

Šíření zvuku ve volném  
prostoru, zvukové signály

# Přenosový řetězec

„přirozený“:

zdroj – přenosové prostředí – přijímač (ucho)

se začleněním multimediální techniky:

zdroj – přenosové prostředí – mikrofon –  
záznam/zpracování/přenos - reproduktor –  
přenosové prostředí – přijímač (ucho)

# Aspekty zvukové techniky

zdroj – vysílač (přirozený/umělý)

tvorba řeči, tvorba hudby – hudební nástroje akustické a elektronické, mechanické kmity obecných ploch

teorie signálů (typy dle průběhu časového, kmitočtového, transformace..)

přenosové médium – šíření zvuku v prostoru, prostorová akustika, návaznost na architekturu

záznamová a přenosová technika (záznamové a kompresní formáty, přenosové protokoly)

elektroakustické měniče – mikrofony a reproduktory

přijímač – ucho – fyziologická, psychologická a hudební akustika = vliv na člověka

# Disciplíny pokrývající daná témata

obecné šíření zvuku – fyzikální akustika

měníče (reproduktory, mikrofony..) – elektroakustika

vlastnosti sluchového systému – fyziologická akustika

vnímání zvuku a jeho působení na člověka – psychologická akustika

hudební nástroje, hudební signály – hudební akustika

šíření zvuku v uzavřených prostorech, úprava akustiky prostoru – prostorová akustika

typy akustických signálů, transformace a kódování – zpracování akustických signálů

záznam signálu

...další příbuzné obory:

stavební akustika (zvuková izolace prostorů)

akustika řeči (tvorba řečového signálu)

akustická emise (nedestruktivní testování materiálu)

psychometrie (psychologické testování (i akustických) signálů)

...

# Terminologie

**Zvuková technika** = audio technika

popisuje podstatu zvuku, jeho šíření a prostředky, kterými se generuje nebo přijímá, tedy popis vlastností celého zvukového přenosového řetězce

**Akustika** = (z řeckého akuo – slyším)

se zabývá všemi oblastmi, kde se vyskytuje jakékoli obecné mechanické kmitání

Zvuk = mechanické kmity kontinua

jeden z prostředků komunikace člověka (proto mnohdy se přidává do definice slyšitelné spektrum 20 Hz-20kHz)

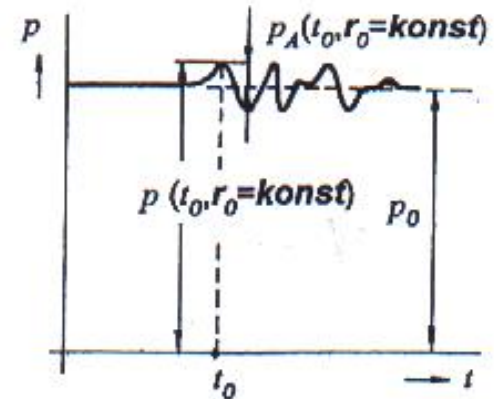
- s dalšími lidmi: řeč (informace, melodika řeči),  
hudba, jiné zvuky
- s prostředím: hlukové signály (orientace v prostoru,  
upozornění na nebezpečí)

# Zvuk a jeho podstata

zvuk = mechanické kmity kontinua, tedy v plynné, kapalně i pevné fázi.

MY SE NYNÍ OMEZÍME NA ZVUK VE VZDUCHU

akustický tlak = změny celkového tlaku



Obr. 1.1.2 Akustický tlak  $p_A$ .



akustický tlak  $p_a$  se udává v Pascalech (Pa), ale obvyklejší je

HLADINA AKUSTICKÉHO TLAKU  $L_{SPL}$

$$L_{SPL} = 20 \log \frac{p_a}{p_{ref}} \quad [\text{dB}]$$

$p_a$ ...efektivní hodnota  
akustického tlaku

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

proč logaritmus (hladina) : psychofyzologie vnímání,  
člověk vnímá logaritmicky (Weberův a Fechnerův zákon)

proč taková volba reference :  $p_{ref}$  je přibližná hodnota prahu  
slyšitelnosti v okolí 2 kHz

proč DECibely: 1 dB je přibližně hodnota JND (právě  
postřehnutelný rozdíl)

- 132 decibelů  
punková kapela Gallows
- 130 decibelů  
startující letadlo Boeing 747  
vzdálené sto metrů
- 126 decibelů  
The Who, koncert 1976
- 122 decibelů  
dudácká kapela
- 120 decibelů  
pneumatické kladivo
- 110 decibelů  
noční klub
- 110 decibelů  
orchestr hrající Prsten Nibelungův  
od Wagnera
- 94 decibelů  
metro
- 70 decibelů  
vysavač
- 60 decibelů  
normální rozhovor

# Veličiny pro popis zvuku

Akustický tlak (už známe) **nejdůležitější**

Akustická částice statisticky významné množství molekul, které kmitají stejným způsobem – se stejnou fází

Akustická výchylka výchylka akustické částice z rovnovážné polohy

Akustická rychlost derivace akustické výchylky dle času, tedy rychlost kmitání akustické částice, NENÍ TO RYCHLOST ŠÍŘENÍ!!!!

**Intenzita, výkon, energie**

# Rychlost šíření

adiabatická rychlost zvuku  $c_0 = \sqrt{\frac{\kappa p_0}{\rho_0}} = c_{ad}$

ve vzduchu přibližně 340 m/s

Vlnová délka pro slyšitelné kmitočty  $c_0 = \lambda f$

20	100	500	1k	2k	5k	10k	20k	50k
17m	3,4m	68cm	34cm	17cm	6,8cm	3,4cm	1,7cm	6,8mm

oblast hluku

oblast řeči

oblast perkusních signálů

## Vlnová rovnice (lineární)

Předpoklady (zavádějí omezující podmínky!!!):

