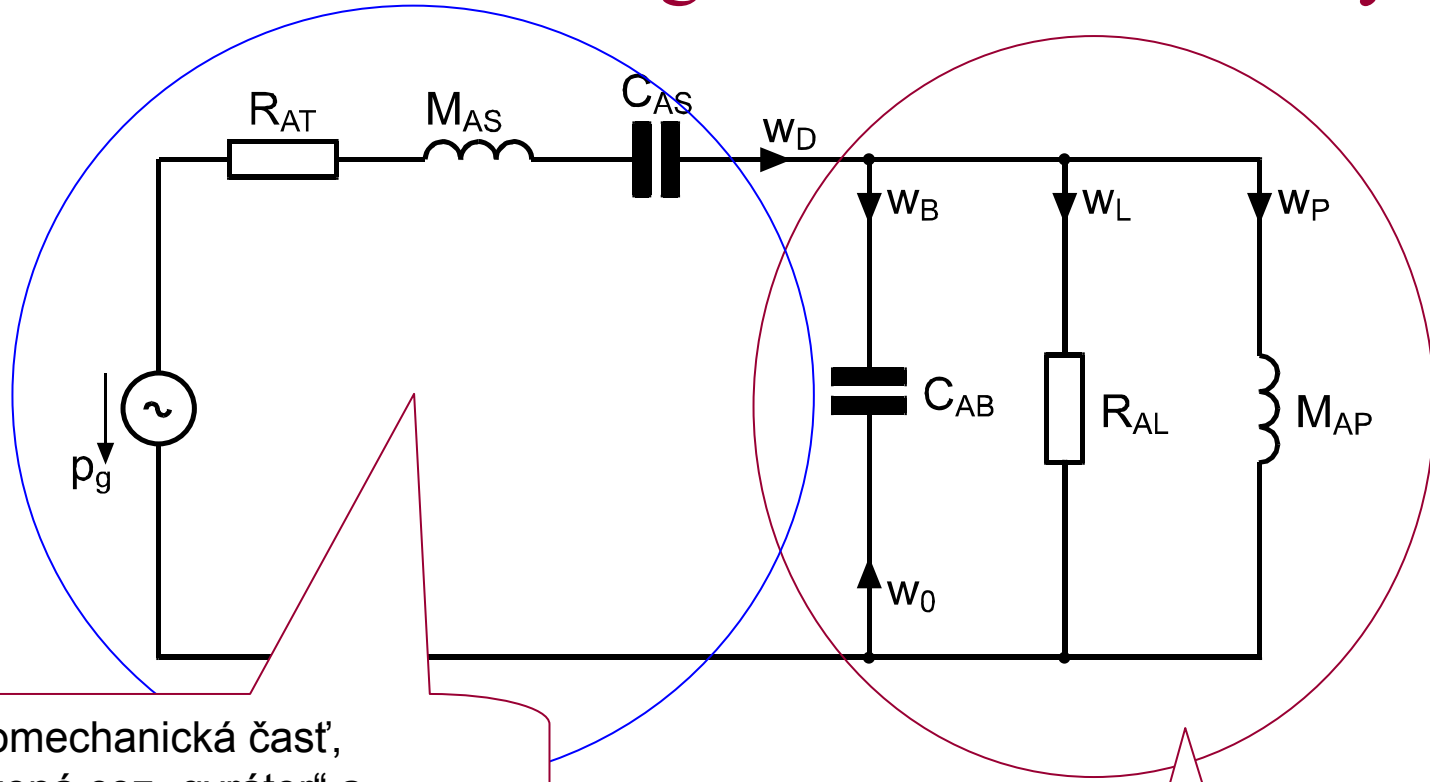
Elektrická impedancia sústavy VB



Elektrická impedancia sústavy VB pri simulácii v programe AkAbak



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 akustickom poli sústavy

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

Akustický tlak v akustickom poli sústavy

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

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

Akustický tlak v akustickom poli sústavy

$$p_0(s) = p_m \cdot G_{VB}(s)$$

$$p_m = \frac{\rho_0}{2\pi r} \cdot \frac{u_G \cdot (Bl) \cdot S_D}{(R_G + R_{EVC}) \cdot M_{MS}} \quad - \quad \text{amplitúda}$$

$$G_{VB}(s) = \frac{N(s)}{D(s)} \quad - \quad \text{prenosová funkcia}$$

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.

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

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

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

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

Charakteristická frekvencia „filtra“

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

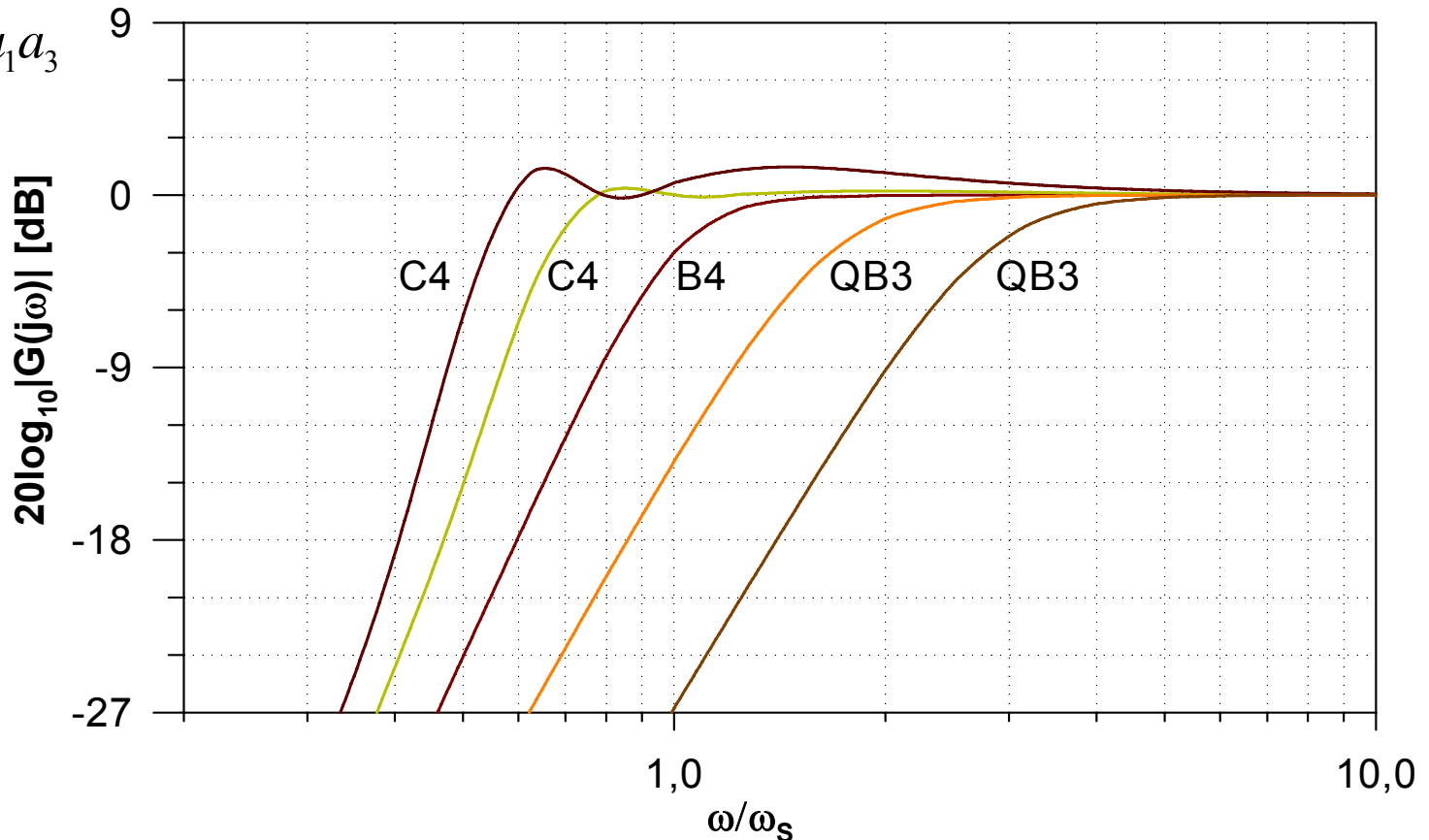
Amplitúdová frekvenčná charakteristika sústavy

$$\left|G_{VB}(s)\right|_{s=j\omega} = \left|G_{VB}(j\Omega_0)\right| = \frac{\Omega_0^4}{\sqrt{\Omega_0^8 + A_1\Omega_0^6 + A_2\Omega_0^4 + A_3\Omega_0^2 + 1}}; \quad \Omega_0 = \frac{\omega}{\omega_0}$$

