

ZDROJE ZVUKU

Každé kmitajúce teleso s frekvenciou kmitania v akustickom pásme

Základná koncepcia:

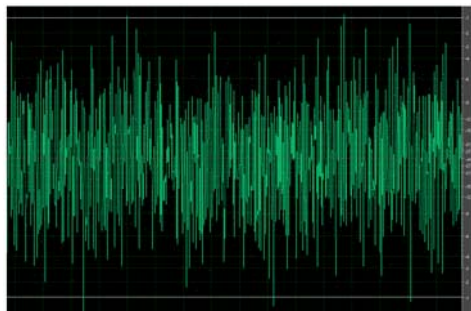
Rozdelenie:

generované spontánne/cielene, periodické/neperiodické, hudobné/nehudobné...

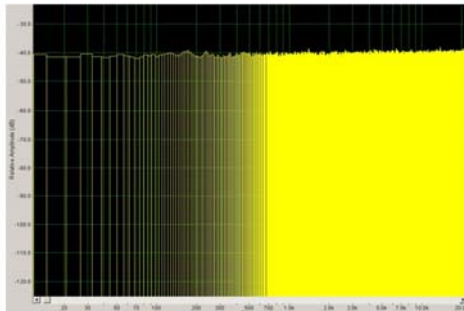
PRÍRODNÉ ZDROJE ZVUKU

- generované spontánne prírodnými javmi, obyčajne nehudobné (výnimky – napr. morský organ)
- Často: základ v náhodne generovanom šume, ktorý je vhodne amplitúdovo modulovaný a filtrovaný vo frekvenčnej oblasti
- kvantifikácia šumov – napr. poloha frekvenčného spektra
- Podobnosť so svetlom - označujeme rôzne šумы farbami

Biely šum: konštantná výkonová hustota v celom akustickom spektre - v celom frekvenčnom pásme na konštantnej impedancii má rovnakú strednú hodnotu amplitúdy:



a)



b)

Meracie účely, syntéza zvukov.

Šedivý šum (zelený šum) - filtrácia bieleho šumu filtermi rešpektujúcimi citlivosť ľudského ucha. Neutrálne šumové pozadie kde počujeme rovnomerne celé spektrum.

Ružový šum je filtrovaný tak, aby **každá októva** v rámci spektra mala **konštantný výkon**. Výkonová šírka spektra klesá rovnomerne s frekvenciou s hodnotou 3dB/okt., t.j. úroveň šumu klesá s koeficientom $k = f^{-1}$. Meracie účely (EA meniče).

Červený šum (hnedý šum). Úroveň amplitúdy šumu klesá so štvorcem frekvencie: $k = f^{-2}$ a teda 6 dB/okt. V prírode je generovaný vetrom, vlnobitím, morom a pod.

Zvyšovanie úrovne spektra s frekvenciou: **modrý šum** so zdvihom 3dB/okt. a **purpurový šum** s nárastom výkonovej úrovne s priebehom $k = f^2$ a teda 6 dB/okt.

Čierny šum: nulová úroveň šumu alebo šумы ležiace v oblasti infrazvuku: $k = f^{-\beta}$, kde $\beta > 2$. Pomalá zmena základnej hladiny šumu (tzv. dýchanie)

Ľudský hlas ako zdroj zvuku

Technicky: mechanizmus podobný jazýčkovým zvukozvučným nástrojom
Hlasivky (savce) - dve membrány s nastaviteľnou šírkou štrbiny, cez ktorú prúdi vzduch

Frekvenčné spektrum závisí na dĺžke hlasiviek (12 mm – 18 mm) a ich napínaní (špeciálne svaly)

Preladiteľnosť asi 1,5 oktávy (bežný človek), až do 3 oktáv (cvičený hlas)

Typ hlasu	Frekv. rozsah [Hz]	Tóny
detský	220 - 660	a - e2
soprán	246 - 1046	h - c3
mezzosoprán	200 - 880	g - a2
Alt/ kontraalt	164 - 660	e - e2
kontratenor	164 - 880	e - a2
tenor	123 - 530	H - c2
Barytón/basbarytón	98 - 392	G - g1
Bas/kontrabas	82 - 329	E - e1

Formanty – rezonančné pásma, zvyrazňujúce vyššie harmonické (max.4 kHz)

Farba hlasu: tvarovaná rezonanciou hltanovej dutiny (400 Hz), nosnej, a ústnej dutiny (hlavný formant, preladiateľný polohou jazyka, zubov a pier v rozsahu približne od 170 Hz do 3700 Hz)

Prídavná modulácia perami, zubami, jazykom, pridávaním neperiodických zložiek a šumu do signálu (jazyk)

Artikulácia zmenou formantov a prídavnou moduláciou:

- vytváranie vokálov – a,e,i,o,u
- konsonánt – b,m,s,t
- perné hlásky (p, b,.. „pops“) – problém pri snímaní v blízkom poli

Samohlásky: Prelaďovanie ústnej dutiny: základná frekvencia závisí na type rečníka, ale nezávisí na vyslovenej samohláske

Spoluhlásky: amplitúdová modulácia prúdu vzduchu perami, jazykom a medzerami medzi zubami

Horný koniec frekvenčného pásma: 10 kHz – 14 kHz (sykavky)

Pri šepkaní sú hlasivky uvoľnené a základný tón nevzniká, zvuk je tvarovaný len rezonančnými dutinami

Vnímanie vlastného hlasu:

prenos chvenia hlasiviek k sluchovému orgánu viac prostredníctvom tvrdých častí hlavy ako odrazmi od okolia - prenosová funkcia vnútorného systému hlavy je iná ako pri prenose voľným priestorom - vlastný reprodukováný hlas vnímame neprirodzene

HUDOBNÉ NÁSTROJE AKO ZDROJE ZVUKU

Hudobný zvuk: cielene generovanie periodického signálu s frekvenciou vyvolávajúcou v sluchovom orgáne človeka zvuk určitej výšky - ako **tóny**

Frekvenčný rozsah hudobných zvukov: 16 Hz ... 4500 Hz základné pásmo, do 20 kHz a viac vyššie harmonické – alikvotné tóny, formanty, zákmitové javy a pod.

