



Komunikačná akustika

L04: Reproduktor v zatvorenej ozvučnici

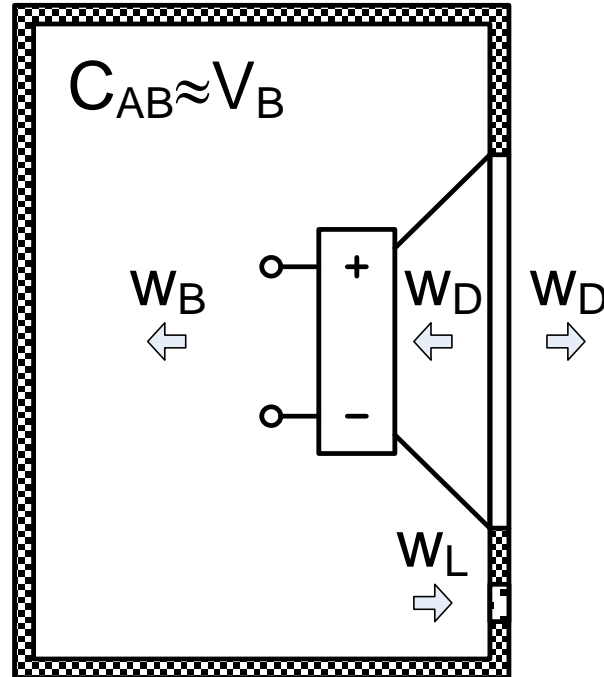
prof. Ing. Jozef Juhár, CSc.

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

Úloha ozvučnice

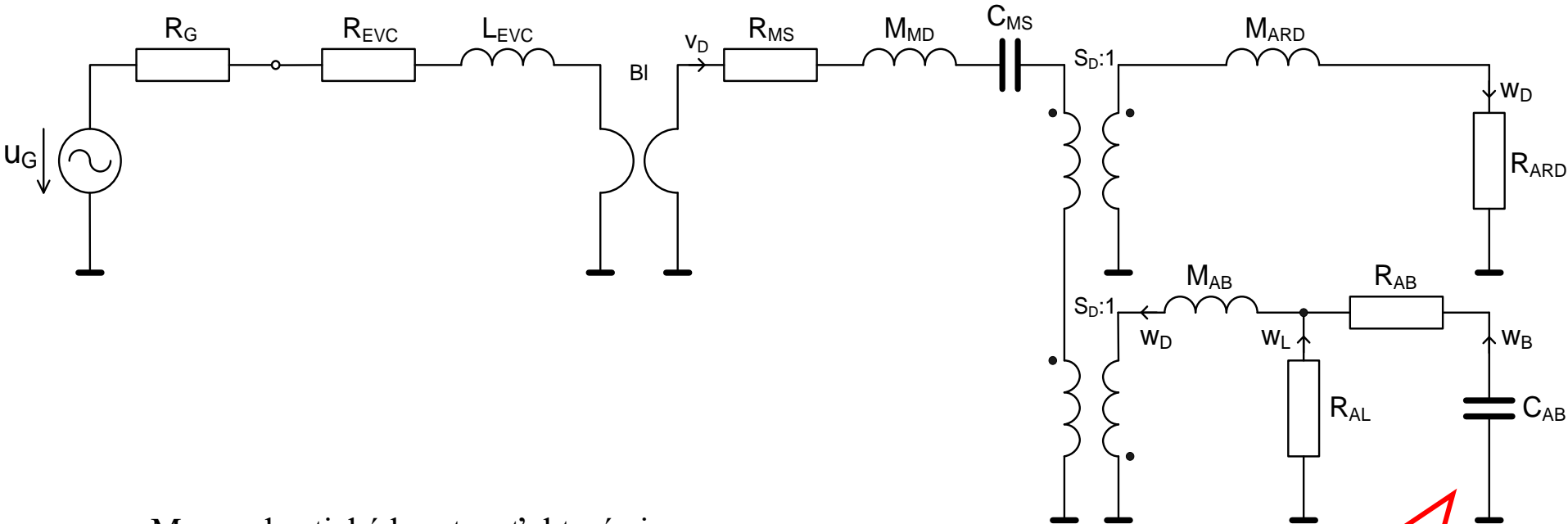
- Akustický skrat u „otvoreného“ priamovysielaajúceho reproduktora.
- Úloha ozvučnice:
 - posunutie akustického skratu smerom k nižším frekvenciám (mimo „užitočné“ frekvenčné pásmo)
 - úplné odstránenie akustického skratu
 - „spracovanie“ akustického skratu na prospech prenosovej funkcie reproduktora
- Typy ozvučníc
 - jednoduché ozvučnice (dosková, otvorená skriňová)
 - zatvorená ozvučnica
 - otvorená ozvučnica (basreflexová, typu „transmission line“)
 - špeciálne viackomorové ozvučnice a ozvučnice so zvukovodmi

Reproduktor v zatvorenej ozvučnici



- zatvorená ozvučnica je veľmi dobrou realizáciou nekonečnej ozvučnice – oddelenie akustických priestorov pred a za membránou
- objem ozvučnice predstavuje akustickú poddajnosť – akustický prvok, s vplyvom ktorého musíme pri realizácii ozvučnice počítať
- návrh ozvučnice = návrh skrinky konkrétneho objemu !!!

