



# **Elektroakustika**

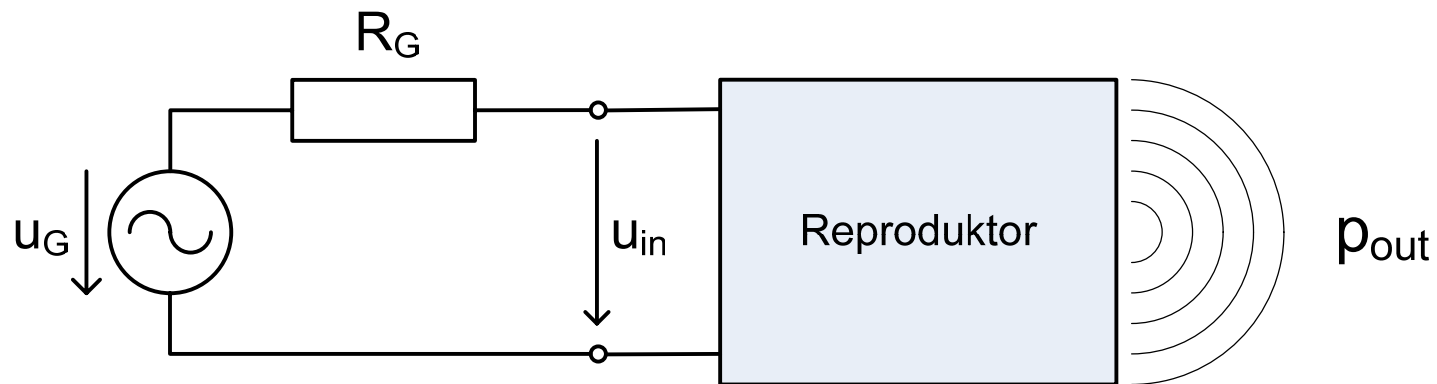
## **L06: Reprodukory**

**doc. Ing. Jozef Juhár, PhD.**

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

# Reproduktor = elektroakustický menič + akustický vysielateľ

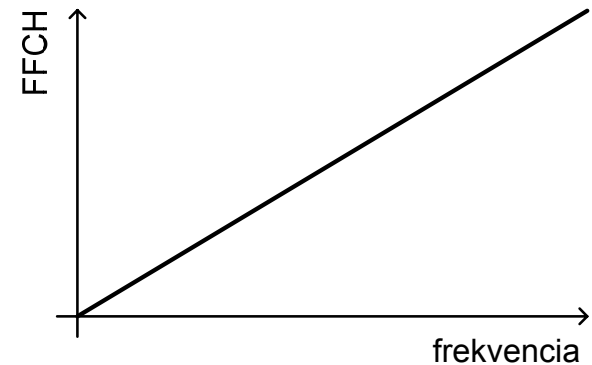
- základnou požiadavkou, kladenou na reproduktor je verná reprodukcia akustického signálu
- prenosová sústava – elektrický signál na vstupe – akustický signál na výstupe



$$p_{renos} = \frac{p_{out}}{u_{in}}$$

# Požiadavky na „ideálny“ prenos

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



# Rozdelenie reproduktorov

(podľa spôsobu vysielania)

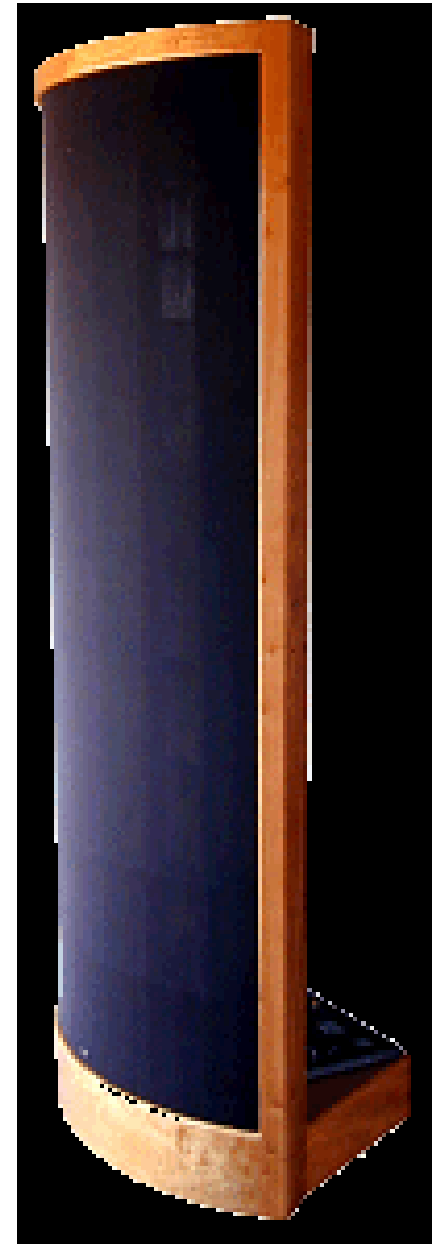
- priamovysielaajúce
- nepriamovysielaajúce (tlakové)



# Rozdelenie reproduktorov

(podľa typu elektromechanického meniča)

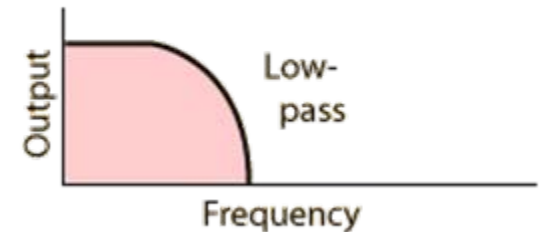
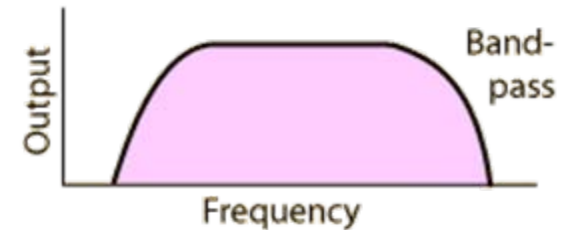
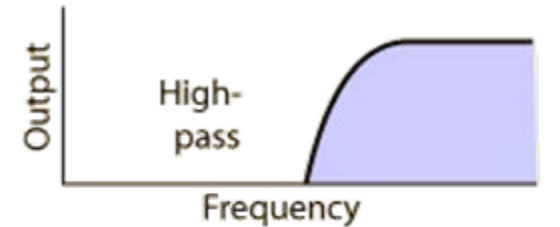
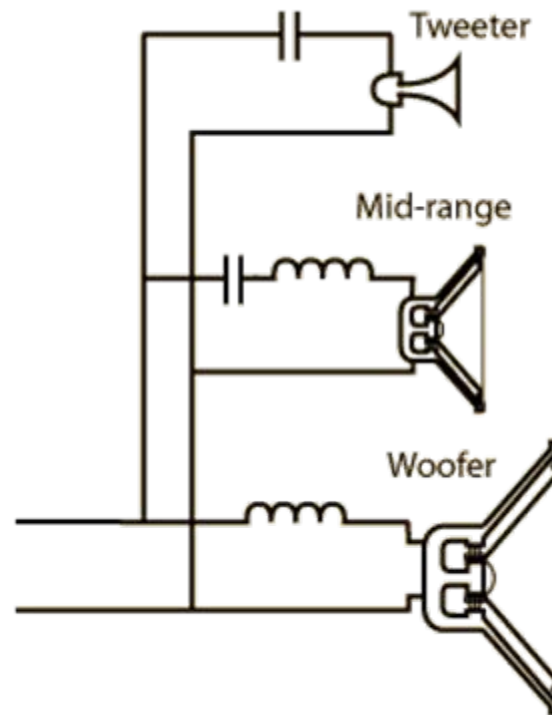
- elektrodynamické cievkové
- elektrodynamické páskové
- elektrostatické
- piezoelektrické
- iné



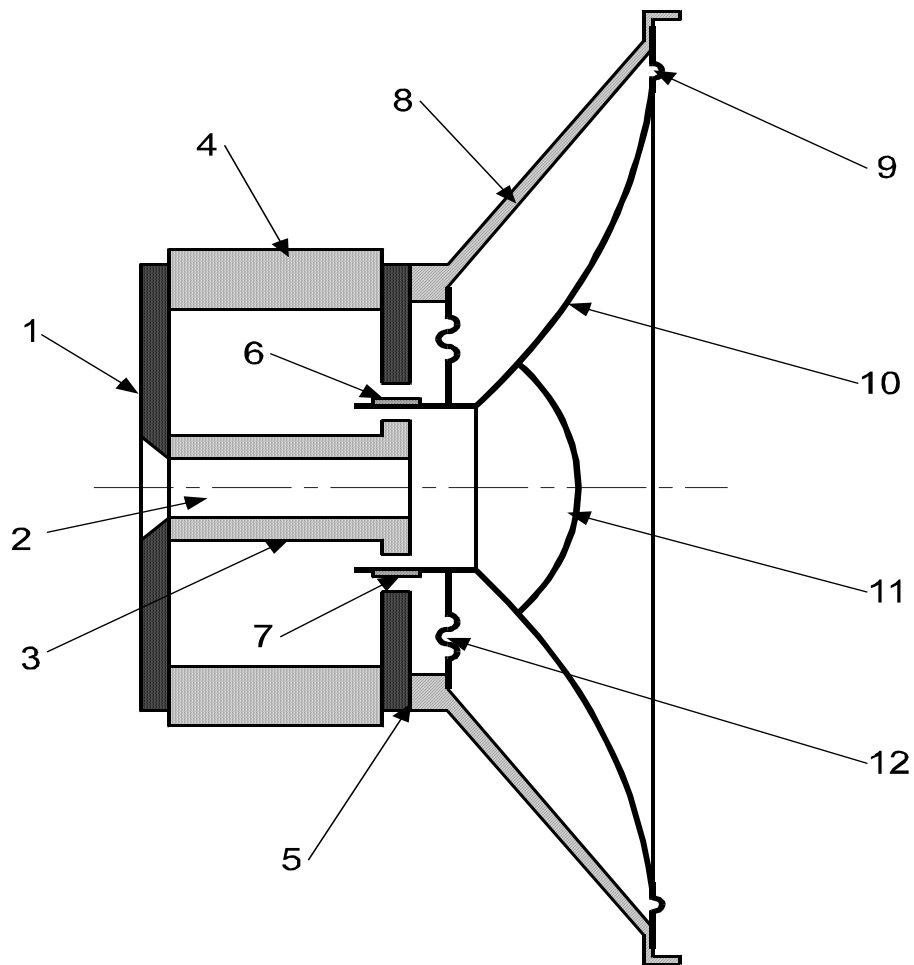
# Rozdelenie reproduktorov

(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	5.7 Ohms
Recommended Frequency Range	50 - 4000 Hz	Voice Coil Inductance	0.3 mH
Short Term Power Handling *	250 W	Force Factor	4.6 N/A
Long Term Power Handling *	60 W	Free Air Resonance	49 Hz
Characteristic Sensitivity (2,83V, 1m)	86.5 dB	Moving Mass	6.28 g
Voice Coil Diameter	26 mm	Air Load Mass In IEC Baffle	0.38 g
Voice Coil Height	16 mm	Suspension Compliance	1.7 mm/N
Air Gap Height	6 mm	Suspension Mechanical Resistance	0.93 Ns/m
Linear Coil Travel (p-p)	10 mm	Effective Piston Area	75 cm <sup>2</sup>
Maximum Coil Travel (p-p)	20 mm	VAS	12 Litres
Magnetic Gap Flux Density	1.1 T	QMS	2.21
Magnet Weight	0.42kg	QES	0.56
Total Weight	1.29 kg	QTS	0.45

## 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 <sup>2</sup>
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

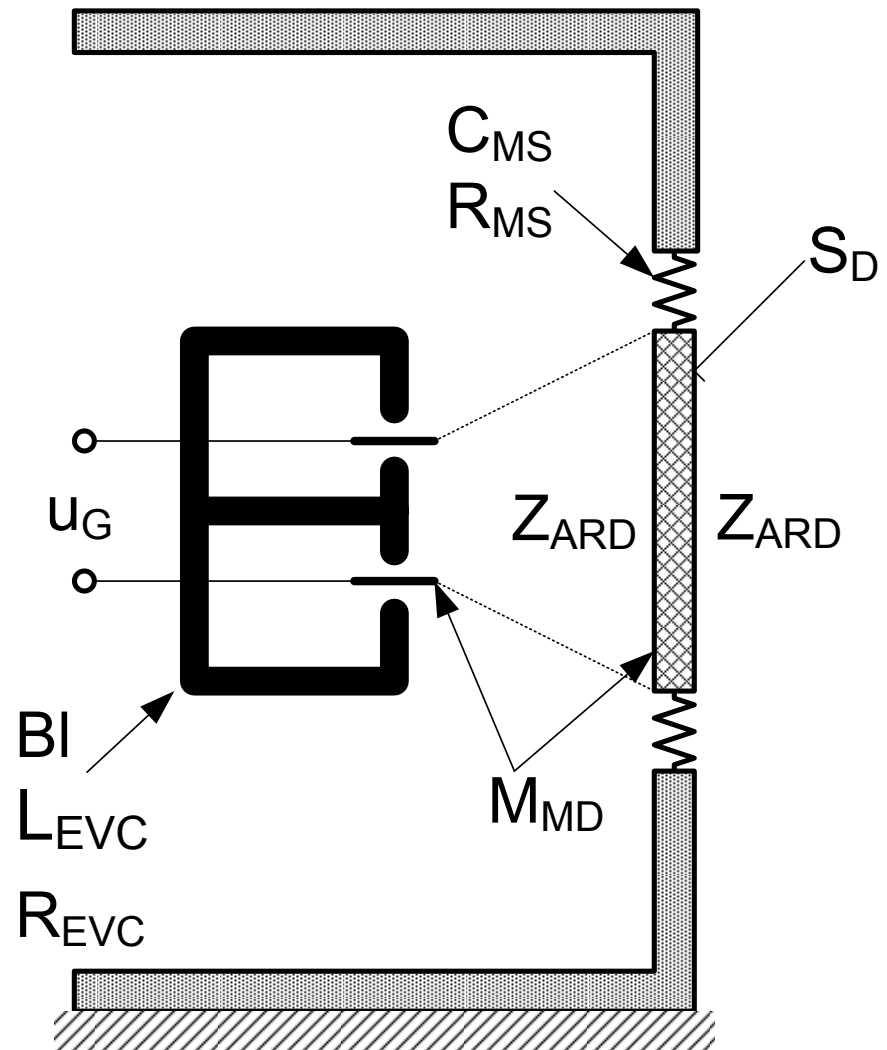
# Typické parametre vysokotónového reproduktora (tweeter)



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 <sup>2</sup>
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

# Reproduktor v nekonečnej ozvučnici (symbolický náčrt)

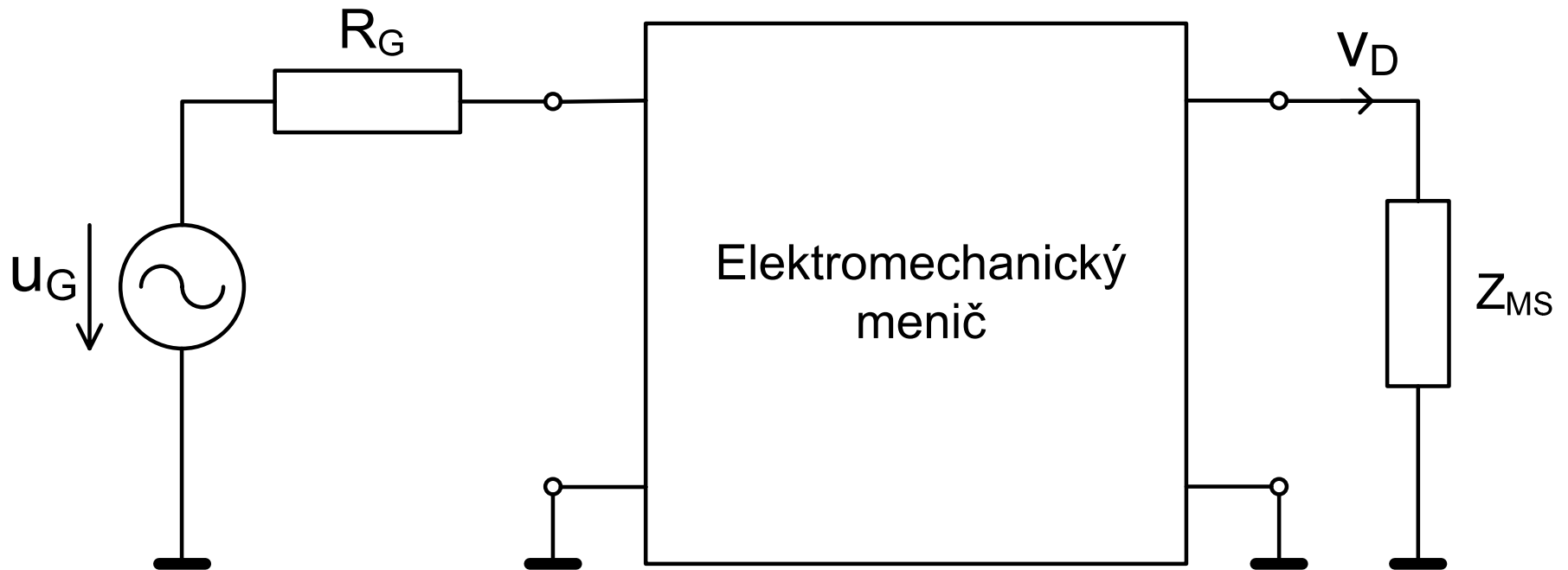
- membrána reproduktora je nahradená ideálnym piestom
- predná a zadná strana piesta „je zaťažená“ vysielacou impedanciou  $Z_{ARD}$
- „nekonečná“ ozvučnica slúži na dokonalé oddelenie akustických priestorov pred a za membránou



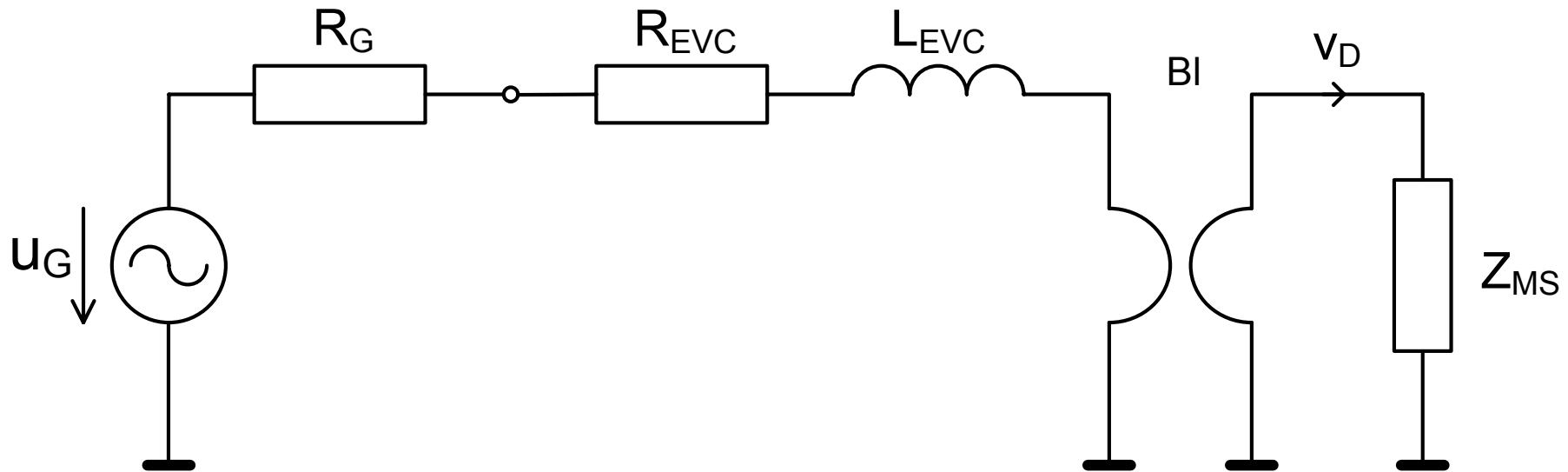
## Elektrické, mechanické a akustické prvky elektrodynamického reproduktora v nekonečnej ozvučnici

- $R_G$  vnútorný odpor zdroja elektrického signálu;
- $R_{EVC}$  elektrický odpor cievky;
- $L_{EVC}$  elektrická indukčnosť cievky;
- $Bl$  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

