



## **Komunikačná akustika**

# **L05: Reproduktor v basreflexovej ozvučnici**

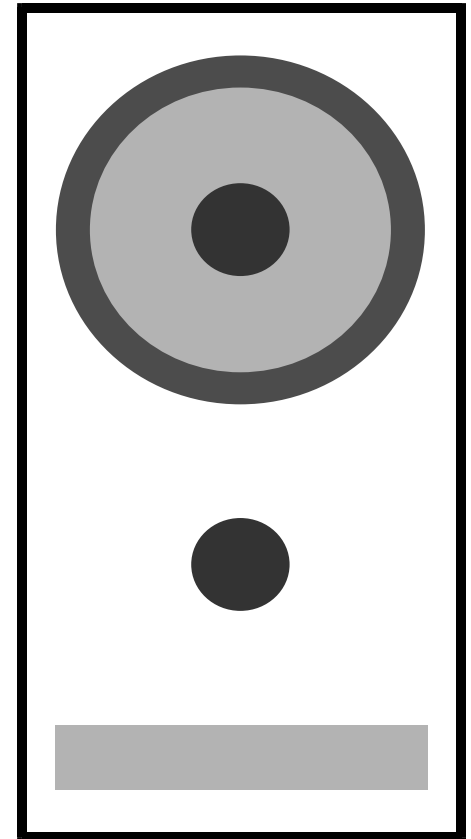
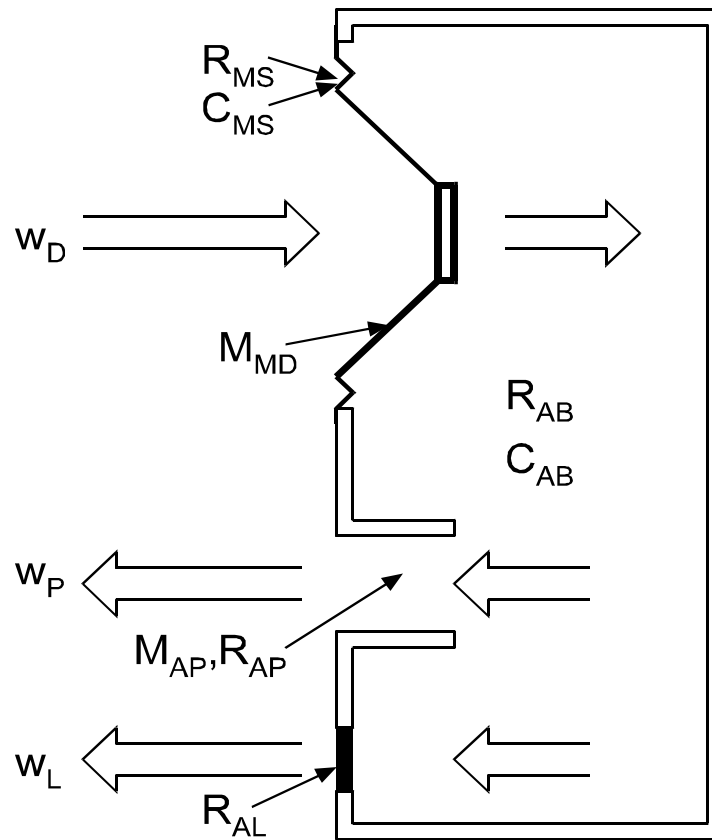
**prof. Ing. Jozef Juhár, PhD.**

<http://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



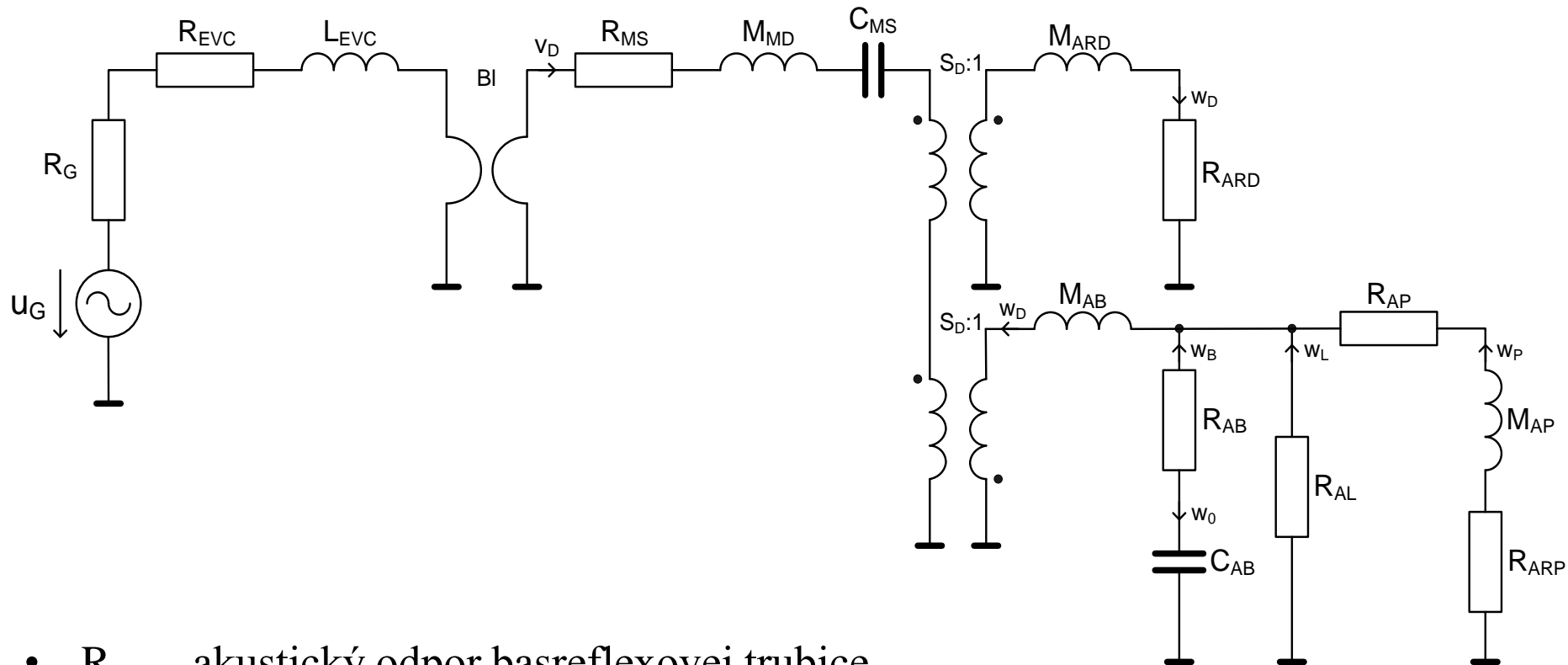
Celková objemová rýchlosť, generovaná sústavou do akustického priestoru

