



# **Elektroakustika**

## **L01: Základné pojmy**

**doc. Ing. Jozef Juhár, PhD.**

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

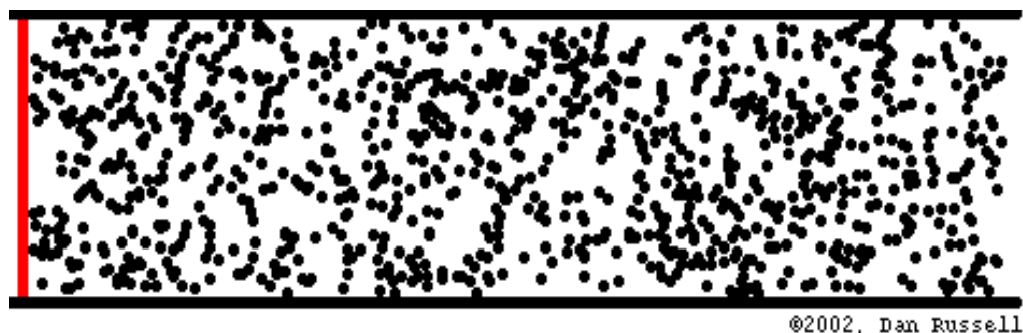
# Akustika

- Akustika je veda, zaoberajúca vznikom, šírením, príjmom a pôsobením **zvuku**.
- Jej názov je odvodený od gréckeho slova „**akoustos**“, ktorého pôvodný význam je „počúvanie“ resp. „počutie“.
- Už od svojich počiatkov aplikácie akustiky hrajú dôležitú rolu v každodennom živote ľudí:
  - hudba
  - architektúra
  - engineering
  - armáda
  - medicína
  - psychológia
  - lingvistika
  - ...



# Zvuk

- Zvuk je mechanický rozruch, ktorý
  - vzniká v **pružnom** prostredí vychyľovaním častíc prostredia zo svojej rovnovážnej polohy
  - šíri sa prostredím vo forme zvukovej **vlny** (odovzdávaním energie kmitania medzi susediacimi časticami)
  - je vnímateľný sluchovými orgánmi ľudí, zvierat a iných živých tvorov, alebo detekovateľný špeciálnymi prístrojmi (sonar)

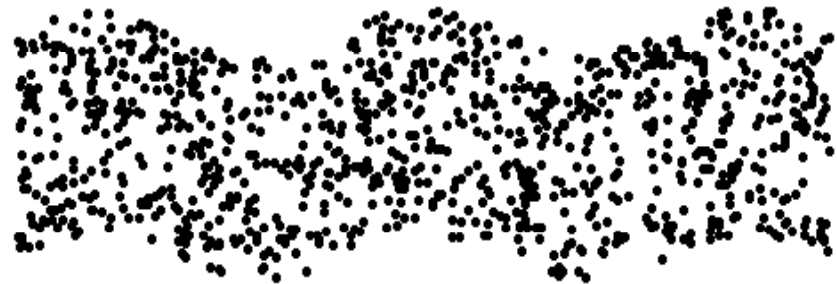


- Nazývame ho tiež **zvukovým (akustickým) vlnením**

# Zvukové vlnenie

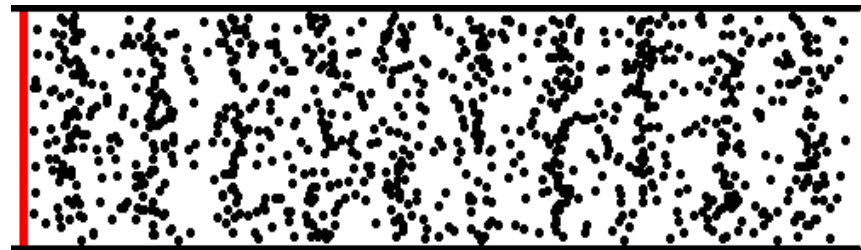
- priečne (transverzálne)

- častice sa vychyľujú v smere kolmom na smer šírenia rozruchu
- tangenciálne sily
- pevné látky

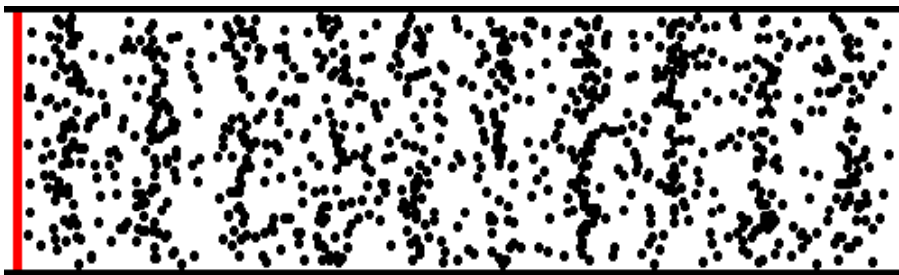
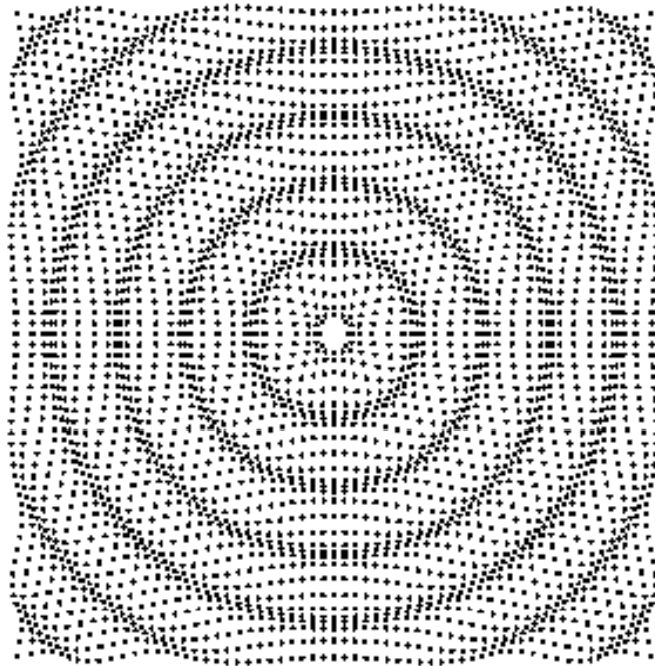


- pozdĺžne (longitudinálne)

- častice sa vychyľujú v smere šírenia rozruchu
- normálové sily
- kvapalné a plynné látky



# Rovinná a guľová zvuková vlna



- Guľová zvuková vlna
  - vlnoplochy v tvare koncentrických guľ
  - zvukové lúče v tvare sférických radiál
  - každý zvukový zdroj, ktorého rozmery sú oveľa menšie, ako je vlnová dĺžka vysielaného zvukového vlnenia
- Rovinná zvuková vlna
  - vlnoplochy v tvare paralelných rovín
  - zvukové lúče v tvare súbežných priamok
  - teoretickým zdrojom je nekonečná rovina
  - simuluje sa v akustických trubiciach, guľová vlna vo veľkej vzdialenosti od zdroja
- Valcová (cylindrická) vlna
  - vlnoplochy v tvare sústredných valcov
  - zvukové lúče v tvare paralelných radiál
  - teoretickým zdrojom je „pulzujúca“ priamka

# Vlnoplocha, čelo vlny, zvukový lúč

- Vlnoplocha
  - geometrické miesto bodov prostredia, v ktorých častice prostredia kmitajú s rovnakou fázou
- Čelo vlny
  - geometrické miesta bodov, do ktorých zvukové vlnenie dorazilo v určitom okamihu a v ktorých kmitajú častice prostredia s rovnakou fázou
- Zvukový lúč
  - smer šírenia zvukového vlnenia
  - v izotropnom prostredí je kolmý na vlnoplochu

# Akustické pole a charakteristiky akustického poľa

- Akustické pole – priestor, v ktorom sa šíri zvuková vlna
  - akustické pole jediného zvukového zdroja
  - akustické pole viacerých zvukových zdrojov – princíp superpozície
- Charakteristiky akustického poľa
  - Rýchlosť zvuku
  - Frekvencia a vlnová dĺžka zvuku
  - Akustická výchylka a akustická rýchlosť
  - Akustický tlak
  - Akustický výkon a akustická intenzita
  - Vlnová impedancia a akustická impedancia

# Rýchlosť zvuku

- Je to rýchlosť, ktorou sa šíri zvukové vlnenie v pružnom prostredí
- Závisí od teploty, hustoty látky, ....
- Pre plyny (teda aj vzduch) platí:

$$c = \sqrt{\frac{\chi p_0}{\rho}} = \sqrt{\frac{\chi p_{00}}{\rho_0} (1 + \gamma T)} \doteq 331,8 + 0,61T \quad [\text{ms}^{-1}]$$

$\chi$  - Poissonova konštanta

$p_{00}$  - statický (barometrický) tlak vzduchu pri 0°C

$\rho_0$  - hustota vzduchu pri 0°C

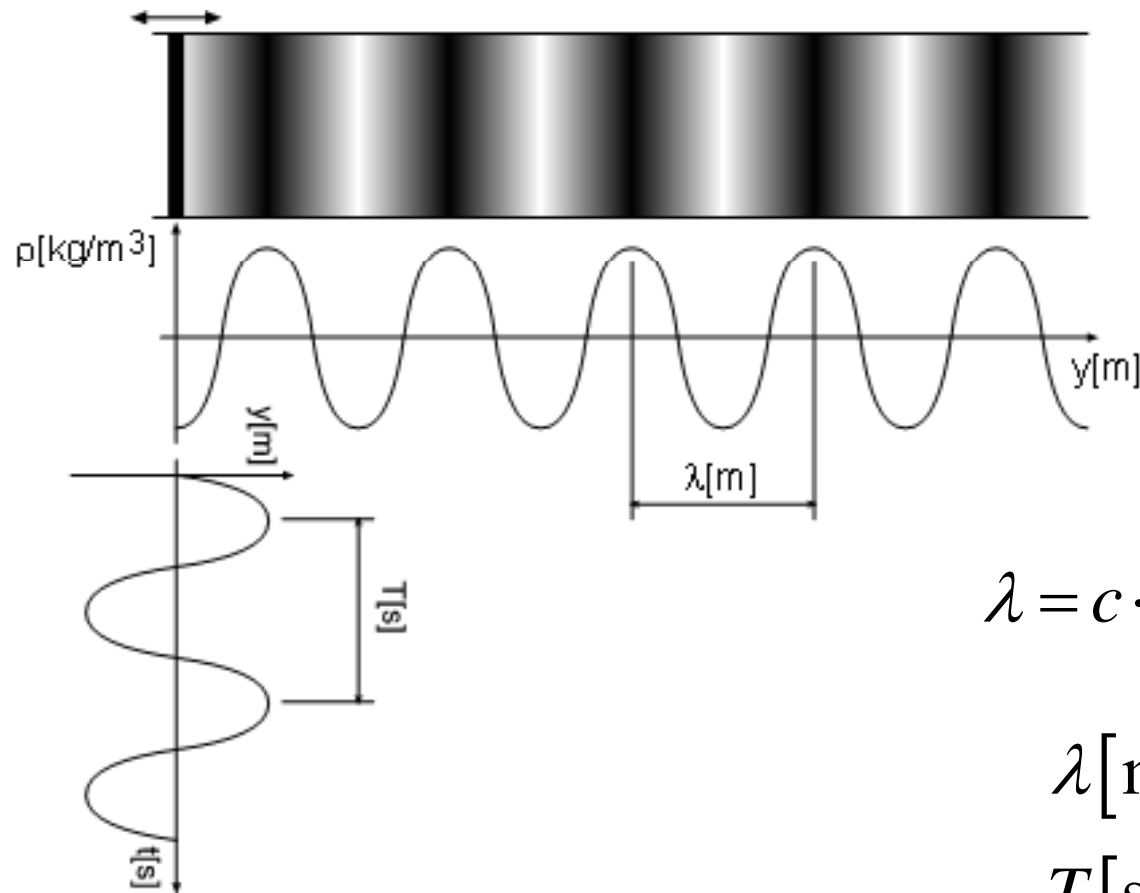
$\gamma$  - koeficient objemovej rozťažnosti plynov

T - teplota v 0°C

Teplota [°C]	Rýchlosť zvuku [m/s]
0	331,8
5	334,9
10	337,9
15	341,0
20	344,0
25	347,0
30	350,1