Rozpätie vnímaných frekvencií 1: 1000, človek vníma frekvencie **logaritmicky**

Absolútna výška tónu – vnímateľná len vybranými jedincami

Relatívna výška tónu: pomer k referenčnému tónu 440 Hz („komorné a“)

Oktáva – pomer frekvencií 1:2, pôvodne 8 tónov

Delenie oktávy na tóny dané spôsobom vytvárania hudobnej stupnice

Snaha: súzvučnosť viac súčasne hraných tónov (konsonancia)

Pytagoras: frekvencie tónov v pomere malých celých čísiel sú súzvučné – **čisté ladenie**

Problémy pri rôznych hudobných stupniciach – kompromis: geometricky rovnomerné, tzv. **temperované ladenie**, 8 tónov, 5 poltónov: Intervaly

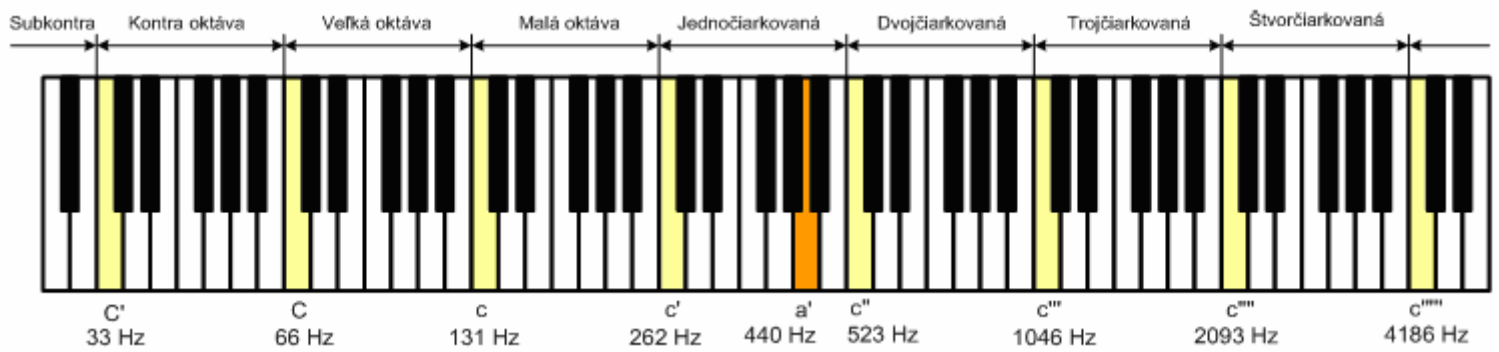
delenia oktávy: **poltóny:** $q = \sqrt[12]{2} = 1,059463$

Centy: $1\text{cent} = 100\sqrt[100]{q} = 1200\sqrt[1200]{2}$

Trénované ucho: odchýlka v ladení niekoľko centov
(1 cent medzi h^1/c^2 predstavuje 0,016 Hz!!!)

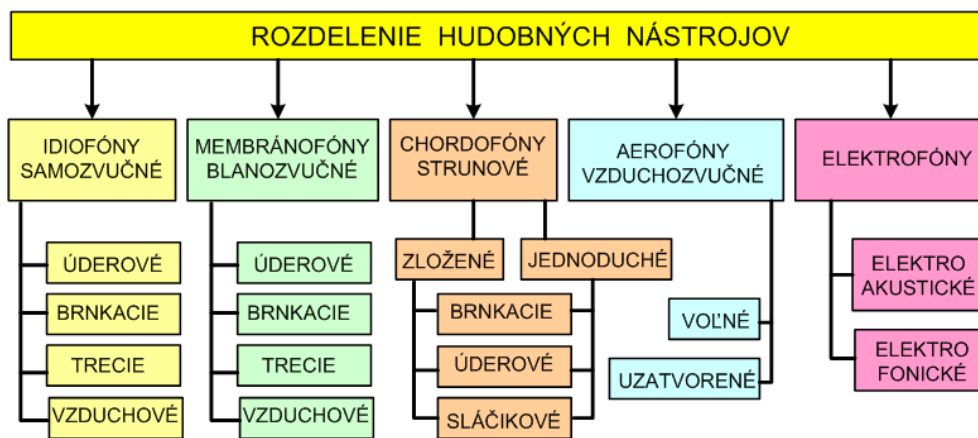
Tón	Čisté (pytagorejské) ladenie			Temperované ladenie (c-dur)	
	f [Hz]	Pomer susedných tónov	Pomer oproti tónu c ¹	f [Hz]	Pomer oproti tónu c ¹
c ¹	264	-	1,000000	261,6	1,000000
c ¹ is				277,2	1,059463
d ¹	297	9/8	9/8 = 1,125000	293,7	1,122462
d ¹ is				311,1	1,189207
e ¹	330	10/9	5/4 = 1,25000	329,6	1,259920
f ¹	352	16/15	4/3 = 1,33333	349,2	1,334839
f ¹ is				370,0	1,414213
g ¹	396	9/8	3/2 = 1,50000	392,0	1,498306
g ¹ is				415,3	1,587400
a ¹	440	10/9	5/3 = 1,66666	440,0	1,681791
a ¹ is				466,2	1,781796
h ¹	495	9/8	15/8 = 1,87500	493,9	1,887747
c ²	528	16/15	2/1 = 2,00000	523,2	2,000000

