



Elektroakustika

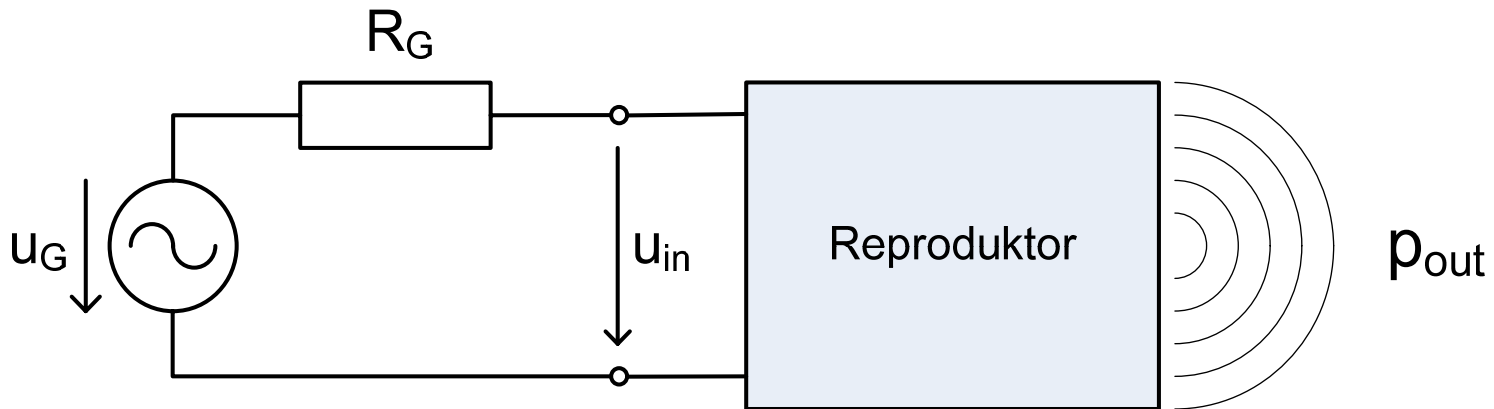
L06: Reprodukory

doc. Ing. Jozef Juhár, PhD.

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

Reproduktor = elektroakustický menič + akustický vysielateľ

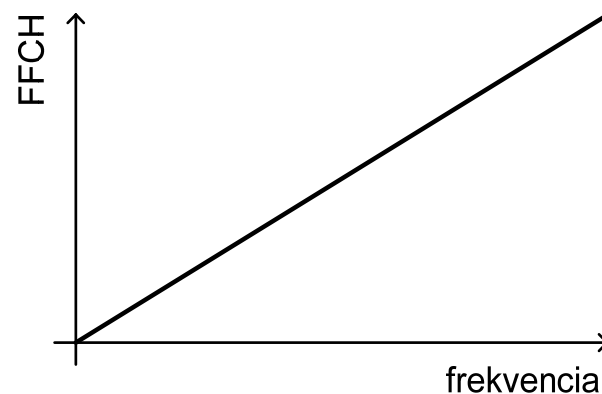
- základnou požiadavkou, kladenou na reproduktor je verná reprodukcia akustického signálu
- prenosová sústava – elektrický signál na vstupe – akustický signál na výstupe



$$p_{renos} = \frac{P_{out}}{U_{in}}$$

Požiadavky na „ideálny“ prenos

- konštantná amplitúdová frekvenčná charakteristika
- lineárna fázová charakteristika
- impulzová odpoveď (prechodová charakteristika) bez zvlnenia
- minimálne nelineárne skreslenie
- „dobrá“ účinnosť
- ...
- žiaden reproduktor nespĺňa tieto požiadavky = veľké množstvo typov



Rozdelenie reproduktorov

(podľa spôsobu vysielania)

- priamovysielaajúce
- nepriamovysielaajúce (tlakové)



Rozdelenie reproduktorov

(podľa typu elektromechanického meniča)

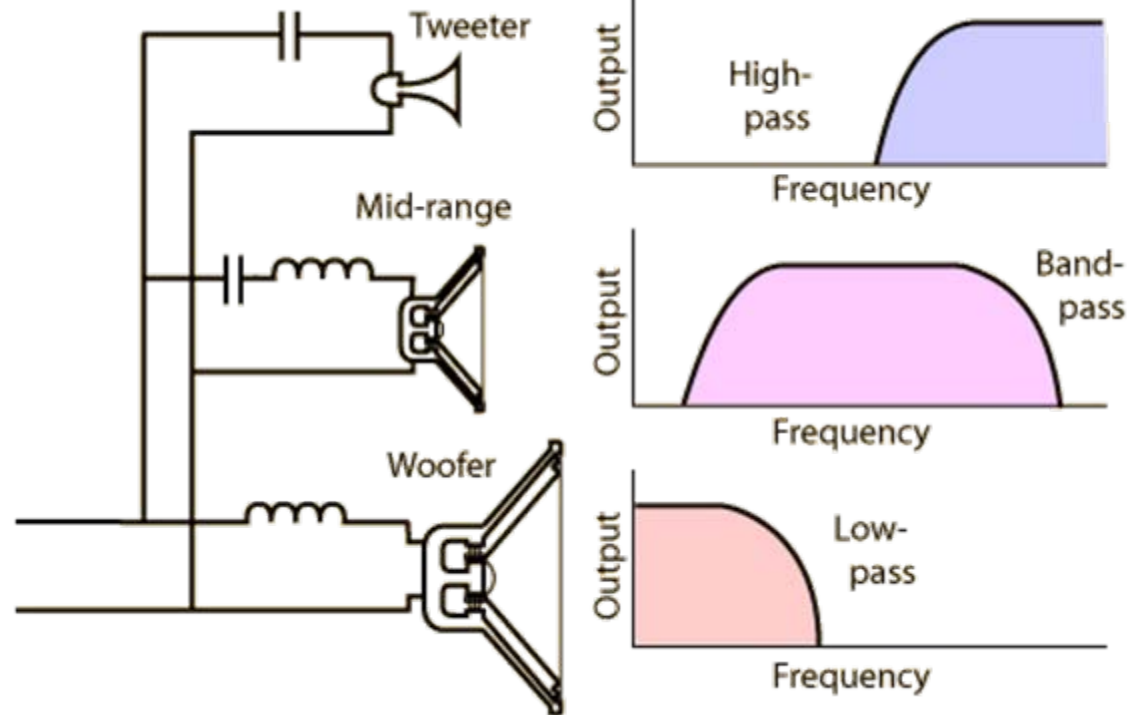
- elektrodynamické cievkové
- elektrodynamické páskové
- elektrostatické
- piezoelektrické
- iné



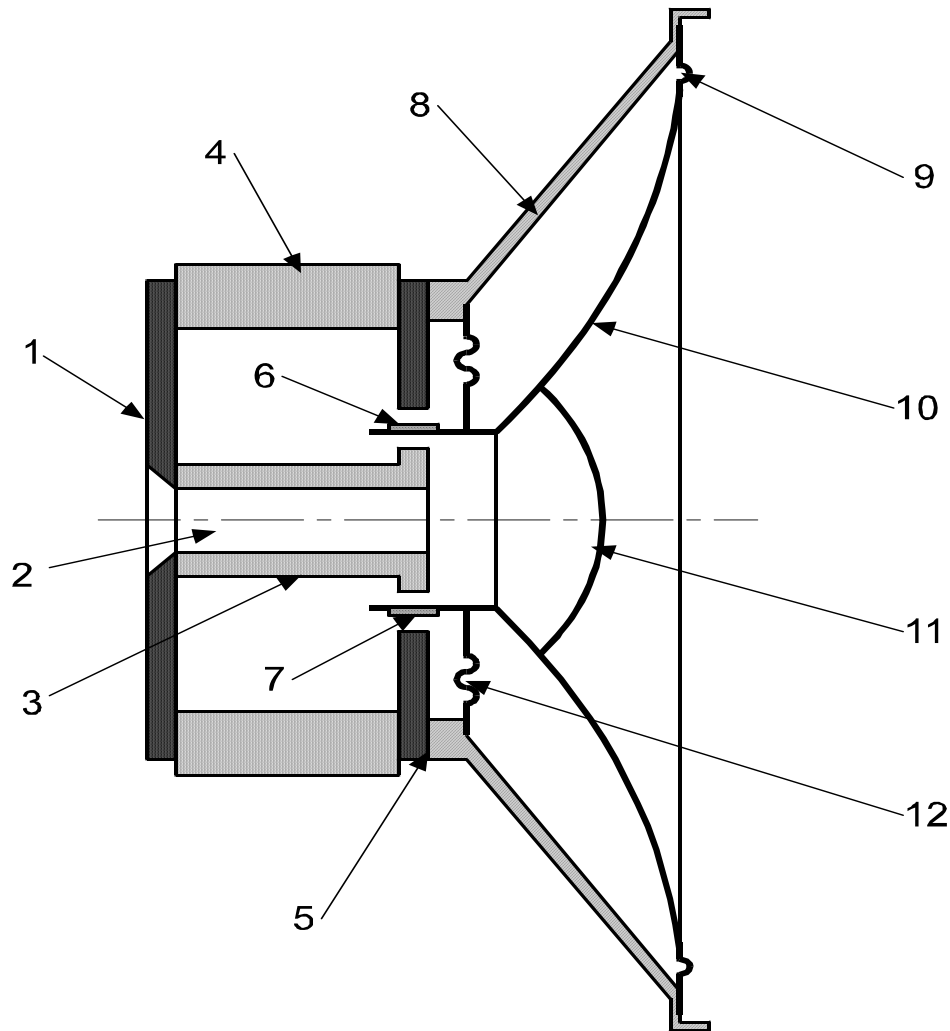
Rozdelenie reproduktorov

(podľa prenášaného pásma frekvencií)

- nízkotónové
- stredotónové
- vysokotónové
- širokopásmové
- iné



Elektrodynamický reproduktor



- 1 - predná platňa
- 2 - otvor
- 3 - pólové nástavce
- 4 - magnet
- 5 - zadná platňa
- 6 - cievka
- 7 - vzduchová medzera
- 8 - kôš
- 9 - surround
- 10 - membrána
- 11 - prachový kryt
- 12 - strediaca membrána

Podsystemy elektrodynamického reproduktora

- elektrodynamický elektromechanický menič:
 - magnetický obvod (permanentný magnet, pólové nástavce, predná a zadná platňa)
 - cievka;
- mechanický obvod
 - teleso membrány a cievky
 - pružné zavesenie membrány a cievky:
 - strediaci membrána - pavúka (spider)
 - poddajné zavesenie na okrajoch (surround)
- akustický vysielač – plocha membrány v tvare:
 - zrezaného kužeľa
 - guľového vrchlíka (konvexný alebo konkávny)

Typické parametre nízkotónového reproduktora (woofer)



Nominal Impedance	8 Ohms	Voice Coil Resistance	6.1 Ohms
Recommended Frequency Range	20 - 2500 Hz	Voice Coil Inductance	3.47 mH
Short Term Power Handling *	250 W	Force Factor	11.4 N/A
Long Term Power Handling *	100 W	Free Air Resonance	20 Hz
Characteristic Sensitivity (2.83V, 1m)	87 dB	Moving Mass	41.6 g
Voice Coil Diameter	39 mm	Air Load Mass In IEC Baffle	2.02 g
Voice Coil Height	20 mm	Suspension Compliance	1.5 mm/N
Air Gap Height	6 mm	Suspension Mechanical Resistance	1.67 Ns/m
Linear Coil Travel (p-p)	14 mm	Effective Piston Area	230 cm ²
Maximum Coil Travel (p-p)	21 mm	VAS	108 Litres
Magnetic Gap Flux Density	0.9 T	QMS	3.28
Magnet Weight	0.64 kg	QES	0.26
Total Weight	2.20 kg	QTS	0.24

Typické parametre stredotónového reproduktora (midrange)



Nominal Impedance	8 Ohms	Voice Coil Resistance	6.3 Ohms
Recommended Frequency Range	400 - 5000 Hz	Voice Coil Inductance	0.31 mH
Short Term Power Handling *	400 W	Force Factor	4.2 N/A
Long Term Power Handling *	110 W	Free Air Resonance	68 Hz
Characteristic Sensitivity (2.83V, 1m)	86.0 dB	Moving Mass	4.58 g
Voice Coil Diameter	26 mm	Air Load Mass In IEC Baffle	0.24 g
Voice Coil Height	5.8 mm	Suspension Compliance	1.2 mm/N
Air Gap Height	4.0 mm	Suspension Mechanical Resistance	0.85 Ns/m
Linear Coil Travel (p-p)	1.8 mm	Effective Piston Area	55 cm ²
Maximum Coil Travel (p-p)	-	VAS	5 Litres
Magnetic Gap Flux Density	1.1 T	QMS	2.42
Magnet Weight	0.25 kg	QES	0.74
Total Weight	0.66 kg	QTS	0.56

Typické parametre vysokotónového reproduktora (tweeter)

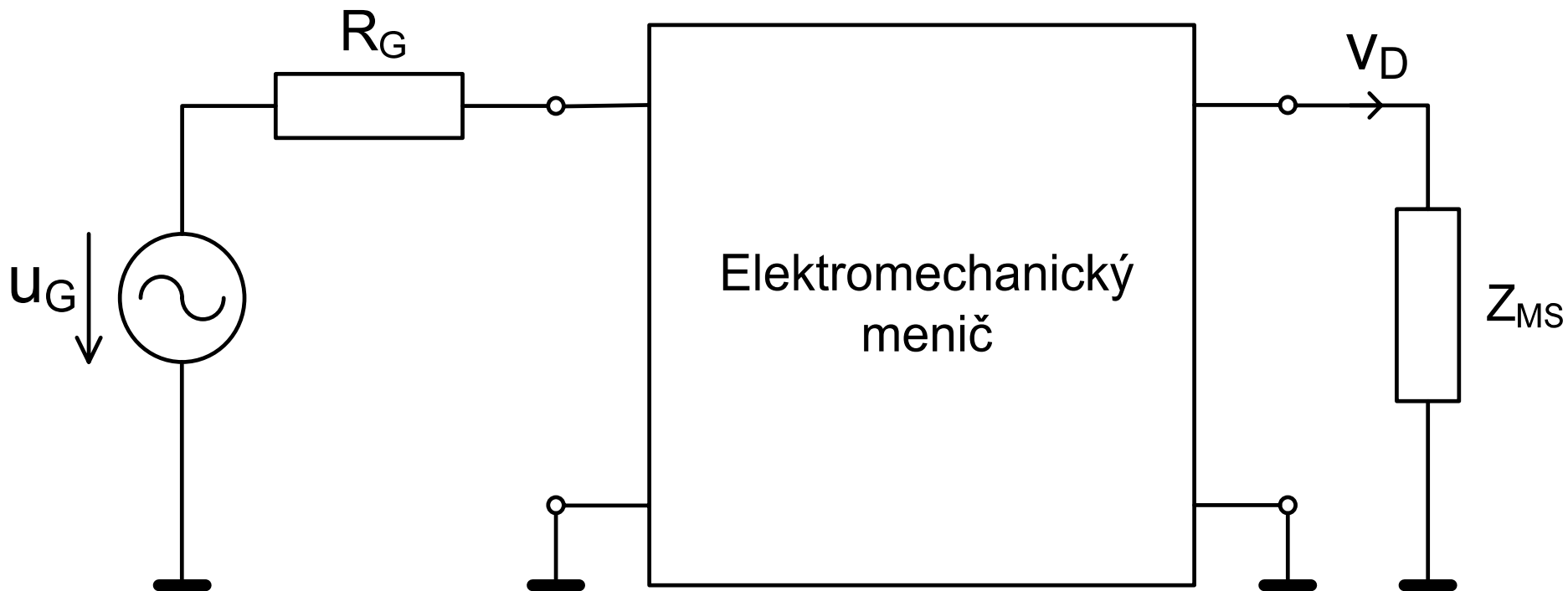


Nominal Impedance	6 Ohms	Voice Coil Resistance	4.6 Ohms
Recommended Frequency Range	2000 - 25000 Hz	Voice Coil Inductance	0.05 mH
Short Term Power Handling *	200 W	Force Factor	3.5 N/A
Long Term Power Handling *	90 W	Free Air Resonance	700 Hz
Characteristic Sensitivity (2.83V, 1m)	91 dB	Moving Mass	0.33 g
Voice Coil Diameter	26 mm	Effective Piston Area	7.0 cm ²
Voice Coil Height	1.5 mm	Magnetic Gap Flux Density	1.8 T
Air Gap Height	2.0 mm	Magnet Weight	0.34 kg
Linear Coil Travel (p-p)	0.5 mm	Total Weight	0.80 kg

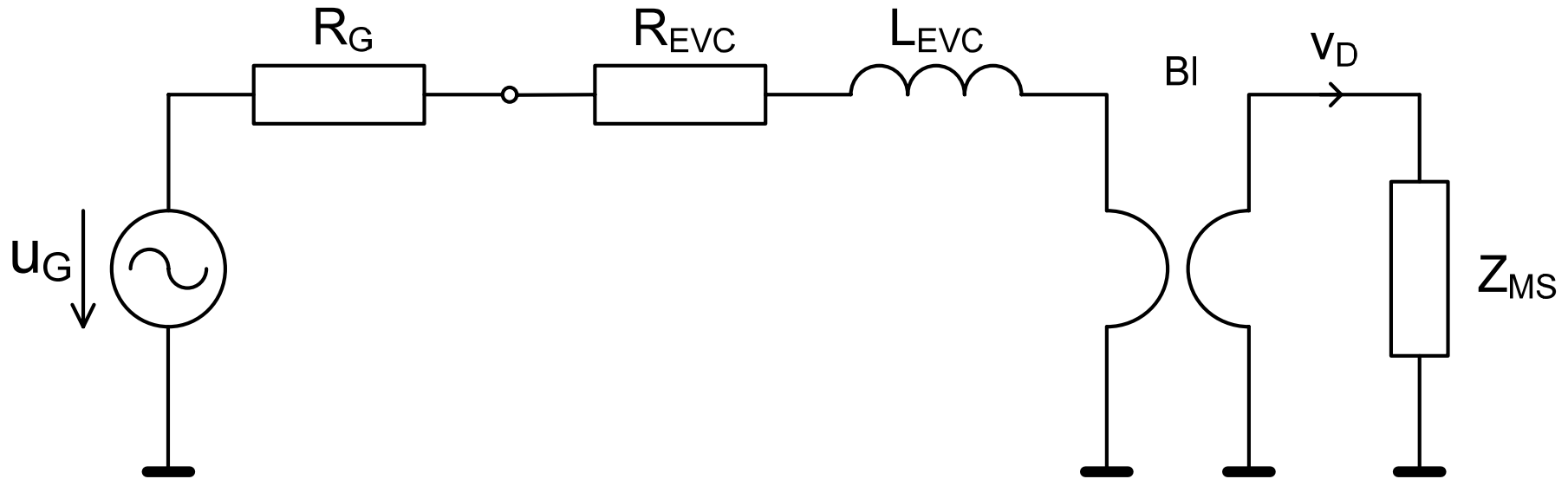
Elektrické, mechanické a akustické prvky elektrodynamického reproduktora v nekonečnej ozvučnici

- R_G vnútorný odpor zdroja elektrického signálu;
- R_{EVC} elektrický odpor cievky;
- L_{EVC} elektrická indukčnosť cievky;
- B_l transformačná konštanta elektromechanického meniča;
- M_{MD} mechanická hmotnosť membrány a cievky reproduktora;
- C_{MS} mechanická poddajnosť reproduktora;
- R_{MS} mechanický odpor trenia membrány, telesa cievky a pružného závesu;
- R_{ARD} akustický vysielač odpór reproduktora;
- M_{ARD} akustická vysielačia hmotnosť (membrány) reproduktora;
- S_D efektívna vysielačia plocha membrány reproduktora (transformačná konštanta mechanicko-akustického meniča).

Elektrický podsystem reproduktora

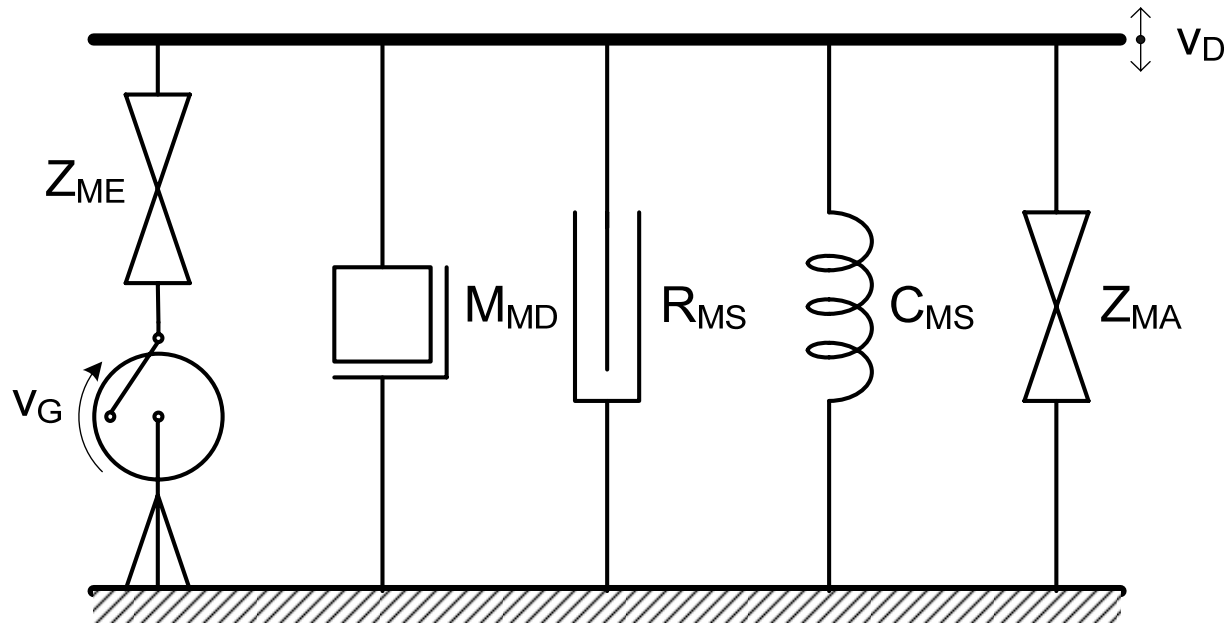


Elektrický podsystem reproduktora (náhradná schéma)



- mechanická impedancia Z_{MS} predstavuje mechanickú záťaž elektrodynamického meniča, tvorenú mechanickými prvkami a akustickou „záťažou“ reproduktora
- hlavnou veličinou na mechanickej strane náhradnej schémy mechanická rýchlosť v_D , pretože vstupné elektrické napätie sa meničom transformuje na rýchlosť („prúdová“ veličina)

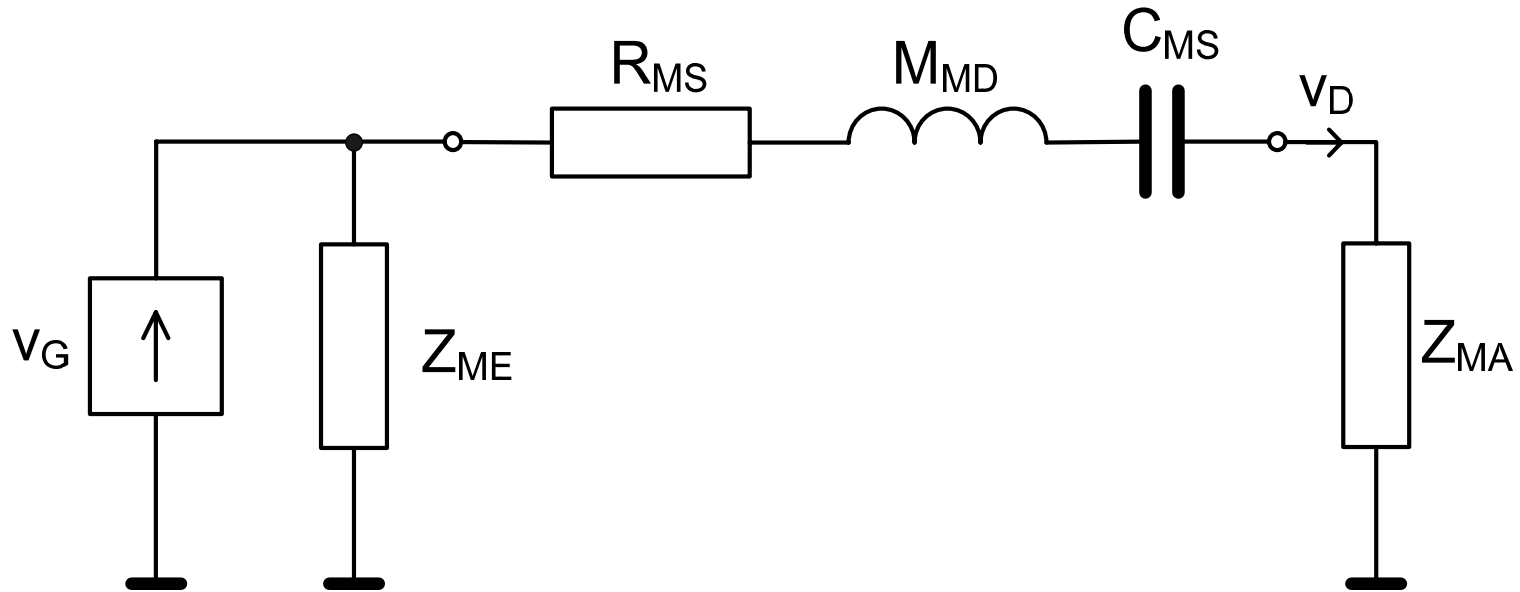
Mechanický podsystem reproduktora (symbolická schéma)