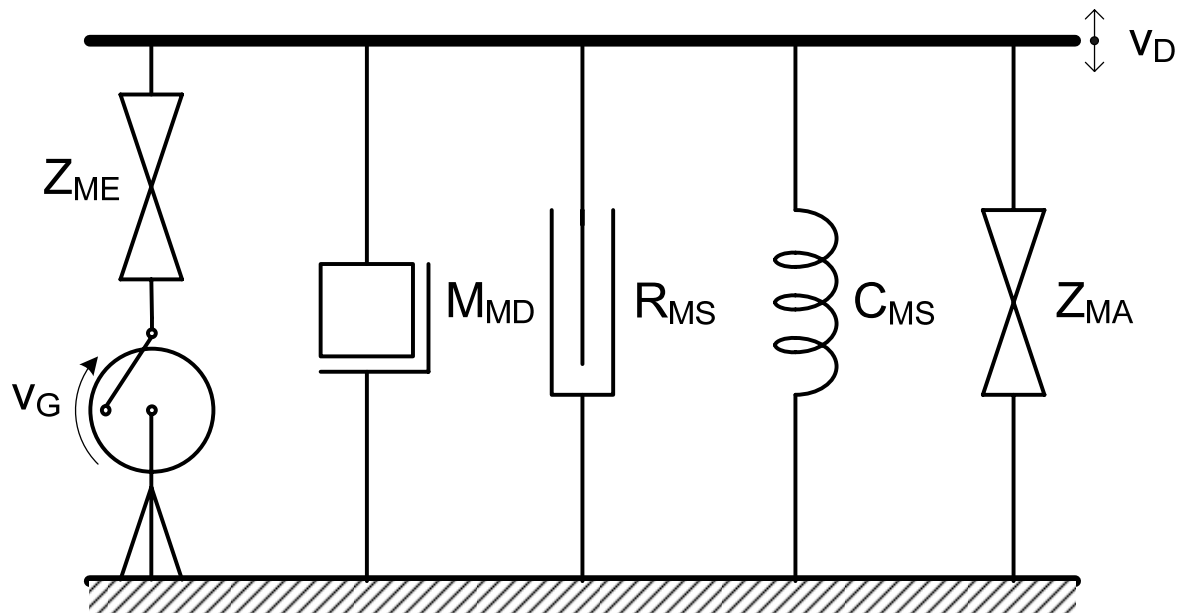


# Elektrický podsystem reproduktora (náhradná schéma)



- 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)

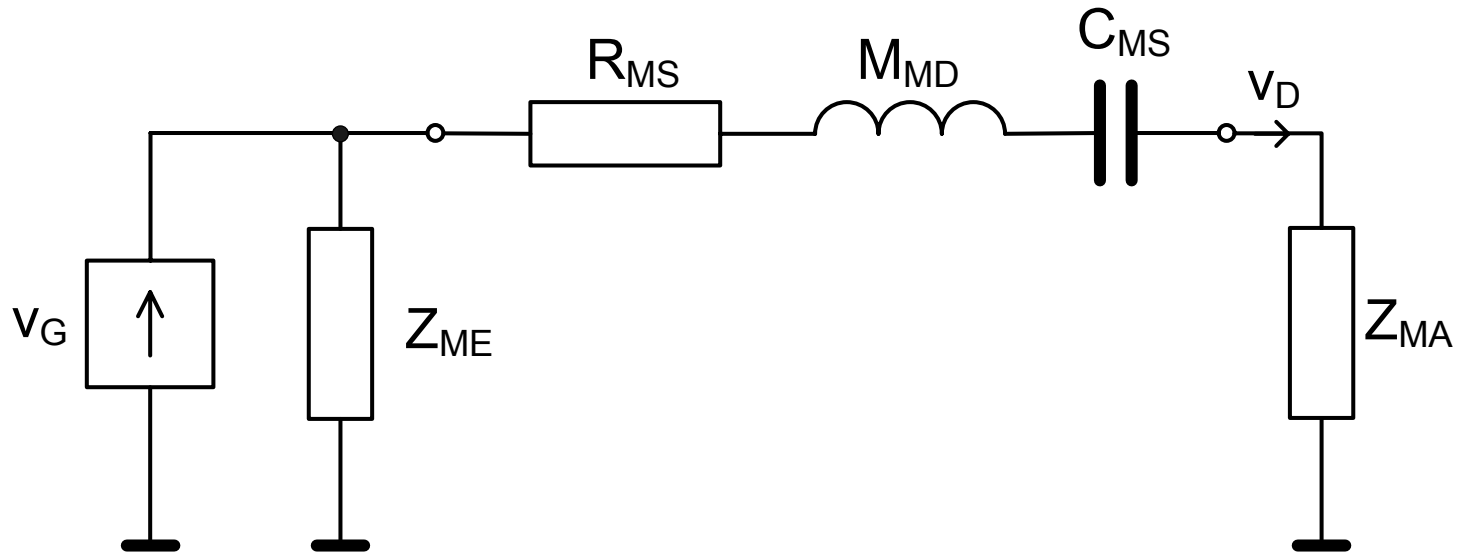


- zdroj mechanickej rýchlosti  $v_G$  je obrazom elektrického napätia na vstupe elektrodynamického meniča
- mechanická impedancia  $Z_{ME}$  reprezentuje elektrické prvky, zobrazené na mechanickú stranu



# Mechanický podsystem reproduktora

(analogická schéma)



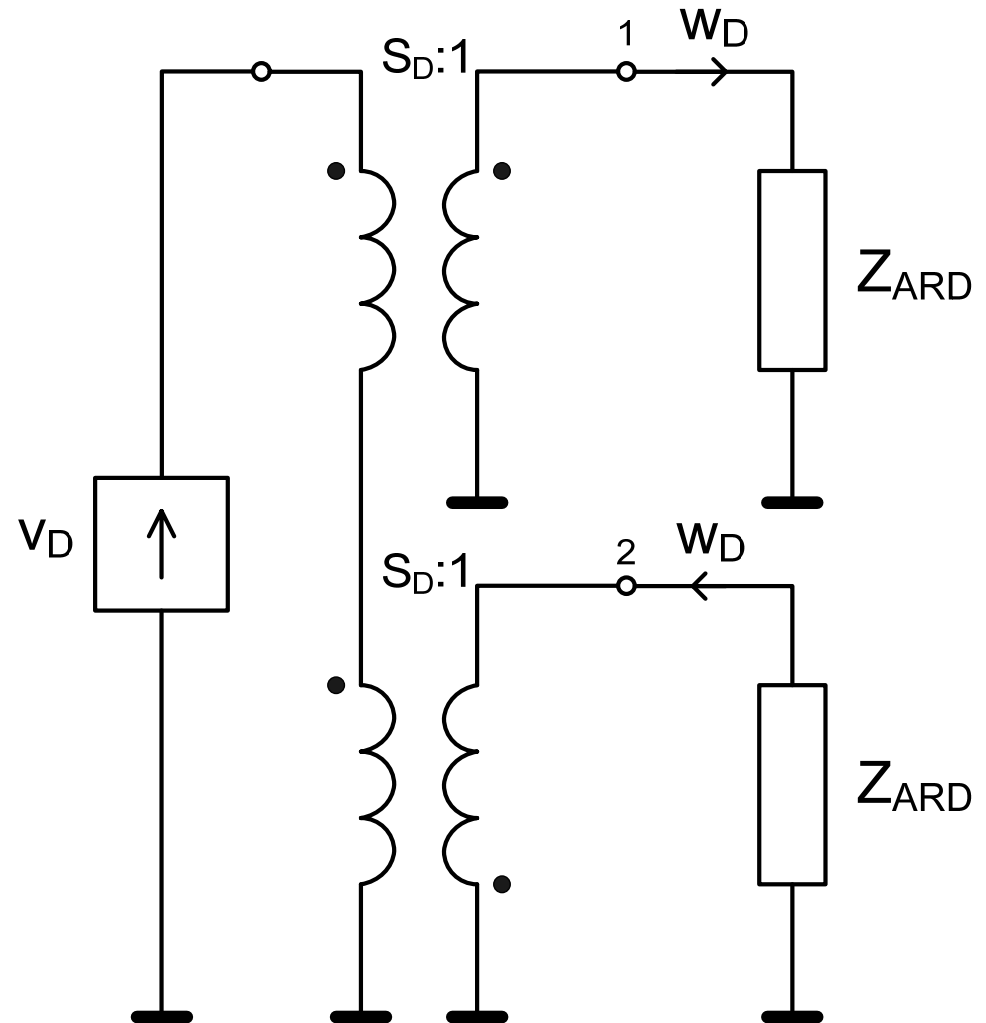
- hlavnými prvkami mechanického podsystemu reproduktora sú mechanické prvky  $M_{MD}$ ,  $R_{MS}$ ,  $C_{MS}$ , ktoré kmitajú rovnakou rýchlosťou  $v_D$ , takže v analogickej schéme budú zapojené do série
- mechanická impedancia  $Z_{MA}$  reprezentuje akustickú záťaž piesta (vysielacie impedancie) zobrazenú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



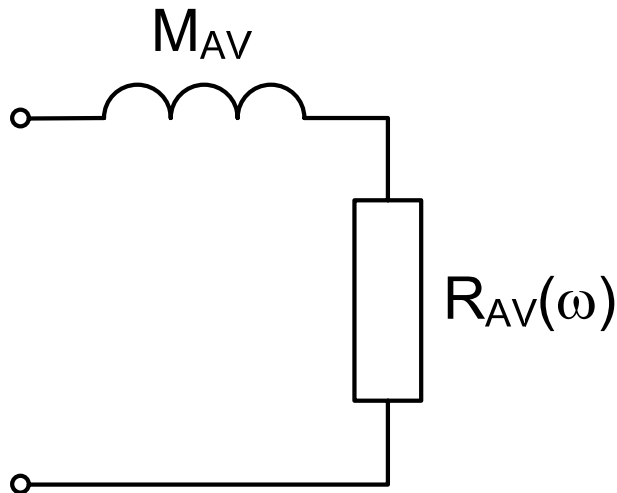
# Akustický podsystem reproduktora

(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

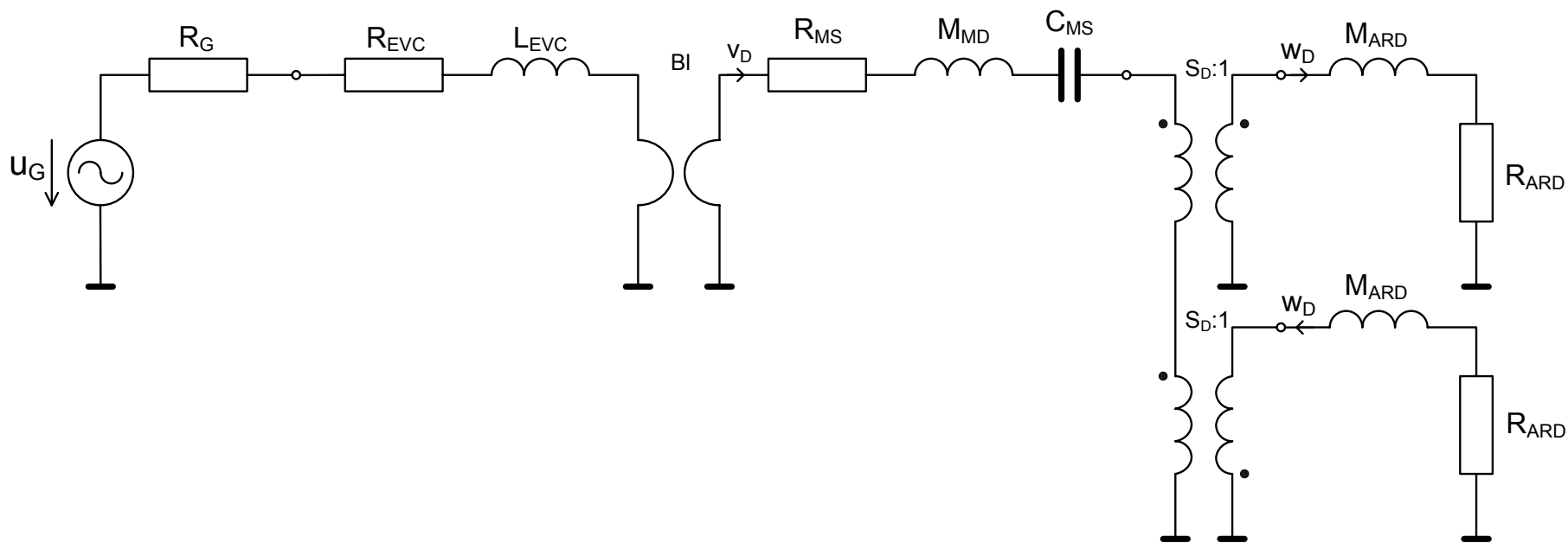


$$Z_{ARD} = R_{ARD}(\omega) + j\omega M_{ARD}$$

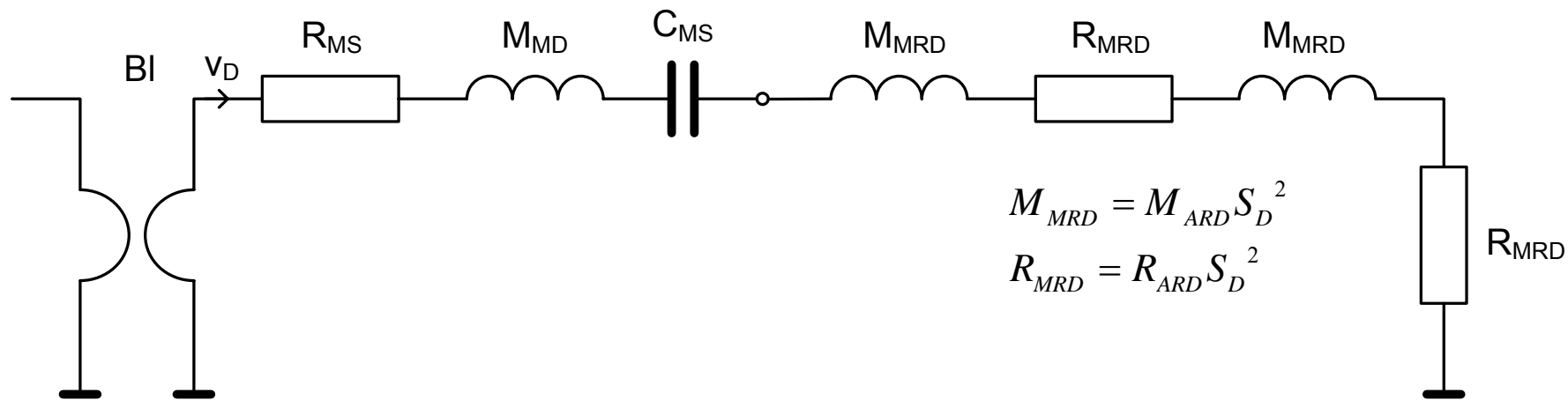
$$R_{ARD}(\omega) = \frac{\rho_0}{2\pi c_0} \omega^2$$

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

# Úplná náhradná schéma elektrodynamického, priamovysielačného reproduktora

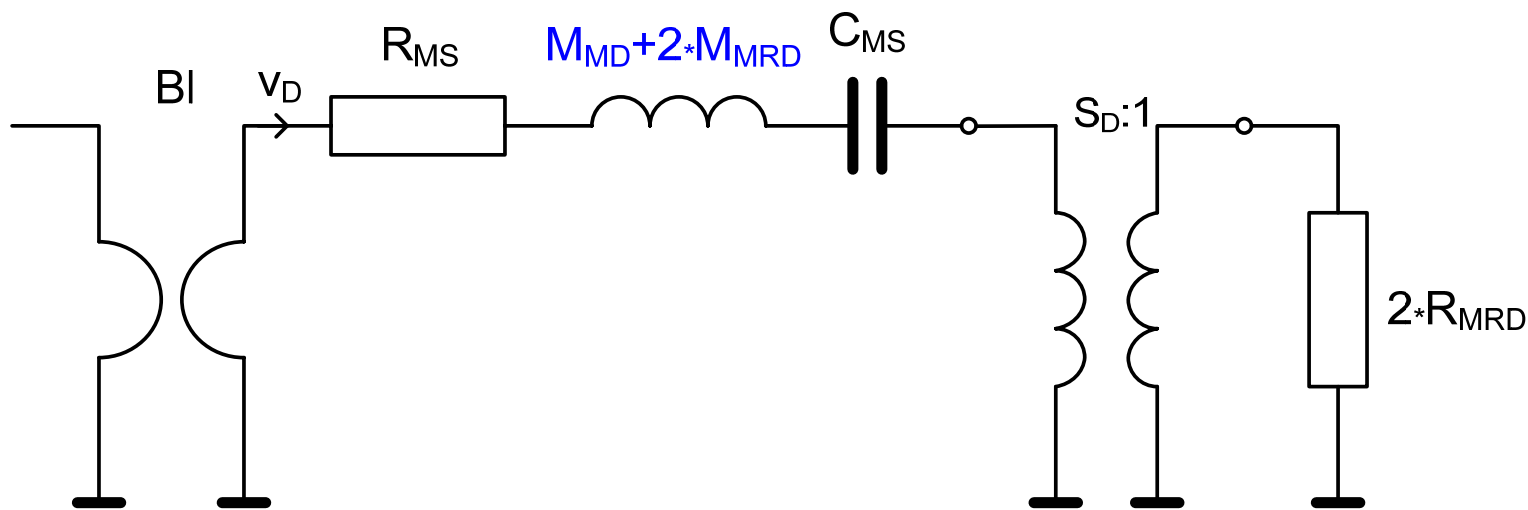


# Úprava (zjednodušenie) náhradnej schémy reproduktora

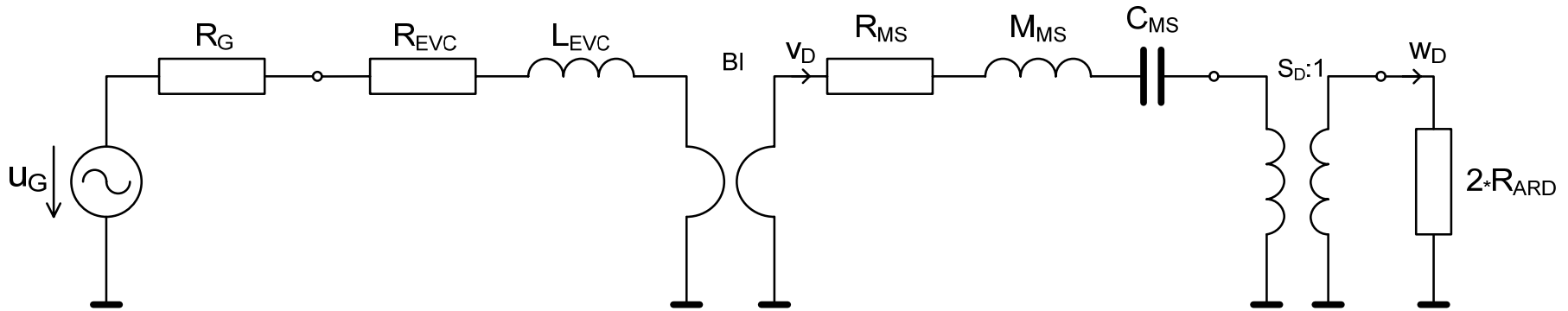


$$M_{MRD} = M_{ARD} S_D^2$$

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



## Zjednodušená náhradná schéma elektrodynamického priamovysielačujúceho reproduktora



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

$$R_{ARD} \doteq 0$$

Akustická vysielač hmotnosť, zobrazená do "mechanickej" časti schémy:

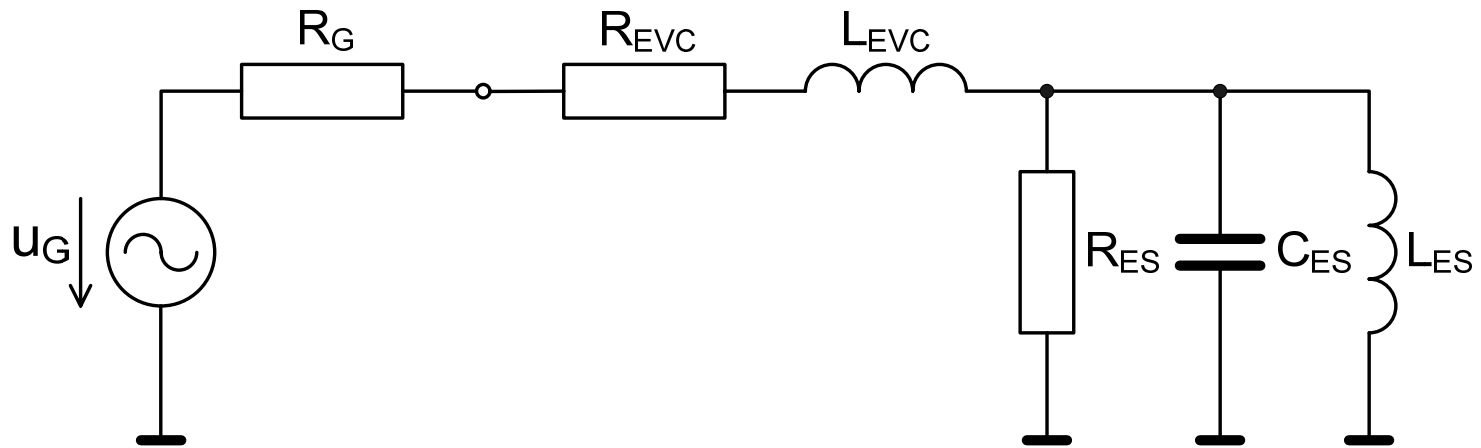
$$M_{MRD} = M_{ARD} S_D^2 = \frac{8}{3} R_D^3 \rho_0$$