Elektro-mechanicko-akustická náhradná schéma sústavy



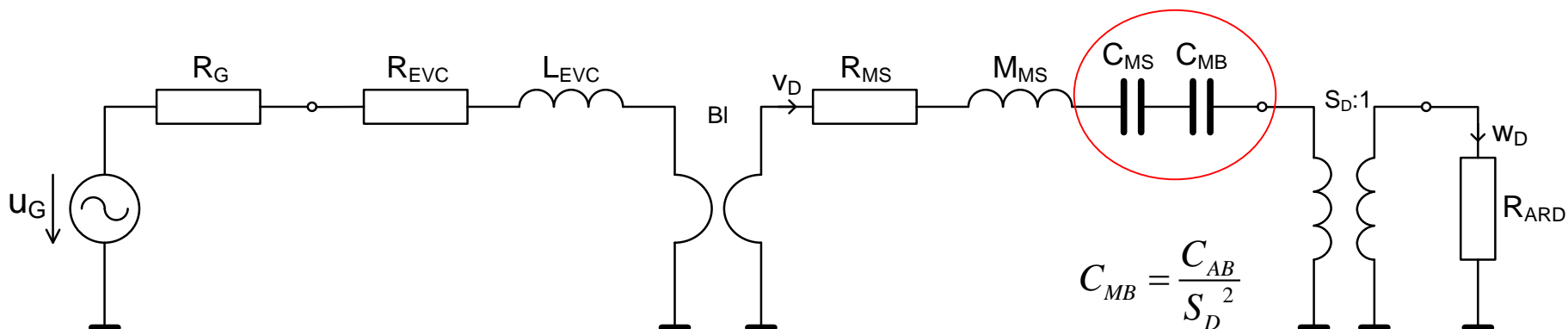
- M_{AB} – akustická hmotnosť, ktorú si môžeme predstaviť ako „vysielaciu“ hmotnosť zadnej strany membrány (smerom do skrinky)
- R_{AB} – akustický odpor, reprezentujúci straty v objeme ozvučnice
- R_{AL} – akustický odpor, reprezentujúci „únikové“ straty (netesnosti skrinky)

Hlavným prvkom na zadnej strane membrány reproduktora v zatvorenej ozvučnici je akustická poddajnosť C_{AB} , ktorá v náhradnej schéme reprezentuje „dutinu“ skrinky objemu V_{AB} .

Platí:

$$C_{AB} = \frac{V_{AB}}{c_0^2 \cdot \rho_0} \text{ [mN}^{-1}\text{]}$$

Zjednodušená náhradná schéma sústavy



$$M_{ARD} \approx M_{AB}$$

$$R_{AL} \rightarrow \infty$$

$$R_{AB} = 0$$

$$\frac{1}{C_{MC}} = \frac{1}{C_{MS}} + \frac{1}{C_{MB}}$$

- akustická poddajnosť, reprezentujúca objem zatvorenej ozvučnice, sa zobrazí na mechanickej strane ako mechanická poddajnosť, ktorá je zapojená do série so „systémovou“ poddajnosťou reproduktora
- reproduktor s ozvučnicou tvoria systémový „neoddeliteľný“ celok, ktorý sa v podstate správa ako reproduktor v nekonečnej ozvučnici so „zmenenou“ systémovou poddajnosťou – „tuhším“ kmitacím systémom

TS parametre reproduktora v zatvorenej ozvučnici (CB)

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{M_{MS} \cdot C_{MC}}} = f_s \cdot \sqrt{1 + \alpha}$$

$$Q_{MC} = \frac{1}{R_{MS}} \sqrt{\frac{M_{MS}}{C_{MC}}} = Q_{MS} \cdot \sqrt{1 + \alpha}$$