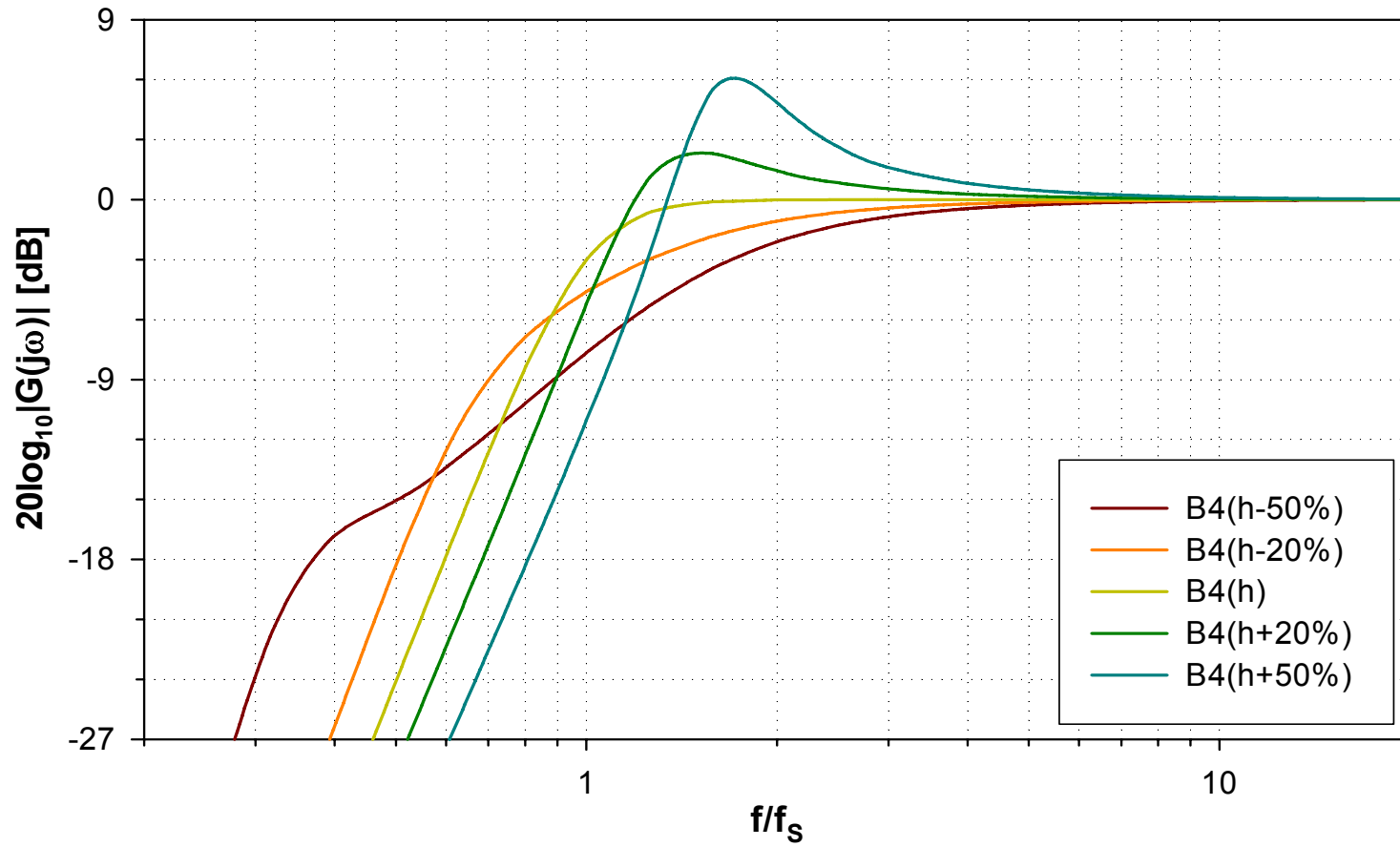
$$A_1 = a_1^2 - 2a_2$$

$$A_2 = a_2^2 + 2 - 2a_1a_3$$

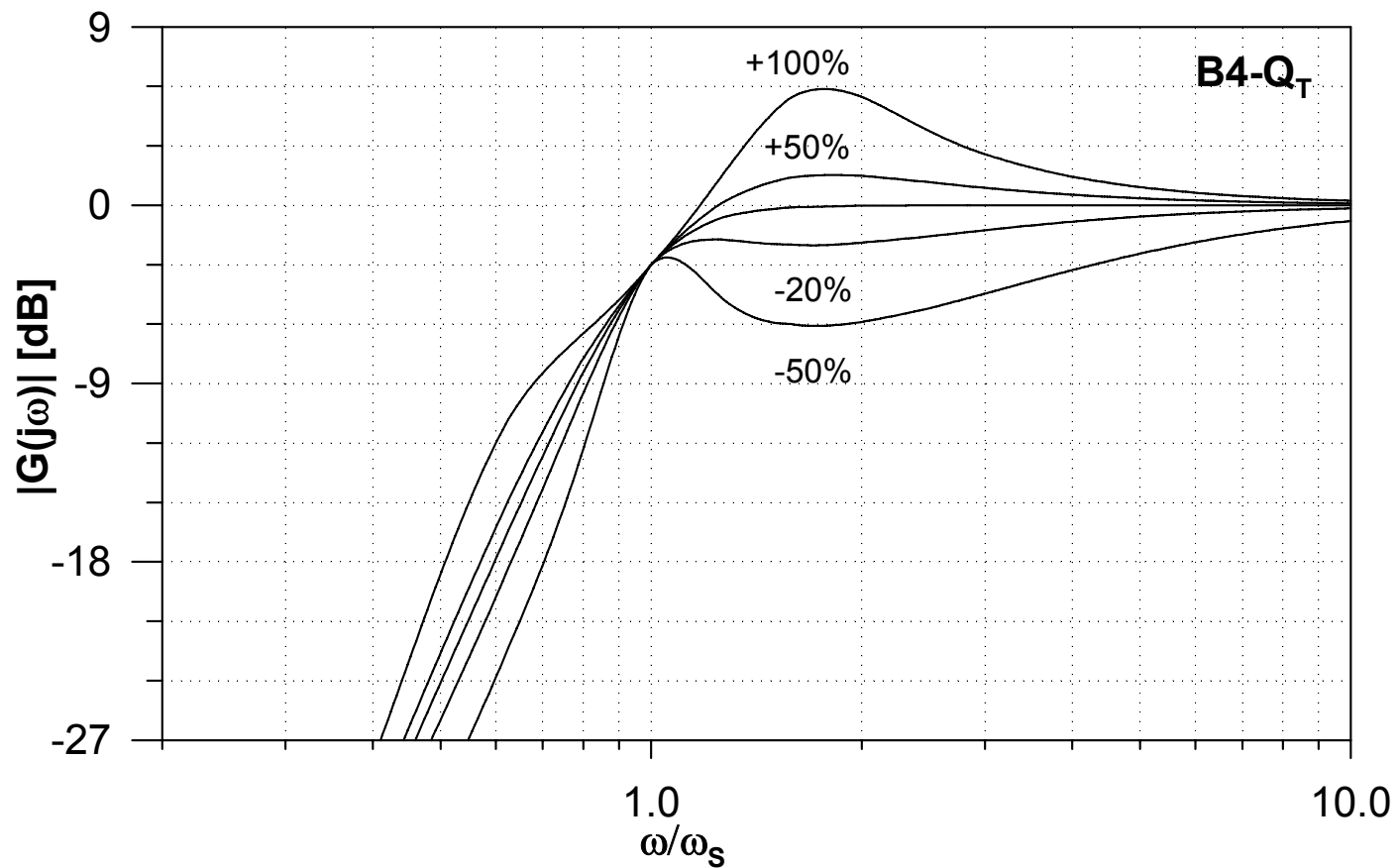
$$A_3 = a_3^2 - 2a_2$$



Citlivosť basreflexových sústav na rozptyl parametra h



Citlivosť basreflexových sústav na rozptyl parametra Q_T



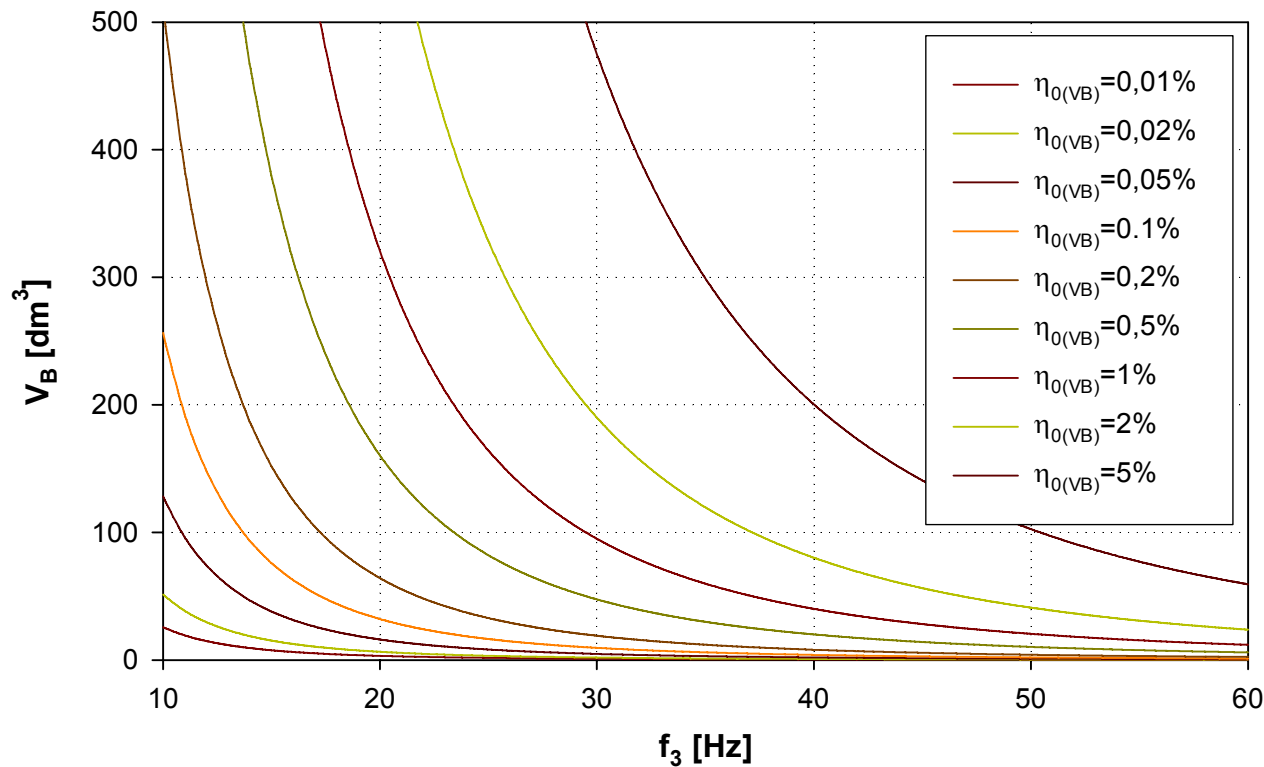
Menovitá účinnosť basreflexovej sústavy

- 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

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

Maximálna účinnosť basreflexovej sústavy

$$\eta_{N(VB),\max} = 3.9 \cdot 10^{-6} \cdot f_{3(VB)}^3 \cdot V_B \quad \left[-; Hz, m^3 \right]$$



Každá sústava, ktorá má dolnú medznú frekvenciu $f_{3(VB)}$ a objem V_B , bude mať menovitú účinnosť menšiu, než je hodnota $\eta_{N(VB),\max}$, odčítaná z grafu