- prostředí je spojité, stlačitelné, homogenní, izotropní, neviskózní (bez ztrát), v klidu
- výchylky všech veličin jsou malé (linearizace úlohy)
- akustické pole se předpokládá za nevírové (pole je gradientní)
- akustické děje jako adiabatický termodynamický děj

tedy vše – LINEÁRNÍ AKUSTIKA

# **Tři výchozí rovnice**

Eulerova (2. Newtonův zákon)

kontinuity (zákon zachování)

stavová (adiabatický zákon)

zvuk v plynech je vlnění podélné (nejsou smyková napětí  
mezi molekulami)

střední hodnota akustického tlaku je nulová

průběhy jsou v drtivé většině harmonické

pro analýzu možno použít Fourierových řad

jeho šíření se řídí (v drtivé většině případů) lineární vlnovou  
rovnicí (v tomto případě pro akustický tlak)

$$\Delta p = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}$$

## Praktická řešení vlnové rovnice (vlny ve volném prostoru)

v kartézských souřadnicích  
rovinná vlna

$$p = \left( A e^{-jkx} + B e^{+jkx} \right) e^{j\omega t}$$

ve sférických souřadnicích  
kulová vlna

$$p = \frac{A}{r} e^{-jkr} e^{j\omega t}$$

v cylindrických souřadnicích  
válcová vlna

$$p = \frac{A}{\sqrt{kr}} e^{-jkr} e^{j\frac{\pi}{4}} e^{j\omega t}$$



## Interpretace vztahů

A... amplituda veličiny ve vzdálenosti 1m od zdroje

$e^{j\omega t} = \cos(\omega t) + j \sin(\omega t)$ .. časová exponenciála

$e^{-jkr} = \cos(kr) - j \sin(kr)$  prostorová exponenciála

vlňové číslo  $k = \frac{\omega}{c_0}$

Zvuk je tedy informačním signálem

Analýzou jeho vlastností tuto informaci získáme

# Zvukové signály

literatura:

Syrový, V.: Hudební akustika, AMU  
Špelda, A.: Hudební akustika, SPN

terminologie

zvuk      x      hluk      x      šum

nejednotnost ve výkladu

možná definice přes psychoakustiku:

zvuk – signál, který je člověku přínosem, líbí se mu, vztah k němu je kladný

hluk – signál, který člověku škodí, je mu nepříjemný, vztah k němu je záporný

(tedy relativní!!)

šum – z matematického hlediska náhodná veličina na rozdíl od zvuku a hluku

# Klasifikace akustických signálů

základní rozdělení :

- deterministické... lze popsat matematickým vztahem
- stochastické..... nelze popsat matematickým vztahem

## Deterministické signály („zvuk“)

- přechodné (soustava se po určitém čase vrací do ustáleného stavu)

- periodické signály – lze popsat vztahem  $x(t) = x(t + nT)$ ,  $n$  celé číslo

periodické signály mohou být buď jednoduché – obsahují jen jednu složku, nebo složité, které kromě základní harmonické obsahují její celistvé násobky

- kvaziperiodické signály – poměr alespoň dvou kmitočtových složek není racionální číslo

## Stochastické signály („šum“)

- stacionární – v čase se nemění statistické vlastnosti (hustoty pravděpodobnosti)