- zdroj mechanickej rýchlosti v_G je obrazom elektrického napätia na vstupe elektrodynamického meniča
- mechanická impedancia Z_{ME} reprezentuje elektrické prvky, zobrazené na mechanickú stranu

Mechanický podsystem reproduktora

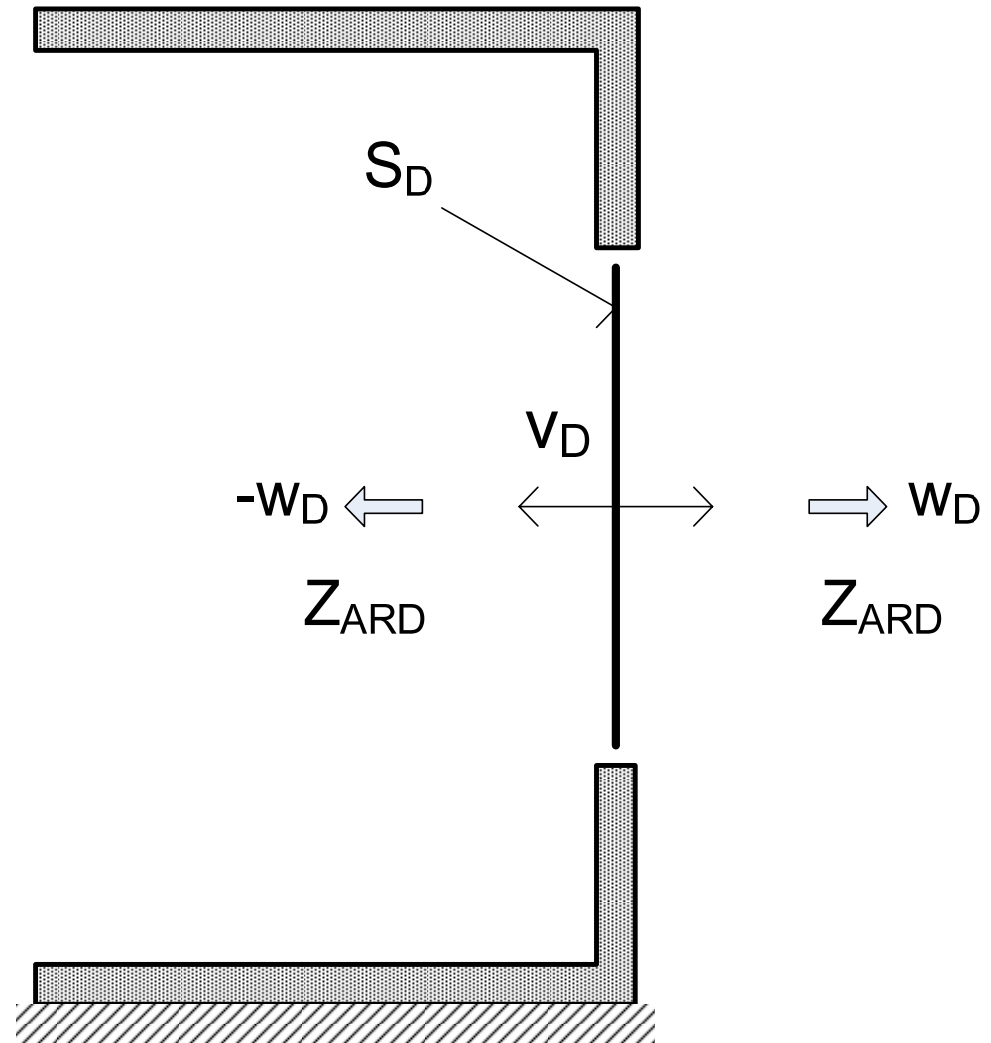
(analogická schéma)



- hlavnými prvkami mechanického podsystemu reproduktora sú mechanické prvky M_{MD} , R_{MS} , C_{MS} , ktoré kmitajú rovnakou rýchlosťou v_D , takže v analogickej schéme budú zapojené do série
- mechanická impedancia Z_{MA} reprezentuje akustickú záťaž piesta (vysielacie impedancie) zobrazenú na mechanickej strane cez ideálny mechanicko-akustický menič

Akustický podsystem reproduktora (symbolická schéma)

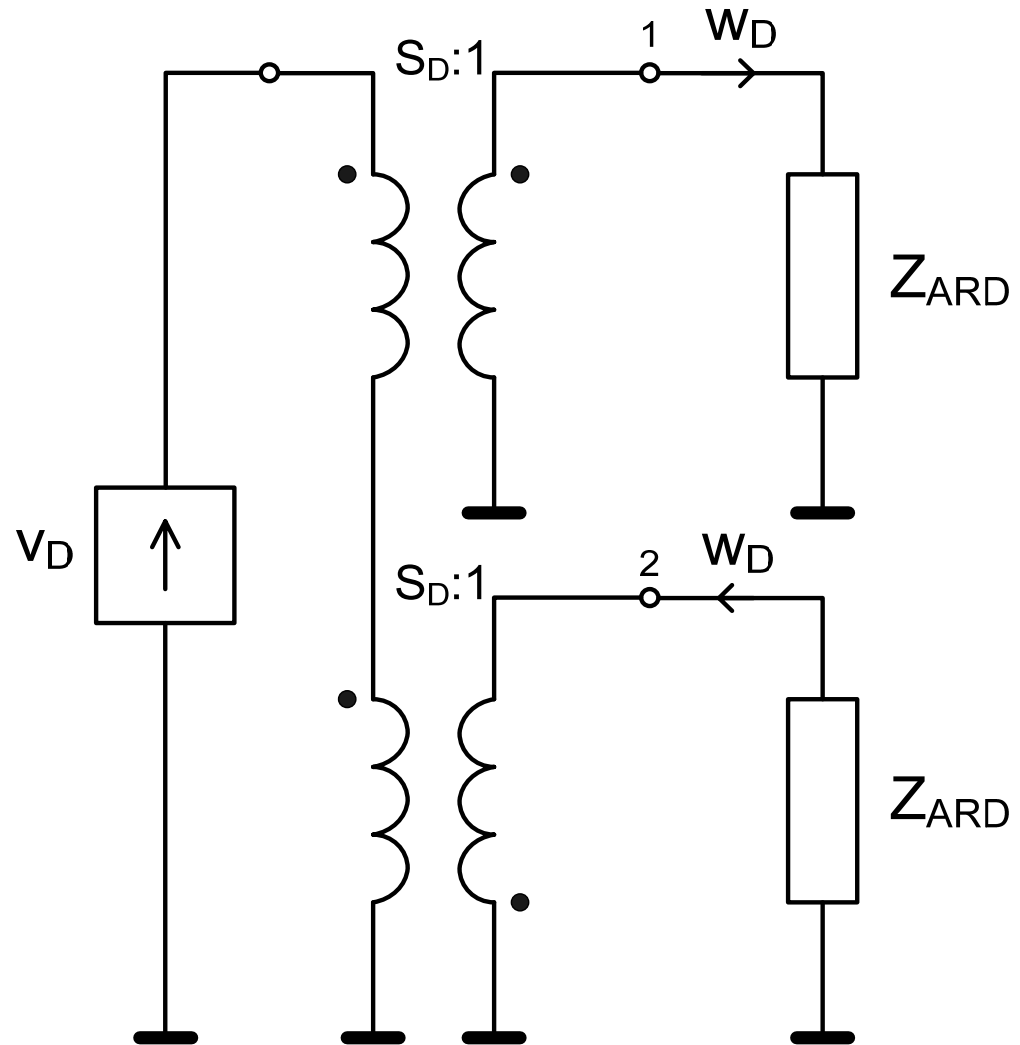
- je ním ideálny (dokonale tuhý, nehmotný) piest plochy S_D , ktorý je zdrojom akustického vlnenia, generovaného do akustickej vysielacej impedancie Z_{ARD}
- piest má v analogickej schéme funkciu mechanicko-akustického meniča



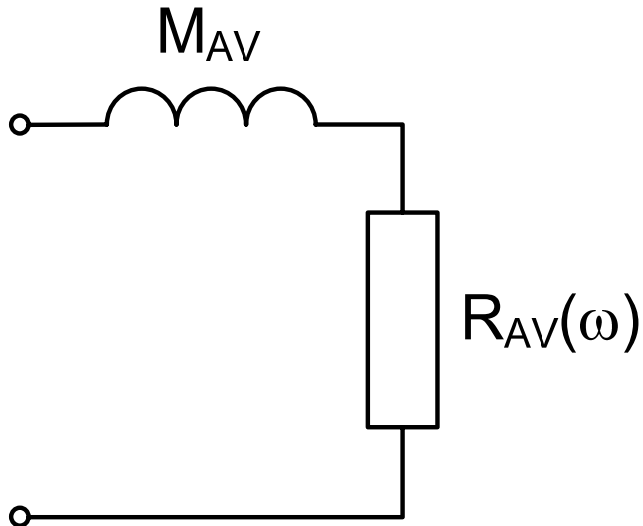
Akustický podsystem reproduktora

(analogická schéma)

- pretože piest vysiela prednou aj zadnou stranou do oddelených akustických priestorov, jeho náhradnou (analogickou) schémou je dvojitý mechanicko-akustický menič, u ktorého je opačná fáza akustických veličín realizovaná „otočením“ polarity sekundárnej strany



Vysielacia impedancia piesta v nekonečnej stene

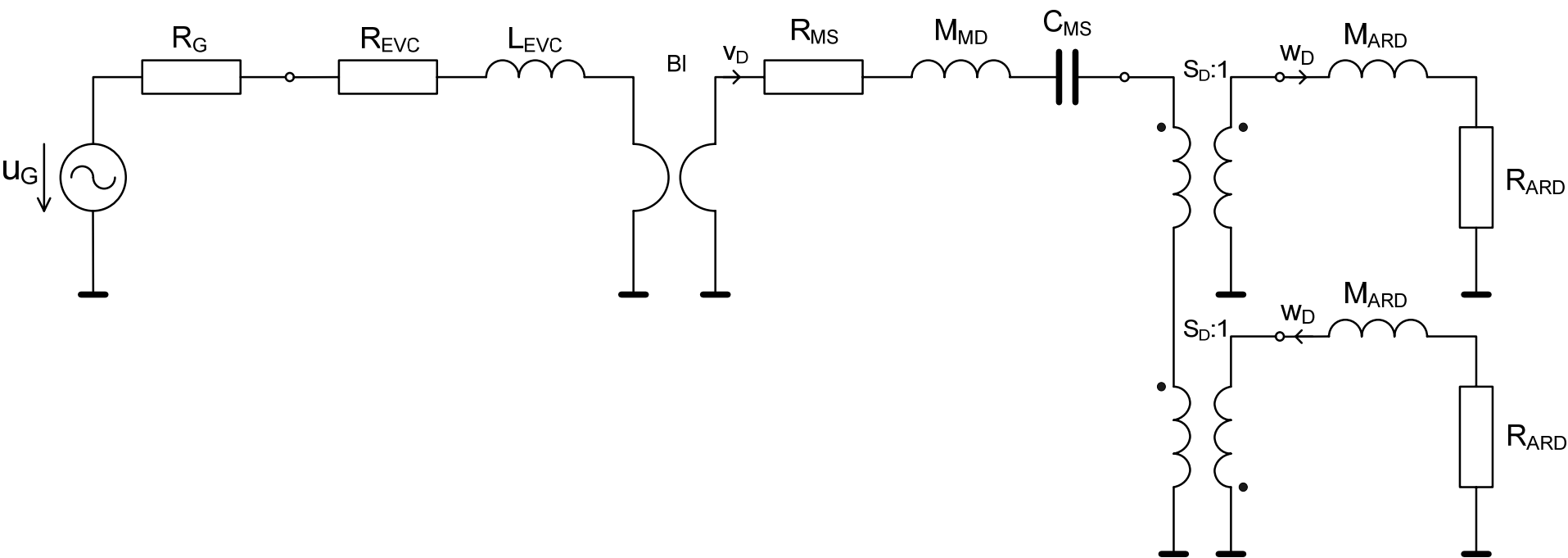


$$Z_{ARD} = R_{ARD}(\omega) + j\omega M_{ARD}$$

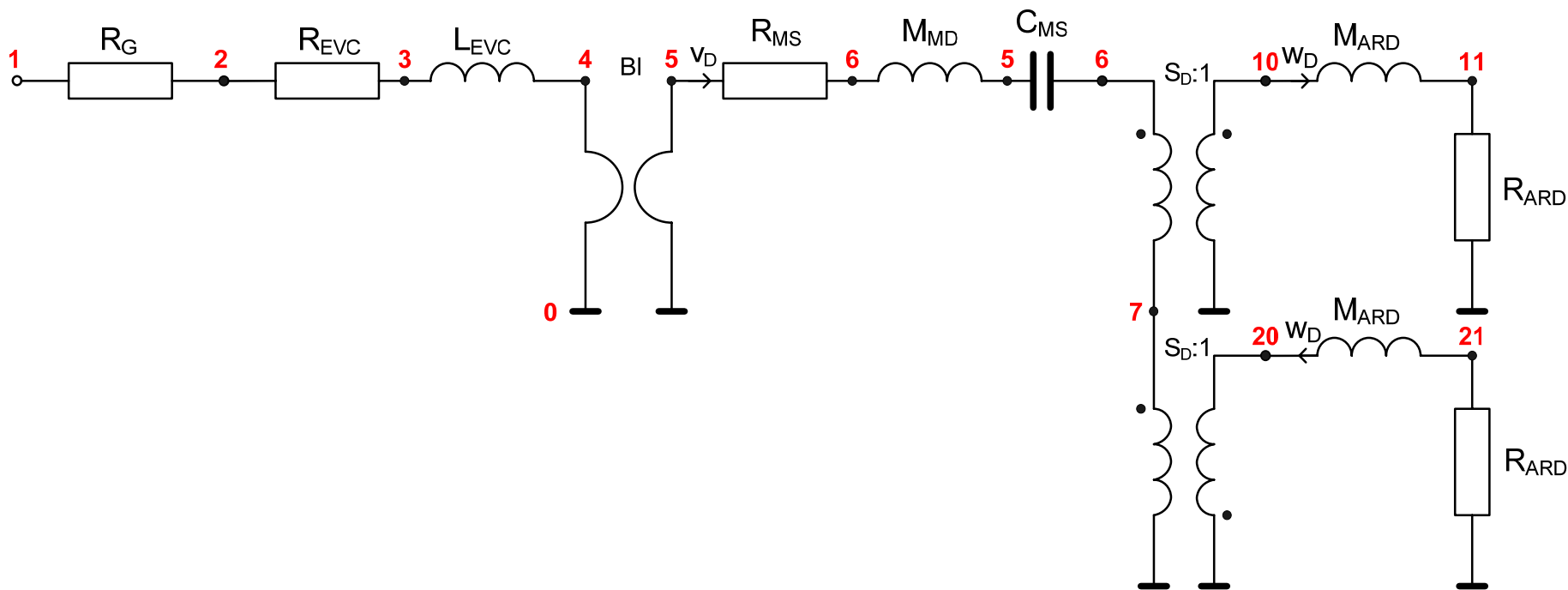
$$R_{ARD}(\omega) = \frac{\rho_0}{2\pi c_0} \omega^2$$

$$M_{ARD} = \frac{\rho_0}{S_D} \frac{8R_D}{3\pi} = \frac{8\rho_0}{3\pi^2 R_D}$$

Úplná náhradná schéma elektrodynamického, priamovysielaajúceho reproduktora



Úplná náhradná schéma reproduktora v nekonečnej ozvučnici pre analýzu jeho vlastností (simuláciu) v programe AkAbak



Skript programu AkAbak

| 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);
}

System 'S1'

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

Ratio={1/Sd}

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

Impedance 'Rard1' Node=11

$Z = \{(\text{roh} * \omega^2) / (2 * \pi * c0)\}$

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

Ratio={1/Sd}

AcouMass 'Mard2' Node=20=21 Ma={Mard}

Impedance 'Rard2' Node=21

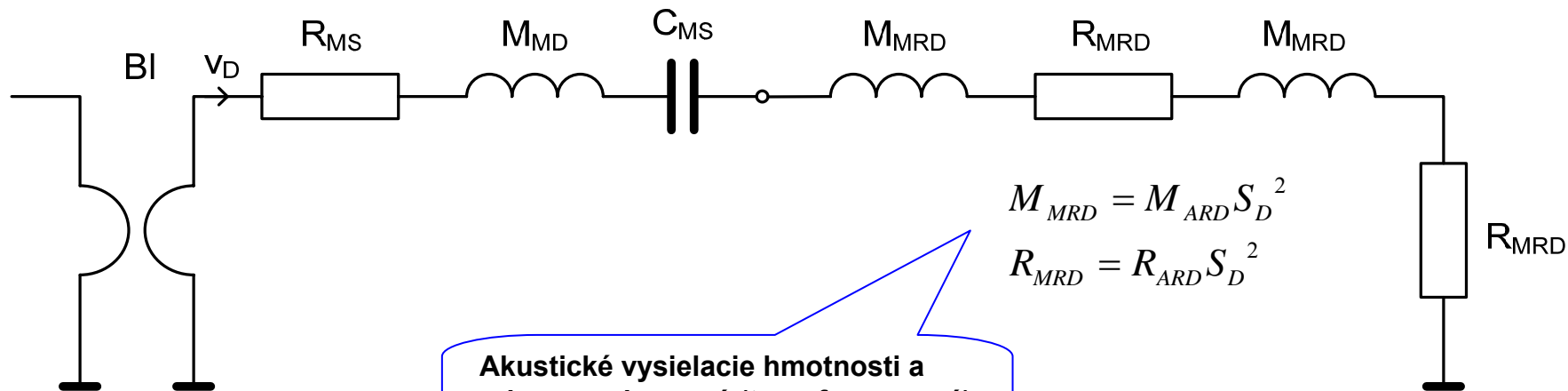
$Z = \{(\text{roh} * \omega^2) / (2 * \pi * c0)\}$

Potential 'P1' Node=10

Analýza vlastností reproduktora v nekonečnej ozvučnici

- Súbežne:
 - Analytická analýza vlastností reproduktora
 - Analýza pomocou programu AkAbak
- Zameraná na:
 - elektrické vlastnosti
 - vstupná (elektrická) impedancia
 - prenosové vlastnosti (analýza pri „malých“ signáloch)
 - prenosová funkcia
 - menovitá účinnosť
 - charakteristická citlivosť
 - výkonové vlastnosti (analýza pri „veľkých“ signáloch)
 - výchylka reproduktora
 - maximálnou výchylkou limitovaný el. príkon
 - maximálnou výchylkou limitovaný ak. výkon

Úprava (zjednodušenie) náhradnej schémy reproduktora pre analýzu vlastností reproduktora

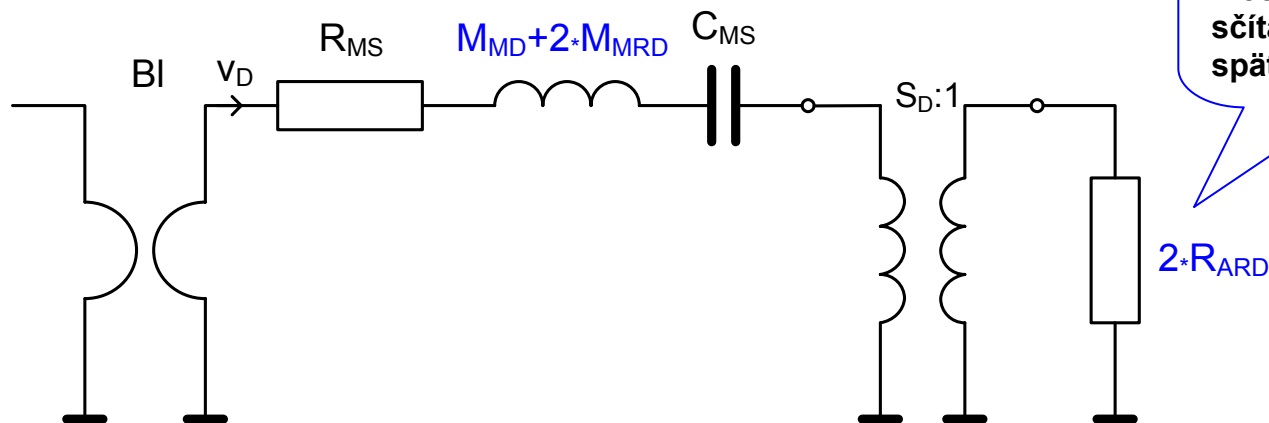


$$M_{MRD} = M_{ARD} S_D^2$$

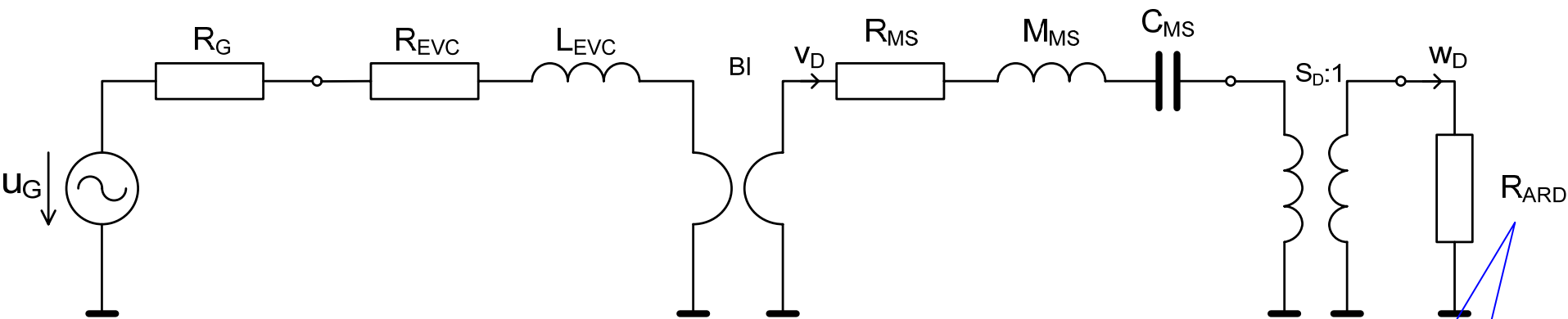
$$R_{MRD} = R_{ARD} S_D^2$$

Akustické vysielacie hmotnosti a odpory, zobrazené (transformované) do mechanickej domény.

Akustické vysielacie odpory boli v mechanickej doméne sčítané a vrátené späť do akustickej.



Zjednodušená náhradná schéma elektrodynamického priamovysielačujúceho reproduktora

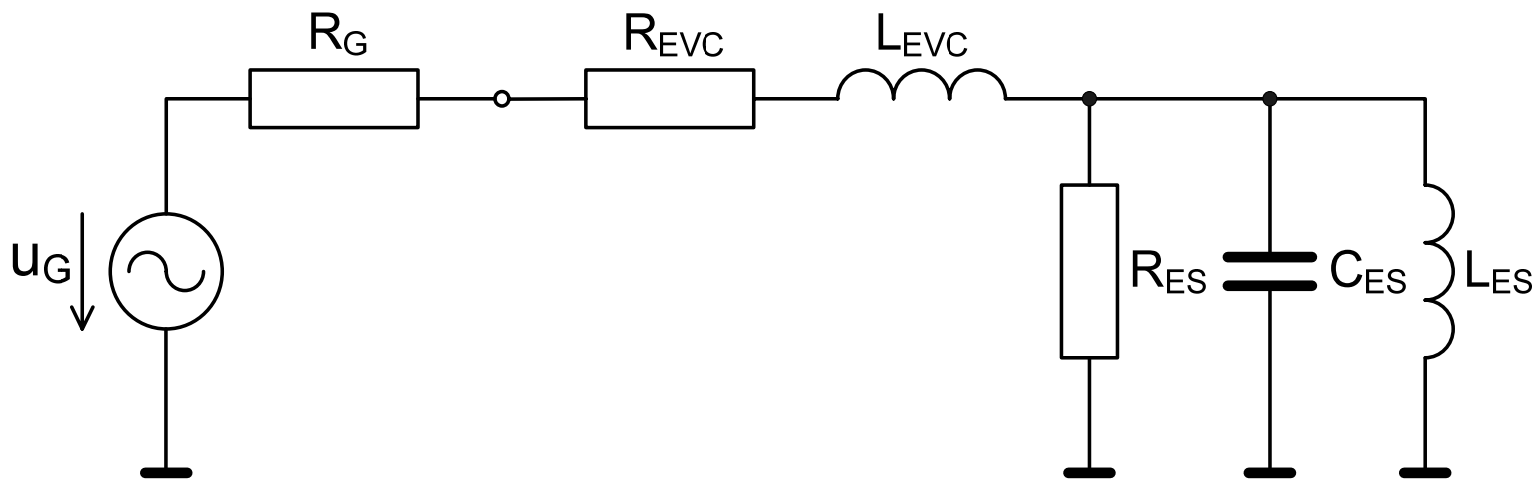


$$M_{MS} = M_{MD} + 2M_{MRD}$$

$$R_{ARD} \doteq 0$$

Akustický vysielačový odpor figuruje v schéme iba symbolicky.