Rozsah základných tónov



Klasifikácia hudobných nástrojov podľa Sachsa a Hornbostela

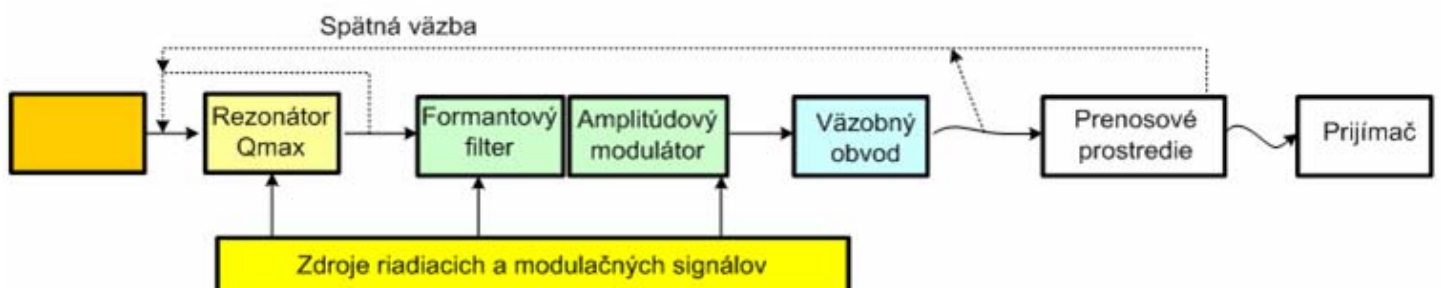
(od r. 1914 doteraz)



Všeobecné vlastnosti z hľadiska generovania zvuku:

- ✚ Vlnenie sa vždy pohybuje – šírenie pozdĺžne (longituálne) a priečne (transverzálné)
- ✚ Superpozícia niektorých vlnení má extrémny na rovnakom mieste – stojaté vlnenie
- ✚ Prostredie v ktorom sa vlny odrážajú od zakončení zdrojového média vždy závisia na vlastnostiach média – rezonančné frekvencie média
- ✚ Rovnomerne rozložené uzly (nulový pohyb) a kmitne (antinódy, max. rozkmit)
- ✚ Viacrozmerné šírenie – superponované vlnenie nemusí byť periodické
- ✚ Základná frekvencia a alikvotné tóny (vyššie harmonické)
- ✚ Obálka výkonovej úrovne signálu (attack, decay, sustain, release)
- ✚ Tvar obálky periodického signálu (zázneje a pod.)
- ✚ Aby bol zvuk laditeľný, frekvencia vlnení na všetkých módoch musí byť periodická, módy ako celočíselné násobky základnej frekvencie

Všeobecná bloková schéma zdroja (aj) zvuku:



Samozvučné nástroje (Idiofóny): tón vzniká vibrovaním celého nástroja alebo jeho súčastí. Niektoré perkusné a bicie nástroje okrem bubnov. Podľa spôsobu vybudenia:

- **Úderové**, nástroj sa rozoznieva úderom. (Činely, xylofón, triangel, gong, vibrafón, zvonkohra, kastanety a pod.)
- **Brnkacie**, nástroj rozoznievajú jazýčky alebo doštičky (drumbľa)
- **Trecie**, zvuk vzniká vzájomným trením jeho častí, nie strún. (Sklenená harmonika, Kanadská píla.
- **Vzduchové**, prúd vzduchu rozochvieva celý nástroj.



Strunozvučné nástroje (chordofóny) vytvárajú zvuk pomocou kmitajúcej struny napnutej medzi dvoma bodmi. Rozdelenie:

- ✚ **jednoduché** chordofóny (rezonátor je doplnok)
- ✚ **Zložené chordofóny** (rezonátor je nevyhnutná súčasť).

Podľa aktivácie rezonátora:

- ✚ **brnkacie** - struna sa rozochvieva brnkaním prstami/brnkátkom /mechanikou nástroja (napr. akustická gitara);
- ✚ **úderové** - struna sa rozochvieva udieraním paličkami, kladvkami, a pod. (klavír, čembalo, cimbali, ...);
- ✚ **sláčikové** - tón sa vyludzuje pohybom sláčika po strune (husle, viola, violončelo, ...).

Mechanizmus generovania tónu:

- ✚ Struna uchytená na koncoch – v bodoch uchytenia uzly, pre základný mód kmitňa v strede
- ✚ Mechanizmus kmitania struny závisí na spôsobe aktivácie struny - je pomerne komplikovaný, vzniká torzné aj priečne vlnenie, rotácia struny a pod. Vytváranie vlnenia len v jednej dimenzii – líniový zdroj
- ✚ Struna - vysoko selektívny rezonátor

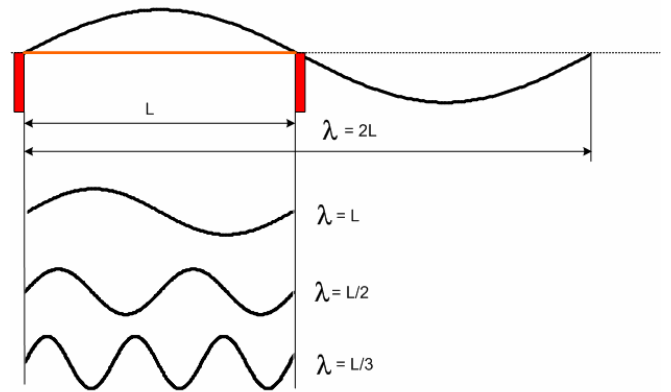
Rýchlosť šírenia vlny v strune: úmerná napnutiu struny a nepriamo úmerná mernej hmotnosti:

$$c = \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad [\text{m}\cdot\text{s}^{-1}, \text{N}, \text{kg}\cdot\text{m}^{-1}]$$

(Oceľová struna 1 mm ($\rho = 7800 \text{ kg.m}^{-3}$), napnutá silou $F = 500 \text{ N}$. Merná hmotnosť struny 1 mm: $\mu = 6,123 \cdot 10^{-3} \text{ kg.m}^{-1}$, rýchlosť šírenia priečnej vlny $c = 285,8 \text{ m.s}^{-1}$.)