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

$$\left. \begin{aligned} W_0 &= -W_D + W_P + W_L \\ W_D &= W_B + W_P + W_L \end{aligned} \right\} \Rightarrow W_0 = -W_B$$

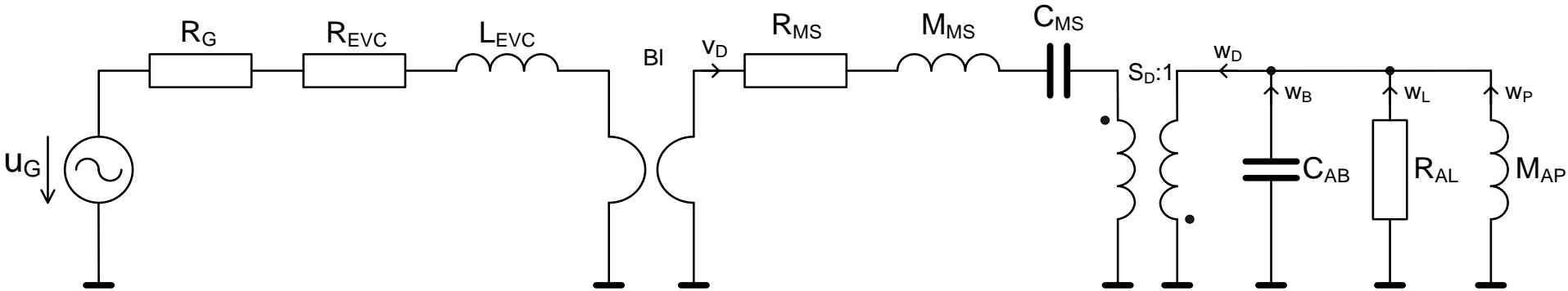
Celková objemová rýchlosť, generovaná sústavou do akustického priestoru, je identická s objemovou rýchlosťou, absorbovanou v dutine ozvučnice!!!

# Náhradná schéma sústavy VB (Vented Box)



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

# 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.

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

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

# 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.

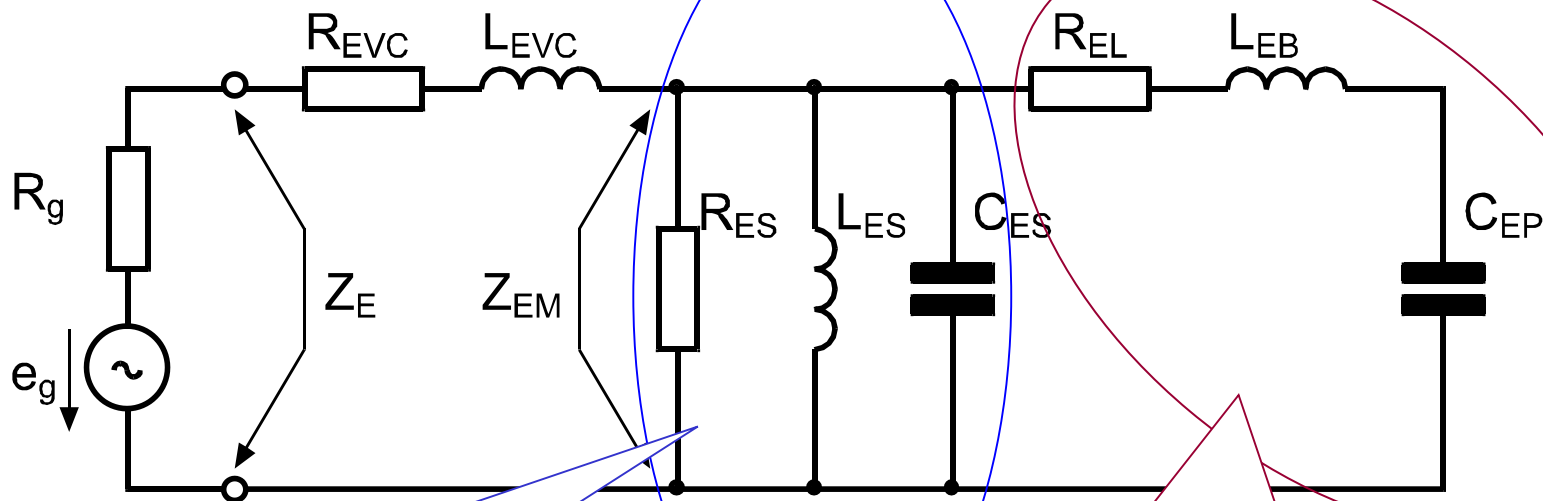
# Konštanty, používané pri návrhu sústavy VB

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

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

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

# Náhradná elektrická schéma sústavy VB



Mechanická časť reproduktora, zobrazená cez „elektromechanický gyrátor“ do elektrickej domény

Akustická časť sústavy, reprezentujúca akustický rezonančný obvod (ozvučnicu), zobrazená cez mechanicko-akustický „coupler“ a elektro-mechanický „gyrátor“ do elektrickej domény.