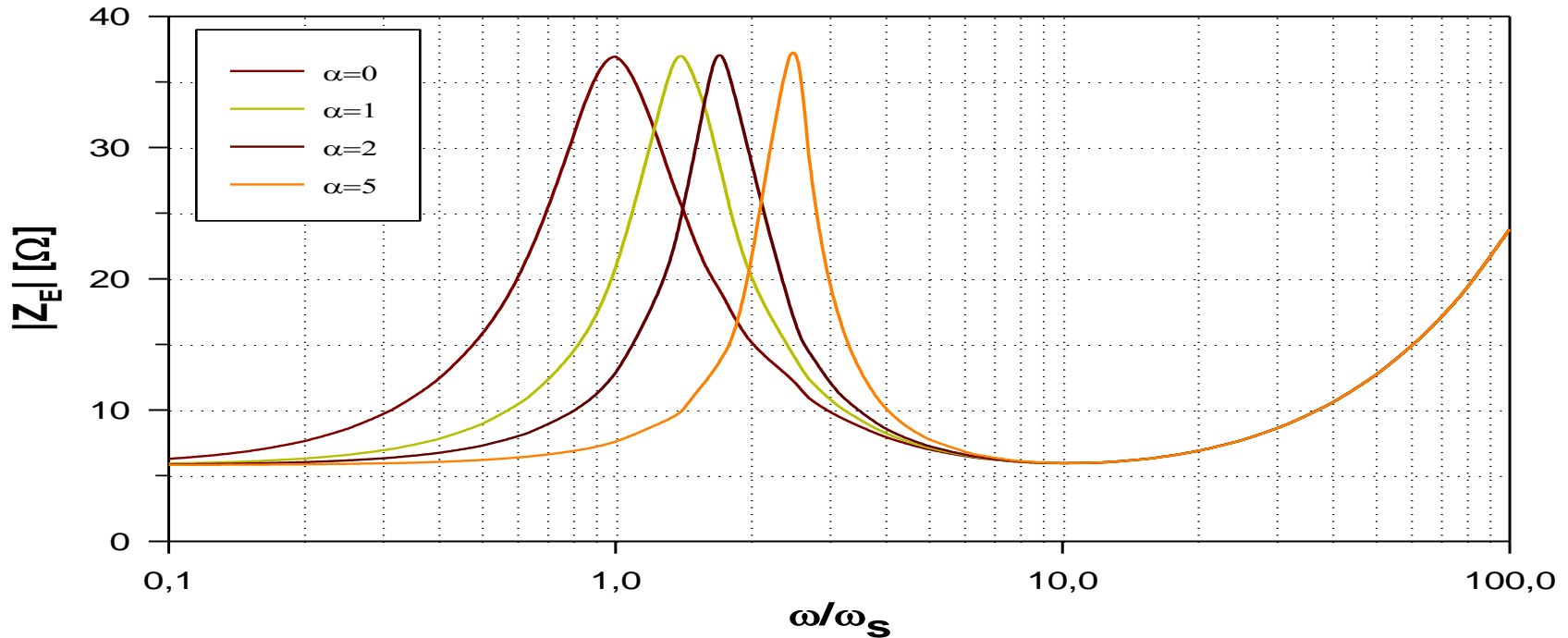
$$Q_{EC} = \frac{R_{EVC}}{(Bl)^2} \sqrt{\frac{M_{MS}}{C_{MC}}} = Q_{ES} \cdot \sqrt{1 + \alpha}$$

$$Q_{TC} = \frac{Q_{MC} \cdot Q_{EC}}{Q_{MC} + Q_{EC}} = Q_{TS} \cdot \sqrt{1 + \alpha}$$

Konštanta α :

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

Elektrická impedancia (CB)



$$Z_{E(CB)} = R_{EVC} + sL_{EVC} + \frac{(Bl)^2}{R_{MS}} \cdot \frac{\frac{s_N}{\sqrt{\alpha+1}} \frac{1}{Q_{MS} \sqrt{\alpha+1}}}{\left(\frac{s_N}{\sqrt{\alpha+1}}\right)^2 + \frac{s_N}{\sqrt{\alpha+1}} \frac{1}{Q_{MS} \sqrt{\alpha+1}} + 1}$$

V porovnaní s nekonečnou ozvučnicou má impedančná krivka reproduktora v zatvorenej ozvučnici posunuté maximum smerom k vyšším frekvenciám

Mechanický činiteľ kvality reproduktora v zatvorenej ozvučnici je väčší, čo sa prejaví zmenšením šírky pásma rezonančnej krivky

Akustický tlak a menovitá tlaková citlivosť (CB)

$$p_{m,CB} = \frac{\sqrt{P_E}}{r} \cdot \sigma_{p(CB)|1m,1W}$$

$$\sigma_{p,(CB)|1m,1W} = 7,9 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{\frac{f_S^3 \cdot V_{AS}}{Q_{ES}}} \quad [\text{PaW}^{-1/2}\text{m}]$$

$$\sigma_{p,(CB)|1m,1W} = \sigma_{p,(IB)|1m,1W}$$

- menovitá tlaková citlivosť reproduktora v zatvorenej ozvučnici je rovnaká, ako citlivosť reproduktora v nekonečnej ozvučnici !!!
- amplitúda akustického tlaku v akustickom poli sústavy CB bude teoreticky rovnaká, ako amplitúda akustického tlaku, generovaná reproduktorom v nekonečnej ozvučnici