Elektrická náhradná schéma reproduktora



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

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

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

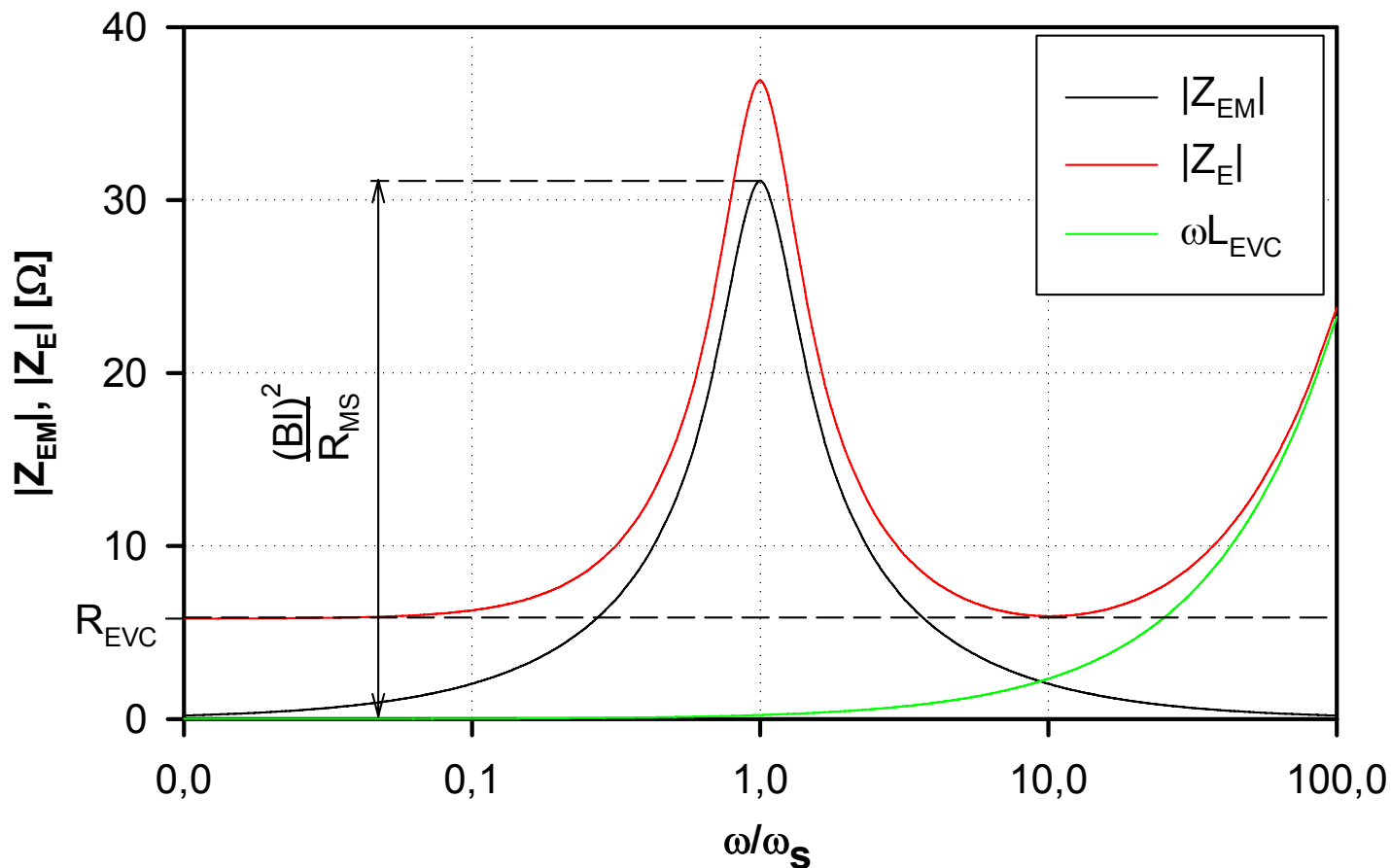
Elektrická impedancia

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

rezonančná frekvencia = $\frac{1}{2\pi\sqrt{L_{ES}C_{ES}}} \Rightarrow f_s$

činiteľ kvality = $R_{ES}\sqrt{\frac{C_{ES}}{L_{ES}}} \Rightarrow Q_{MS}$

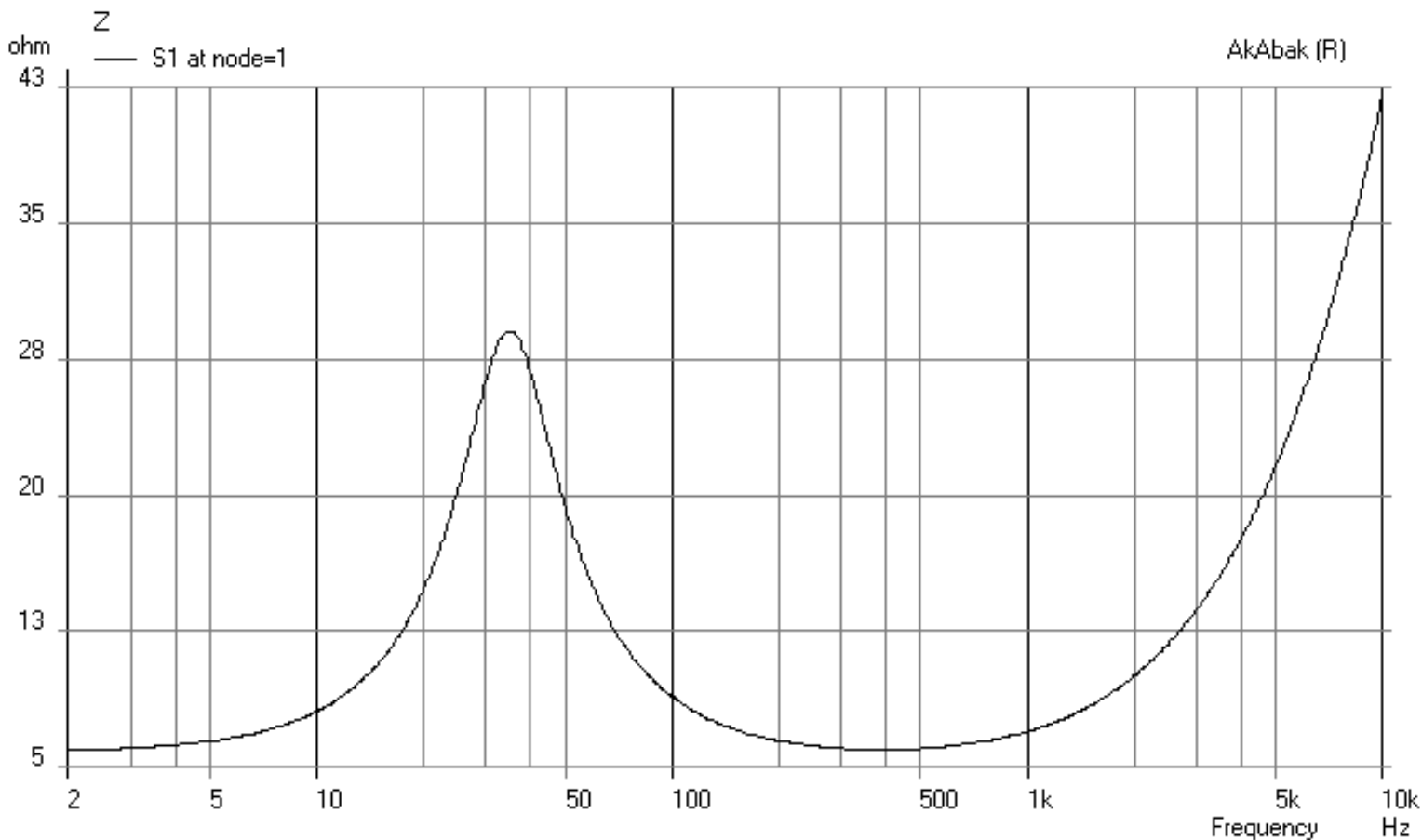
Frekvenčná závislosť elektrickej impedancie reproduktora



- na elektrickej impedancii reproduktora sa podieľa:
 - elektrický odpor cievky R_{EVC} – v celom frekvenčnom pásme
 - paralelný elektrický rezonančný obvod (R_{ES}, L_{ES}, C_{ES}) – v pásme nízkych frekvencií (v okolí rezonančnej frekvencie)
 - reaktancia cievky (ωL_{EVC}) – začína sa výraznejšie prejavovať zhruba od 10-násobku rezonančnej frekvencie

Frekvenčná závislosť elektrickej impedancie reproduktora (simulácia v programe AkAbak)

19. Impedance of L06-07, Amplitude (Phase)



“Mechanická“ časť elektrickej impedancie

$$Z_{EM} = \frac{1}{\frac{1}{R_{ES}} + \frac{1}{sL_{ES}} + sC_{ES}} = \frac{1}{\frac{R_{MS}}{(BL)^2} + \frac{1}{sC_{MS}(BL)^2} + s\frac{M_{MS}}{(BL)^2}}$$

Normovaná funkcia pásmového priepustu 2. rádu

Po úprave:

$$Z_{EM} = \frac{(BL)^2}{R_{MS}} \cdot \frac{s_N / Q_{MS}}{s_N^2 + s_N / Q_{MS} + 1};$$

$$s_N = \frac{s}{\omega_S} = \frac{s}{2\pi f_S}$$

$$|Z_{EM}(j\Omega)| = \frac{(BL)^2}{R_{MS}} \cdot \frac{\Omega / Q_{MS}}{\sqrt{(1 - \Omega^2)^2 + (\Omega / Q_{MS})^2}};$$

$$\Omega = \frac{\omega}{\omega_S}$$

Rezonančná frekvencia a „mechanický“ činiteľ kvality reproduktora

- sériová mechanická impedancia je z elektrickej strany „videná“ ako paralelná (je to zrejmé z rezonančnej krivky elektrickej impedancie reproduktora)
- „mechanický“ činiteľ kvality je činiteľom kvality sériového mechanického rezonančného obvodu, ktorý je z elektrickej strany „videný“ ako paralelný elektrický rezonančný obvod

$$\omega_s = \frac{1}{\sqrt{M_{MS} \cdot C_{MS}}}$$

$$Q_{MS} = \frac{1}{R_{MS}} \sqrt{\frac{M_{MS}}{C_{MS}}}$$

Analýza prenosových vlastností sústavy

(platí pre pásmo nízkych frekvencií)

- malé signály – lineárna oblasť kmitania reproduktora
- prenosová charakteristika reproduktora - pomer medzi výstupnou akustickou veličinou (akustický tlak, akustická objemová rýchlosť, akustický výkon) a vstupnou elektrickou veličinou (elektrické napätie, elektrický prúd, elektrický výkon)
- najčastejšie - pomer výstupného akustického tlaku ku vstupnému napätiu
- v **uvažovanom pásme akustických frekvencií** (rozmery reproduktora menšie než štvrtina vlnovej dĺžky) reproduktor považujeme za **zdroj guľovej zvukovej vlny** a vplyv **indukčnosti cievky** a **vysielacieho odporu** je **zanedbateľný**

Uvažované pásmo „nízkých“ frekvencií

Je vymedzené podmienkou:

$$\text{rozmery reproduktora} < \frac{\lambda}{4}$$

$$\text{t.j. napr.: } 2\pi R_D < \frac{\lambda}{4}$$

$$2\pi R_D < \frac{c_0}{4f}$$

$$f < \frac{c_0}{8\pi R_D}$$

Ak napr.:

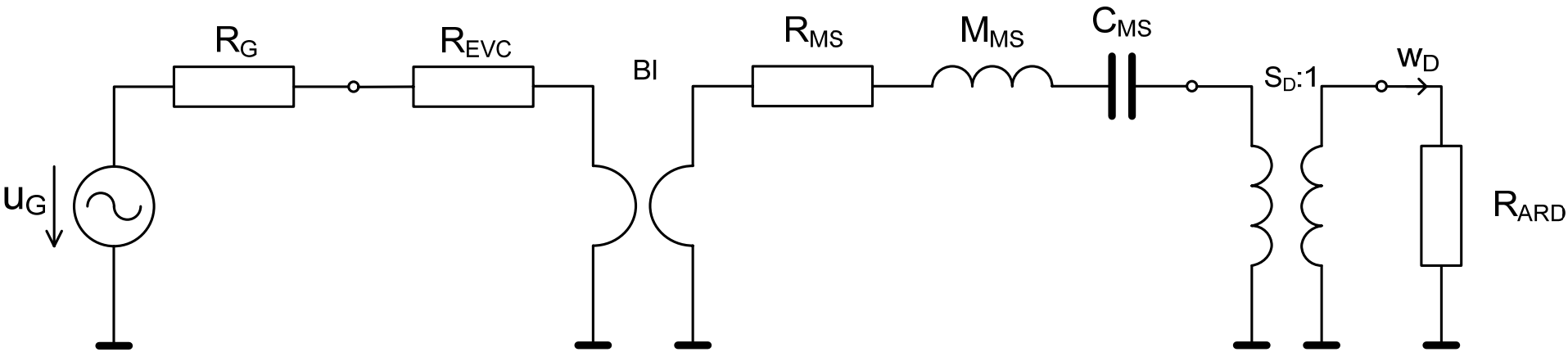
$$R_D = 10\text{cm}$$

"Nízke" frekvencie

budú platiť do frekvencie:

$$f_{\max} < \frac{344}{8 \cdot \pi \cdot 0.1} \doteq 138\text{Hz}$$

Zjednodušenie schémy (vynechanie indukčnosti cievky)

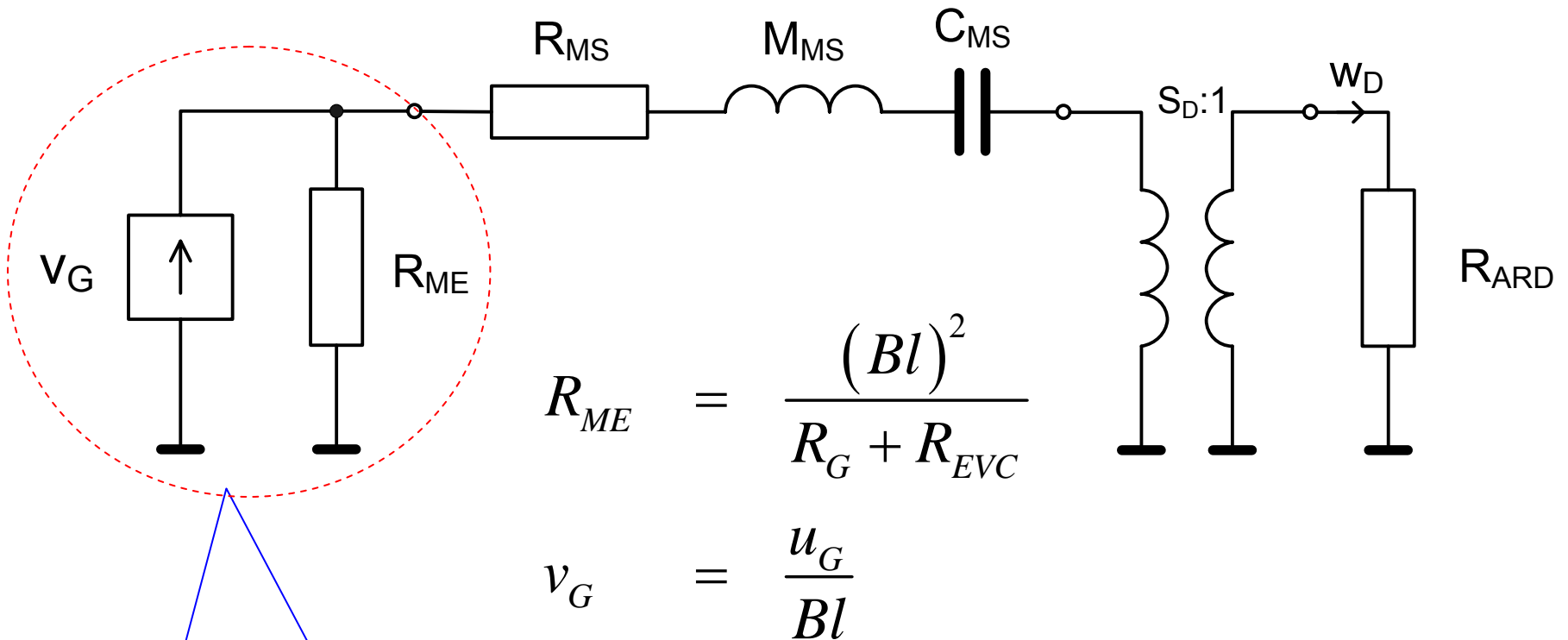


V blízkom poli reproduktora platí (r je vzdialenosť od ústia reproduktora):

$$p_{out}(t) = \frac{\rho_0}{2\pi r} \cdot \frac{d w_D(t)}{d t} \quad \Leftrightarrow \quad p_{out}(s) = \frac{\rho_0}{2\pi r} s w_D(s)$$

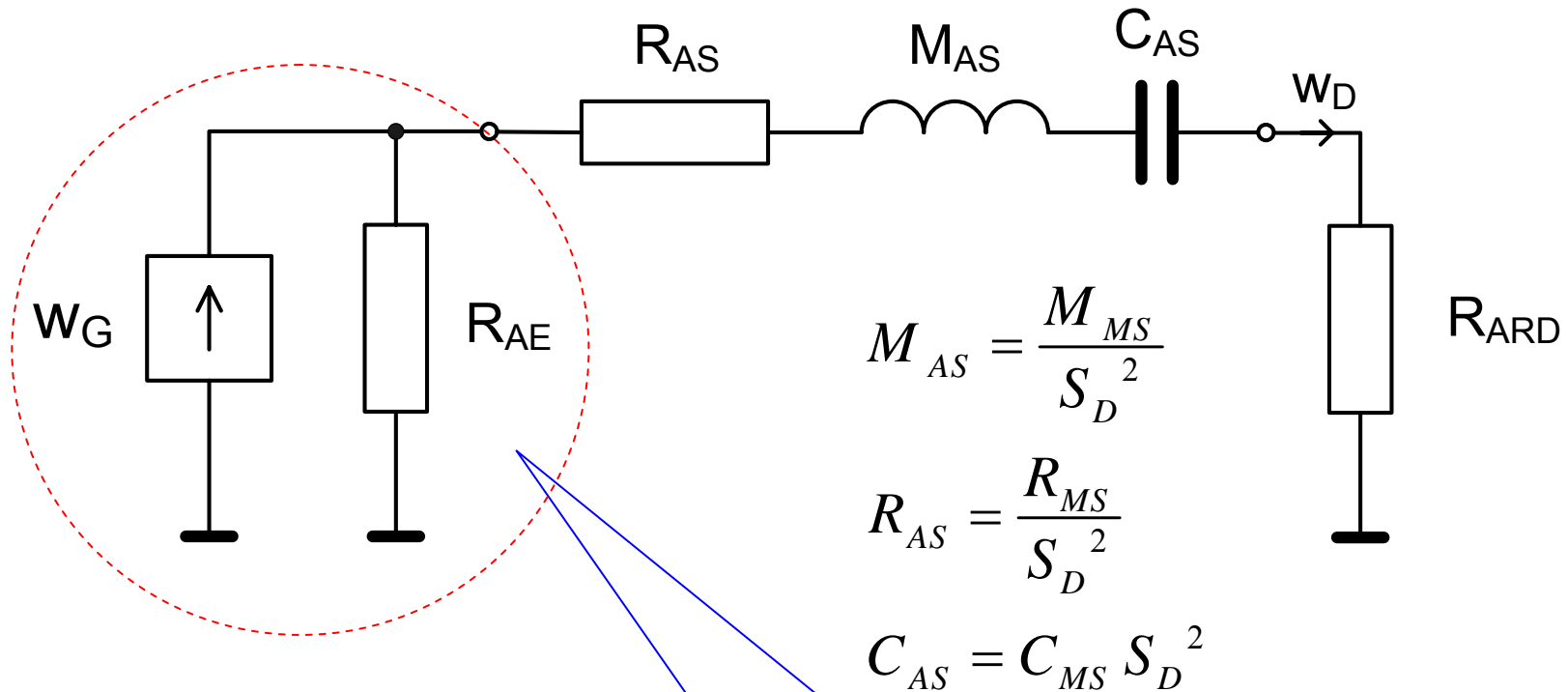
Akustický tlak v priestore môžeme určiť z objemovej rýchlosti, ktorú vieme zistiť z analogickej schémy !!!

Mechanicko-akustická analogická schéma



Elektrická část náhradej schémy, transformovaná (zobrazená) cez gyrátor na mechanickú stranu

Akustická analogická schéma

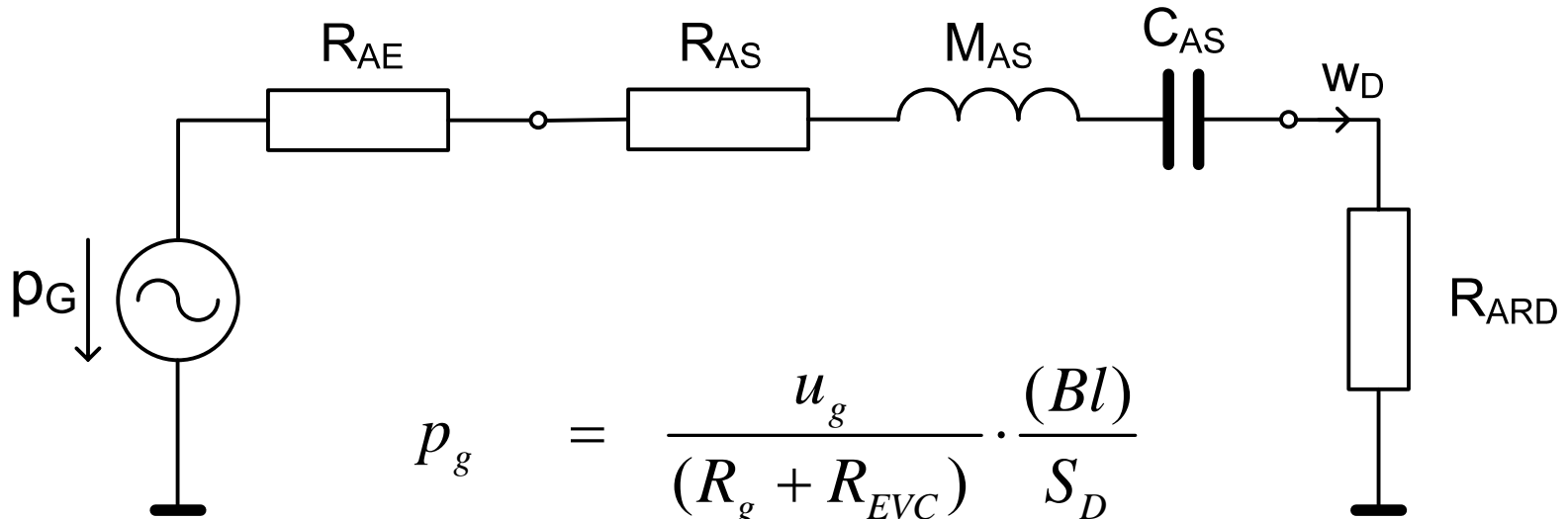


$$W_G = v_G \cdot S_D = u_g \cdot \frac{S_D}{(Bl)}$$

$$R_{AE} = \frac{1}{(R_g + R_{EVC})} \cdot \frac{(Bl)^2}{S_D^2}$$

Elektrická časť náhradnej schémy, transformovaná (zobrazená) cez gyrátor a coupler na akustickú stranu

Akustická náhradná schéma



$$p_g = \frac{u_g}{(R_g + R_{EVC})} \cdot \frac{(Bl)}{S_D}$$

$$R_{AE} = \frac{1}{(R_g + R_{EVC})} \cdot \frac{(Bl)^2}{S_D^2}$$

- vynechávame indukčnosť a vysielač odpór – zaujíma nás frekvenčné pásmo, v ktorom je ich vplyv zanedbateľný
- transformujeme všetky prvky do akustickej oblasti
- na výslednú schému aplikujeme Théveninovu poučku ("prúdový" zdroj sa zmení na "napätový")

Objemová rýchlosť v akustickom poli

$$w_D(s) = \frac{p_G}{R_{AS} + R_{AE} + sM_{AS} + \frac{1}{sC_{AS}}} = \frac{u_g \cdot \frac{1}{(R_g + R_{EVC})} \cdot (Bl)}{\underbrace{R_{AS} + R_{AE} + sM_{AS} + \frac{1}{sC_{AS}}}_{R_{AT}}}$$

$$w_D(s) = \underbrace{u_g \cdot \frac{S_D}{(Bl)} \cdot \frac{R_{AE}}{R_{AT}}}_{w_{D,max}} \cdot \underbrace{\frac{sC_{AS}R_{AT}}{s^2M_{AS}C_{AS} + sC_{AS}R_{AT} + 1}}_{W_D(s)}$$

Celkový akustický odpor akustickej náhradnej schémy reproduktora

Amplitúda (konštantná časť) objemovej rýchlosti

Prenosová funkcia (frekvenčne závislá časť) objemovej rýchlosti

Prenosová funkcia a frekvenčná charakteristika objemovej rýchlosti v akustickom poli

$$W_D(s) = \frac{s C_{AS} R_{AT}}{s^2 M_{AS} C_{AS} + s C_{AS} R_{AT} + 1} = \frac{s_N / Q_T}{s_N^2 + s_N / Q_T + 1}$$

$$s_N = \frac{s}{\omega_S} \quad - \quad \text{normovaný operátor}$$

$$Q_T = \frac{1}{\omega_S C_{AS} R_{AT}} \quad - \quad \text{tzv. celkový činiteľ kvality}$$

