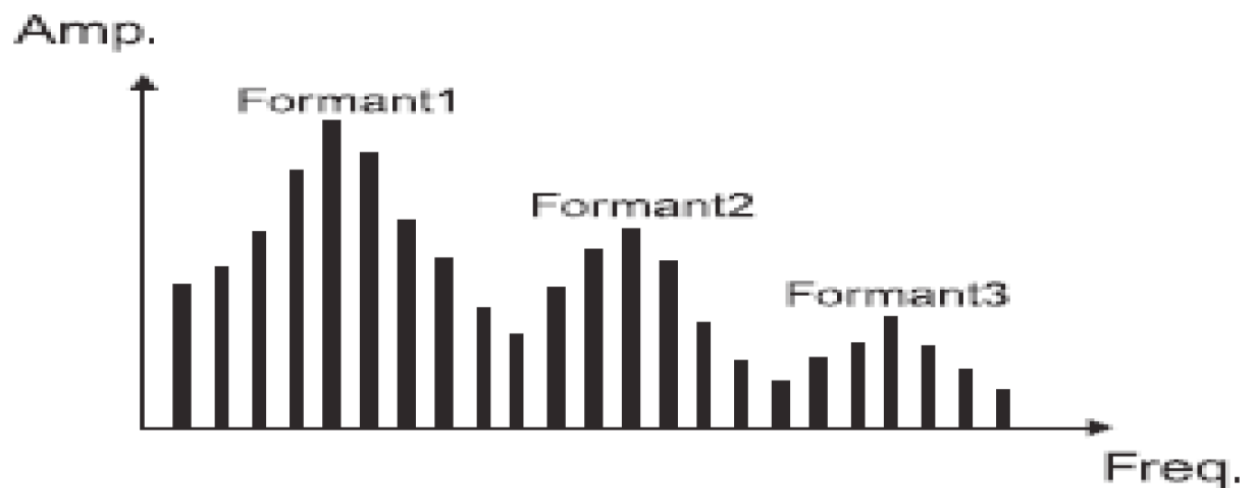


# 6. PŘEDNÁŠKA – Formantová syntéza

- **Základy formantové syntézy**
  - buzení, rezonátor, řazení filtrů
- **Číslicové pásmové propusti**
  - dvoupólové filtry (rezonátory)
- **Hudební nástroje**
  - spektra a formanty
- **Hlas a řeč**
  - formantová syntéza řeči
  - znělé a neznělé buzení
  - základní frekvence, formanty
  - Klattův formantový syntetizér
- **Aplikace**
  - banka filtrů (rezonátory)
  - filtrační syntézy s časově proměnnými filtry
  - formantové syntézy hudebních nástrojů a samohlásek

## • Základy formantové syntézy

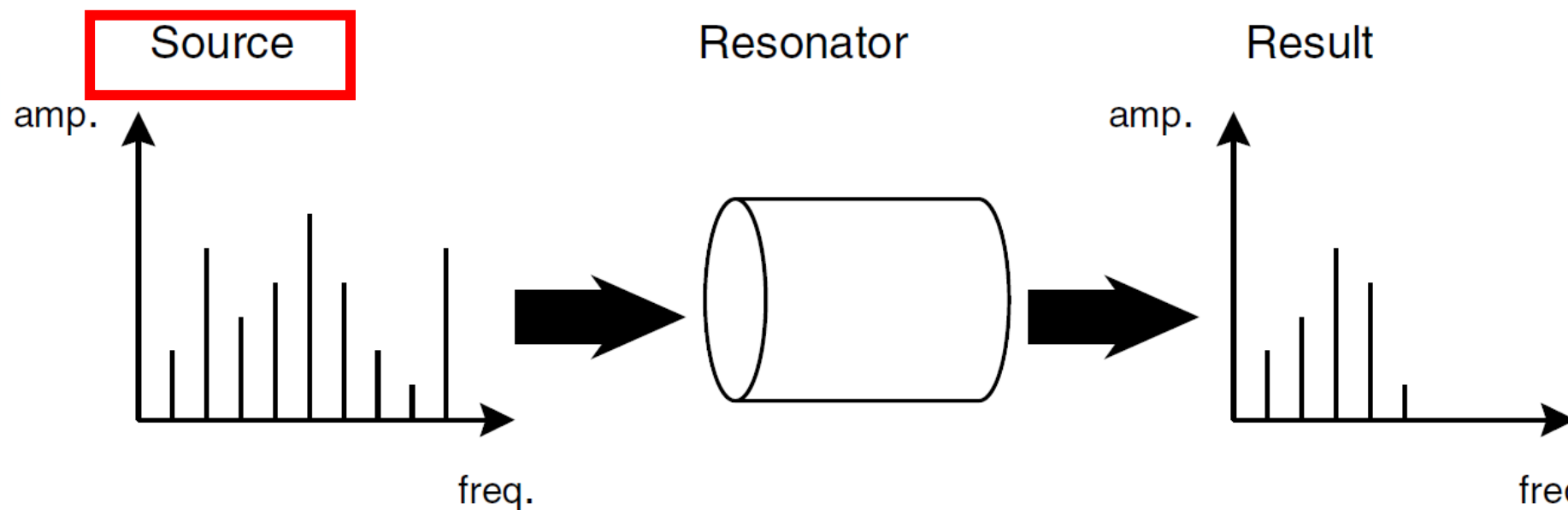
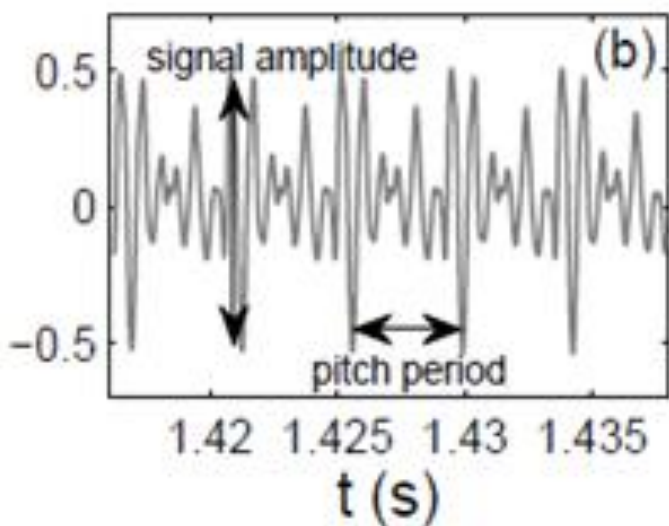
- **Formanty představují rezonanční frekvenční pásma**
- Základy formantové syntézy byly položeny při výzkumu lidského hlasu, avšak později byla syntéza upravena i pro jiné typy zvuků.
- Formanty vytváří konzistentní zabarvení bez ohledu na výšku tónu.
- Poskytují realistické zabarvení.



## • Budící signály v rezonátorech

### ○ Generátory šumu a pulzů

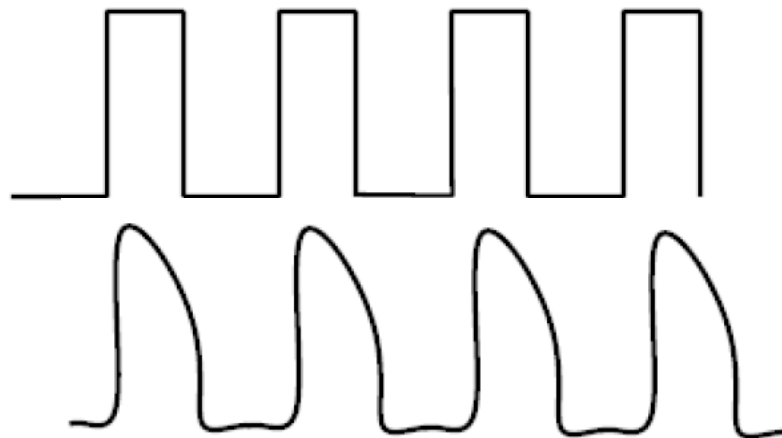
- Generátory pulzů vytváří periodické průběhy vln bohaté na harmonické, užitečné pro syntézu znělých úseků.
- Generátory šumu produkují širokospektrální zvuky, ideální pro simulaci neharmonických úseků.
- Jitter a vibrato přidávají přirozenou variabilitu a pomáhají napodobovat pestrost a zvuků lidského hlasu a hudebních nástrojů.



# Formantová syntéza

- **Znělé buzení u formantové syntézy**

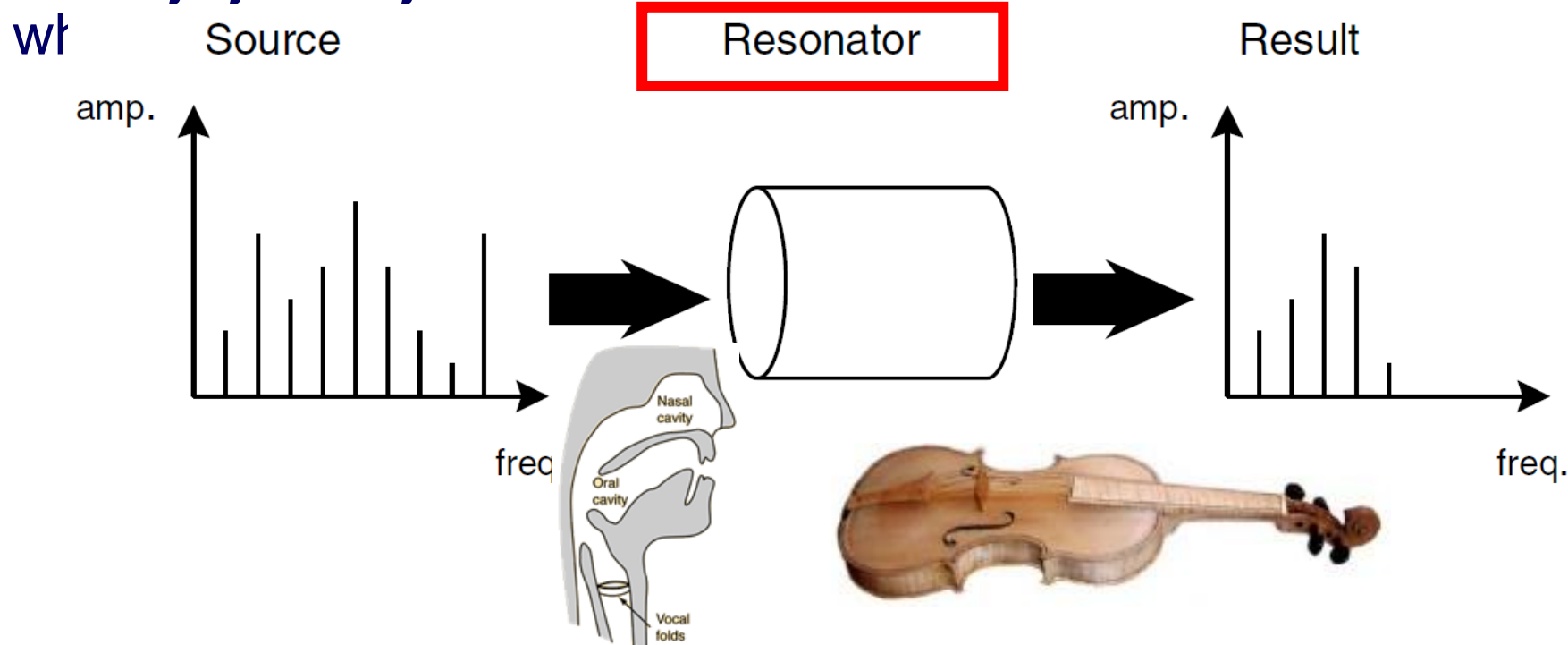
- Pulsní průběh má vyšší energii harmonických složek
- Simulace vyžaduje kaskádu dolních propustí
  - Dvoustupňová DP filtrace simuluje přirozené tlumení a artikulaci v hlasovém ústrojí



# Formantová syntéza

## • Velikost formantů a rezonance v hlasovém ústrojí a hudebních nástrojích

- Hlasový ústrojí a většinu hudebních nástrojů lze modelovat pomocí rezonátorů
- Formanty se mění v závislosti na artikulaci samohlásek, zatímco u hudebních nástrojů je určuje konstrukce tělesa.

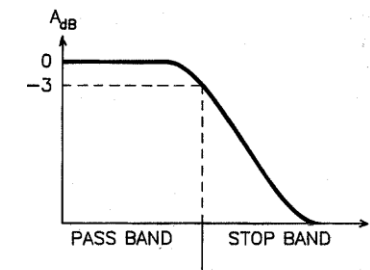


# Formantová syntéza

## • Základní filtry formantové syntézy

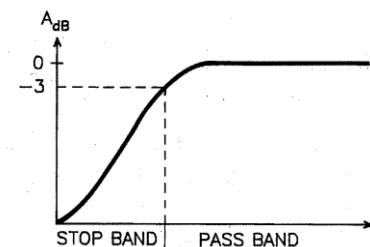
### ○ Dolní propust (DP):

- Odstraňuje vysoké frekvence a zaměřuje se na základní tón



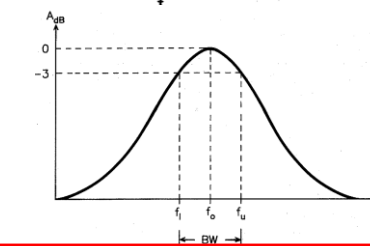
### ○ Horní propust (HP):

- Odstraňuje nízké frekvence, čímž zvuk „rozjasní“



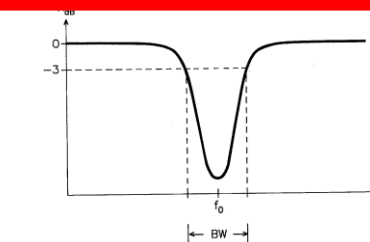
### ○ Pásmová propust (PP):