# Analýza vlastností reproduktora v nekonečné ozvučnici

- 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



# Elektrická náhradná schéma reproduktora



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

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

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

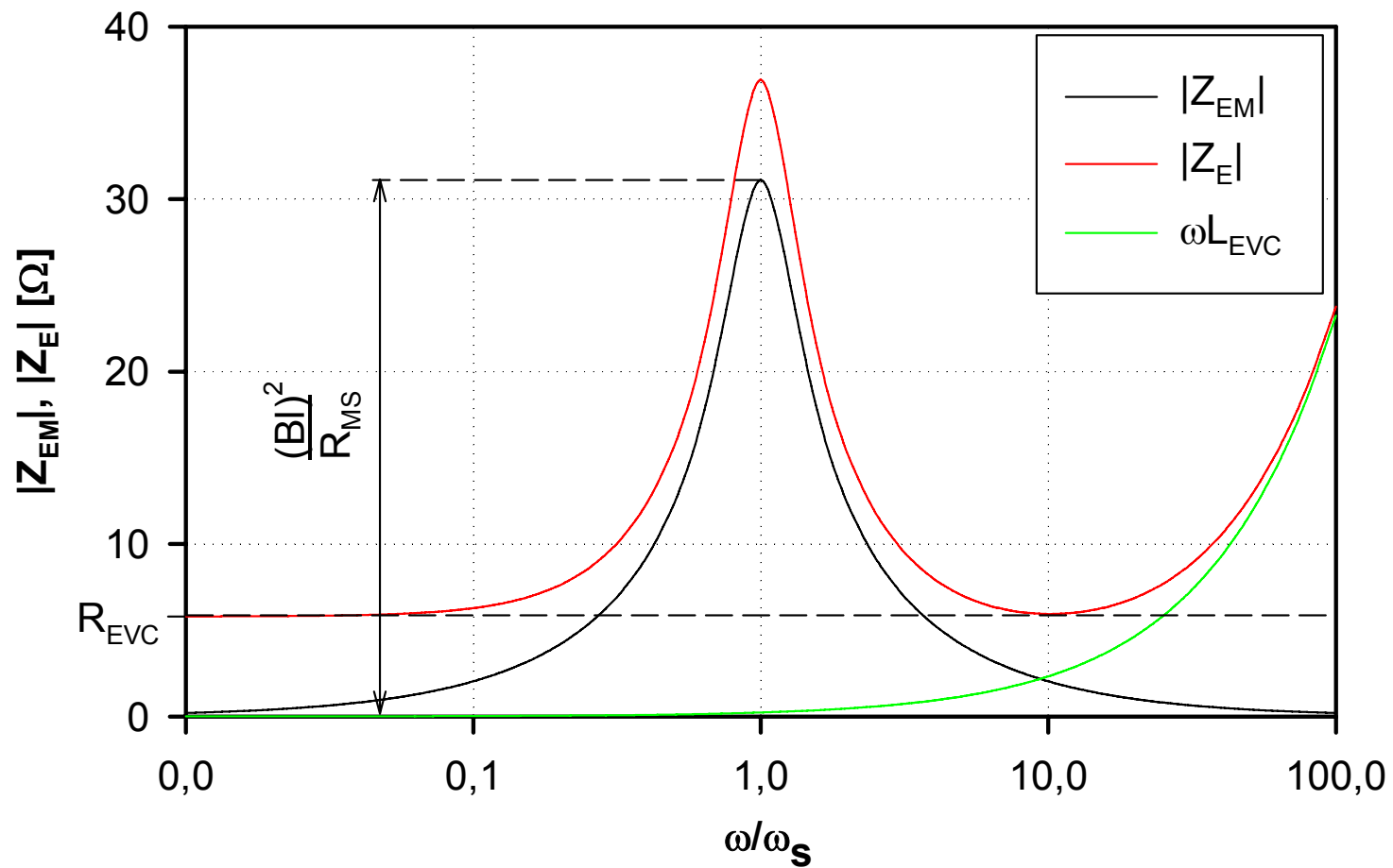
# Elektrická impedancia

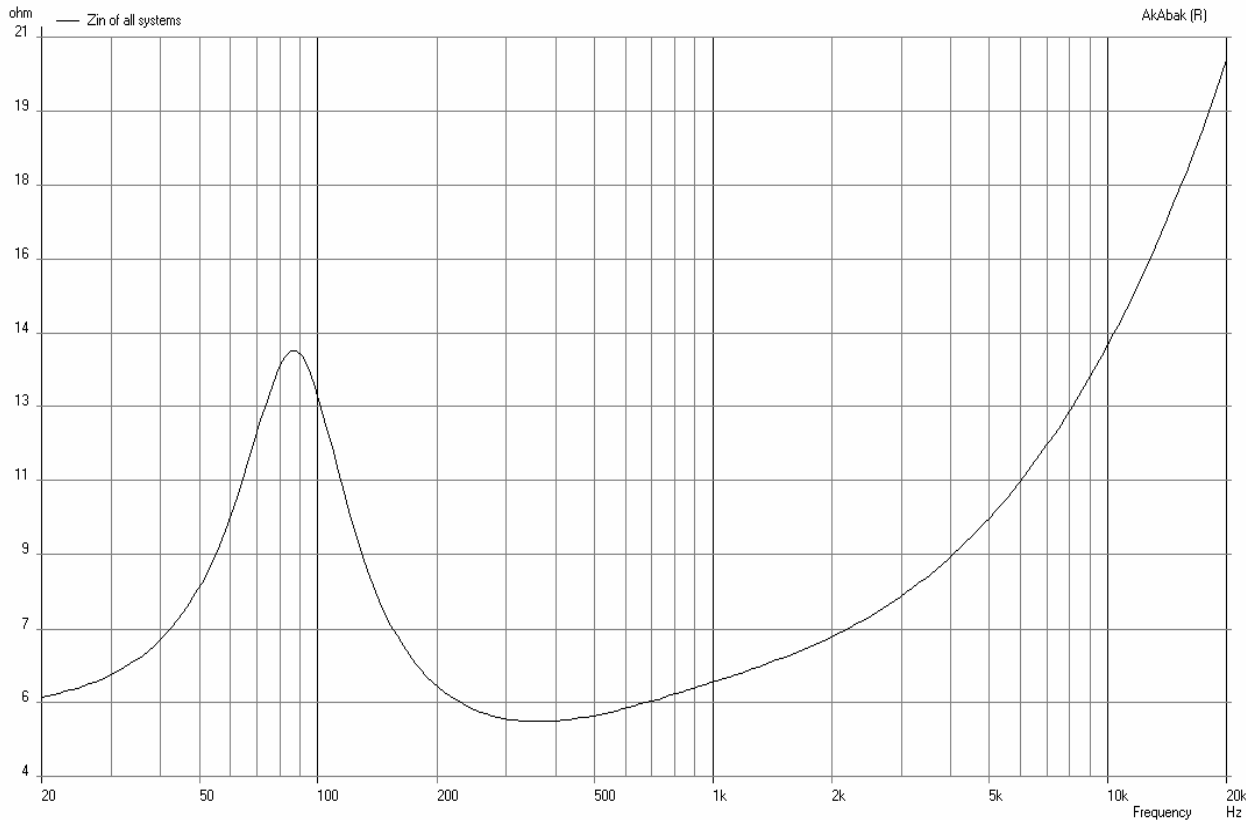
$$Z_E = R_{EVC} + sL_{EVC} + \frac{1}{\frac{1}{R_{ES}} + \frac{1}{sL_{ES}} + sC_{ES}} = R_{EVC} + sL_{EVC} + Z_{EM}$$

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

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

# Elektrická impedancia 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 ( $\omega L_{EVC}$ ) – začína sa výraznejšie prejavovať zhruba od 10-násobku rezonančnej frekvencie

## 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

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

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

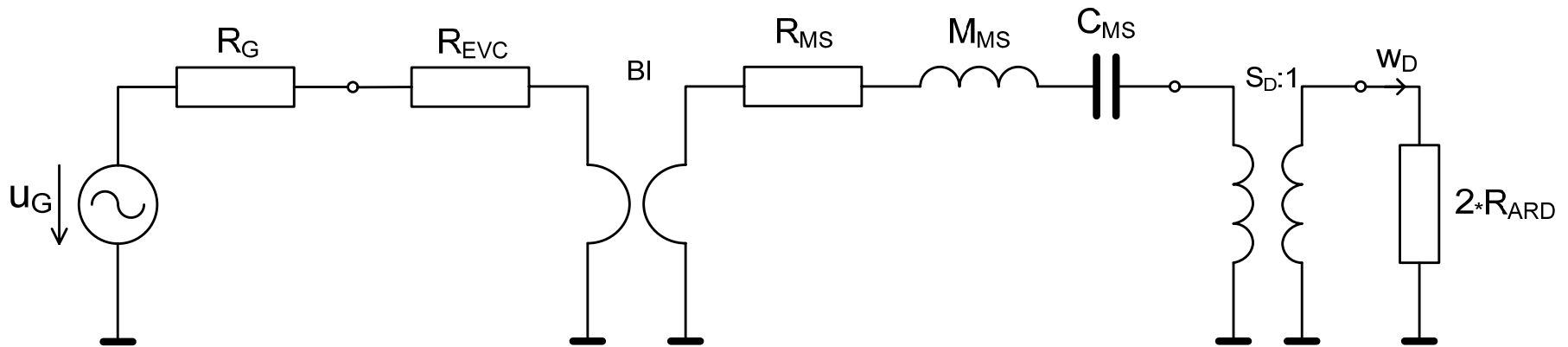
# Analýza prenosových vlastností sústavy (platí pre pásmo nízkych frekvencií)

- 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** reproduktor považujeme za zdroj guľovej zvukovej vlny a vplyv indukčnosti cievky je zanedbateľný
- v blízkom poli reproduktora platí:

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

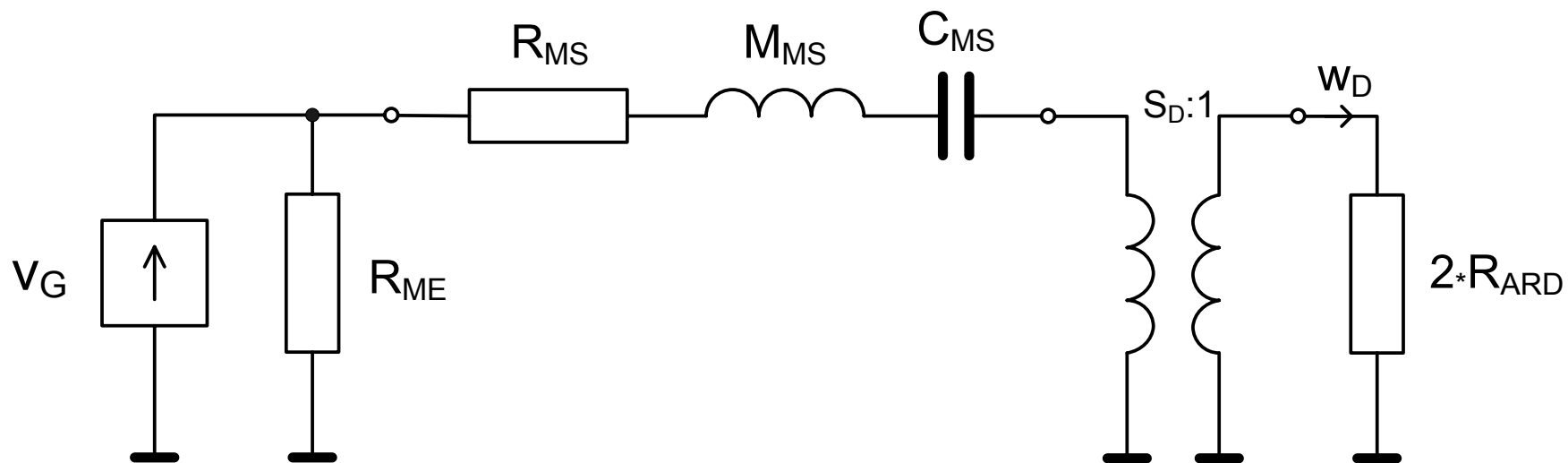
$r$  – vzdialenosť od ústia reproduktora

# Zjednodušenie schémy (vynechanie indukčnosti cievky)



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

# Mechanicko-akustická analogická schéma

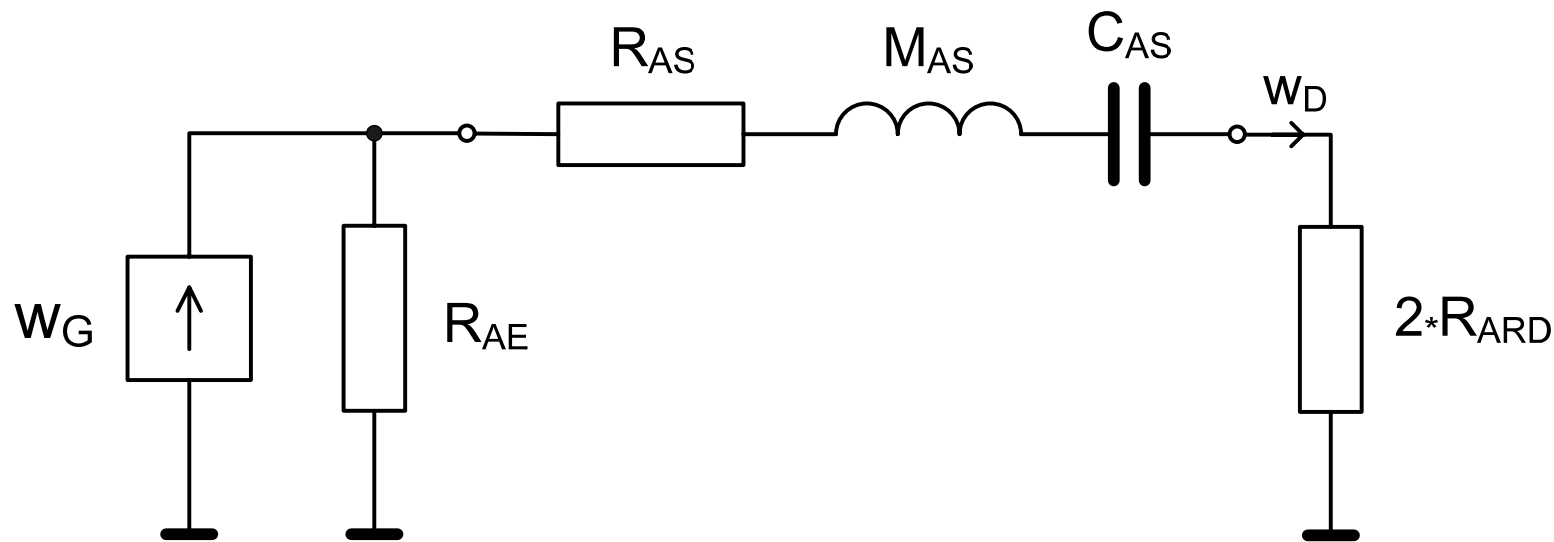


$$R_{ME} = \frac{(Bl)^2}{R_G + R_{EVC}}$$

$$v_G = \frac{u_G}{Bl}$$



# Akustická analogická schéma



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

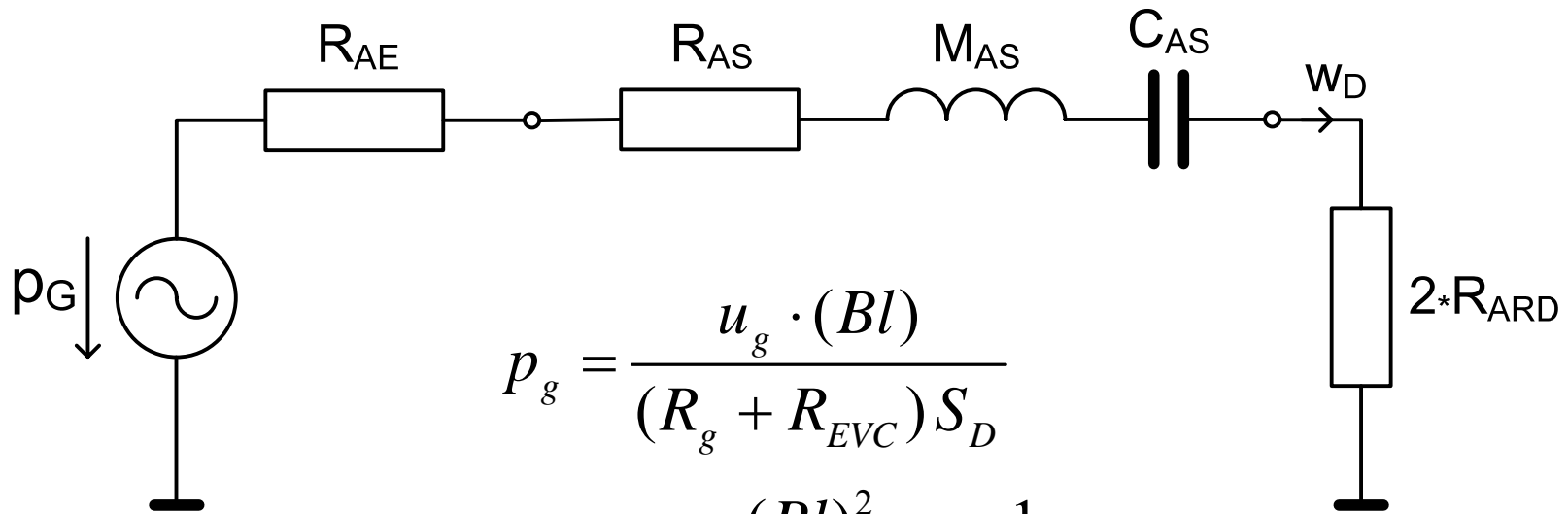
$$R_{AE} = \frac{(Bl)^2}{(R_g + R_{EVC}) S_D^2}$$

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

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

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

# Akustická náhradná schéma



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

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

- 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 "napäťový")

# Objemová rychlost' v akustickom poli

$$w_0(s) = w_D(s) = \frac{\frac{u_g(s) \cdot (Bl)}{(R_g + R_{EVC}) S_D}}{R_{AS} + R_{AE} + s M_{AS} + \frac{1}{s C_{AS}}} = w_{0,\max} \cdot W(s)$$

$$w_{0,\max} = \frac{U_g \cdot (Bl)}{(R_g + R_{EVC}) \cdot S_D} \cdot \frac{1}{R_{AT}}$$

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

$$R_{AT} = R_{AS} + R_{AE}$$

# Objemová rýchlosť v akustickom poli

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

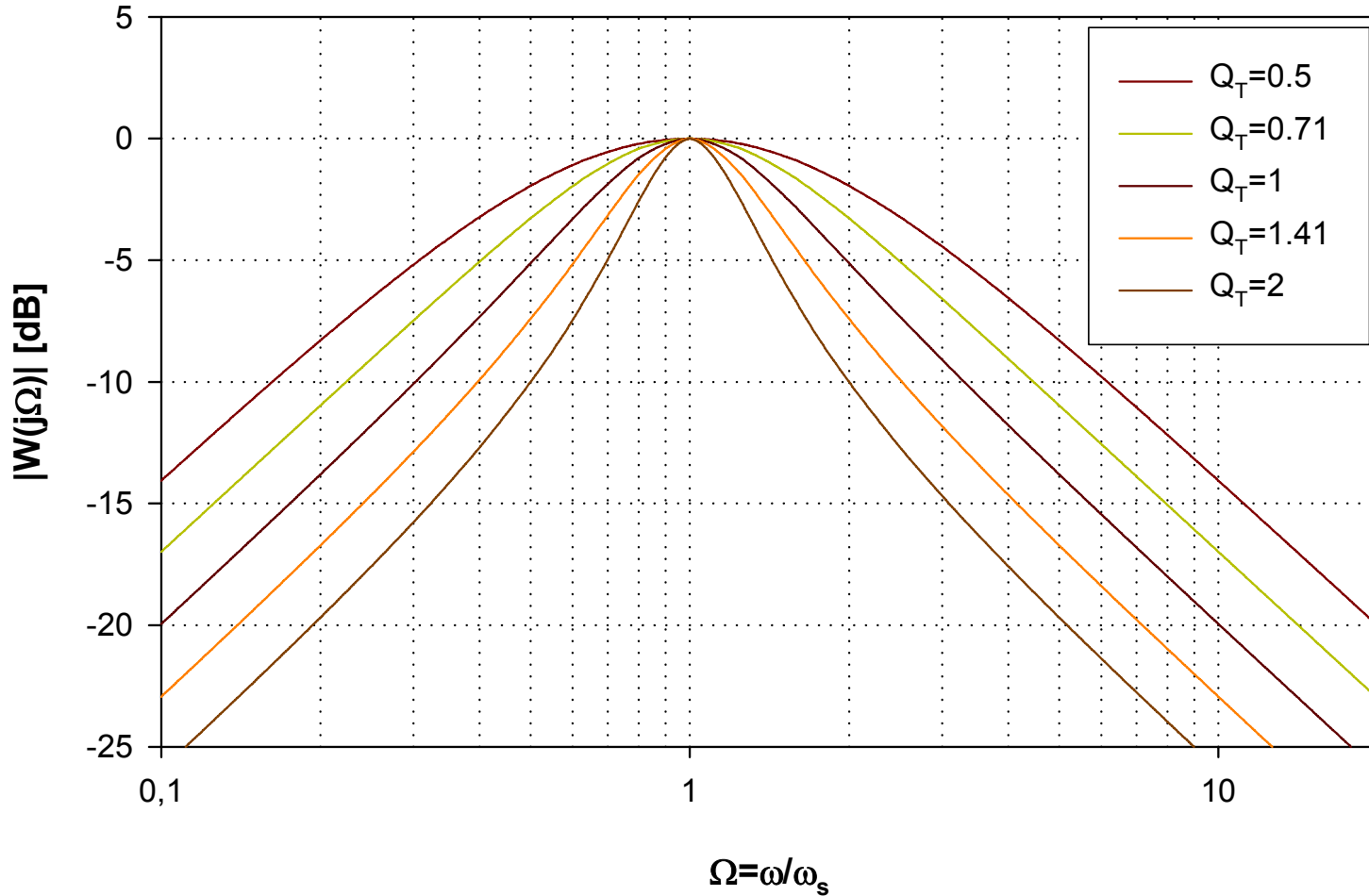
$$s_N = \frac{s}{\omega_S} \quad - \quad \text{normovaný operátor } s$$