Frekvenčná charakteristika objemovej rýchlosti v akustickom poli

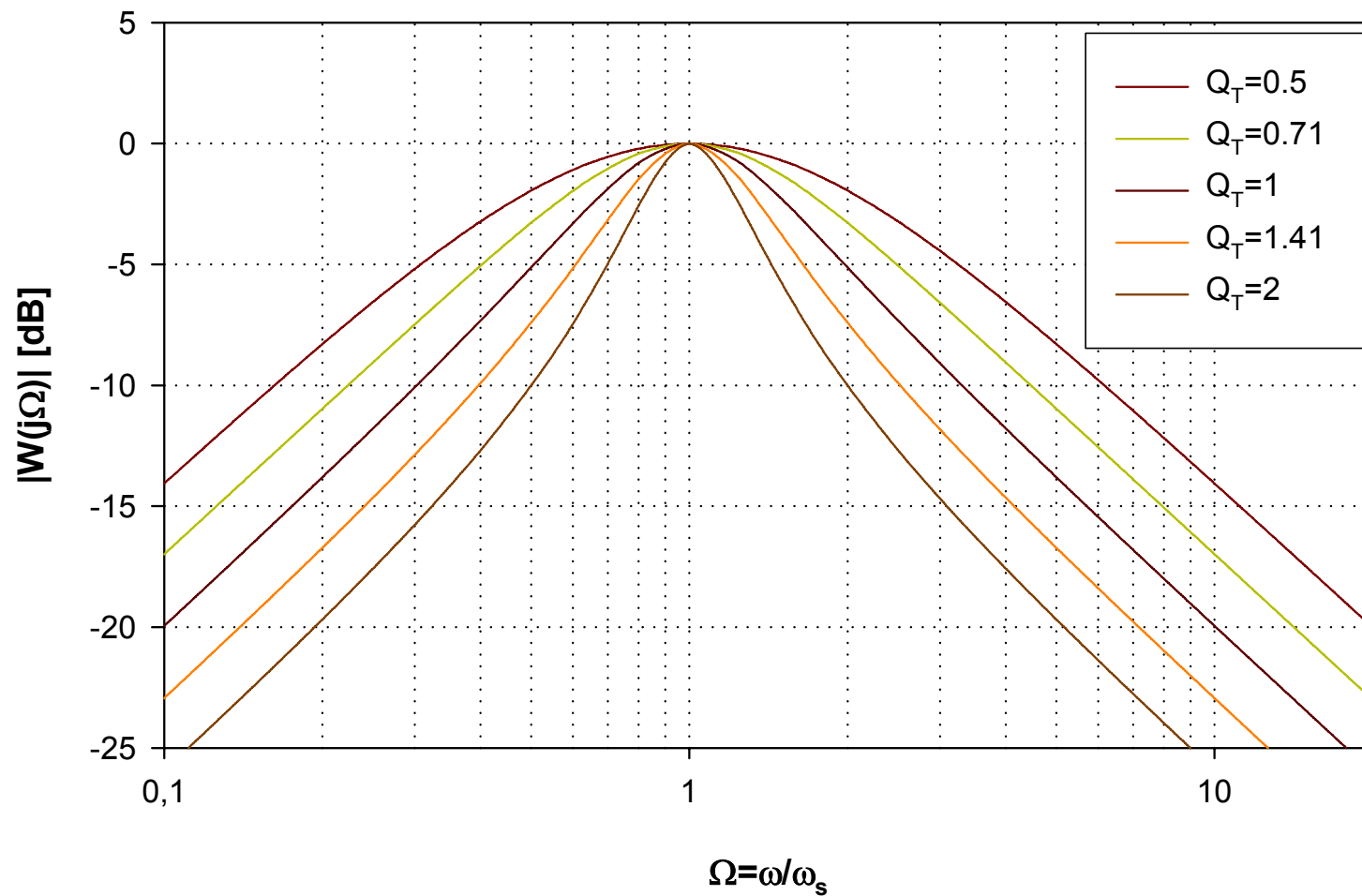
$$W_D(j\Omega) = |W_D(j\Omega)| \cdot e^{j \arg[W_D(j\Omega)]}$$

$$|W_D(j\Omega)| = \frac{\Omega/Q_T}{\sqrt{(1-\Omega^2)^2 + \Omega^2/Q_T^2}}$$

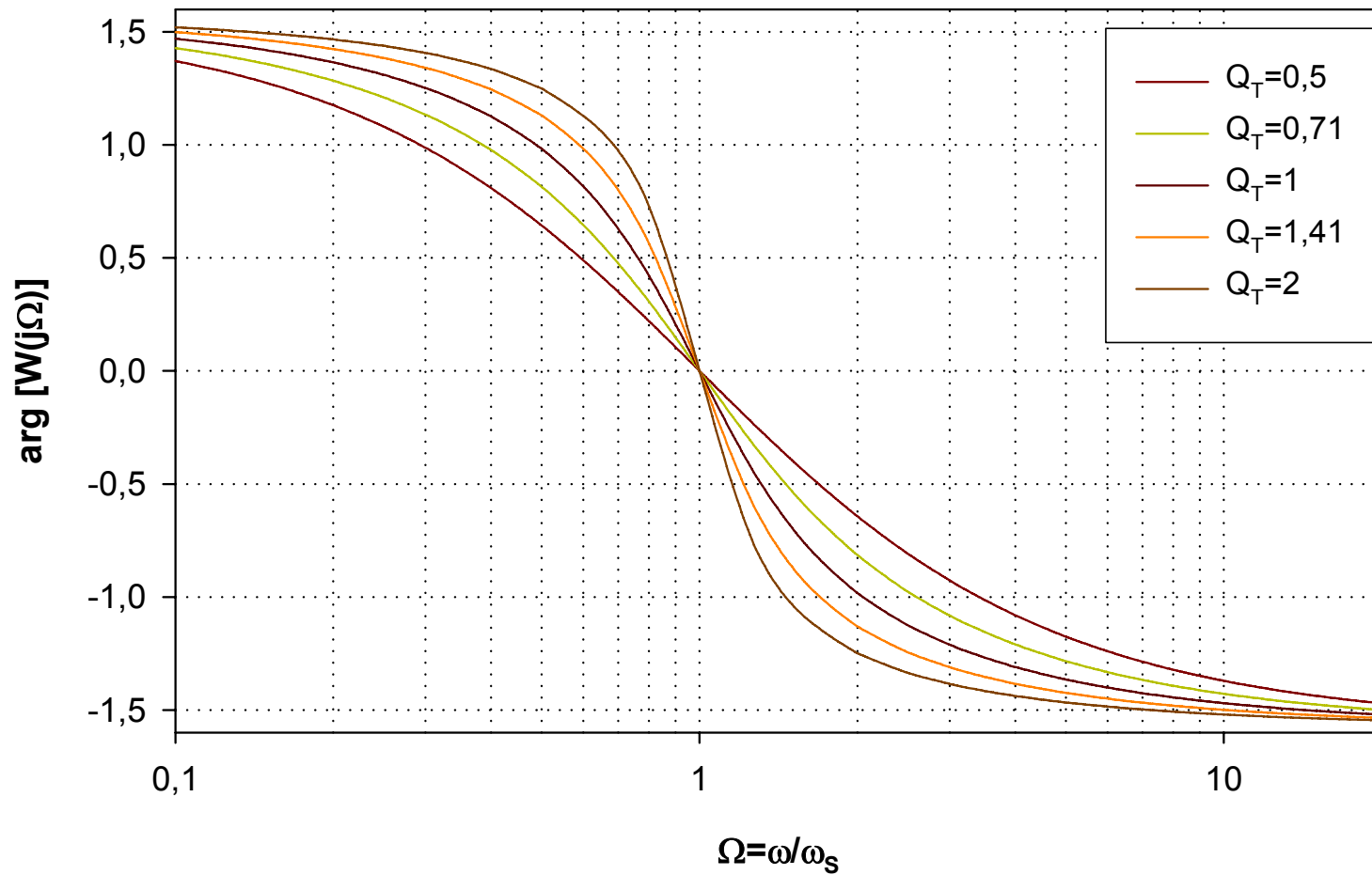
$$\arg[W(j\Omega)] = \operatorname{arctg} \frac{1-\Omega^2}{\Omega/Q_T}$$

$$\Omega = \frac{\omega}{\omega_S} \quad - \quad \text{normovaná uhlová frekvencia } \omega$$

Amplitúdová frekvenčná charakteristika objemovej rýchlosti reproduktora

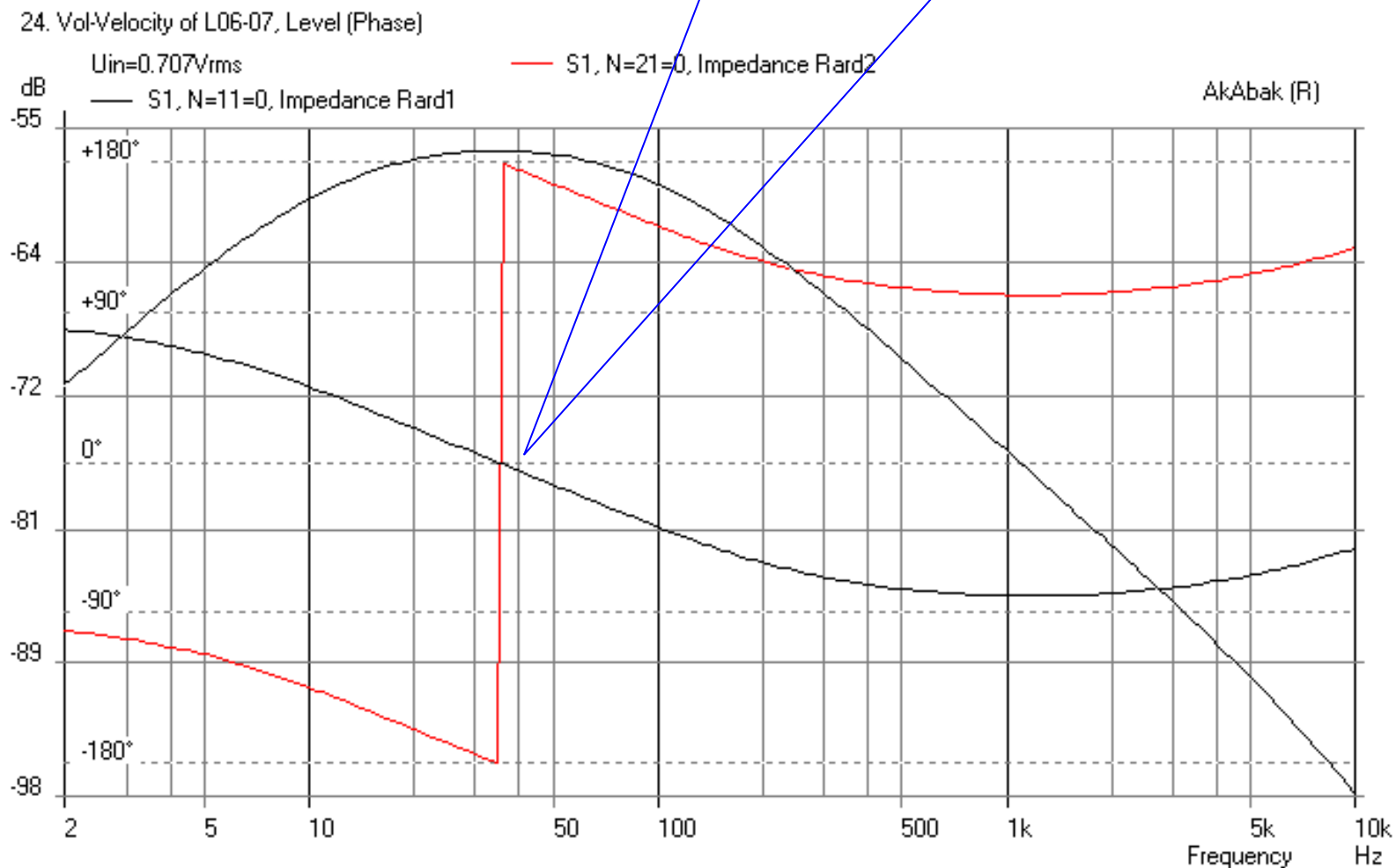


Fázová frekvenčná charakteristika objemovej rýchlosti reproduktora



Objemová rýchlosť reproduktora v nekonečnej ozvučnici získaná simuláciou náhradnej schémy ($L_{EVC}=0$) v programe AkAbak

fázy objemových rýchlostí prednej a zadnej strany membrány sú posunuté o 180 st. – vysielanie v protifáze



Celkový činiteľ kvality reproduktora

$$Q_T = \frac{1}{\omega_S C_{AS} R_{AT}} = \frac{1}{R_{MS} + \frac{(Bl)^2}{(R_g + R_{EVC})}} \sqrt{\frac{M_{MS}}{C_{MS}}}$$

$$\frac{1}{Q_T} = R_{MS} \sqrt{\frac{C_{MS}}{M_{MS}}} + \frac{(Bl)^2}{(R_g + R_{EVC})} \sqrt{\frac{C_{MS}}{M_{MS}}} = \frac{1}{Q_{MS}} + \frac{1}{Q_E}$$

- celkový činiteľ kvality reproduktora je činiteľ kvality rezonančného obvodu, na ktorom sa okrem mechanických reaktančných prvkov (M_{MS} , C_{MS}) podieľajú všetky odporové prvky (mechanické aj elektrické)
- celkový činiteľ kvality tak možno rozdeliť na dve časti, na **mechanický činiteľ kvality**, ktorý je činiteľom kvality „čistého“ mechanického sériového rezonančného obvodu, a na tzv. **elektrický činiteľ kvality**

Elektrický činiteľ kvality reproduktora

$$Q_E = \frac{(R_g + R_{EVC})}{(Bl)^2} \sqrt{\frac{M_{MS}}{C_{MS}}} = \frac{R_{EVC}}{(Bl)^2} \left(1 + \frac{R_g}{R_{EVC}}\right) \sqrt{\frac{M_{MS}}{C_{MS}}} = Q_{ES} \left(1 + \frac{R_g}{R_{EVC}}\right)$$

$$Q_E = Q_{ES} \left(1 + \frac{R_g}{R_{EVC}}\right)$$

$$Q_{ES} = \frac{R_{EVC}}{(Bl)^2} \sqrt{\frac{M_{MS}}{C_{MS}}}$$

- elektrický činiteľ kvality závisí od dvoch odporov, od vnútorného odporu zdroja signálu R_G a od elektrického odporu cievky R_{EVC}
- keďže od celkového činiteľa kvality závisí tvar amplitúdovej frekvenčnej charakteristiky, je zrejmé, že na tvar AFCH bude mať vplyv nielen odpor cievky, ale aj vnútorný odpor zdroja

Akustický tlak v akustickom poli reproduktora

$$p_0(s) = \frac{\rho_0}{2\pi r} s w_D(s) = \frac{\rho_0}{2\pi r} \cdot w_{D,\max} \cdot s \cdot W_D(s) = p_{\max} \cdot G(s)$$

$$p_{\max} = \frac{\rho_0}{2\pi r} \cdot w_{D,\max} \quad - \quad \text{amplitúda akustického tlaku}$$

$$G(s) = s \cdot W_D(s) \quad - \quad \text{prenosová funkcia reproduktora}$$

Prenosová funkcia reproduktora

Funkcia hornopriepustného
filtra 2. rádu

$$G(s) = s \cdot W_D(s) = \frac{s^2 M_{AS} C_{AS}}{s^2 M_{AS} C_{AS} + s C_{AS} R_{AT} + 1} = \frac{s_N^2}{s_N^2 + s_N / Q_T + 1}$$

$$s_N = \frac{s}{\omega_S} \quad - \quad \text{normovaný operátor}$$

Frekvenčná charakteristika reproduktora

$$G(j\Omega) = |G(j\Omega)| \cdot e^{j \arg[G(j\Omega)]}$$

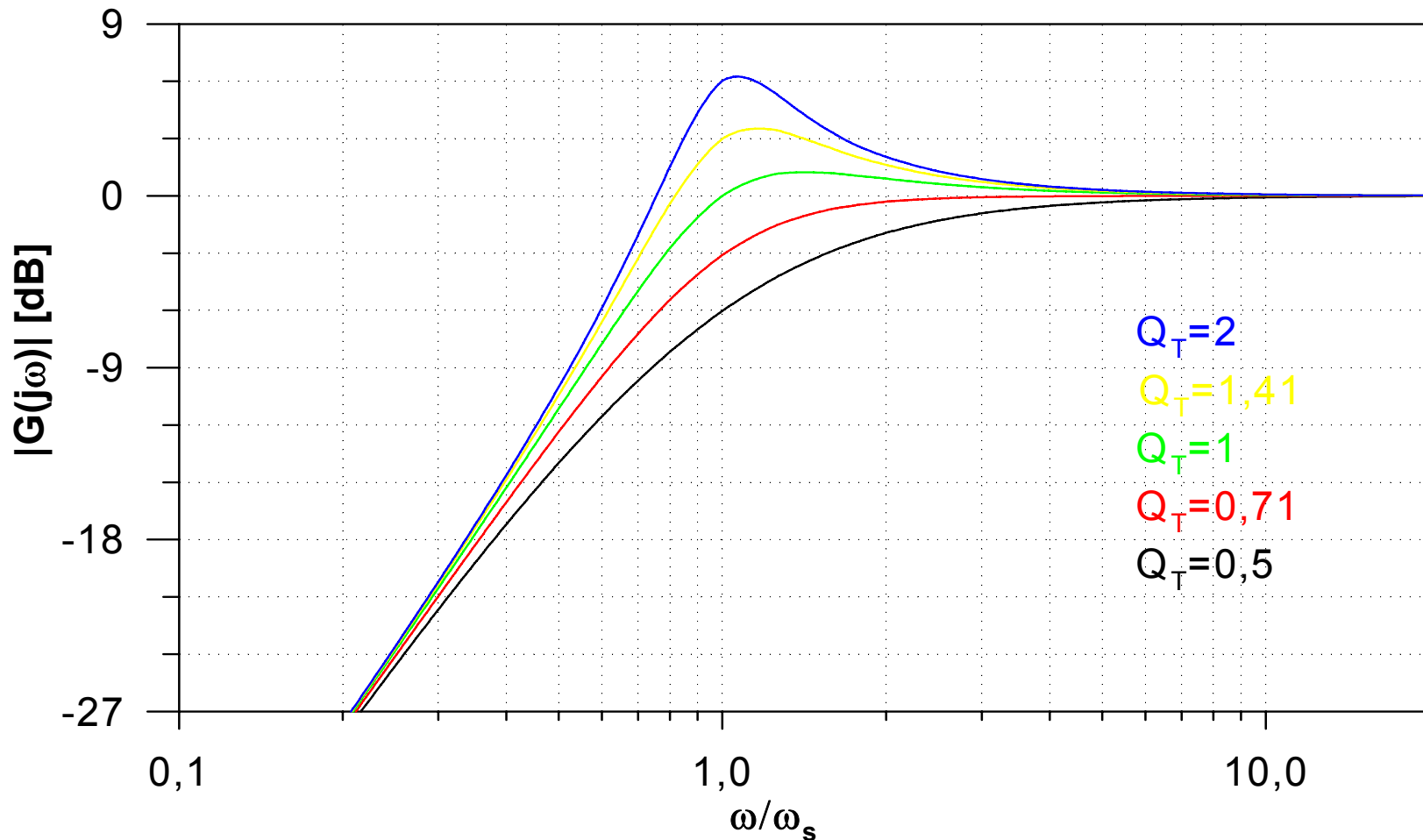
$$|G(j\omega)| = \frac{\Omega^2}{\sqrt{(\Omega^2 - 1)^2 + \Omega^2 / Q_T^2}}$$

$$\arg[G(j\omega)] = -\operatorname{arctg} \frac{\Omega / Q_T}{\Omega^2 - 1}$$

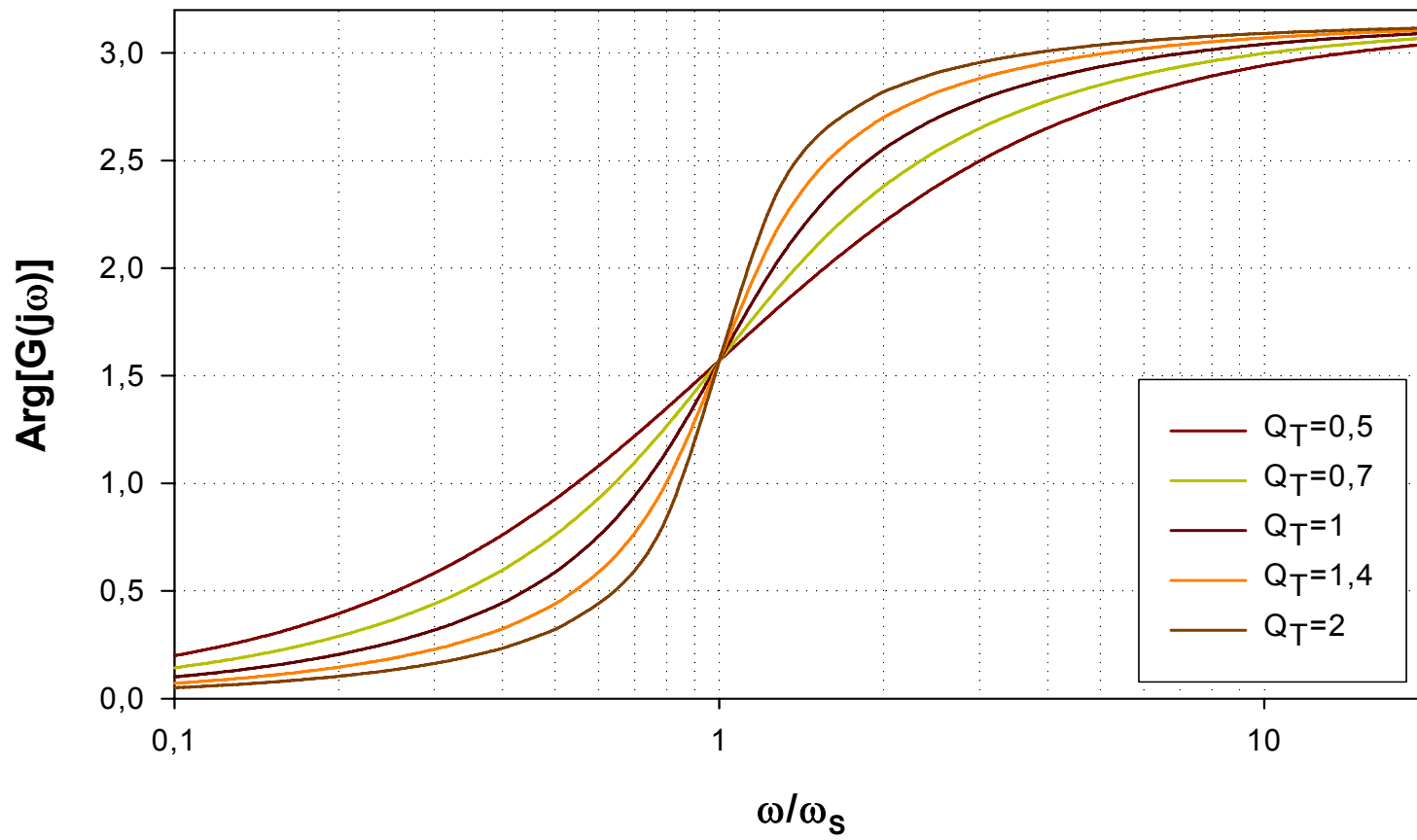
$$\Omega = \frac{\omega}{\omega_s} \quad - \quad \text{normovaná uhlová frekvencia } \omega$$

Amplitúdová frekvenčná charakteristika reproduktora

- detaily charakteristiky:
 - medzná frekvencia
 - zvlnenie charakteristiky v okolí rezonančnej frekvencie
 - sklon charakteristiky v pásme pod medznou frekvenciou
 - vzťah medzi medznou frekvenciou a rezonančnou frekvenciou



Fázová frekvenční charakteristika reproduktora



Prenosová funkcia reproduktora ako hornopriepustný filter 2. rádu

$$G(s) = \frac{b_2 s_N^2}{a_2 s_N^2 + a_1 s_N + a_0} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{array}{l} b_2 = 1 \\ a_2 = 1 \\ a_1 = \frac{1}{Q_T} \\ a_0 = 1 \end{array}$$

$$G(s) = \frac{s_N^2}{s_N^2 + s_N/Q_T + 1}$$

Jediný „nastaviteľný“
koeficient prenosovej funkcie
– závisí od neho tvar
charakteristiky

Frekvencia, ktorou je normovaný
operátor s je tzv.
charakteristickou frekvenciou
filtra. V prípade reproduktora je
ňou rezonančná frekvencia

$$a_1 \left\{ \begin{array}{ll} = 2 & - \text{critically damped} \\ \geq \sqrt{2} & - \text{second-order Bessel} \\ = \sqrt{2} & - \text{second-order Butterworth} \\ \leq \sqrt{2} & - \text{second-order Chebychev} \end{array} \right.$$

Thiele-Small (TS) parametre reproduktora

- sú to odvodené parametre
- umožňujú praktický a veľmi rýchly odhad vlastností reproduktora
- majú významnú úlohu pri návrhu reproduktorovej sústavy

rezonančná frekvencia: $f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{M_{MS} C_{MS}}}$

mechanický činiteľ kvality: $Q_{MS} = \frac{1}{R_{MS}} \sqrt{\frac{M_{MS}}{C_{MS}}}$

elektrický činiteľ kvality: $Q_{ES} = \frac{R_{EVC}}{(Bl)^2} \sqrt{\frac{M_{MS}}{C_{MS}}}$

celkový činiteľ kvality: $Q_{TS} = \frac{Q_{ES} \cdot Q_{MS}}{Q_{ES} + Q_{MS}}$

ekvivalentný objem: $V_{AS} = \rho_0 \cdot c_0^2 \cdot S_D^2 \cdot C_{MS}$

Akustický tlak v akustickom poli reproduktora

$$p_{\max} = \frac{\rho_0}{2\pi r} \cdot w_{D,\max} = \frac{\rho_0}{2\pi r} \cdot \frac{u_g \cdot (Bl) \cdot S_D}{(R_g + R_{EVC}) \cdot M_{MS}}$$

$$p_{\max} = \frac{\sqrt{2\pi\rho_0}}{c_0} \cdot \frac{\sqrt{P_E}}{r} \sqrt{\frac{f_S^3 V_{AS}}{Q_{ES}}} \quad [\text{Pa}]$$

$$p_{\max} = 7.9 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{\sqrt{P_E}}{r} \sqrt{\frac{f_S^3 V_{AS}}{Q_{ES}}} \quad [\text{Pa}]$$

Charakteristická tlaková citlivosť

Akustický tlak v osi reproduktora vo vzdialenosti 1m od jeho ústia pri elektrickom príkone 1W:

$$7.9 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{\frac{f_S^3 V_{AS}}{Q_{ES}}} = p_{\max} \frac{r}{\sqrt{P_E}} \Big|_{P_E=1W, r=1m} = \sigma_{p|1W,1m} \quad [\text{PaW}^{-1/2}\text{m}]$$

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

Rýchly odhad amplitúdy akustického tlaku z charakteristickej tlakovej citlivosti:

$$p_{\max} = \sigma_{p|1W,1m} \cdot \frac{\sqrt{P_E}}{r} \quad [\text{Pa}]$$

Hladina akustického tlaku a char. tlaková citlivosť v [dB]

$$L_p = 20 \cdot \log_{10} \frac{p}{p_{ref}} \quad [\text{dB}]$$

$$p_{ref} = 2 \cdot 10^{-5} \quad [\text{Pa}]$$

Charakteristická citlivosť v [dB] sa vypočíta podobne, ako hladina akustického tlaku.