- Selektivně zesiluje formanty, což je důležité pro barvu zvuku



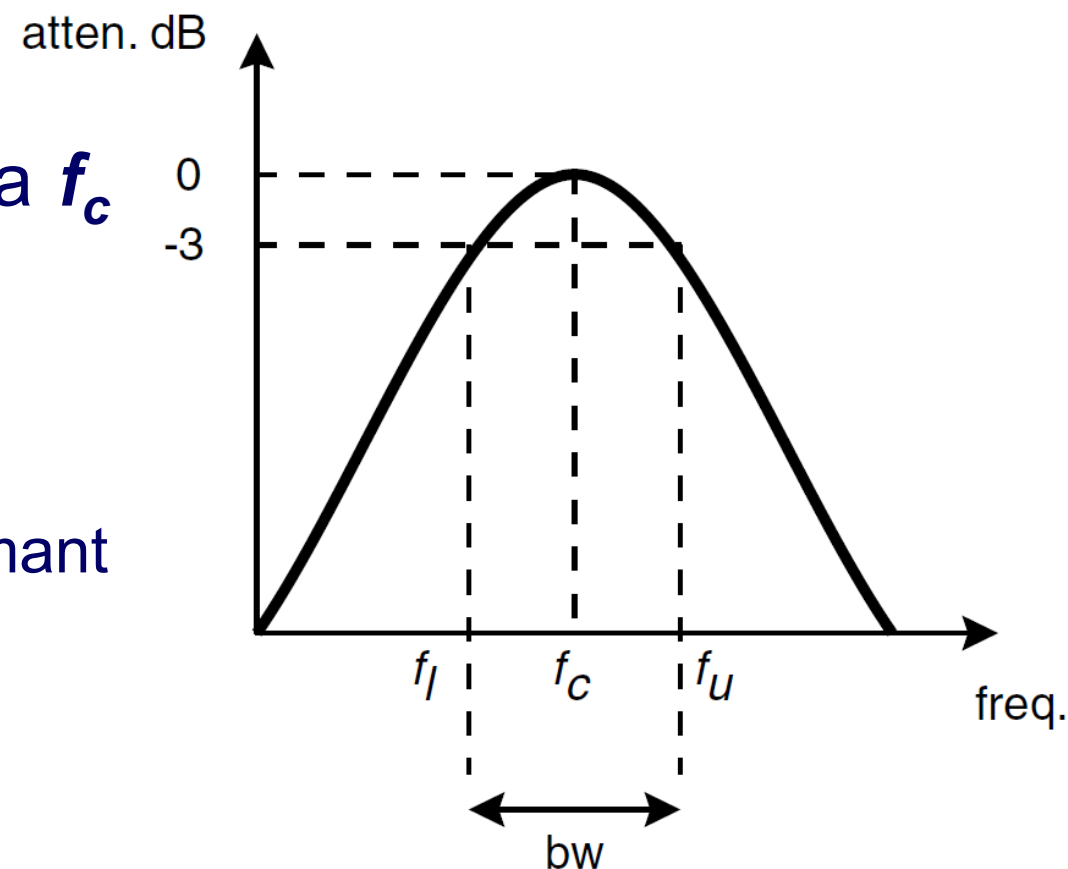
### ○ Pásmová zádrž (PZ):

- Používá se pro potlačení specifických frekvencí, např. 50 Hz



## • Parametry rezonátorů

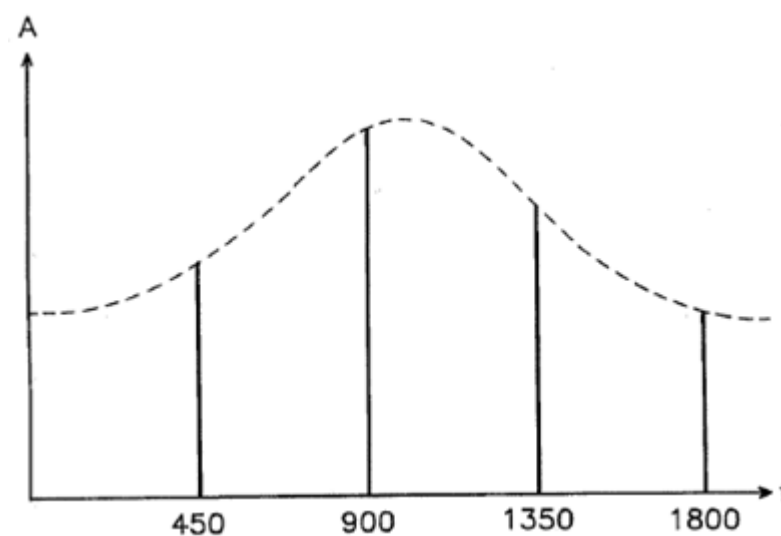
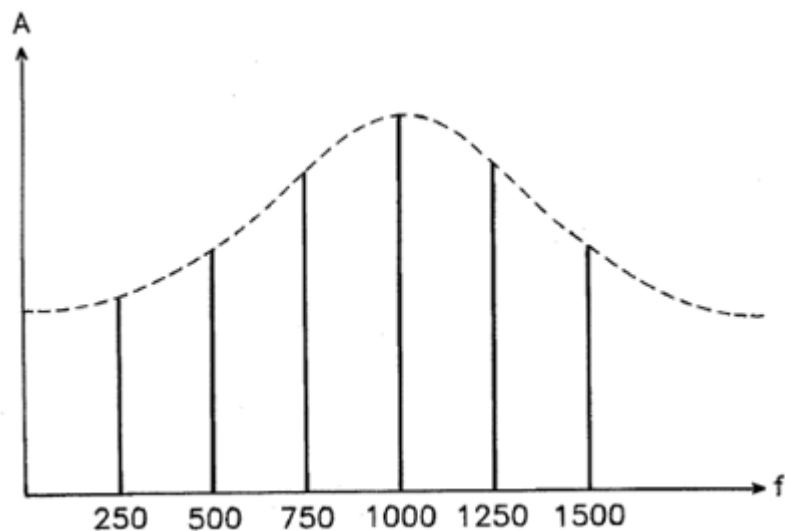
- Střední frekvence propustného pásma  $f_c$
- Šířka pásma rezonance  $bw$ 
  - Šířka pásma ovlivňuje, jak „ostře“ se formant jeví ve spektru
  - Pečlivé ovládání parametrů umožňuje přesné nastavení barvy zvuku



# Formantová syntéza

## • Příklad spektra s pevnými formanty

- Pevné formanty udržují konzistenci „barvy“ napříč výškami tónů, což je důležité pro rozpoznání samohlásek a hudebního nástroje.

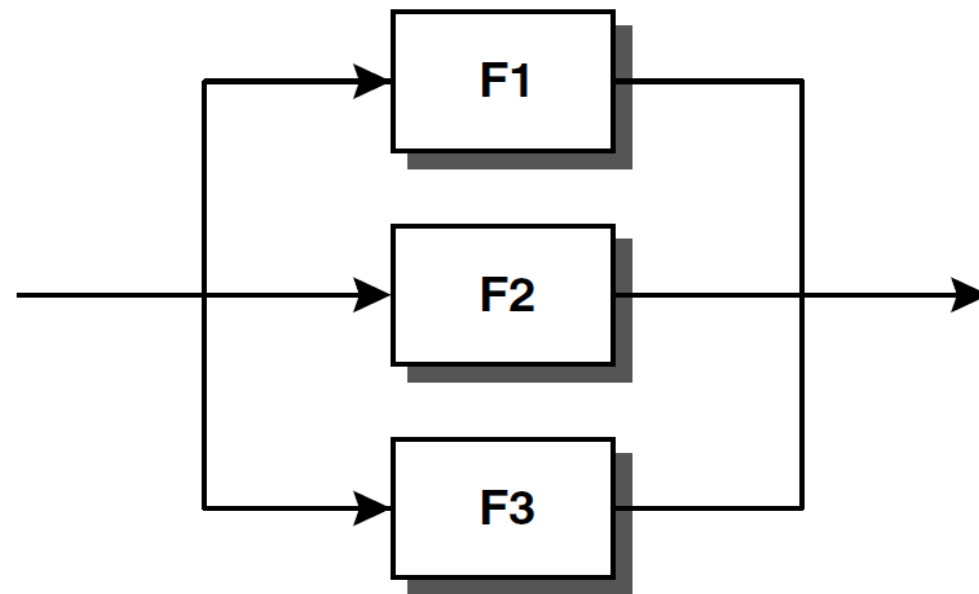


- **Uspořádání filtrů**

- **paralelní konfigurace**

- uchovává oddělené formanty

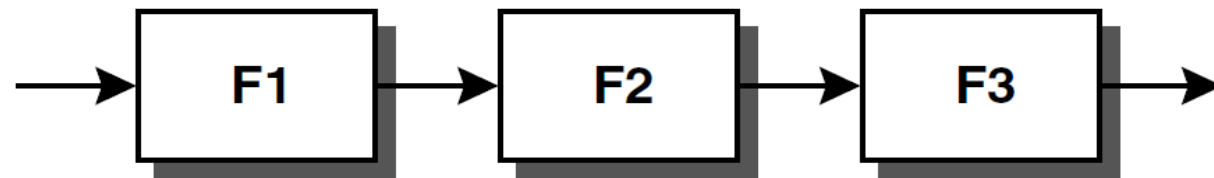
$$|F1| + |F2| + |F3|$$



- **kaskádní konfigurace**

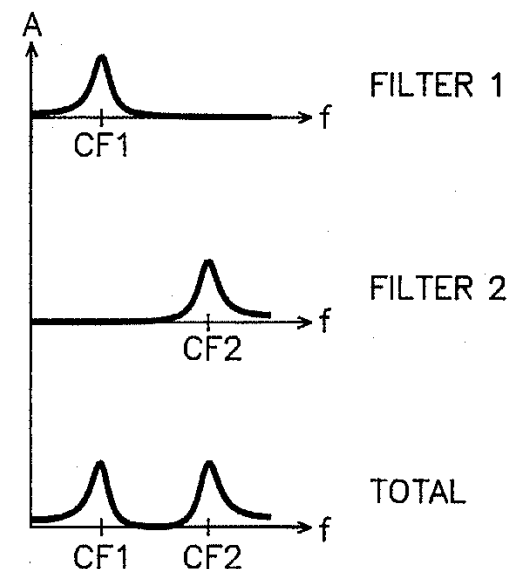
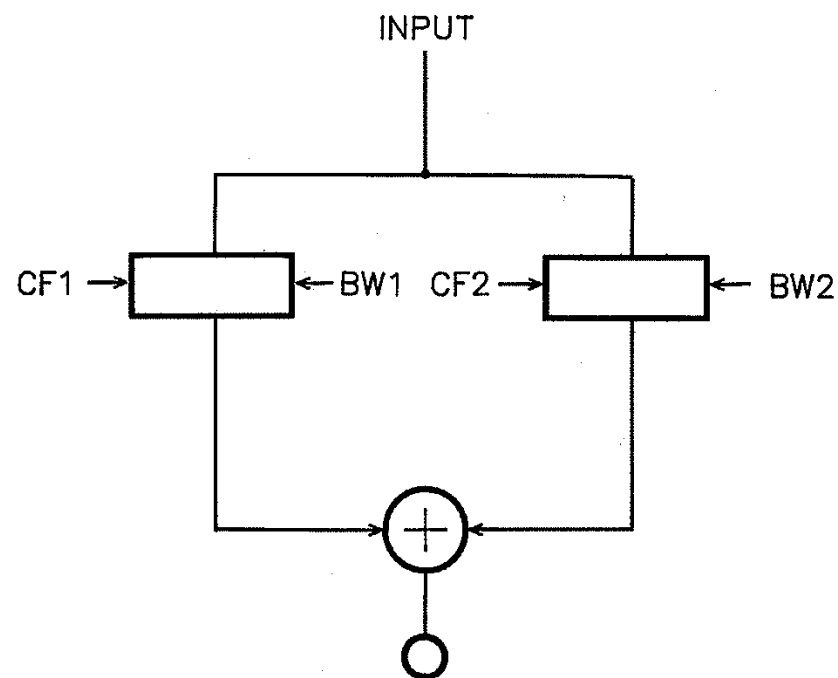
- efekty se násobí

$$|F1| * |F2| * |F3|$$



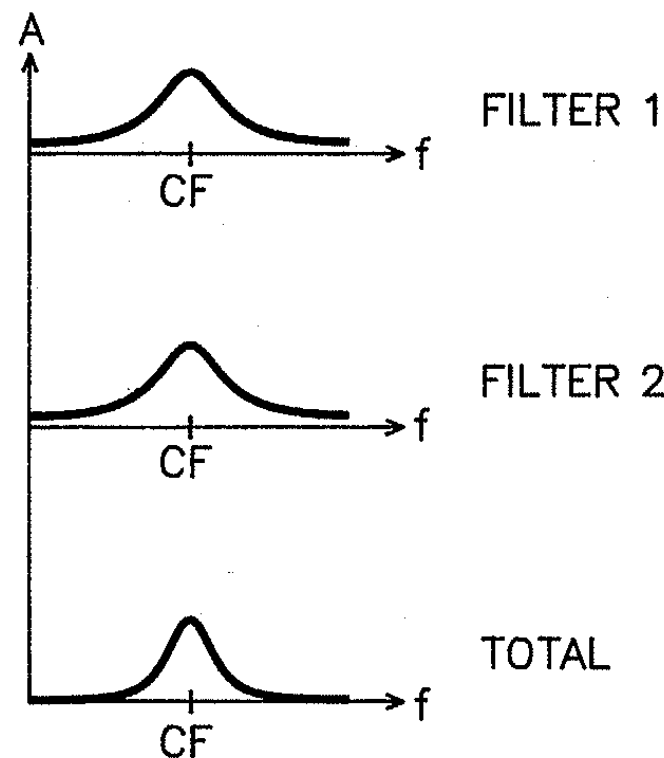
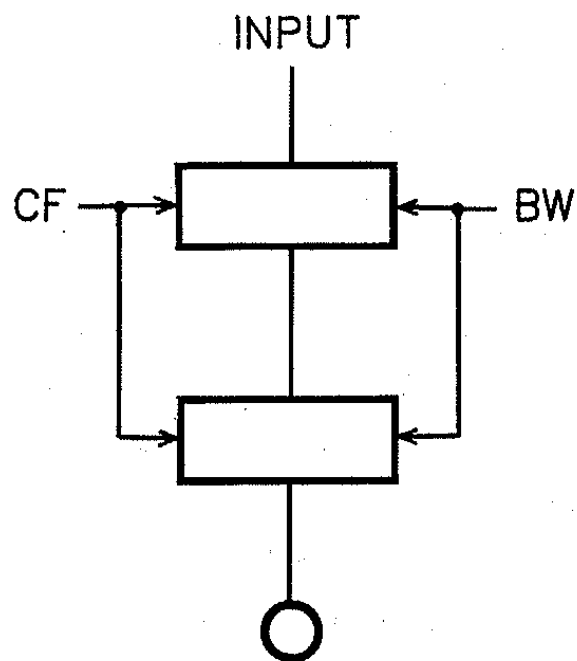
## • Příklady zapojení filtrů

- paralelní spojení
- **pásmová filtrace**



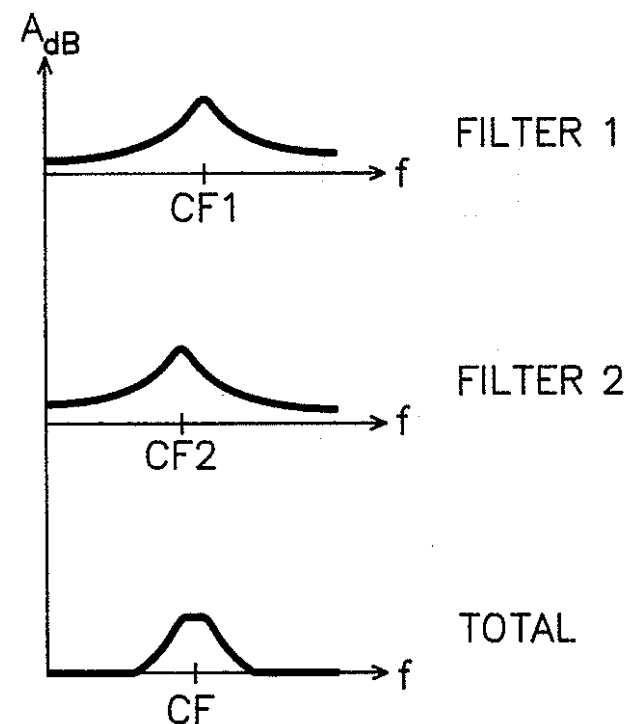
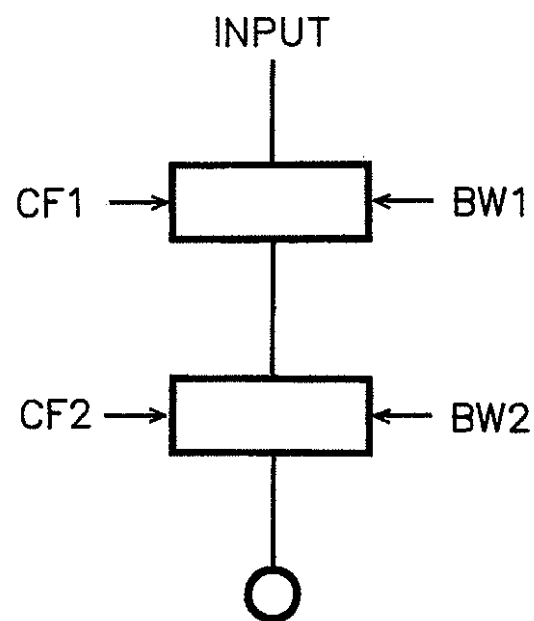
## • Příklady zapojení filtrů