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

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

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

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

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

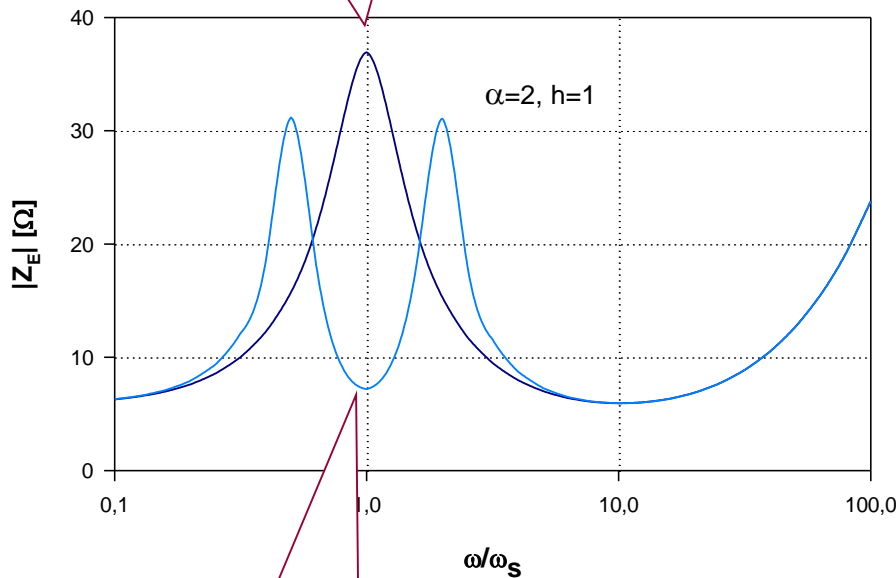
$$C_{EP} = \frac{S_D^2 \cdot M_{AP}}{(Bl)^2}$$



# Elektrická impedancia sústavy VB

Krivka elektrickej impedancie reproduktora v nekonečnej ozvučnici

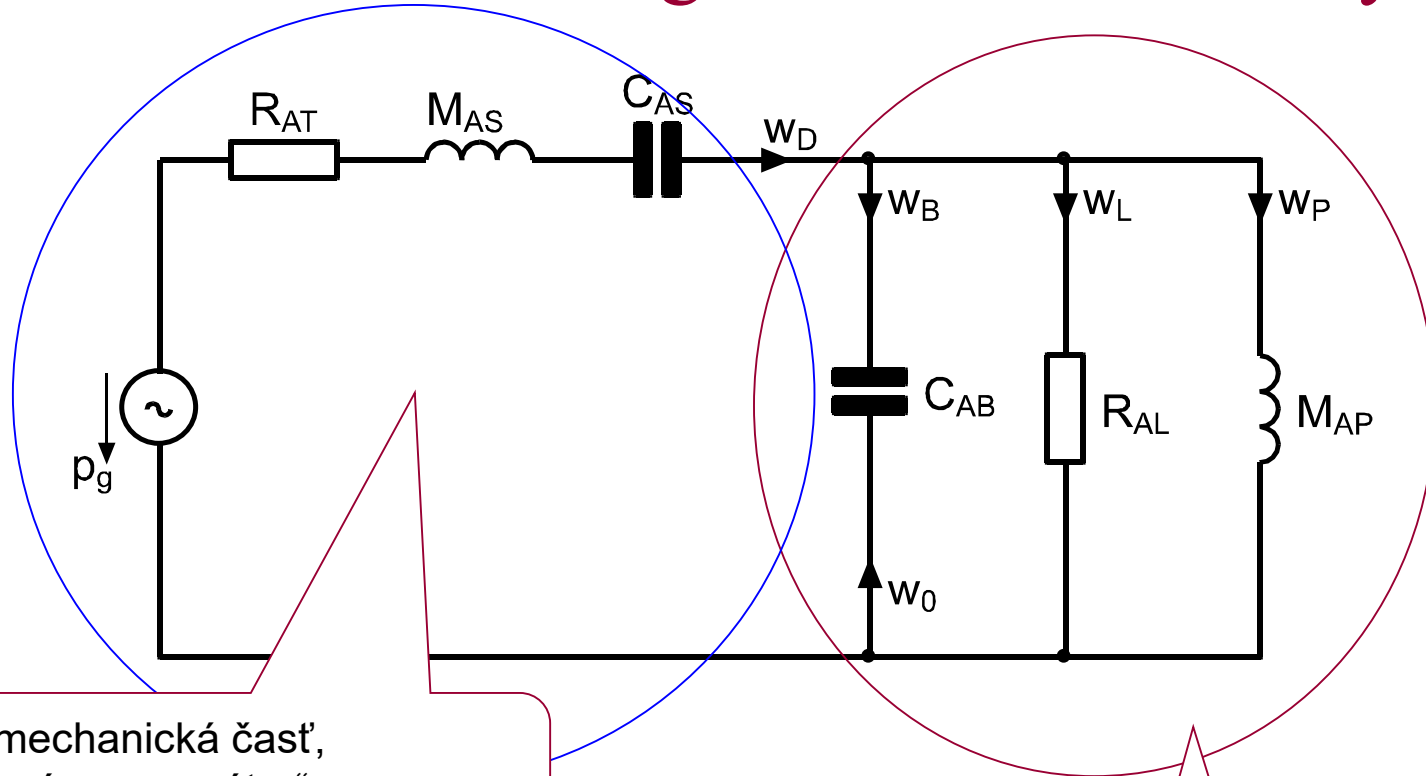
$$Z_E = R_{EVC} + sL_{EVC} + \underbrace{\frac{1}{\frac{1}{R_{ES}} + \frac{1}{sL_{ES}} + sC_{ES}} + \frac{1}{R_{EL} + sL_{EB} + \frac{1}{sC_{EP}}}}_{Z_{EM}}$$