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

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

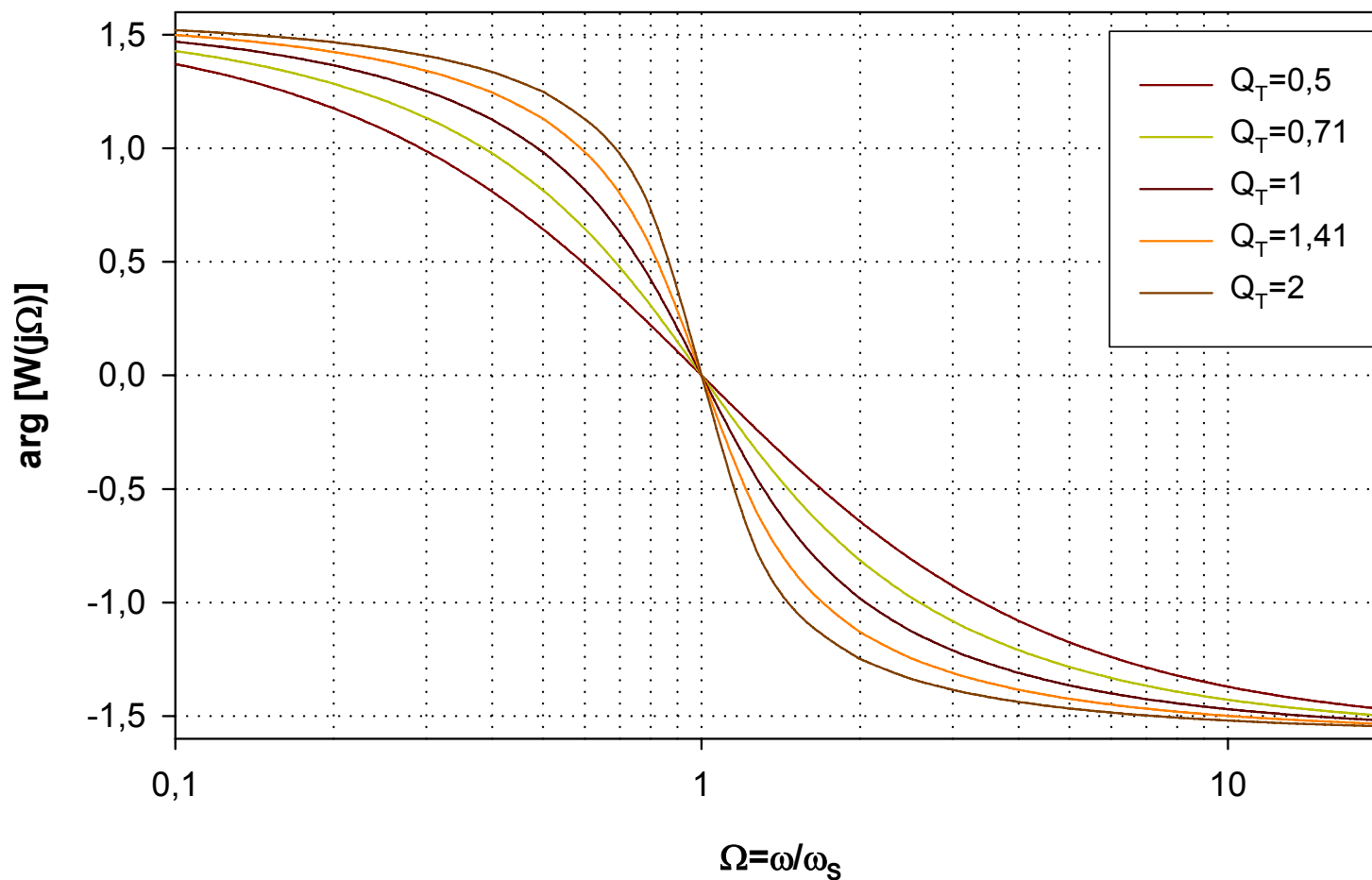
# Amplitúdová charakteristika objemovej rýchlosti reproduktora

$$|W(j\Omega)| = \frac{\Omega/Q_T}{\sqrt{(1-\Omega^2)^2 + \Omega^2/Q_T^2}} \quad - \quad \text{funkcia pásmového priepustu}$$



## Fázová charakteristika objemovej rýchlosti reproduktora

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



## 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

$$p_0(s) = \frac{\rho_0}{2\pi r} s w_0(s) = \frac{\rho_0}{2\pi r} \cdot w_{0,\max} \cdot s \cdot W(s) = p_{0,\max} \cdot G(s)$$

$$p_{\max} = \frac{\rho_0}{2\pi r} \cdot \frac{U_g \cdot (Bl) \cdot S_D}{(R_g + R_{EVC}) M_{MS}} \quad - \quad \text{amplitúda akustického tlaku}$$

$$G(s) = \frac{s^2 M_{AS} C_{AS}}{s^2 M_{AS} C_{AS} + s C_{AS} R_{AT} + 1} \quad - \quad \text{prenosová funkcia reproduktora}$$

# Prenosová funkcia reproduktora

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

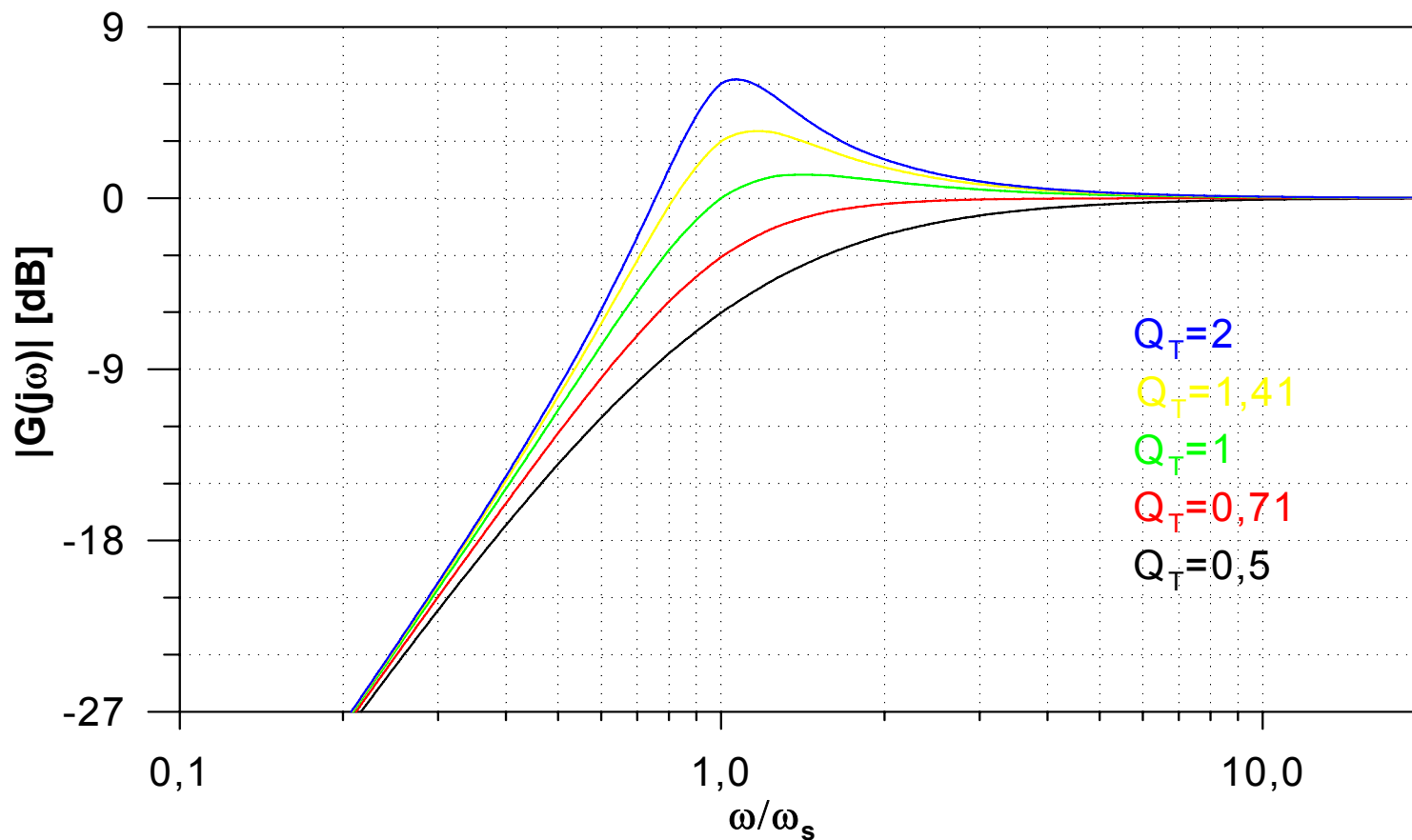
$$s_N = \frac{s}{\omega_S} \quad - \quad \text{normovaný operátor } s$$

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

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

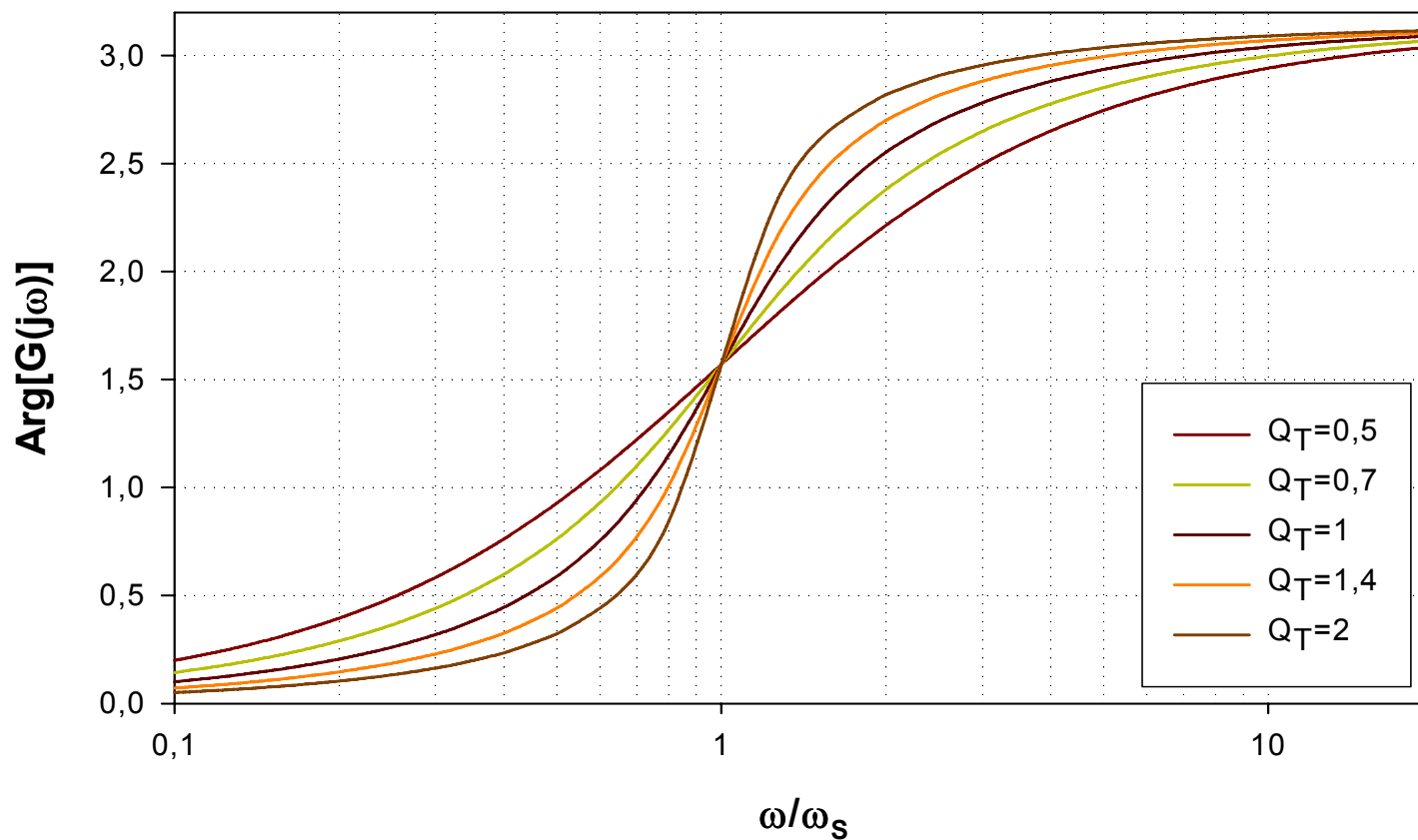
# Amplitúdová frekvenčná charakteristika reproduktora

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



## Fázová frekvenční charakteristika reproduktora

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



## Prenosová funkcia reproduktora ako hornopriepustný filter 2. rádu

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

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

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

$$b_2 = 1$$

$$a_2 = 1$$

$$a_1 = \frac{1}{Q_T}$$

$$a_0 = 1$$

# 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:

$$Q_{TS} = \frac{Q_{ES} \cdot Q_{MS}}{Q_{ES} + Q_{MS}}$$

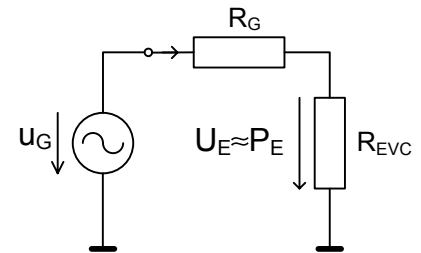
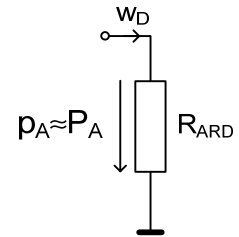
ekvivalentný objem:

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

# Menovitá účinnost reproduktora

Pomer činného akustického výkonu  
k menovitému elektrickému  
príkonu:

$$\eta = \frac{P_A}{P_{E,Nom}} = \frac{|w_0|^2 \cdot R_{ARD}}{\left[ \frac{E_G}{R_G + R_{EVC}} \right]^2 \cdot R_{EVC}}$$



Po dosadení a úprave:

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

# Akustický tlak v akustickom poli reproduktora

- amplitúdu akustického tlaku vyjadríme pomocou TS parametrov

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

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

$$p_{\max} = \frac{\rho_0}{2\pi r} \cdot \frac{U_g \cdot (Bl) \cdot S_D}{(R_g + R_{EVC}) M_{MS}} \quad - \quad \text{amplitúda akustického tlaku}$$



# 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 citlivost' v [dB]

- ...

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

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

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

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

# Výchylka reproduktora

Lineárna výchylka membrány reproduktora:

$$x_D(t) = \int_0^t v_D(\tau) \cdot d\tau = \frac{1}{S_D} \cdot \int_0^t w_0(\tau) \cdot d\tau \quad \Rightarrow \quad x_D(s) = \frac{1}{S_D} \cdot \frac{w_0(s)}{s}$$

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

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

# Výhylková citlivost'

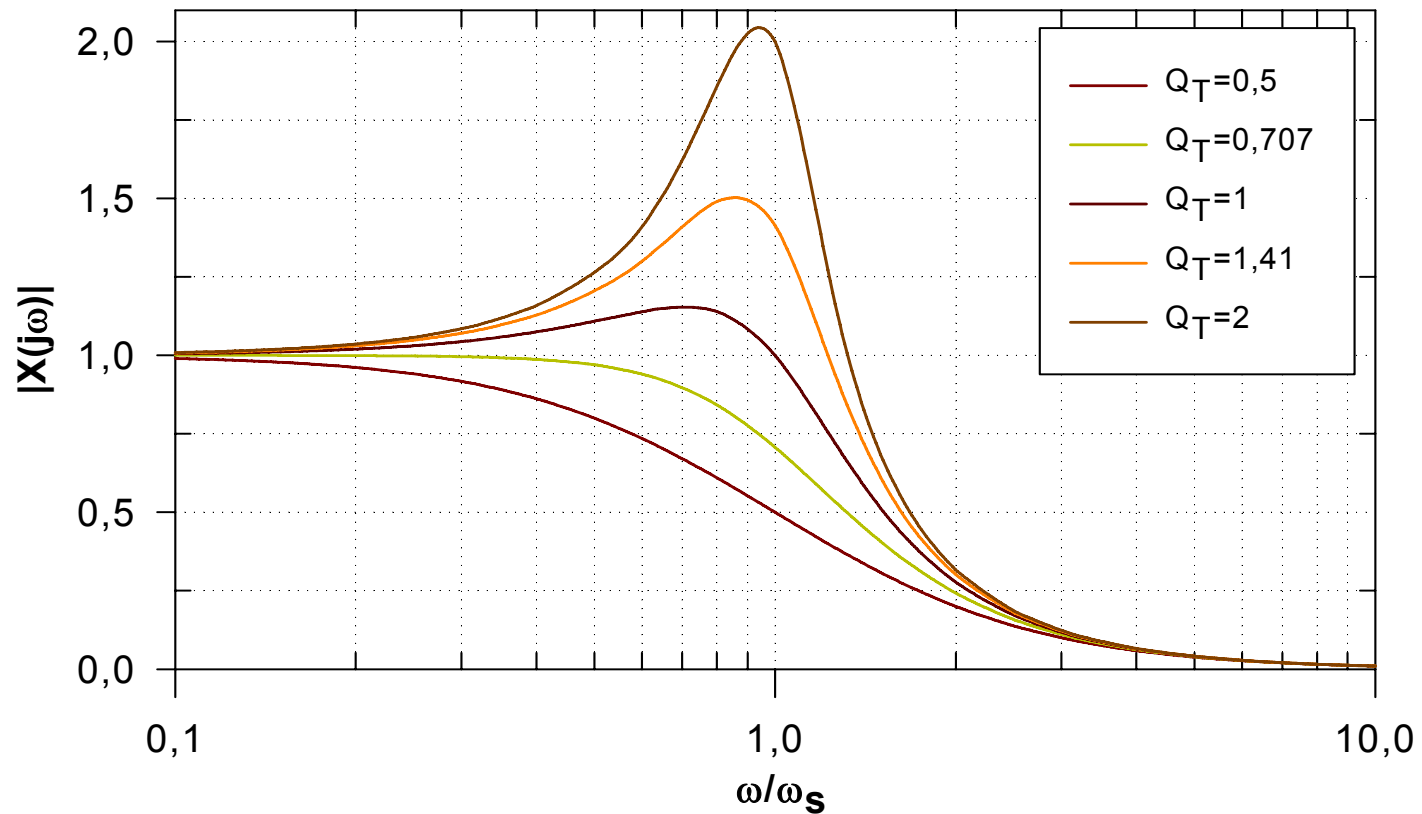
Amplitúda výhylky membrány reproduktora na 1W elektrického príkonu:

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

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

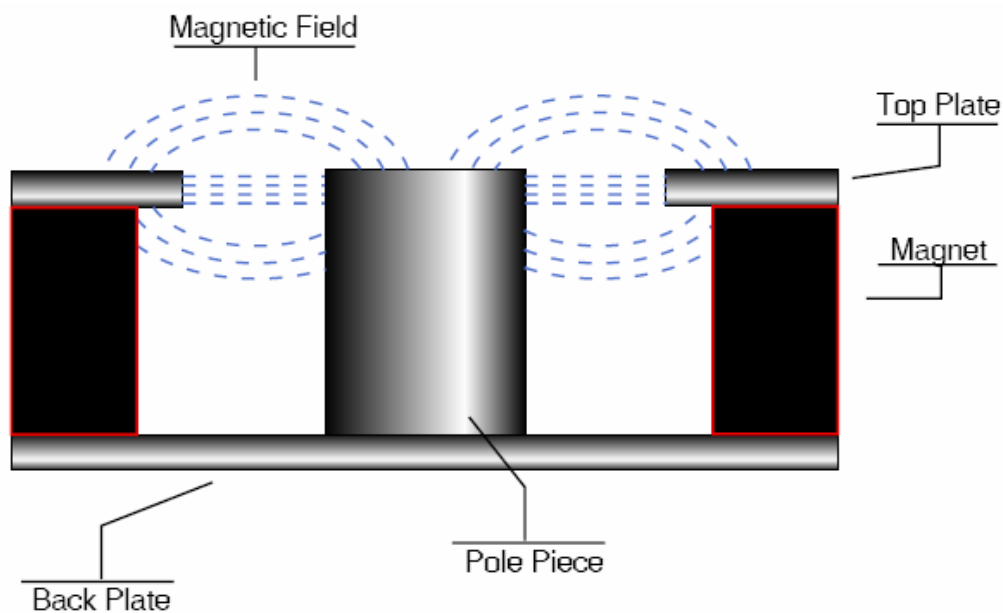
# Frekvenčná charakteristika amplitúdy výchylky