- kaskádní spojení
- identické filtry vytvoří **úzkopásmovou propust**



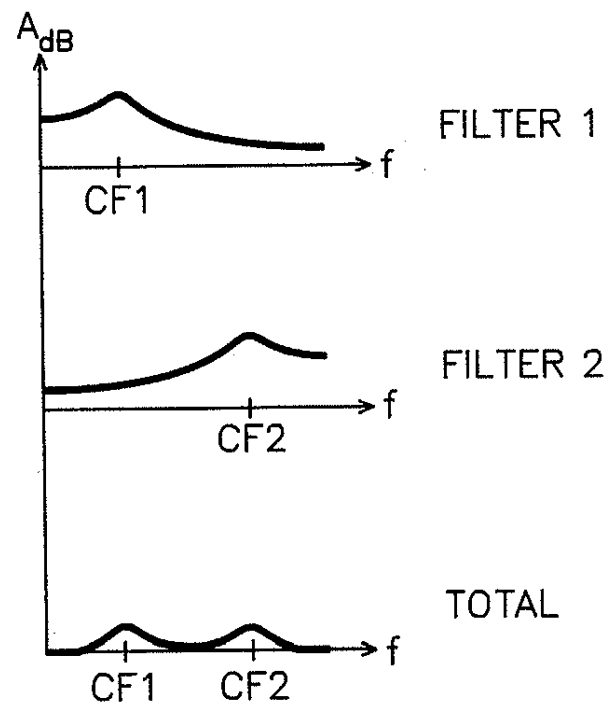
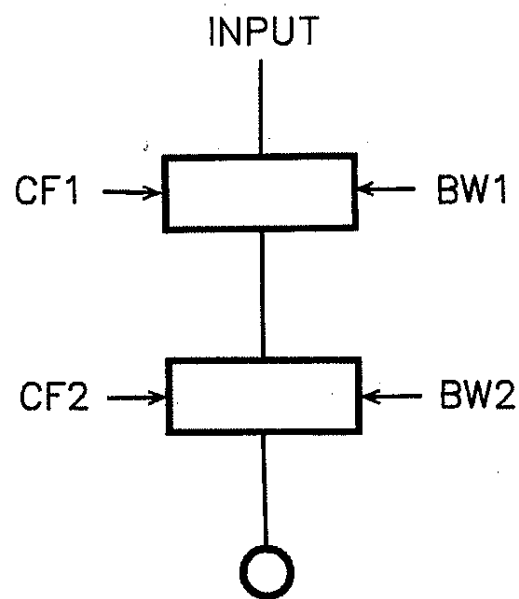
## • Příklady zapojení filtrů

- kaskádní spojení
- filtry s mírně posunutými středními frekvencemi vytvoří **širší a plošší pásmovou propust**



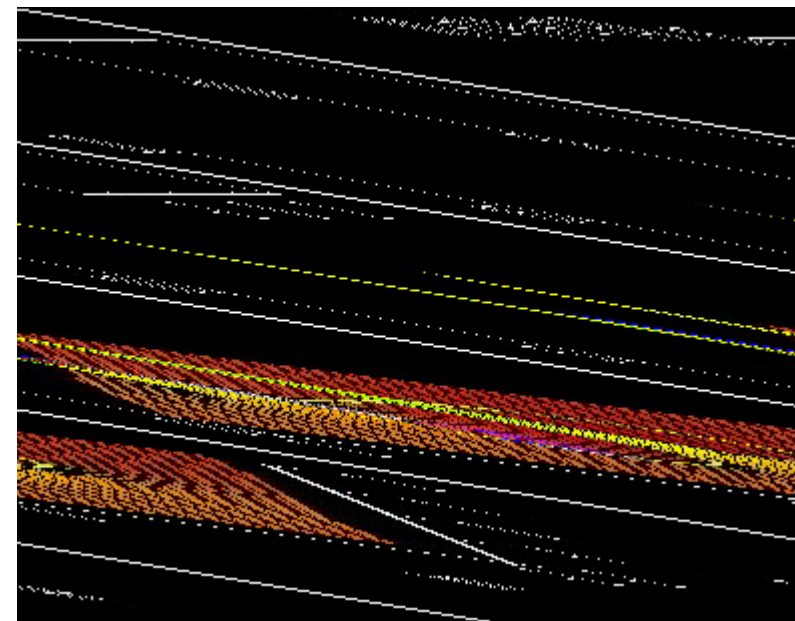
## • Příklady zapojení filtrů

- kaskádní spojení
- Filtry, jejichž propustná pásma se nepřekrývají vytváří **pásmové filtry** (banky filtrů)



## • Úvod

- Dvoupólové filtry se široce používají v syntéze formantů díky svým rezonančním charakteristikám, které umožňují přesné ovládání frekvenční odezvy.
- Tyto filtry vytvářejí rezonanční vrcholy, které jsou klíčové pro simulaci formantů v syntetizované řeči a hudebních nástrojích.

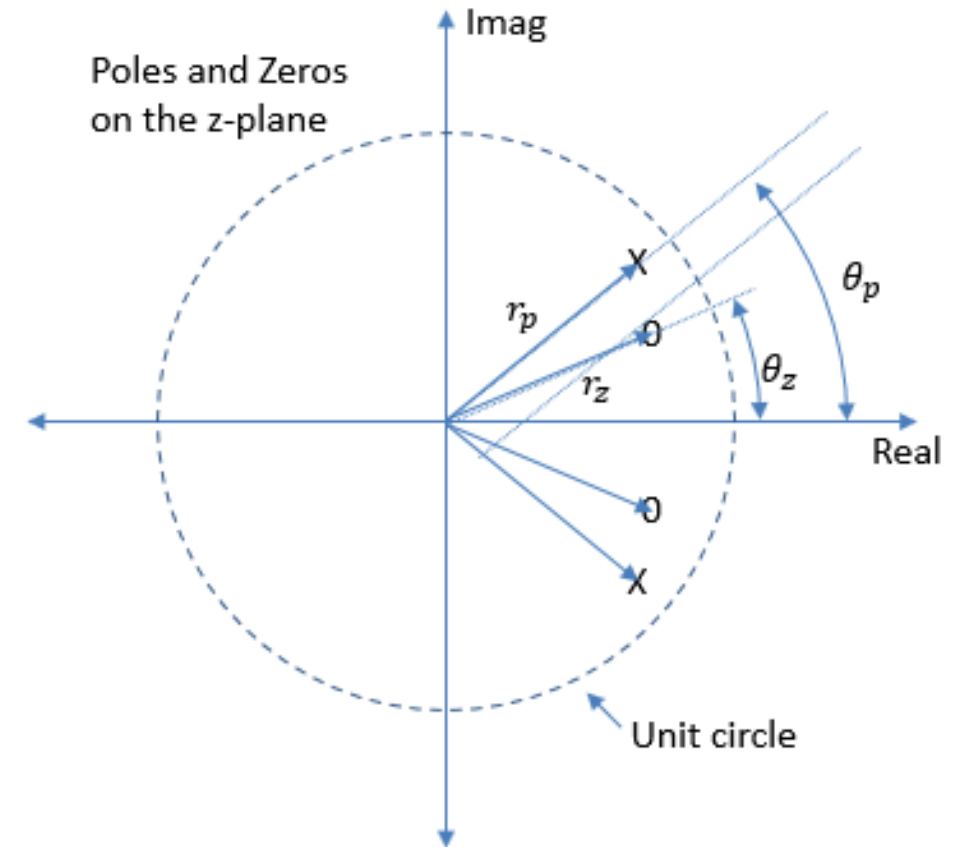


# Filtr se dvěma póly – rezonátor

- **Odvození rovnic pro IIR pásmový filtr se dvěma póly**

- **Parametry:**

- **$r$  (poloměr) a  $\theta$  (úhel)** definují frekvenční charakteristiku filtru a jeho tlumící vlastnosti.
- Rezonance filtru se dosahuje laděním těchto parametrů, což umožňuje zdůraznit specifické formantové frekvence v syntetizovaných zvucích.



# Filtr se dvěma póly – rezonátor

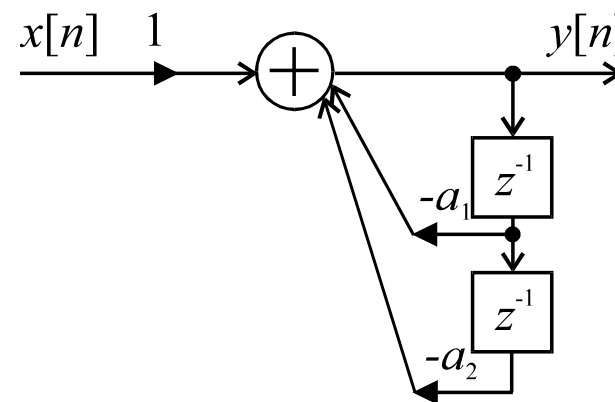
- Odvození rovnic pro IIR pásmový filtr se dvěma póly

$$\begin{aligned}
 H(z) &= \frac{z^2}{(z - re^{j\Theta_0})(z - re^{-j\Theta_0})} = \frac{z^2}{z^2 - zre^{-j\Theta_0} - zre^{j\Theta_0} + r^2} = \\
 &= \frac{z^2}{z^2 - zr(\cos \Theta_0 - j \sin \Theta_0 + \cos \Theta_0 + j \sin \Theta_0) + r^2} = \\
 &= \frac{z^2}{z^2 - 2r \cos \Theta_0 z + r^2} = \frac{z^2}{z^2 + a_1 z + a_2} = \frac{1}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}}
 \end{aligned}$$

$$\Theta_0 = 2\pi \frac{f_0}{f_s}$$

$$a_1 = -2r \cos \Theta_0$$

$$a_2 = r^2$$



# Filtr se dvěma póly – rezonátor

- **Odvození rovnic pro IIR pásmový filtr se dvěma póly**
  - Úpravou  $r$  se mění tlumící faktor, zatímco  $\theta$  nastavuje střední frekvenci, čímž se řídí „ostrot“ rezonance.
  - Dvoupólové filtry poskytují flexibilitu pro úpravu formantových charakteristik prostřednictvím přesného ladění parametrů.

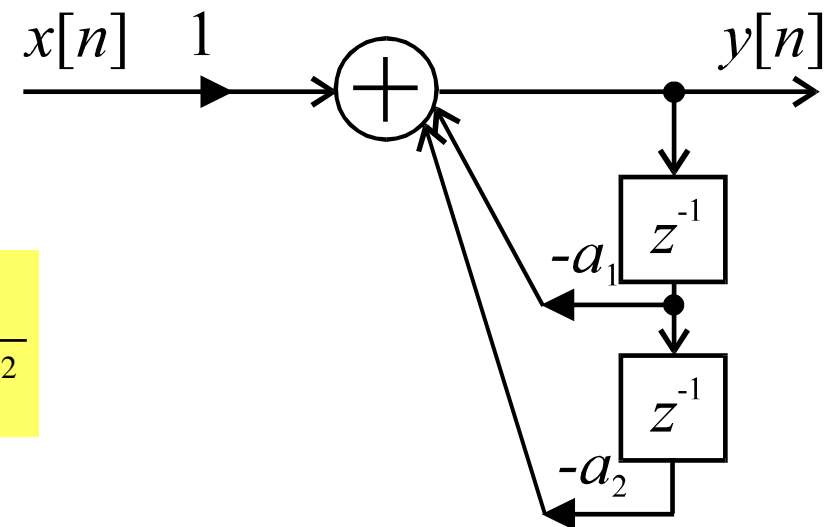
$$\Theta_0 = 2\pi \frac{f_0}{f_s}$$

$$a_1 = -2r \cos \Theta_0$$

$$a_2 = r^2$$

$$y[n] = x[n] - a_1 y[n-1] - a_2 y[n-2]$$

$$H(z) = \frac{z^2}{(z - re^{j\Theta_0})(z - re^{-j\Theta_0})} = \frac{1}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}}$$



# Filtr se dvěma póly – rezonátor

## • Tlumené oscilace u filtrů se dvěma póly

- Tlumení řídí rychlost oscilací, která se s časem snižuje a ovlivňuje tak přirozenost syntetizovaného zvuku.
- Vyšší tlumení vytváří méně rezonující zvuky, zatímco nižší tlumení vytváří výraznější rezonanční vrcholy.