Referenčná hodnota citlivosti má číselne rovnakú hodnotu, ako referenčná hodnota akustického tlaku.

$$L_\sigma = 20 \cdot \log_{10} \frac{\sigma_{p|1W,1m}}{\sigma_{p,ref}} \quad [\text{dB}]$$

$$\sigma_{p,ref} = 2 \cdot 10^{-5} \quad [\text{PaW}^{-1/2}\text{m}]$$

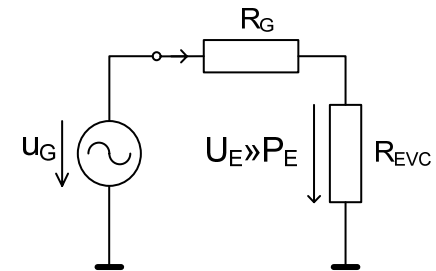
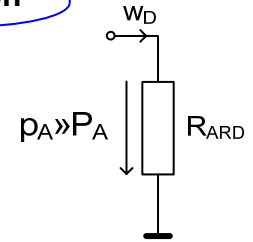
Menovitá účinnosť reproduktora

Pomer činného akustického výkonu k menovitému elektrickému príkonu:

Akustická objemová rýchlosť, „tečúca“ do vysielacieho odporu membrány = činný akustický výkon

$$\eta = \frac{P_A}{P_{E,Nom}} = \frac{|w_{D,max}|^2 \cdot R_{ARD}}{\left[\frac{u_G}{R_G + R_{EVC}} \right]^2 \cdot R_{EVC}}$$

Elektrický prúd, tečúci do odporu cievky = menovitý elektrický príkon



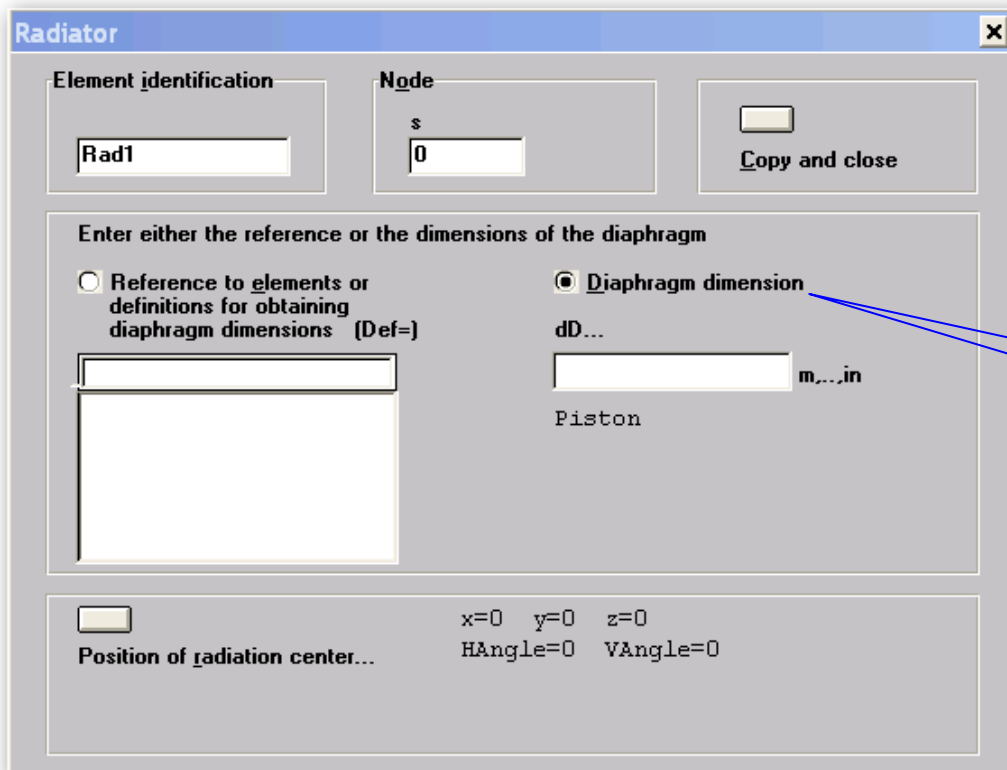
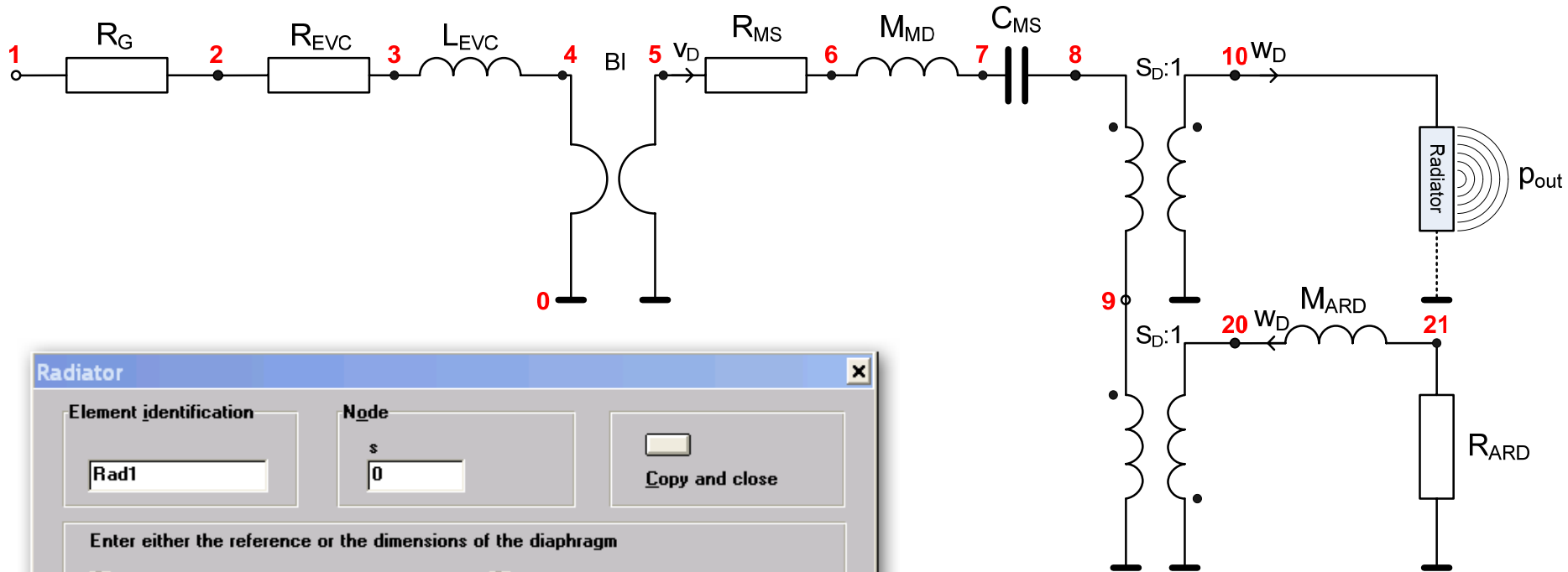
Po dosadení a úprave:

$$\eta_{N(IB)} = \frac{\rho_0}{2\pi c_0} \frac{(Bl)^2 S_D^2}{R_{EVC} M_{MS}^2} = \frac{4\pi^2}{c_0^3} \frac{f_s^3 V_{AS}}{Q_{ES}} = 9,6 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{f_s^3 V_{AS}}{Q_{ES}}$$

Simulácia prenosovej funkcie reproduktora v programe AkAbak – pomocou prvku „Radiator“

- Prvok „Radiator“
 - je implementáciou vysielacej impedancie reproduktora a vzťahu:
...
 - umožňuje simulovať akustický tlak v priestore
 - z pohľadu analogickej schémy ide o „dvojpól“, ktorého jeden pól je automaticky uzemnený ...
- Použitie prvku „Radiator“ si vyžaduje:
 - Úpravy v časti skriptu „Coupler“
 - ...

Náhradná schéma reproduktora s prvkom „Radiator“



Dialógové okno prvku „Radiator“, ktorý musí byť viazaný na model membrány „skutočných“ rozmerov, alebo na prvok, ktorý takúto väzbu obsahuje

```
| 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);
}
```

```
System 'S4' |Radiator na prednej strane membrany
```

```
Resistor 'Rg' Node=1=2 R=10mohm
```

```
Resistor 'Revc' Node=2=4 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 'Mmd' Node=6=7 Mm=14g
```

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

```
Coupler 'front' Node=8=9=10
```

```
Ratio={1/Sd}
```

```
Radiator 'Rad1' Node=10
```

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

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

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

```
Ratio={1/Sd} |Piston
```

```
AcouMass 'Mard2' Node=20=21 Ma={Mard}
```

```
Impedance 'Rard2' Node=21=0
```

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

Skript s prvkom „Radiator“

Radiator – väzba na membránu v tvare ideálneho piesta

Radiator

Element identification: Rad1

Node: 10

Copy and close

Enter either the reference or the dimensions of the diaphragm

Reference to elements or definitions for obtaining diaphragm dimensions (Def=)

Diaphragm dimension

dD... m...in

Piston

Diaphragm

Outer dimensions

Circular

Circular area

Rectangular

Circular Area SD: 136cm2

Inner dimensions

Piston

Cone

Convex Dome

Concave Dome

Diameter of inner diaphragm dD1: m...in

Cone depth tD1: m...in

Set dD1 < 0 to remove inner diaphragm.

Frequency of mass reduction fp: ...Hz...

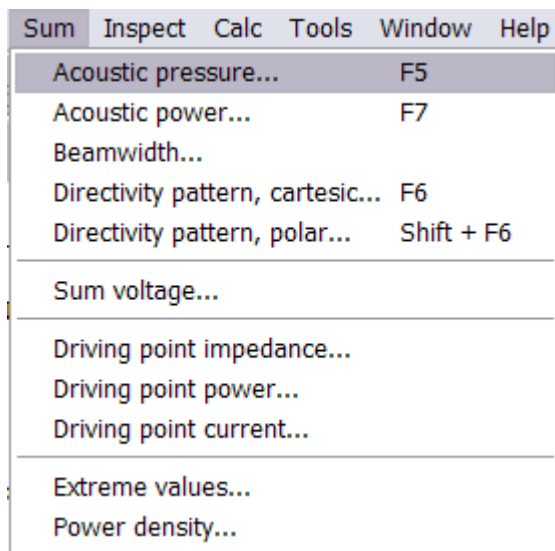
Displacement t1: m...in

Scattering directivity Diffuse: %

Diagram: Top view shows a circular diaphragm with outer diameter dD and inner diameter dD1. Bottom view shows a cross-section with thickness t1 and diameter dD.

Callout bubble: Dialógové okno „Diaphragma“ vyvoláme kliknutím pravým tlačidlom myši na okienko dD.

Dialógové okno pre spustenie simulácie akustického tlaku v akustickom poli reproduktora (Sum/Acoustic Pressure)



Acoustic Pressure

Parameter

Bode type
Lp (Phase)

Input voltage rms
2.43V ..V..

Distance
1m m...in

Range abscissa

Frequency
2Hz ... 20kHz
 log lin ..Hz..

Points
200
Pts/Oct=15.1

Range ordinate

Lp
40dB ... 100dB Show phase
dB

Labels

Multi-
 labels angles

Graph All

1. <all>
 2. <all>
 3. <all>

Listening angles

Horiz. Vert.

Graph 0°

1. 0 0
 2. 30.0 30.0
 3. 60.0 60.0
Deg

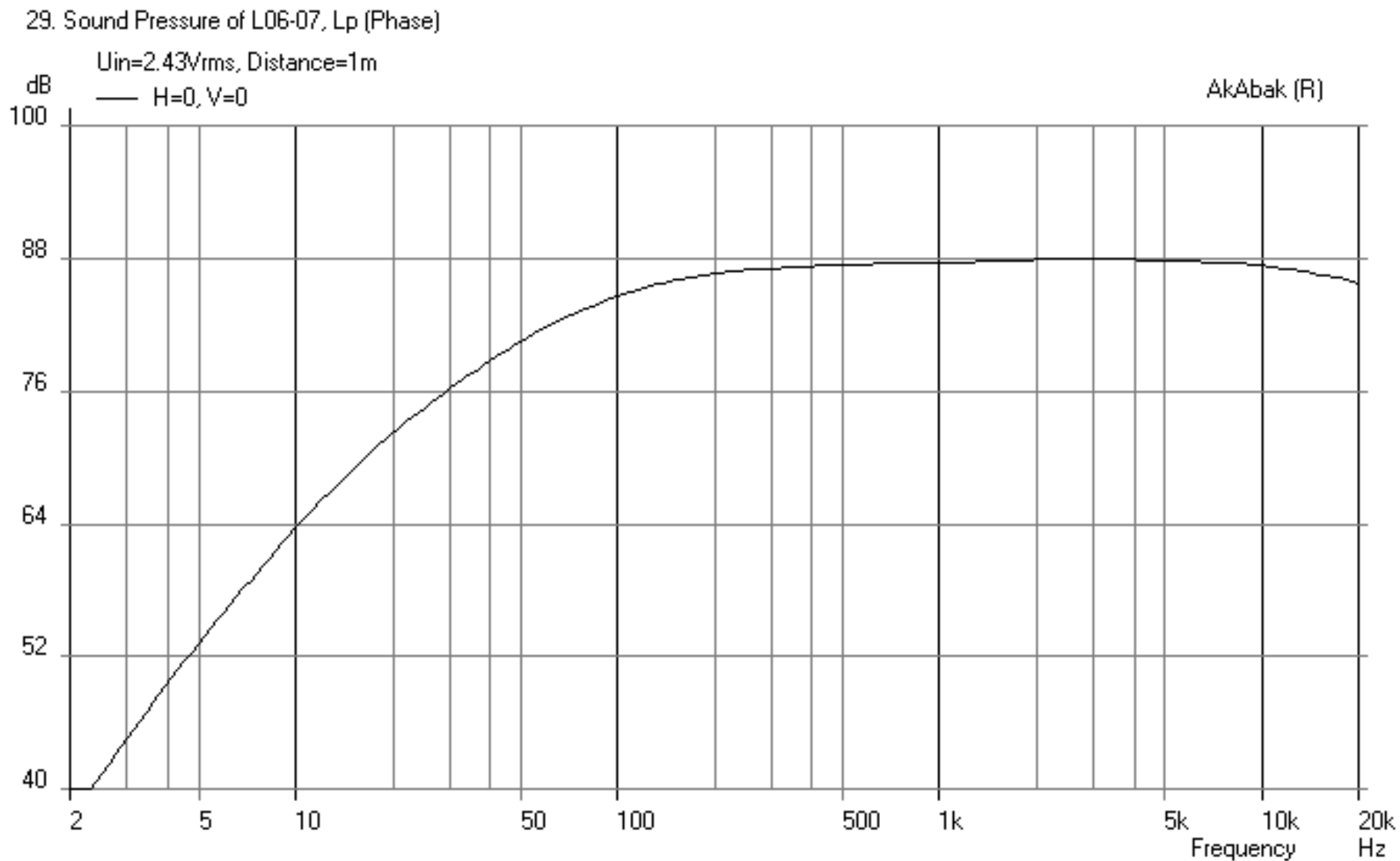
Mean window

Angle range
 Deg

Resolution
2 %

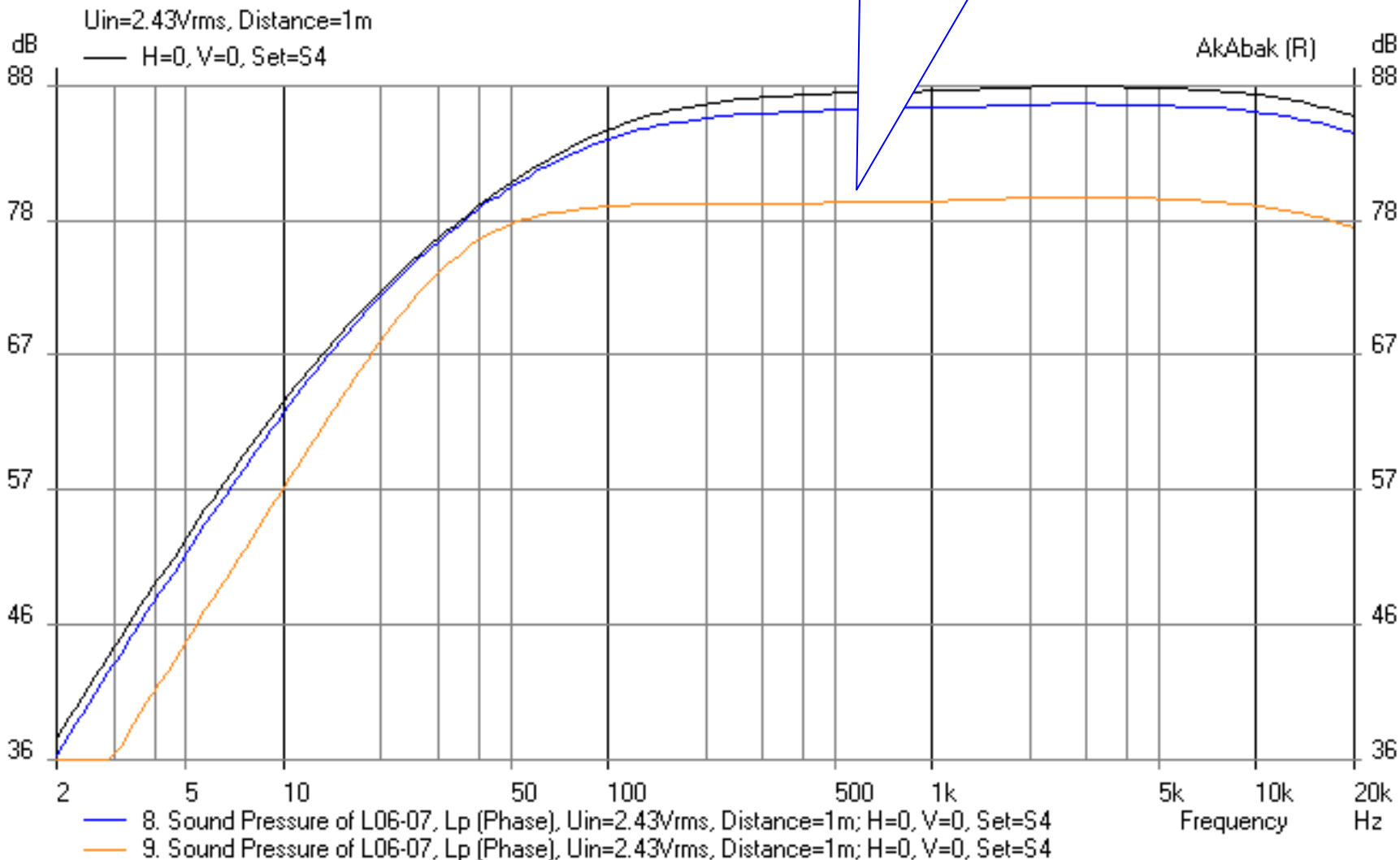
Ok
Esc

Akustický tlak v akustickom poli – simulácia makromodelom „Radiator“ (Sum/Acoustic pressure; v osi reproduktora, $R_G=0$, $L_{EVC}=0$, $PE=1\text{ W}$)



Vplyv vnútorného odporu zdroja ($R_G=1\text{m}\Omega, 1\Omega, 10\Omega$)

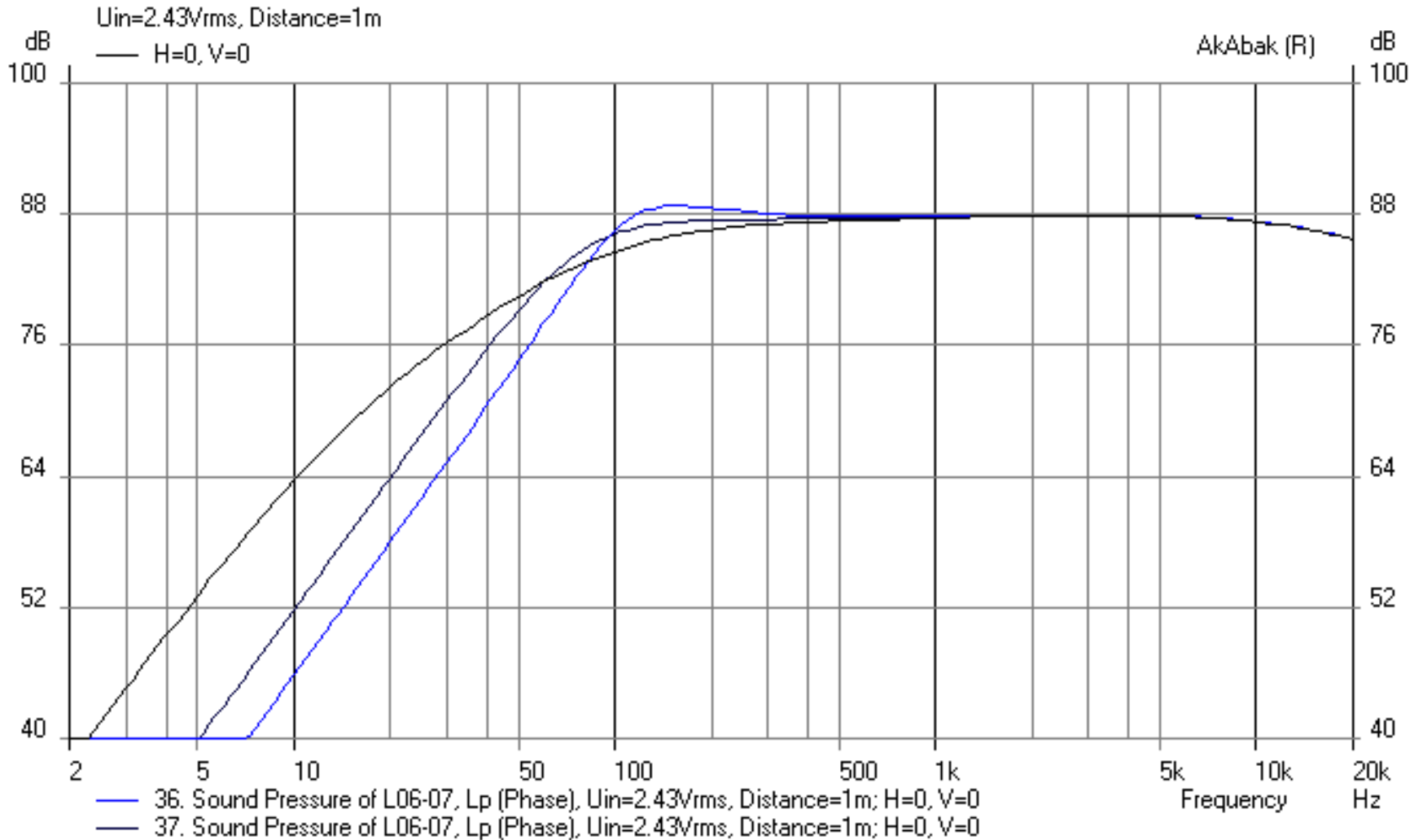
7. Sound Pressure of L06-07, Lp (Phase)



Extrémne veľký vnútorný odpor zdroja znižuje citlivosť reproduktora a mení tvar frekvenčnej charakteristiky

Vplyv poddajnosti reproduktora ($C_{MS2}=C_{MS}/5$; $C_{MS3}=C_{MS}/10$)

29. Sound Pressure of L06-07, Lp (Phase)



Smerová charakteristika piestovej membrány (Sum/Directivity pattern – polar) v horizontálnej rovine pre frekvencie 100Hz, 1kHz a 10kHz