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

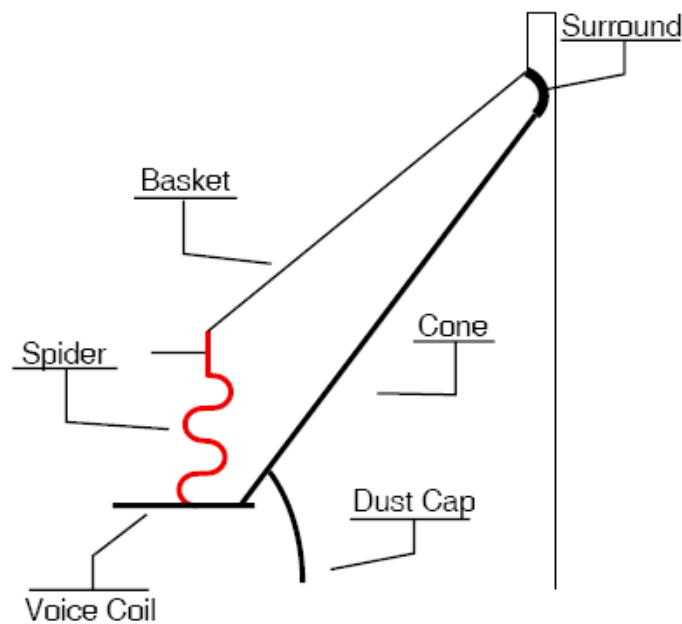


# Zdroje nelineárneho skreslenia

- rozptylové magnetické pole



- materiálové nelinearity „spidera“ a „surroundu“



# Maximálnou výchylkou limitovaný elektrický príkon

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

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

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

## Maximálnou výchylkou limitovaný akustický výkon

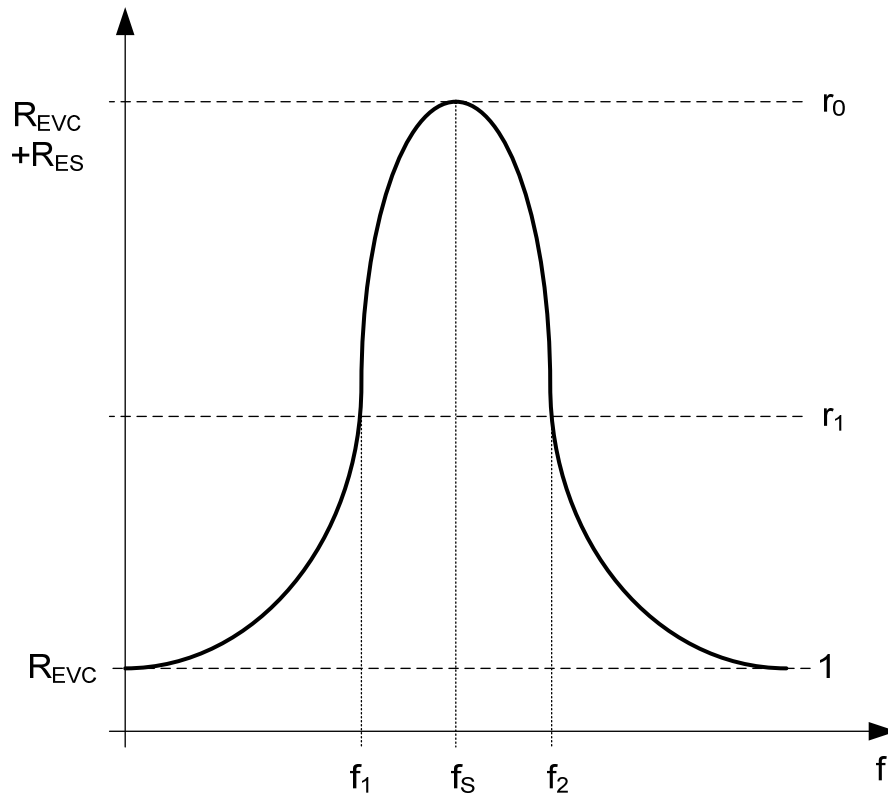
$$P_{AR,\max} = \frac{4 \cdot \pi^3 \cdot \rho_0}{c_0} \cdot \frac{f_S^4 \cdot V_{D,\max}^2}{|X(j\omega)|_{\max}^2}$$

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



# 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:  $r_1 = \sqrt{r_0}$

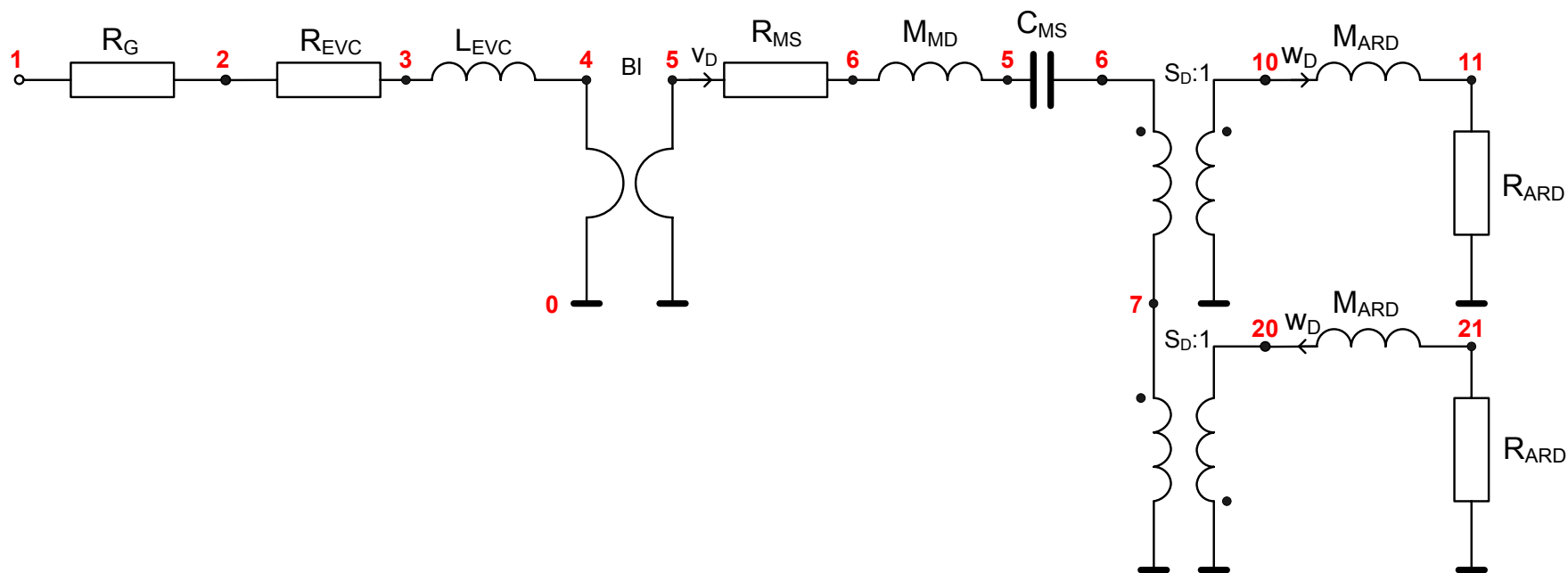
$$Q_{MS} = \frac{f_s}{f_2 - f_1} \sqrt{r_0}$$

## Meranie ekvivalentného objemu z impedančnej charakteristiky

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

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

# Analýza vlastností reproduktora v nekonečnej ozvučnici pomocou programu AkAbak



# Skript

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

## Def\_Const

{roh=1.18; c0=344; Sd=0.0136; Rd=sqrt(Sd/pi);  
Mard=(roh\*8\*Rd)/(3\*pi\*Sd);  
}

## 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 '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}

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

Impedance 'Rard1' Node=11

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

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

Ratio={1/Sd}

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

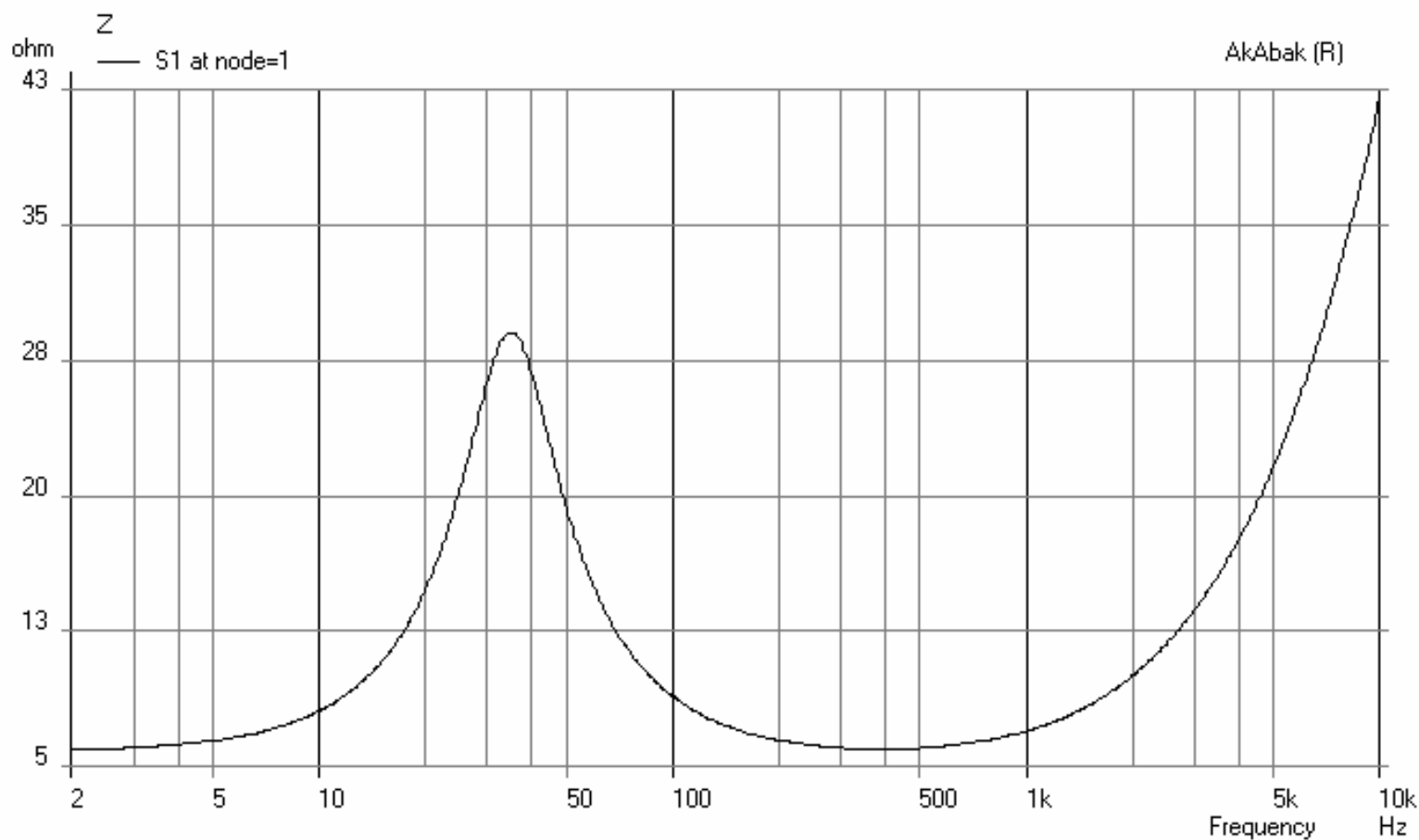
Impedance 'Rard2' Node=21

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

Potential 'P1' Node=10

# Vstupná impedancia obvodu

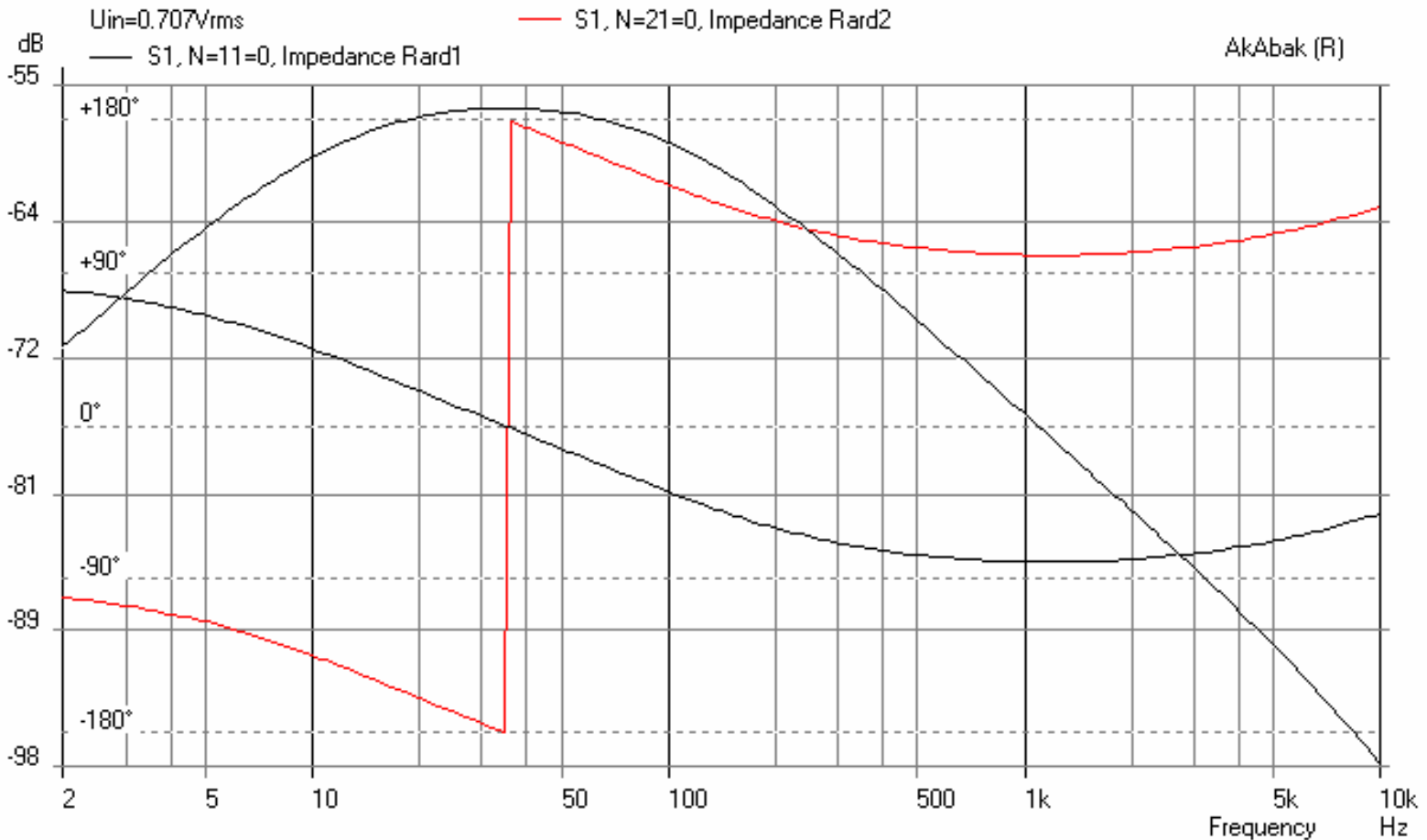
19. Impedance of L06-07, Amplitude (Phase)



# Amplitúda výstupnej objemovej rýchlosti ( $L_{EVC}=0$ )

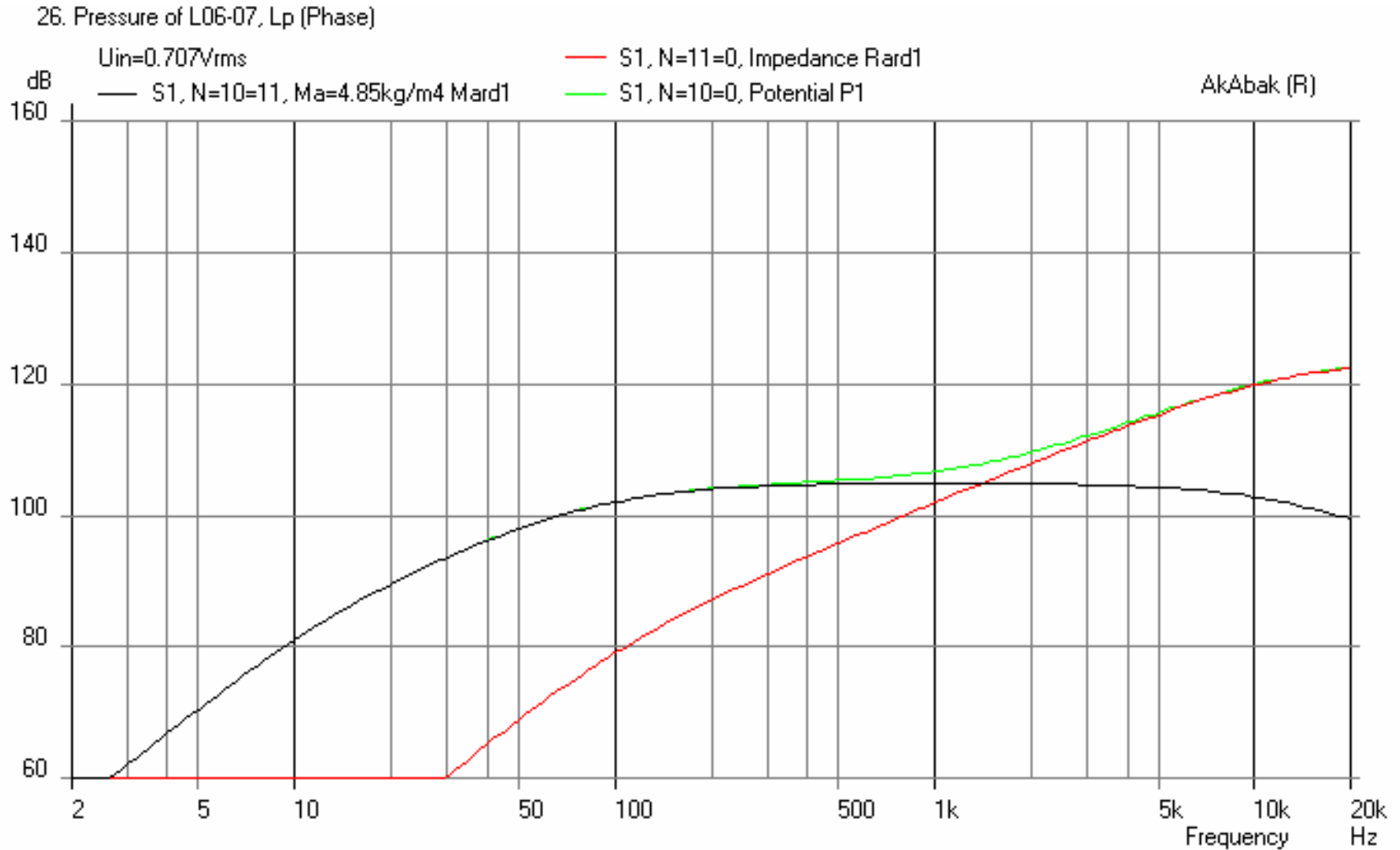
- fázy objemových rýchlostí prednej a zadnej strany membrány sú posunuté o 180 st. – vysielanie v protifáze

24. Vol-Velocity of L06-07, Level (Phase)



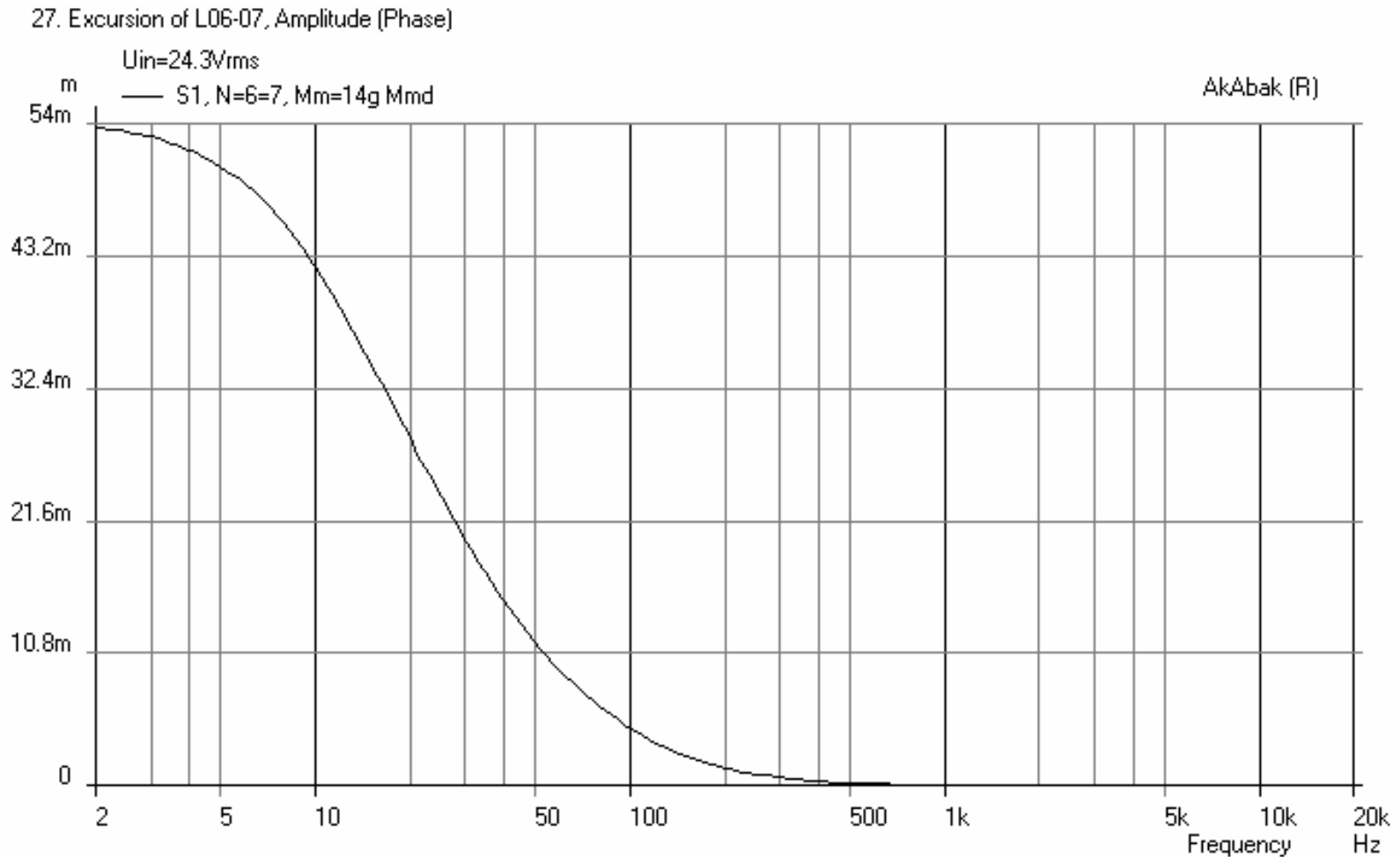
# Akustický tlak na vysielacej impedancii ( $L_{EVC}=0$ )

- neposkytuje vhodnú interpretáciu akustického tlaku, vyslaného do priestoru



# Výchylka membrány reproduktora ( $L_{EVC}=0$ , $P_E=80W$ )

- v pásme veľmi nízkych frekvencií výchylka niekoľkonásobne prevyšuje dovolenú výchylku !!!