Prenosová funkcia sústavy (CB)

Reproduktor v zatvorenej ozvučnici:

$$G_{CB}(s) = \frac{s_C^2}{s_C^2 + s_C/Q_{TC} + 1}$$

$$s_C = \frac{s}{\omega_C} \quad - \quad \text{normovaný operátor} \quad \Rightarrow$$

Hornopriepustný filter:

$$G(s) = \frac{b_2 s^2}{a_2 s^2 + a_1 s + a_0}$$

$$b_2 = 1$$

$$a_2 = 1$$

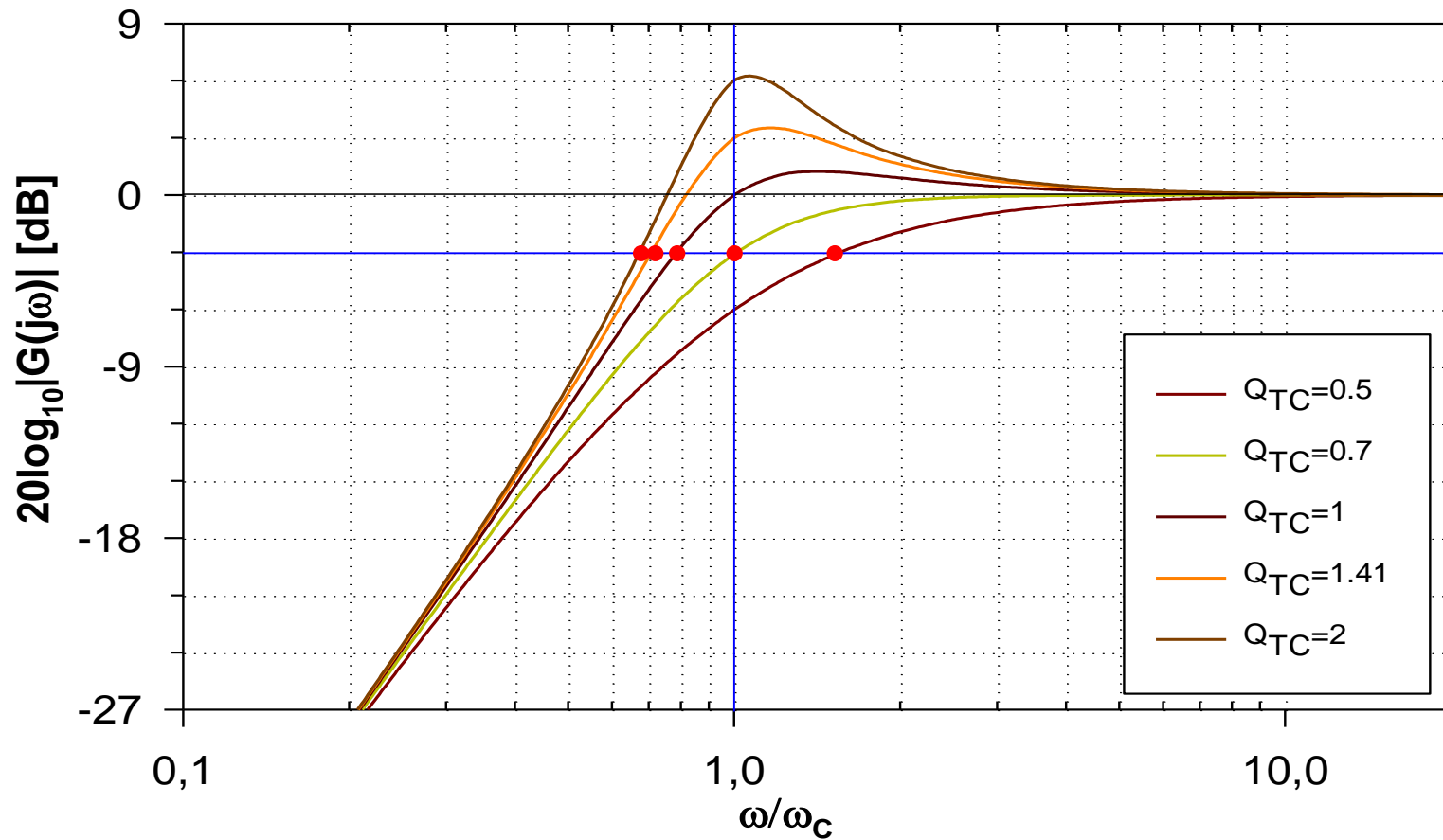
$$a_1 = \frac{1}{Q_{TC}}$$

$$a_0 = 1$$

- prenosová funkcia reproduktora v zatvorenej ozvučnici je funkciou hornopriepustného filtra druhého rádu, ktorá má dva „nastaviteľné“ parametre – charakteristickú frekvenciu ω_C a činiteľ akosti Q_{TC}
- na rozdiel od reproduktora v nekonečnej ozvučnici, u ktorého sú obdobné parametre (ω_S, Q_{TS}) „nastavené“ výrobcom, je v tomto prípade **parametre (ω_C, Q_{TC}) nastaviteľný vhodnou voľbou objemu ozvučnice (parametr α)**