# Frekvencia, perióda a vlnová dĺžka zvuku



$$\lambda = c \cdot T = \frac{c}{f} \quad [\text{m}]$$

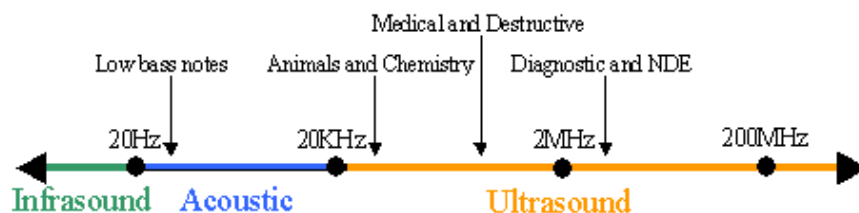
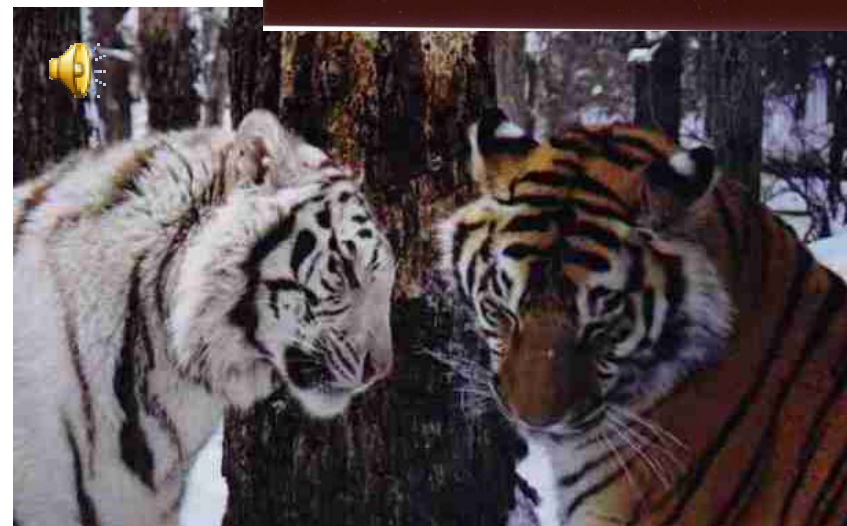
$\lambda$  [m] - vlnová dĺžka

$T$  [s] - perióda kmitania

$f$  [Hz] - frekvencia

# Zvuk, ultrazvuk a infrazvuk

- Infrazvuk
  - zemetrasenia, povodne, požiare, víchrice, automobilové a letecké motory
  - zvieratá (slony, tigre, žraloky, ...) (umožňuje komunikáciu na veľké vzdialenosti)
  - The Sonic Weapon of Vladimir Gavreau (infrazvukové píšťaly – organ)
- Ultrazvuk
  - zvieratá (psy, myši, delfíny, netopiere, hmyz, ...)
  - diagnostická sonografia v medicíne
  - nedeštruktívna priemyselná diagnostika
  - lokalizácia objektov (sonar)
  - ultrazvukové čistenie
  - komunikácia (modulovaný ultrazvuk) medzi ponorkami



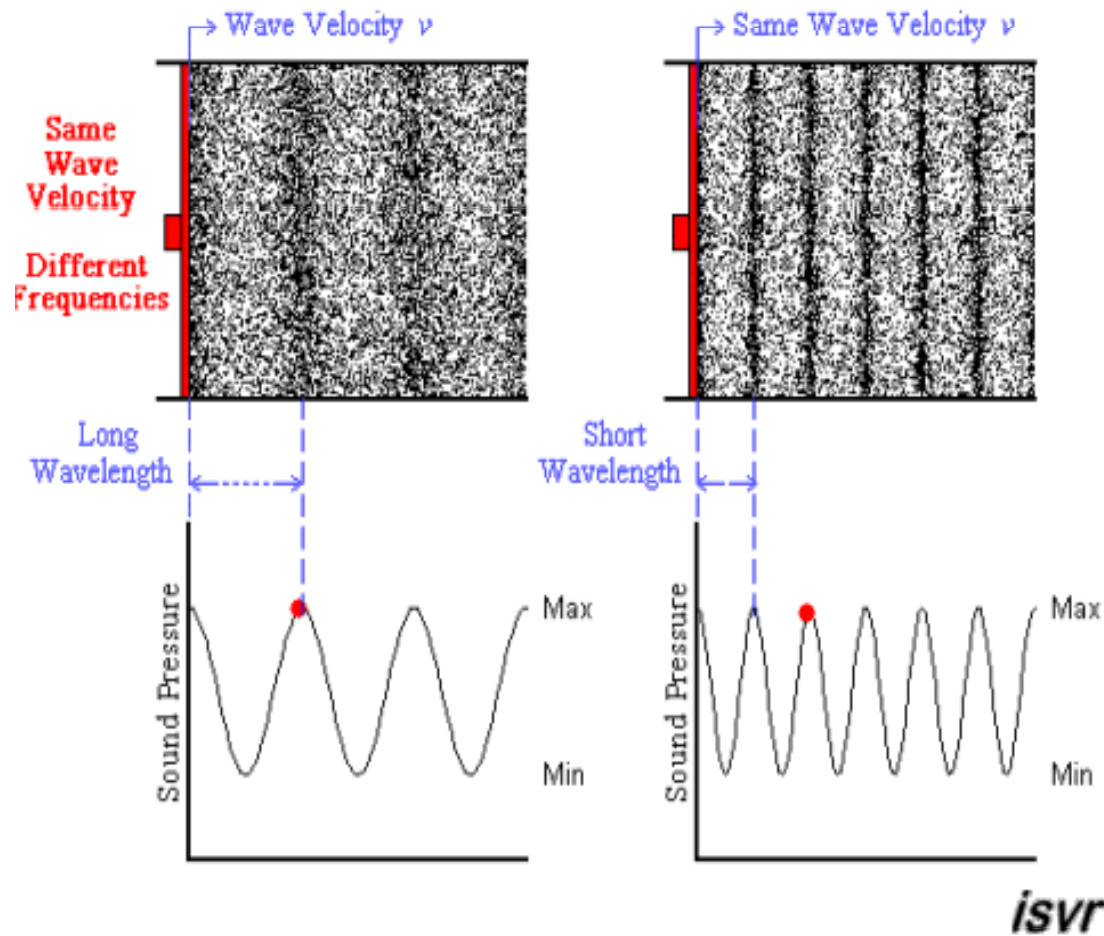
zvuk:  $f \in \langle 16, 22\,000 \rangle$  Hz

$\lambda \in \langle 21.5\text{ m}, 1.5\text{ cm} \rangle$

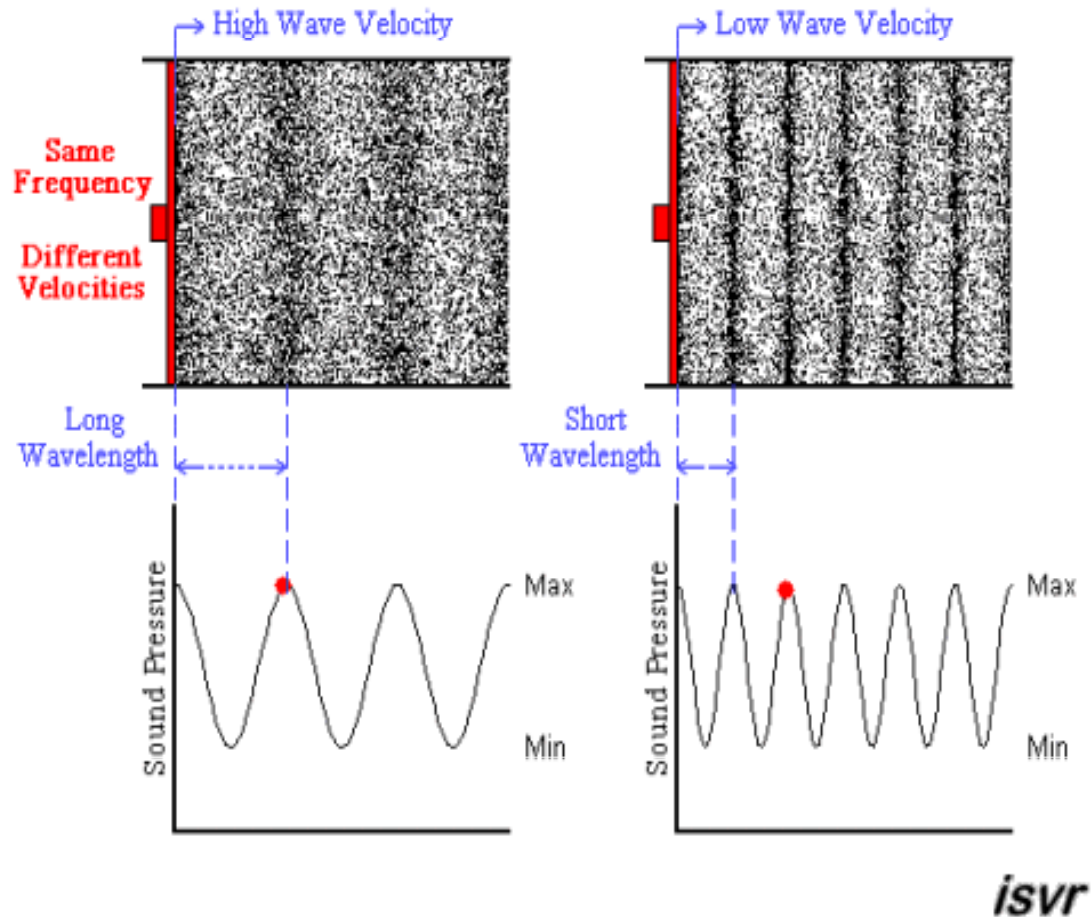
ultrazvuk:  $f > 22\,000$  Hz;  $\lambda < 1.5\text{ cm}$