$$r = 0,975$$

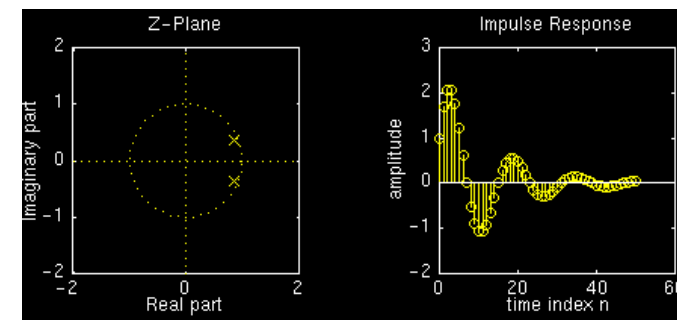
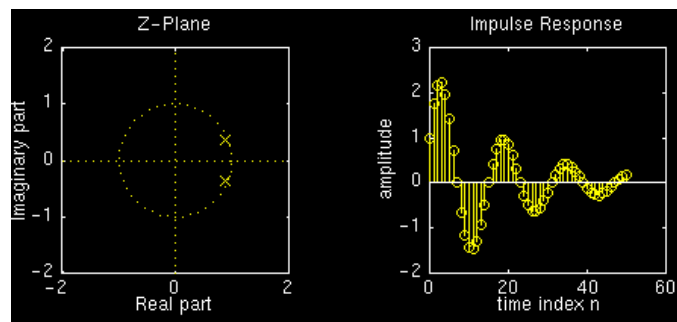
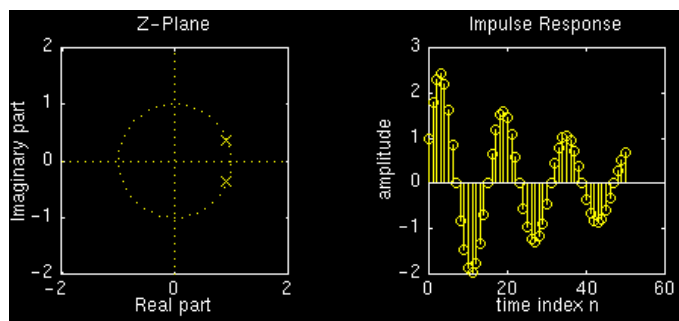
$$\Theta_0 = \frac{\pi}{8}$$

$$r = 0,95$$

$$\Theta_0 = \frac{\pi}{8}$$

$$r = 0,925$$

$$\Theta_0 = \frac{\pi}{8}$$

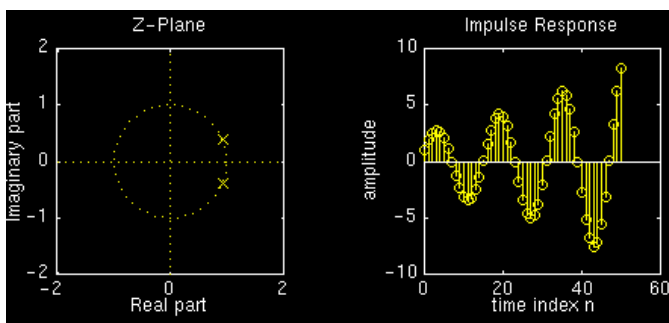


# Filtr se dvěma póly – rezonátor

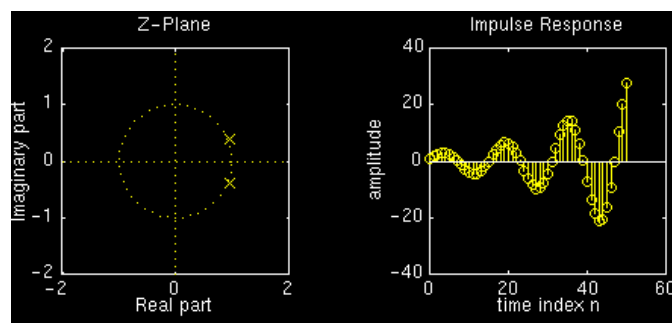
## • Netlumené oscilace rezonátorů

- Když se pól nachází mimo jednotkovou kružnici, filtr se stává nestabilním, což v praxi může způsobit, že audio systém bude produkovat zvonivý nebo „pískavý“ zvuk.
- Rezonanční systém s póly na jednotkové kružnici je na hranici stability, což znamená, že oscilace pokračují bez tlumení.
- V praxi se snažíme udržovat póly mírně uvnitř jednotkové kružnice, abychom zajistili stabilitu systému a zároveň zachovali kontrolovaný rezonanční efekt.

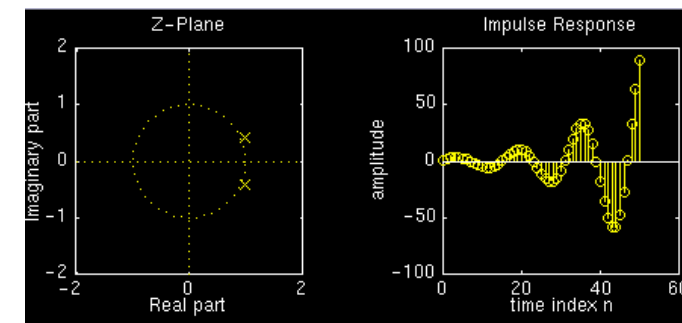
$$r = 1,025 \quad \Theta_0 = \frac{\pi}{8}$$



$$r = 1,05 \quad \Theta_0 = \frac{\pi}{8}$$



$$r = 1,075 \quad \Theta_0 = \frac{\pi}{8}$$



# Filtr se dvěma póly – rezonátor

- **Filtr se dvěma póly a konstantním koeficientem  $a_2$** 
  - V tomto případě systém zůstává v rezonanci a frekvence kmitání se mění s úhlem  $\theta$  na jednotkové kružnici.
  - Úpravou  $\theta$  můžeme řídit rezonanční frekvenci a zároveň udržovat rezonanci aktivní, za předpokladu zachování stability.

$$a_1 = -2 \cos(\pi / 6) \quad a_2 = 1$$

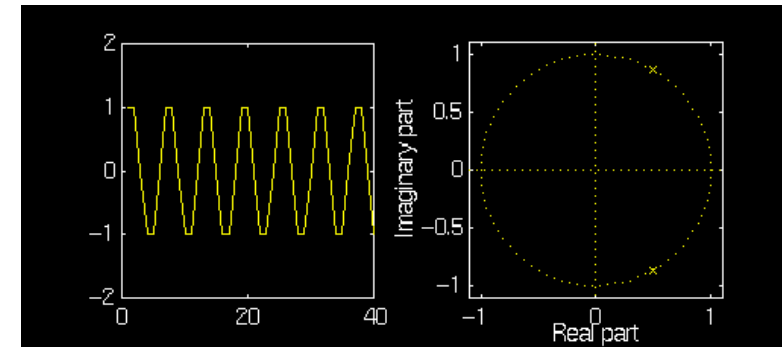
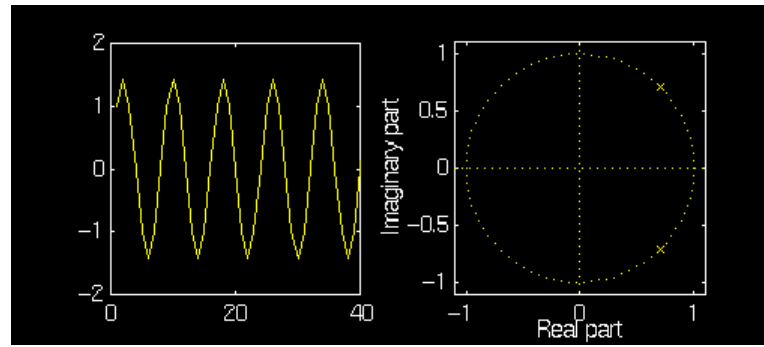
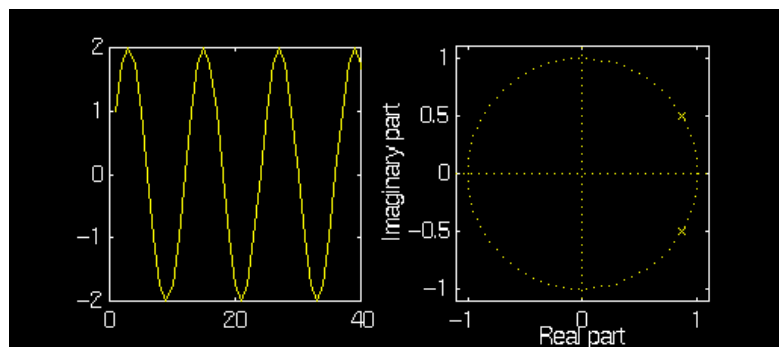
$$a_1 = -2 \cos(\pi / 4) \quad a_2 = 1$$

$$a_1 = -2 \cos(\pi / 3) \quad a_2 = 1$$

$$a_1 = -2 \cos(\pi / 4) \quad a_2 = 1$$

$$a_1 = -2 \cos(\pi / 3) \quad a_2 = 1$$

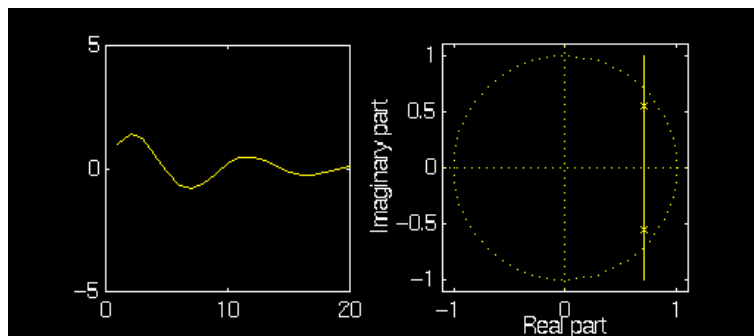
$$a_1 = -2 \cos(\pi / 3) \quad a_2 = 1$$



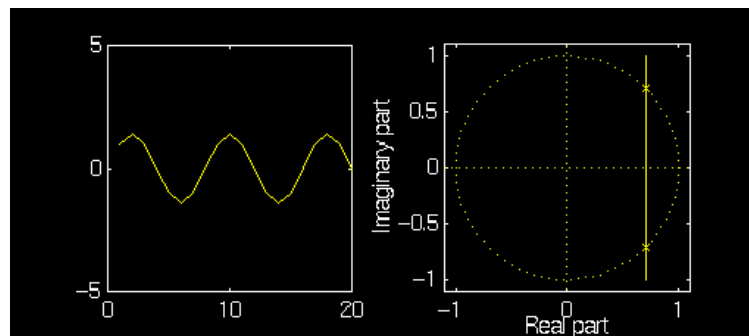
# Filtr se dvěma póly – rezonátor

- **Filtr se dvěma póly a konstantním koeficientem  $a_1$** 
  - Při konstantní hodnotě  $a_1$  lze úpravami  $a_2$  řídit stabilitu systému a rezonanční frekvenci.
  - S rostoucí hodnotou  $a_2$  se filtr blíží nestabilitě, což má za následek vyšší frekvence oscilací.
  - Pečlivé ladění  $a_2$  nám umožňuje ovlivnit rezonanční charakteristiky bez ohrožení stability filtru.

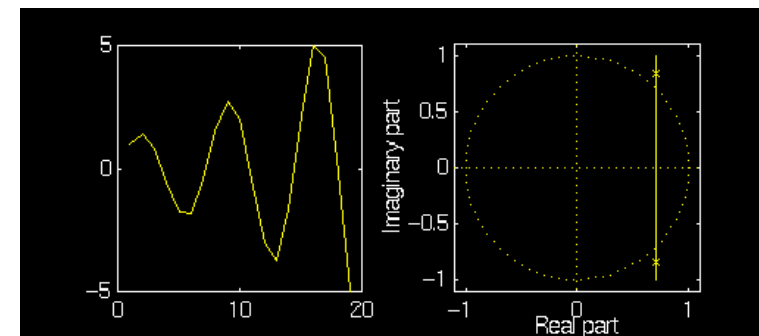
$$a_1 = -2 \cos(\pi / 4) \quad a_2 = 0,8$$



$$a_1 = -2 \cos(\pi / 4) \quad a_2 = 1$$

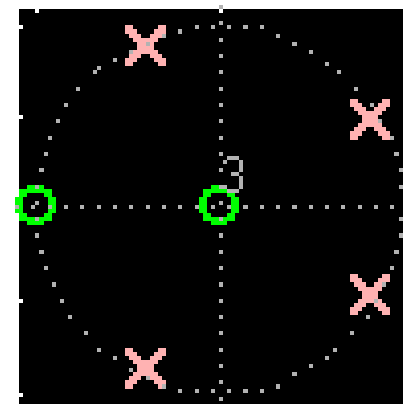
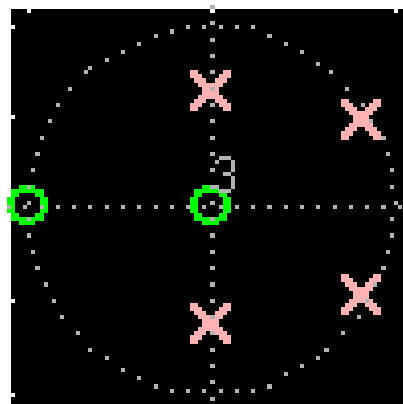
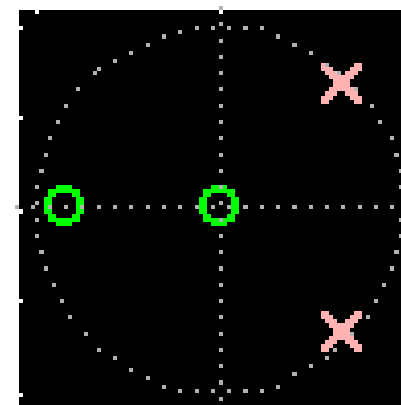
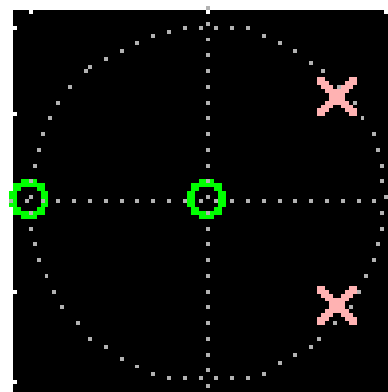
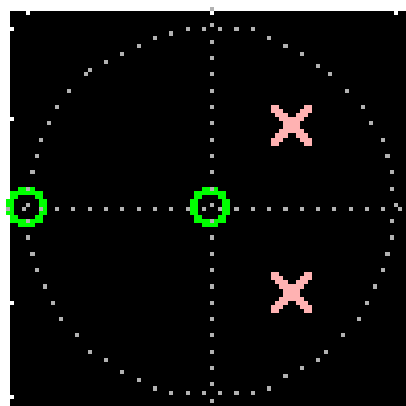


$$a_1 = -2 \cos(\pi / 4) \quad a_2 = 1,2$$



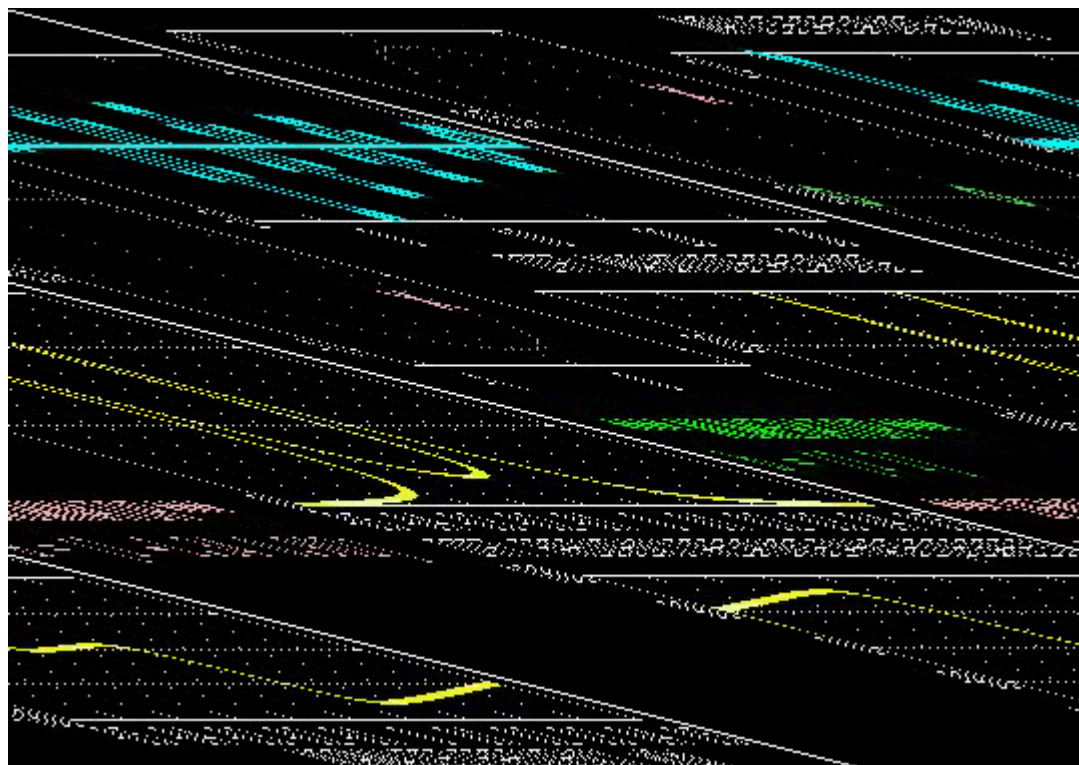
# Analýza filtrů – vliv pohybu pólů

- Pohyb pólu ovlivňuje frekvenční odezvu filtru, rezonanci a stabilitu.