Amplitúdová frekvenčná charakteristika 1 (CB)

$$G_{CB}(s) = \frac{s_C^2}{s_C^2 + s_C/Q_{TC} + 1}$$

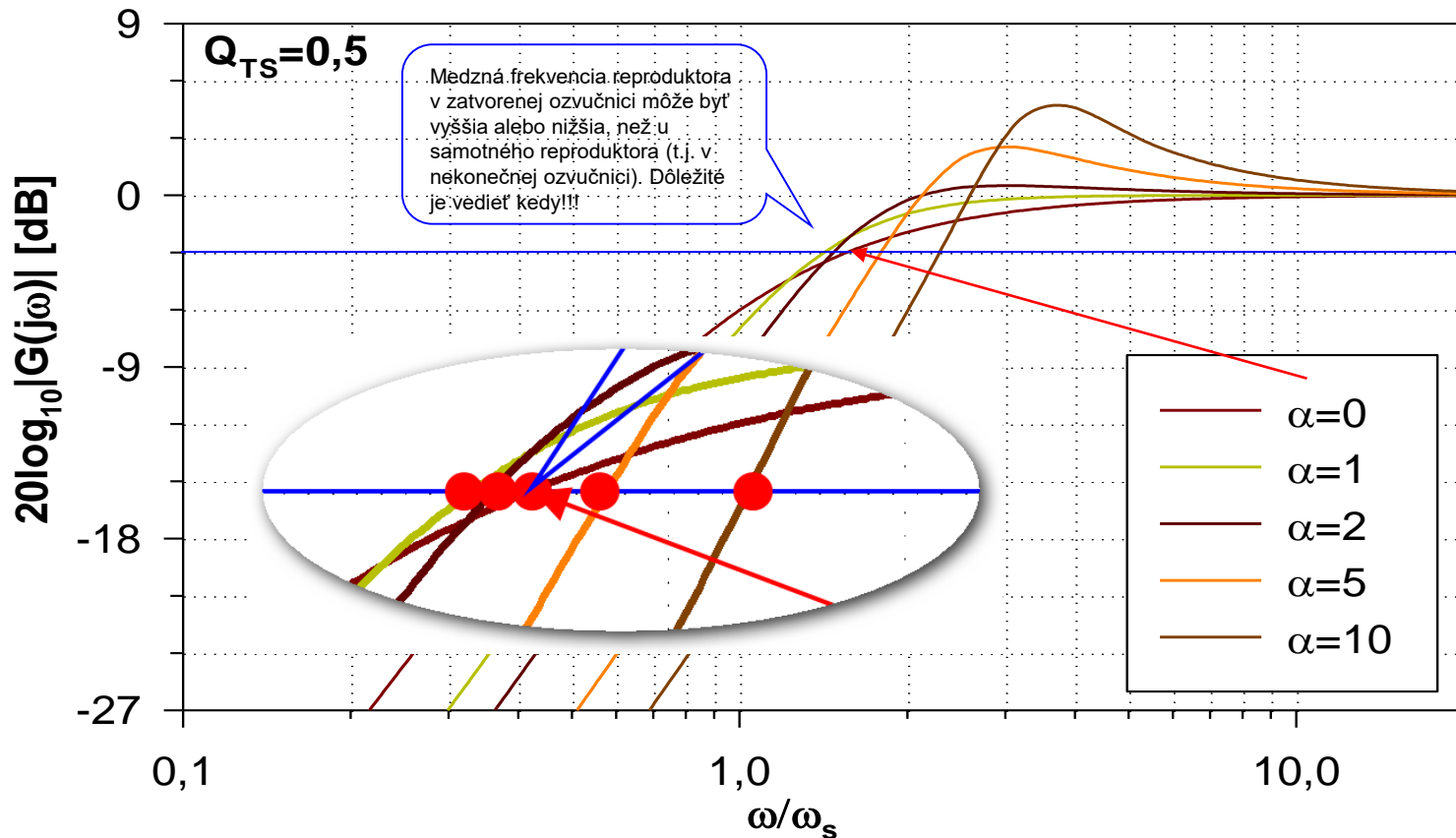


Amplitúdová frekvenčná charakteristika 2 (CB)