Lokálne minimum pri frekvencii  $f_B$

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

# 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)

# Akustický tlak v akustickom poli sústavy

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

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

# 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) ako hornopriepustný filter 4. rádu

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

Charakteristická frekvencia „filtra“

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

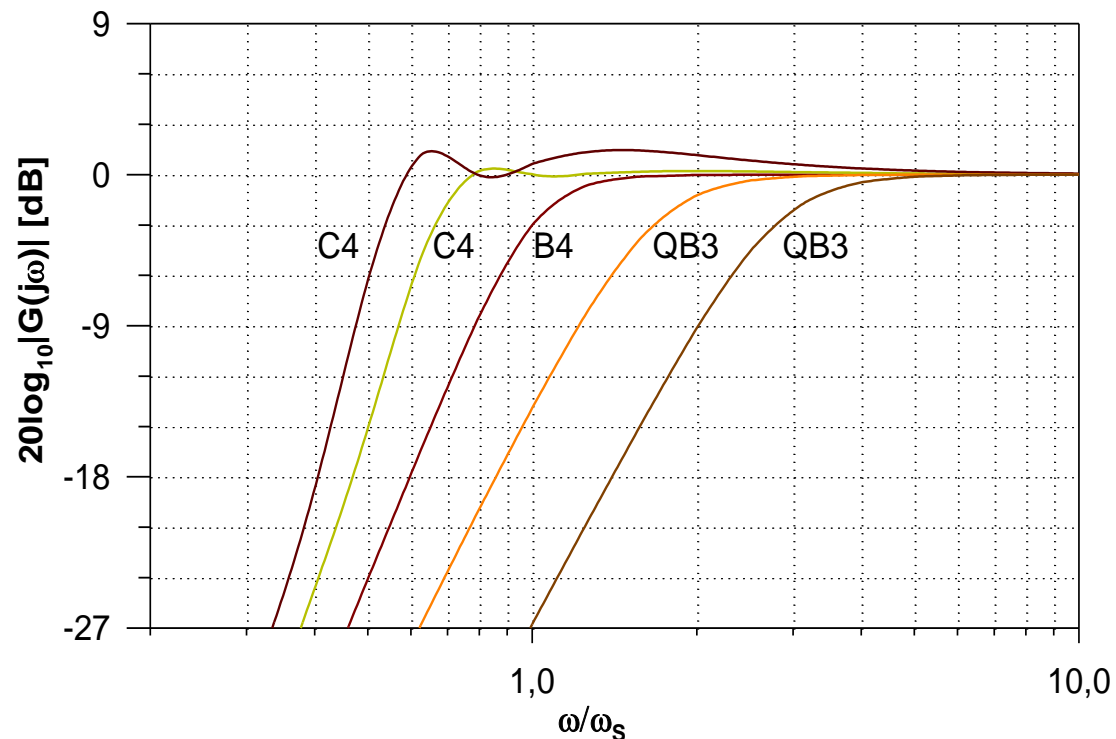
$$s_0 = \frac{s}{\omega_0} \quad \omega_0 = \sqrt{\omega_B \omega_S}$$

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

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

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

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



# Aproximácie prenosovej funkcie sústavy

V súčasnosti existuje asi 15 typov aproximácií, ktoré vedú k realizovateľným basreflexovým reproduktorovým sústavám. Principiálne 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) Diskrétnne 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 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.

# Lineárna výchylka membrány

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

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

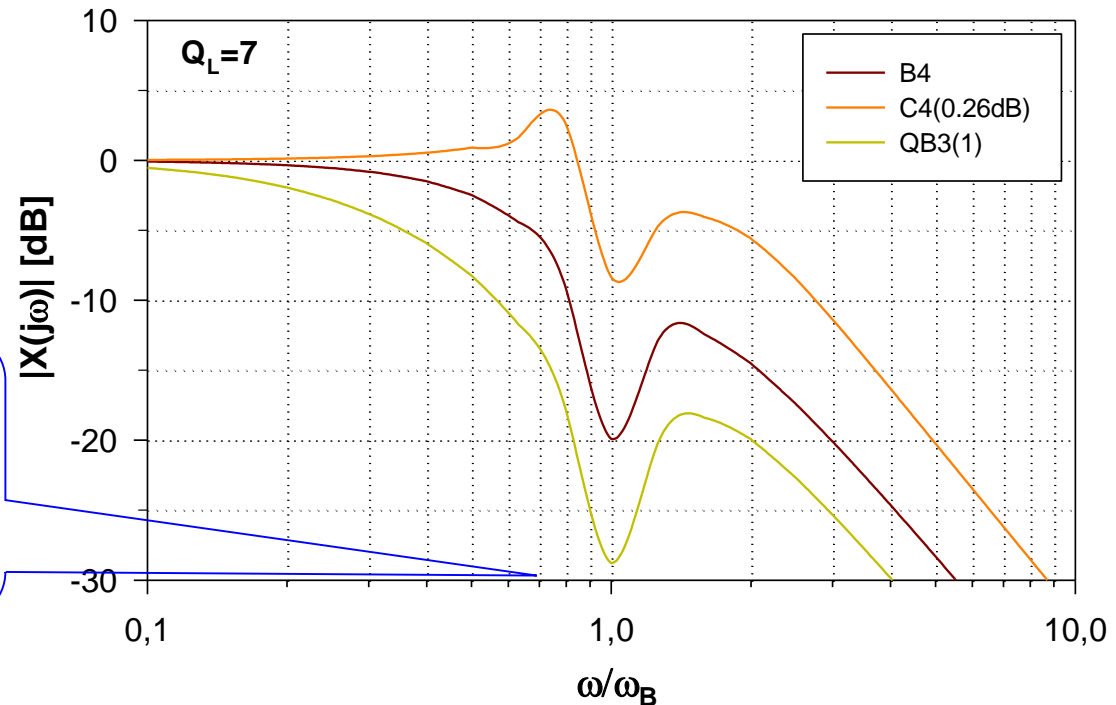
$$X_{(VB)}(s) = \frac{b_1 s_0^2 + b_2 s_0 + 1}{s_0^4 + a_1 s_0^3 + a_2 s_0^2 + a_3 s_0 + 1}$$