# Analýza filtrů – vliv pohybu pólů

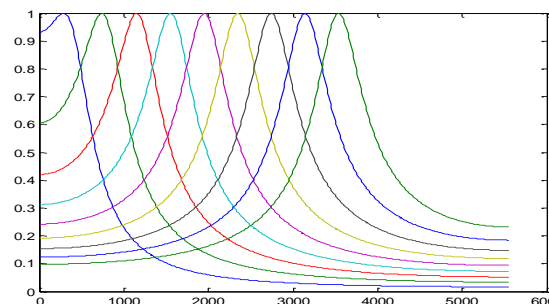
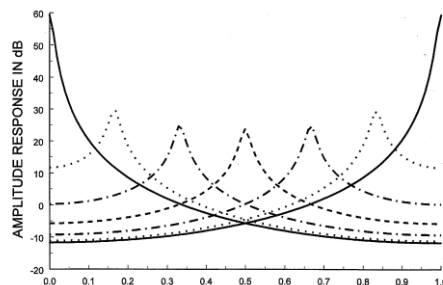
- Pohyb pólu ovlivňuje frekvenční odezvu filtru, rezonanci a stabilitu.



# Filtr se dvěma póly – rezonátor

## • Normování a šířka pásma u filtrů se dvěma póly

- Normování zajišťuje stejnou amplitudy napříč formantovými frekvencemi, což je v aplikacích vícepásmové syntézy nezbytné.
- Použití normovaných bank filtrů zajišťuje vyvážené výstupní spektrum při zvukovou syntézu.



$$H(\omega_0) = \frac{b_0}{(1 - re^{j\omega_0} e^{-j\omega_0})(1 - re^{-j\omega_0} e^{-j\omega_0})}$$

$$= \frac{b_0}{(1 - r)(1 - re^{-j2\omega_0})}$$

$$|H(\omega_0)| = \frac{b_0}{(1 - r)\sqrt{1 + r^2 - 2r \cos 2\omega_0}} = 1$$

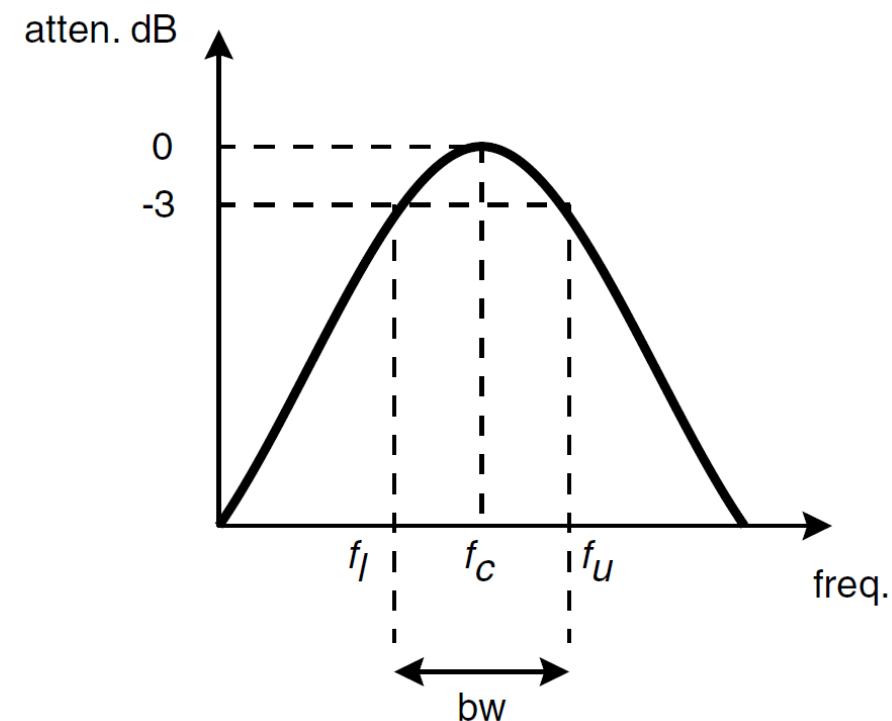
$$b_0 = (1 - r)\sqrt{1 + r^2 - 2r \cos 2\omega_0}$$

# Filtr se dvěma póly – rezonátor

## • Šířka pásma rezonátoru bw

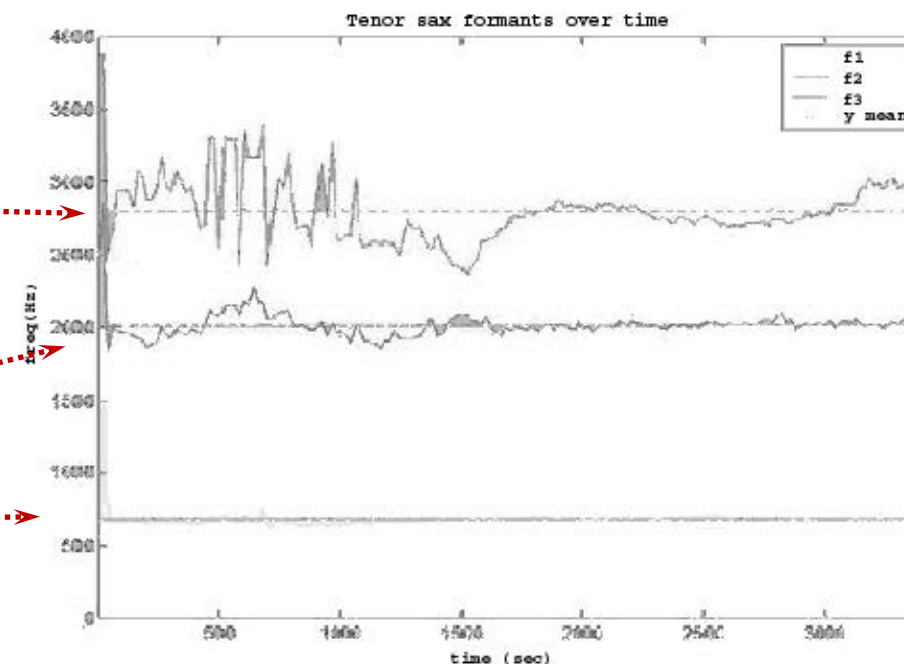
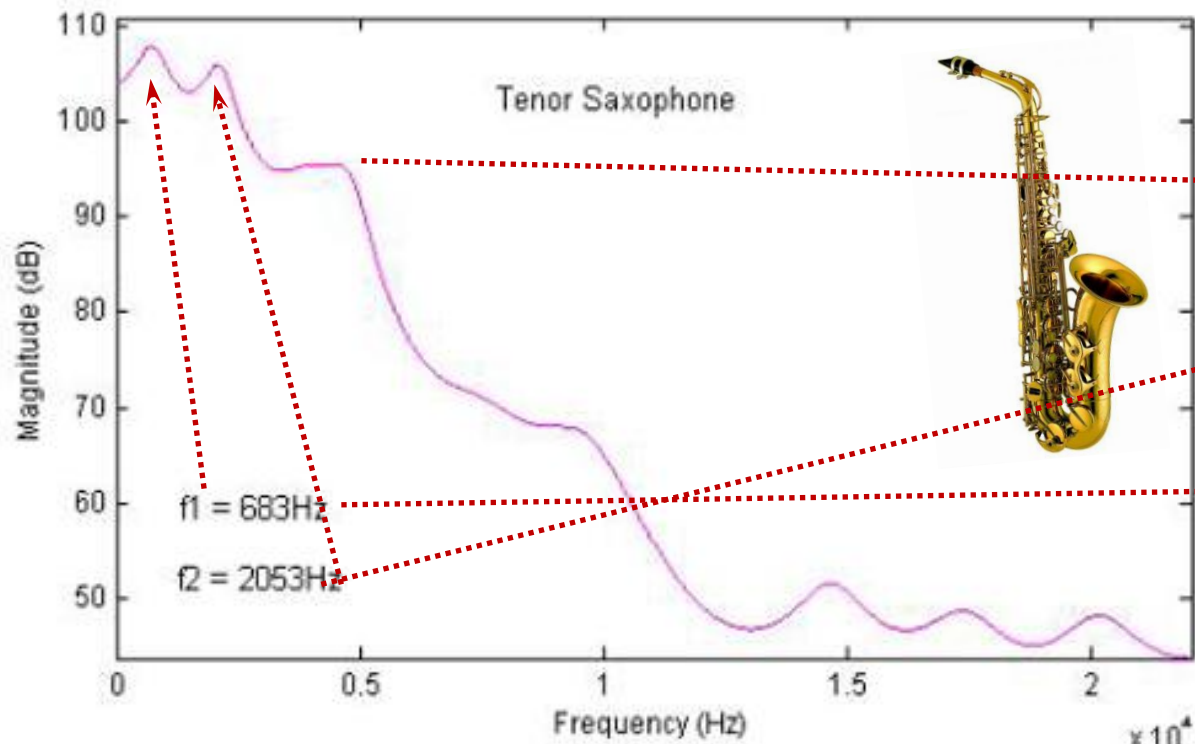
- $bw = 2(1 - r)$  dává jednoduchý lineární vztah mezi šířkou pásma a poloměrem pólu..
- Se vzdalováním  $r$  od 1 se šířka pásma zvyšuje v důsledku vyššího tlumení.
- Součinitel 2 udržuje aproximaci v blízkosti  $r = 1$ .
- Vztah umožňuje snadné ovládání šířky pásma změnou  $r$ .

$$\Delta\omega \approx 2(1 - r)$$



## • Spektrum saxofonu

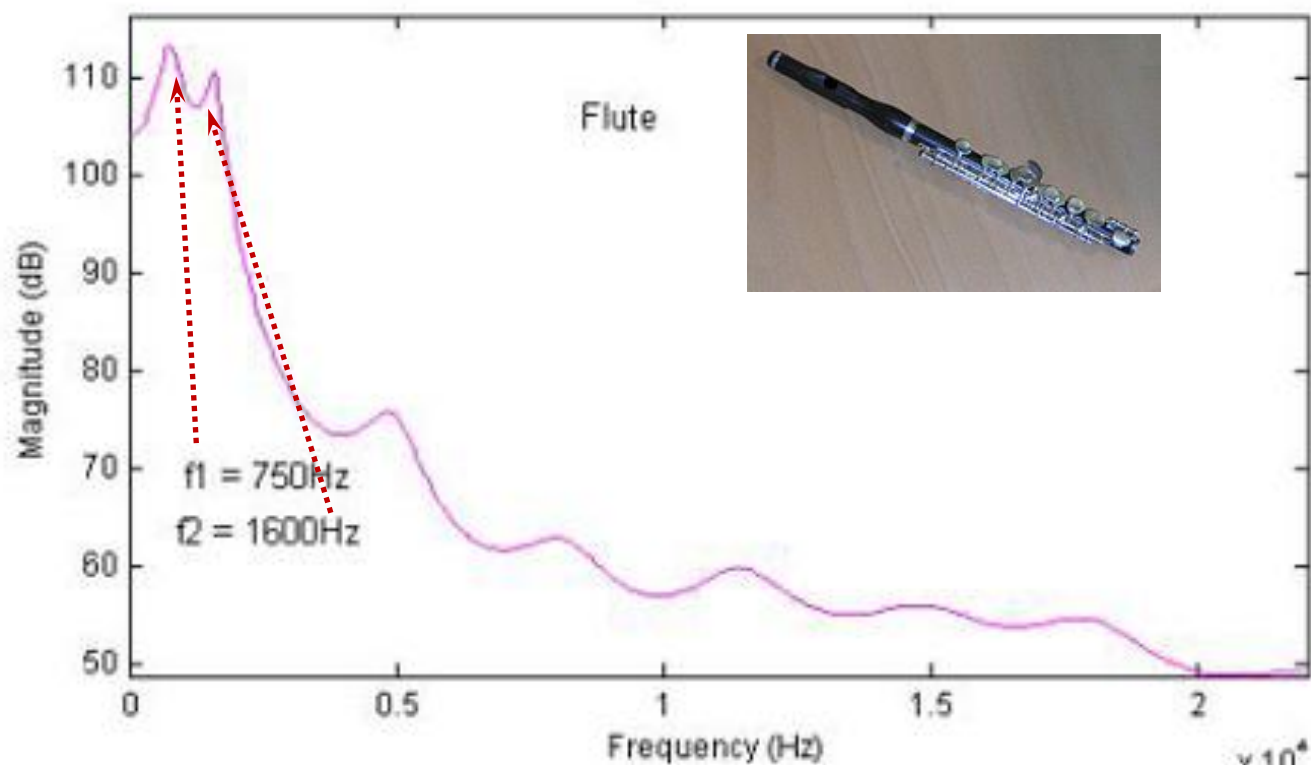
- *Buzení*: proudění vzduchu
- *Rezonátor*: rezonuje vzduchový sloupec uvnitř saxofonu, modulovaný rty muzikanta.