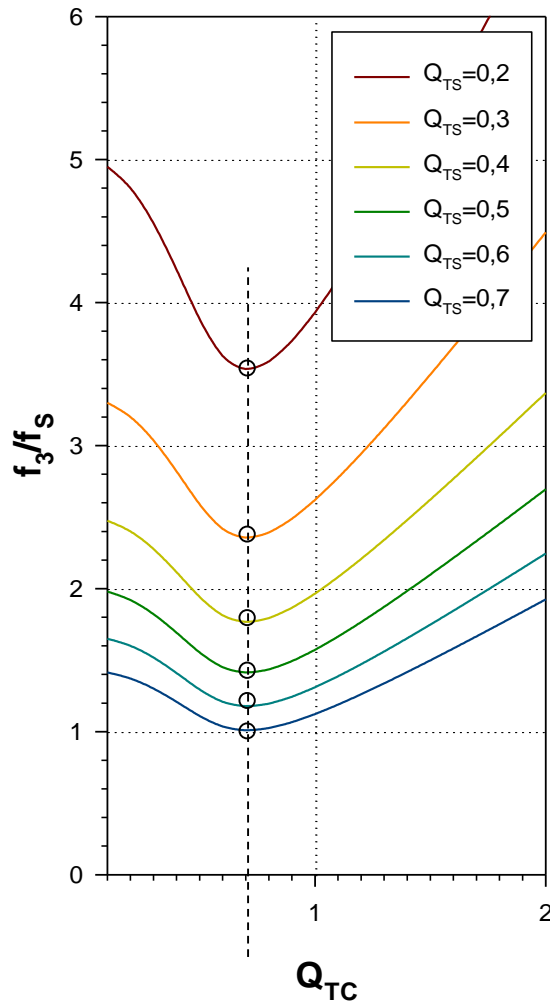
$$G_{CB}(s)|_{R_G=0} = \frac{\left(\frac{s_N}{\sqrt{\alpha+1}}\right)^2}{\left(\frac{s_N}{\sqrt{\alpha+1}}\right)^2 + \frac{s_N}{\sqrt{\alpha+1}} \frac{1}{Q_{TC}\sqrt{\alpha+1}} + 1}$$

V porovnaní s nekonečnou ozvučnicou má amplitúdová frekvenčná charakteristika reproduktora v zatvorenej ozvučnici posunutú charakteristickú (rezonančnú) frekvenciu smerom k vyšším frekvenciám

Celkový činiteľ kvality reproduktora v zatvorenej ozvučnici je väčší, čo sa prejaví zmenou tvaru charakteristiky.



Ako závisí medzná frekvencia AFCH od Q_{TC}



$$f_{3(CB)} = f_s \frac{Q_{TC}}{Q_{TS}} \cdot \sqrt{\frac{1}{2Q_{TC}^2} - 1 + \sqrt{\left(\frac{1}{2Q_{TC}^2} - 1\right)^2 + 1}}$$

$$\text{pre } Q_{TC} = \frac{1}{\sqrt{2}} \Rightarrow f_{3(CB),\min} = \frac{f_s}{\sqrt{2} \cdot Q_{TS}}$$

- reproduktor v zatvorenej ozvučnici má minimálnu (najnižšiu) medznú frekvenciu pri $Q_{TC}=0.707$
- je to teoreticky najnižšia dosiahnuteľná medzná frekvencia pre reproduktor s danými hodnotami f_s a Q_{TS}
- jej hodnotu vieme vypočítať podľa vyššie uvedeného vzťahu

Príklad

- Uvažujeme reproduktor s nasledovnými parametrami:
 - $f_s=37\text{Hz}$
 - $Q_{TS}=0.32$
 - $V_{AS}=32\text{lit.}$
- Chceme navrhnúť zatvorenú ozvučnicu tak, aby sústava CB mala najväčšiu šírku pásma smerom k nízkym frekvenciám (t.j. najnižšiu medznú frekvenciu)

Riešenie

Cieľový parameter : $Q_{TC} = \frac{1}{\sqrt{2}}$

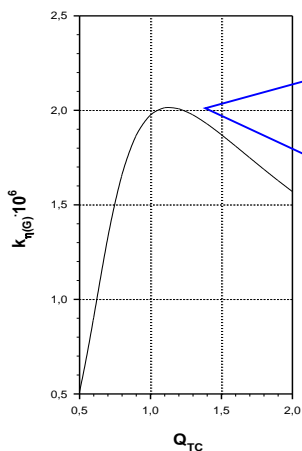
1. Vypočítame α : $\alpha = \left(\frac{Q_{TC}}{Q_{TS}} \right)^2 - 1 = \left(\frac{1}{\sqrt{2} \cdot 0.32} \right)^2 - 1 \approx 3.88$