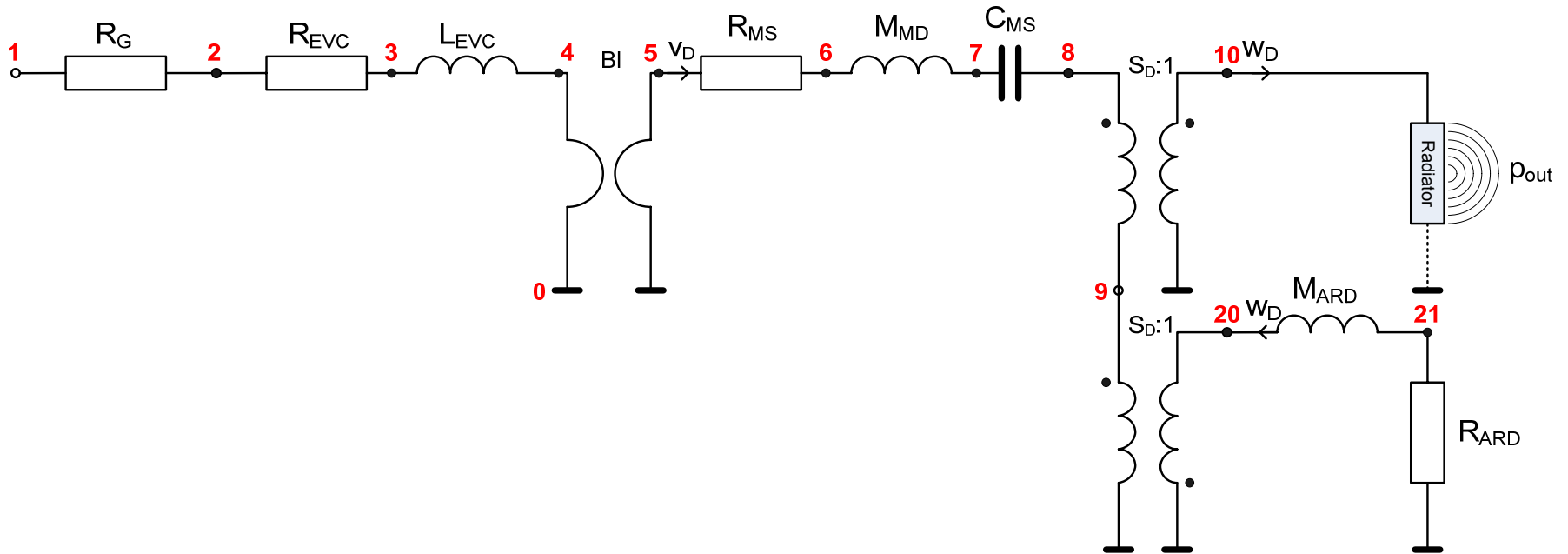


# Makromodel „Radiator“

- je implementáciou vysielacej impedancie reproduktora a vzt'ahu: ...
- umožňuje simulovať akustický tlak v priestore
- z pohľadu analogickej schémy ide o „dvoj pól“, ktorého jeden pól je automaticky uzemnený ...

# Náhradná schéma reproduktora s makromodelom „Radiator“

• ...



# Skript

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

Def\_Const

{roh=1.18; c0=344; Sd=0.0136; Rd=sqrt(Sd/pi);  
Mard=(roh\*8\*Rd)/(3\*pi\*Sd);  
}

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 '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*

*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

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

# Coupler – vázba na piest

### Coupler

**Element identification**

**Nodes**  

s	t	u	v
9	0	0	20

One of the secondary poles has to be grounded. Couplers can not be chained. Make sure that there is no secondary pole wired to any other pole of a Coupler. The primary poles can be connected in series or in parallel with other Couplers.

Ratio as value
  Ratio as runtime formula
  Ratio as diaphragm

**Diaphragm dimensions**  
 dD...   
 m...in

### Diaphragm

**Outer dimensions**

 Circular  
 Circular area  
 Rectangular

Circular Area  
SD

  
 m2...in2

**Inner dimensions**

 Piston  
 Cone  
 Convex Dome  
 Concave Dome

Diameter of inner diaphragm  
dD1

  
 m...in

Cone depth  
dD1

  
 m...in

Set dD1 < 0 to remove inner diaphragm.

Frequency of mass reduction  
fp

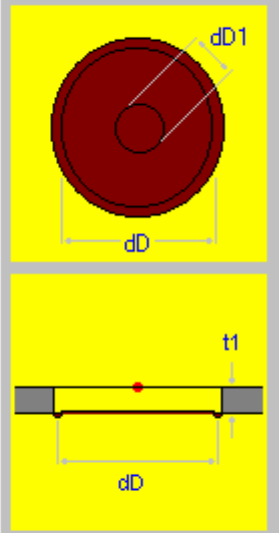
  
 ...Hz...

Displacement  
t1

  
 m...in

Scattering directivity  
Diffuse

  
 %



specify the Ratio as a  
 The abscissa-frequency  
 or  $w (= 2 \cdot \pi \cdot f)$   
 system can not be edited by this  
 want to start with a new  
 click this button and AkAbak  
 me for the formula.  
 $d=0=30$   
 $= 2 \cdot \pi \cdot 5000; wn = w/wo;$   
 $n/(1 + i \cdot wn); }$

# 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

dD...  
m...in

Piston

front	ICoupler
front	ICoupler

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:

<b>Diffraction</b> dEdge... m...in	<b>Displacement</b> t1 m...in
--	-------------------------------------

No Radiation "NoRad"  
 No Directivity "NoDir"

Label numbers  
[ ]

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

# Sum/Acoustic Pressure

Sum Inspect Calc Tools Window Help

Acoustic pressure...	F5
Acoustic power...	F7
Beamwidth...	
Directivity pattern, cartesic...	F6
Directivity pattern, polar...	Shift + F6
Sum voltage...	
Driving point impedance...	
Driving point power...	
Driving point current...	
Extreme values...	
Power density...	

## Acoustic Pressure

**Parameter**

**Bode type**  
 Lp (Phase) ▾

**Input voltage**  rms  
 2.43V ..V..

**Distance**  
 1m m...in

**Labels**

**Multi-**  
 labels  angles

**Graph** All

<input type="checkbox"/> 1.	<all>	▾
<input type="checkbox"/> 2.	<all>	▾
<input type="checkbox"/> 3.	<all>	▾

**Range abscissa**

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

**Points**  
 200  
 Pts/Oct=15.1

**Range ordinate**

**Lp**  
 40dB ... 100dB  Show phase  
 dB

**Listening angles**

Horiz.  Vert.

**Graph** 0°

<input checked="" type="checkbox"/> 1.	0	0
<input type="checkbox"/> 2.	30.0	30.0
<input type="checkbox"/> 3.	60.0	60.0