dále se dělí na ergodické  
neergodické

- nestacionární – statistické charakteristiky se mění

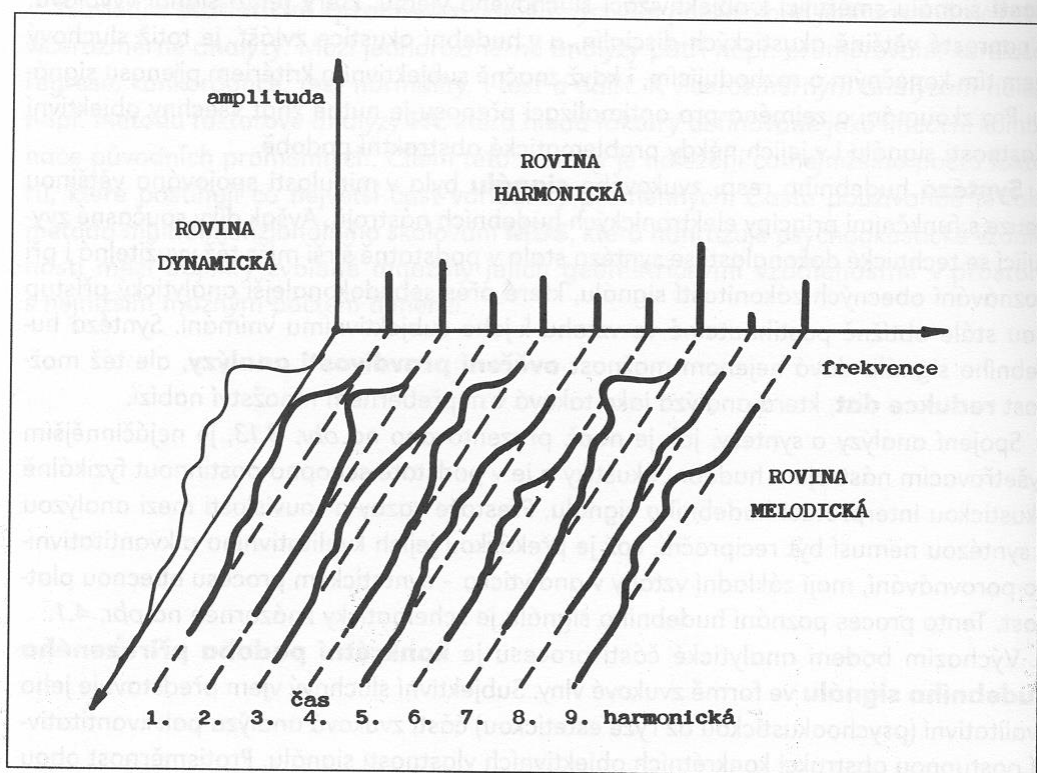
# Analýza hudebních signálů

Tři roviny analýzy: dynamická, melodická, harmonická

dynamická – závislost amplitudy na času

melodická – závislost kmitočtu na času

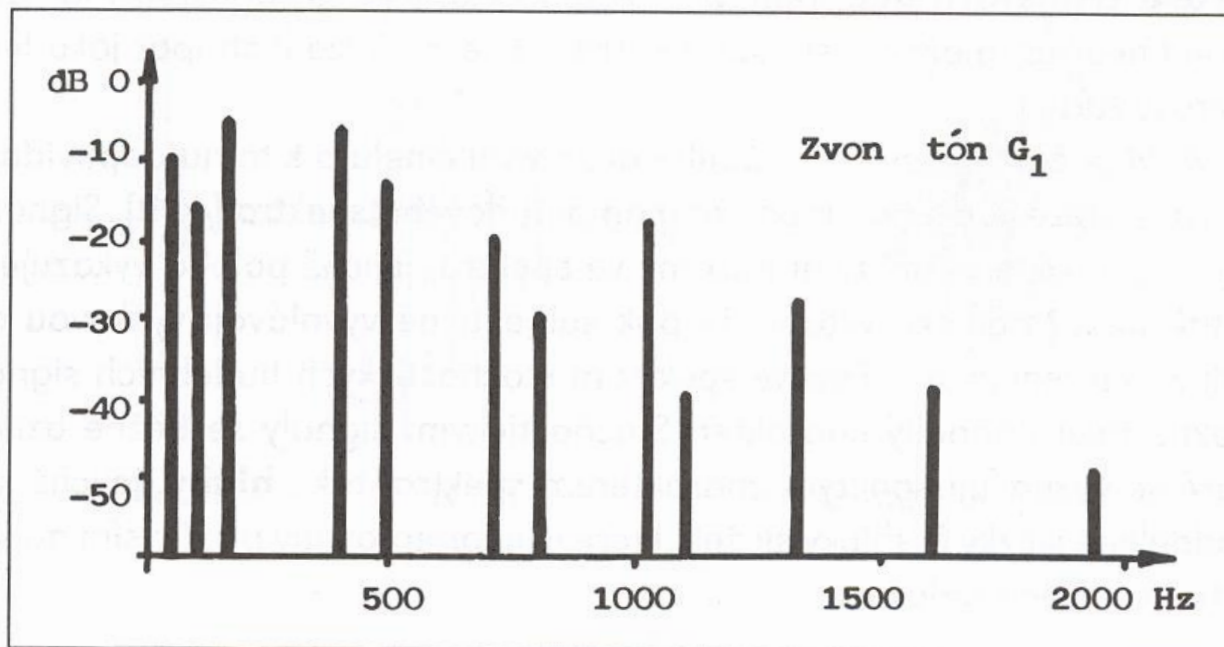
harmonická – závislost amplitudy na kmitočtu



Obr. 4.2 Dynamické pojetí hudebního signálu



## Kmitočtové vlastnosti hudebního signálu

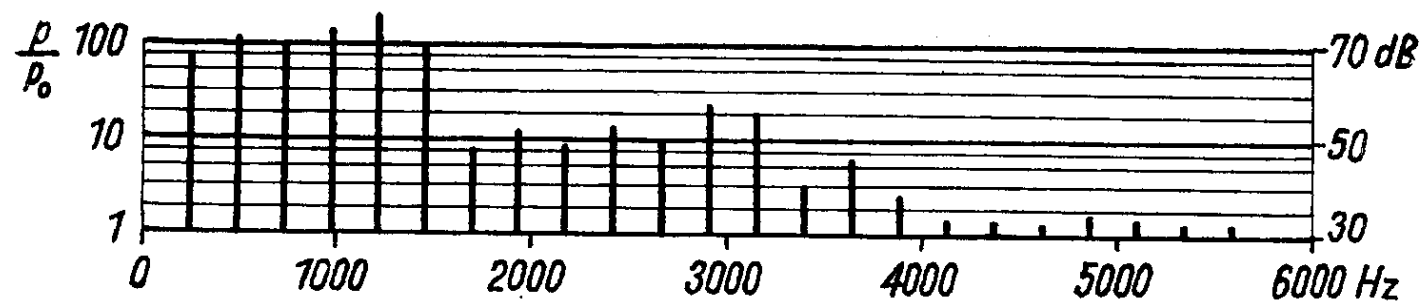


Obr. 4.23 Spektrum tónu zvonu

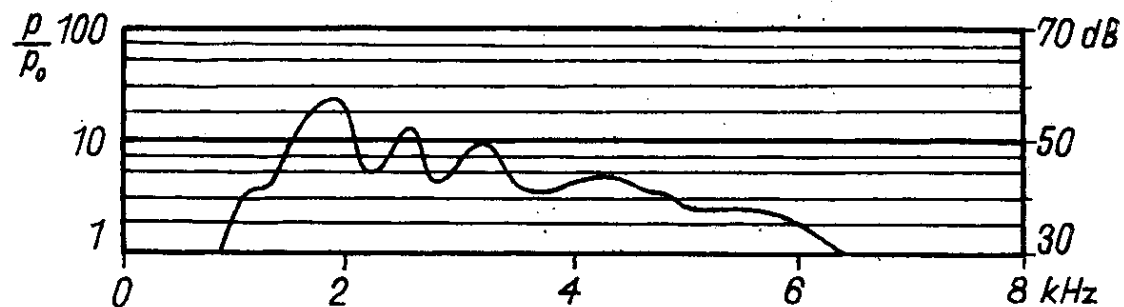
základní harmonická  
vyšší harmonické  
částkové tóny

rovina harmonická, signál analyzujeme např.  
Fourierovými řadami, předpokládáme nekonečné  
trvání to však neodpovídá realitě (**statické pojetí**), v  
něm – zvuk – periodický signál, hluk – neperiodický

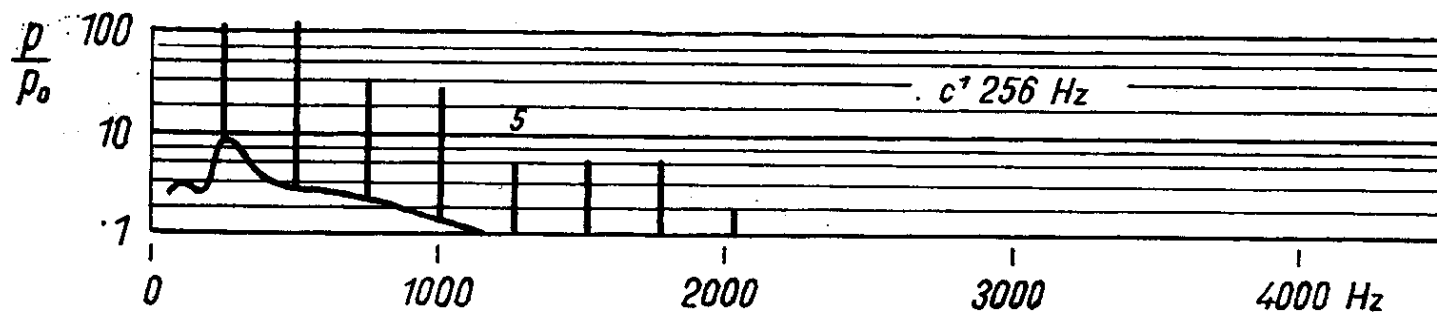
Obr. 3.6  
Akustické spektrum  
a) čárové:



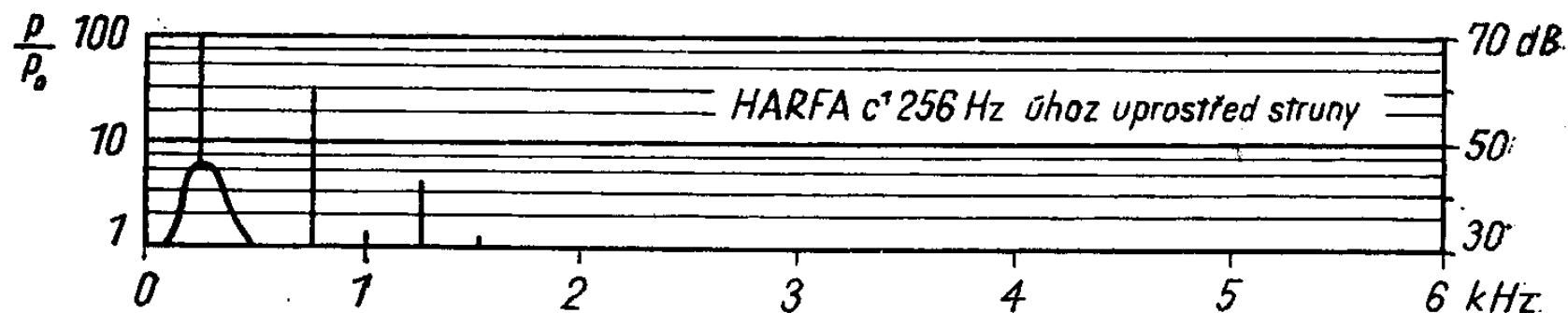
b) spojité:



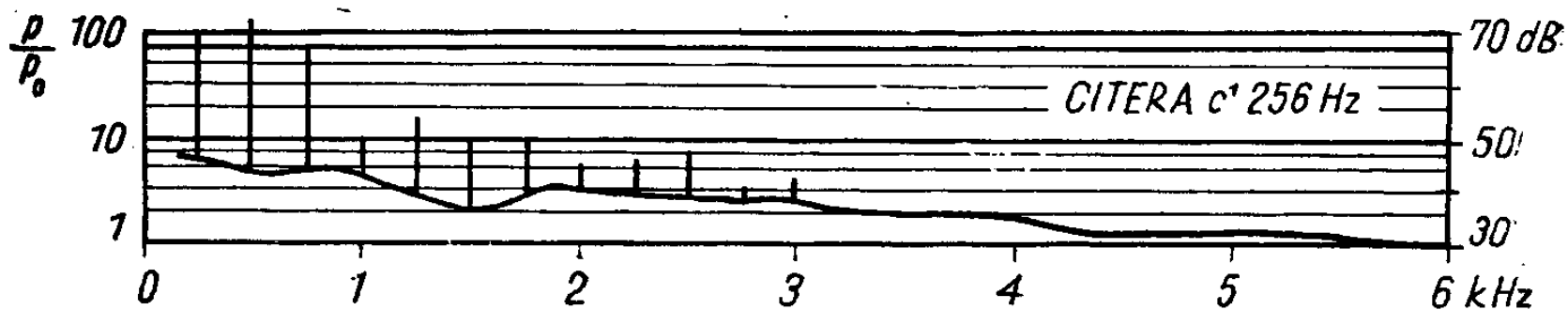
c) kombinované:



Obr. 5.6a  
Spektrum tónu harfy

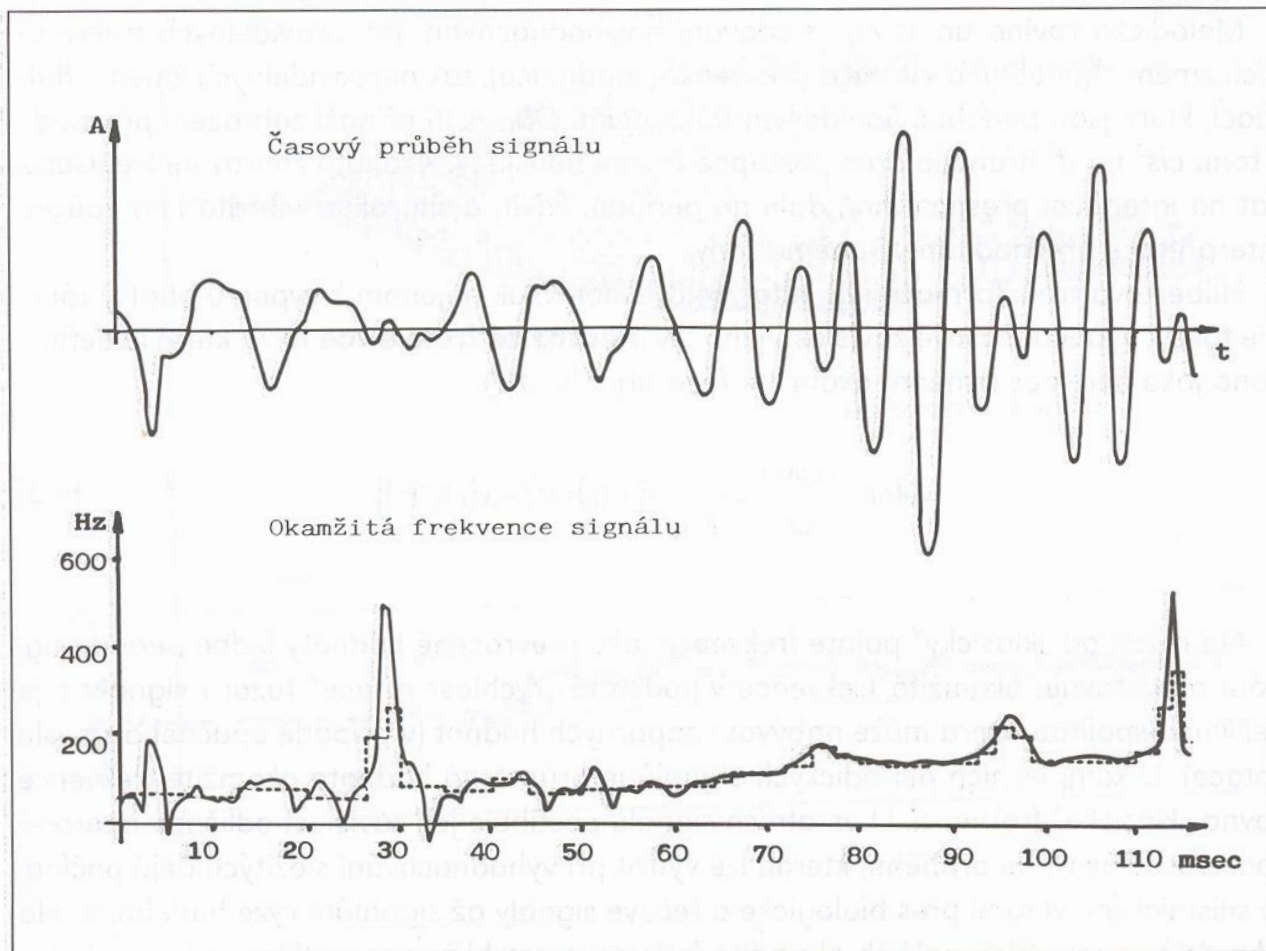


Obr. 5.6b  
Spektrum tónu citery



# Rovina melodická

- zkoumání složek, fluktuace period, okamžitá  $f$ , neharmonicity

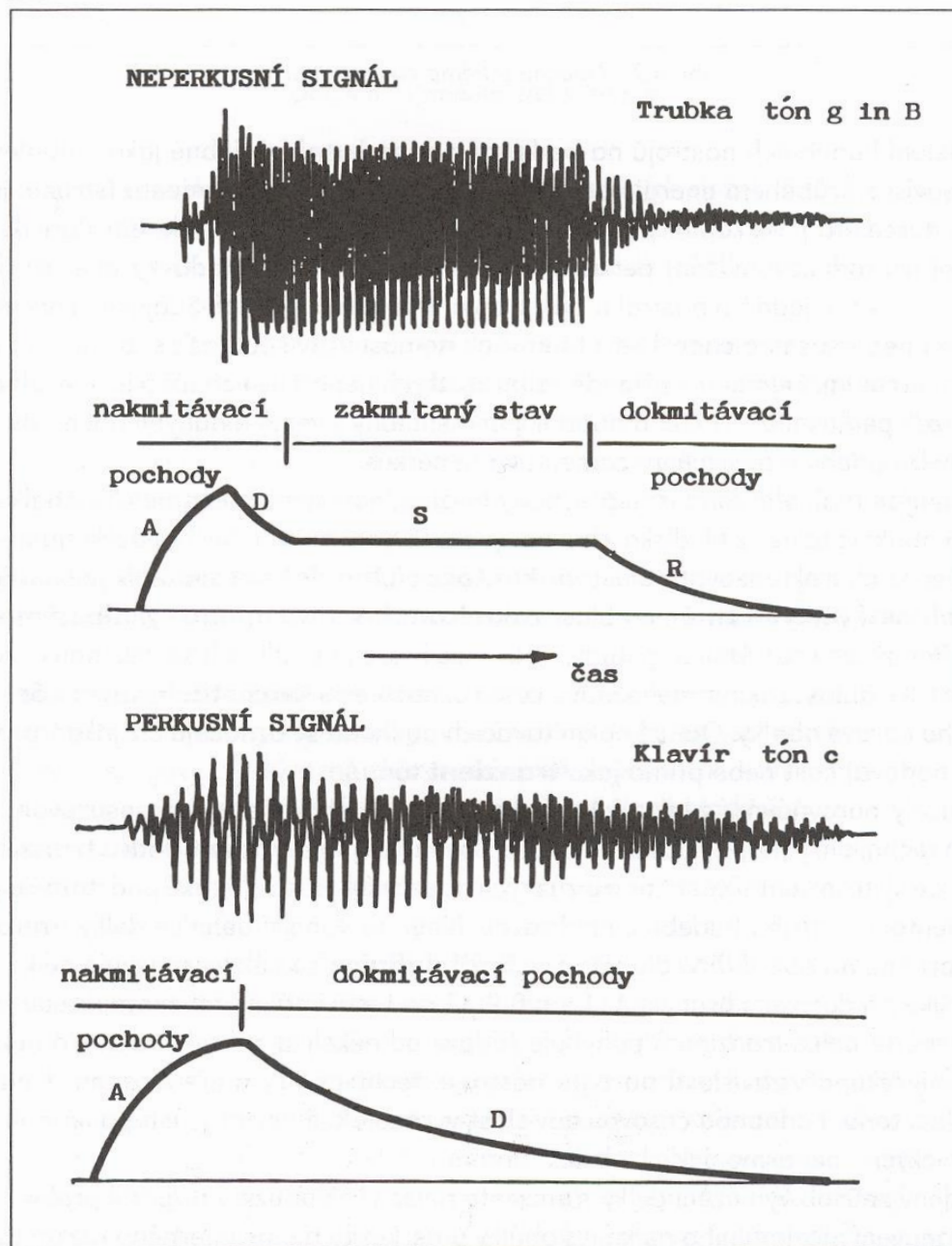


Obr. 4.17 Okamžitá frekvence signálu (lit. 10)