infrazvuk:  $f < 16$  Hz;  $\lambda > 21.5\text{ m}$

# Vlnové dĺžky zvukového vlnenia rôznych frekvencií v prostredí s rovnakou rýchlosťou šírenia zvuku



# Vlnové dĺžky zvukového vlnenia rovnakých frekvencií v prostrediach s rôznou rýchlosťou šírenia zvuku

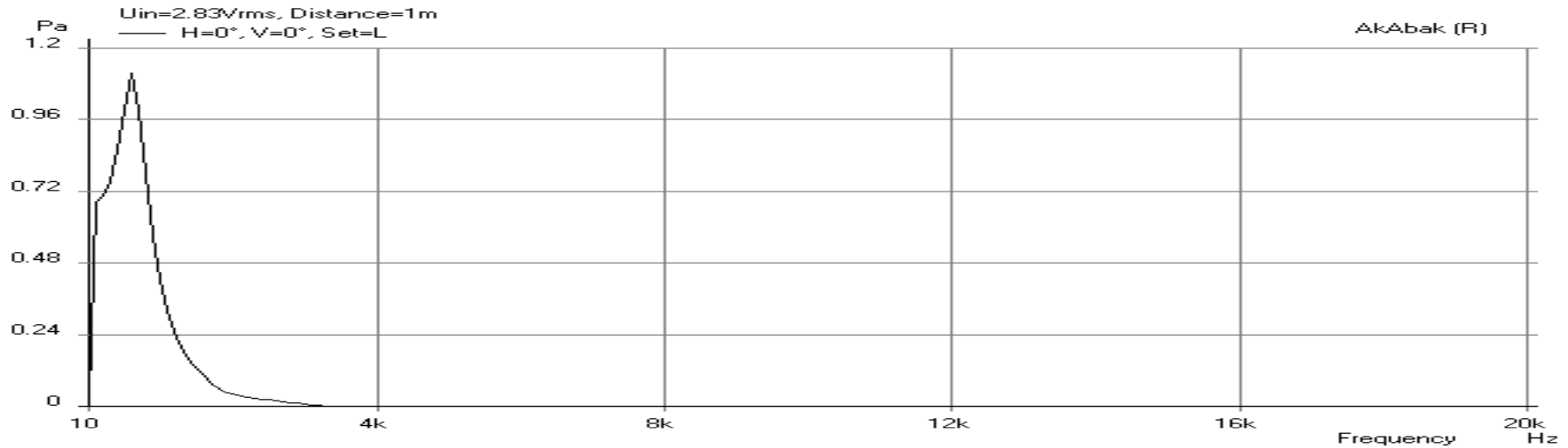


# Lineárna a nelineárne frekvenčné stupnice

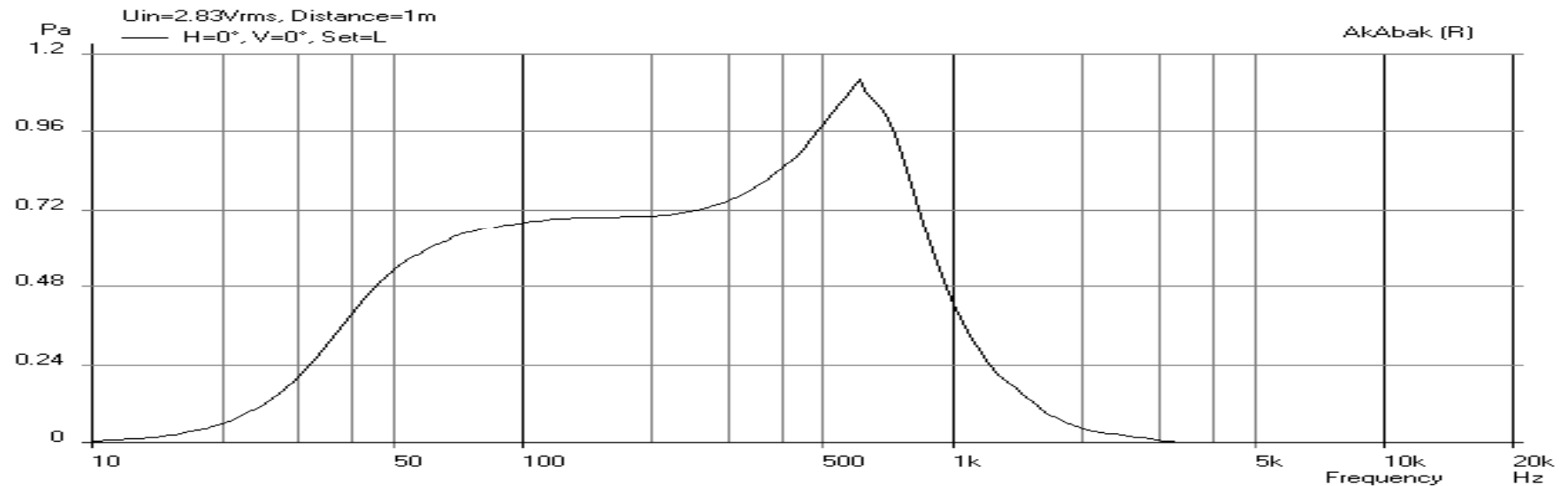
- zobrazenie akustických signálov (amplitúdové/fázové frekv. charakteristiky, smerové charakteristiky, spektrogramy, ....), návrh a konštrukcia elektroakustických zariadení (banky filtrov), konštrukcia a ladenie hudobných nástrojov
- hudobné stupnice – empiricky určené frekvenčné intervaly (frekvencia versus výška tónu) – tónové sústavy
- „matematické“ stupnice
  - logaritmická stupnica
  - oktávová, pol-oktávová a tretino-oktávová stupnica
- stupnice odvodené od vlastností ľudského sluchu
  - melova stupnica
  - barkova stupnica

# Frekvenčná závislosť akustického tlaku, zobrazená na lineárnej a nelineárnej (logaritmickej) frekvenčnej stupnici

4. Sound Pressure of L12, Amplitude (Phase)



3. Sound Pressure of L12, Amplitude (Phase)



# Oktávové frekvenčné pásma

- v profesionálnej zvukovej technike sa na analýzu a úpravu zvukových signálov často používajú frekvenčné analyzátory, ktoré sú založené na tzv. oktávových (tretinooktávových) frekvenčných filtroch
- stredné a hraničné frekvencie týchto filtrov upravuje norma ISO:

$$f_{n,c} = 1000 \times 2^{\frac{n}{q}} \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$

$$\frac{f_{n,h}}{f_{n,d}} = 2^{\frac{1}{q}}$$

$$f_{n,c} = \sqrt{f_{n,h} \cdot f_{n,d}}$$

$$q = \begin{cases} 1 & \text{- oktávová škála} \\ 2 & \text{- pol-oktávová škála} \\ 3 & \text{- tretino-oktávová škála} \end{cases}$$

# Príklad: Frekvenčné pásma oktávovej škály

$$q = 1$$

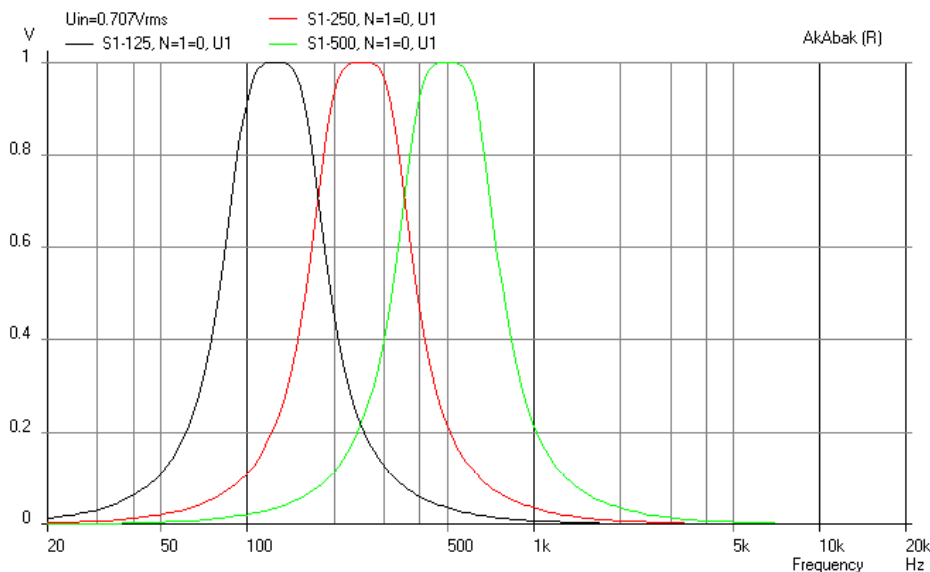
Centrálne frekvencie:

$$f_{n,c} = 1000 \times 2^n \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$

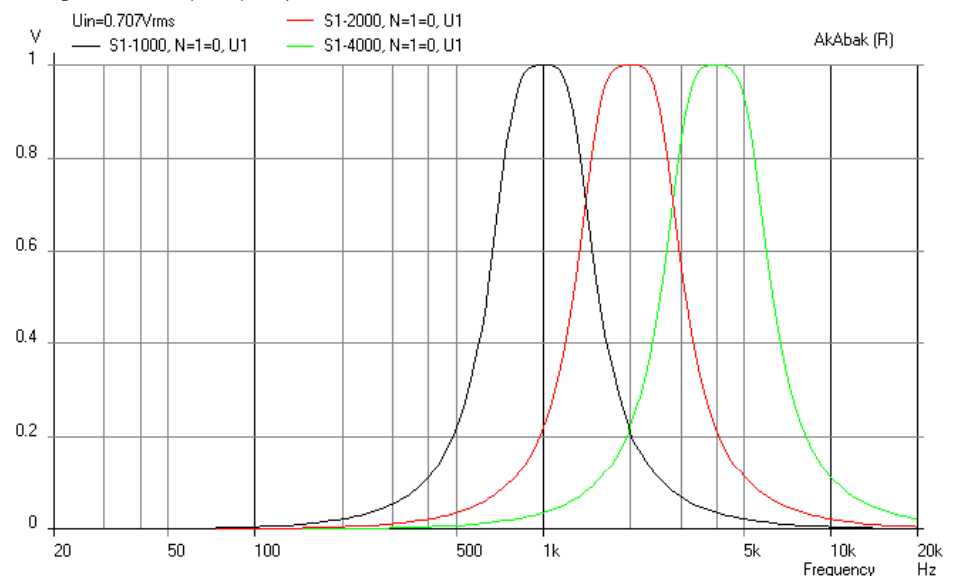
$$f_{n,c} = 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000, 16000 \quad [\text{Hz}]$$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{f_{n,h}}{f_{n,d}} = 2 \\ f_{n,c} = \sqrt{f_{n,h} \cdot f_{n,d}} \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l} f_{n,d} = \frac{f_{n,c}}{\sqrt{2}} \\ f_{n,h} = f_{n,c} \cdot \sqrt{2} \end{array} \right\} \begin{array}{l} f_{n,d} = 88.5, 177, 353.5, 707, 1414, 2828.5, 5657, 11314 \quad \text{Hz} \\ f_{n,h} = 177, 353.5, 707, 1414, 2828.5, 5657, 11314, 22628 \quad \text{Hz} \end{array}$$

1. Voltage of OKTAVY, Amplitude (Phase)



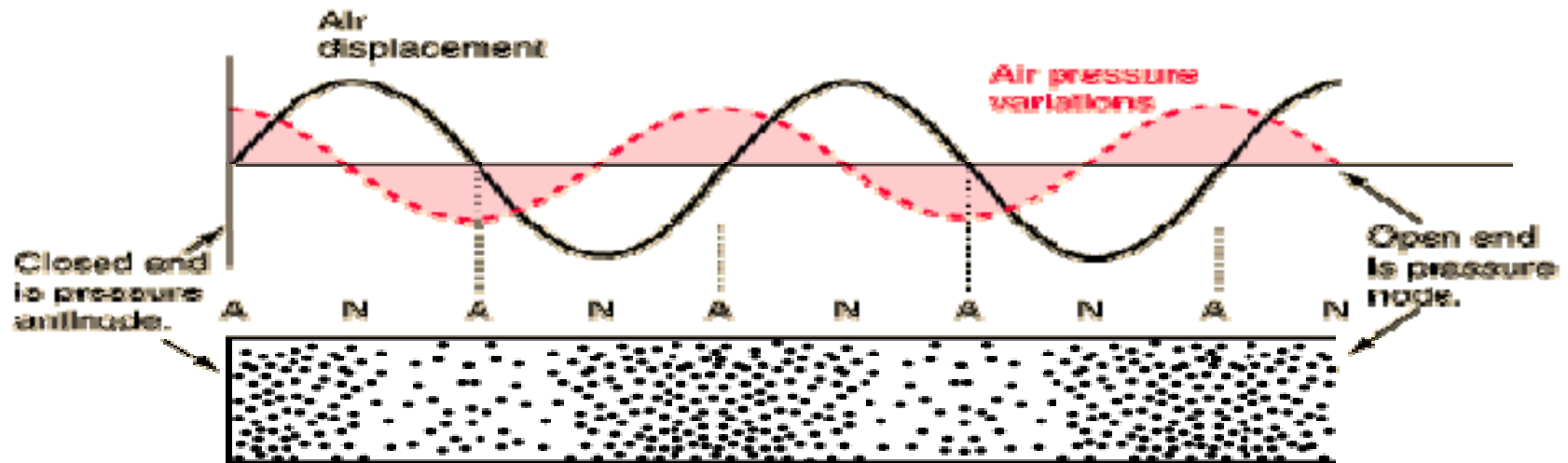
2. Voltage of OKTAVY, Amplitude (Phase)





# Akustická výchylka – $y(t)$

- výchylka, o ktorú sa pri šírení zvukového vlnenia prostredím vychylujú častice prostredia zo svojej rovnovážnej polohy
  - akustická výchylka je striedavou veličinou
  - je funkciou času a priestoru (pre zvukovú vlnu šíriacu sa v priestore)
  - jej základnou jednotkou je [m]
- Typické hodnoty:
    - Maximálna výchylka  $\sim 40 \mu\text{m}$  ( $10^{-6}$ )
    - Normálna výchylka  $\sim 40 \text{nm}$  ( $10^{-9}$ )
    - Minimálna výchylka  $\sim 80 \text{pm}$  ( $10^{-12}$ )

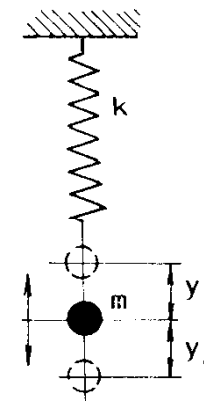


# Lineárny oscilátor – matematický model pohybu hmotnej častice, prenášajúcej zvukovú vlnu

Pohyb hmotného bodu lineárneho oscilátora je periodický, prebiehajúci po priamke a jeho časový priebeh možno získať riešením diferenciálnej rovnice, ktorá je vlastne pohybovou rovnicou hmotného bodu oscilátora:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + s y = 0 \quad \text{kde } y \text{ [m]} \quad \text{výchylka} \quad (1)$$

$m$ [kg]	hmotnosť kmitajúceho bodu
$t$ [s]	čas
$s$ [N/m]	tuhosť pružiny



Riešením tejto rovnice je výraz pre tzv. voľné kmity bez tlmenia:

$$y = y_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \quad \text{kde } \omega_0 \text{ [1/s]} \quad \text{vlastný uhlový kmitočet} \quad (2)$$

$\varphi_0$ [-]	fázový uhol
$y_0$ [m]	amplitúda výchylky kmitania

Spätným dosadením rovnice (2) do (1) dostaneme informáciu o tzv. vlastnom uhlovom kmitočte oscilátora:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{s}{m}}$$