Frekvencia základnej, prvej harmonickej:

$$f = \frac{1}{2.L} \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad [\text{Hz, m, N (=kg. m.s}^{-2}\text{), kg.m}^{-1}]$$



Vyššie harmonické: celočíselné násobky

Počet a amplitúda závisí na spôsobe vybudenia:

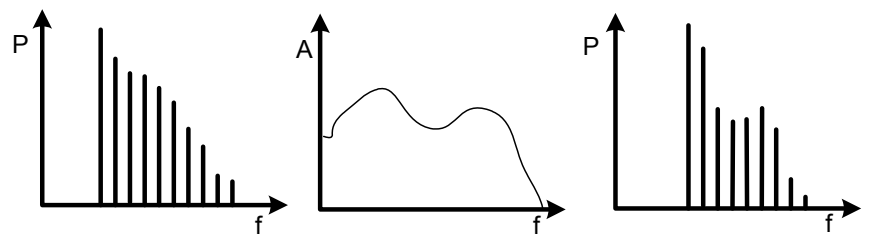
- + Tvrдый/predmet – viac/menej harmonických
- + Sláčik – závisí na polohe sláku, prítlaku, rýchlosti pohybu

Akustický skrat – extrémny pomer priemeru struny a vlnovej dĺžky

Prídavný akustický rezonančný prvok – **ozvučnica**:

- + Odstránenie akustického skratu
- + vlastná frekvenčná charakteristika a jej podiel na zvuku
- + podiel na doznievaní zvuku (tlmenie ozvučnice podľa charakteru nástroja a energie kmitajúcich častí)

Husľoví majstri – talianska škola 17. st. Stradivari a pod.



Frekvenčné spektrum generované zdrojom, vlastnosti rezonátora a výsledné spektrum

Vzduchozvučné nástroje (aerofóny): telo nástroja samo nekmitá - kmitá len:

- + vzduchový stĺpec vo voľnom priestore (bez vzduch. stĺpca, tzv. *voľné aerofóny*), alebo
- + vzduchový stĺpec je ohraničený nástrojom - čelá vzduchového stĺpca sú jednostranne alebo obojstranne otvorené.

Voľné aerofóny bez vzduchového stĺpca:

- + Okarina – Helmholtzov rezonátor, ladený otváraním dier – viac otvorených, väčšia hmota vzduchu – nižšia frekvencia)
- + Harmonika a akordeón – aktívne rezonátory **jazýčky** (reeds).

Uzatvorený vzduchový stĺpec:

Základný typ vlnenia - stojaté vlnenie, chvenie vzduchového stĺpca vznikajúce odrazom na konci stĺpca + rad prídavných priečných a pozdĺžnych vlnení, ktoré ovplyvňujú farbu a kvalitu zvuku nástroja.

Podľa materiálu a konštrukcie:

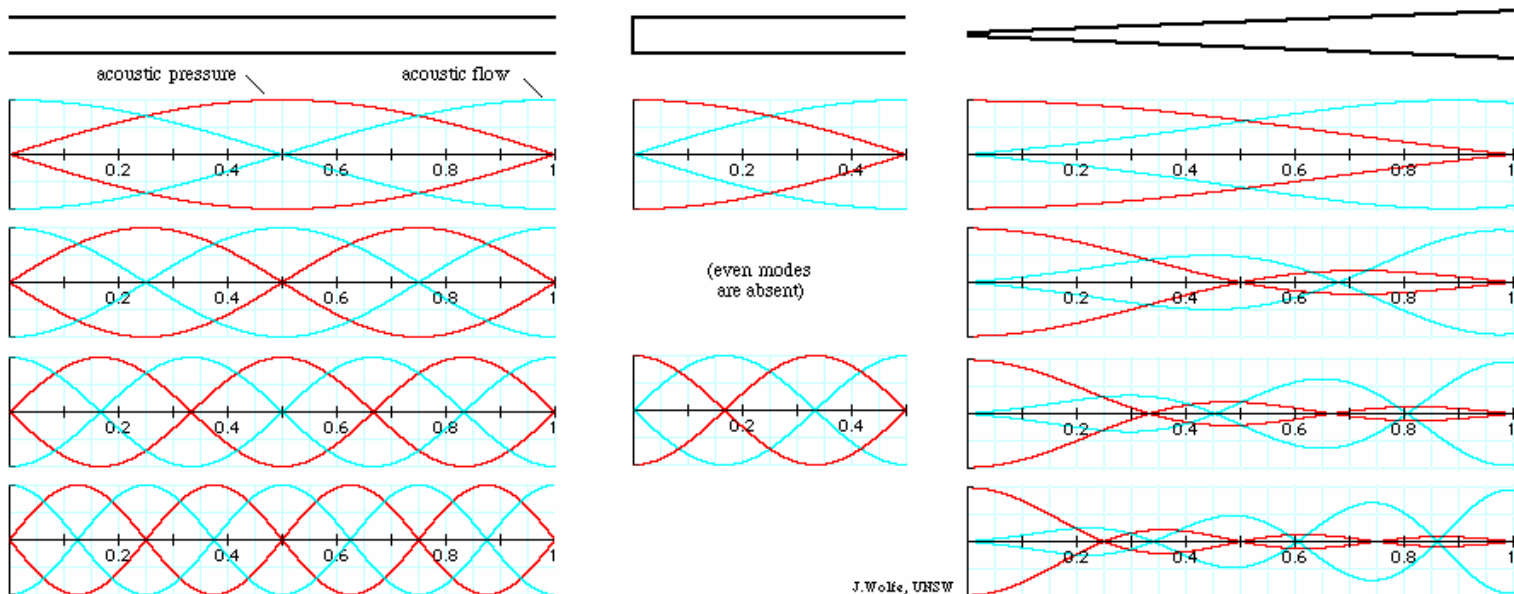
- ✚ **Drevené nástroje** (Woodwinds) – ladenie zmenou dĺžky vzduchového stĺpca (dierky)
- ✚ **Dychové plechové nástroje** (Brass) – priama mechanická zmena (posunom trubiek, ventilmi) + väzobný obvod (selektívny člen, akustický transformátor zmena frekvenčnej charakteristiky a impedancie "dusítkom")