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

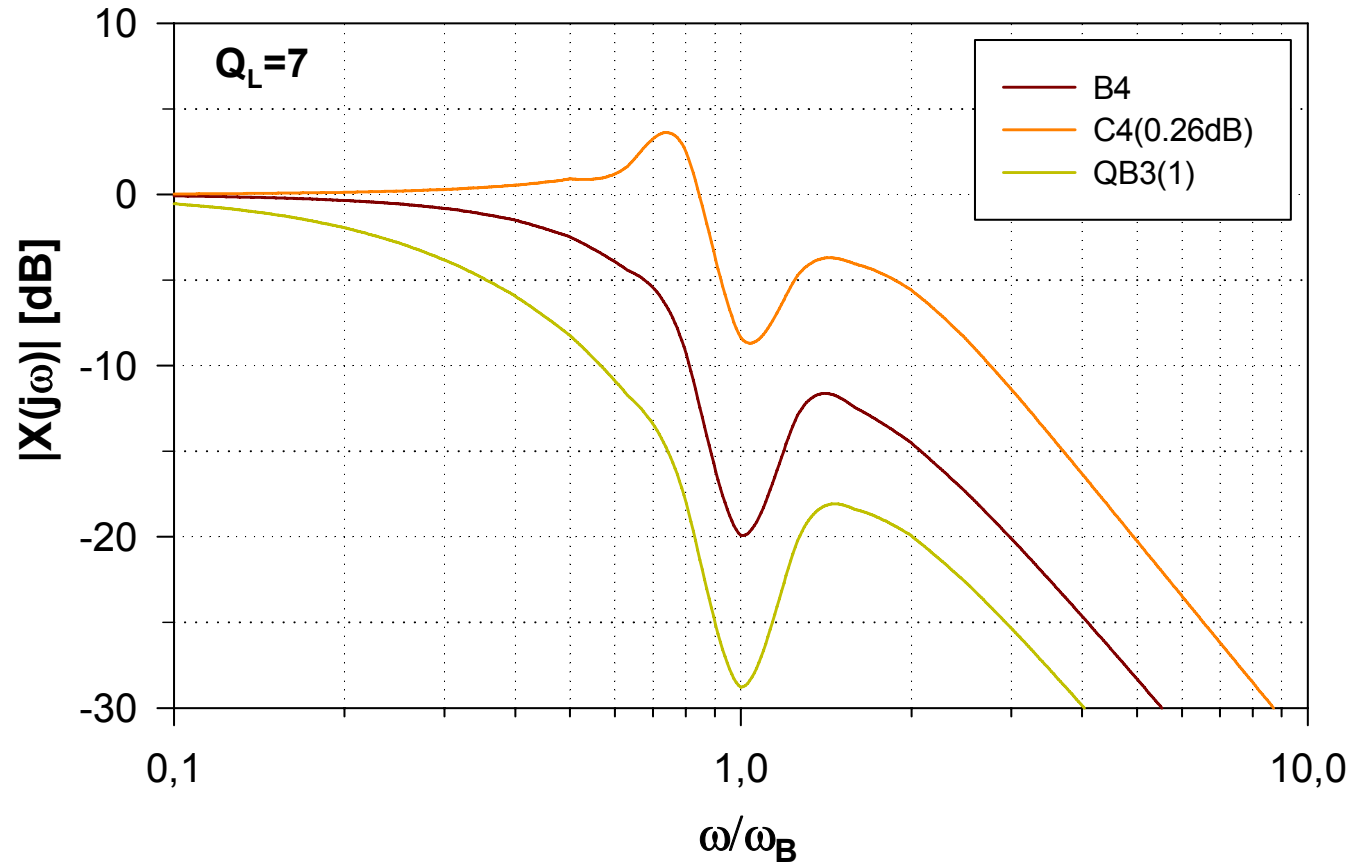
to znamená, že reproduktor nie je basreflexovou ozvučnicou vôbec tlmený (na rozdiel od reproduktora v zatvorenej ozvučnici)

Prenosová funkcia výchyľky membrány reproduktora v br. ozvučnici

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

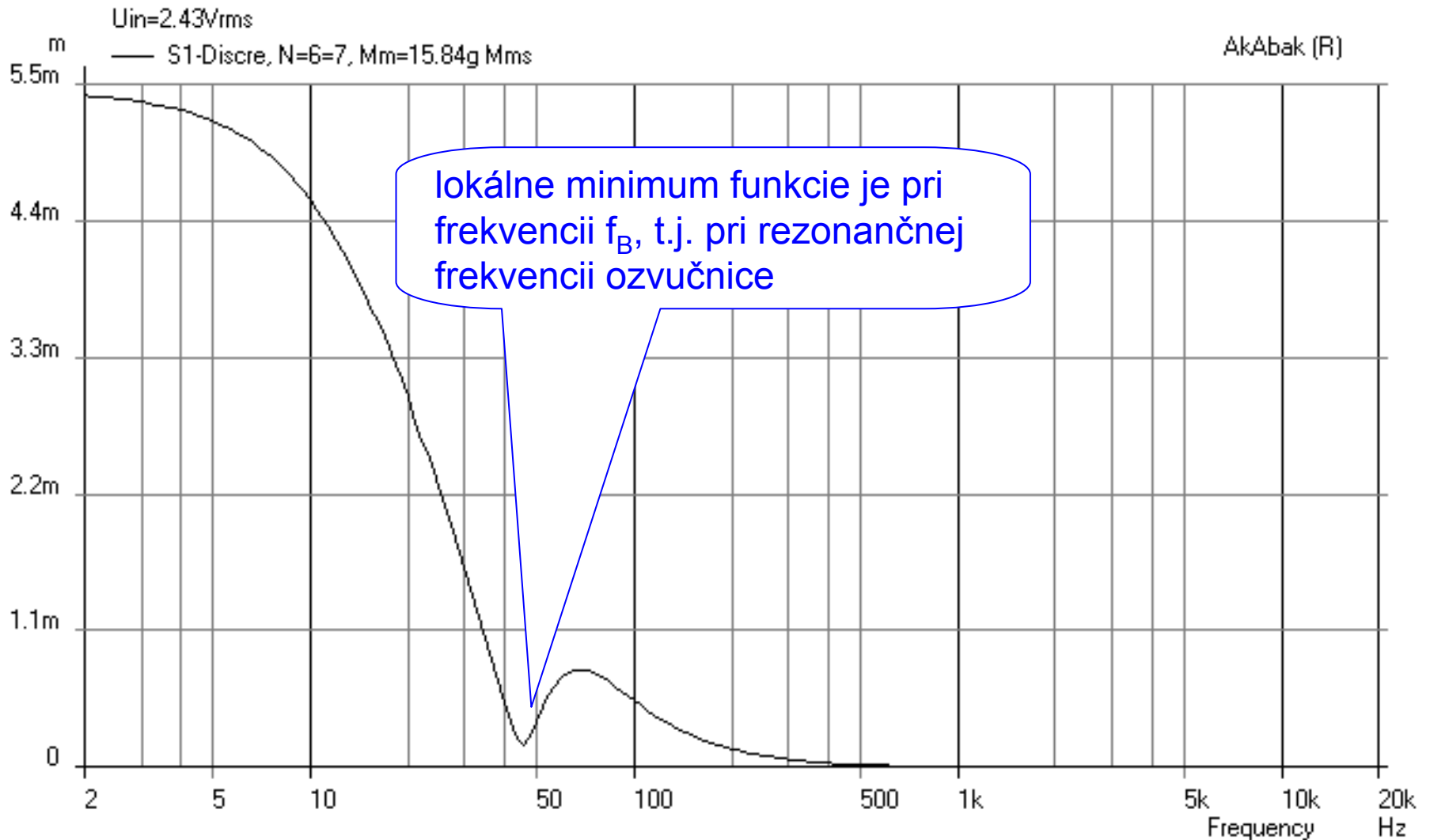
$$b_1 = \frac{1}{h}$$

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



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-Chebyshev)
- 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 tromi typmi:

- E) C4 (Fourth-Order Chebyshev)
- 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.

Aproximácia B4

(Butterworthov filter 4. rádu)

$$|G(j\Omega_0)|^2 = \frac{\Omega_0^8}{\Omega_0^8 + 1} \Rightarrow A_1 = A_2 = A_3 = 0$$

$$\left. \begin{array}{l} a_2 = 2 + \sqrt{2} \\ a_1 = a_3 = \sqrt{2a_2} \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{array}{l} h = 1 \\ q = 1 \end{array} \Rightarrow \begin{array}{l} f_B = f_S \\ f_{-3dB} = f_S \end{array}$$

Q_L	α	h	Q_T	q
∞	1.414	1	0.383	1
20	1.286	1	0.390	1
10	1.163	1	0.398	1
7	1.061	1	0.405	1
5	0.932	1	0.414	1
3	0.653	1	0.439	1

Aproximácia QB3

(„Kvázi“-Butterworthov filter 3. rádu)

$$|G(j\Omega_0)|^2 = \frac{\Omega_0^8}{\Omega_0^8 + B^2\Omega_0^2 + 1} \Rightarrow A_3 = B^2; A_2 = A_1 = 0$$

1. Zvolíme $B > 0$

2. Riešime algebraickú rovnicu:

$$\left. \begin{array}{l} A_1 = a_1^2 - 2a_2 = 0 \\ A_2 = a_2^2 + 2 - 2a_1a_3 = 0 \\ A_3 = a_3^2 - 2a_2 = B^2 \end{array} \right\} \Rightarrow a_2^4 - 12a_2^2 - 8B^2a_2 + 4 = 0$$

3. Vyberieme $a_2 > 2 + \sqrt{2}$ a vypočítame:

$$a_1 = \sqrt{2a_2}$$

$$a_3 = \frac{a_2^2 + 2}{2a_1}$$

4. Vypočítame α, h, q, Q_T

Aproximácia C4/SC4

$$|G(j\omega)|^2 = \frac{\Omega_0^8}{\Omega_0^8 + A_1\Omega_0^6 + A_2\Omega_0^4 + A_3\Omega_0^2 + 1}; \quad \Omega_0 = \frac{\omega}{\omega_0}$$

$$\omega_0 = \left(\frac{64\varepsilon^2}{1 + \varepsilon^2} \right)^{\frac{1}{8}} \cdot \omega_N; \quad \omega_N = \frac{\omega_{-3dB}}{2} \sqrt{2 + \sqrt{2 + 2\sqrt{2 + \frac{1}{\varepsilon^2}}}}$$

$$A_1 = -0.25 \left(\frac{64\varepsilon^2}{1 + \varepsilon^2} \right)^{\frac{3}{4}}; \quad A_2 = 1.25 \left(\frac{64\varepsilon^2}{1 + \varepsilon^2} \right)^{\frac{1}{2}}; \quad A_3 = -2 \left(\frac{64\varepsilon^2}{1 + \varepsilon^2} \right)^{\frac{1}{4}}$$

Zvlnenie (R_{dB}) frekvenčnej charakteristiky:

$$\varepsilon = \sqrt{10^{\frac{R_{dB}}{10}} - 1} \Rightarrow R_{dB} = 10 \cdot \log_{10} (1 + \varepsilon^2)$$