# Časový priebeh harmonického kmitania

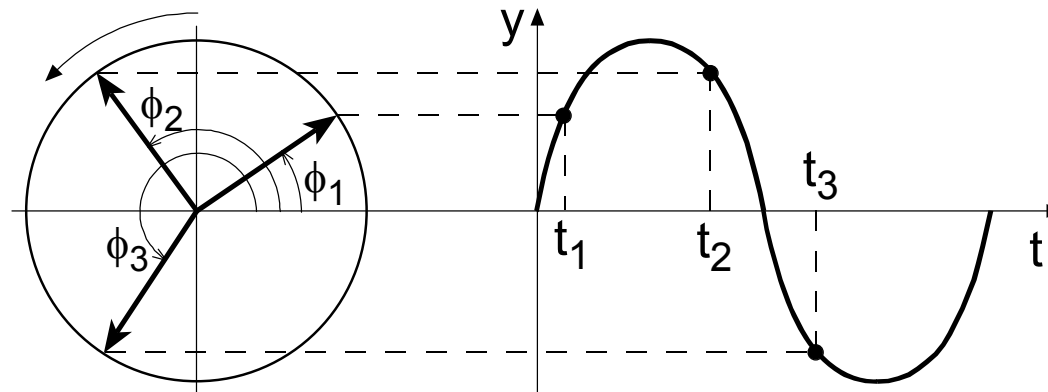
- Pohyb lineárne kmitajúceho hmotného bodu si môžeme predstaviť ako priemet vektora (fázora), otáčajúceho sa konštantnou uhlovou rýchlosťou.
- Okamžitú hodnotu výchylky môžeme vyjadriť ako reálnu alebo imaginárnu časť výrazu, popisujúceho vektor, rotujúci konštantnou uhlovou rýchlosťou

(Eulerov vzorec)

$$\left. \begin{array}{l} \cos \varphi + j \sin \varphi = e^{j\varphi} \\ \varphi = \omega t + \varphi_0 \end{array} \right\} \Rightarrow \vec{y} = y_0 \cdot e^{j(\omega t + \varphi_0)}$$

$$y = \operatorname{Re}\{\mathbf{Y}\} = y_0 \cdot \cos(\omega t + \varphi_0)$$

$$y = \operatorname{Im}\{\mathbf{Y}\} = y_0 \cdot \sin(\omega t + \varphi_0)$$



# Akustická rýchlosť – $v(t)$

- (mechanická) rýchlosť, ktorou častice prostredia kmitajú okolo svojej rovnovážnej polohy
- striedavá veličina – funkcia času a priestoru
- základnou jednotkou je  $[\text{ms}^{-1}]$
- Typické hodnoty akustickej rýchlosti:
  - Maximálna  $\sim 0,25 \text{ m/s}$
  - Normálna  $\sim 0,25 \text{ mm/s}$
  - Minimálna  $\sim 0,05 \text{ }\mu\text{m/s}$

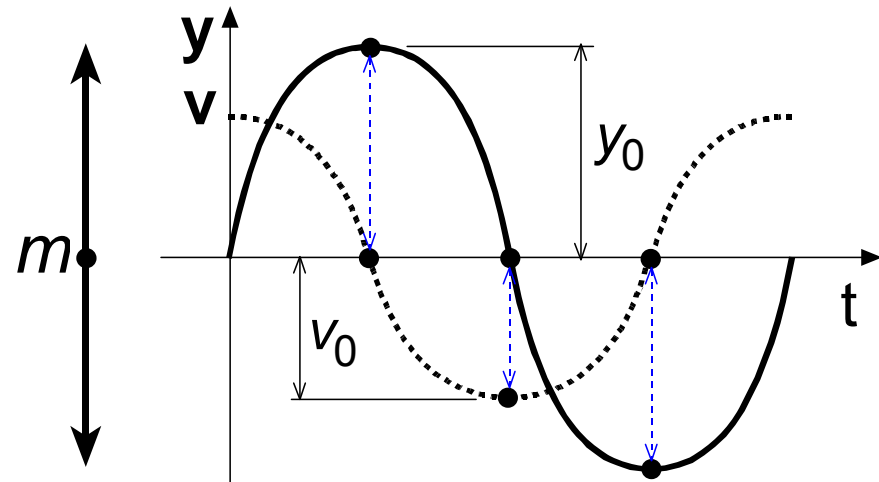
# Rýchlosť kmitania hmotného bodu

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{y}}{dt} = \frac{d\left(y_0 e^{j(\omega t + \varphi_0)}\right)}{dt} = y_0 e^{j(\omega t + \varphi_0)} \cdot j\omega = \omega y_0 e^{j\left(\omega t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2}\right)} = v_0 e^{j\left(\omega t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2}\right)}$$

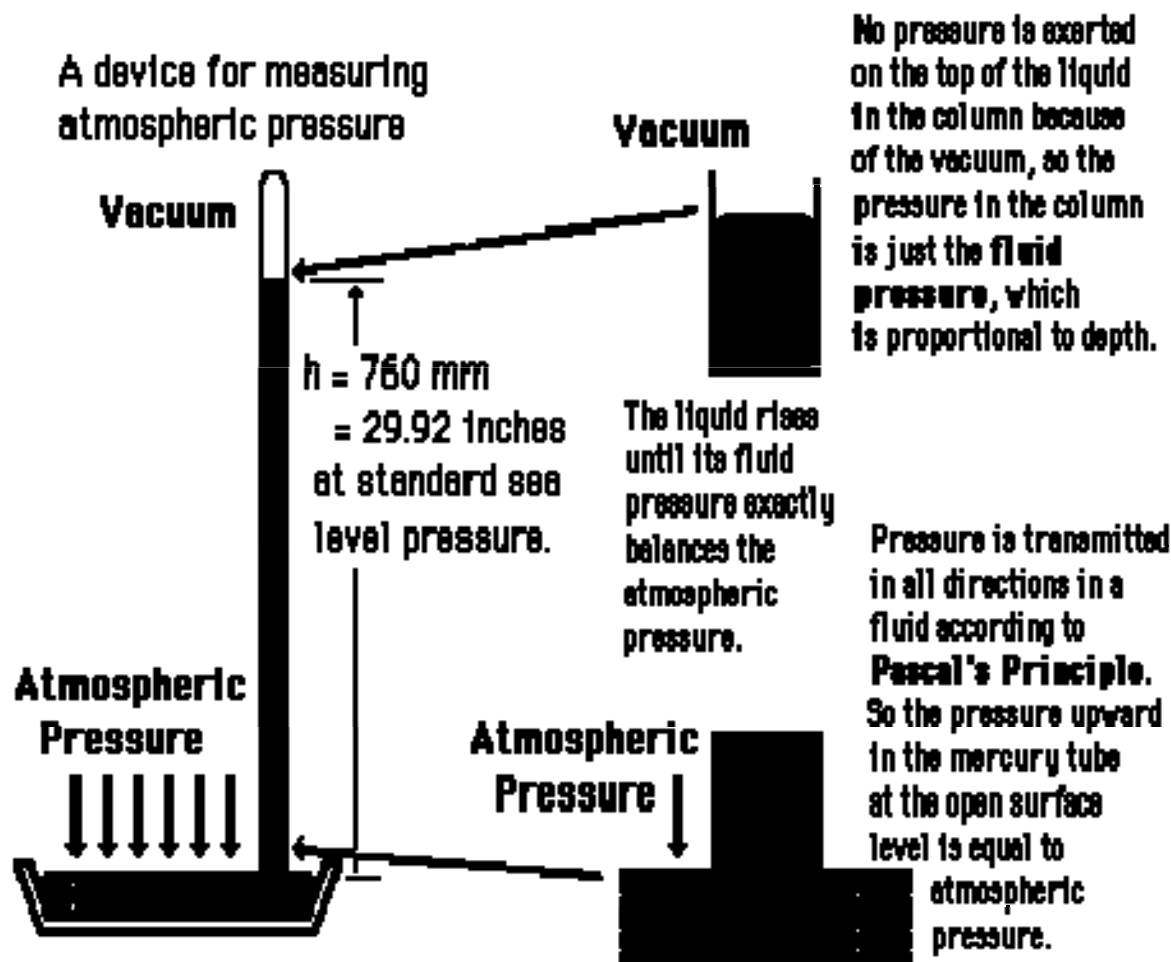
$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{y}}{dt} = \frac{d\left(y_0 \sin(\omega t + \varphi_0)\right)}{dt} = \omega y_0 \cos(\omega t + \varphi_0) = v_0 \cos(\omega t + \varphi_0)$$

$$v_0 = \omega y_0 \quad \left[\text{ms}^{-1}\right]$$

• ...



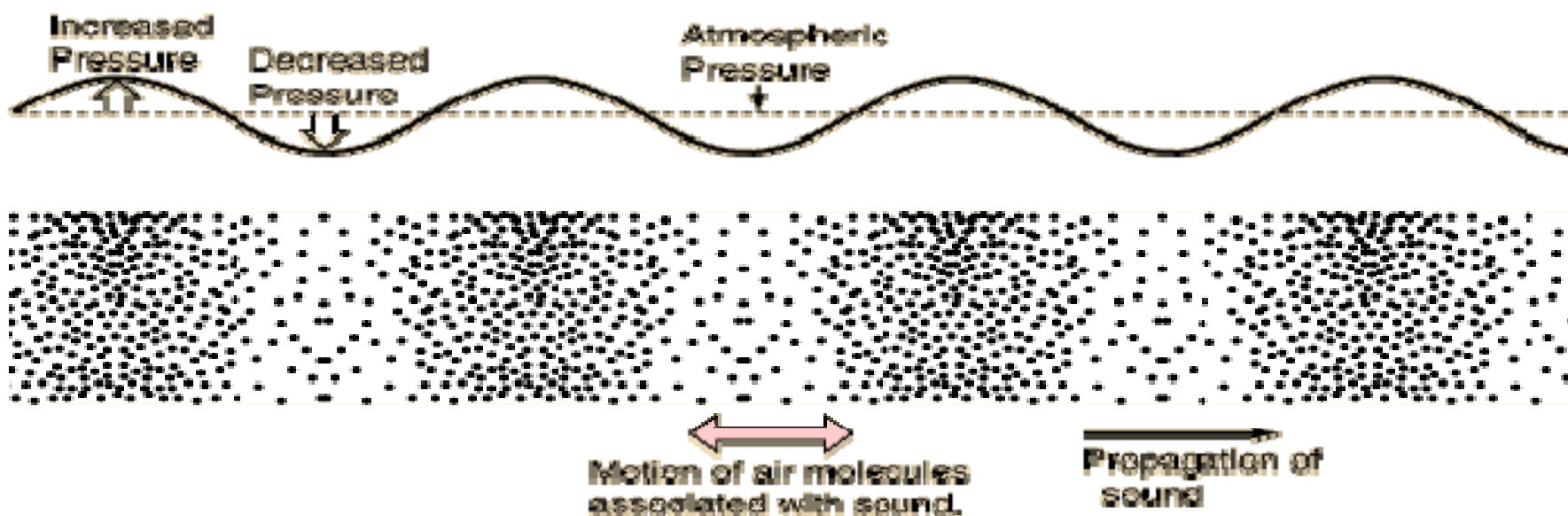
# Atmosférický (statický) tlak



- zvuková vlna sa šíri v prostredí, v ktorom pôsobí stály „barometrický“ tlak
- tlak, ktorý v danom mieste existuje aj bez prítomnosti zvukovej vlny
- barometrický tlak
- závisí od nadmorskej výšky a teploty vzduchu
- jednotkou je Pascal ( $1 \text{ Pa} = 1 \text{ Nm}^{-2} = 1 \text{ kgm}^{-1} \text{ s}^{-1}$ )
- označovanie  $p_0$  [ $\text{Nm}^{-2}$ ; Pa]
- priemerná hodnota pri bežnej teplote ( $20^\circ \text{C}$ ) je približne  $p_0 = 10^5 \text{ Pa}$

# Akustický tlak - $p_A$ [ $\text{Nm}^{-2}$ ; Pa]

- rozdiel medzi okamžitou a referenčnou (strednou) hodnotou atmosférického tlaku v danom mieste prostredia
- striedavá veličina, t.j. nadobúda kladné i záporné hodnoty a je skalárom (matematicko-fyzikálne hľadisko)
- bežné hodnoty akustického tlaku:
  - Prah počutia  $\sim 10^{-5}$   $\mu\text{Pa}$
  - Bežná konverzácia  $\sim 100$  mPa
  - Prah bolesti  $\sim 100$  Pa