$$b_1 = \frac{1}{h} \quad b_2 = \frac{1}{\sqrt{h} \cdot Q_L}$$

- Na výchylkovej funkcii je zreteľne vidno, že pri rezonančnej frekvencii ozvučnice klesá výchylka reproduktora na minimum – vtedy sa presadzuje vysielacia funkcia basreflexu !

- 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)





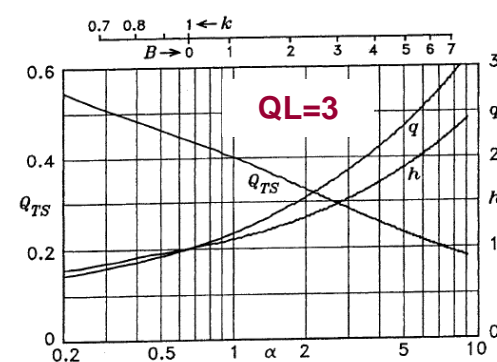
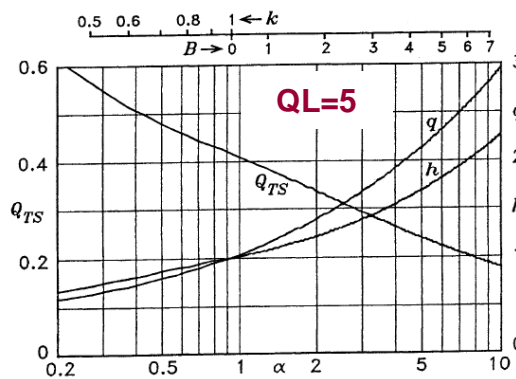
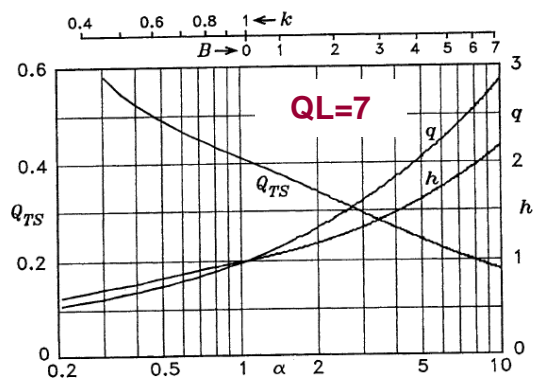
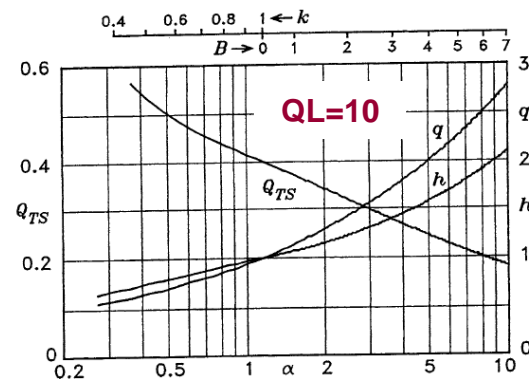
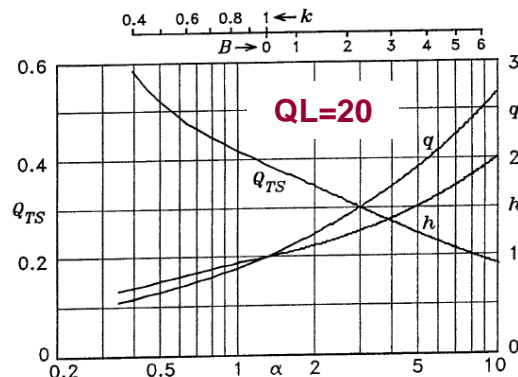
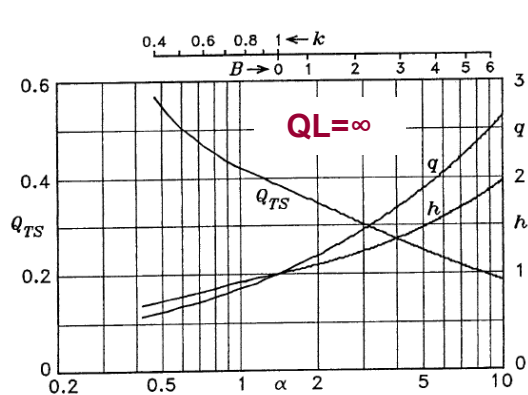
# Návrh basreflexovej sústavy (VB)