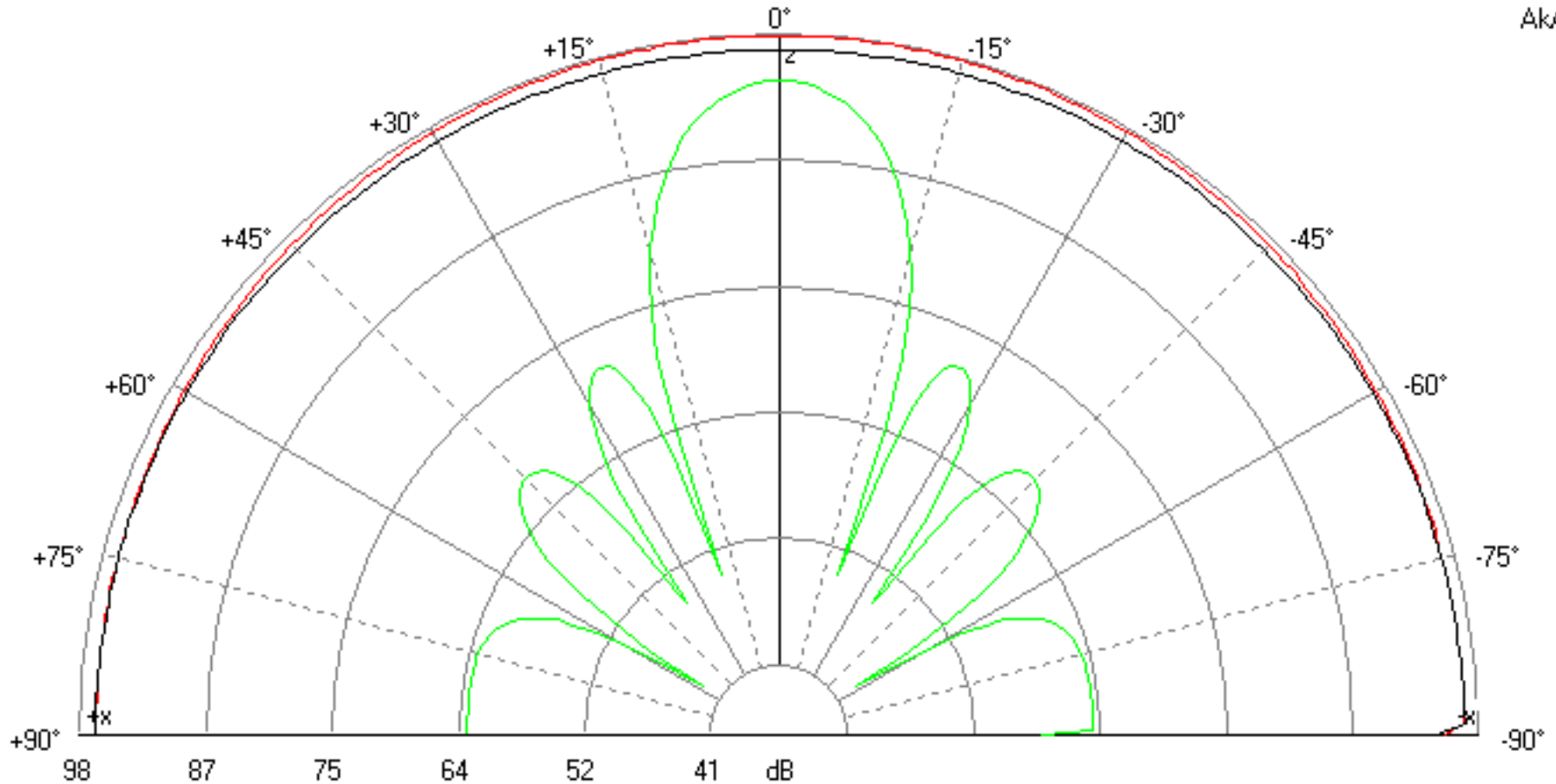
11. Polar of L06-07, Lp

$U_{in}=2.43V_{rms}$, Distance=1m

— Horiz. f=100Hz

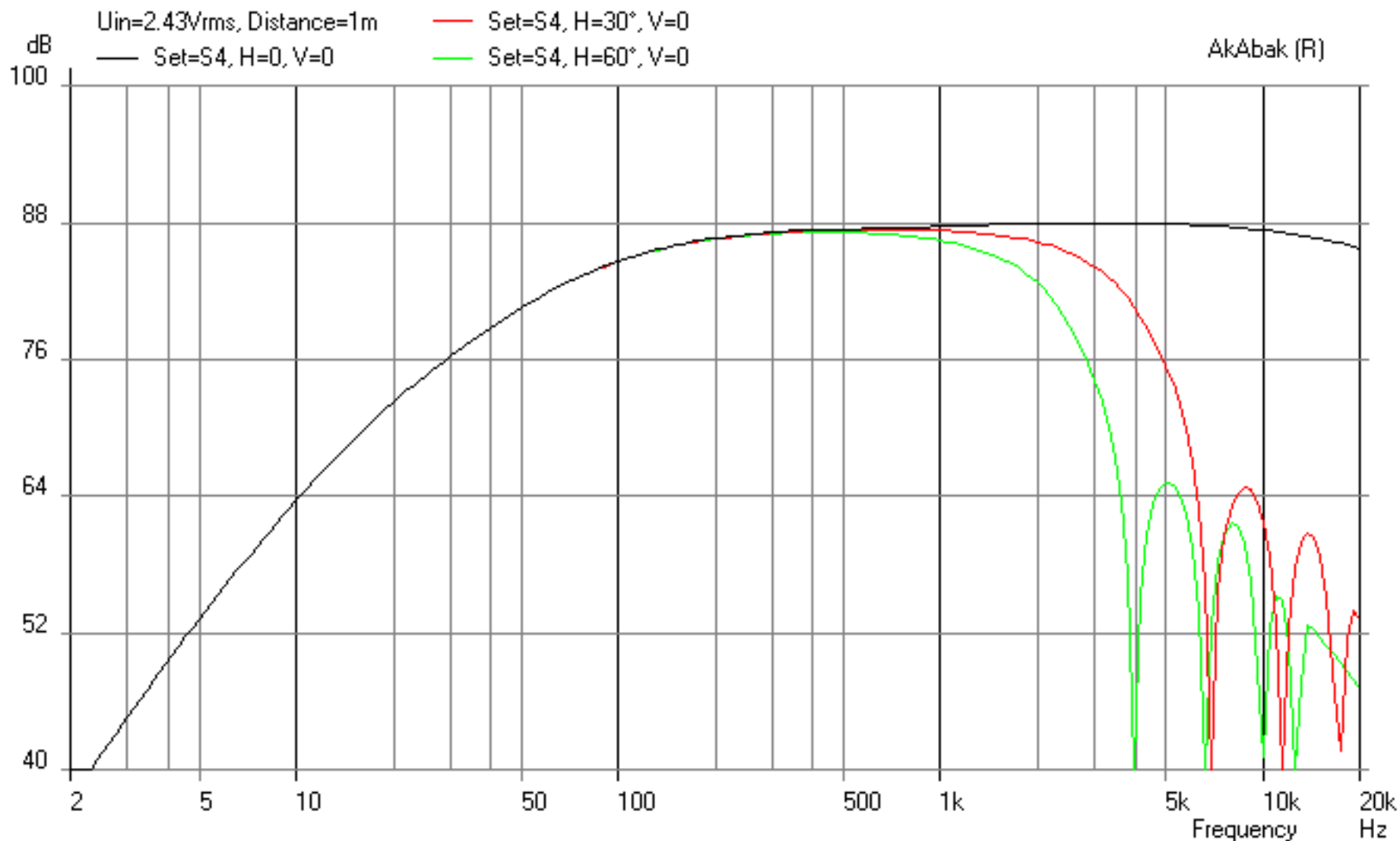
— Horiz. f=1kHz

— Horiz. f=10kHz



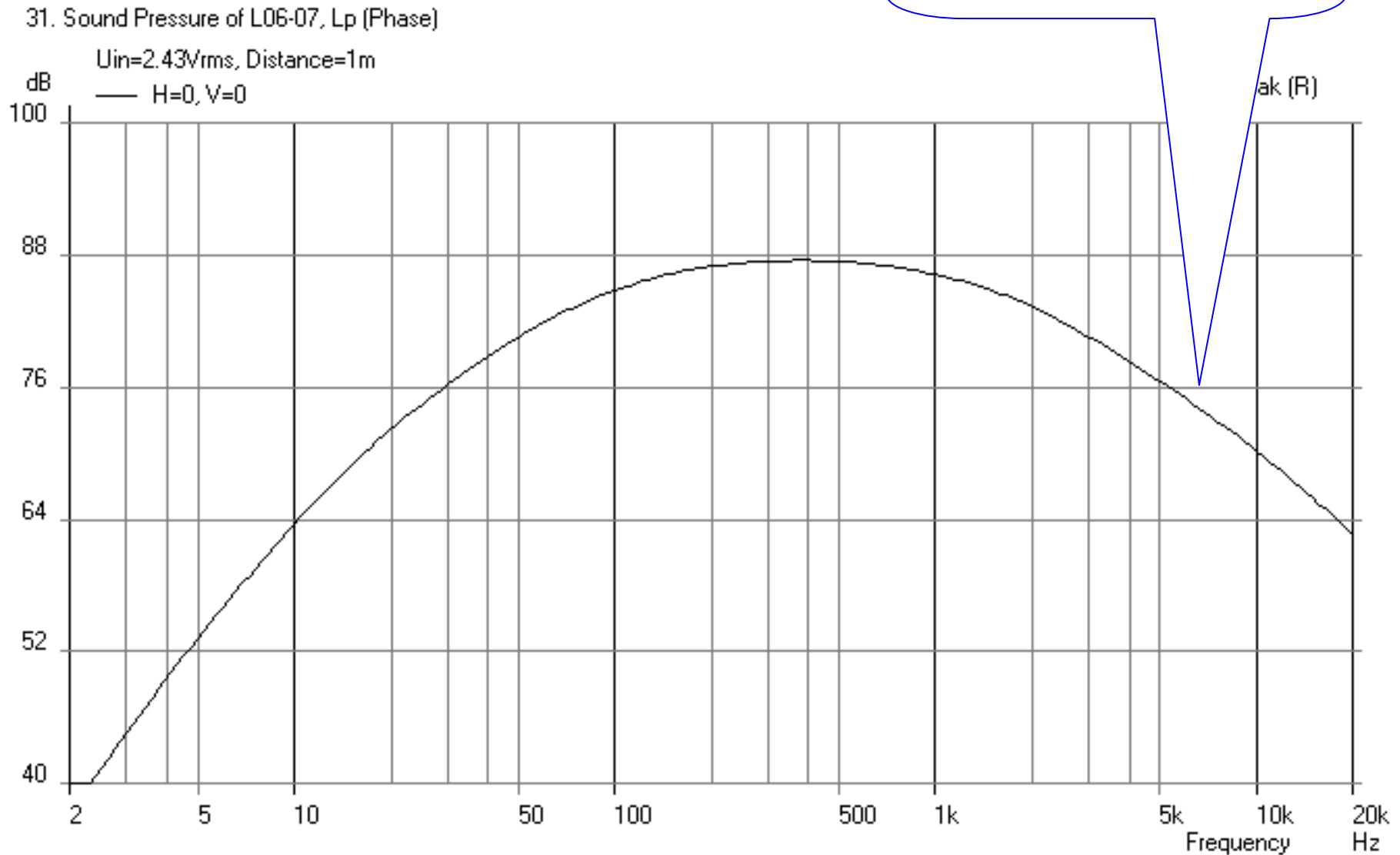
Vplyv smerovosti piesta na frekvenčnú charakteristiku reproduktora

12. Sound Pressure of L06-07, Lp (Phase)



Akustický tlak v akustickom poli – simulácia makromodelom „Radiator“ (Sum/Acoustic pressure; v osi reproduktora, $L_{EVC}=0.67\text{mH}$, $P_E=1\text{W}$, piestová membrána)

Reaktancia cievky, ktorá sa zväčšuje s rastúcou frekvenciou znižuje hladinu vysielaného akustického tlaku



Lineárna výchylka reproduktora

Lineárna výchylka membrány reproduktora:

$$x_D(t) = \int_0^t v_D(\tau) \cdot d\tau = \frac{1}{S_D} \cdot \int_0^t w_D(\tau) \cdot d\tau \quad \Rightarrow \quad x_D(s) = \frac{1}{S_D} \cdot \frac{w_D(s)}{s}$$

$$x_D(s) = \frac{u_G \cdot (Bl)}{(R_G + R_{EVC})} \cdot \frac{C_{AS}}{S_D^2} \cdot \frac{1}{s^2 \cdot M_{AS} \cdot C_{AS} + s \cdot C_{AS} \cdot R_{AT} + 1}$$

$$x_D(s) = \sqrt{2P_E} \cdot \sigma_{x(IB)} \cdot X(s)$$

Výchylková citlivosť reproduktora

Prenosová funkcia výchylky

Výhylková citlivost'

Amplitúda výhylky membrány reproduktora na 1W elektrického príkonu (ak $R_G=0$):

$$\sigma_{x(IB)} = \frac{C_{MS} \cdot (Bl)}{\sqrt{R_{EVC}}} = \frac{1}{c_0 \sqrt{2\pi\rho_0}} \cdot \frac{1}{S_D} \sqrt{\frac{V_{AS}}{f_S \cdot Q_{ES}}}$$

$$\sigma_{x(IB)} = \frac{10,65 \cdot 10^{-4}}{S_D} \cdot \sqrt{\frac{V_{AS}}{f_S \cdot Q_{ES}}} \quad \left[\text{mW}^{-\frac{1}{2}} \right]$$

Výhylková prenosová funkcia a amplitúdová frekvenčná charakteristika

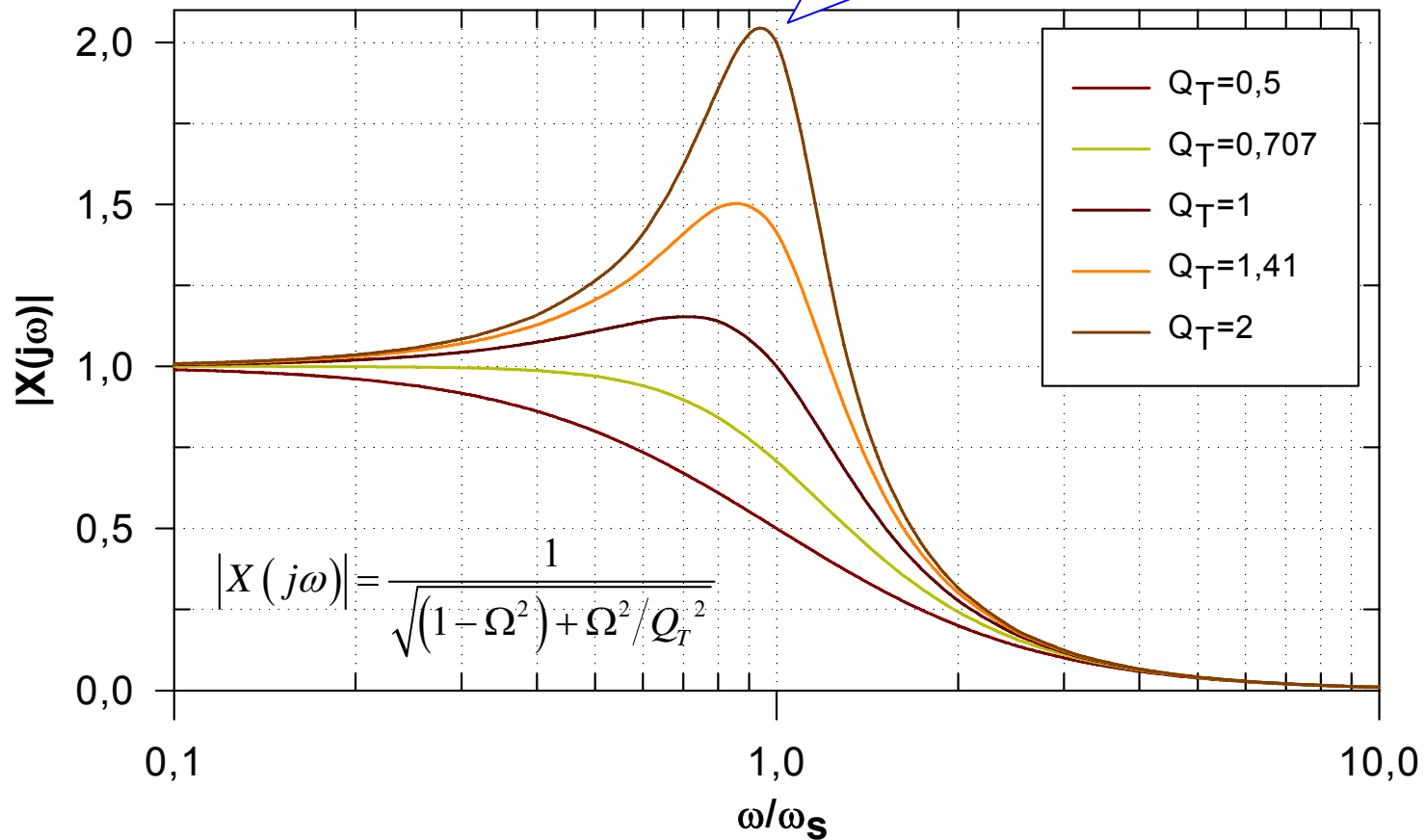
$$X(s) = \frac{1}{s^2 \cdot M_{AS} \cdot C_{AS} + s \cdot C_{AS} \cdot R_{AT} + 1}$$

$$X(s) = \frac{1}{s_N^2 + s_N / Q_T + 1}$$

$$|X(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{(1 - \Omega^2)^2 + \Omega^2 / Q_T^2}}$$

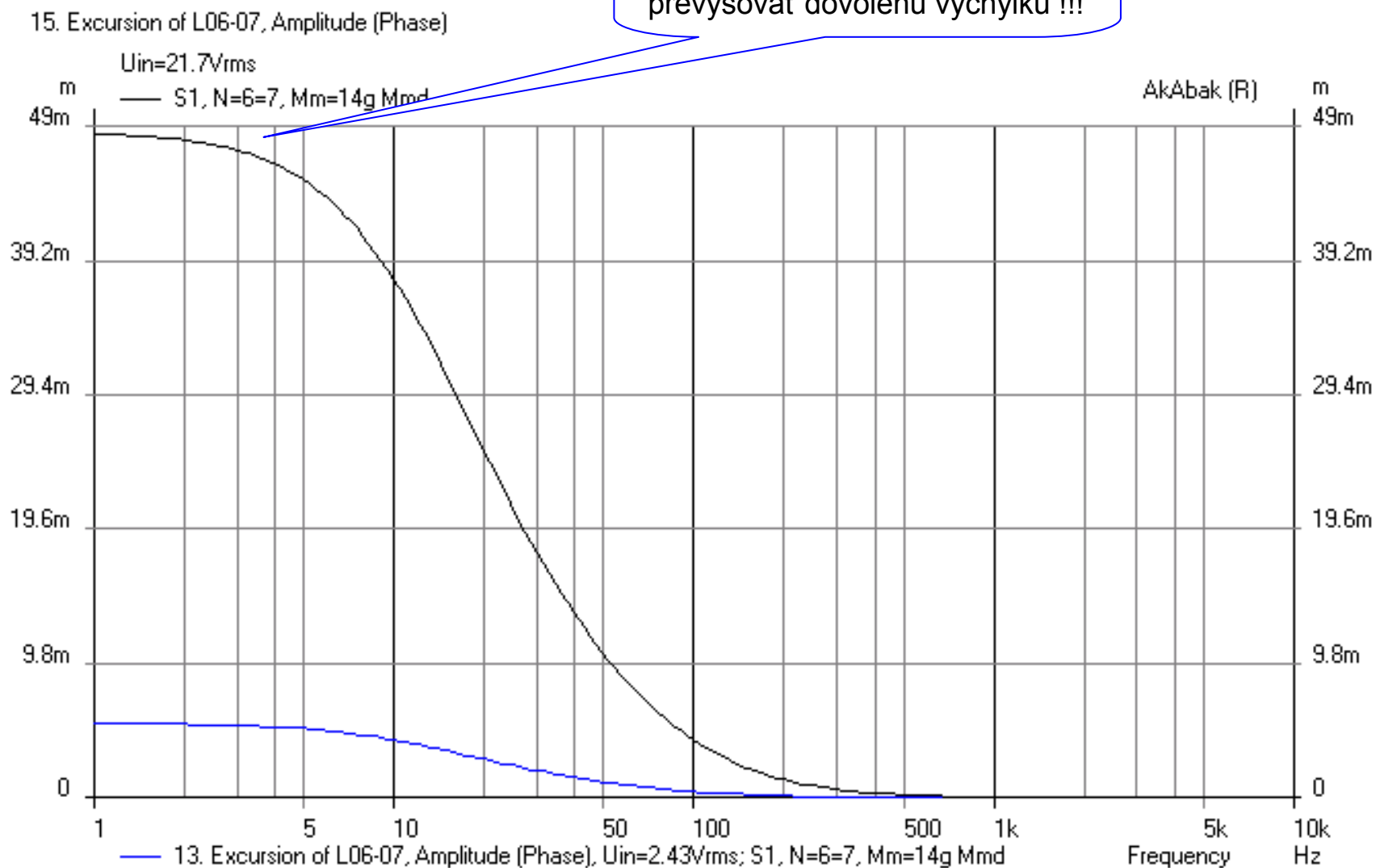
Frekvenčná charakteristika amplitúdy výchylky

Výchylka reproduktora v nekonečnej ozvučnici môže mať teoreticky svoje maximum v blízkosti rezonančnej frekvencie, alebo sa môže asymptoticky blížiť k maximálnej hodnote. Závisí to od celkového činiteľa kvality



Výchylka membrány reproduktora ($L_{EVC}=0$, $P_E=1\text{ W}$ a 80 W)

pri veľmi nízkych frekvenciách
výchylka môže niekoľkonásobne
prevyšovať dovolenú výchylku !!!



Maximálnou výchylkou limitovaný elektrický príkon

Maximálnou výchylkou limitovaný elektrický príkon je hodnota príkonu, ktorá sa nesmie prekročiť v mieste (t.j. pri frekvencii) potenciálnej maximálnej výchylky

$$P_{ER,max} = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{x_{D,max}}{\sigma_{x(IB)} \cdot |X(j\omega)|_{MAX}} \right]^2$$

Maximálna hodnota výchylky, povolená výrobcom pre daný reproduktor

Maximálnu hodnotu prenosovej funkcie odhadneme z priebehu výchylkovej prenosovej funkcie

$$P_{ER,max} = \frac{\pi \cdot \rho_0 \cdot c_0^2}{V_{AS}} \cdot \frac{f_S \cdot Q_{ES} \cdot V_{D,max}^2}{|X(j\omega)|_{max}^2}$$

Vzorec, ktorý dostaneme úpravou horného vzťahu – býva často uvádzaný v návodoch na návrh reproduktorových sústav.

$$V_{D,max} = S_D \cdot x_{D,max}$$

Tzv. maximálna objemová výchylka – niekedy je súčasťou katalógového listu

Maximálnou výchylkou limitovaný akustický výkon

Závisí od maximálnou výchylkou limitovaného elektrického príkonu a účinnosti reproduktora

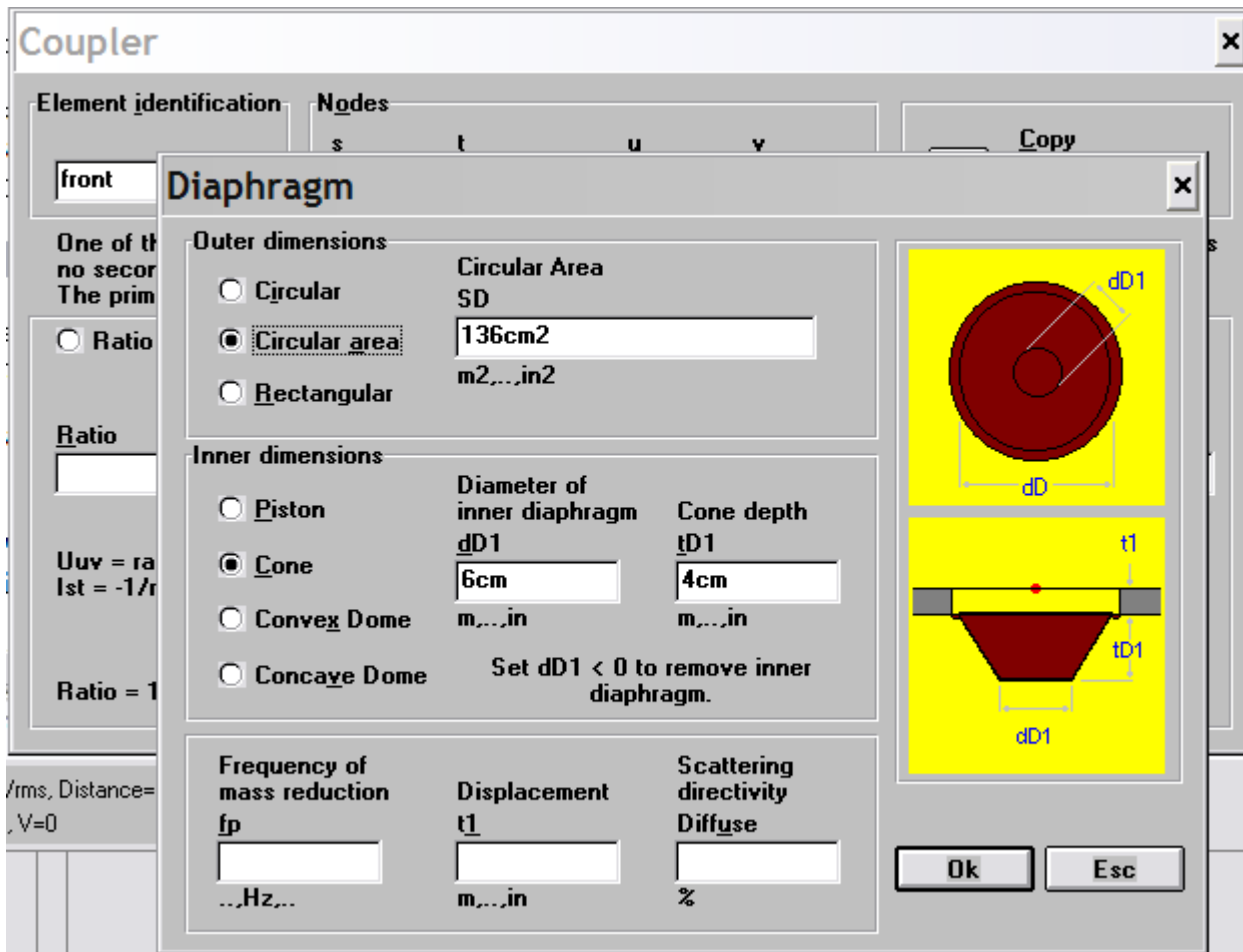
$$P_{AR,\max} = \frac{4 \cdot \pi^3 \cdot \rho_0}{c_0} \cdot \frac{f_S^4 \cdot V_{D,\max}^2}{|X(j\omega)|_{\max}^2}$$

$$P_{AR,\max} = 0,42 \cdot \frac{f_S^4 \cdot V_{D,\max}^2}{|X(j\omega)|_{\max}^2}$$

Vplyv reálneho tvaru membrány

- zmena skriptu v časti „Coupler“ !!!