# Hladina akustického tlaku

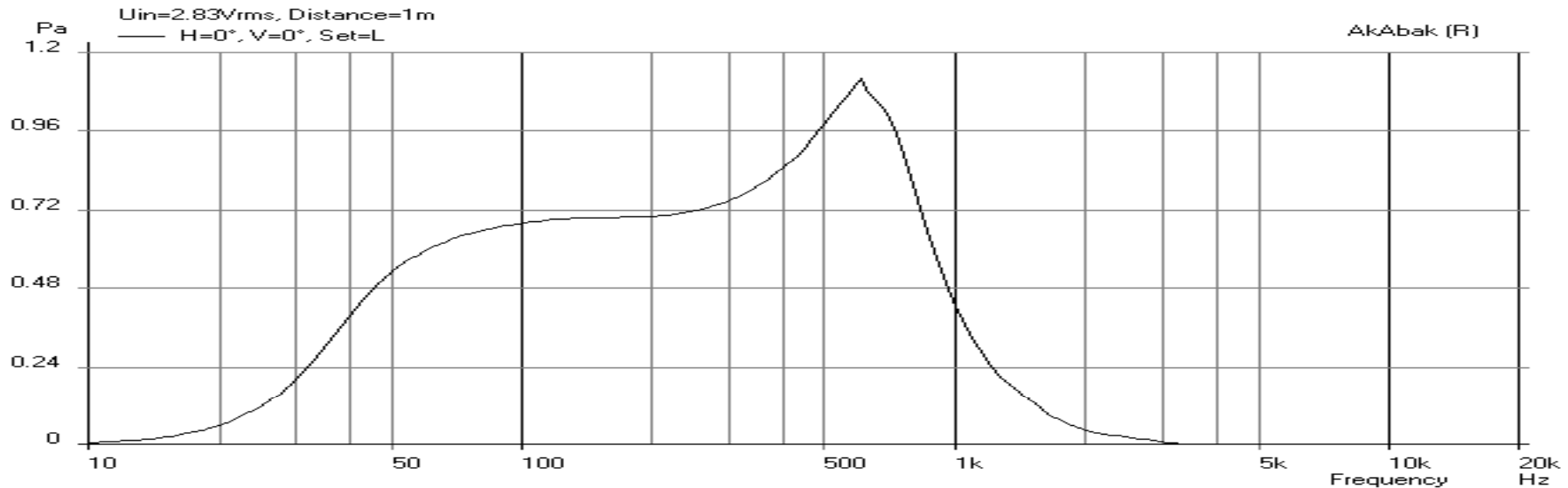
- Rozsah akustických tlakov, vyskytujúcich sa v prírode, od šepotu až po hluk turbín veľkých lietadiel je veľmi veľký a ľudské ucho vníma akustické tlaky v rozpätí od 0,00002 Pa až po 200 Pa.
- Pretože zápis ich hodnôt na lineárnej stupnici je málo prehľadný, používa sa v akustike častejšie **logaritmická** stupnica.
- Pri vyjadrovaní hodnôt akustického tlaku na logaritmickú stupnicu sa vychádza z logaritmu podielu akustického tlaku a jeho medzinárodne štandardizovanej **referenčnej** hodnoty.
- Takto získaná veličina sa nazýva hladina akustického tlaku. Vyjadruje sa v decibeloch.

$$L_p = 20 \cdot \log \frac{p_A}{p_{A,ref}} = 20 \cdot \log \frac{p_A}{2 \cdot 10^{-5}} = 20 \cdot \log p_A + 94 \quad [\text{Pa}; \text{dB}]$$

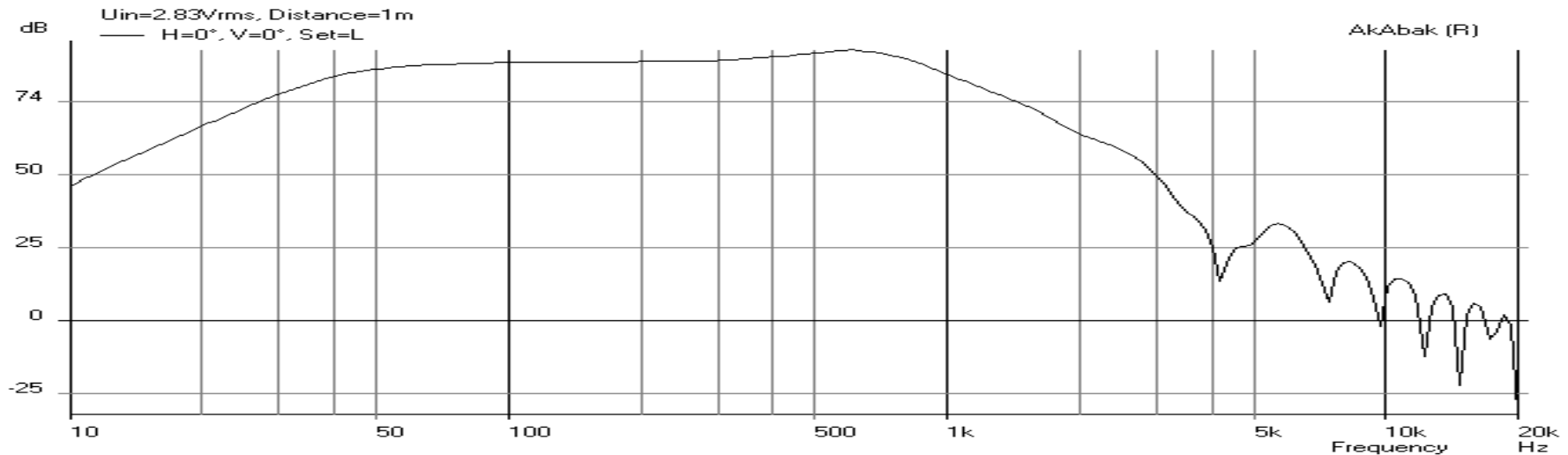


# Akustický tlak a hladina akustického tlaku, zobrazená na nelineárnej frekvenčnej stupnici

3. Sound Pressure of L12, Amplitude (Phase)



1. Sound Pressure of L12, Lp (Phase)



# Akustické tlaky a hladiny akustických tlakov

**Table 2-5.** Some common sound-pressure levels and sound pressures.

Sound Source	Sound pressure (Pa)	Sound level* (decibels, A-weighted)
Saturn rocket	100,000. (one atmosphere)	194
Ram jet	2,000.	160
Propeller aircraft	200.	140
Threshold of pain		135
Riveter	20.	120
Heavy truck	2.	100
Noisy office, } Heavy traffic }	0.2	80
Conversational speech	0.02	60
Private office		50
Quiet residence	0.0002	40
Recording studio		30
Leaves rustling	0.0002	20
Hearing threshold, good ears at frequency of maximum sensitivity		10
Hearing threshold, excellent ears at frequency maximum response	0.00002	0

Desaťnásobná  
zmena akustického  
tlaku = zmena  
hladiny akustického  
tlaku o 20 dB

\* Reference pressure (take your pick, these are identical):  
 20 micropascal (μPa)  
 0.00002 pascal  
 2×10<sup>-5</sup> newton/meter<sup>2</sup>  
 0.0002 dyne/cm<sup>2</sup> or microbar

# Vlnová (merná akustická) impedancia

- komplexný pomer akustického tlaku a akustickej rýchlosti zvukového vlnenia v danom prostredí
- komplexná veličina, ktorá vyjadruje reakciu prostredia na činnosť akustického zdroja
- jej reálna časť je **vlnový odpor prostredia** ktorého hodnota závisí iba od vlastností prostredia

$$z_V = \frac{P_A}{v} \left[ \text{Nsm}^{-3}; \text{rayl} \right]$$

$$r_V = c_0 \cdot \rho_0 = 344 \cdot 1,18 \doteq 406 \text{ Nsm}^{-3}$$

# Akustický výkon

- pri šírení zvukového vlnenia dochádza k pôsobeniu akustického tlaku na plochu silou, ktorá je daná veľkosťou akustického tlaku a veľkosťou a tvarom uvažovanej plochy
- definícia akustického výkonu vychádza zo všeobecnej definície výkonu v tvare skalárneho súčinu vektorov sily a akustickej rýchlosti, t.j.:

$$P_A = \vec{F} \cdot \vec{v} \quad [\text{W}]$$

# Akustický výkon

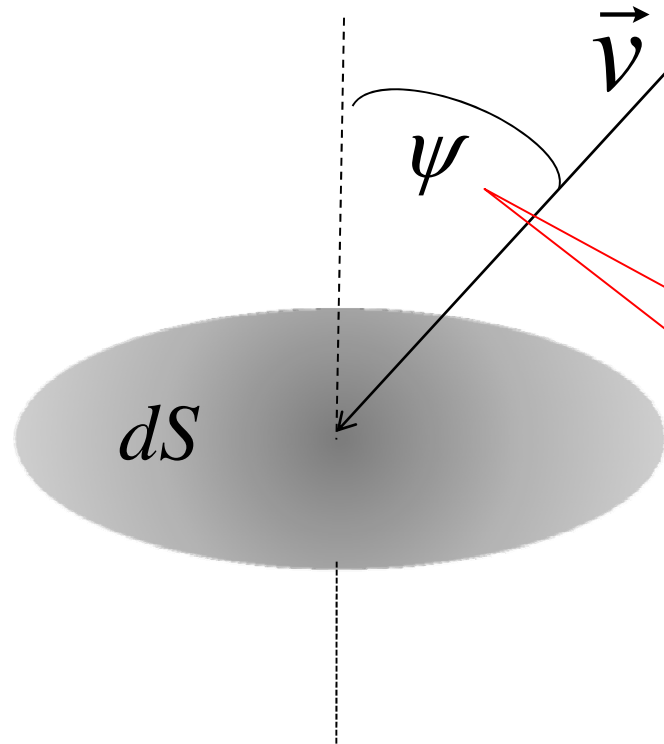
$$P_A = p_A \cdot S \cdot v \cdot \cos(\psi)$$

$$P_A = \oiint_S dP_A$$

$$dP_A = p_A \cdot v \cdot \cos(\psi) \cdot dS$$

Ak akustický tlak pôsobí na plochu rovnomerne.

Ak akustický tlak pôsobiaci na plochu S sa spojito mení.



$\psi$  je uhol medzi normálou k ploche S a vektorom akustickej rýchlosti.

# Akustická intenzita

- množstvo energie, prechádzajúce za jednotku času cez jednotku plochy, kolmej na smer šírenia zvukovej vlny
- akustický výkon prechádzajúci plochou  $S$ , orientovanou kolmo na smer šírenia akustickej energie:

$$I_A = \frac{dP_A}{dS} = \frac{p_A \cdot v \cdot dS}{dS} = p_A \cdot v \quad [\text{Wm}^{-2}]$$

# Hladina akustického výkonu a intenzity

$$L_P = 10 \cdot \log \frac{P_A}{P_{A,ref}} = 10 \cdot \log(P_A) + 120 \quad [\text{W}; \text{dB}]$$

$$P_{A,ref} = 10^{-12} \text{ W}$$

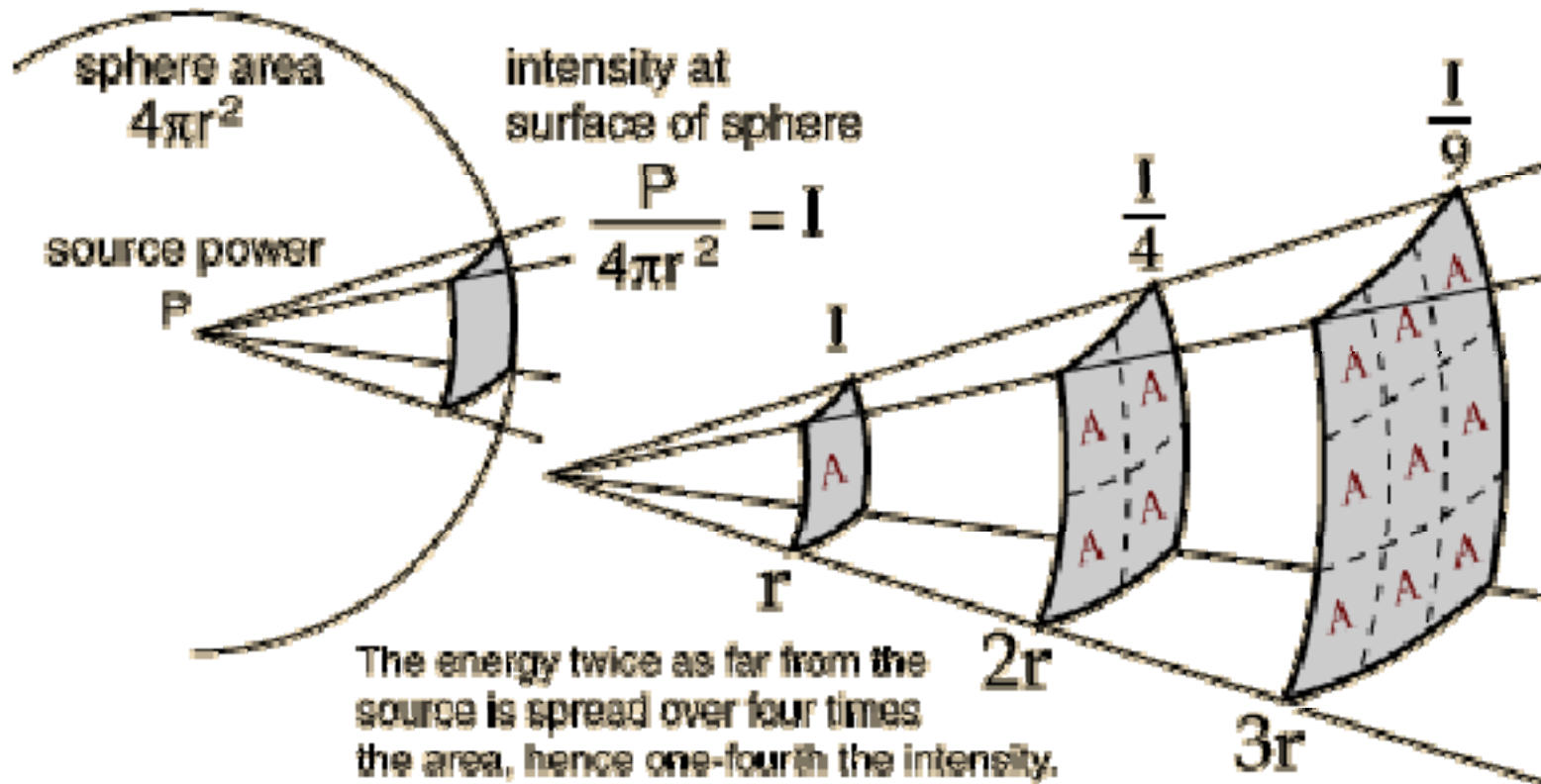
$$L_I = 10 \cdot \log \frac{I_A}{I_{A,ref}} = 10 \cdot \log(I_A) + 120 \quad [\text{Wm}^{-2}; \text{dB}]$$