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)

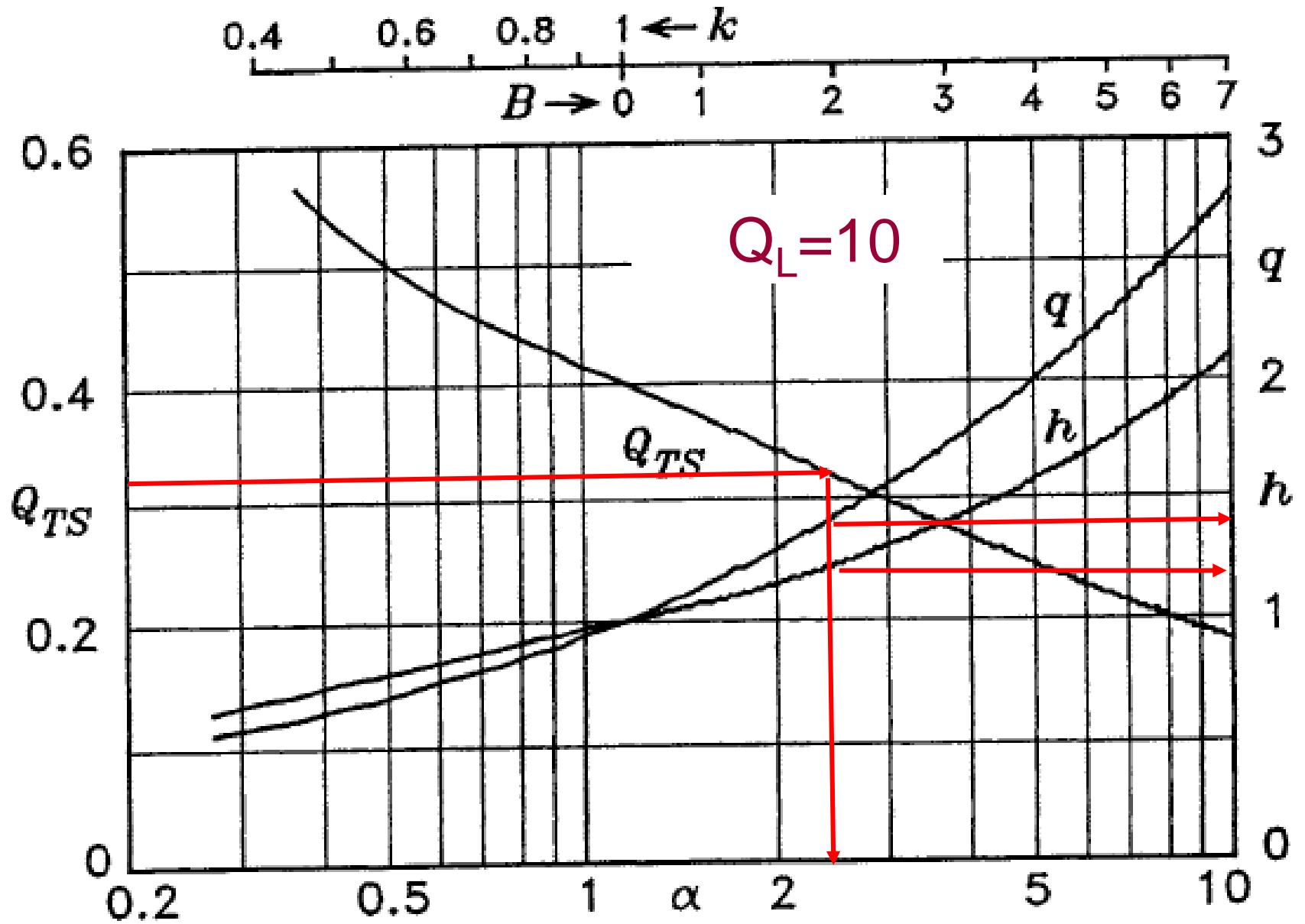
1. manuálny numerický výpočet – prácny a časovo náročný postup
2. grafická resp. tabuľková metóda – čiastočná automatizácia rutinných výpočtov
3. použitie špecializovaných programových (softvérových) prostriedkov - CAD

# Grafická metóda návrhu VB



# Príklad 1:

- Uvažujeme reproduktor s nasledovnými parametrami:
  - $f_S=37\text{Hz}$   $S_D=136\text{cm}^2$
  - $Q_{TS}=0.32$   $x_{\max}=6\text{mm}$
  - $V_{AS}=32\text{lit.}$
- Chceme navrhnúť basreflexovú ozvučnicu tak, aby sústava VB mala potenciálne činiteľ kvality  $Q_L=10$
- Z grafických závislostí (viď 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

• ...

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

⇓

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

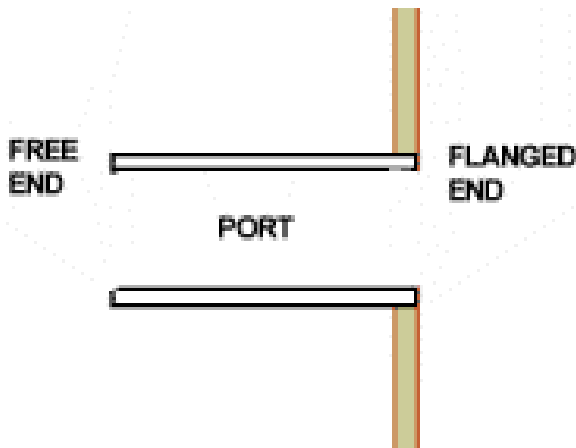
kde:

$D_p$  – priemer trubice

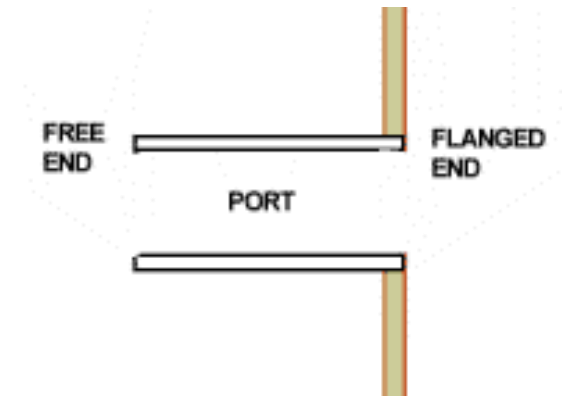
$l_p$  – dĺžka trubice

$N_p$  – počet trubic

$k_{end}$  – 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.

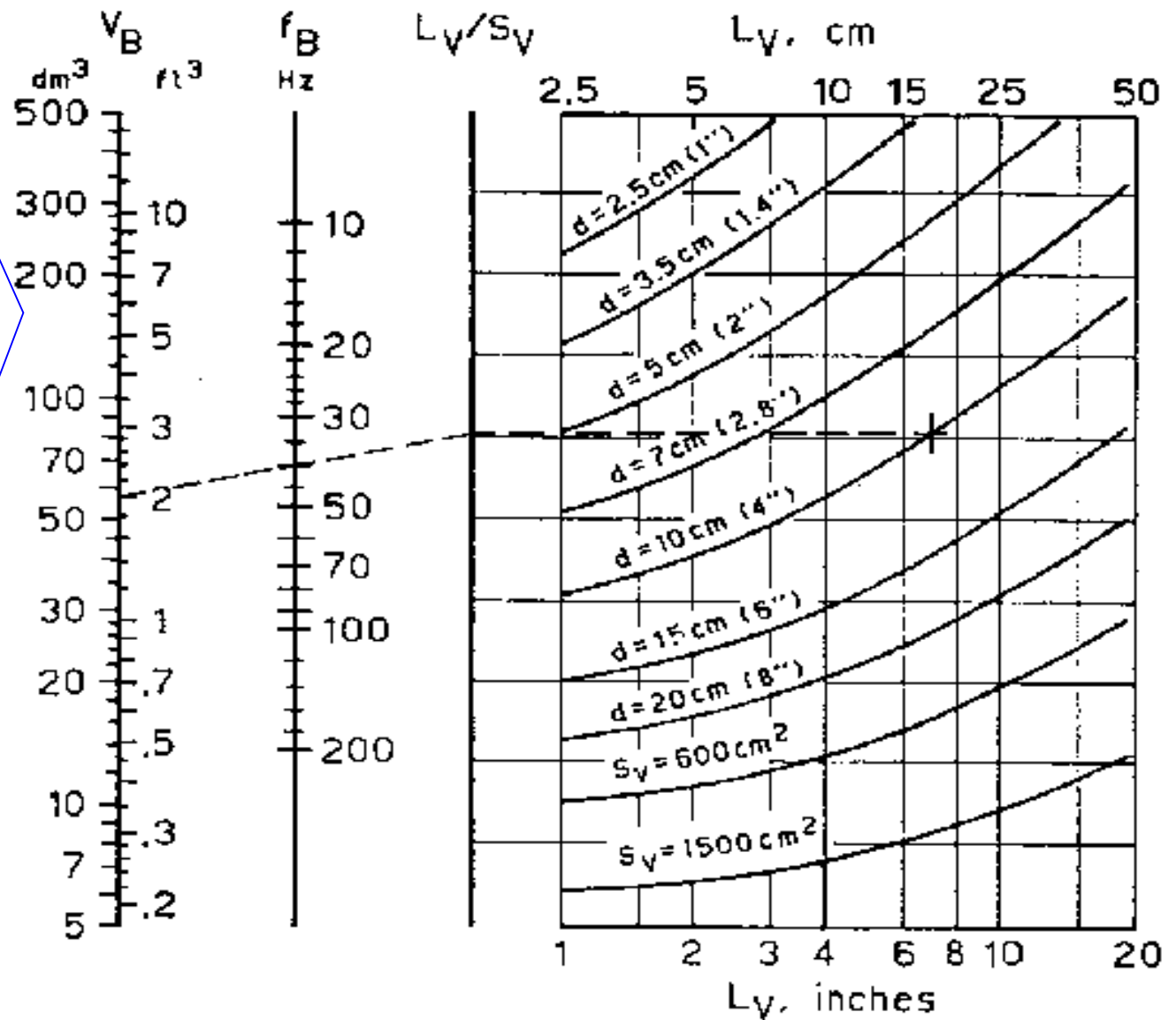


Fig. 21. Nomogram and chart for design of ducted vents.