Evolution of the Saxophone Spectrum

## • Spektrum flétny

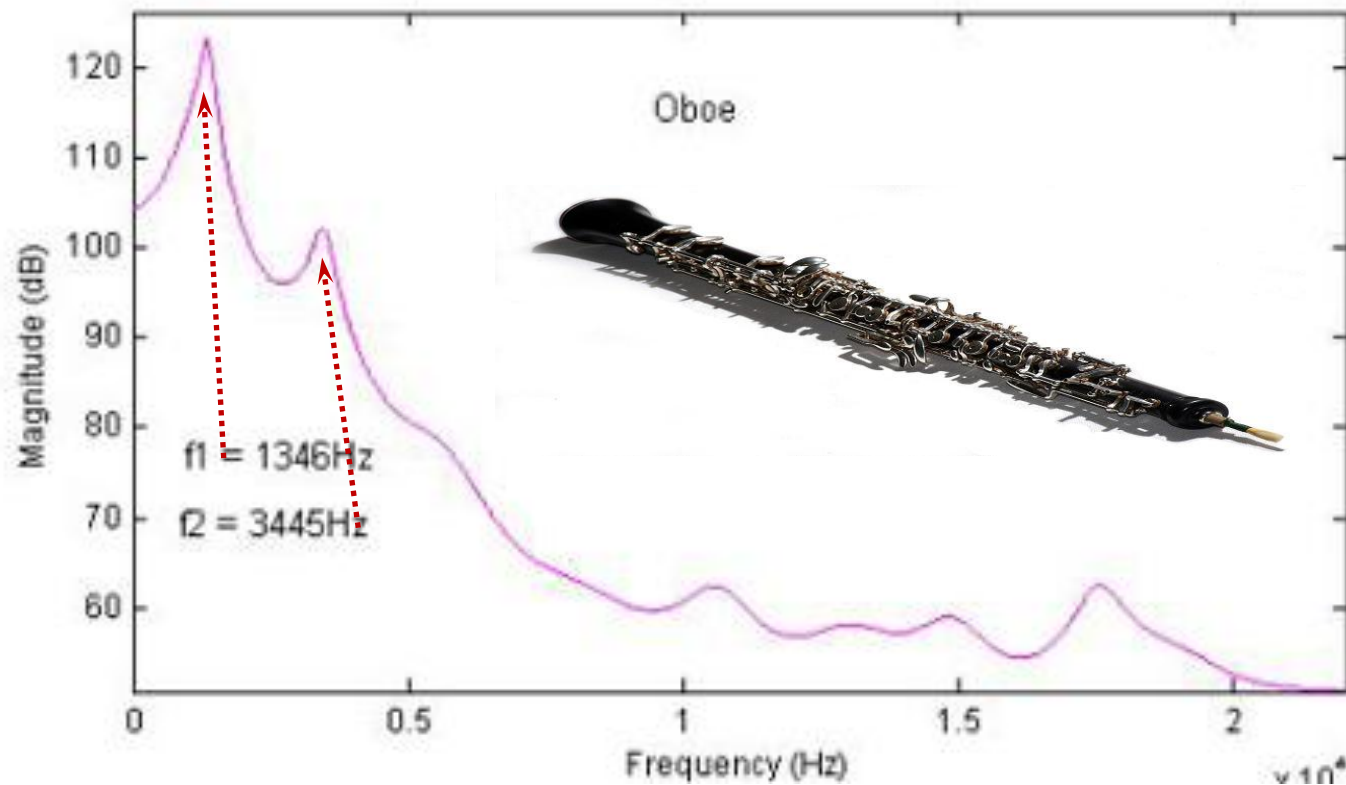
- *Buzení*: proudění vzduchu
- *Rezonátor*: Vzduchový sloupec ve flétně funguje jako rezonátor a změny polohy prstů ovlivňují formantové frekvence.



# Formanty hudebních nástrojů

## • Spektrum hoboje

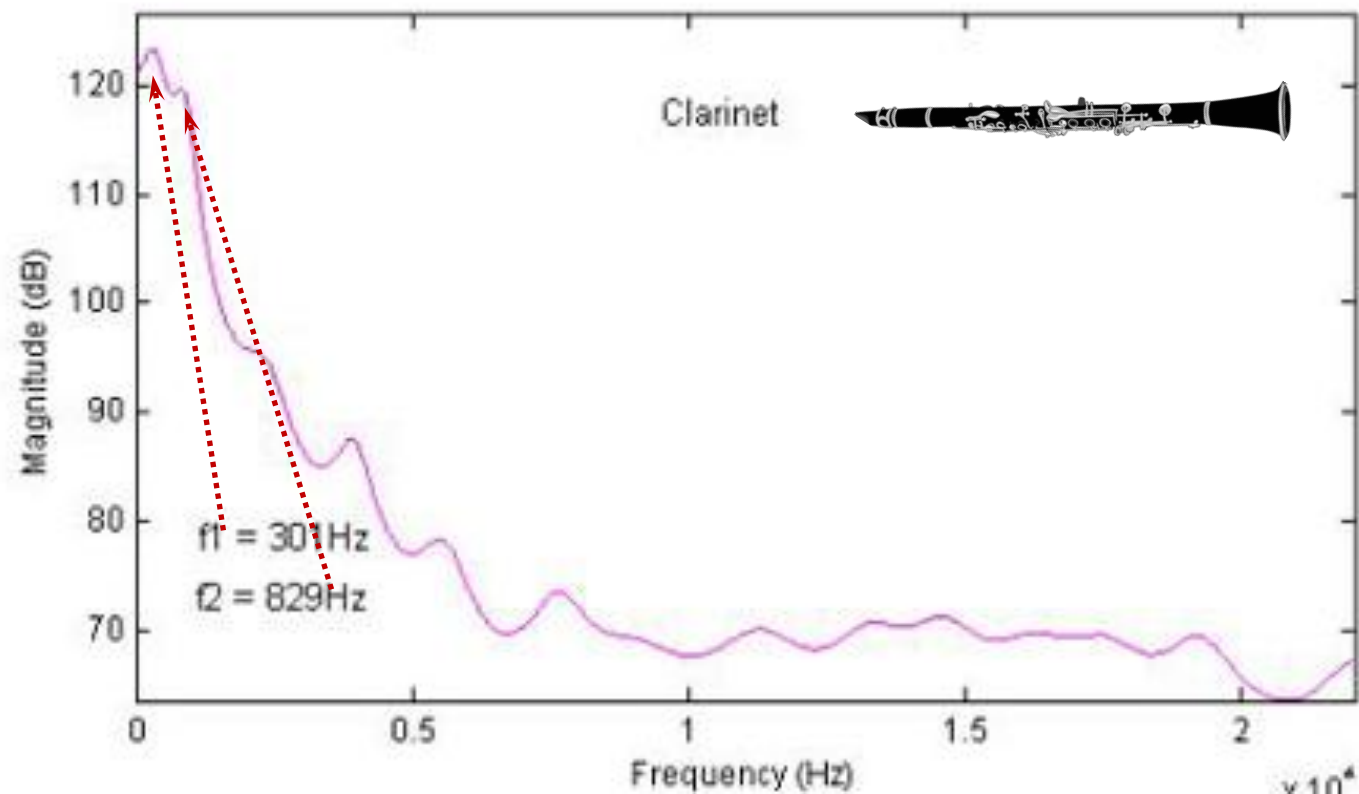
- *Buzení*: proudění vzduchu a plátek
- *Rezonátor*: formanty definuje vzduchový sloupec uvnitř hoboje, přičemž plátek přispívá ke složitosti zvukového spektra.



# Formanty hudebních nástrojů

## • Spektrum klarinetu

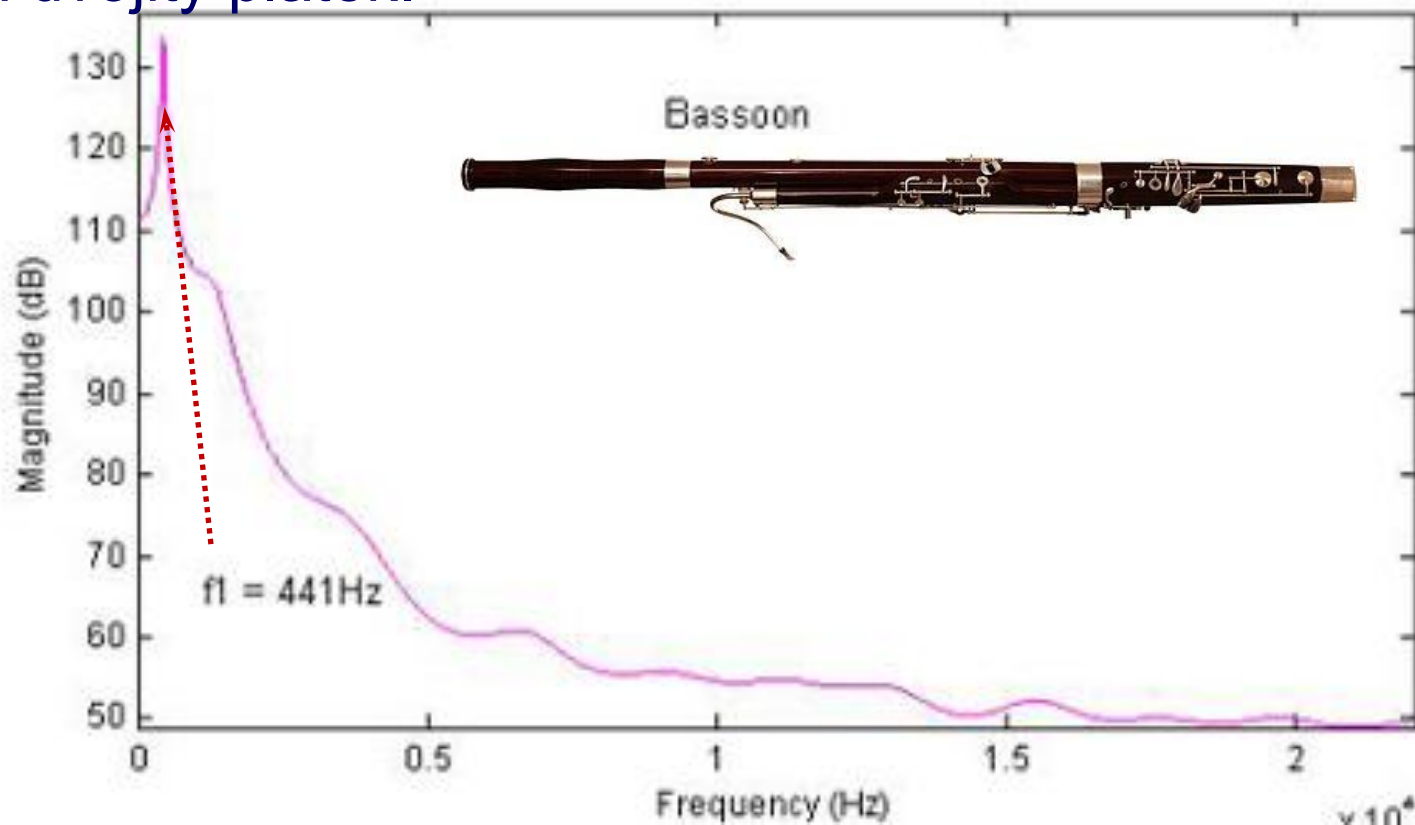
- *Buzení*: proudění vzduchu
- *Rezonátor*: rezonuje vzduchový sloupec klarinetu, přičemž zvukovému spektru dominují liché harmonické..



# Formanty hudebních nástrojů

## • Spektrum fagotu

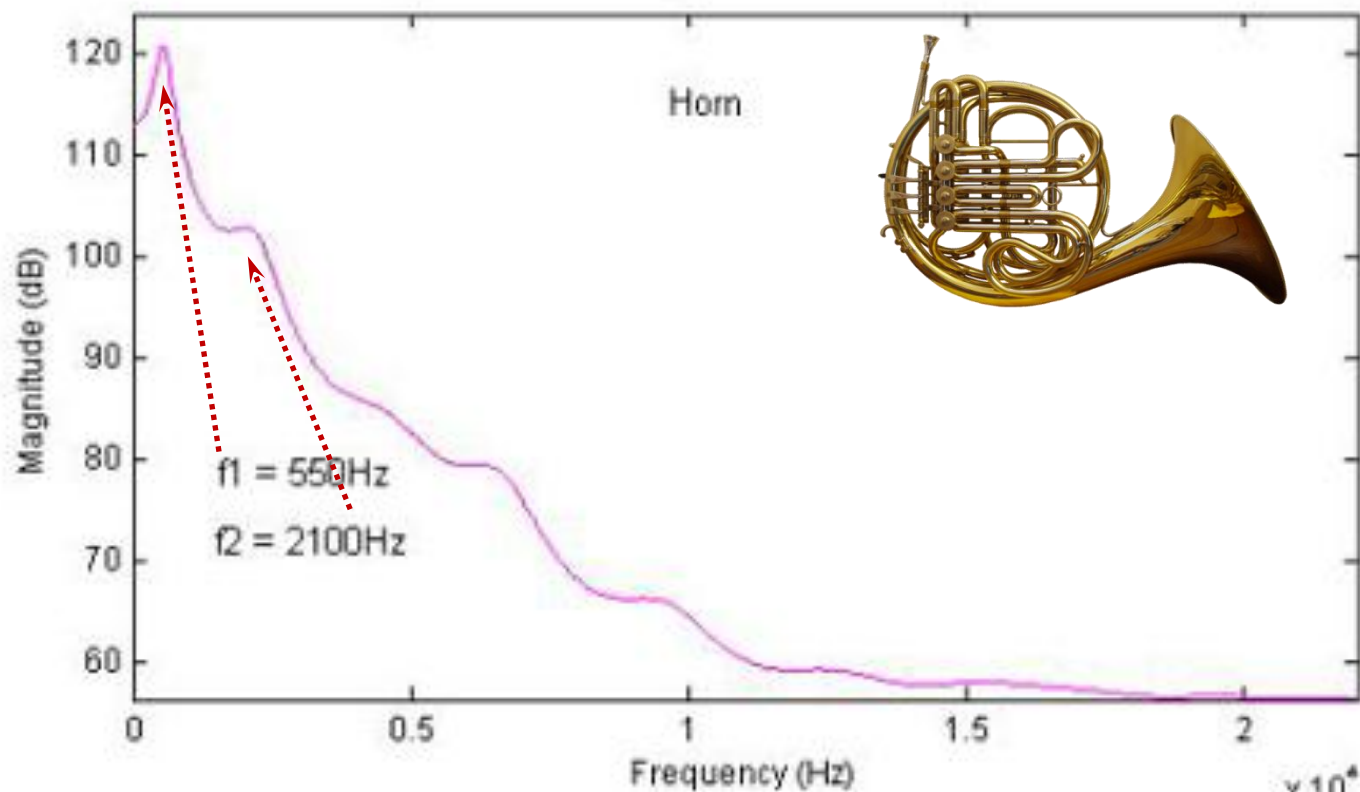
- *Buzení*: proudění vzduchu a jazýček
- *Rezonátor*: k jedinečné, bohaté harmonické struktuře s výraznými formanty přispívá dvojitý plátek.