Akustický systém tvorí:

- ✚ **zdroj chvenia** zvukového stĺpca (prechod vzduchu z nátrubku cez ostrú hranu, rozkmitanie vzduchu chvením pružného jazýčka alebo perami hudobníka)
- ✚ **akustický rezonátor** - vzdušná dutina uzatvorená v tubuse – dominuje jeden rozmer \Rightarrow prevážne jedna dimezia vlnenia
- ✚ **ozvučnica (niekedy) a väzobný obvod.**

Súčinnosť všetkých troch prvkov ovplyvňuje: efektívnu dĺžku vzduchového stĺpca, jeho impedanciu a rozloženie uzlov a kmitní.

- ✚ Výrazný rozdiel akustickej impedancie tubusu a okolia
- ✚ Uzatvorený/otvorený koniec tubusu – poloha kmitní akust. tlaku
- ✚ Válcový alebo kužellový tvar – vplyv na charakter alikvotných tónov.



Frekvencia základného tónu generovaného vzduchovým stĺpcom **v otvorenej píšťale** je možné, podobne ako pri strune vyjadriť vzťahom:

$$f = \frac{1}{2.L} \sqrt{\frac{\chi \cdot p}{\rho}} = \frac{c}{2.L} \quad [\text{Hz, m, N.m}^{-2}, -, \text{N.m}^{-2}, \text{kg.m}^{-3}; \text{m.s}^{-1}, \text{m}]$$

χ - adiabatická konštanta plynu, pre vzduch $\chi = 1,4$

p - tlak plynu [Pa, N.m⁻²]

ρ - merná hustota vzduchu [kg.m⁻³]

c - rýchlosť šírenia zvuku vo vnútri tubusu (neadiabatický dej, korekcia fyzickej dĺžky o hodnotu +0,6.D (priemer tubusu)).

- ✚ Umiestenie uzla na konci stĺpca – podmienka splnená pre všetky harmonické signály so sínusovým priebehom a dĺžkou vlny rovnou $2L/n$, kde n sú celé čísla $1, 2, \dots, n \Rightarrow$ generujú sa všetky vyššie harmonické
- ✚ Farba zvuku závisí na vlastnostiach rezonátora/ozvučnice
- ✚ Regulácia efektívnej dĺžky vzduchového stĺpca – otváraním dierok na nástroji
- ✚ Prefúknutie – potlačenie základného módu a generovanie len vyšších harmonických
- ✚ Typické nástroje: flauta, pikola, fujara

Jednostranne uzatvorený stĺpec - dĺžka vlny dvojnásobná, **frekvencia zvuku polovičná**

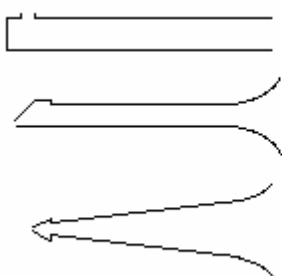
Rozloženie uzlov a kmitní - generovanie harmonického signálu kosínusového priebehu - **len nepárne harmonické frekvencie**

Premenlivý prierez vzduchového stĺpca:

- ✚ priebežná zmena akust. rýchlosti a tlaku – posun kmitní a uzlov – iné rozloženia alikvotných tónov
- ✚ prispôsobenie akustickej impedancie vnútri tubusu na okolie – účinnosť vyžarovania

Rozelenie aerofónov podľa budenia akustického poľa:

- ✚ Budenie prúdením vzduchu cez hranu
- ✚ Kmitaním pružného jazýčka – vzduch alebo do jazýčka naráža, alebo ho obteká – vlastnosti a ladenie určuje jazýček v spolupráci s rezonátorom - tubusom
 - Materiál jazýčka:
 - Mosadz (napr. harmónium, akordeón, ústna harmonika)
 - drevo (klarinet)
 - trstina (fagot, hobo, anglický roh)
- ✚ modulovaním prúdu vzduchu perami hráča (plechové nástroje, brass) – prevaha párnych harmonických



Flauta

Klarinet

Hoboj

Najdokonalejší aerofónny nástroj – **organ**

Základné časti:

- ✚ **píšťaly** umiestené v hracom stroji, pedálovom stroji (basové píšťaly) a na prospekte (viditeľná časť hracieho stroja),
- ✚ **hrací stôl** vybavený klaviatúrou a výberom zvukových registrov,
- ✚ **traktúra** zabezpečujúca prenos signálu z hracieho stola do ovládania píšťal a
- ✚ **vzduchový systém** počnúc ventilátorom cez zásobníky vzduchu, rozvody a ventily.