Pri výpočte sa používa parameter k : $k = \tanh \left[\frac{1}{4} \sinh^{-1} \left(\frac{1}{\varepsilon} \right) \right]$

Aproximácia C4/SC4

1. Zvolíme si zvlnenie fr. charakteristiky $\Rightarrow \varepsilon = \sqrt{10^{\frac{R_{dB}}{10}} - 1}$

2. Vypočítame parameter k: $k = \tanh \left[\frac{1}{4} \sinh^{-1} \left(\frac{1}{\varepsilon} \right) \right]$

3. Vypočítame D: $D = \frac{k^4 + 6 \cdot k^2 + 1}{8}$

4. Vypočítame a_1, a_2, a_3 : $a_3 = \frac{k \cdot \sqrt{4 + 2\sqrt{2}}}{\sqrt[4]{D}}$

$$a_2 = \frac{1 + k^2 (1 + \sqrt{2})}{\sqrt{D}}$$

$$a_1 = \frac{a_3}{\sqrt{D}} \cdot \left[1 - \frac{1 - k^2}{2\sqrt{2}} \right]$$

5. Vypočítame α, h, q, Q_T

Návrh sústavy (VB): Výpočet základných parametrov sústavy

Cieľ: α, h, Q_{TS} a f_{-3dB}

Poznáme: a_1, a_2, a_3, Q_L

1. Nájdeme najväčší pozitívny reálny koreň rovnice:

$$|G(j\omega_{-3dB})|^2 = \frac{\Omega_0^8}{\Omega_0^8 + A_1\Omega_0^6 + A_2\Omega_0^4 + A_3\Omega_0^2 + 1} = \frac{1}{2}$$

$$\Omega_0^2 = d$$

$$d^4 - A_1d^3 - A_2d^2 - A_3d - 1 = 0 \Rightarrow d_{1,2,3,4}$$

Výpočet základných parametrov sústavy

2. Zo vzťahov pre a_1 a a_3 elimináciou premenných dostaneme:

$$\left. \begin{aligned} r^4 - c_1 \cdot r^3 + c_2 \cdot r - 1 &= 0 \\ c_1 &= a_1 \cdot Q_L \\ c_2 &= a_3 \cdot Q_L \\ r &= \sqrt{h} \end{aligned} \right\} \Rightarrow r_{1,2,3,4}$$

Rovnicu riešime a vyberieme pozitívny reálny koreň.

Výpočet základných parametrov sústavy

3. Zo hodnôt d a r vypočítame hľadané parametre nasledovne:

$$h = \frac{f_B}{f_S} = r^2 \Rightarrow f_B = f_S \cdot h = f_S \cdot r^2$$

$$\frac{\omega_{-3dB}}{\omega_0} = \sqrt{d} \Rightarrow q = \frac{f_{-3dB}}{f_S} = r\sqrt{d} \Rightarrow f_{-3dB} = f_S \cdot \sqrt{h} \cdot \sqrt{d} = f_S \cdot r \cdot \sqrt{d}$$

$$Q_T = \frac{hQ_L}{a_1\sqrt{h}Q_L - 1} = \frac{r^2Q_L}{a_1rQ_L - 1}$$

$$\alpha = \frac{V_{AS}}{V_{AB}} = h \left(a_2 - \frac{1}{Q_L Q_{TS}} - h \right) - 1 = r^2 \left(a_2 - \frac{1}{Q_L Q_{TS}} - r^2 \right) - 1 \Rightarrow V_{AB} = \frac{V_{AS}}{\alpha}$$

Ak existuje viac než jeden pozitívny reálny koreň r , vyberie sa taký, pomocou ktorého dostaneme kladné hodnoty α a Q_{TS} .

Ak existuje viac než jeden pozitívny reálny koreň d , výber závisí od hodnoty koreňa r :

$$r < 1 \Rightarrow d \leq r^2$$

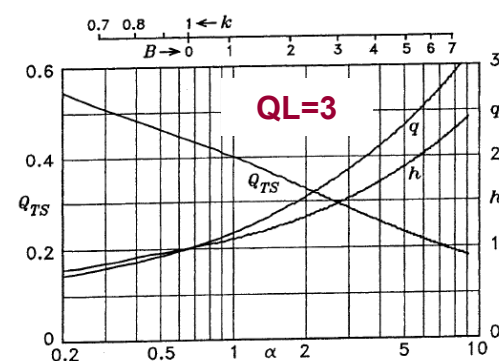
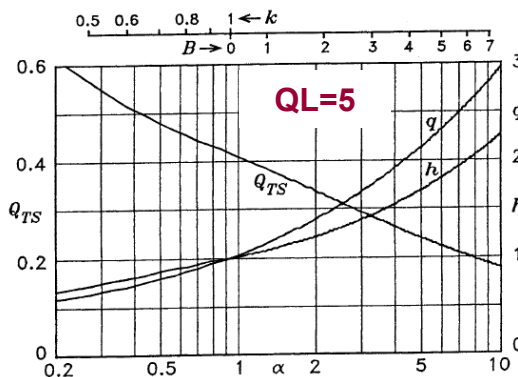
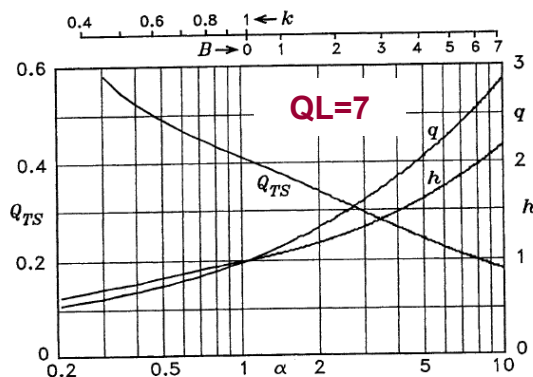
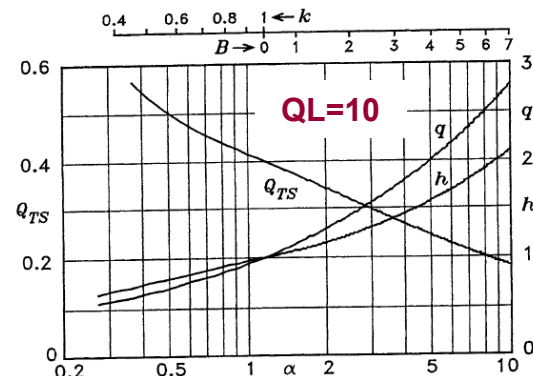
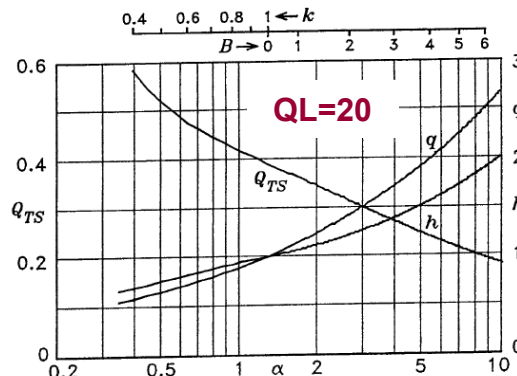
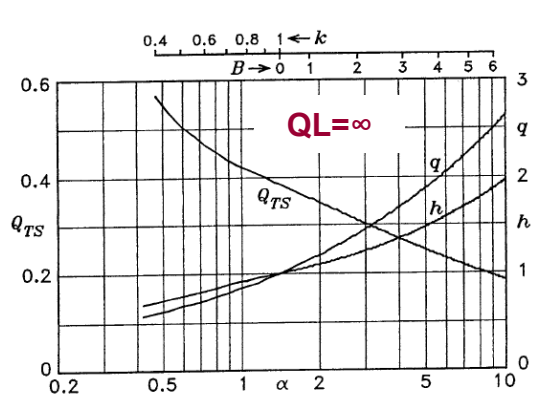
$$r > 1 \Rightarrow d \geq r^2$$

Výpočet základných parametrov sústavy

4. Ak $Q_L \rightarrow \infty$:

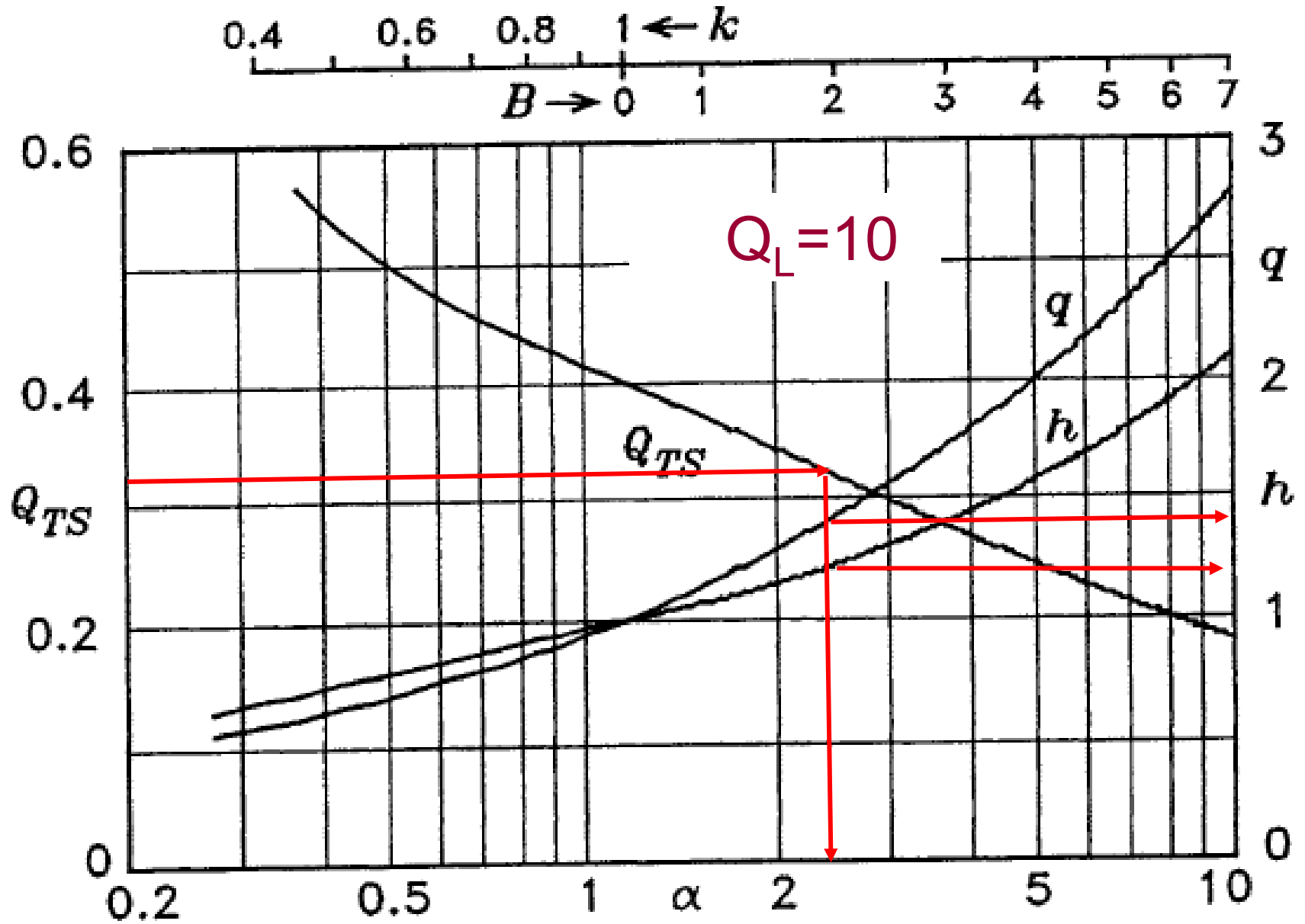
$$\left. \begin{aligned} a_1 &= \frac{1}{\sqrt{h} \cdot Q_T} \\ a_2 &= \frac{\alpha + 1 + h^2}{h} \\ a_3 &= \frac{\sqrt{h}}{Q_T} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{aligned} h &= \frac{a_3}{a_1} \\ \alpha &= a_2 \cdot h - h^2 - 1 \\ Q_T &= \frac{1}{\sqrt{a_1 \cdot a_3}} \end{aligned}$$