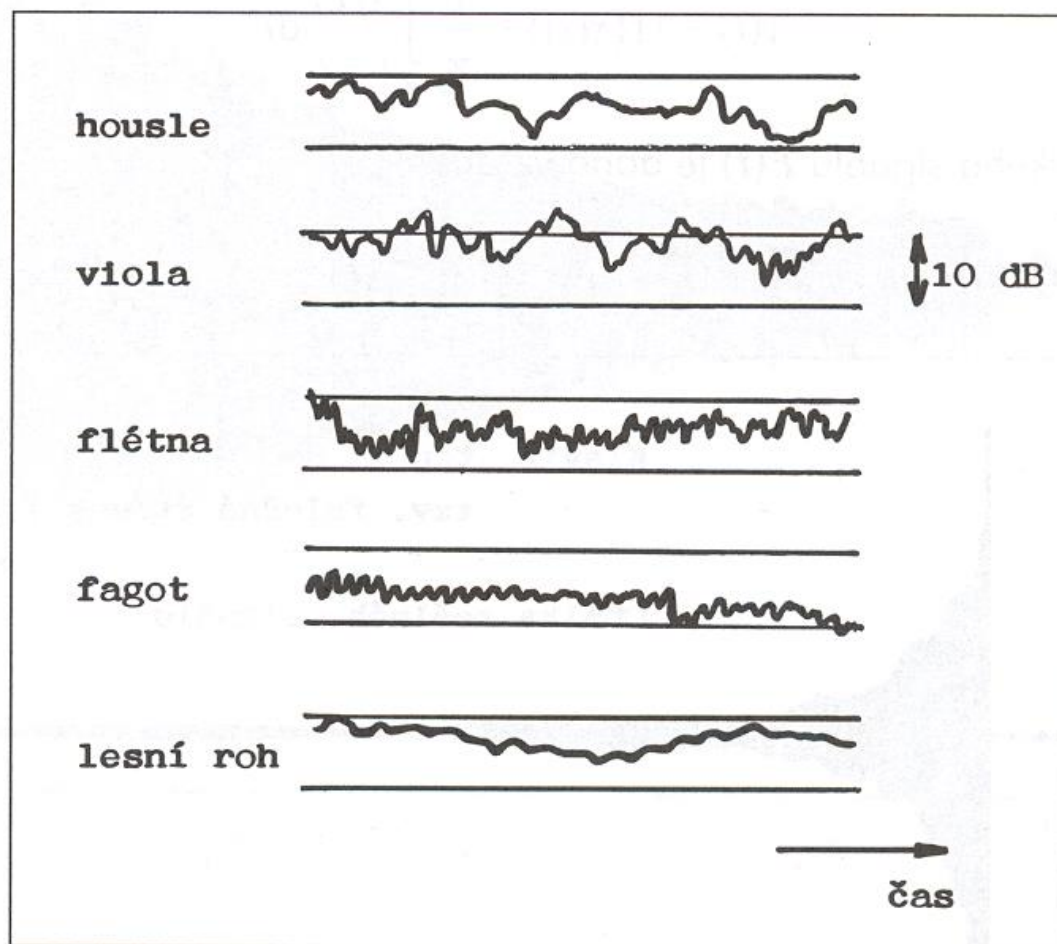
# Časové vlastnosti hudebního signálu

rovina dynamická,  
nejjednodušší,  
nejednoznačný výklad,  
obálka

technika hry tremolo (AM)



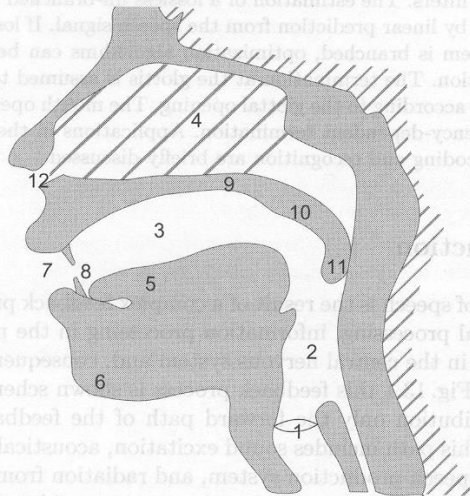
Obr. 4.6 Neperkusrní a perkusrní signály a jejich zjednodušené časové obálky



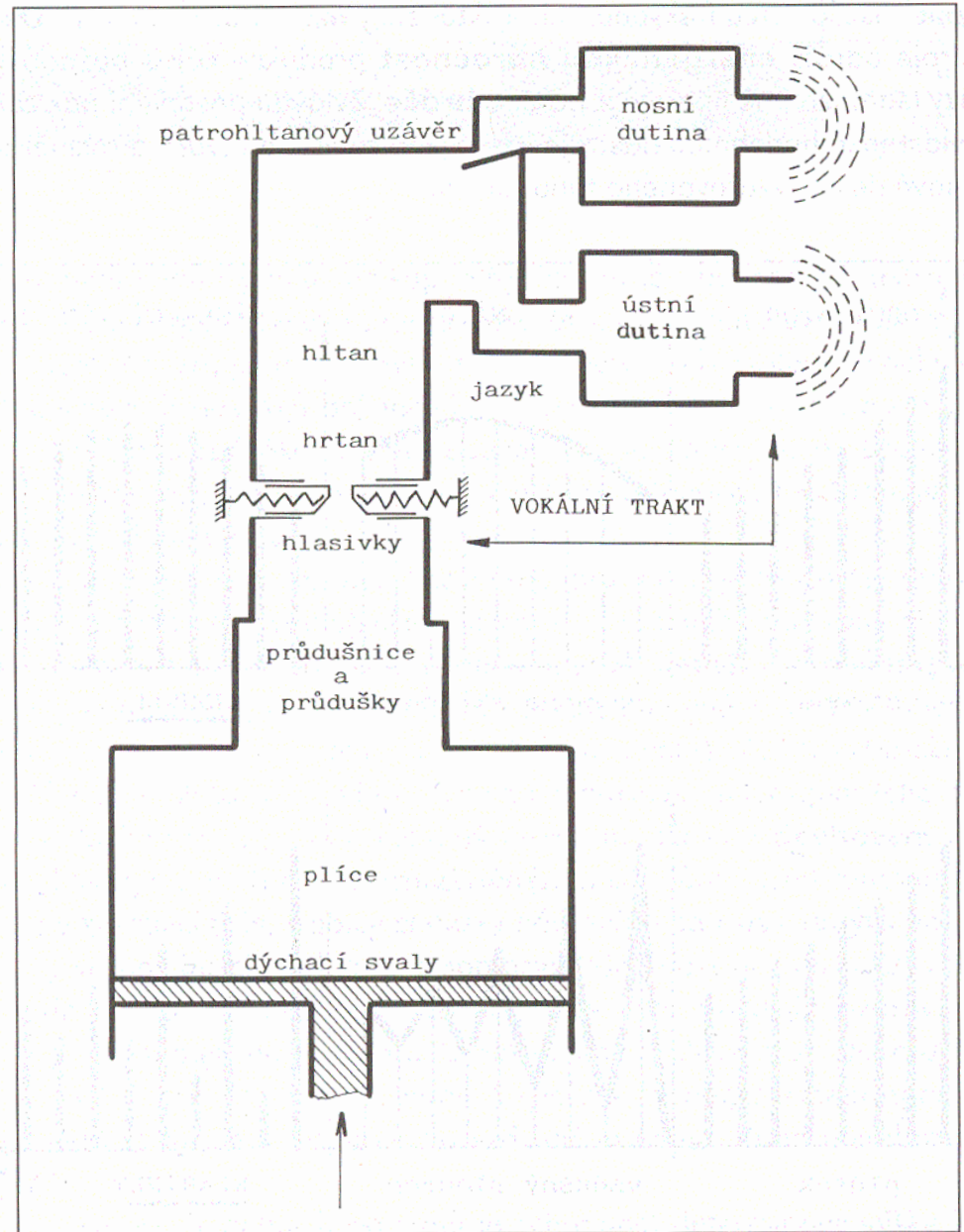
Obr. 4.10 Špeldovy fluktuace ustálené hladiny tónu (lit. 91)