Deg

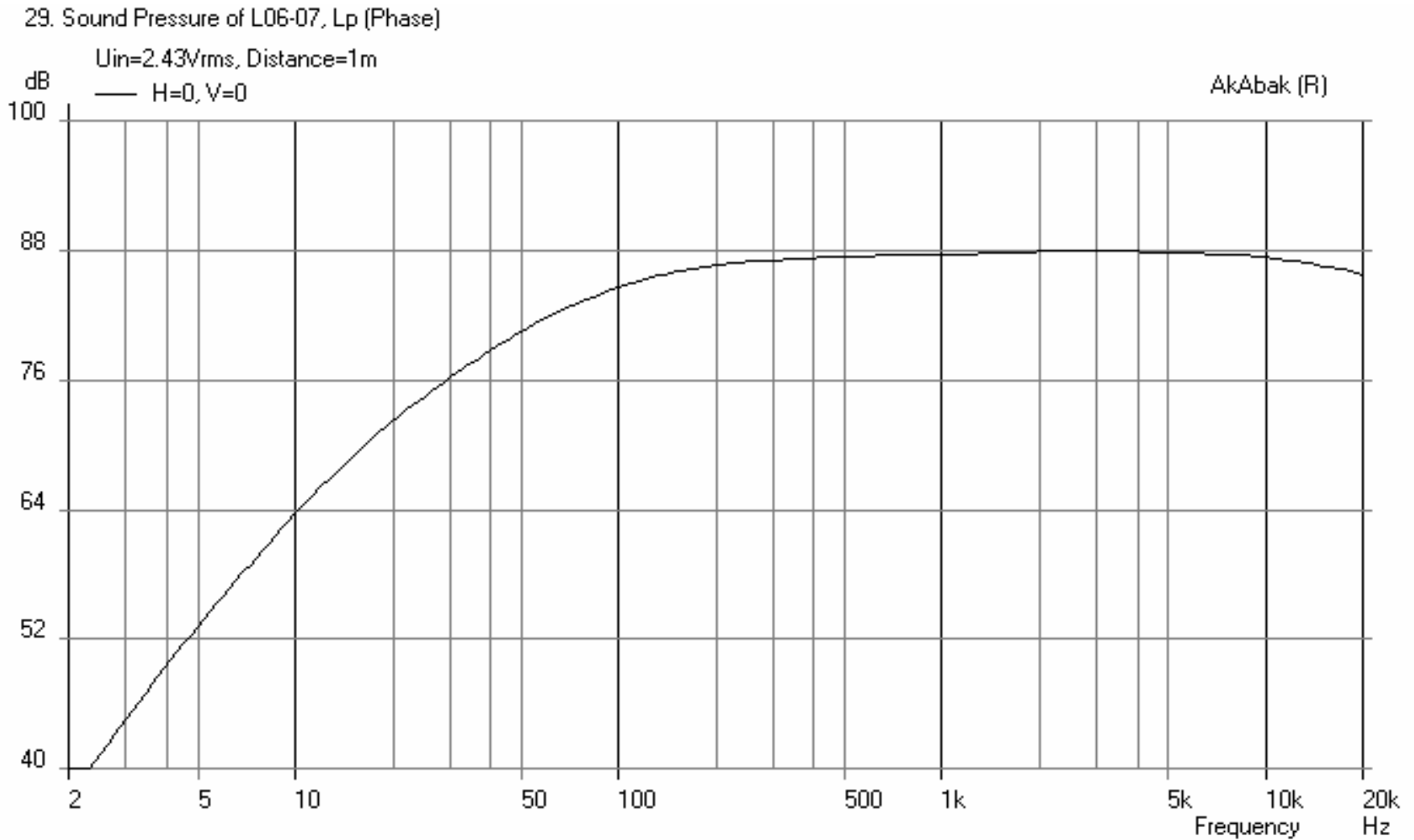
**Mean window**

**Angle range**  
 [ ] Deg

**Resolution**  
 2 %

Ok  
 Esc

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

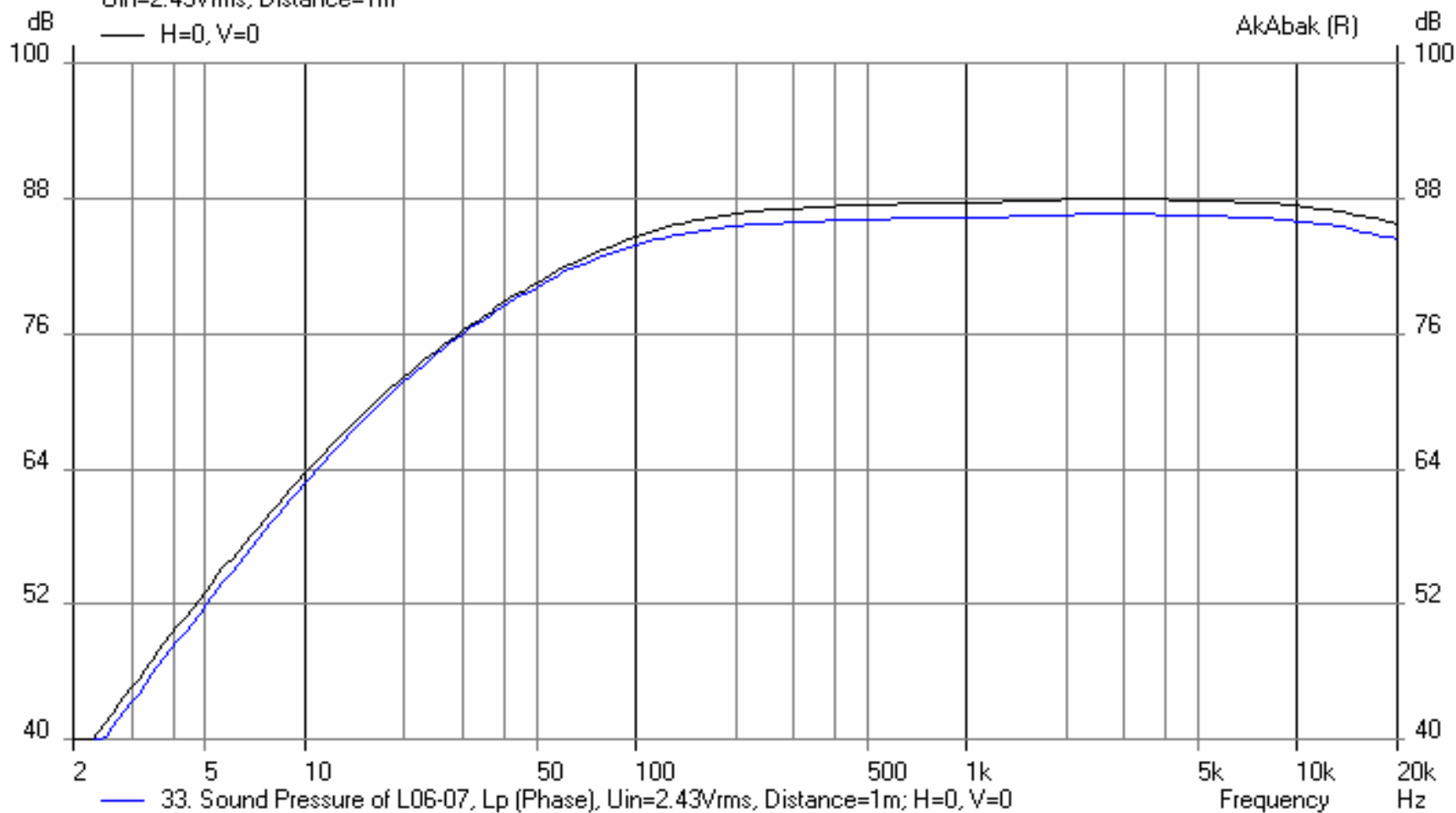


# Vplyv vnútorného odporu zdroja ( $R_G=1\Omega$ )

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

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

— H=0, V=0



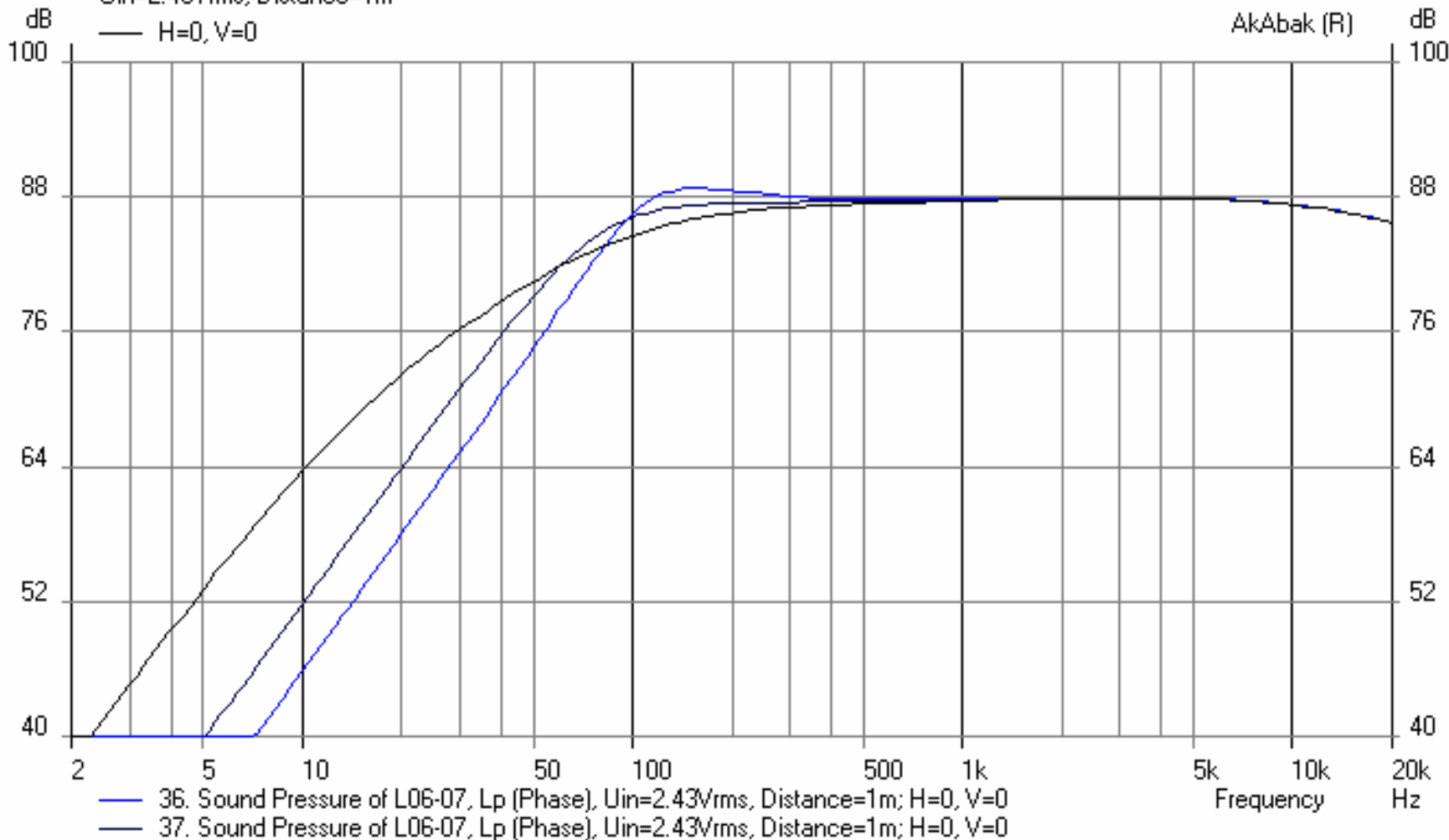


# Vplyv poddajnosti reproduktora ( $C_{MS2}=C_{MS}/5$ ; $C_{MS3}=C_{MS}/10$ )

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

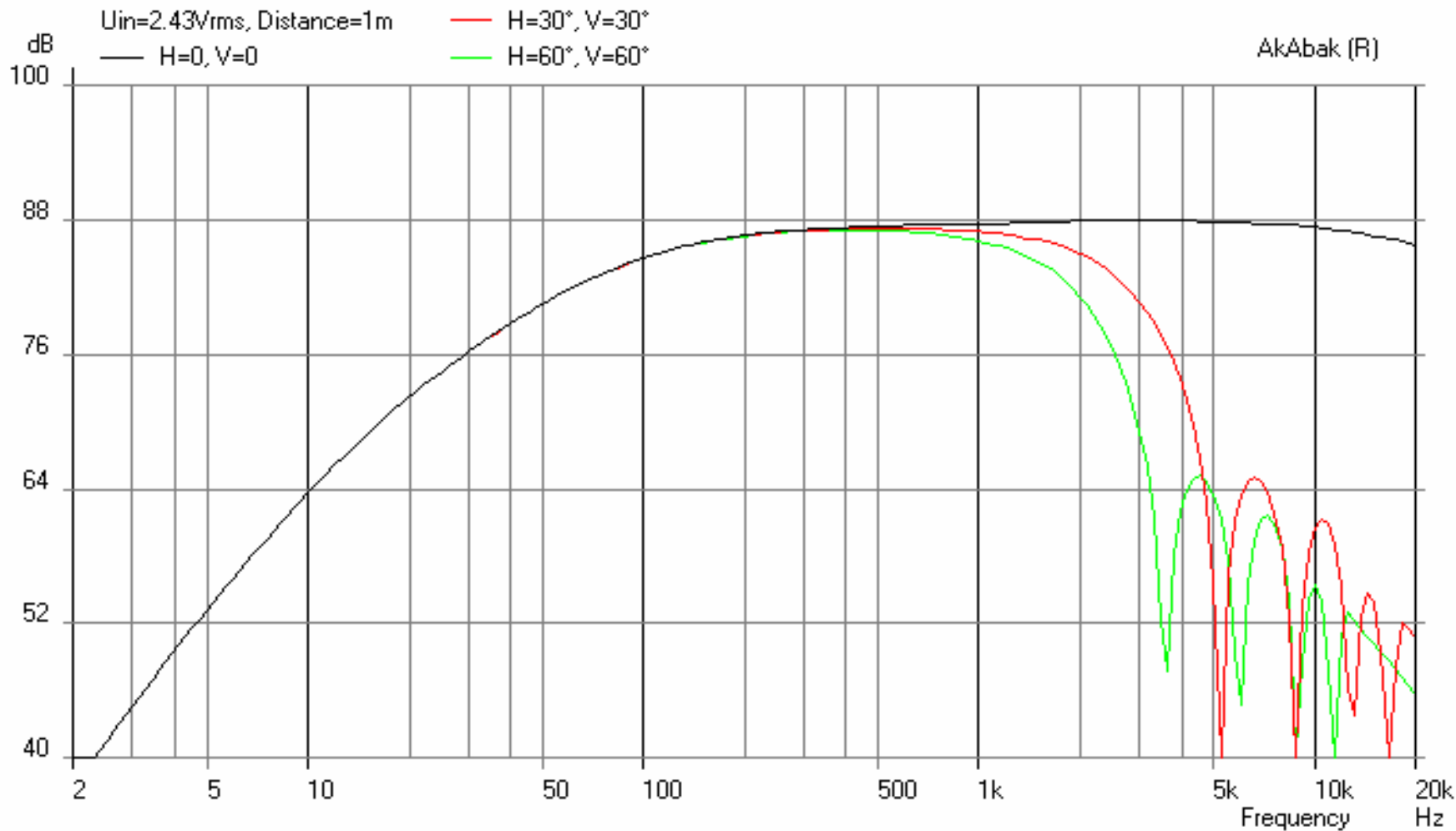
$U_{in}=2.43V_{rms}$ , Distance=1m

— H=0, V=0

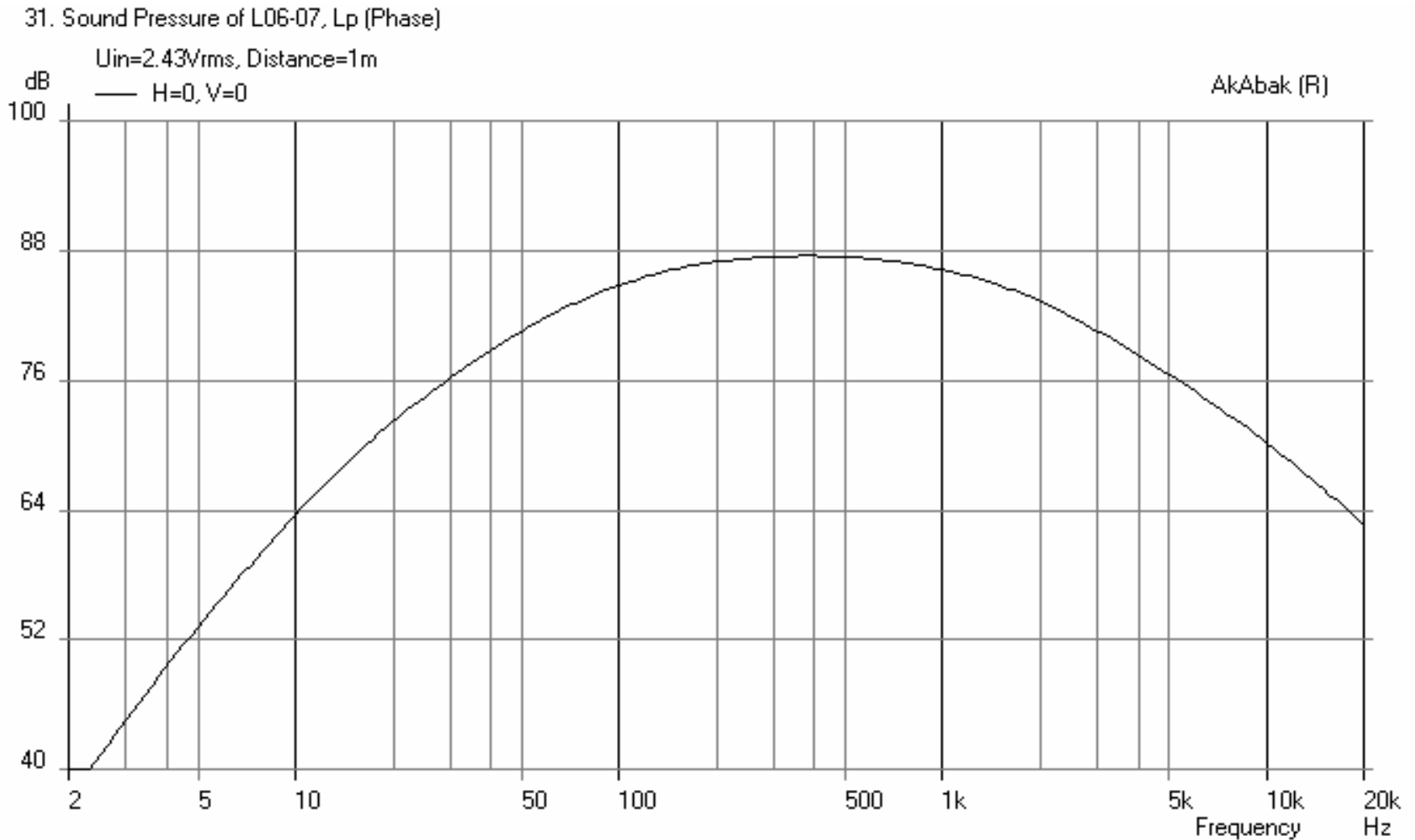


# Vplyv smerovosti piesta

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



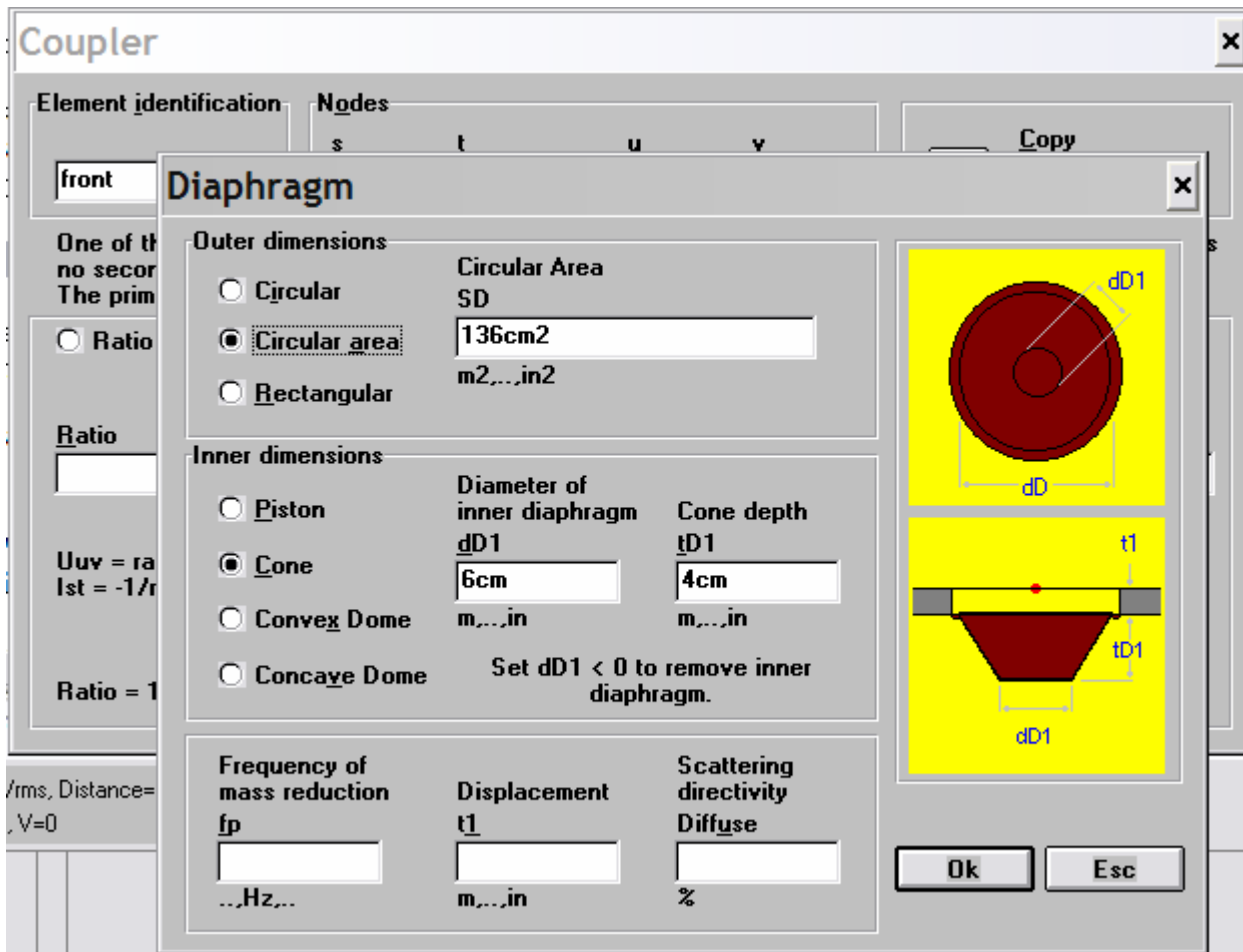
# Akustický tlak v akustickom poli – simulácia makromodelom „Radiator“ (Sum/Acoustic pressure; v osi reproduktora, $L_{EVC}=0.67\text{mH}$ , $P_E=1\text{W}$ )