Farba zvuku píšťal ovplyvňuje:

- ✚ materiál, z ktorého sú vyrobené (obyčajne cín alebo drevo)
- ✚ pomer hĺbky píšťaly k jej dĺžke – menzúra.
 - úzka menzúra (1:15 až 1:25) - viac harmonických frekvencií, ostrejší zvuk
 - drevené píšťaly a píšťaly so širokou menzúrou (1:6 až 1:10) – mäkkší zvuk, dominuje viac základný tón a nižšie harmonické

Membránofóny

Blanozvučné nástroje (membránofóny): vzniká tón kmitaním napnutej blany – membrány (koža, plastická hmota)

Membrána nemá exaktne stanovenú rezonančnú frekvenciu - doplnenie rezonančnou dutinou

Objem dutiny spolu s napnutím blany definujú základnú harmonickú, ktorá sa objaví v spektre signálu vyvolaného úderom na blanu. Podľa mechanizmu aktivácie membrány delíme blanozvučné nástroje na:

- *Úderové*, kde sa membrána rozochvieva priamym úderom na ňu (napr. tympány, tamburína);
- *Brnkacie*: Bubny s pripevnenou strunou, ktorej pohyb rozochvieva membránu (malý bubon);
- *Trecie*: Bubny a iné nástroje s blanou, ktoré sa namiesto udierania trú, či už rukou alebo paličkou;
- *Vzduchové* (mirlitony): Rozoznievajú sa prúdom vzduchu, avšak nevydávajú vlastný tón ale menia tón pomocou vibrujúcej membrány (Kazoo).



Frekvencia generovaného zvuku:

- ✚ Predpokladajme **kruhovú membránu** napnutú okolo pevného kruhu (analógia ukončenia struny na pevných koncoch)
- ✚ Membrána spojená s akustickým rezonátorom (dutinou, valcom,...)
- ✚ Membrána kmitá v **dvojrozmernom priestore**, odrazom vln od upevnenia vznik stojatých vln

- ✚ Dvojrozmerný priestor: uzly na kružniciach s konštantnými rozstupmi, medzi nimi kmitne – popis $\{m, n\}$ kde m je počet počet kmitní a n počet uzlov (n je vždy >0 - obvodové uchytenie blany)

Frekvencia jednotlivých módov:

$$f(m, n) = \frac{c \cdot j(m, n)}{2 \cdot \pi \cdot R} \quad c = \sqrt{\frac{T_s}{\rho}}$$

Kde T_s = sila napnutia membrány [$N \cdot m^{-1}$]

ρ = plošná merná hustota membrány [$kg \cdot m^{-2}$]

R = polomer membrány [m]

$j(m, n)$ je n -tý koreň Besselovej funkcie m -tého rádu

Módy	Relatívna frekvencia	Pomer frekvenčných zložiek
(0,1)	2,405 . c	1
(1,1)	3,837 . c	1,596
(2,1)	5,141 . c	2,142
(0,2)	5,520 . c	2,300

- ✚ Jednotlivé **módy generujú periodické** harmonické frekvencie (laditeľné), **zvuk ako celok je neharmonický**, neperiodický (teoreticky)

- ✚ Maximum energie býva na módoch (0,1), (0,2), (0,3)...(1,5)

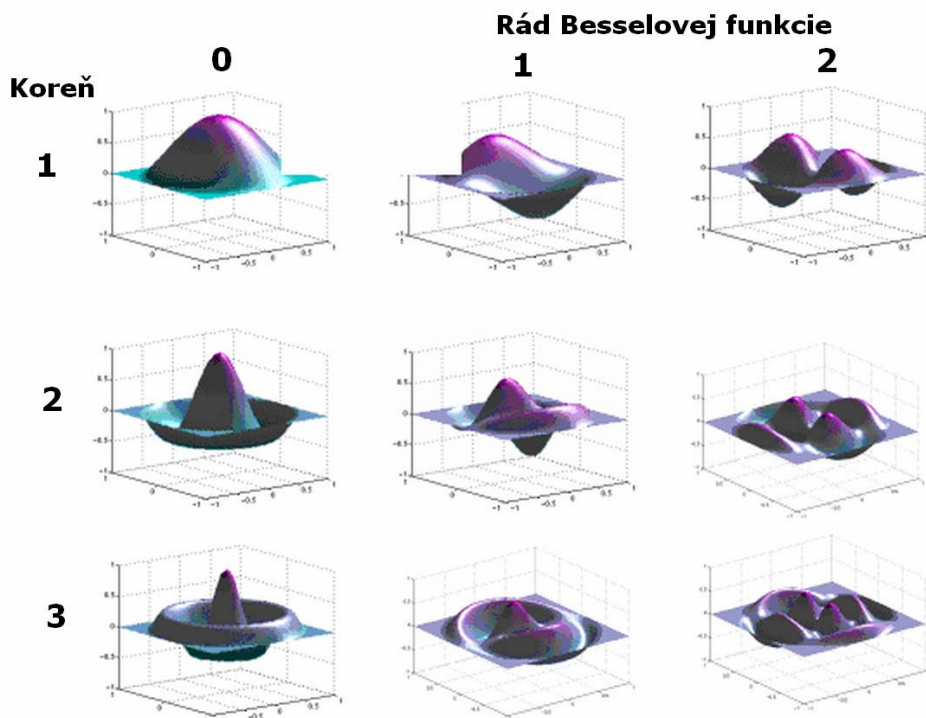
- ✚ Pre $m > 1$ strmý pokles energie

- ✚ Excitácia módov závisí i na mieste udretia do membrány

- ✚ **stred** – budí prevážne módy (0, n)

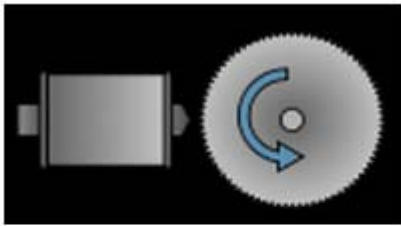
- ✚ **okraj** – mnoho módov s rýchlym poklesom, ostrejší zvuk