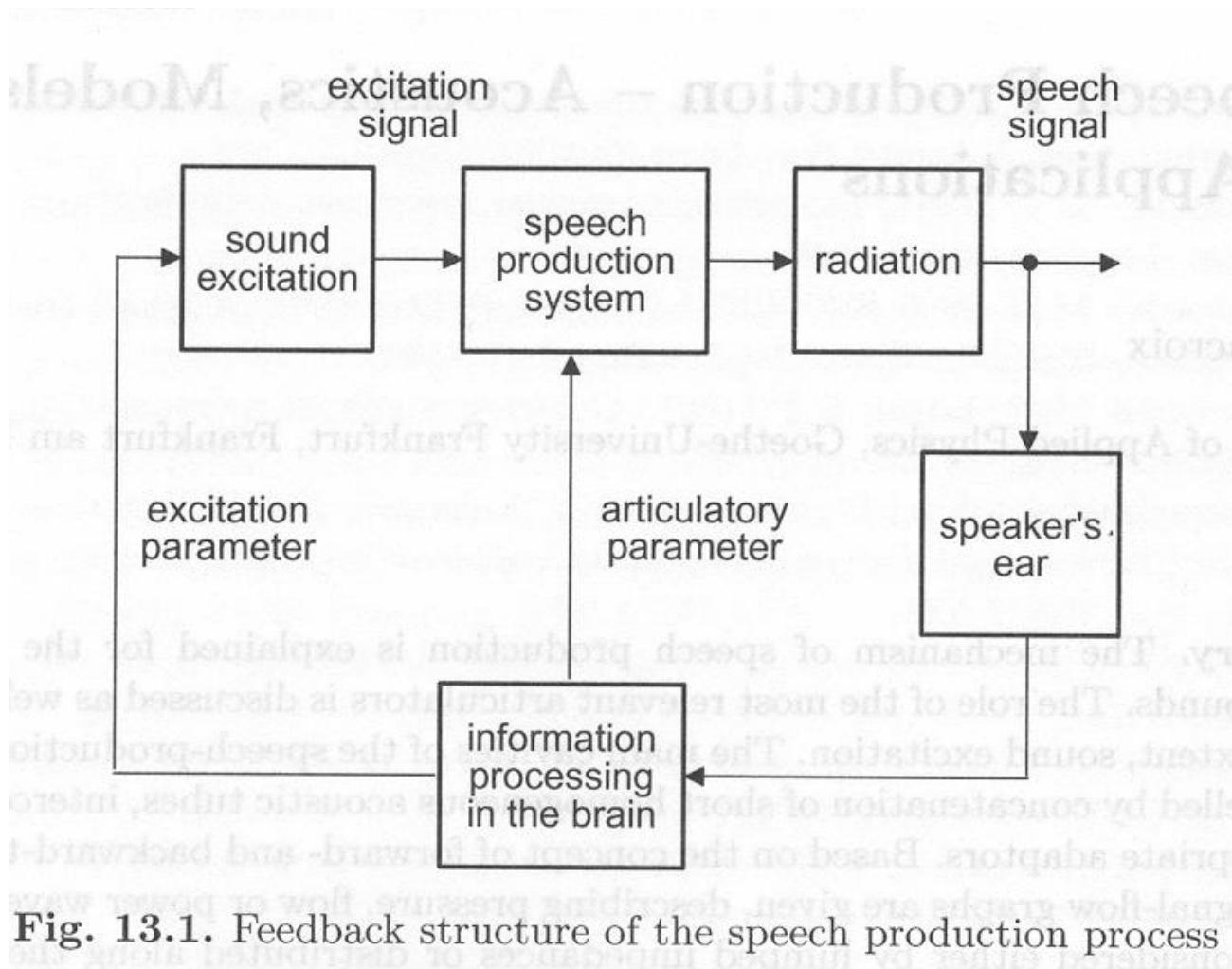
# Řečový signál



**Fig. 13.2.** Mid-sagittal section of the human head. Speech organs: 1 vocal cords, 2 pharynx, 3 mouth cavity, 4 nasal cavity with septum, *hatched*, 5 tongue, 6 lower jaw, 7 lips, 8 teeth, 9 palate, 10 velum, 11 uvula, 12 nostrils