Grafická metóda 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 navrhnúť 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



Príklad 1: pokračovanie

- Určíme minimálnu priemer akustickej trubice:

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

- Z nomogramu (vid' nasl. slajd) určíme rozmery trubice:

nomogram pre
určenie rozmerov
basreflexovej
trubice z objemu
a rezonančnej
frekvencie
ozvučnice

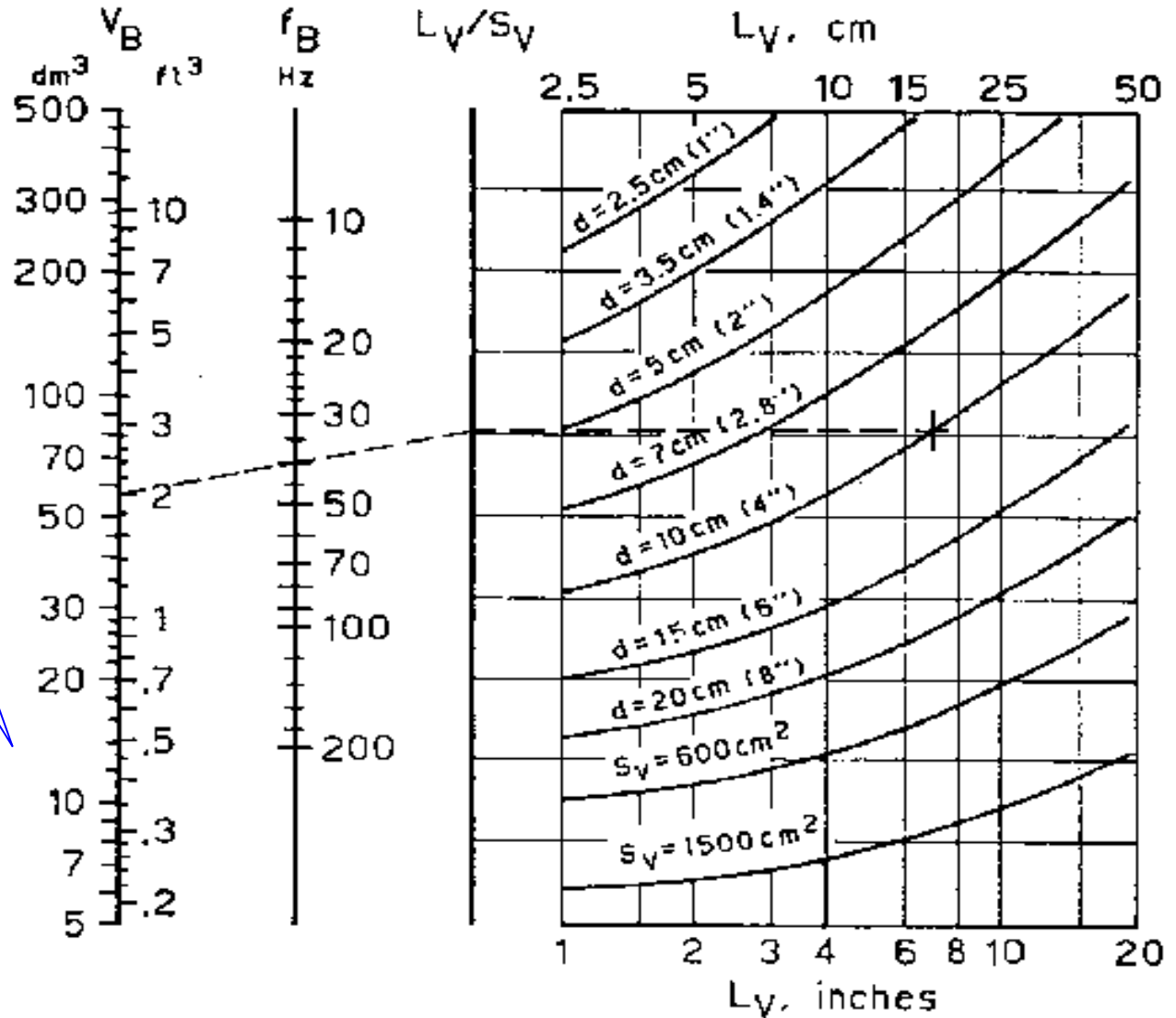


Fig. 21. Nomogram and chart for design of ducted vents.

Výpočet dĺžky basreflexovej trubice

• ...

$$M_{AP} = \frac{\rho_0}{N_P \cdot S_P} \cdot (l_P + k_{end} \cdot D_P)$$

⇓

$$l_P = \frac{c_0^2}{16\pi} \cdot \frac{D_P^2}{f_B^2 V_{AB}} \cdot N_P - k_{end} \cdot D_P$$

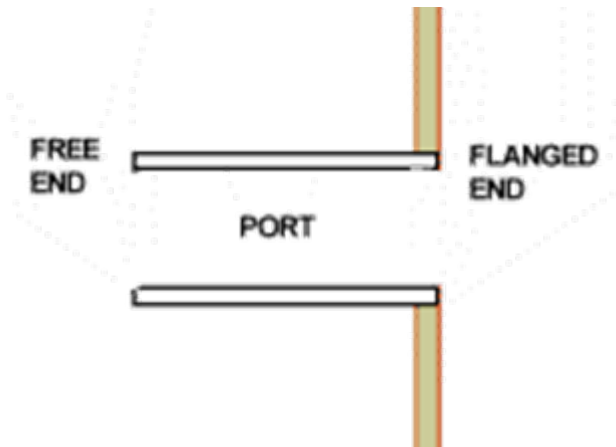
kde:

D_P – priemer trubice

l_P – dĺžka trubice

N_P – počet trubíc

k_{end} – tzv. koncová korekcia



Minimálna vysielačacia plocha basreflexovej trubice

• ???

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

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

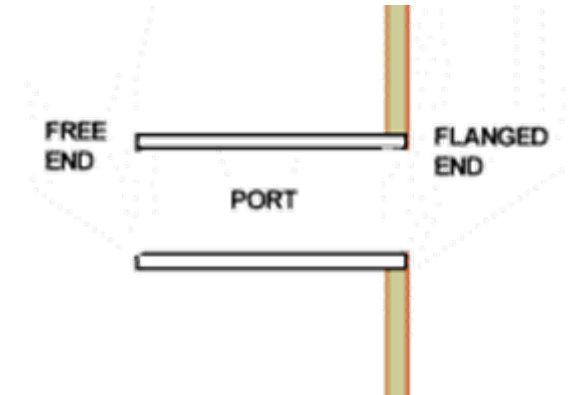
kde :

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

hodnota maximálnej výchylky z katalógového listu reproduktora

Konštanty koncových korekcií

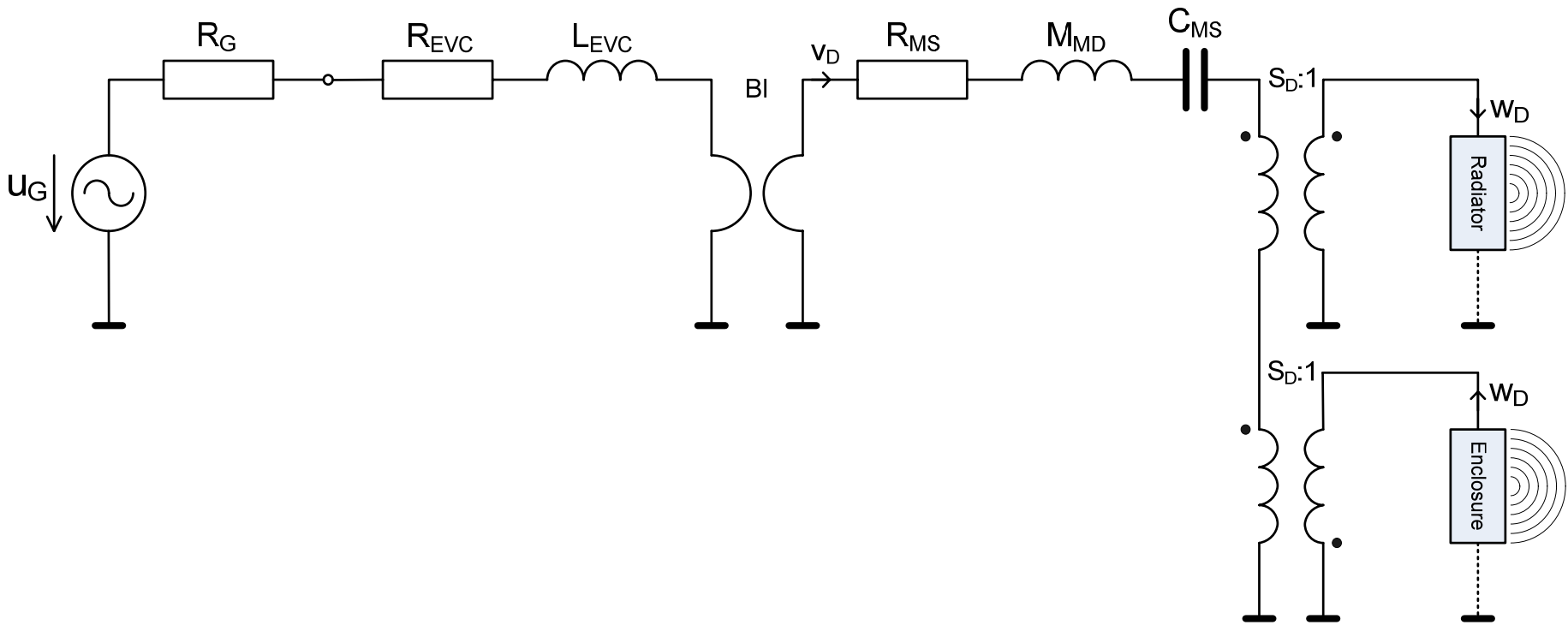
- Flanged End: $k_{\text{flanged}} = 0.425$
- Free End: $k_{\text{free}} = 0.307$