# Formanty hudebních nástrojů

## • Spektrum lesního rohu

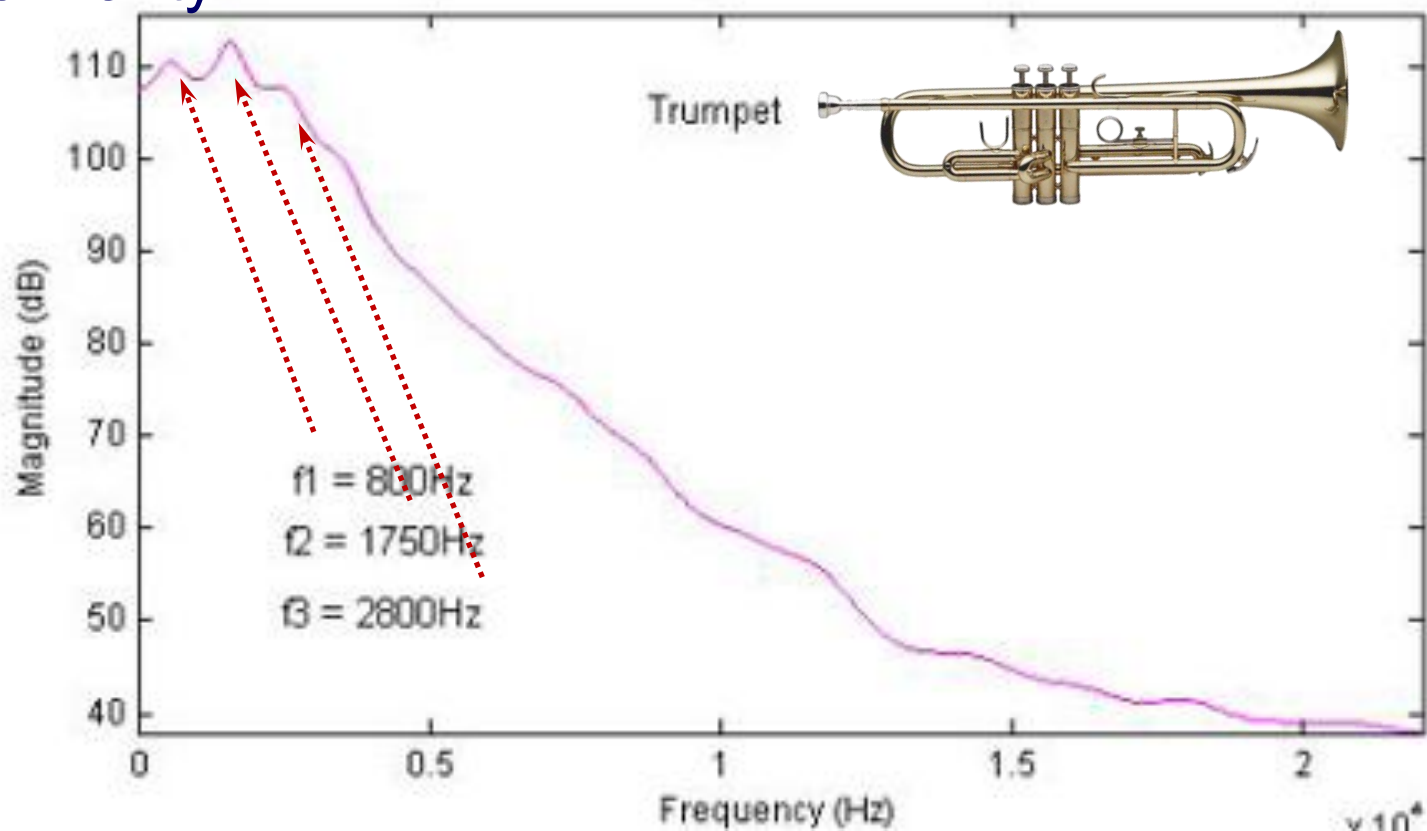
- *Buzení*: proudění vzduchu a rty
- *Rezonátor*: Dlouhý, stočený vzduchový sloupec lesního rohu určuje formantové frekvence a charakteristický zvuk.



# Formanty hudebních nástrojů

## • Spektrum trubky

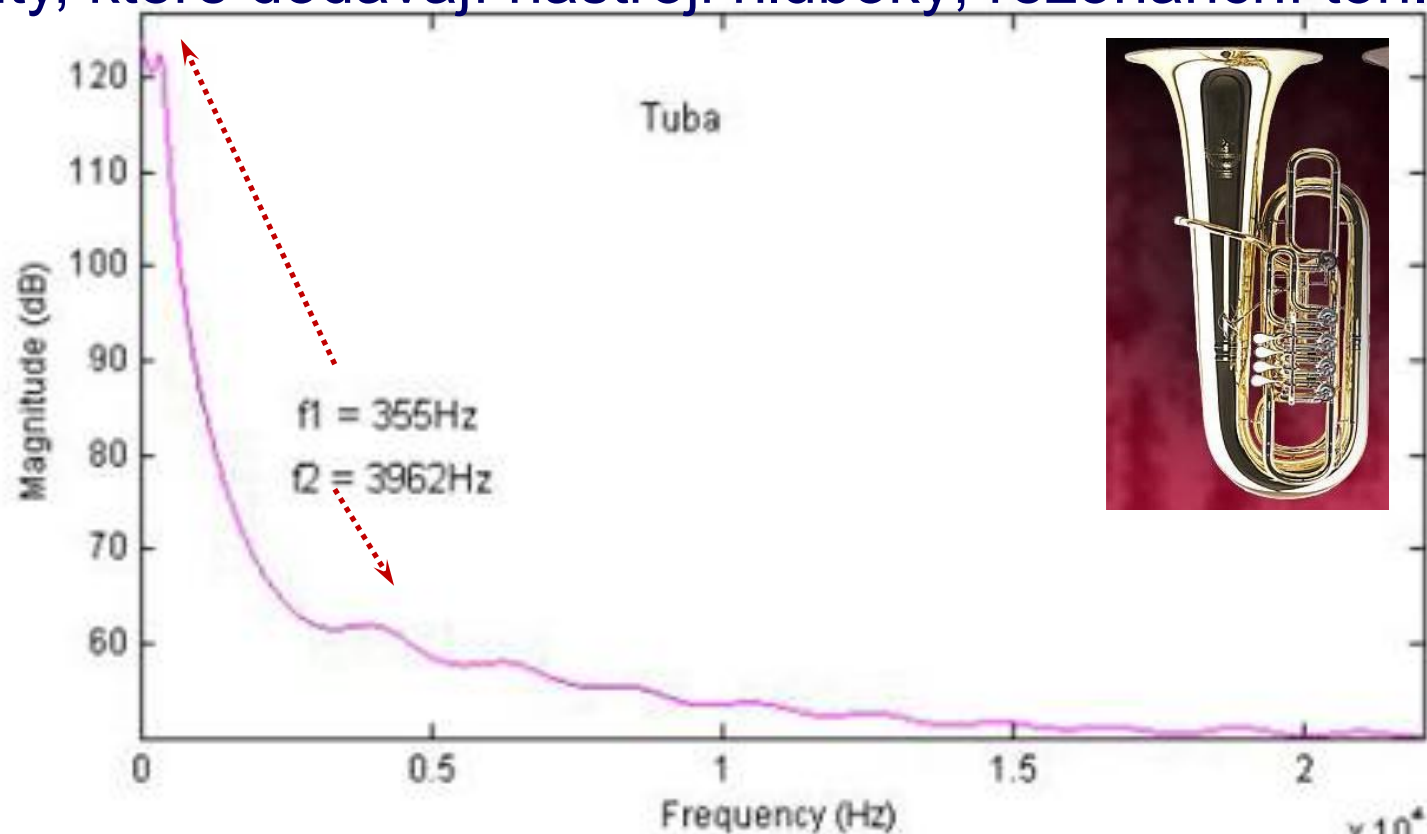
- *Buzení*: proudění vzduchu a rty
- *Rezonátor*: rozšířený otvor trubky, vzduchový sloupec a rty vytváří formanty



# Formanty hudebních nástrojů

## • Spektrum tuby

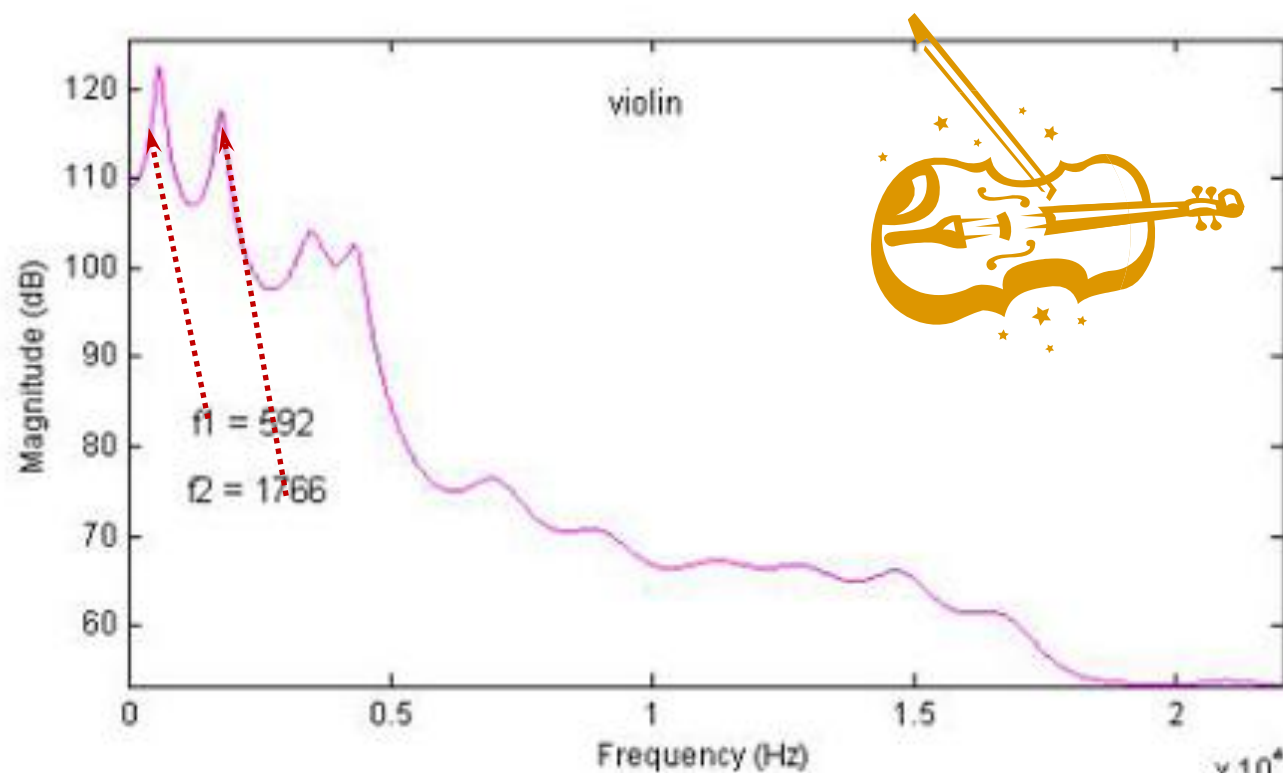
- *Buzení*: proudění vzduchu a rty
- *Rezonátor*: velký vzduchový sloupec tuby určuje její nízkofrekvenční formanty, které dodávají nástroji hluboký, rezonanční tón.



# Formanty hudebních nástrojů

## • Spektrum houslí

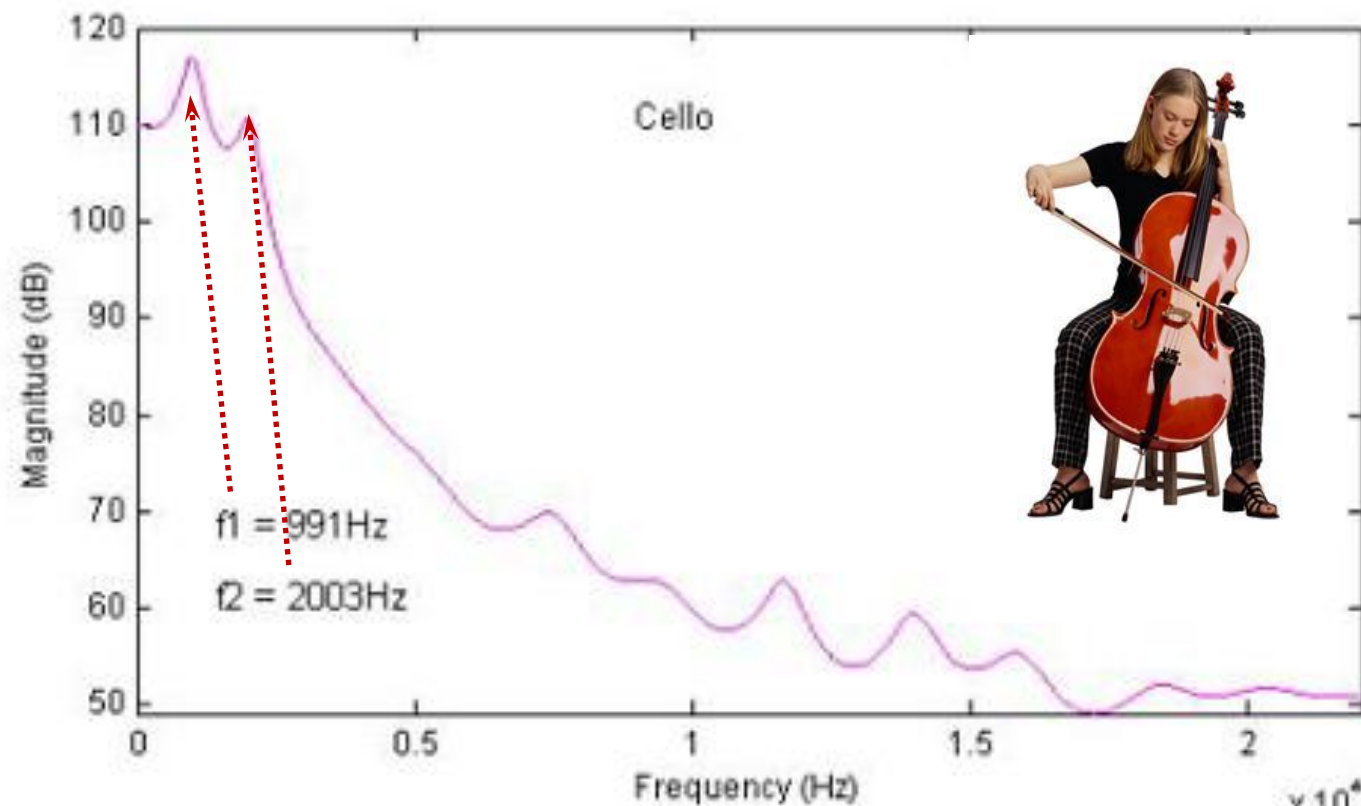
- *Buzení*: smyčec a struny
- *Rezonátor*: především ozvučná deska a vnitřní objem vzduchu, formuje formanty a dává houslím jejich charakteristický zabarvení.