- ✚ **medzi** – módy (1,2), (2,2), (3,2) – neharmonické frekvencie



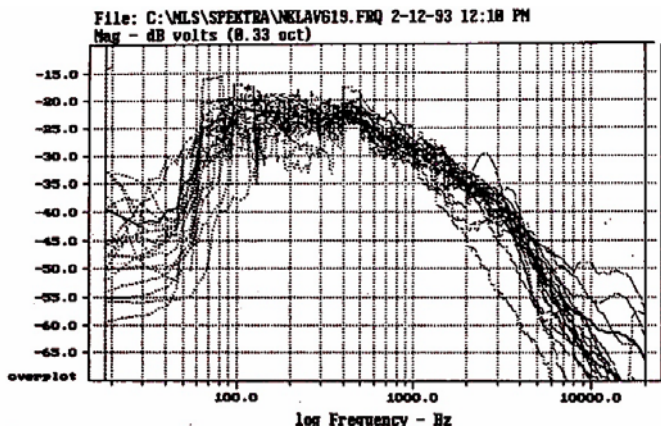
Elektrofóny - zvuk vzniká elektromechanicky alebo elektronicky

- ⚡ **Elektroakustické nástroje** - zvuk vzniká elektromechanicky a následne je zosilňovaný
 - ⚡ Bez prídavného zosilnenia je nástroj nefunkčný - elektrická gitara, Hammondov organ,...
- ⚡ **Elektronické nástroje** - zvuk vzniká výlučne elektronickou cestou - syntetizátory, samplery a pod.

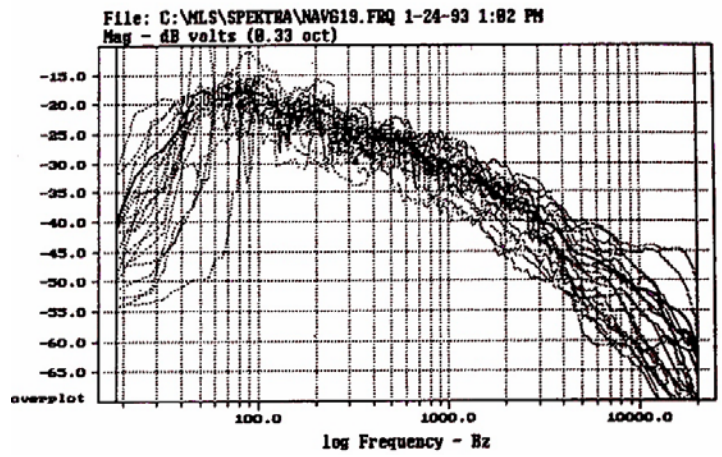


ZDROJ ZVUKU	ZÁKLADNÉ PÁSMO	VYŠŠIE HARMONICKÉ	ZÁKMITOVÉ JAVY
KLAVÍR	24 – 4 186	7 050	-
ORGAN	18 – 7 800	9 340	20 000
HUSLE	147 – 4 700	9 340	15 800
KONTRABAS	32 - 175	4 180	9 340
KLARINET	73 - 532	10 550	14 100
BUBON MALÝ	55 - 250	16 800	
BUBON VEĽKÝ	20 - 50	55 – 2 350	4 700
ČINELY		330 – 15 000	
TRIANGEL		2 100 – 16 800	
MUŽSKÝ HLAS	80 - 800	12 000	
ŽENSKÝ HLAS	120 - 1200	16 000	