- Napr:
- both ends were flanged: $k_{\text{end}} = 0.425 + 0.425 = 0.850$
- one flanged, one free: $k_{\text{end}} = 0.425 + 0.307 = 0.732$
- both ends were free: $k_{\text{end}} = 0.307 + 0.307 = 0.614$
- Normally, $k_{\text{end}}=0.732$ is assumed

- In practice, it's best to use ports that are slightly longer than predicted by the above equations, then adjust their length until the correct tuning is achieved. It is much easier to shorten a port than to lengthen it!

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=136cm²
| 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

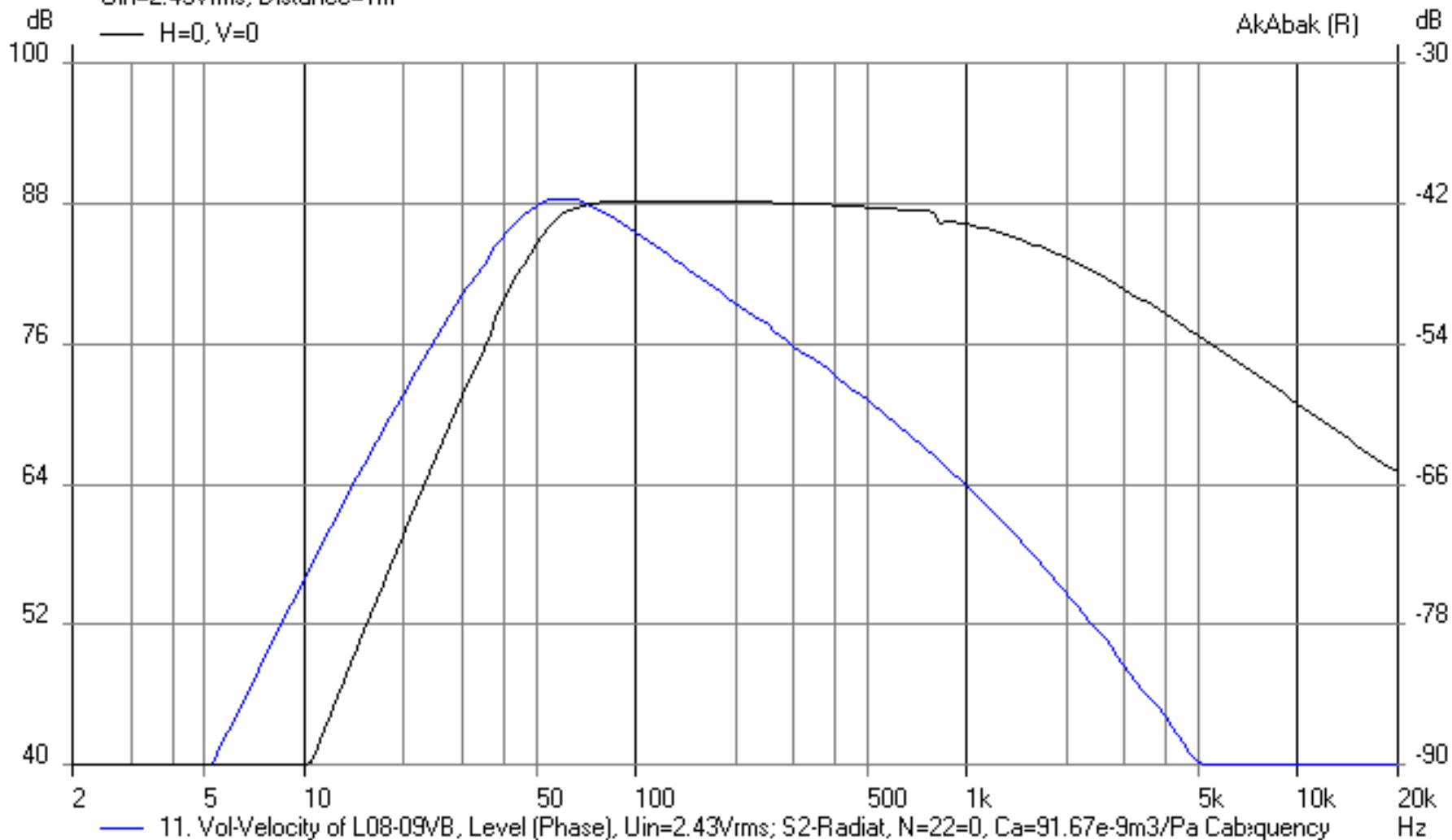
Coupler 'front' Node=8=9=10
SD={Sd} |Piston
Radiator 'Rad1' Def='front' Node=10
x=0 y=0 z=0 HAngle=0 VAngle=0

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)