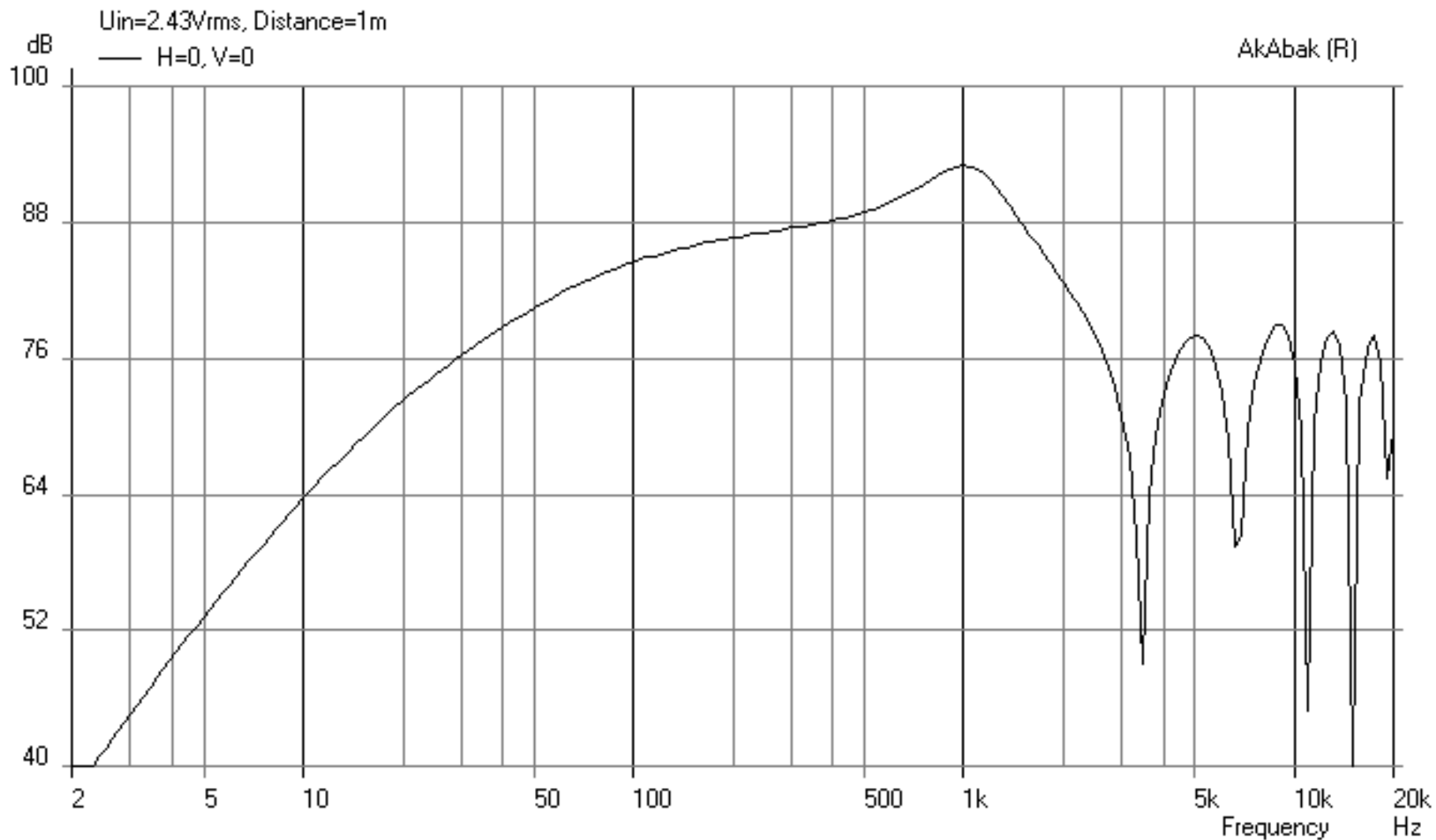
```
Coupler 'front' Node=8=9=10
SD=136cm2 dD1=6cm tD1=4cm |Cone
Radiator 'Rad1' Def='front' Node=10
x=0 y=0 z=0 HAngle=0 VAngle=0
```



$$f_P \doteq \frac{200}{dD}$$

Akustický tlak v akustickom poli – simulácia makromodelom „Radiator“ (Sum/Acoustic pressure; v osi reproduktora, $L_{EVC}=0$, $P_E=1W$, **kónická membrána**)

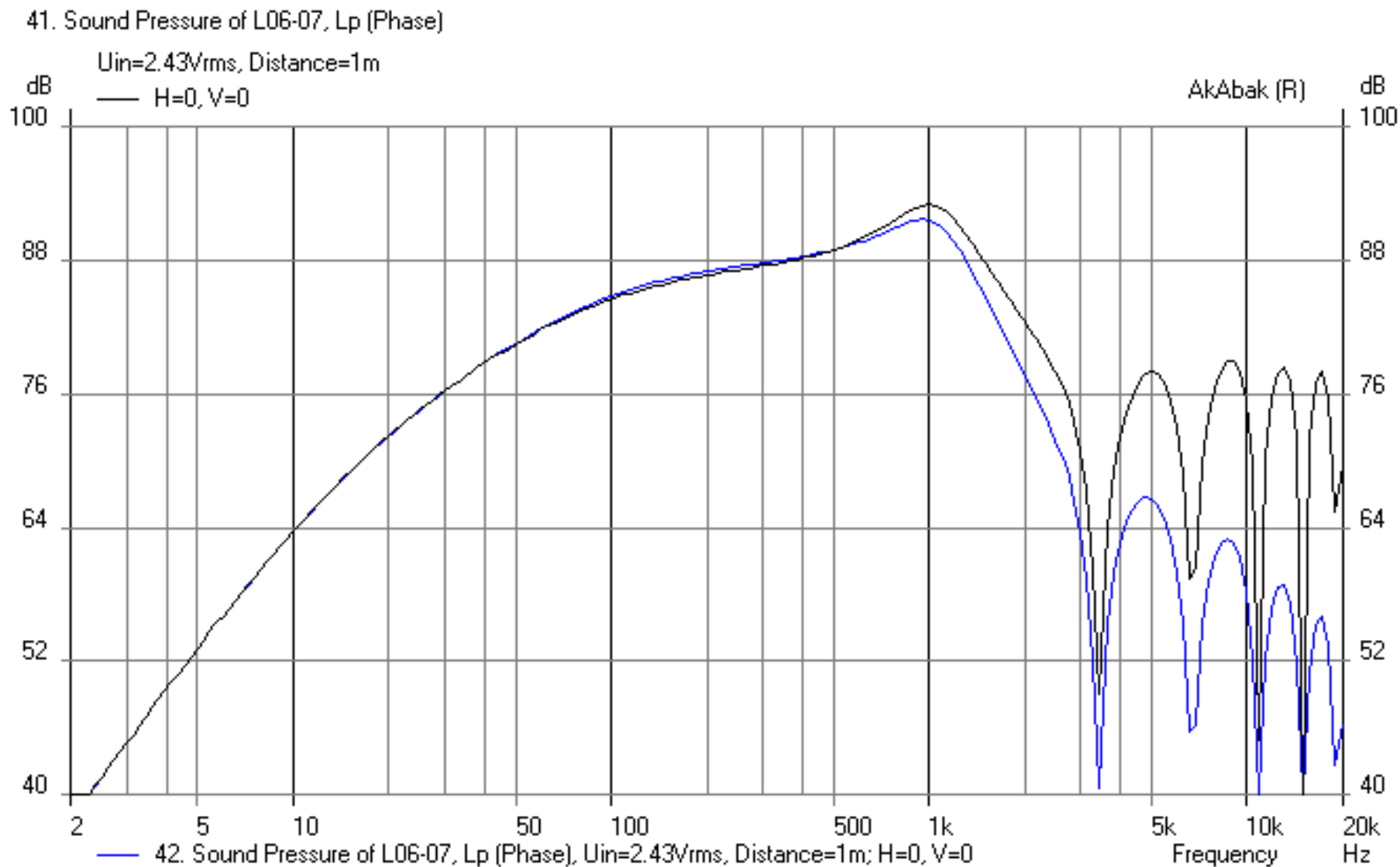
41. Sound Pressure of L06-07, Lp (Phase)



Vlastné kmity membrány

- ideálnou membránou by bola dokonale tuhá piestová membrána – nerealizovateľná !!!
- reálne najčastejšie používané membrány majú tvar zrezaného kužeľa (kónus) alebo guľového vrchlíka – ich typickou vlastnosťou sú vlastné kmity, ktoré sa prejavujú:
 - redukciou hmotnosti membrány, čo spôsobuje nárast hladiny akustického tlaku (f_P – frekvencia, pri ktorej k tomu dochádza)
 - zvlnením (deformáciou) charakteristiky pri vyšších frekvenciách

Vplyv cievky (modrá)



Smerová charakteristika kónickej membrány

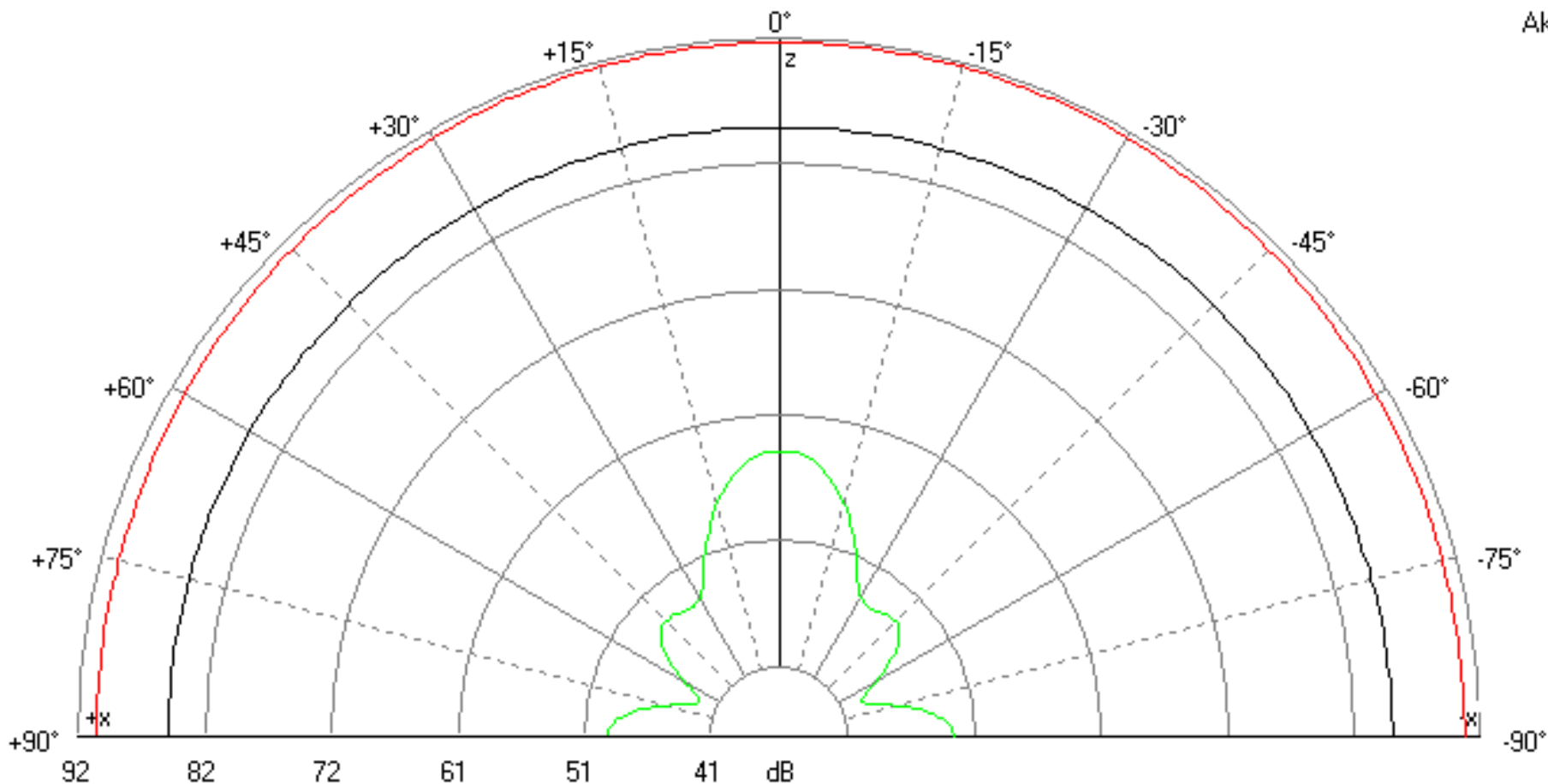
44. Polar of L06-07, Lp

$U_{in}=2.43V_{rms}$, Distance=1m

— Horiz. f=100Hz

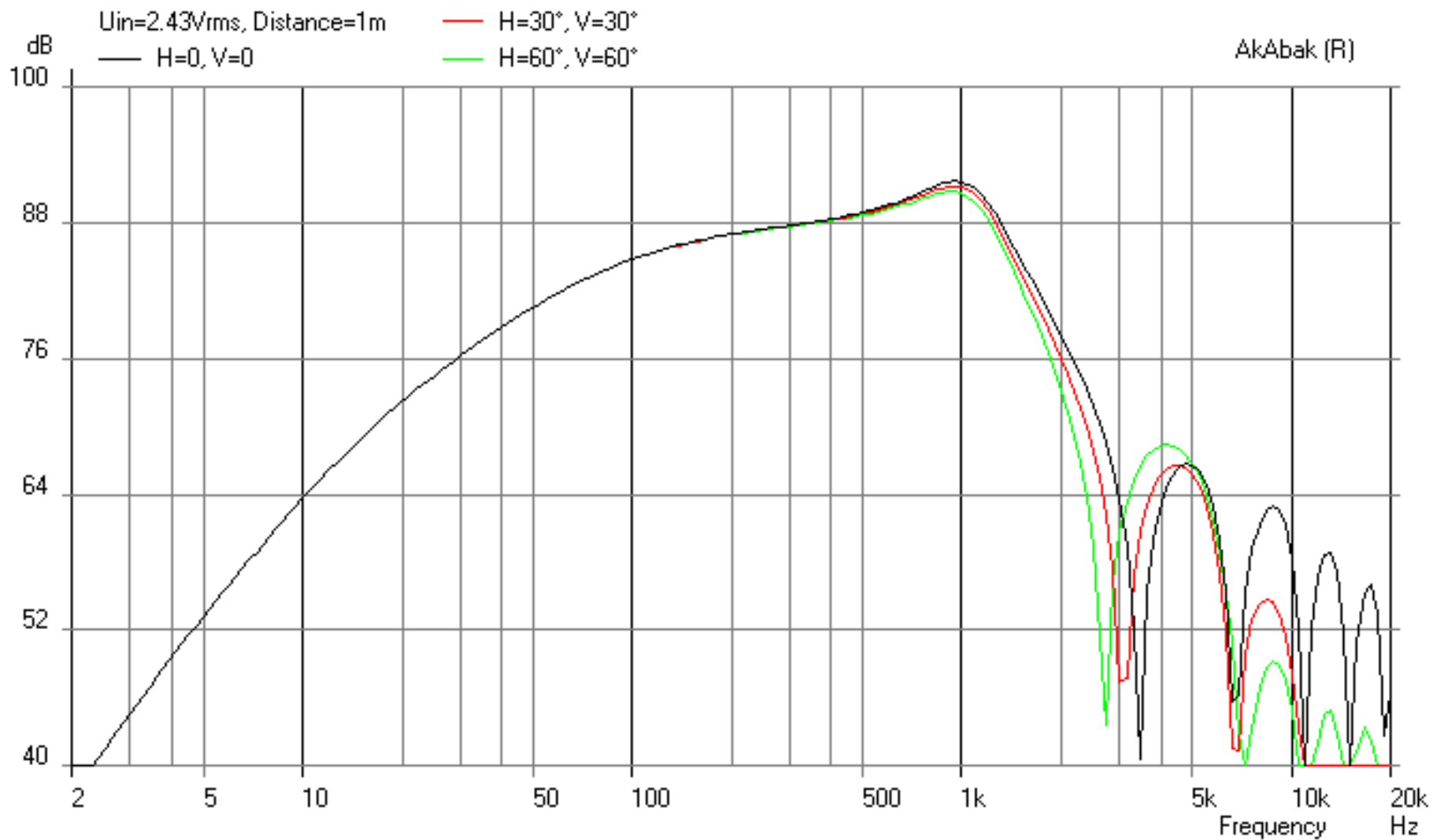
— Horiz. f=1kHz

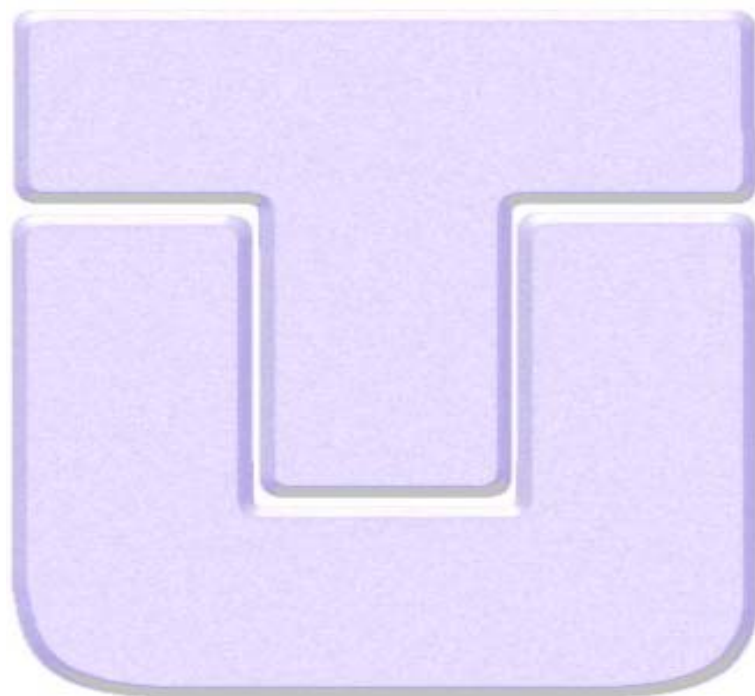
— Horiz. f=10kHz



Vplyv smerovosti

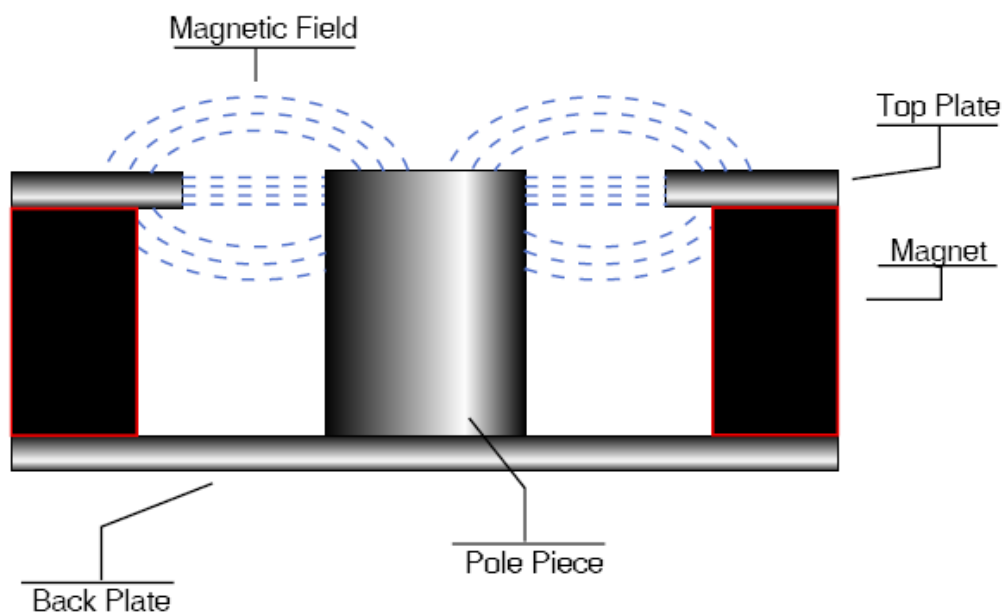
43. Sound Pressure of L06-07, Lp (Phase)



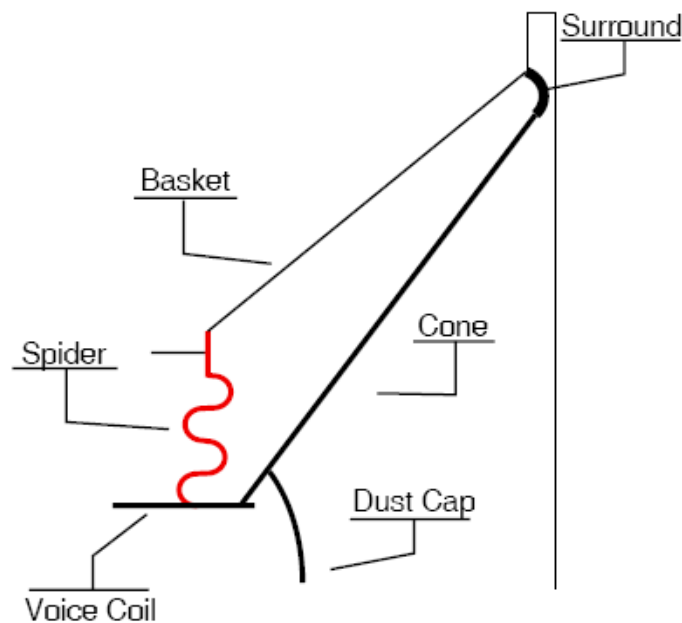


Zdroje nelineárneho skreslenia

- rozptylové magnetické pole

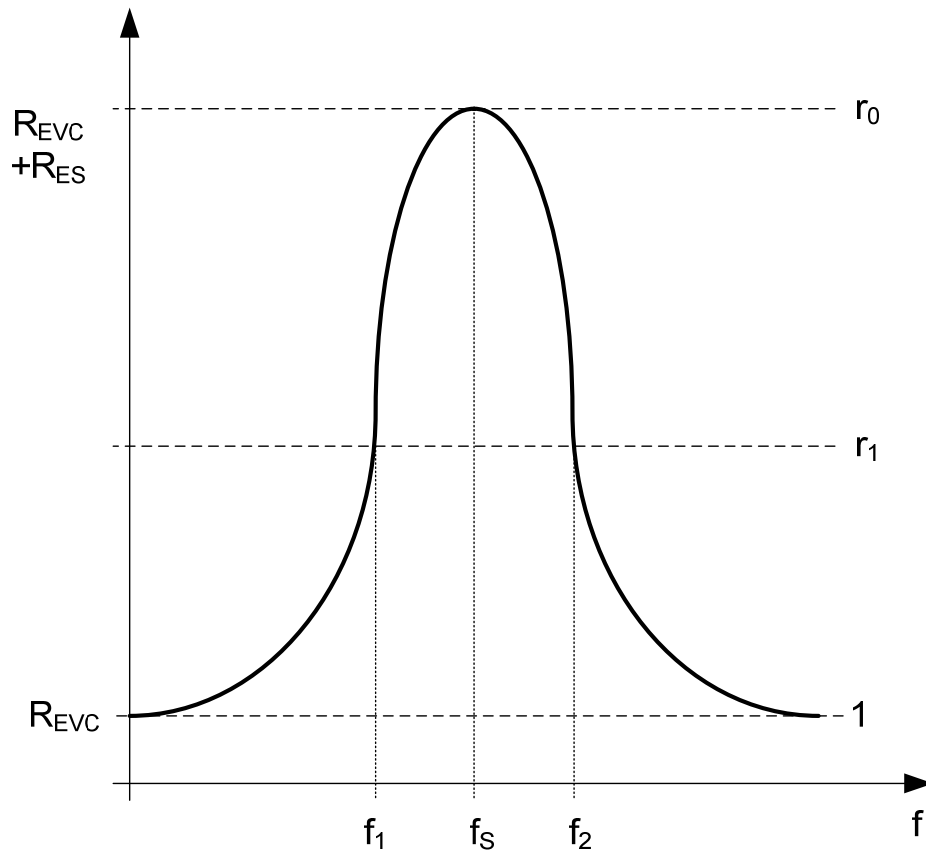


- materiálové nelinearity „spidera“ a „surroundu“



Meranie činiteľov kvality z impedančnej charakteristiky

• ...