2. Vypočítame V_{AB} : $V_{AB} = \frac{V_{AS}}{\alpha} = \frac{32}{3.88} \approx 8.2 \text{ [lit]}$

3. Medzná frekvencia bude : $f_{3(CB),\min} = \frac{f_s}{\sqrt{2} \cdot Q_{TS}} = \frac{37}{\sqrt{2} \cdot 0.32} = 81.8 \text{ [Hz]}$

Menovitá účinnosť sústavy (CB)

$$\eta_{N(CB)} = \eta_{N(IB)} = 9,6 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{f_S^3 V_{AS}}{Q_{ES}}$$



Koeficient účinnosti sústavy CB závisí od celkového činiteľa akosti Q_{TC} . Nadobúda maximálnu hodnotu pre $Q_{TC}=1,1$.

Je to jedno z cieľových kritérií pri návrhu zatvorenej ozvučnice.

Teoretická menovitá účinnosť sústavy

Vidíme, že menovitá účinnosť reproduktora sa pridaním zatvorenej ozvučnice nezmení, tj. závisí iba od parametrov reproduktora a nie od parametrov ozvučnice.

Tento záver je však platný iba vtedy ak platí predpoklad ideálnej ozvučnice s dokonale pohltivými vnútornými stenami. V praxi sa steny ozvučnice obkladajú tlmiacim materiálom a vnútro ozvučnice sa plní pórovitým materiálom s nízkou hustotou, ktorého úlohou je zabrániť odrazom a vzniku stojateho vlnenia. Vhodnou voľbou reproduktora, objemu ozvučnice a tlmiaceho materiálu možno skutočnú účinnosť sústavy oproti menovitej zlepšiť až o 15%, nevhodnou voľbou však tiež mierne zhoršiť.

Skutočná účinnosť sústavy

Závisí od tzv. koeficientu účinnosti, medznej frekvencie a skutočného objemu ozvučnice.

Skutočný objem ozvučnice môže byť menší než vypočítaný, pretože pri vyplnení vnútra ozvučnice pórovitým materiálom sa v ozvučnici zväčší hustota prostredia, v ktorom sa šíri zvuková vlna, čím sa zmenší akustická poddajnosť, ktorú reprezentuje. Aby sa poddajnosť vrátila na pôvodnú hodnotu, je potrebné skutočný objem ozvučnice zmenšiť

$$\eta_{N(CB)} = k_{\eta} f_{3(CB)}^3 V_B$$

k_{η} – koeficient účinnosti (efficiency factor)

$f_{3(CB)}$ – medzná (skutočná) frekvencia sústavy

V_B – skutočný objem ozvučnice

Príklad

- Uvažujeme reproduktor s nasledovnými parametrami:
 - $f_s=37\text{Hz}$
 - $Q_{TS}=0.32$
 - $V_{AS}=32\text{lit.}$
- Chceme navrhnuť zatvorenú ozvučnicu tak, aby sústava CB mala potenciálne najväčšiu účinnosť

Riešenie

Cieľový parameter: $Q_{TC} = 1.1$

1. Vypočítame α :
$$\alpha = \left(\frac{Q_{TC}}{Q_{TS}} \right)^2 - 1 = \left(\frac{1.1}{0.32} \right)^2 - 1 \approx 10.82$$

2. Vypočítame V_{AB} :
$$V_{AB} = \frac{V_{AS}}{\alpha} = \frac{32}{10.82} \approx 2.96 \quad [\text{lit}]$$

Výchylka reproduktora (CB)

$$x_{D(CB)}(s) = \sqrt{2P_E} \cdot \sigma_{x(CB)} \cdot X_{(CB)}(s)$$

Výchylková citlivosť reproduktora (CB):

$$\sigma_{x(CB)} = \frac{1}{\alpha + 1} \sigma_{x(IB)} = k_{x(CB)} \sigma_{x(IB)} \quad \left[\text{mW}^{-1/2} \right]$$

Výchylková funkcia reproduktora (CB):