Uin=2.43Vrms, Distance=1m

— H=0, V=0

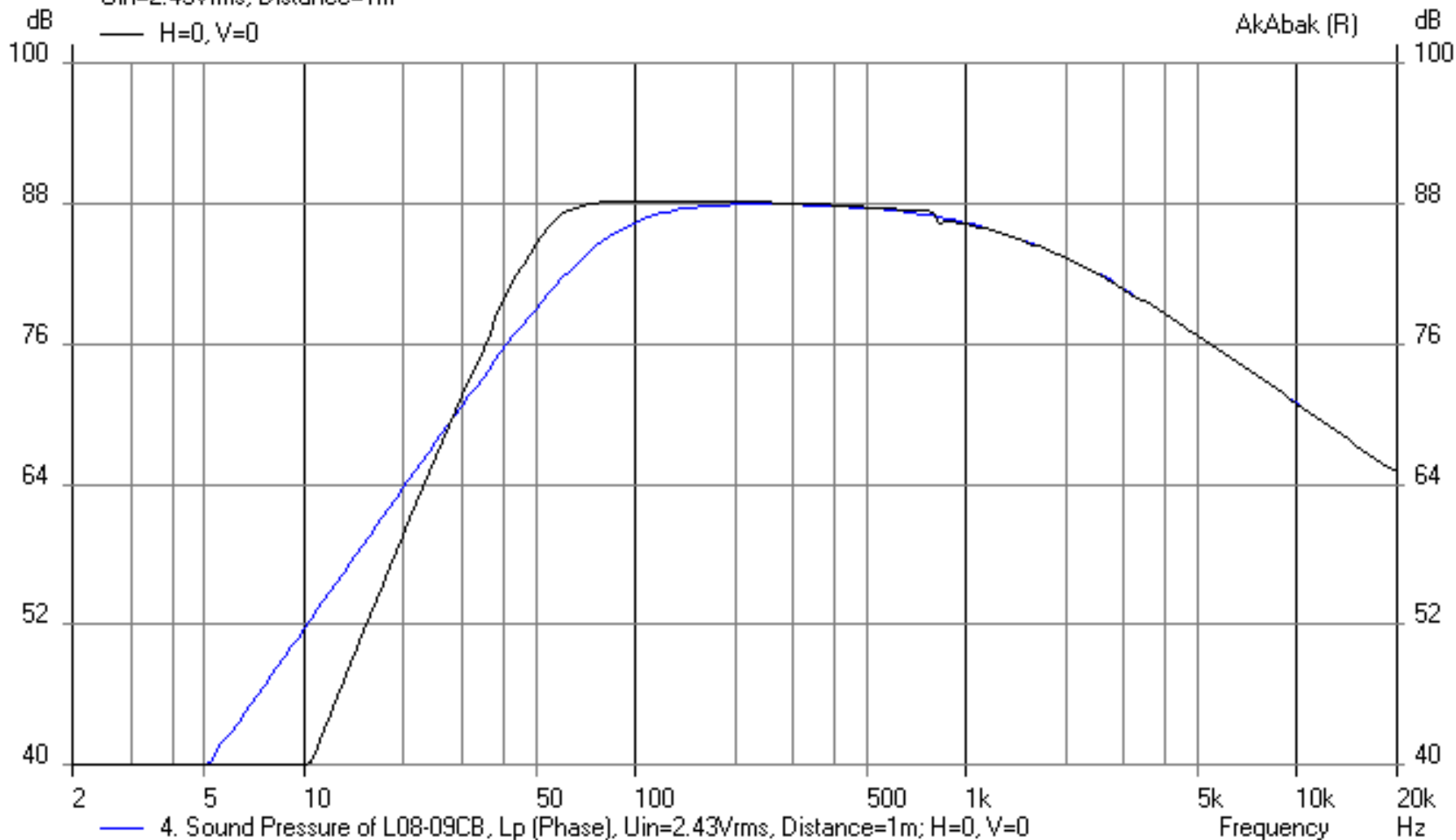


Porovnanie CB a VB

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

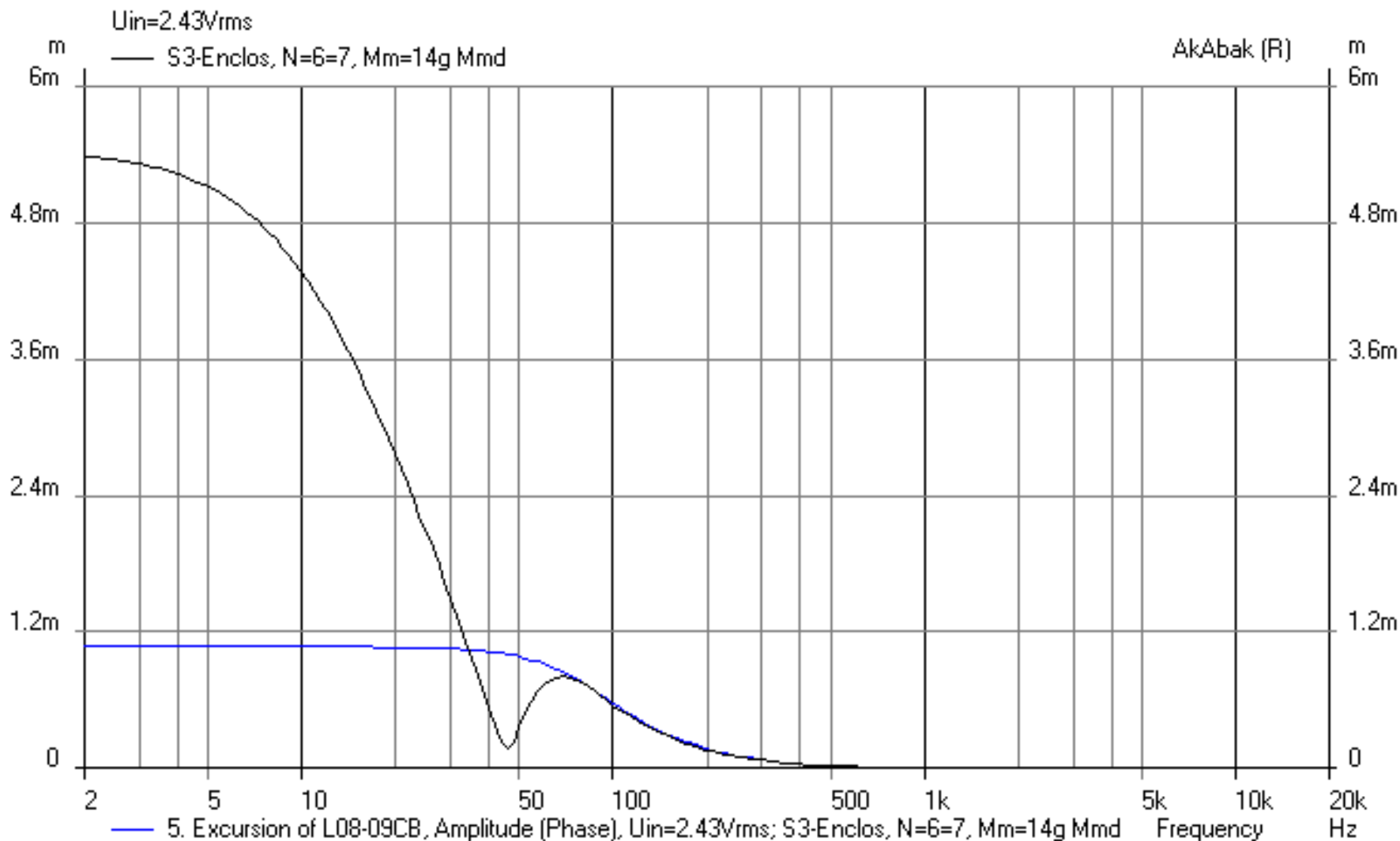
Uin=2.43Vrms, Distance=1m

— H=0, V=0

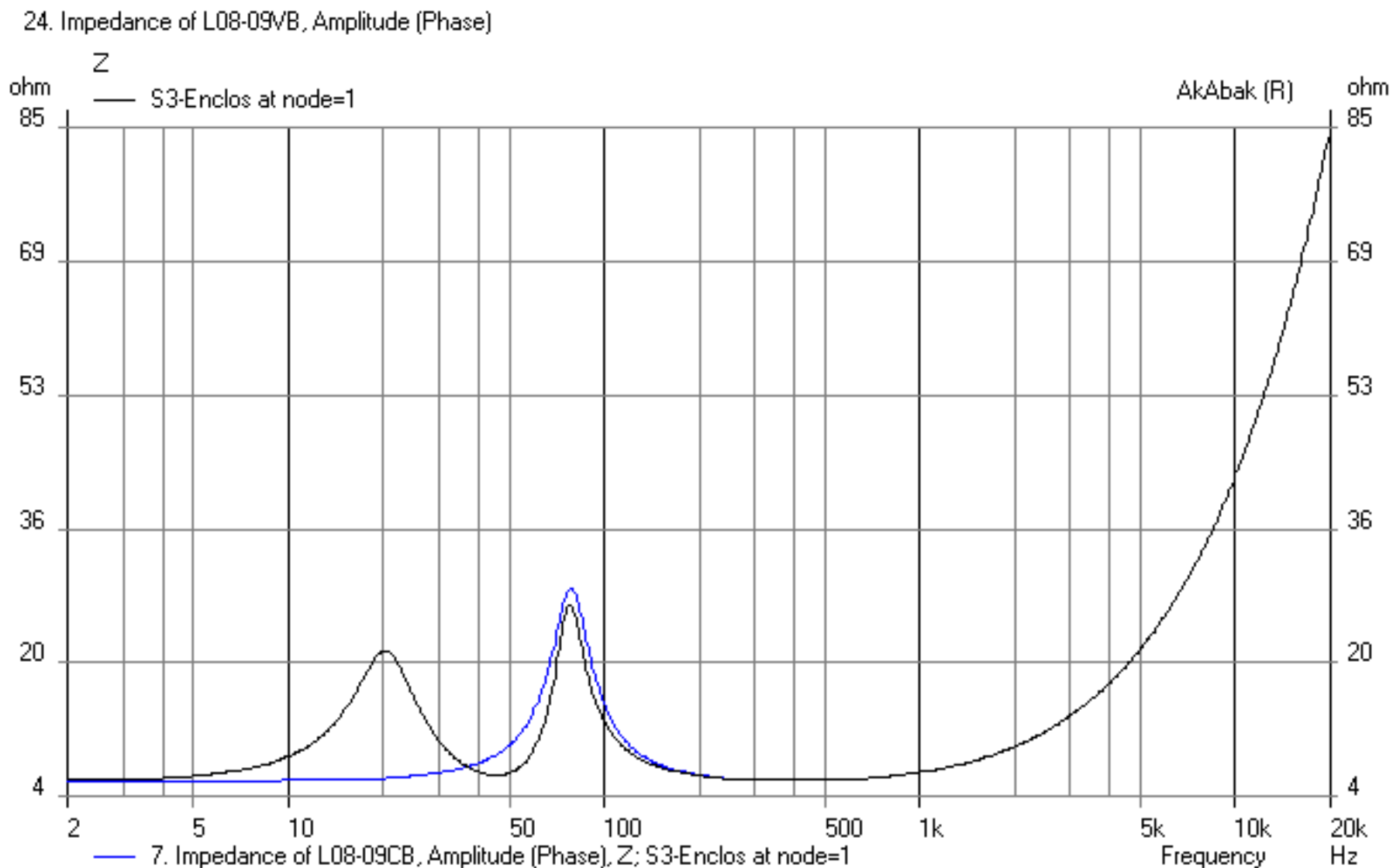


Porovnanie CB a VB

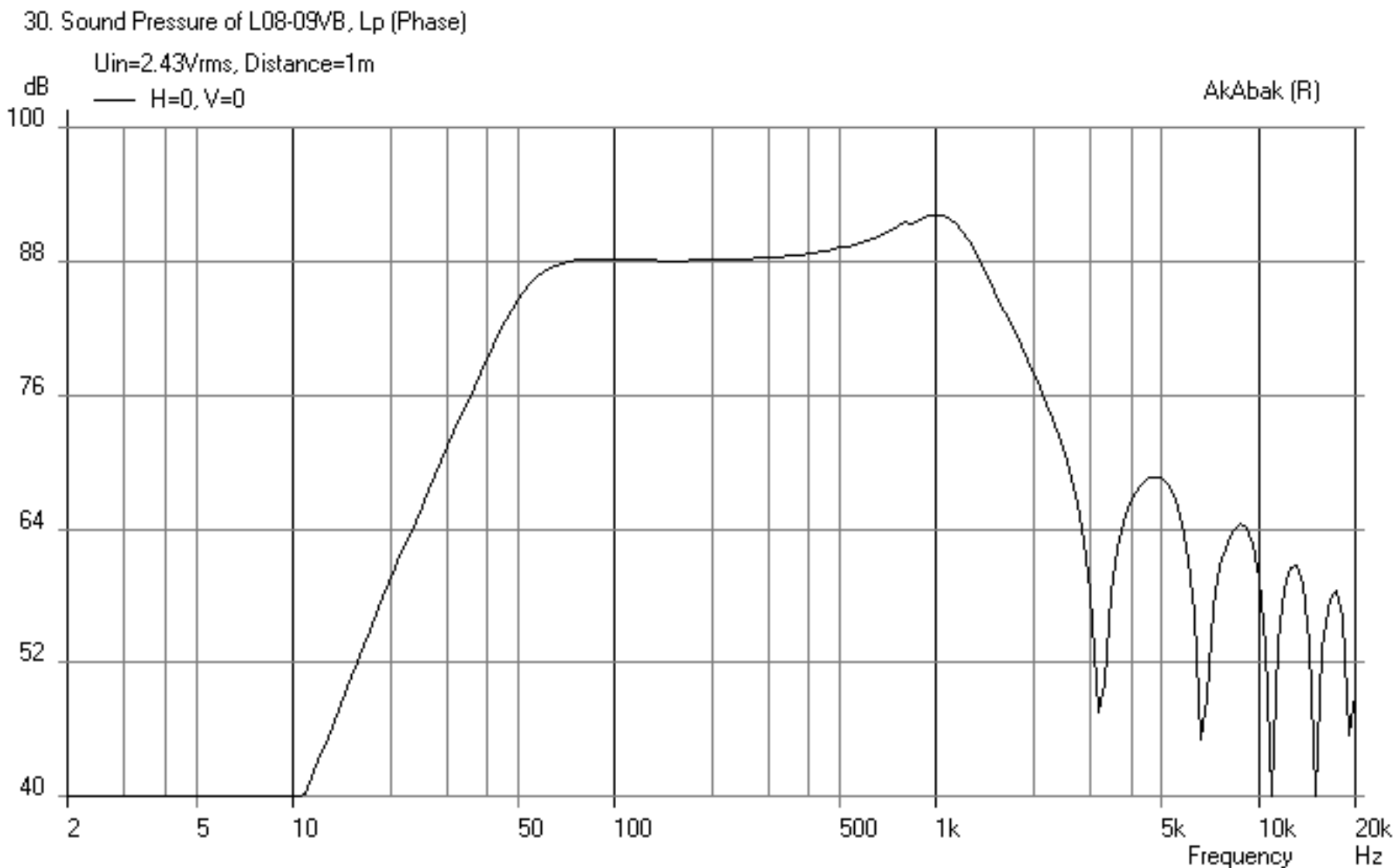
23. Excursion of L08-09VB, Amplitude (Phase)