1. Z impedančnej krivky odčítame:

R_{EVC} , R_1 , $R_{ES} + R_{EVC}$, f_s , f_1 a f_2

2. Vypočítame r_0 a r_1 :

$$r_0 = \frac{R_{ES} + R_{EVC}}{R_{EVC}} \quad a \quad r_1 = \frac{R_1}{R_{EVC}}$$

3. Vypočítame činitele kvality:

$$Q_{MS} = \frac{f_s}{f_2 - f_1} \sqrt{\frac{r_0^2 - r_1^2}{r_1^2 - 1}}$$

$$Q_{ES} = \frac{Q_{MS}}{r_0 - 1}$$

$$Q_{TS} = \frac{Q_{MS}}{r_0}$$

4. Ak zvolíme R_1 tak, aby: $r_1 = \sqrt{r_0}$

$$Q_{MS} = \frac{f_s}{f_2 - f_1} \sqrt{r_0}$$

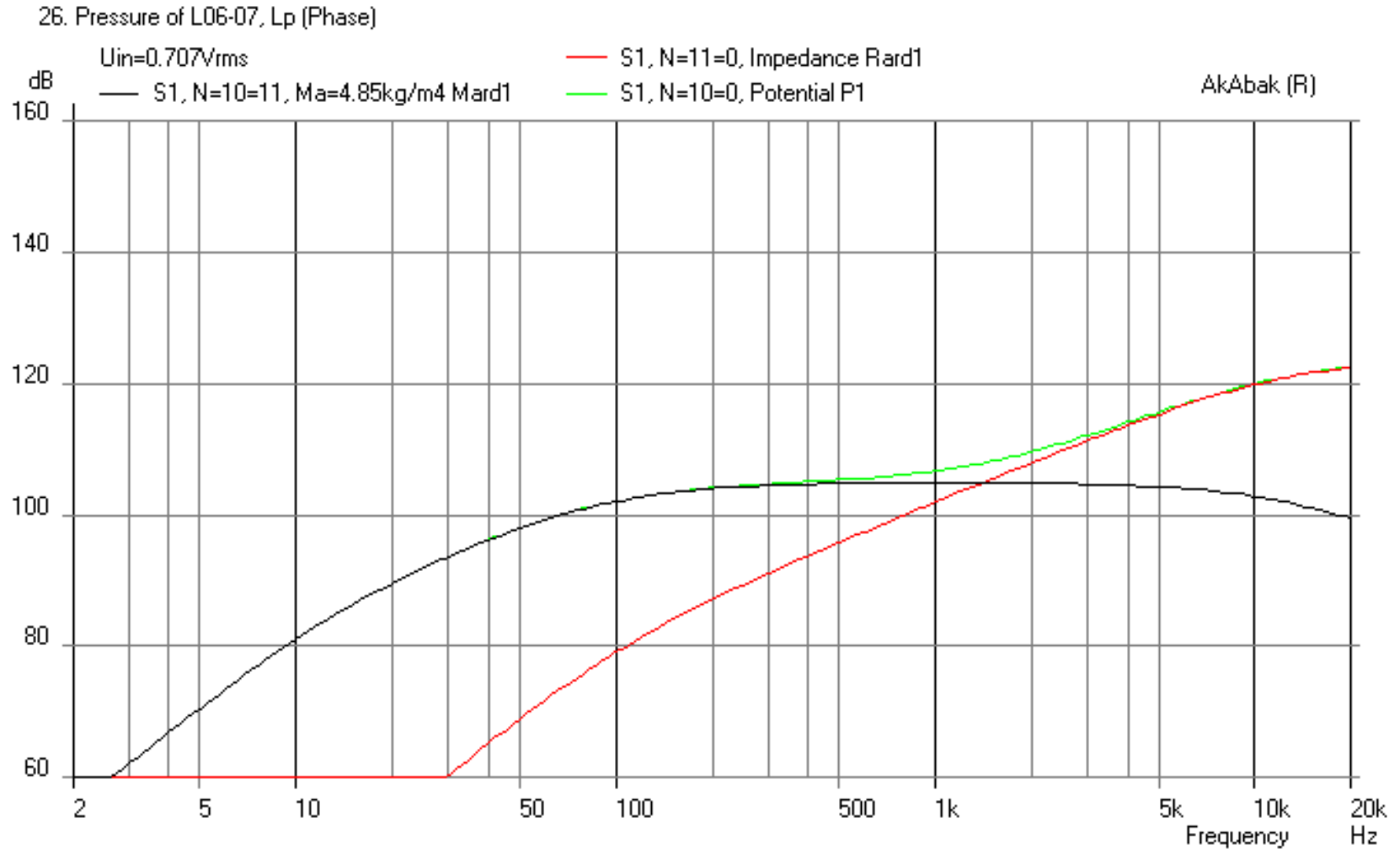
Meranie ekvivalentného objemu z impedančnej charakteristiky

1. Z impedančnej krivky odčítame rezonančnú frekvenciu f_{s1}
2. Na membránu reproduktora prilepíme závažie hmotnosti ΔM_M a zmeriame novú rezonančnú frekvenciu $f_{s2} < f_{s1}$

$$\left. \begin{array}{l} 1. f_{s1} = \frac{1}{2\pi\sqrt{M_{MS} \cdot C_{MS}}} \\ 2. f_{s2} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(M_{MS} + \Delta M_M) \cdot C_{MS}}} \end{array} \right\} M_{MS}, C_{MS} \Rightarrow V_{AS} = c_0^2 \rho_0 C_{MS} S_D^2$$

Akustický tlak na vysielacej impedancii ($L_{EVC}=0$)

- neposkytuje vhodnú interpretáciu akustického tlaku, vyslaného do priestoru



Skript s prvkom „Radiator“

| 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);
}

System 'S2' |Radiator na prednej strane membrany

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

AcouMass 'Mard2' Node=20=21 Ma={Mard}

Impedance 'Rard2' Node=21

$Z=\{(roh*w^2)/(2*pi*c0)\}$

Radiator

Radiator [X]

Element identification
Rad1

Node
s
10

Enter either the reference or the dimensions of the diaphragm

Reference to elements or definitions for obtaining diaphragm dimensions (Def=)

Diaphragm dimension

front | Coupler
front | Coupler

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

Radiation Position [X]

Mounting position and angle

Horizontal x	Vertical y	Axial z	Horizontal HAngle	Vertical VAngle
0	0	0	0	0
m,...,in	m,...,in	m,...,in	Deg.*	Deg.*

Reflection

no
 yes:

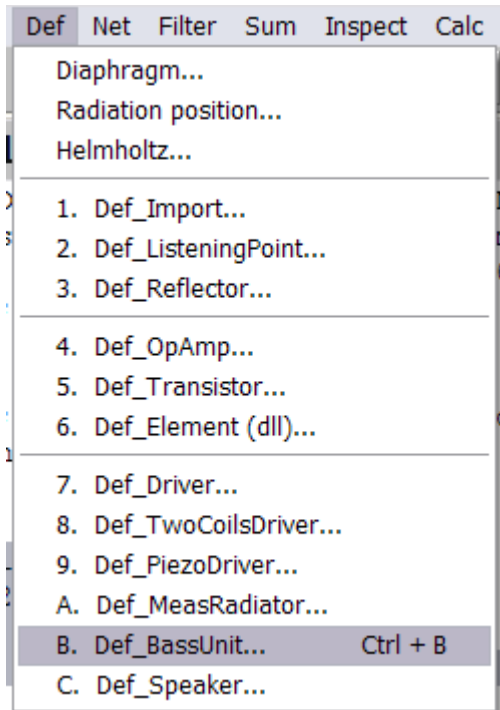
Diffraction dEdge...	Displacement t1
<input type="text"/>	<input type="text"/>
m,...,in	m,...,in

No Radiation "NoRad"
 No Directivity "NoDir"

Label numbers

Mounting point is center of diaphragm (including displacement t1).

BassUnit



Definition Def_BassUnit / Calculator

Resonance frequency fs...	Electrical quality Qes...	Mechanical quality Qms...	Voice coil resistance Re...	Voice coil inductance Le...	Equ. vol. to compliance Vas...	Diaphragm dimension SD...
37Hz	0.39	1.58	5.9ohm		32L	136cm2
...Hz...			..ohm.. fre=3.0kHz	H... ExpoLe=0.6	m3...in3	m2...in2 Piston

Excursion max. Xms	Generator resistance Rg	Mass-load factor mb	Enclosure volume Vb	Quality factor/ frequency Qb/fo	Helmholtz resonance fb...
6mm		1	10m3	1000	
m...in	..ohm..	0.95...1	m3...in3,L		..Hz..

Vented

Closed Box System

fc	Qtc	Directivity freq. fD	f3
37.059Hz	0.313	830Hz	107Hz

Lw max. 4-pi-sr	Pel max.	Uo max. rms	Reverb. -60dB	Ripple
86.41dB	1.33W	2.8V		

HP-Filter on/off

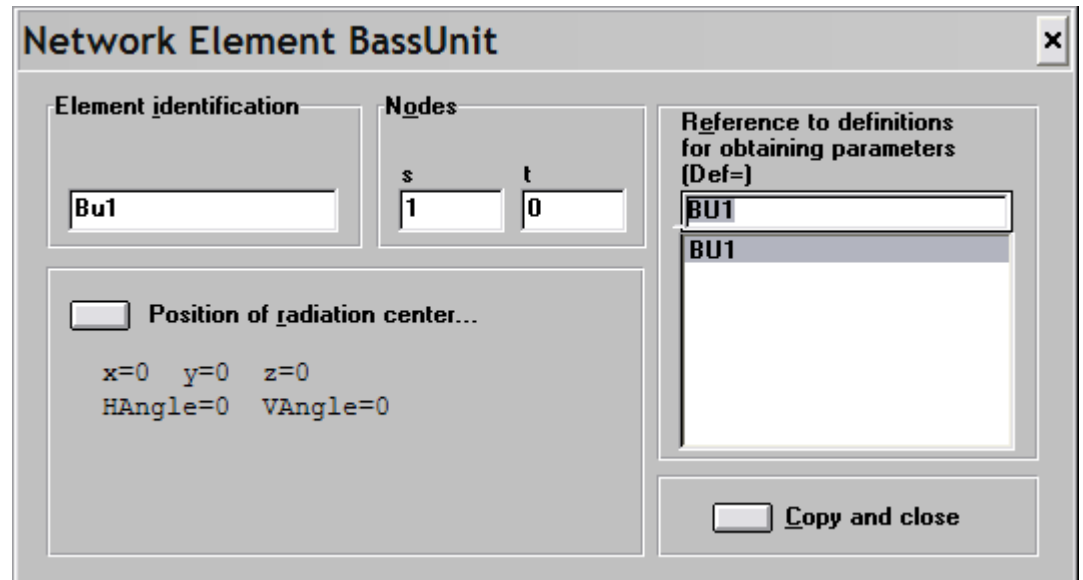
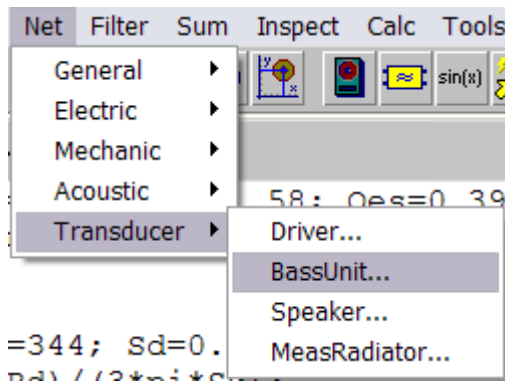
Quality factor Qe	Pole - frequency fe
	..Hz..

Identification

BU1

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

BassUnit - Dialog



Skript

Def_BassUnit 'BU1'

SD=136cm² |Piston

fs=37Hz Vas=32L Qms=1.58

Qes=0.39 Re=5.9ohm | fre=3.0kHz ExpoRe=1 ExpoLe=0.6

Xms=6mm

Vb=10m³

|Performance in sealed enclosure:

| fc Qtc fD f3

| 37.1Hz 0.313 830.4Hz 106.8Hz

| Lwmax Pelmax UoRms t60 Ripple

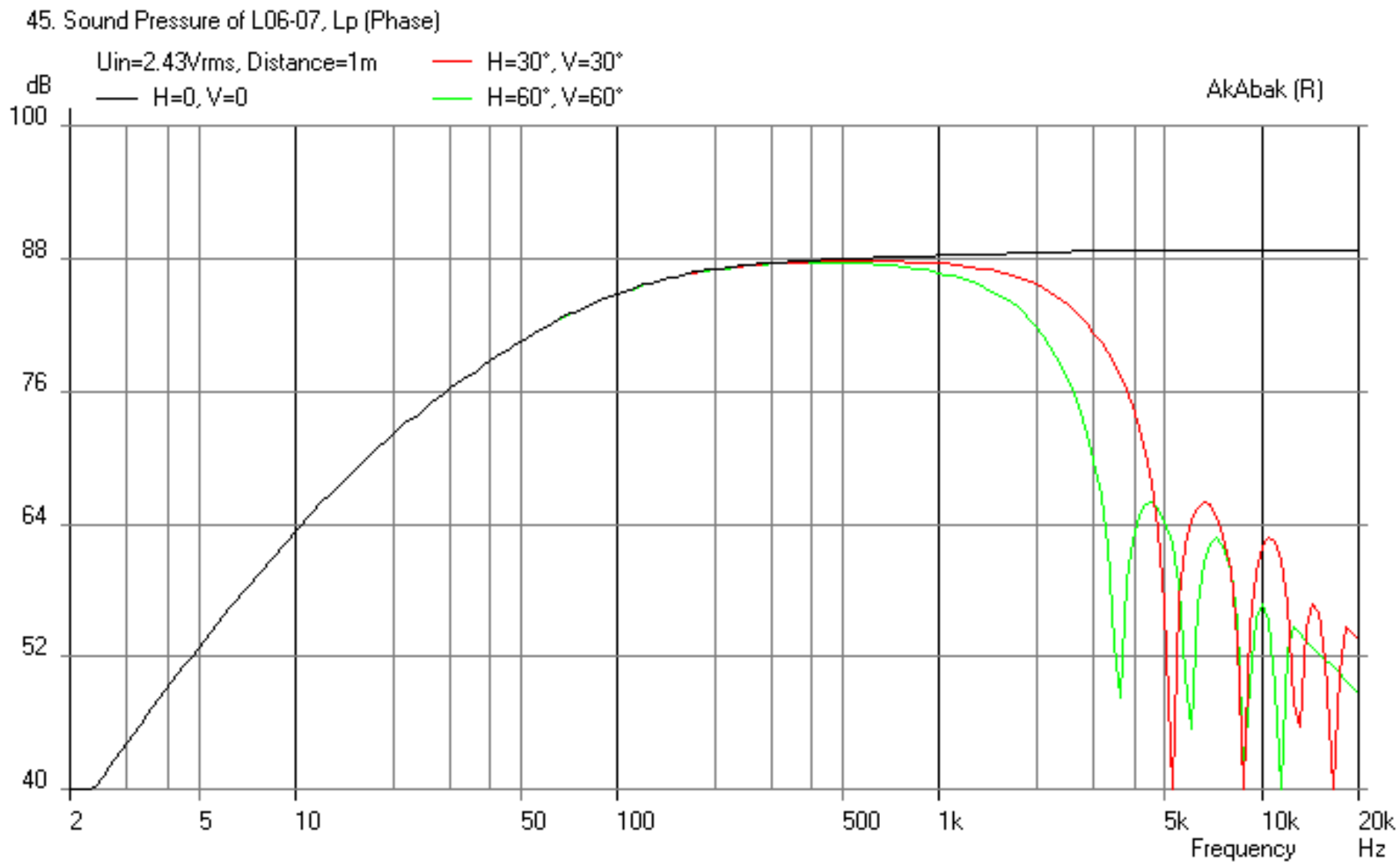
| 86.4dB 1.3W 2.8V 0 0

System 'S0'

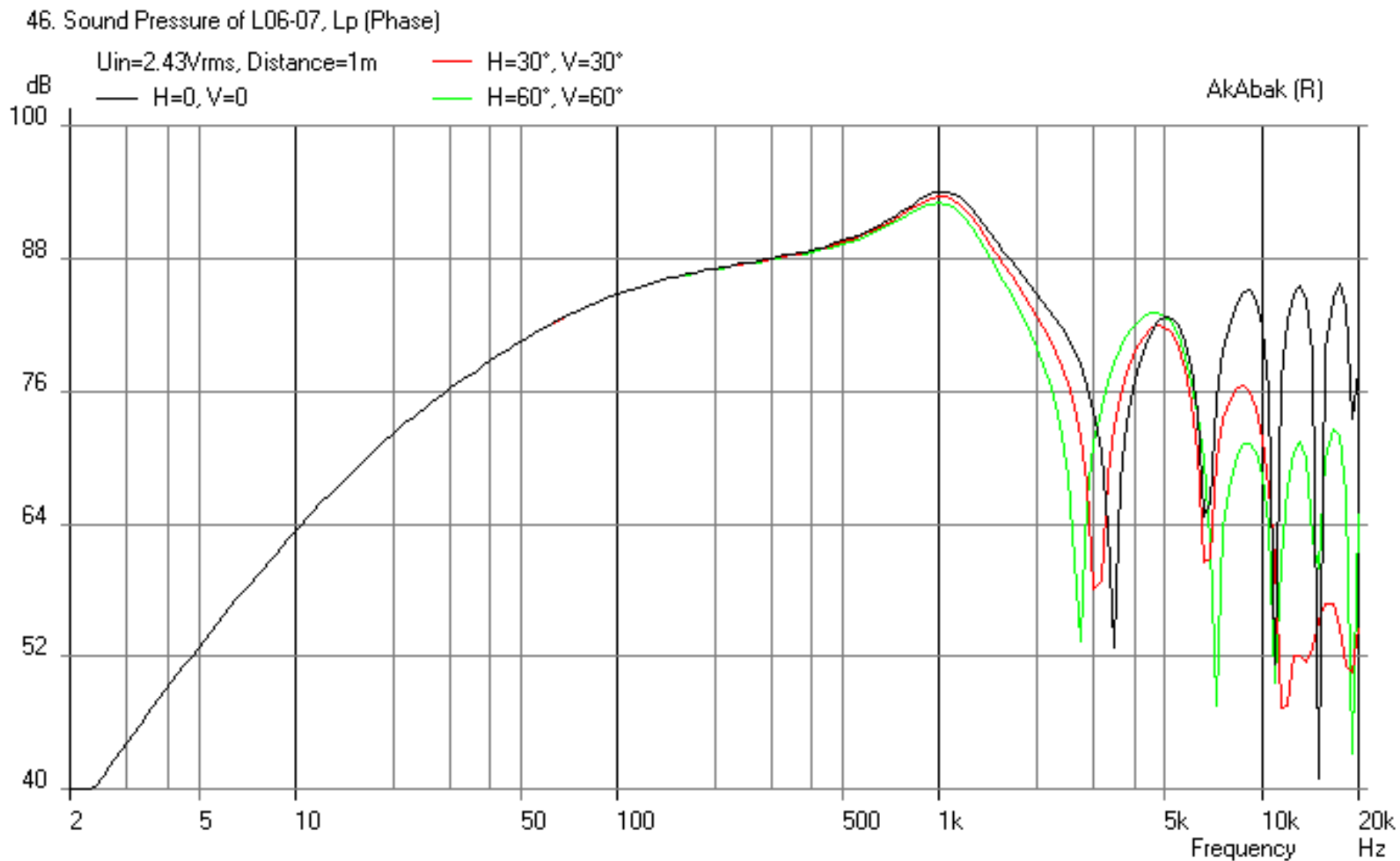
BassUnit 'Bu1' Def='BU1' Node=1=0

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

Akustický tlak v akustickom poli – simulácia makromodelom „BassUnit“ (Sum/Acoustic pressure; piest, $R_G=0$, $L_{EVC}=0$, $PE=1W$)



Akustický tlak v akustickom poli – simulácia makromodelom „BassUnit“ (Sum/Acoustic pressure; cone, $R_G=0$, $L_{EVC}=0$, $PE=1W$)



Smerová charakteristika

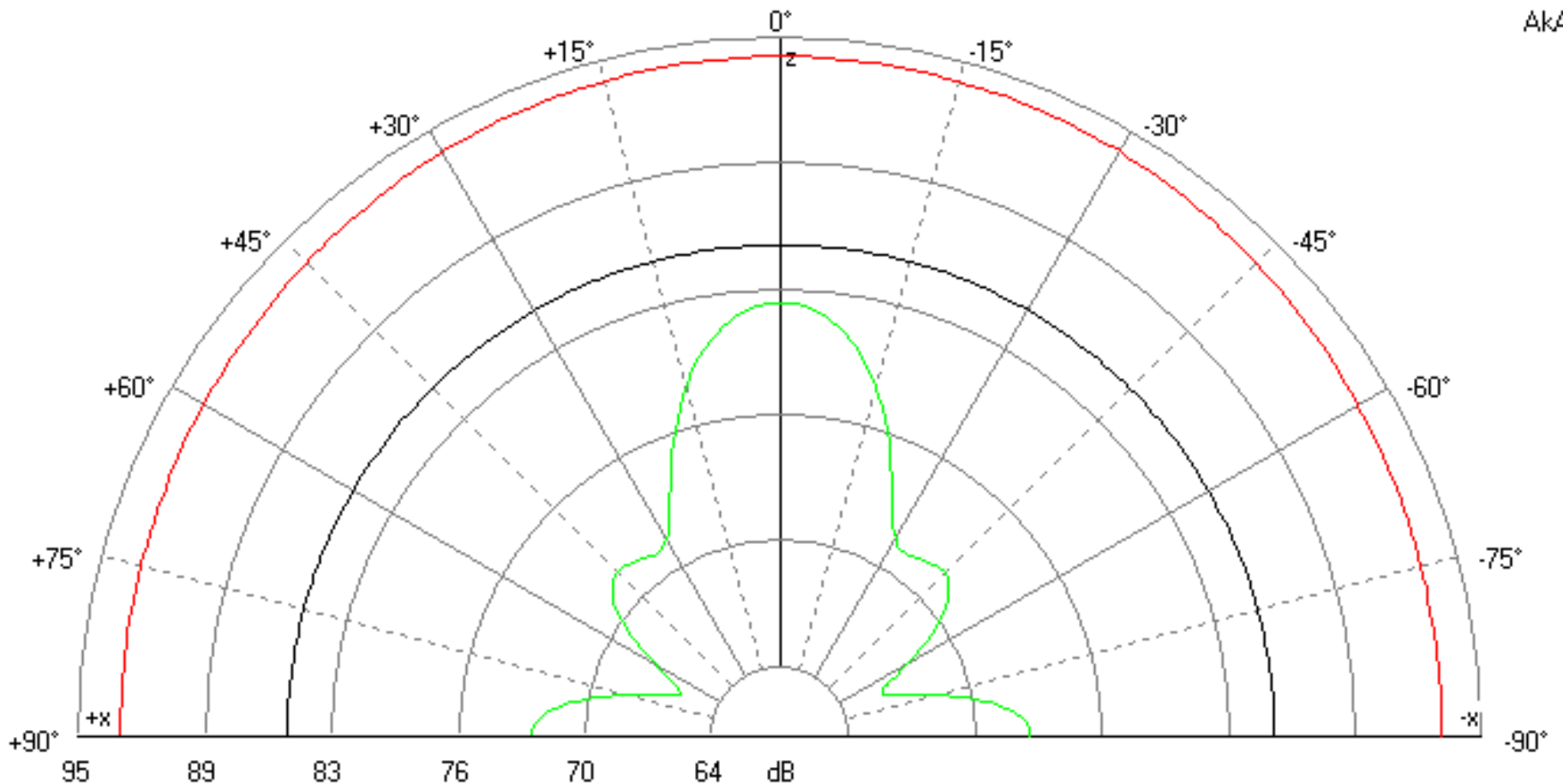
47. Polar of L06-07, Lp

$U_{in}=2.43V_{rms}$, Distance=1m

— Horiz. f=100Hz

— Horiz. f=1kHz

— Horiz. f=10kHz



Nelineárne chovanie cievky

- Nelineárne chovanie odporu je spôsobené vírivými prúdmi
- ...

$$R_{EVC}(f) = R_{EVC} \cdot \left(1 + \frac{f}{f_S}\right)^{ExpoRe}$$

$$ExpoRe \in \langle 0, 3 \rangle$$

$$f_{RE} \in \langle 2 \text{ kHz}, 20 \text{ kHz} \rangle$$

$$X_{EVC} = (\omega L_{EVC})^g$$

$$g = \frac{1 + \left(\frac{\omega L_{EVC}}{R_{EVC}}\right)^{2 \cdot ExpoLe}}{1 + \left(\frac{\omega L_{EVC}}{R_{EVC}}\right)^2}$$

$$ExpoLe \in \langle 0, 3 \rangle$$

fRE=1500Hz, ExpoRe=1;2;3, ExpoLe=0.5;1.5;3

53. Sound Pressure of L06-07, Lp (Phase)

Uin=2.43Vrms, Distance=1m

— H=0, V=0