$$I_{A,ref} = 10^{-12} \text{ Wm}^{-2}$$

# Inverse square law

Akustická intenzita sa znižuje so štvorcom vzdialenosti

$$\frac{I_{A1}}{I_{A2}} = \left( \frac{r_2}{r_1} \right)^2$$

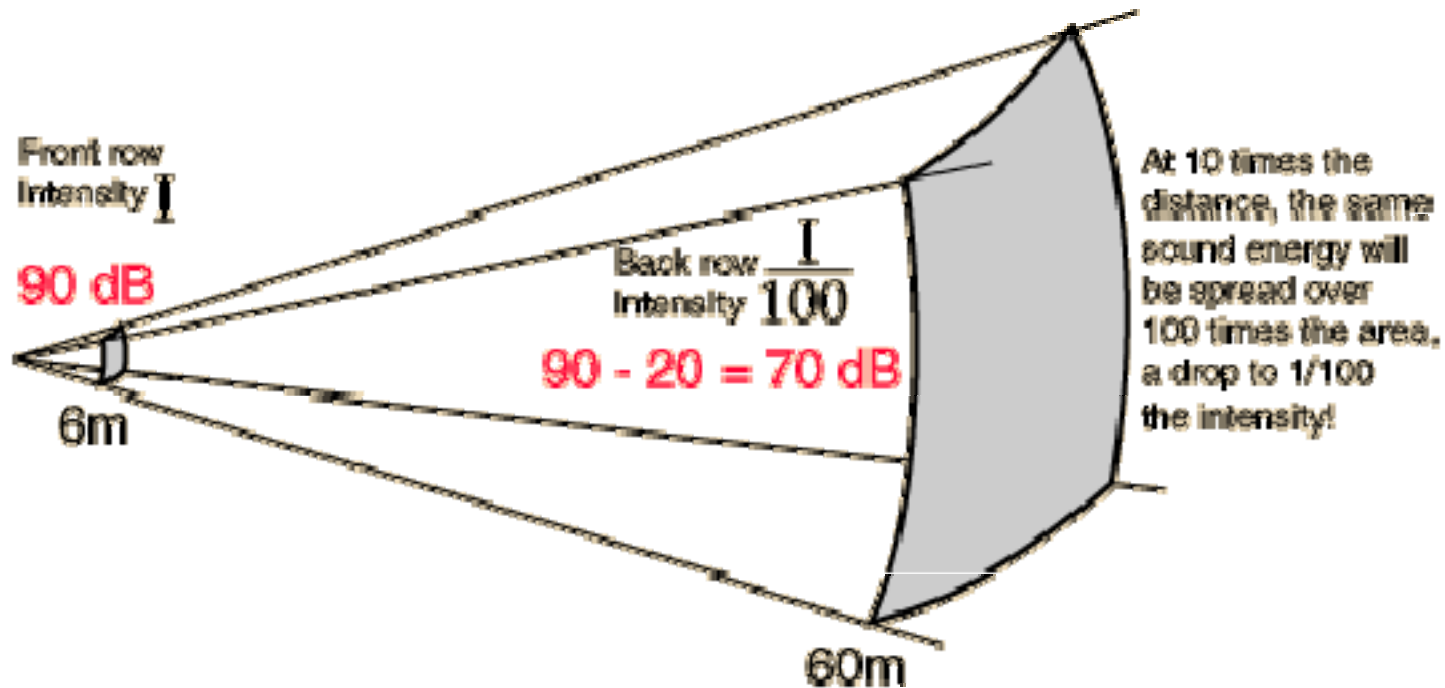




# Inverse square law

Desaťnásobné zväčšenie vzdialenosti znamená pokles hladiny akustickej intenzity o 20dB

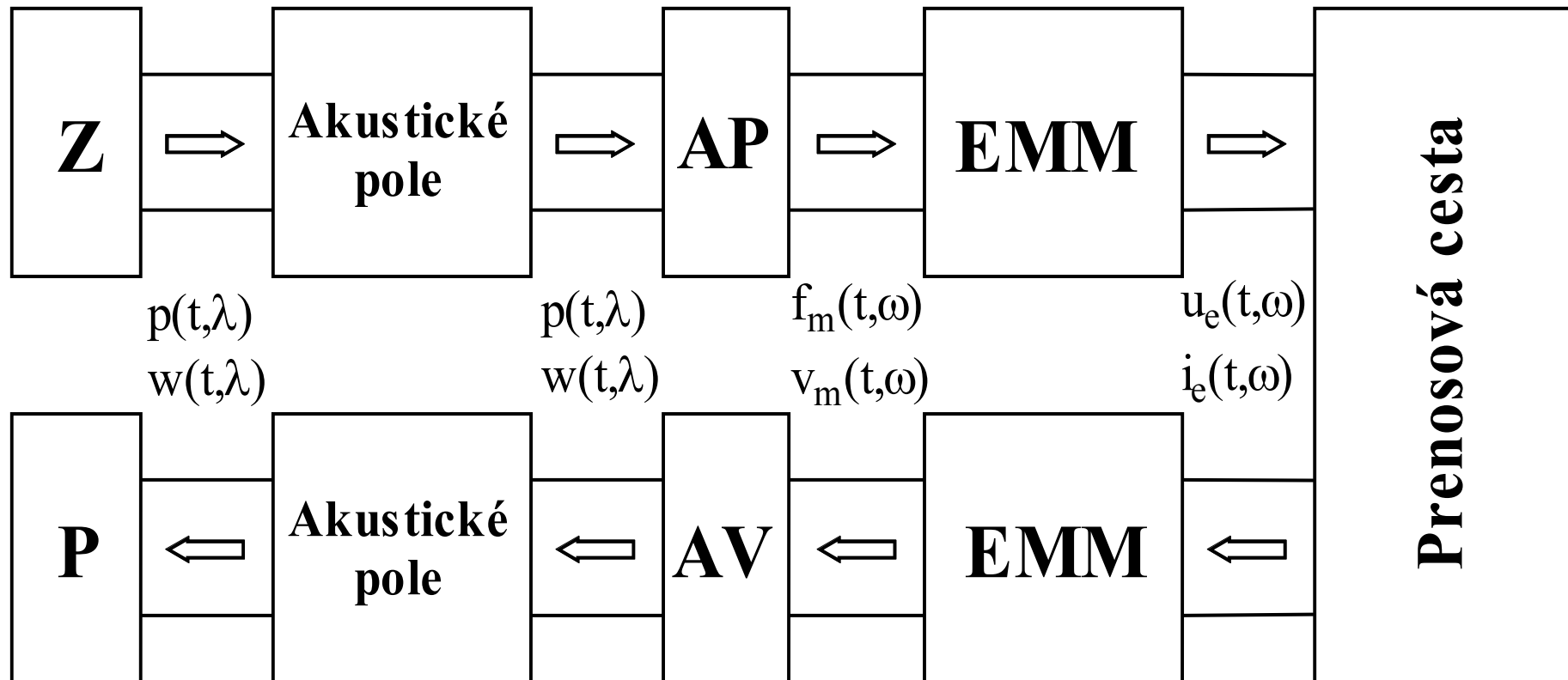
$$\frac{L_{I1}}{L_{I2}} = 10 \cdot \log \left( \frac{r_2}{r_1} \right)^2 = 20 \cdot \log \frac{r_2}{r_1}$$



# Odbory akustiky

- Fyzikálna akustika
  - Náuka o vzniku a šírení zvuku.
- Fyziologická akustika a psychoakustika
  - Zaoberá sa mechanizmom spracovania zvukového rozruchu sluchovým orgánom, nervovým systémom a interpretáciou zvukového obrazu mozgom človeka (psychoakustika) a akustikou hlasu a reči.
- Priestorová akustika
  - Riešenie akustickej kvality uzavretých priestorov s dôrazom na optimálny tvar a veľkosť priestoru (geometrická akustika) a použité materiály na jeho výstavbu a vybavenie (stavebná akustika - náuka o pohlcovaní zvuku a zvukovej izolácii).
- Vibroakustika
  - Štúdium hluku a vibrácií strojov a zariadení.
- Hydroakustika
  - Štúdium šírenia zvuku v tekutinách a jeho praktické aplikácie (detekcia plávajúcich objektov)
- **Elektroakustika**
  - Premena akustických signálov na elektrické, ich spracovanie a opätovnou premenou na signály akustické - **zvukový (elektroakustický) systém**.

# Elektroakustický systém



Z - Zdroj zvuku

AP' - Akustický prijímač

P - Prijímateľ zvuku

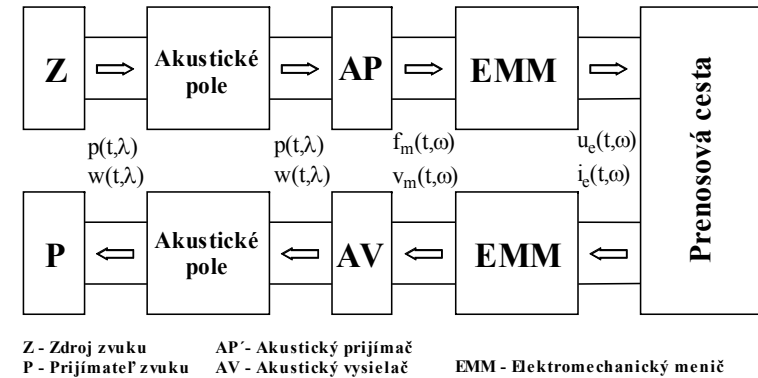
AV - Akustický vysielač

EMM - Elektromechanický menič

# Typické časti elektroakustického systému

- zdroj zvuku / prijímateľ' zvuku
- akustické pole (akustický priestor)
- akustický prijímač / akustický vysielateľ
- elektromechanický menič
- (elektrická) prenosová cesta

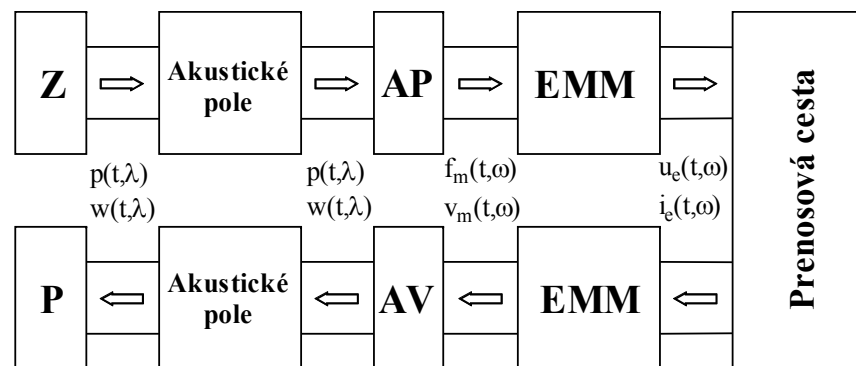
# Zdroj zvuku



- prirodzený
  - človek – reč, spev, neartikulované zvuky
  - ostatné živé tvory (zvieratá, ...)
  - prírodné javy (šum lístia, úder hromu, ...)
  - ....
- umelý (vyrobený človekom)
  - hudobné nástroje
  - stroje
  - ...