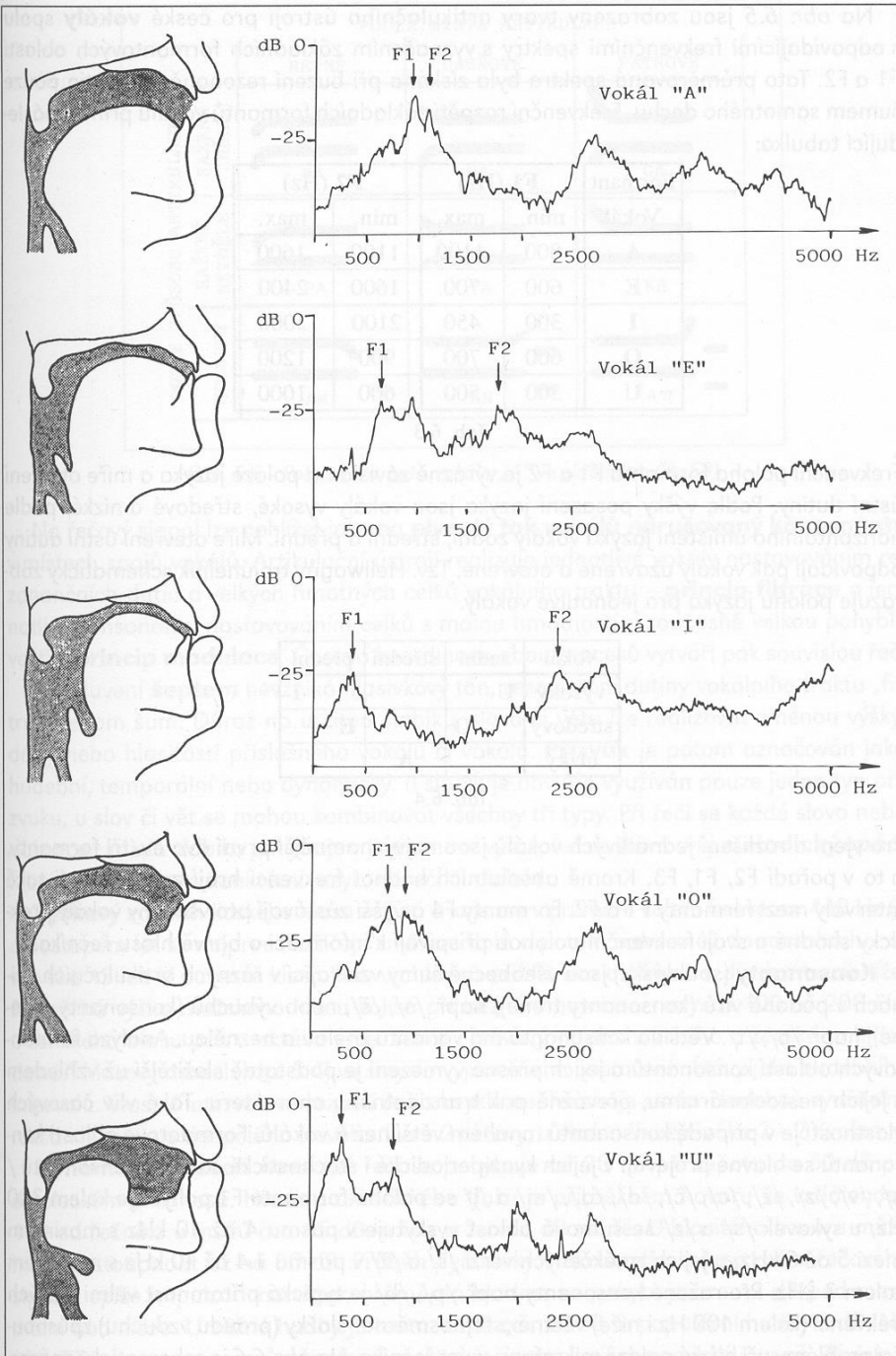


Obr. 6.2 Hlasové ústrojí jako akustický systém

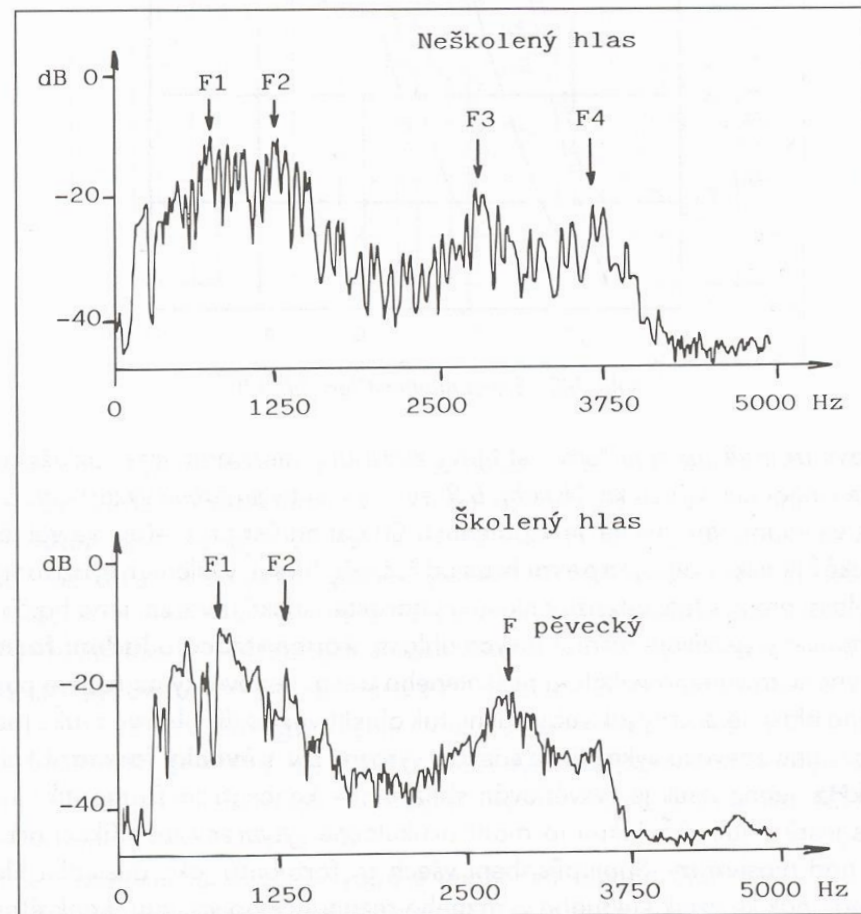


**Fig. 13.1.** Feedback structure of the speech production process





Obr. 6.5 Nastavení artikulačního ústrojí a spektra vokálů



Obr. 6.10 Průměrovaná spektra zpívaného vokálu „A“

**Formanty** = maxima na frekvenční charakteristice hlasu

# ZPĚVNÍ HLASY

bas (73)82-329(392) Hz

baryton (87)98-392(493) Hz

tenor (110)123-493(587) Hz

alt (164)174-698(880) Hz

mezzosoprán (196)220-880(1046) Hz

soprán (246)261-1046(1318) Hz

Normální rozsah

Hraniční rozsah

BĚŽNÁ ŘEČ

muži

ženy, děti

Obr. 6.13 Frekvenční rozsah zpěvních hlasů (lit. 11)

# Hudební akustika

zkoumá zdroje hudby, hudební signály, percepci hudby

tón – zvuk, který má výšku

hudba – skládá se z tónů (většinou), zdroj: hudební nástroje, lidský hlas, elektronické nástroje

Vlastnosti tónů

vlastnosti tónů: délka, síla (hlasitost), barva (timbre), výška

jsou to SUBJEKTIVNÍ veličiny

tónová soustava – uspořádání všech tónů dle výšek

základní tónová řada:

c d e f g a h

(u nás, Německo, Polsko, státy bývalé Jugoslávie, Bulharsko, Rakousko, Švýcarsko, Rumunsko, Britské ostrovy, Nizozemí, Skandinávie, Severní Amerika).

do re mi fa sol la si do (Francie, Itálie, Belgie, Španělsko, Rusko, Orient)

10. stol. Guido z Arezza

oktáva – vzdálenost mezi dvěma nejbližšími tóny stejného jména, poměr frekvencí 2:1