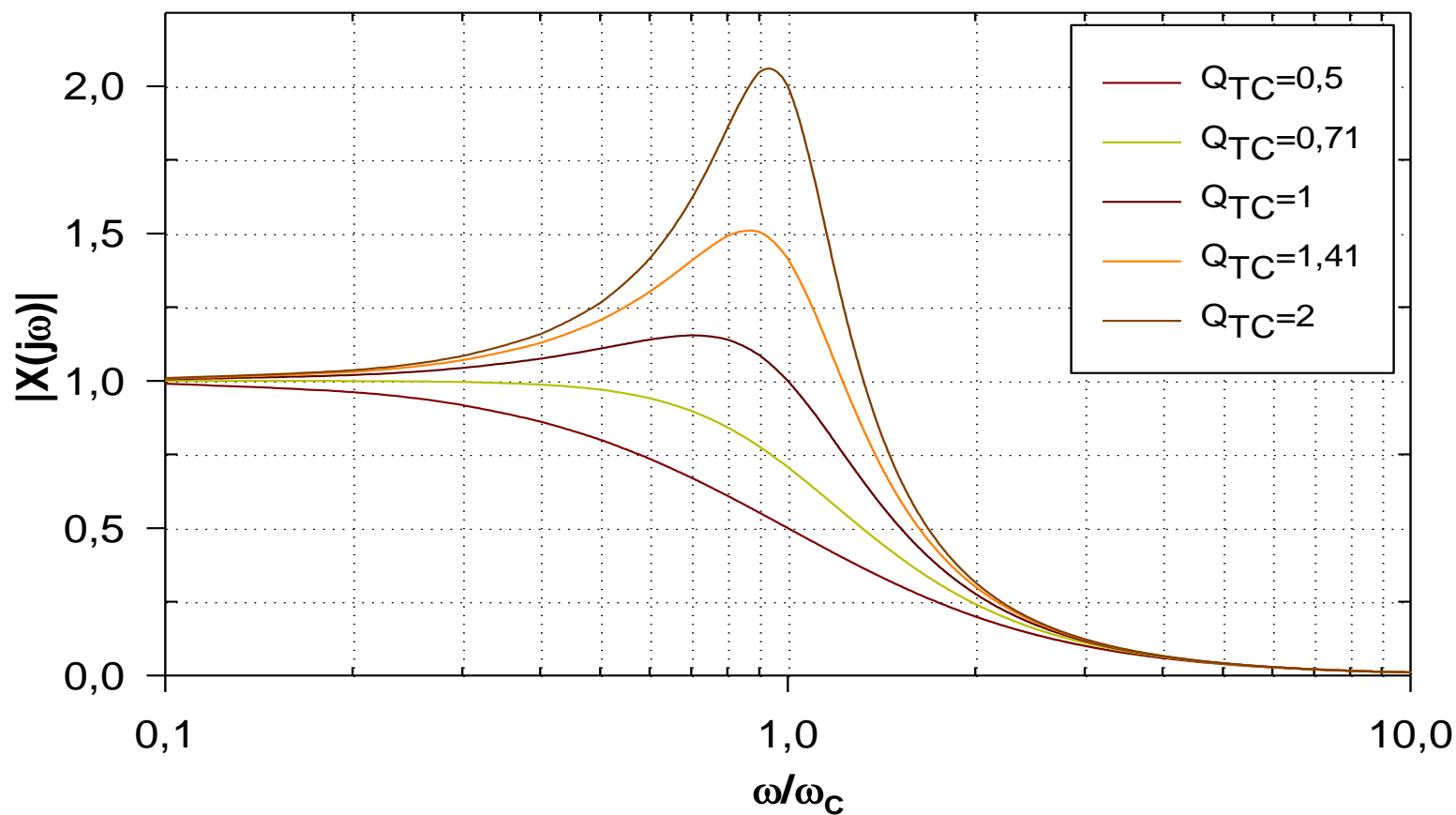
$$X_{(CB)}(s) = \frac{1}{s_C^2 + s_C / Q_{TC} + 1} \quad s_C = \frac{s}{\omega_C}$$

Výchylka reproduktora

- výchylka reproduktora v zatvorenej ozvučnici závisí od frekvencie podobne, ako reproduktor v nekonečnej ozvučnici
- amplitúda výchylky je $(\alpha+1)$ krát menšia, než u reproduktora v nekonečnej ozvučnici
- je to vďaka akustickej poddajnosti ozvučnice, ktorá znižuje celkovú poddajnosť sústavy – reproduktor sa stáva „tuhším“
- dôsledkom znižovania výchylky reproduktora je menšie nelineárne skreslenie pri maximálnom výkone
- poddajnosť ozvučnice taktiež chráni reproduktor pred poškodením

Frekvenčná charakteristika výchylky reproduktora v zatvorenej ozvučnici 1

$$X_{(CB)}(s) = \frac{1}{s_C^2 + s_C/Q_{TC} + 1}$$



Frekvenčná charakteristika výchylky reproduktora v zatvorenej ozvučnici 2

$$k_{x(CB)} \cdot X_{(CB)}(s) = \frac{1}{\alpha + 1} \cdot \frac{1}{\left(\frac{s_N}{\sqrt{\alpha + 1}}\right)^2 + \frac{s_N}{\sqrt{\alpha + 1}} \frac{1}{Q_{MS} \sqrt{\alpha + 1}} + 1}$$