# Akustické pole

- **otvorené**
  - ulica, štadión, ...
- **zatvorené**
  - malé (obývačka, nahrávacie štúdio, menšia poslucháreň, ...)
  - veľké (športová hala, kostol, kongresová sála, staničná budova, ...)

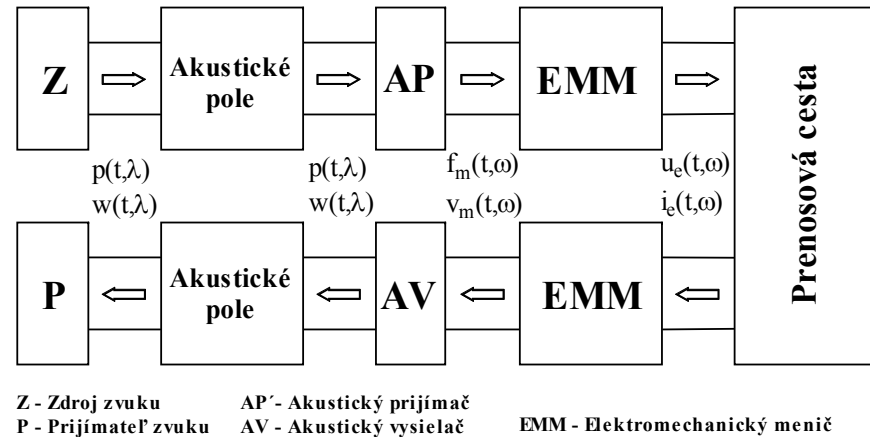


Z - Zdroj zvuku      AP - Akustický prijímač  
P - Prijímateľ zvuku      AV - Akustický vysielač      EMM - Elektromechanický menič

- priestor, v ktorom sa šíri zvukové (akustické) vlnenie
  - akustické pole jediného zvukového zdroja
  - akustické pole viacerých zvukových zdrojov – princíp superpozície

# Akustický přijímač

- **reálný**
  - membrána
  - páska
  - ...
- **teoretický**
  - nultého rádu (bodový přijímač)
  - prvního rádu
  - druhého a vyšších rádu
  - rady a polia bodových akustických přijímačů



# Akustické vysielateľe

- reálne

- mechanické

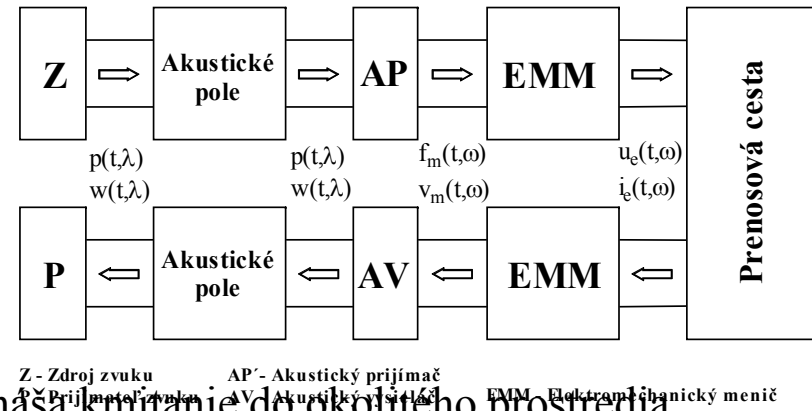
- kmitajúce telesá – ich povrchom sa prenáša kmitanie do okolitého prostredia
  - membrány, struny, ...
- nárazy a trenie telies

- aerodynamické

- turbulentné prúdenie vzduchu (voľné resp. v trubici/štrbine)
- obtekanie telies prúdom vzduchu

- teoretické (matematické modely)

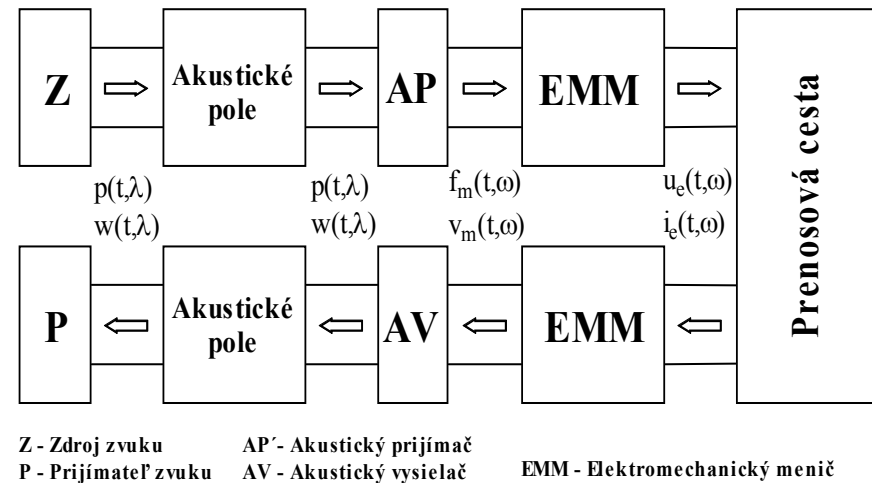
- pulzujúca guľa (bodový vysielateľ, vysielateľ nultého rádu)
- akustický dipól (vysielateľ prvého rádu)
- sférické vysielateľe druhého a vyšších rádov
- rady a polia bodových zdrojov
- priamkové, valcové a piestové vysielateľe





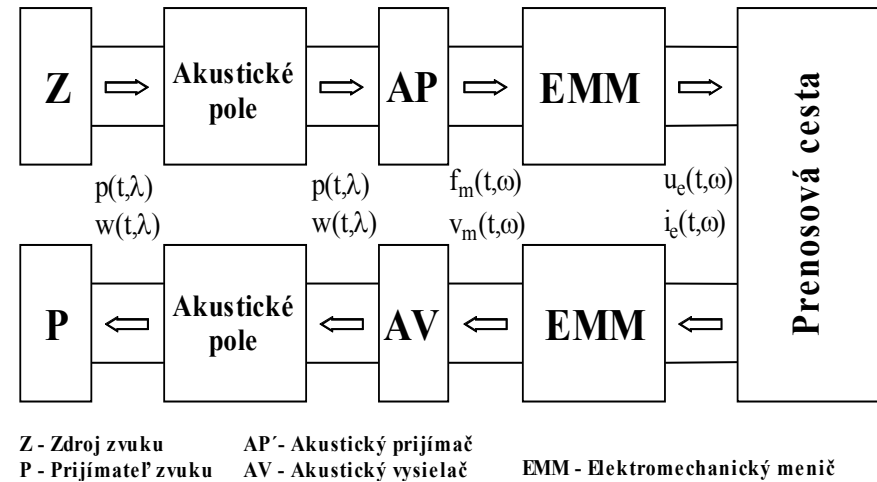
# Elektromechanický menič

- podľa fyzikálneho princípu činnosti
  - elektromagnetický
  - elektrodynamický
  - elektrostatický
  - piezoelektrický
  - ...
- podľa smeru premeny energie
  - jednosmerné (nerecipročné)
  - obojsmerné (recipročné)
- ...



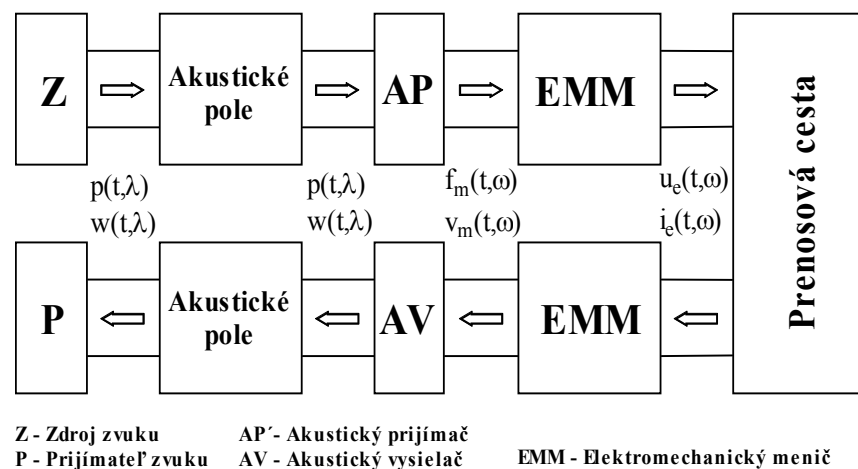
# Prenosová cesta

- obvody elektronického spracovania
  - zosilňovače
  - efektové procesory
  - AD/DA prevodníky
  - ...
- záznamové systémy
- drôtové a bezdrôtové prenosové cesty
- meracie prístroje
- riadiace a kontrolné obvody
- ...



# Prijímateľ zvuku: človek

- sluchové ústrojenstvo človeka – premena zvukového vlnenia na nervové vzruchy (elektrické signály) auditórnych nervov – fyziologická akustika
- mozog – tvorba zvukového obrazu - psychoakustika



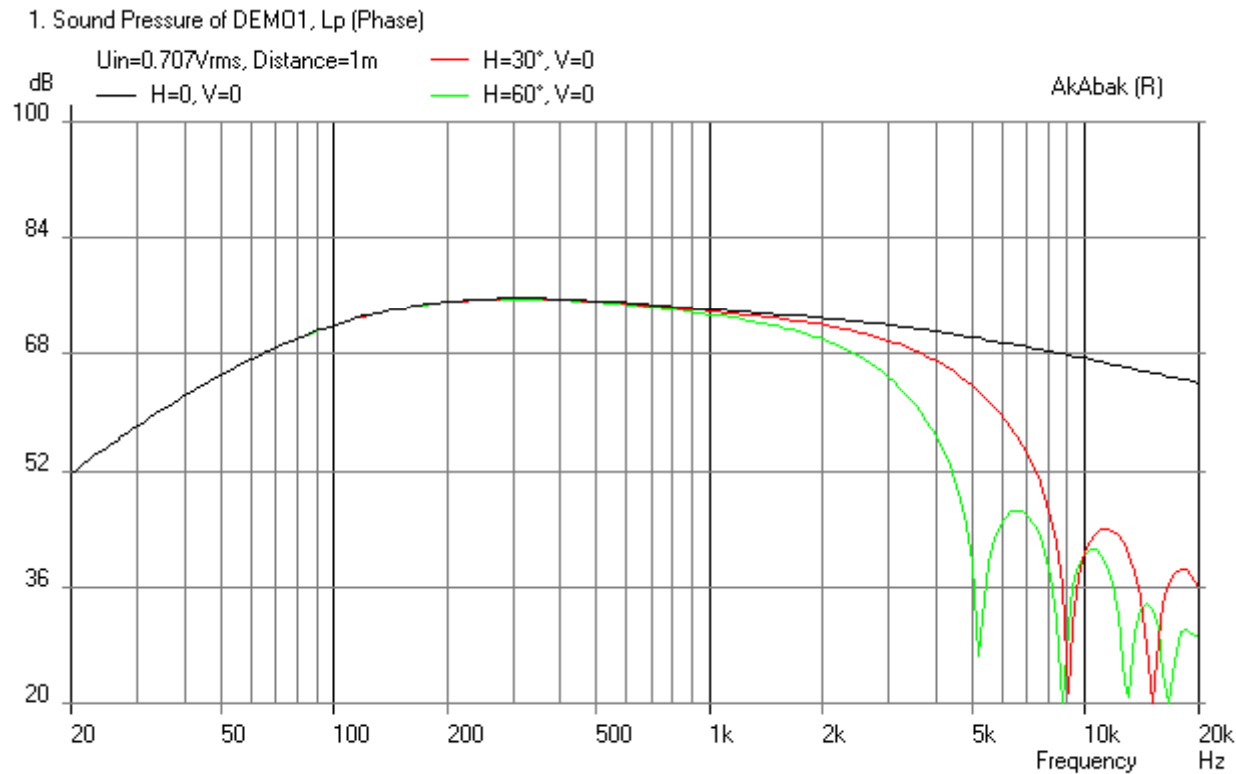
# Subsystémy zvukového systému

- Ozvučovací/prizvučovací systém
  - slúži na zásobovanie ohraničeného priestoru zvukovým signálom v reálnom čase
  - ak je v ozvučovanom priestore aj samotný zdroj zvuku, hovoríme o prizvučovacom systéme.
- Systém na reprodukciu zvuku
  - zosilňujú zvukový signál zo záznamového zariadenia alebo zo vzdialeného zdroja (bezdrôtový alebo drôtový rozhlas);
- Syntetizátorové systémy
  - systémy s umelými zdrojmi zvuku (hudobné a hlasové syntetizátory)
  - "speech privacy systems", ktoré slúžia na maskovanie ľudskej reči šumom
- Pamäťové systémy
  - záznamové zvukové systémy všetkých druhov
- Meracie systémy
  - elektroakustické meracie prístroje (ale aj metódy merania), ktoré sa používajú na meranie parametrov zvukového systému tak v jeho elektronickej ako aj akustickej časti
  - môžu byť prenosné alebo môžu byť stálou súčasťou zvukového systému (v jeho kontrolnej a riadiacej časti);
- Riadiace a kontrolné subsystémy
  - používajú sa na kontrolu a riadenie iných častí zvukového systému (napr. automatická regulácia hlasitosti ovládaná hladinou šumu v miestnosti, systémy na zamedzenie akustickej spätnej väzby apod.)
- Komunikačné subsystémy
  - zabezpečujú prepojenie dvoch alebo viacerých lokálnych alebo vzdialených (remote) zvukových systémov
  - (prepojenie dvoch konferenčných miestností, audio-konferenčné systémy, prepojenie zvukových štúdií v rámci lokálnej alebo rozľahlej počítačovej siete a pod.).