Porovnanie CB a VB



Hladina akustického tlaku s kónickou membrána



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 x

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

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
<	<	<	<	<
m3,...,in3,L		..Hz..	dB	

Alignment list
 Diagram
 Copy alignment to Def_BassUnit Calculator

Lw in a 4-pi-sr. room

Alignment family

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

Def_BassUnit Calculator / Diagram

QB4 a2 = 4.476

Reflections on/off
 Repaint

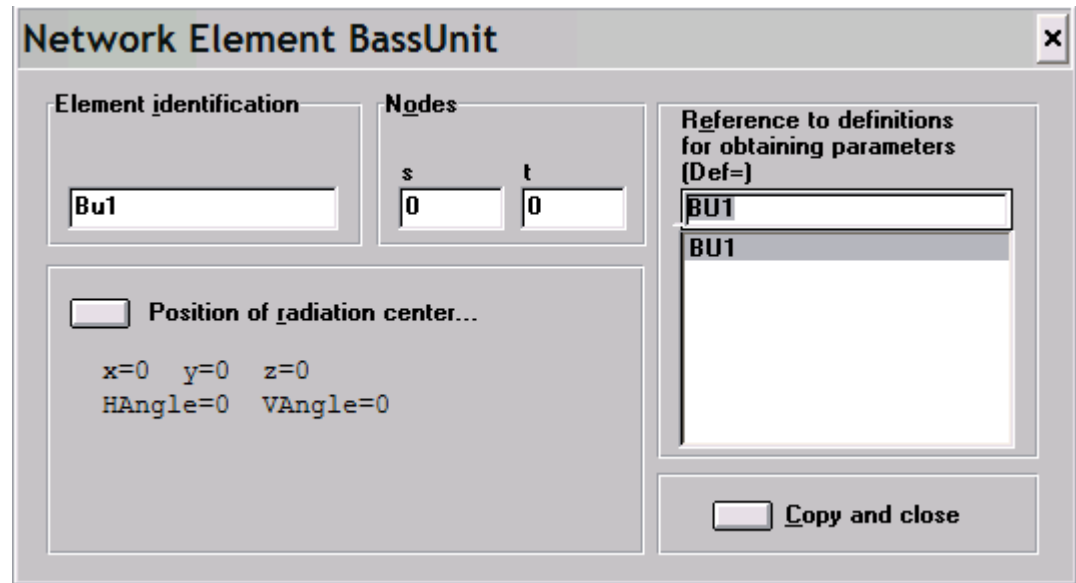
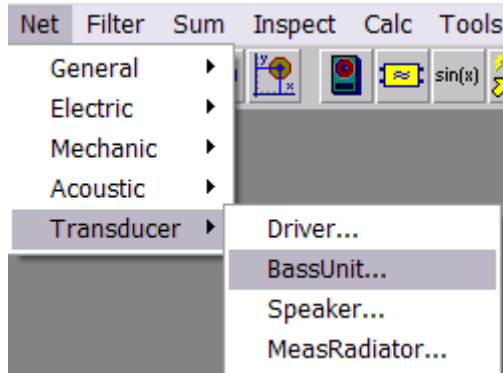
Left wall
 Right wall
 Floor
 m,...,in
 Zoom

fb=46.0Hz

ance in vented enclosure:

Qtr	fD	f3		
0.313	830.4Hz	48.8Hz		
Pelmax	UoRms	t60	Ripple	
1.3W	2.79V	58.3ms	95.3mdB	

Makromodel BassUnit ako obvodový prvok



| 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=136cm²
| 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=136cm² 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

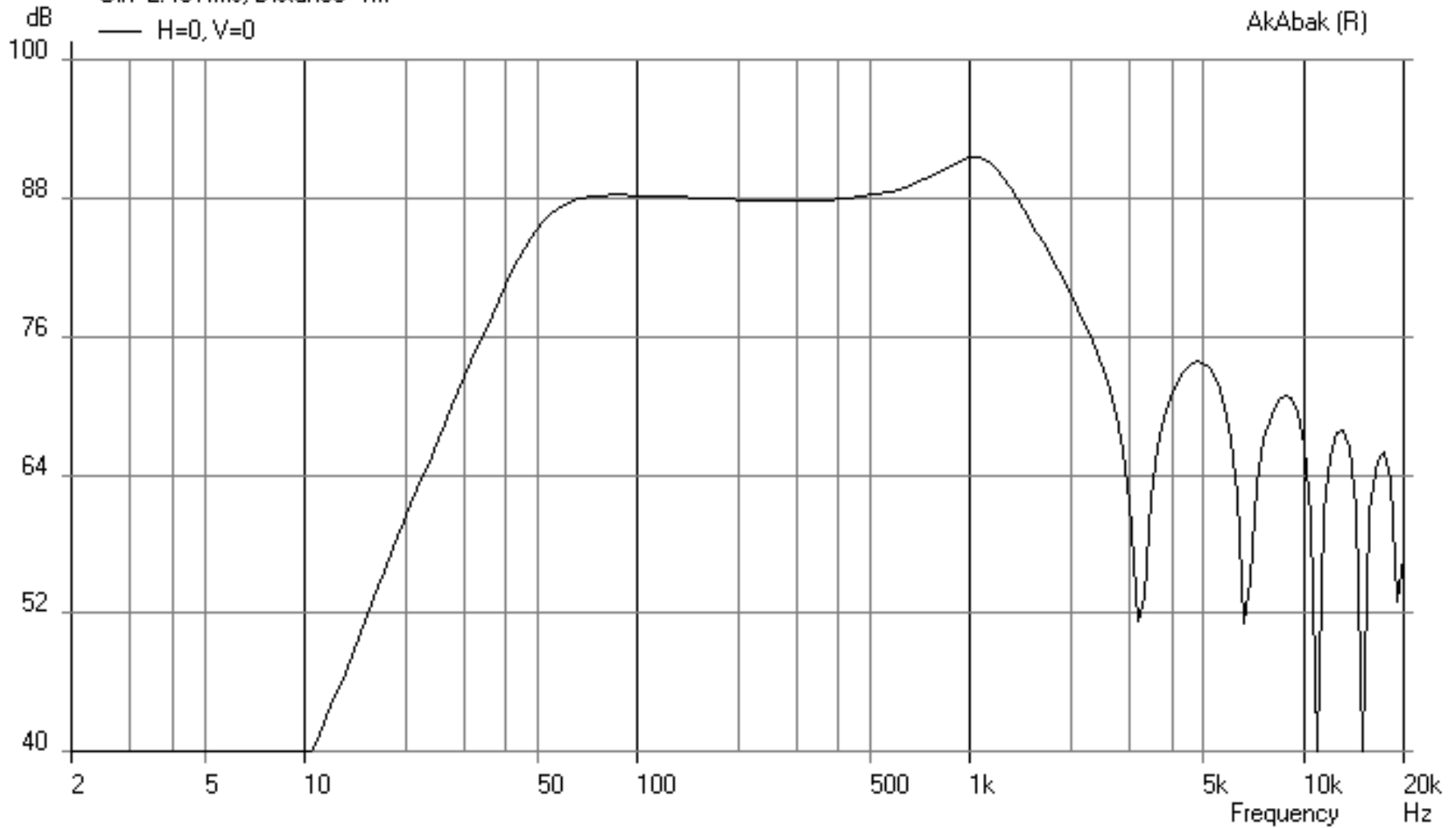
x=0 y=0 z=0 HAngle=0 VAngle=0

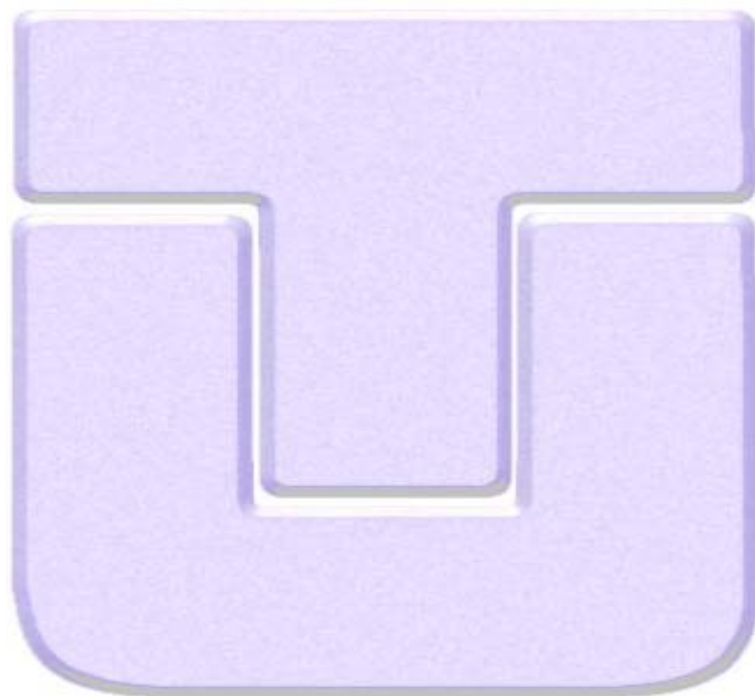
BassUnit

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

Uin=2.43Vrms, Distance=1m

— H=0, V=0





Elektrická impedancia sústavy

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

$$\begin{aligned} Z_{EM} &= \frac{1}{\frac{sL_{ES} + R_{ES} + s^2L_{ES}C_{ES}R_{ES}}{sL_{ES}R_{ES}} + \frac{sC_{EP}}{sC_{EP}R_{EL} + s^2C_{EP}L_{EB} + 1}} = \\ &= \frac{sL_{ES}R_{ES}(sC_{EP}R_{EL} + s^2C_{EP}L_{EB} + 1)}{(sL_{ES} + R_{ES} + s^2L_{ES}C_{ES}R_{ES})(sC_{EP}R_{EL} + s^2C_{EP}L_{EB} + 1) + sC_{EP}sL_{ES}R_{ES}} \end{aligned}$$