# 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
```

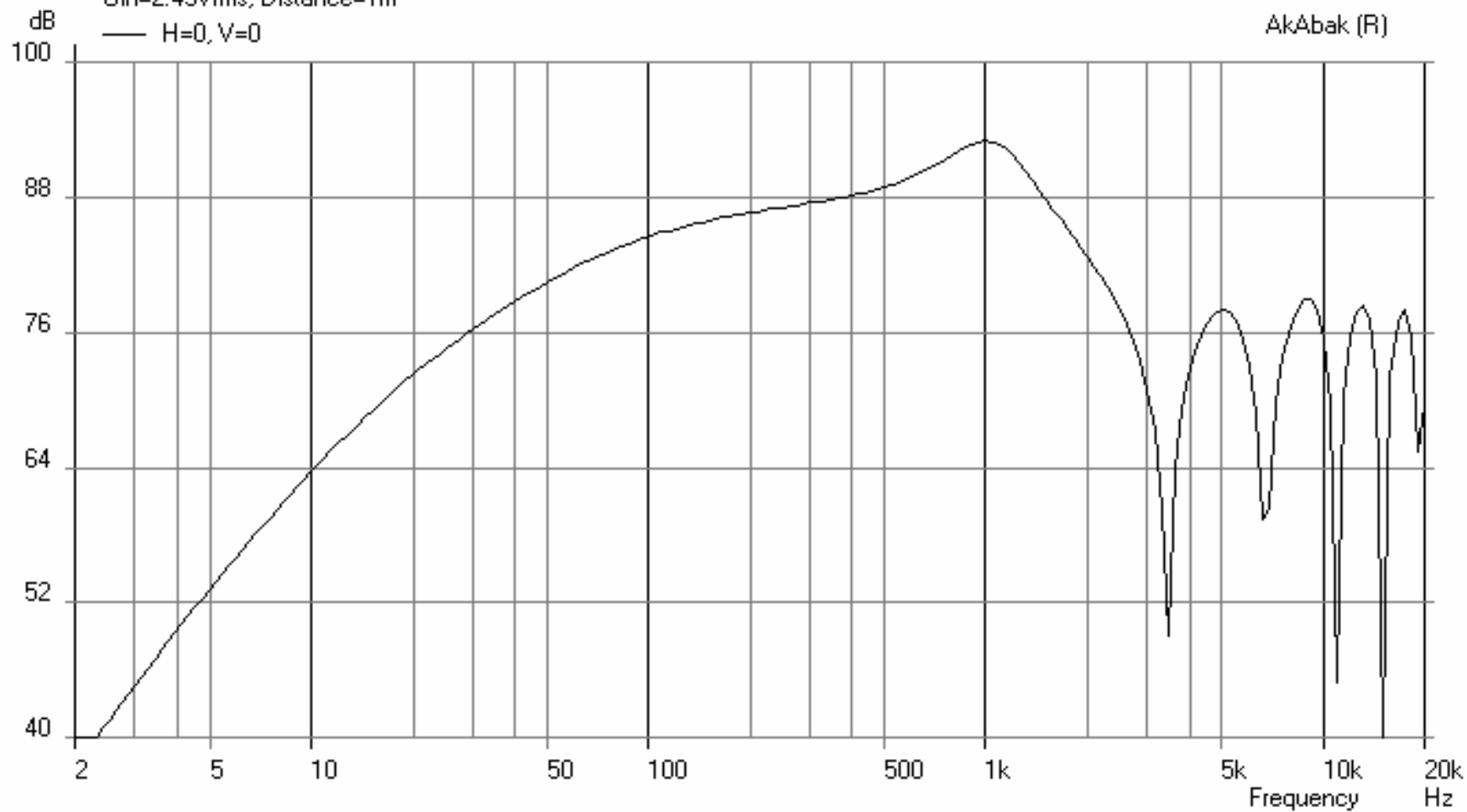


$$f_P \doteq \frac{200}{dD}$$

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

Uin=2.43Vrms, Distance=1m

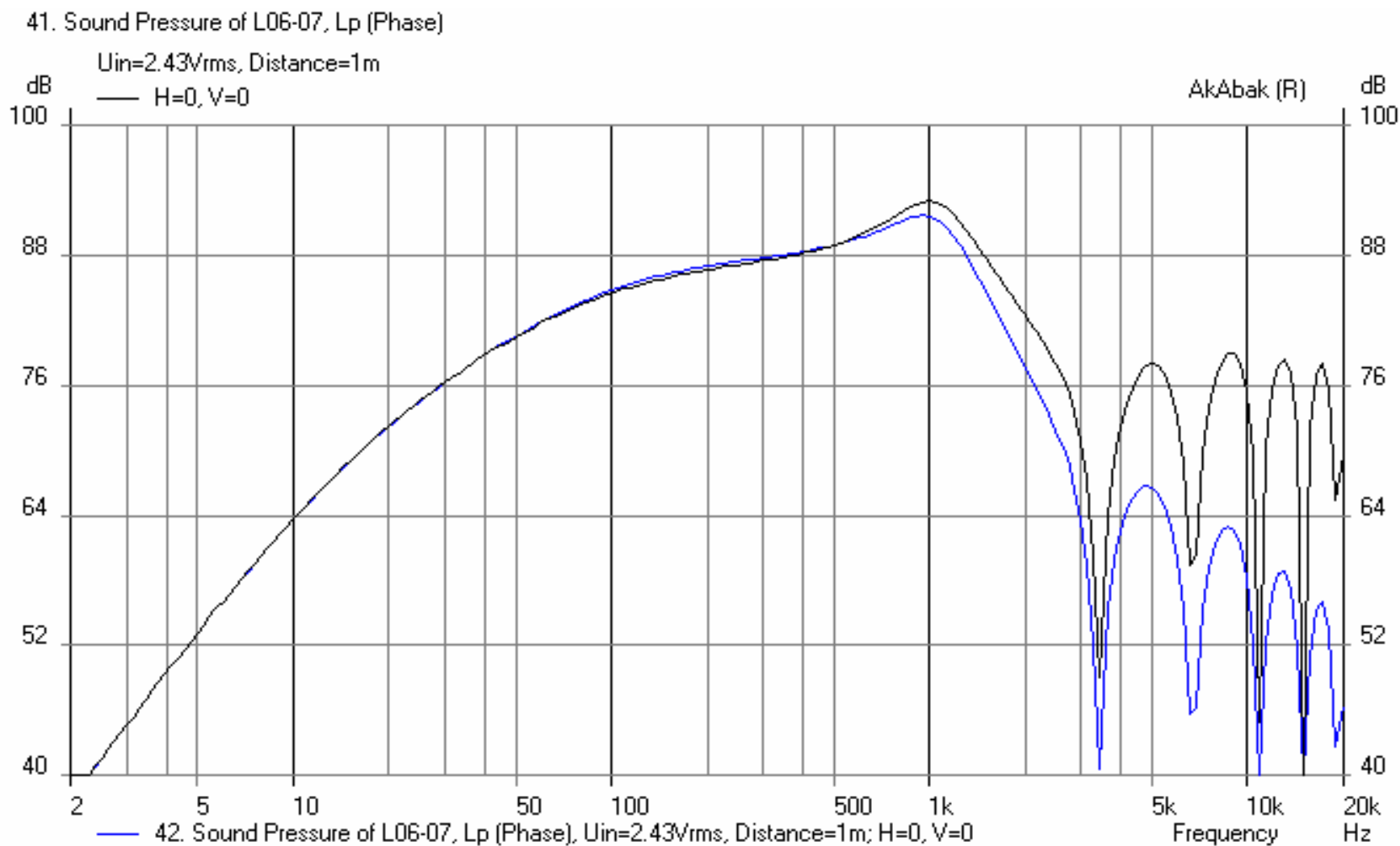
— H=0, V=0



# Vlastné kmity membrány

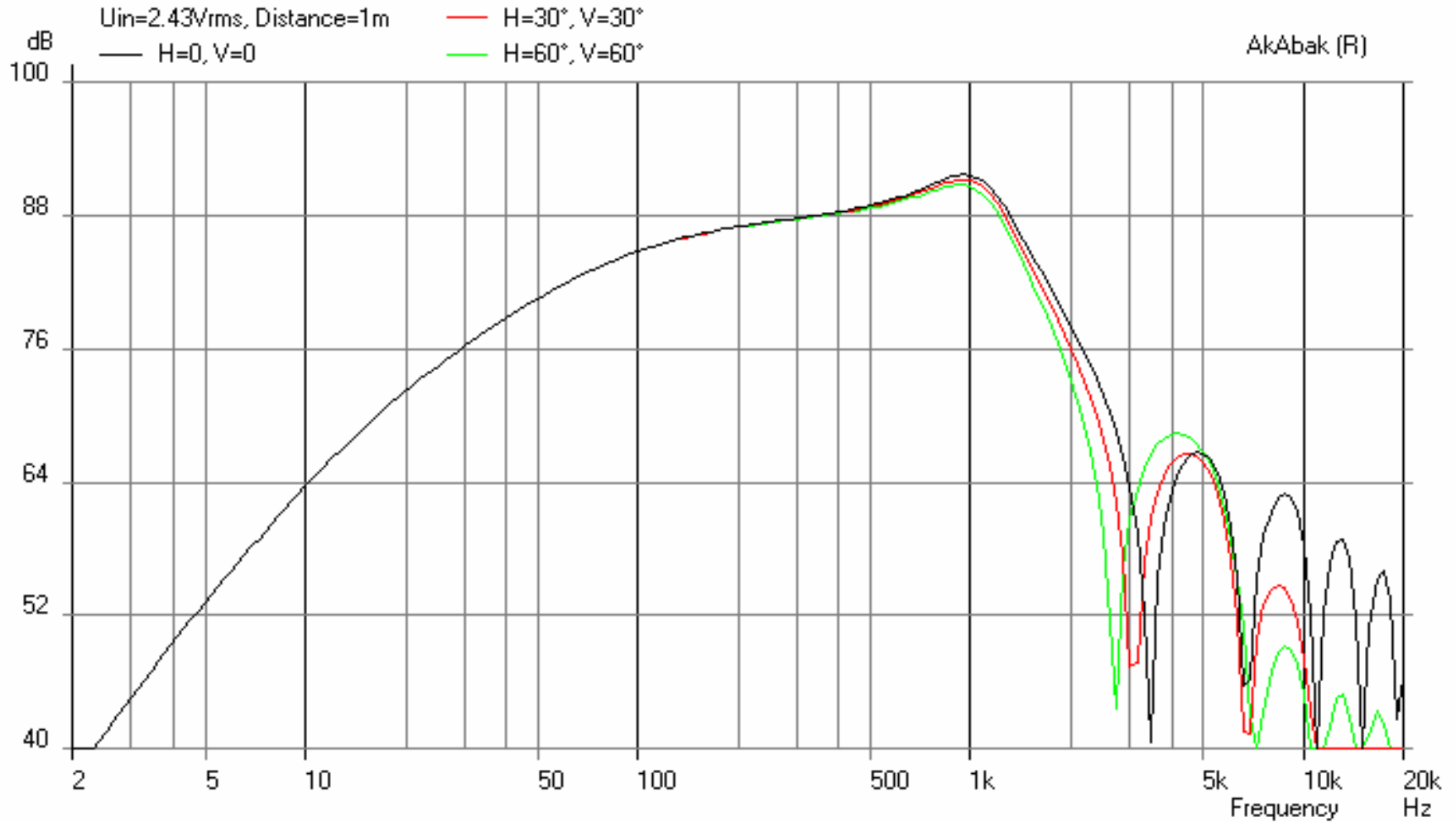
- redukcia hmotnosti membrány spôsobuje nárast hladiny akustického tlaku
- $f_P$  – frekvencia, pri ktorej k tomu dochádza

# Vplyv cievky (modrá)



# Vplyv smerovosti

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





# Vplyv smerovosti – smerová charakteristika

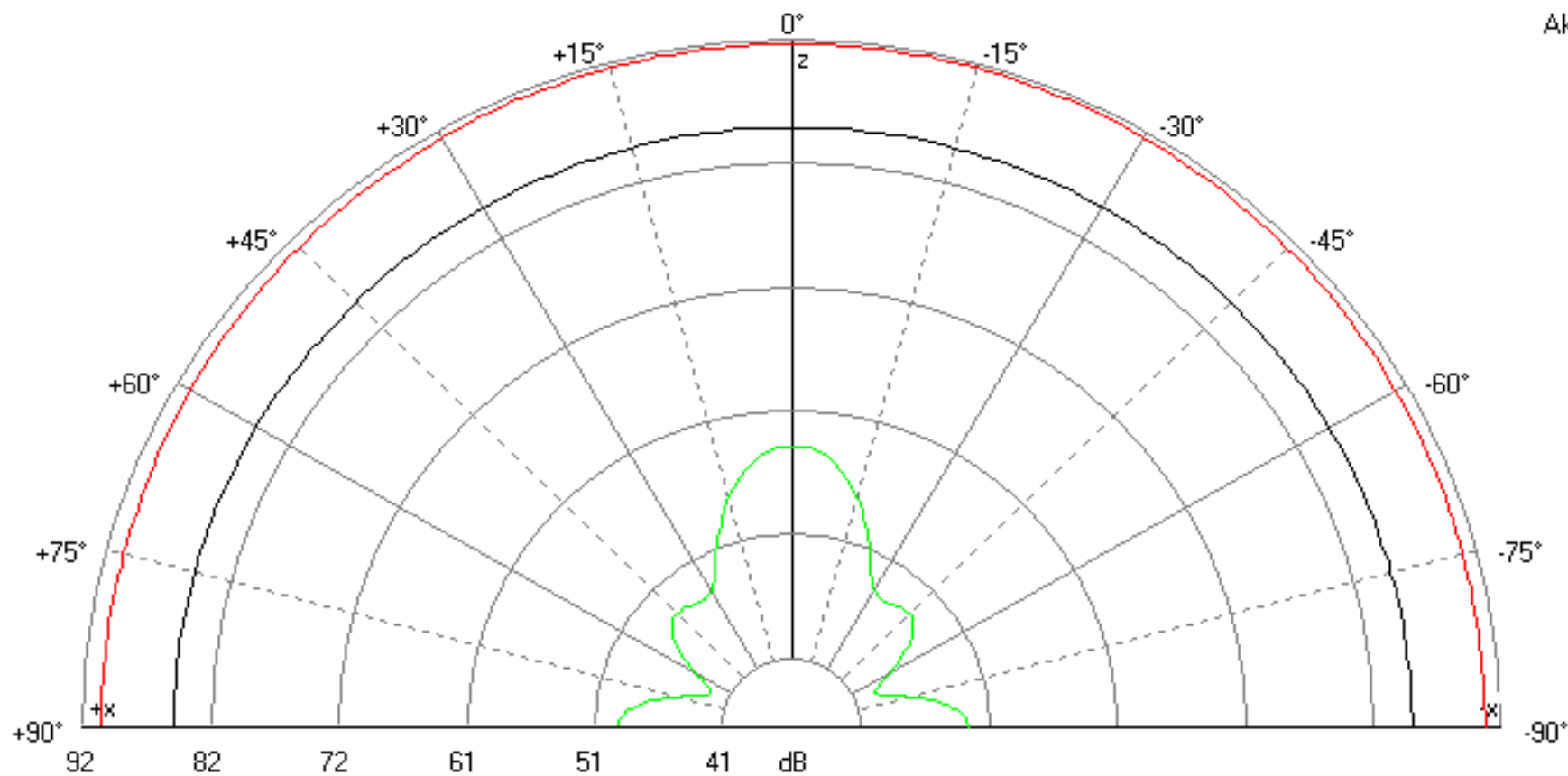
44. Polar of L06-07, Lp

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

— Horiz.  $f=100Hz$

— Horiz.  $f=1kHz$

— Horiz.  $f=10kHz$



# 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	<input type="checkbox"/> Vented	..Hz..

Closed Box System

fc	Qtc	Directivity frequ. 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..

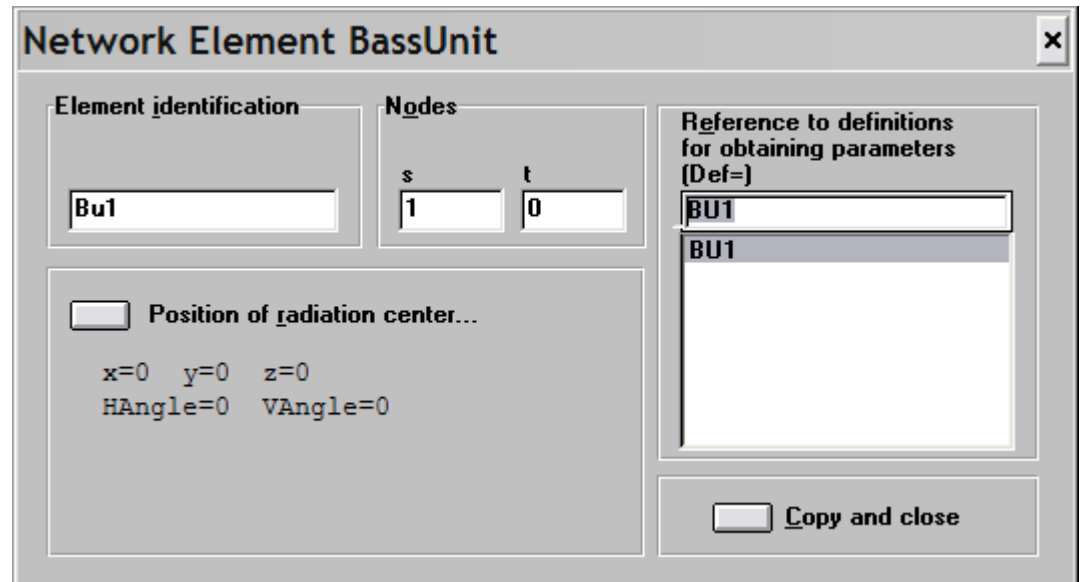
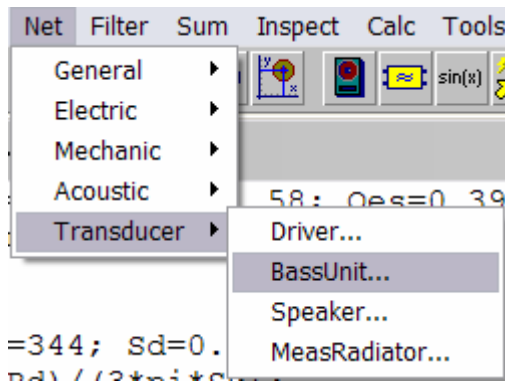
Identification

BU1

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

- 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...

# BassUnit - Dialog



# Skript

Def\_BassUnit 'BU1'

SD=136cm<sup>2</sup> |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=10m<sup>3</sup>

|Performance in sealed enclosure:

| fc Qtc fD f3

| 37.1Hz 0.313 830.4Hz 106.8Hz

| Lwmax Pelmax UoRms t60 Ripple

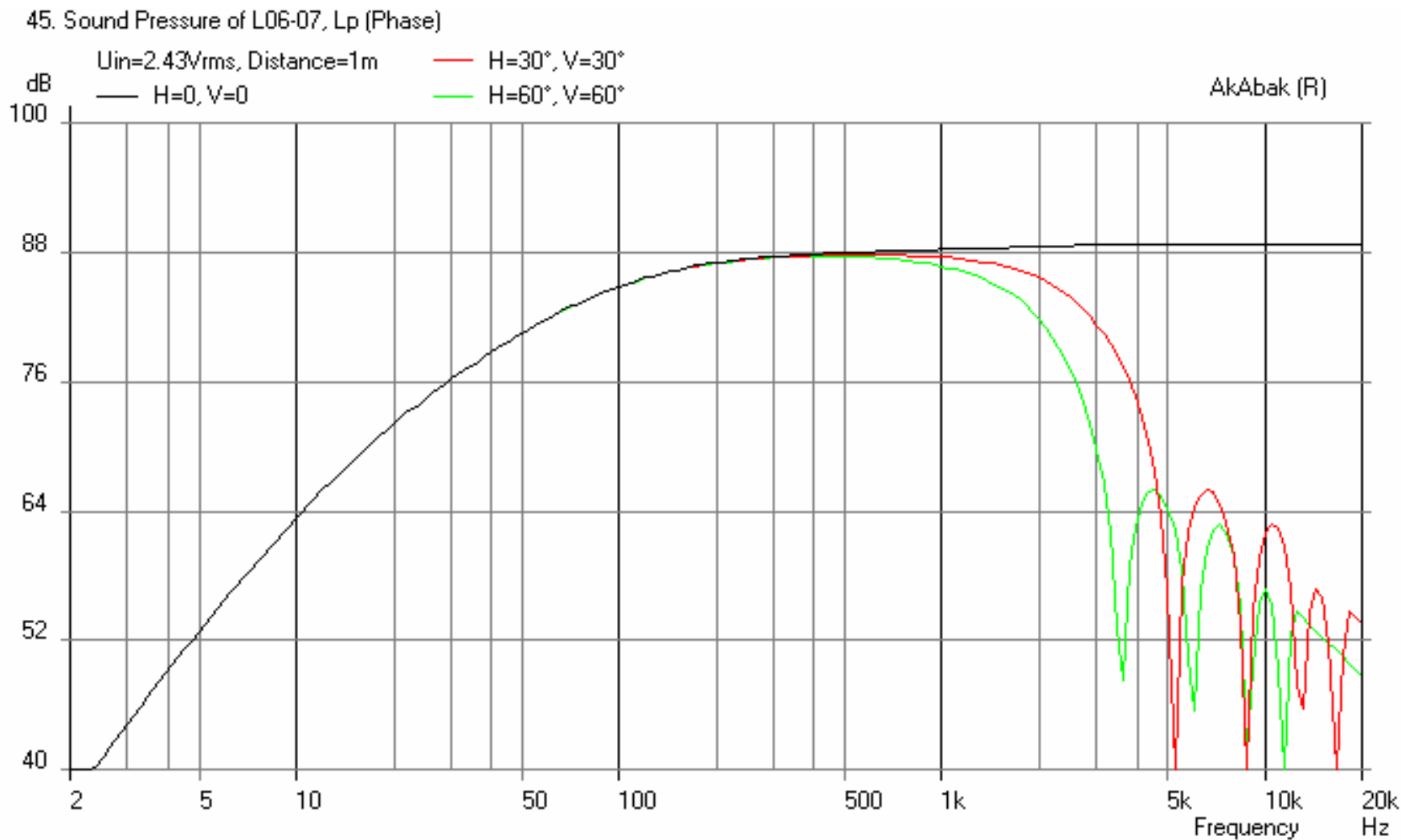
| 86.4dB 1.3W 2.8V 0 0

System 'S0'

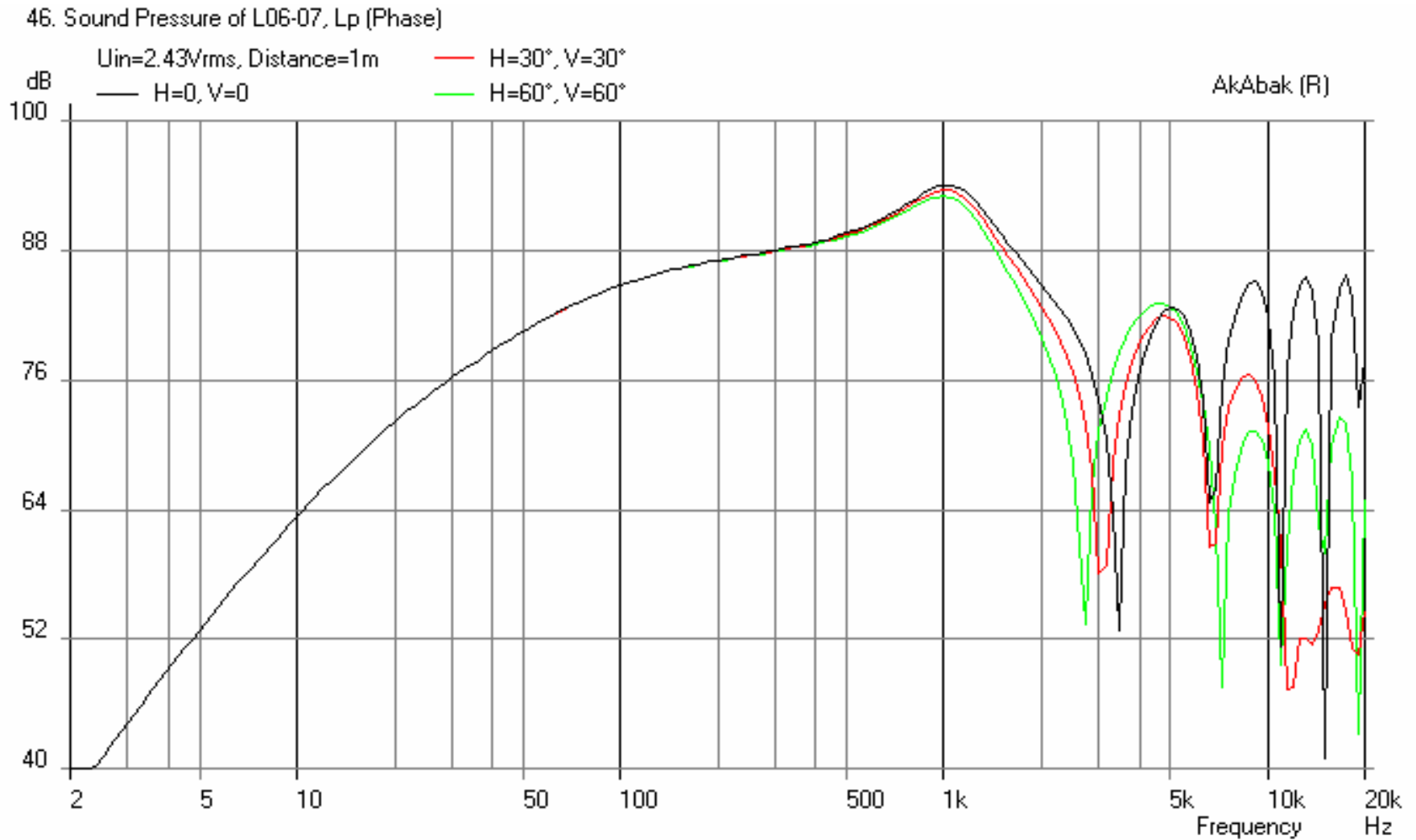
BassUnit 'Bu1' Def='BU1' Node=1=0

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

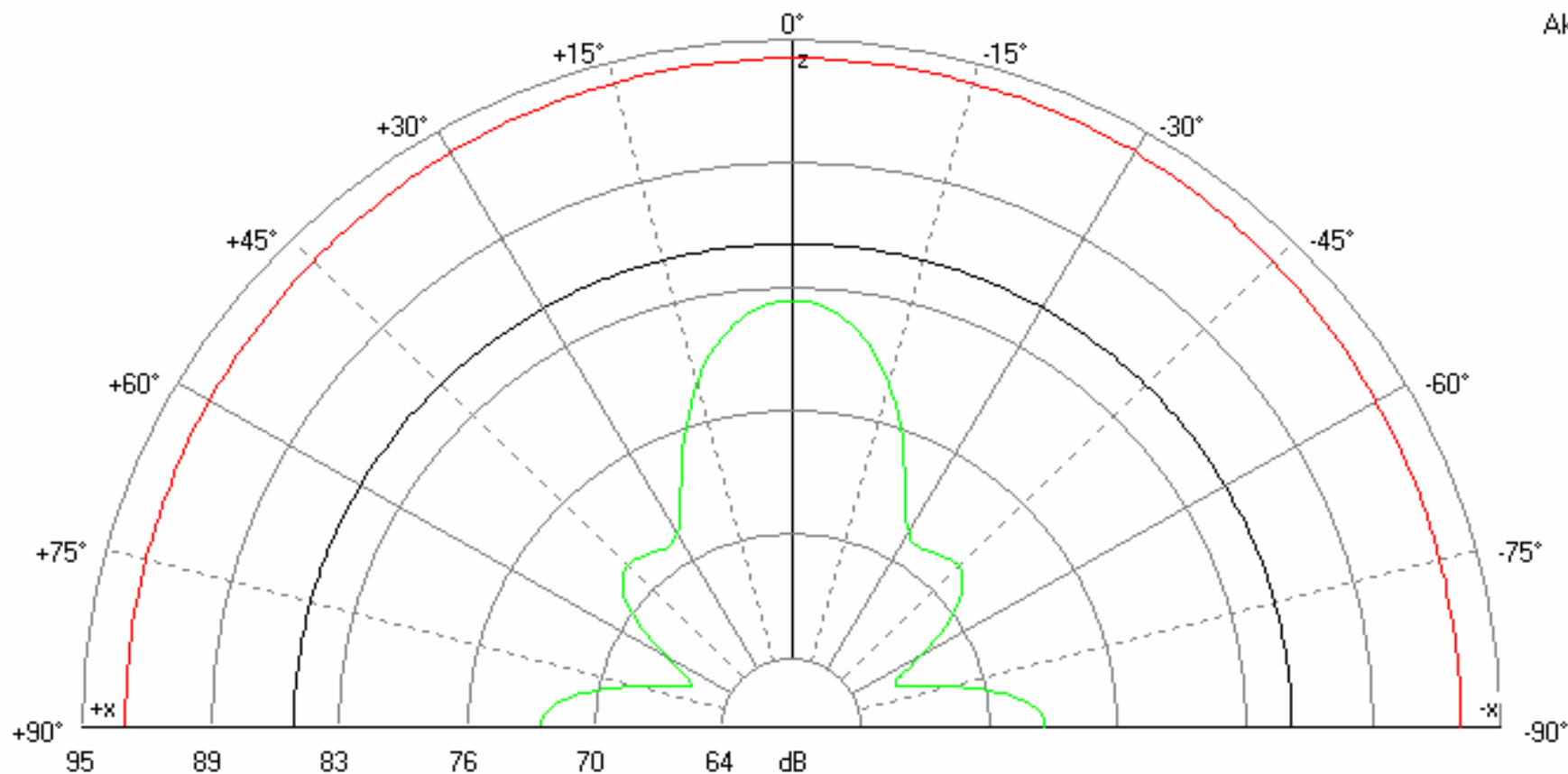
47. Polar of L06-07, Lp

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

— Horiz. f=100Hz

— Horiz. f=1kHz

— Horiz. f=10kHz



AkAb

# Nelineárne chovanie cievky

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

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

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

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

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

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

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



# $f_{RE}=1500\text{Hz}$ , $\text{ExpoRe}=1;2;3$ , $\text{ExpoLe}=0.5;1.5;3$

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

$U_{in}=2.43\text{Vrms}$ , Distance=1m

— H=0, V=0