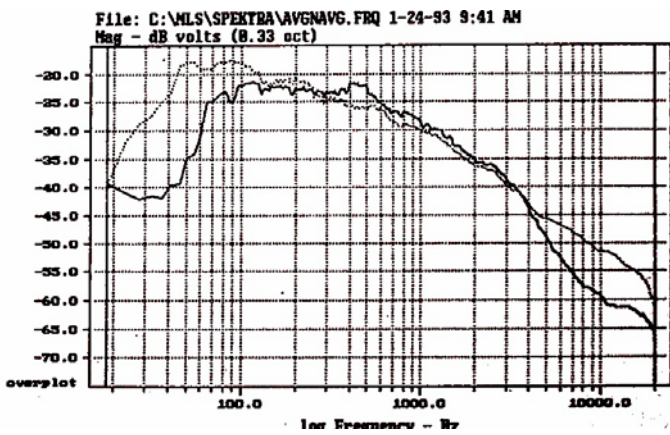
VÝKONOVÉ SPEKTRUM HUDOBNÝCH SIGNÁLOV



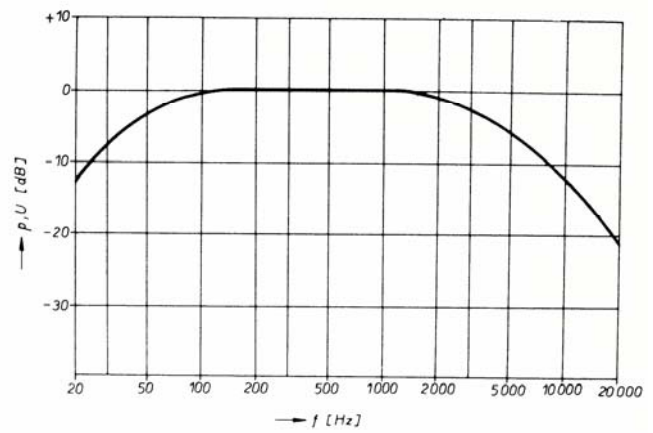
KLASICKÁ HUDBA



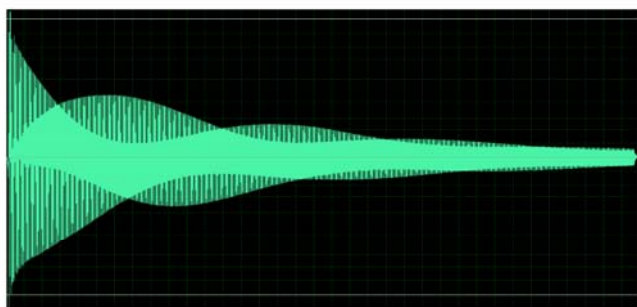
POP



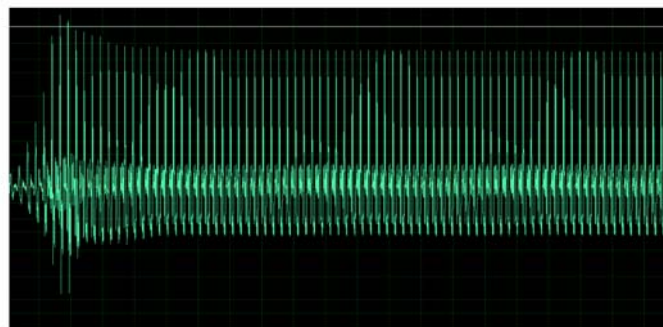
POROVNANIE SPEKTIER
KLASIKA/ POPULÁRNA HUDBA



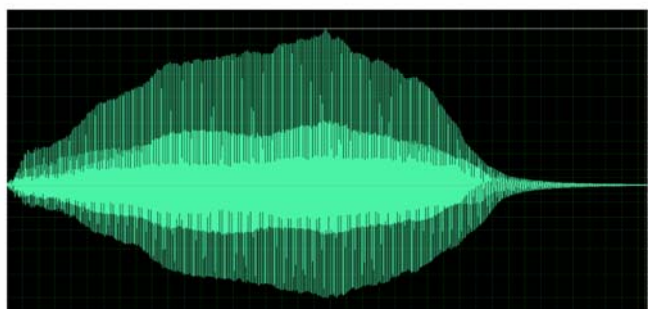
NORMALIZOVANÁ SPEKTRÁLNA
HUSTOTA TEST. SIGNÁLU (IEC)



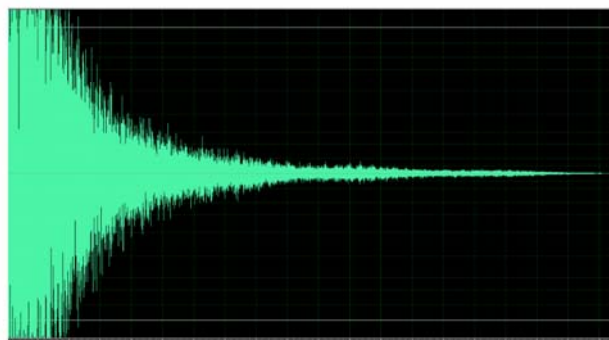
Basová gitara



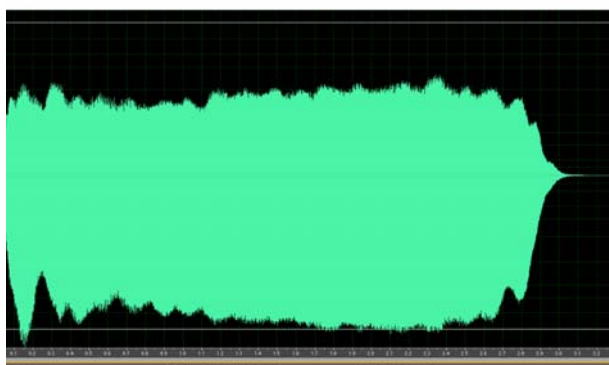
Altsaxofón



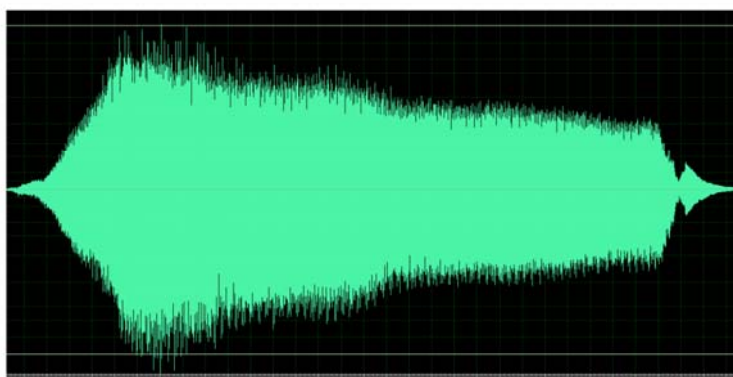
Violončello



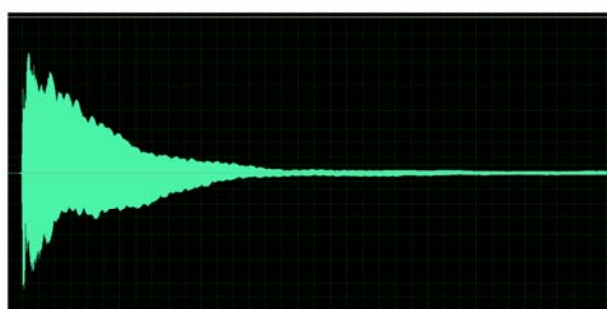
Činela



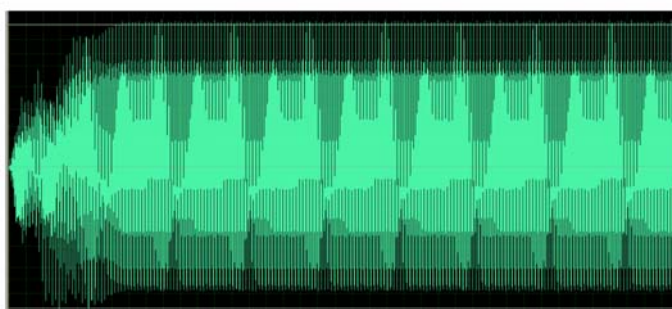
Flauta



Harmonika



Klavír



Organ