# 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:

$$N_P = 1$$

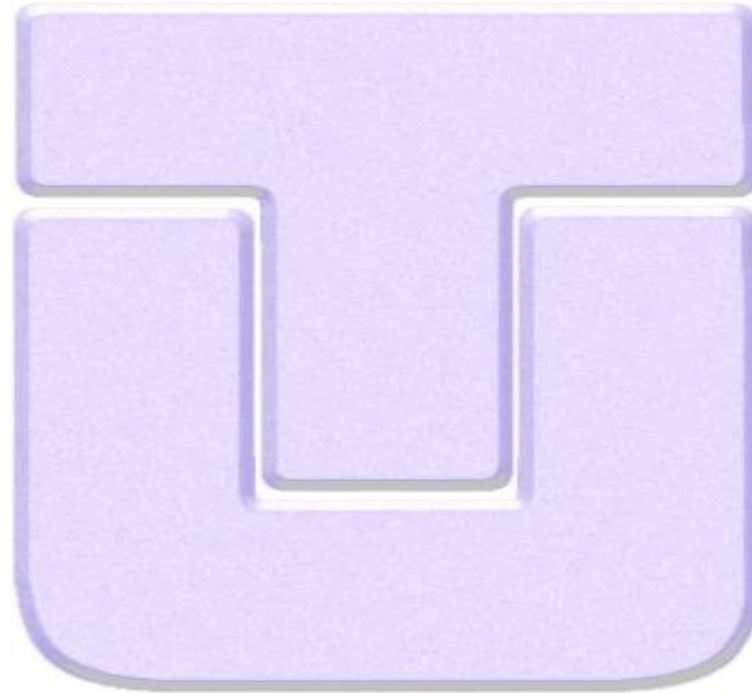
- Zvolíme konštantu koncových korekcií:

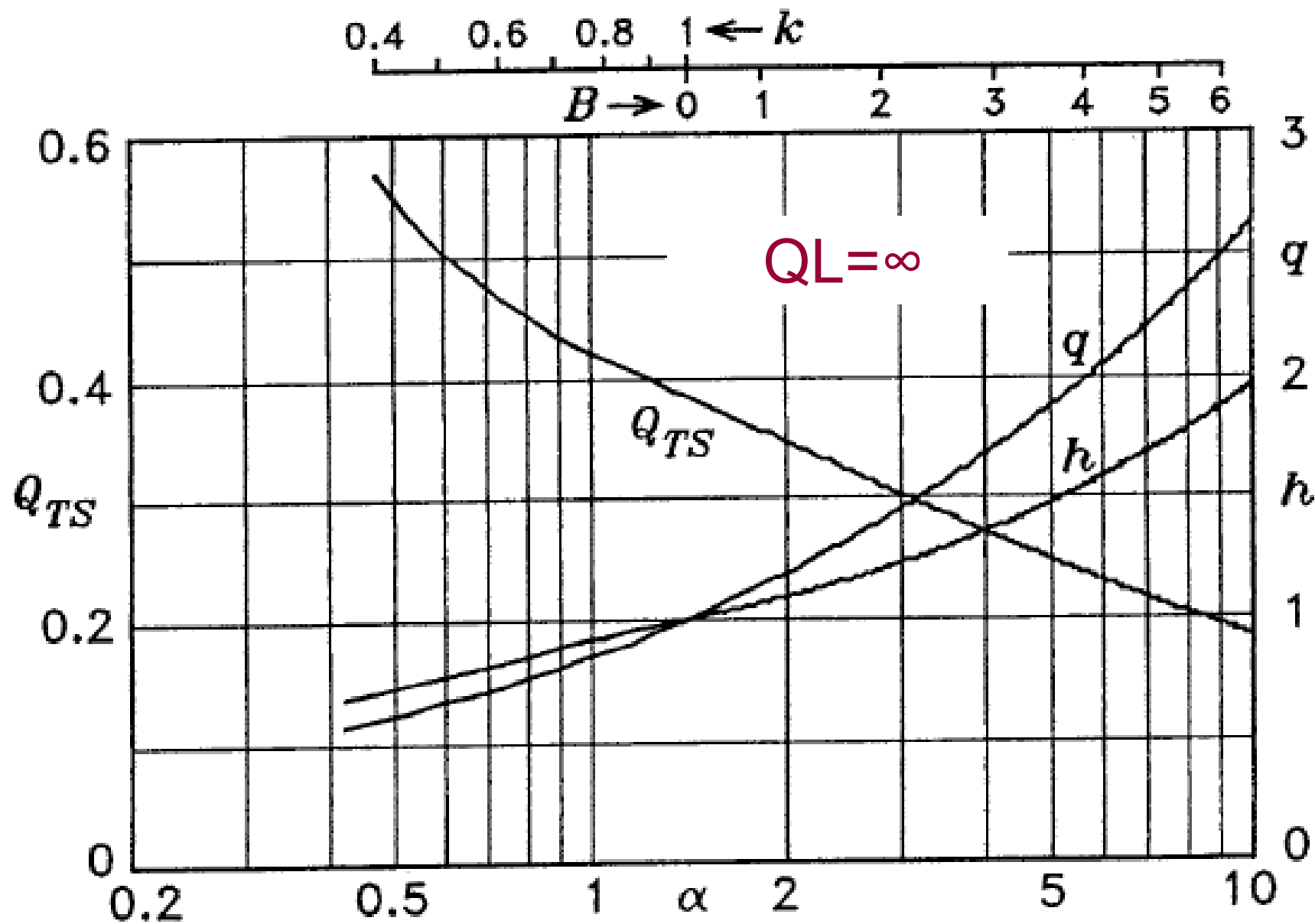
$$k_{\text{end}} = 0.425 + 0.307 = 0.732$$

- Vypočítame potrebnú dĺžku akustickej trubice:

$$l_P = \frac{c_0^2}{16\pi} \cdot \frac{D_P^2}{f_B^2 V_{AB}} \cdot N_P - k_{\text{end}} \cdot D_P = \frac{344^2}{16\pi} \cdot \frac{0.1^2}{44.4^2 \cdot 12.8 \cdot 10^{-3}} \cdot 1 - 0.732 \cdot 0.1 \cong 86 \text{ cm}$$

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





0.4 0.6 0.8 1 ←  $k$   
 $B \rightarrow$  0 1 2 3 4 5 6