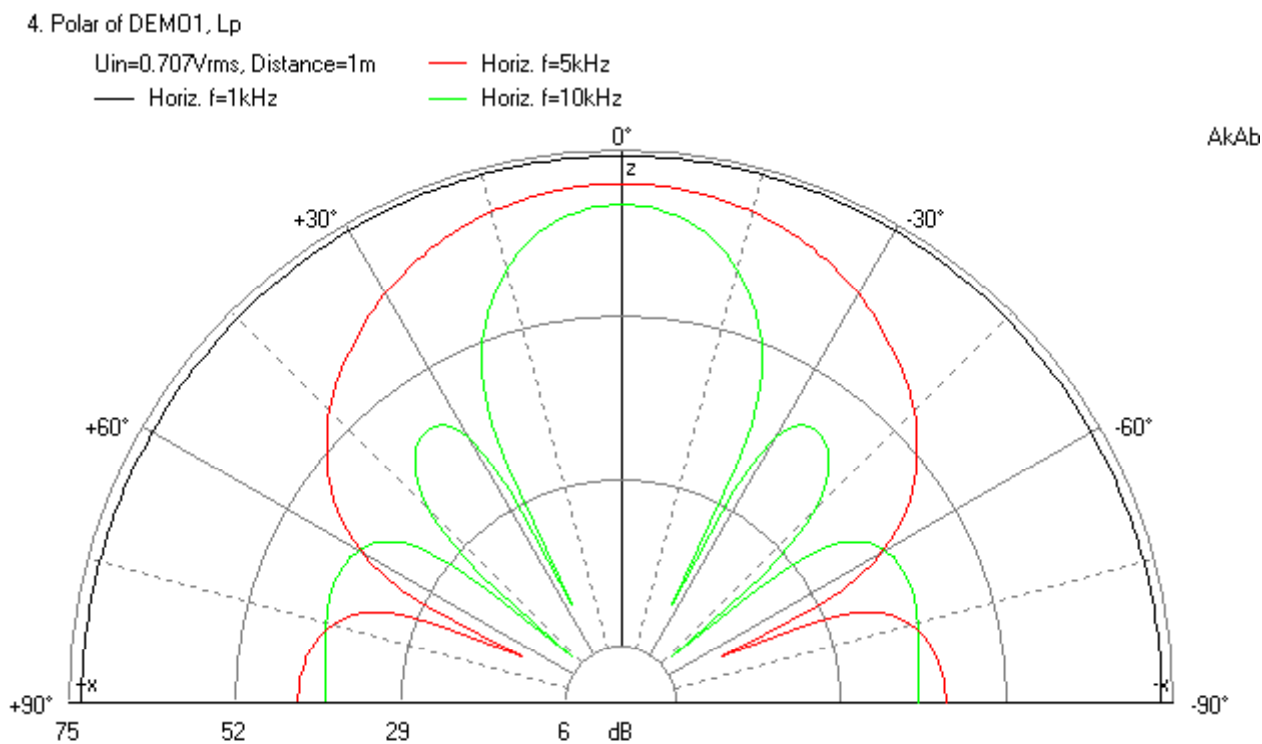
# Charakteristiky elektroakustického systému

- zvukové vlnenie ako signál a jeho charakteristiky
  - časový priebeh signálu
  - frekvenčné spektrum signálu
  - nelineárne skreslenie
  - dynamický rozsah
  - štatistické charakteristiky (...)
  - ...
- charakteristiky čiastkových komponentov (podsystemov) a celková charakteristika systému
  - impedančné charakteristiky (na vstupe a výstupe)
  - prenosové charakteristiky
    - amplitúdová (magnitúdová) frekvenčná charakteristika
    - fázová frekvenčná charakteristika
    - skupinové oneskorenie
  - prechodová a charakteristika
  - impulzová odpoveď
  - ...
- iné dôležité charakteristiky
  - vlastnosti materiálov (zvuková pohltivosť, vzduchová nepriezvučnosť, ...)
  - smerové charakteristiky ak. vysieláčov a prijímačov
  - doba dozvuku a dozvuková vzdialenosť
  - ...

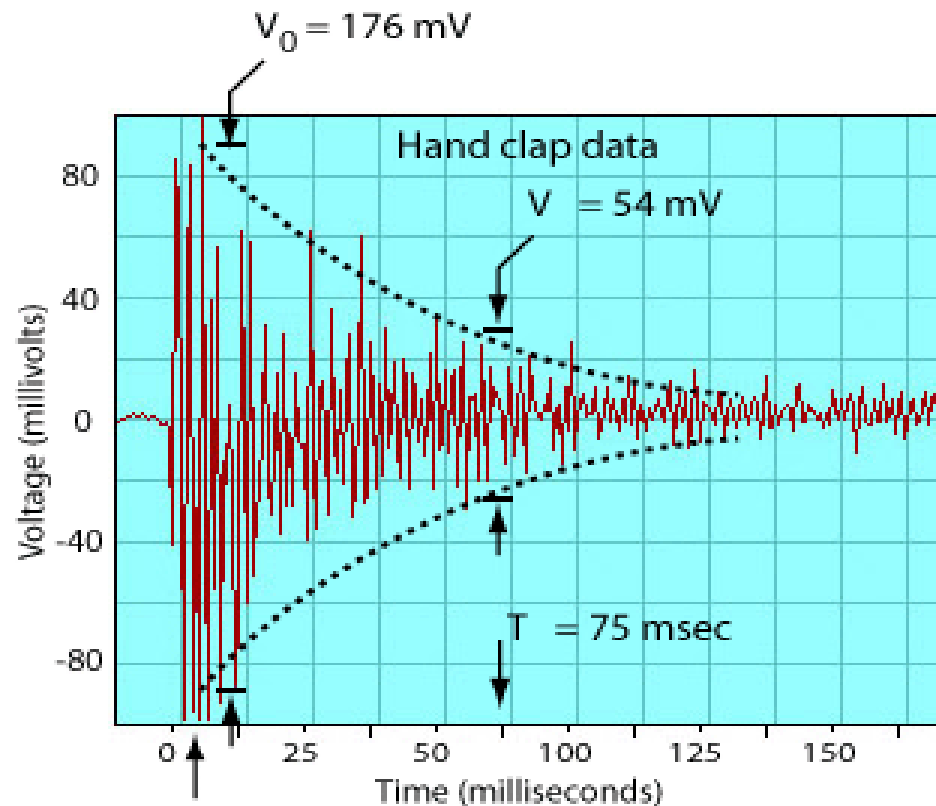
# Amplitúdová frekvenčná charakteristika nízkotónového reproduktora v zatvorenej ozvučnici



# Smerová charakteristika nízkotónového reproduktora



# Časový priebeh zvukového signálu pri meraní doby dozvuku

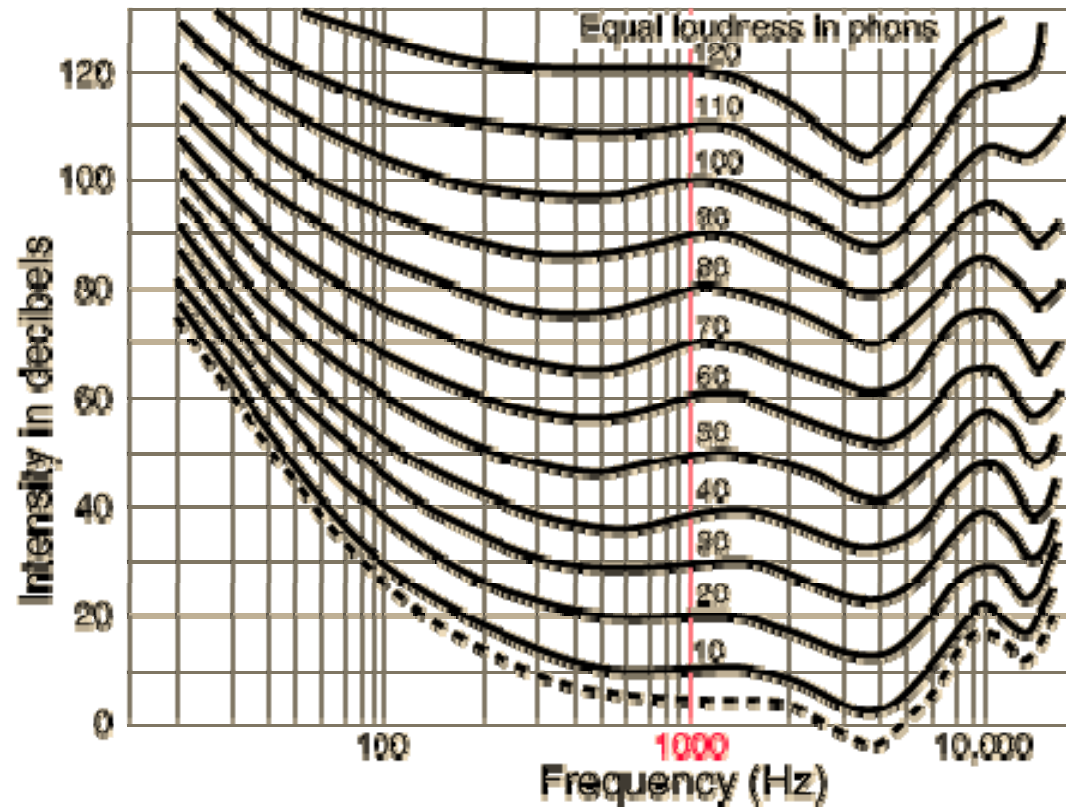


$T_0 = 5$  msec

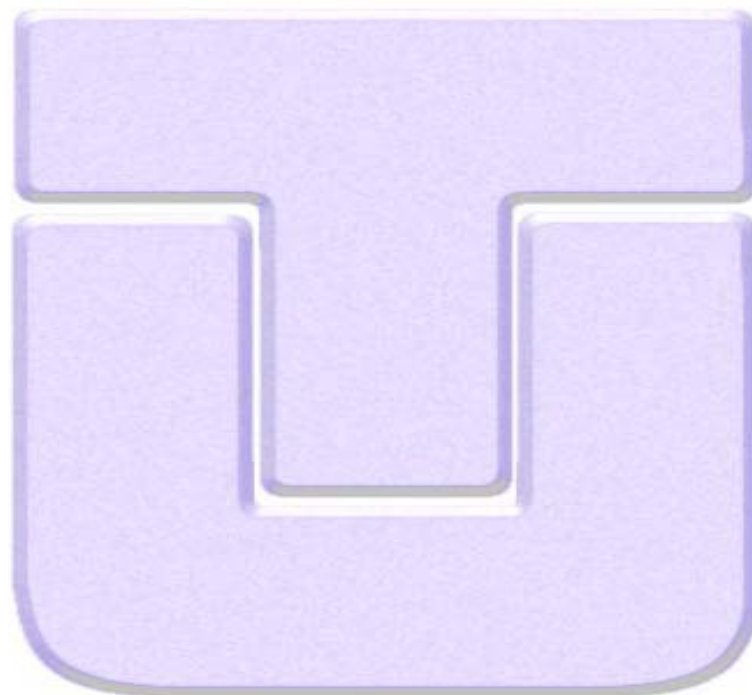
Estimate of Reverberation Time = 0.4 sec



# Krivky rovnakej hlasitosti



- ukazujú rozdiel medzi hladinou akustického tlaku (intenzity) a spôsobom jeho vnímania (percepce) sluchovým ústrojenstvom človeka
- uplatňujú sa aj pri technickom návrhu elektroakustických zariadení (fyziologické regulátory hlasitosti, moderné telefónne kodeky, kompresia audiosignálov, ...)



# Test

- Ako sa nazýva kniha, ktorú napísal John William Strutt, barón Rayleigh ešte v 19. storočí a je považovaná za jedno zo základných diel akustiky?
- Aký je základný rozdiel medzi pozdĺžnou a priečnou vlnou?
- Vlnová dĺžka zvuku sa s rastúcou frekvenciou:
  - a) zväčšuje
  - b) zmenšuje
  - c) nemení