# Formanty hudebních nástrojů

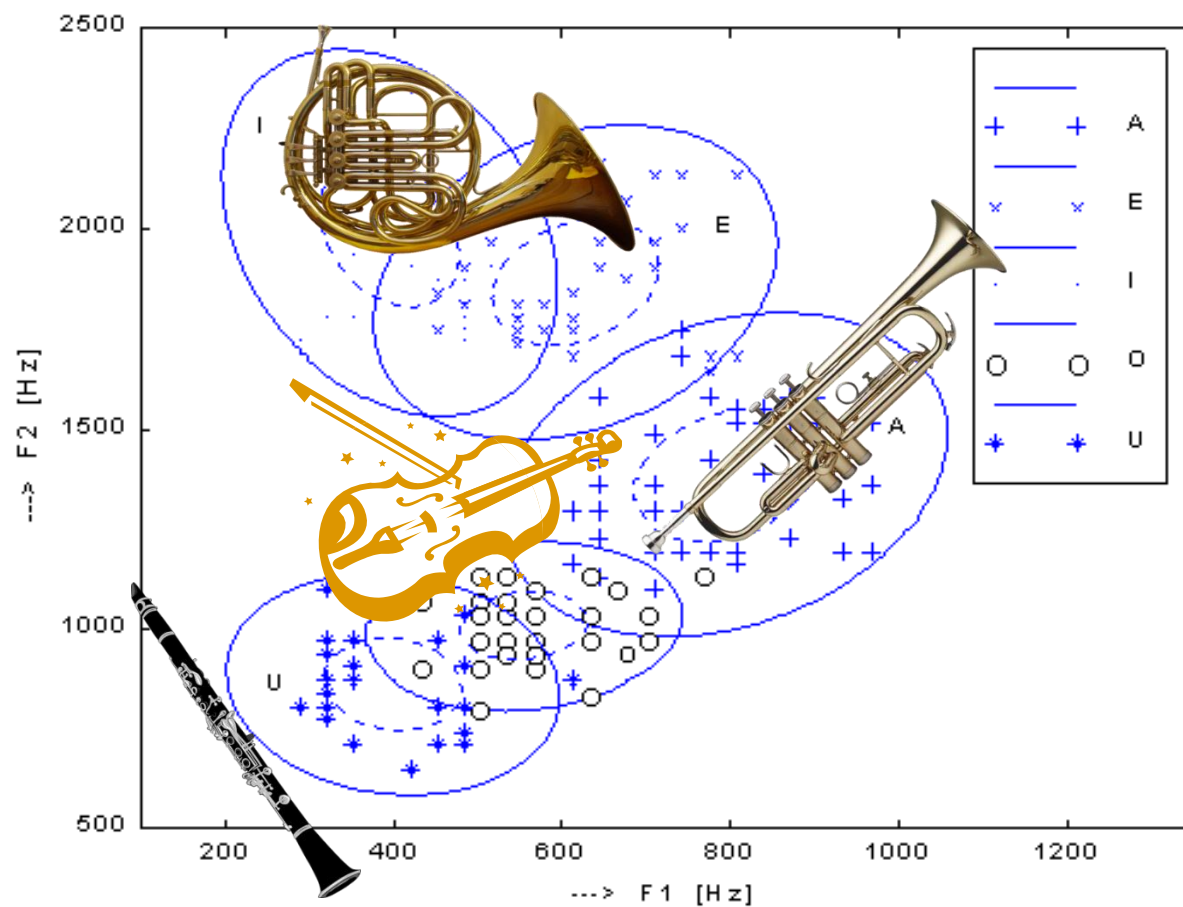
## • Spektrum violoncella

- *Buzení*: smyčec a struny
- *Rezonátor*: větší tělo a ozvučná deska violoncella (ve srovnání s houslemi) produkují nižší formanty, což přispívá k jeho teplému a bohatému zvuku.



# Formanty hudebních nástrojů

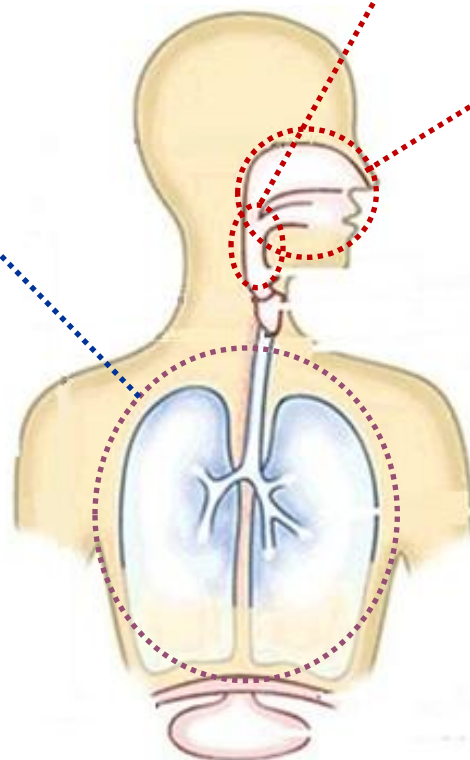
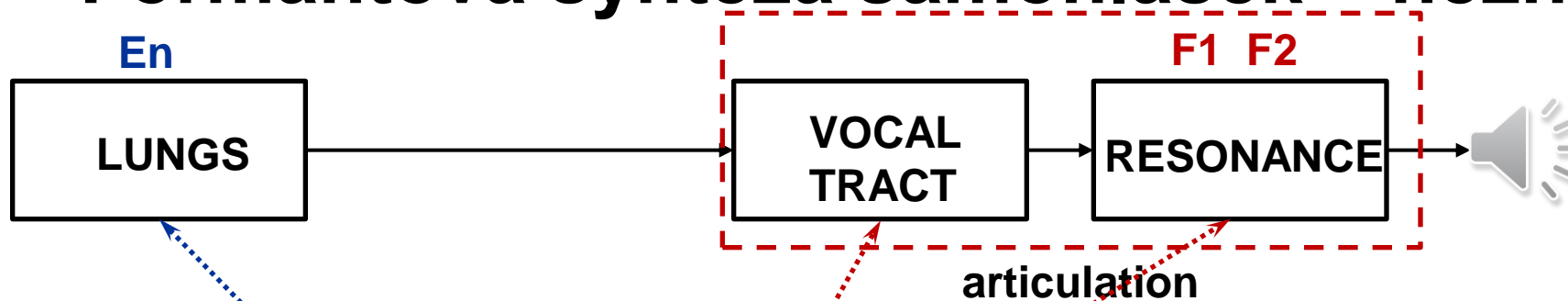
- Vizualizace nástrojů a samohlásek v rovině F1-F2



- **Úvod do formantové syntézy řeči**
  - Zjednodušené modelování hlasového traktu pomocí formantů a antiformantů.
  - Založeno na akustické teorii produkce řeči.
  - Zjednodušená simulace řeči pomocí modelu zdroj – filtr, kde znělé zvuky produkuje generátor pulzů a neznělé zvuky produkuje šum nebo smíšená excitace.
  - Výhody:
    - Jednoduchý model
    - Snadné ovládání prozodických charakteristik
    - Konzistentní kvalita zvuku
    - Schopnost reprezentovat změny hlasu a emoce
  - Nevýhody:
    - Vyžaduje složité manuální nastavování pravidel
    - Interakce parametrů může ovlivnit realismus
    - Obtížné přirozené vytváření explozív

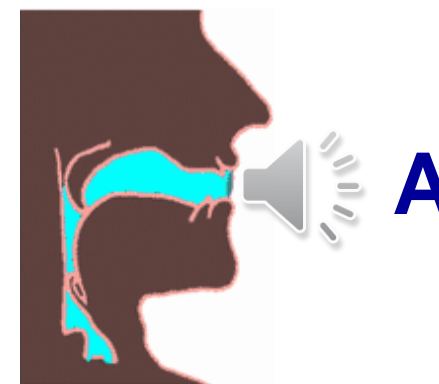
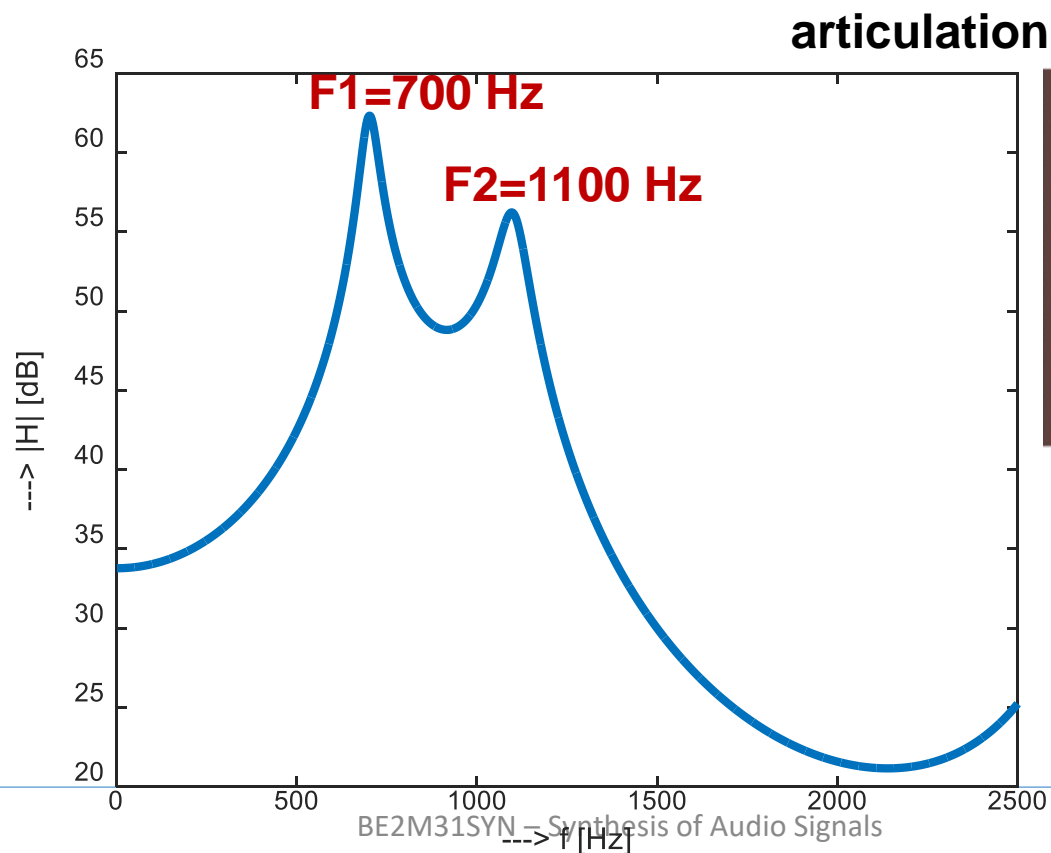
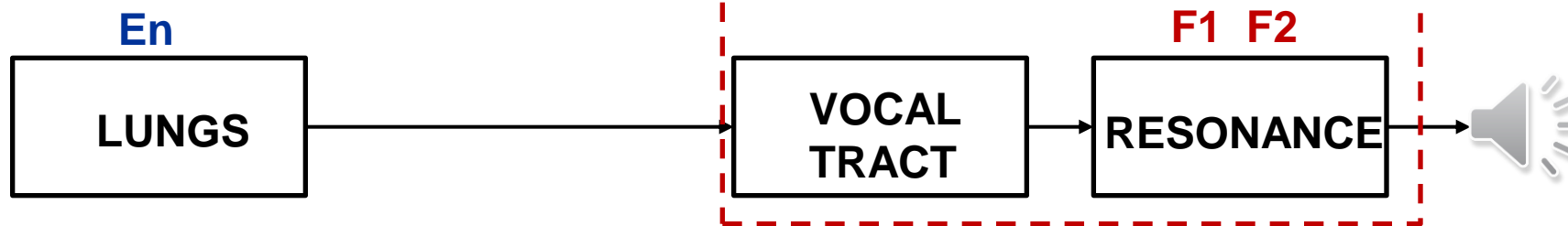
# Hlas a řeč

- Formantová syntéza samohlásek – neznělé buzení



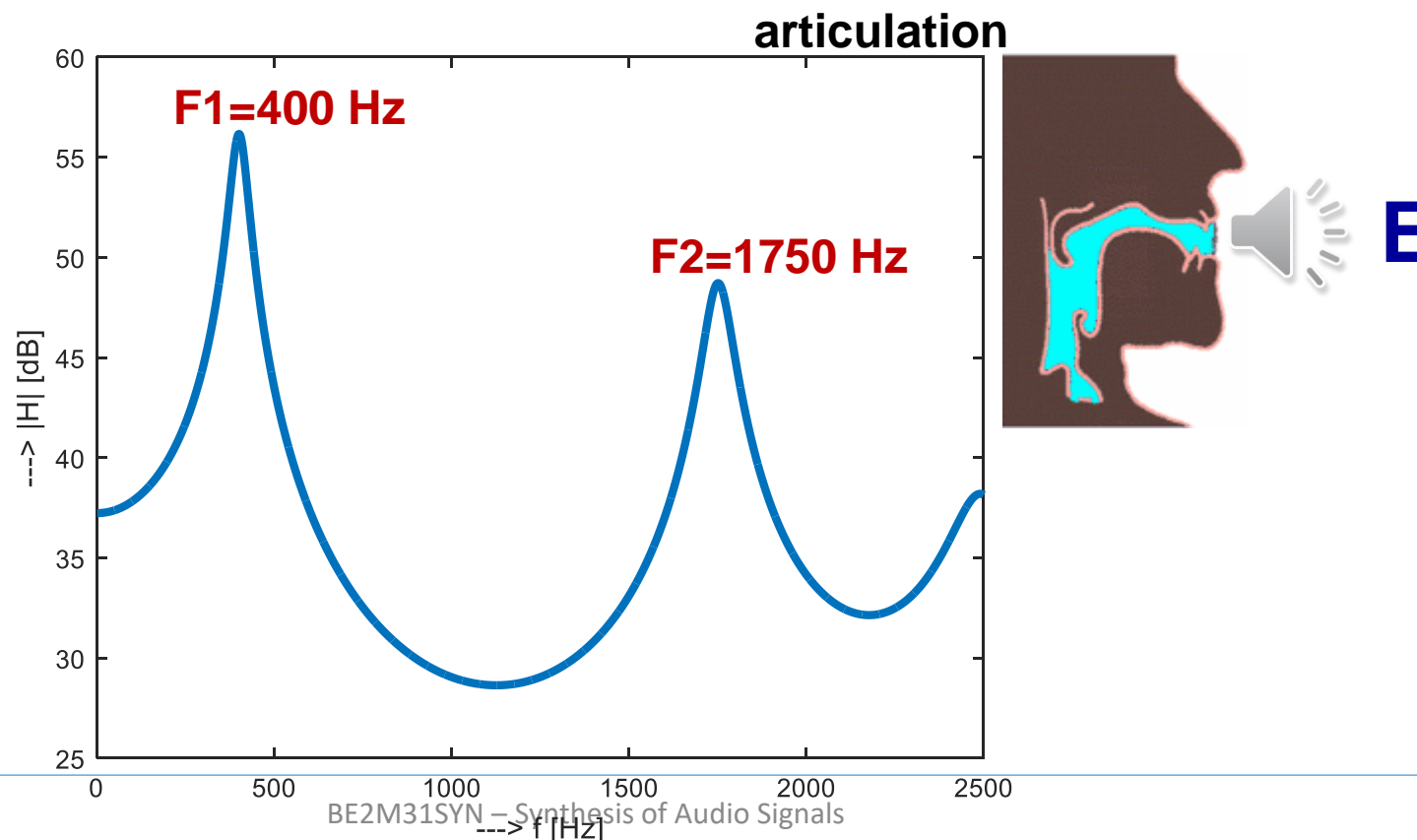
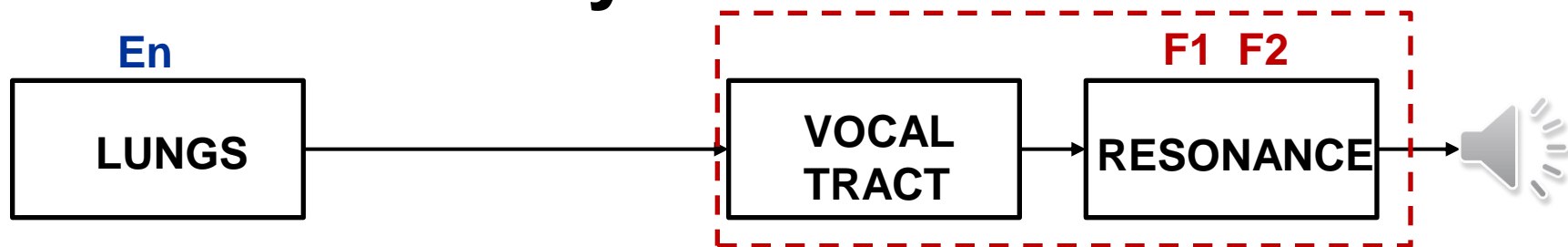
# Hlas a řeč

- Formantová syntéza samohlásek – neznělé buzení



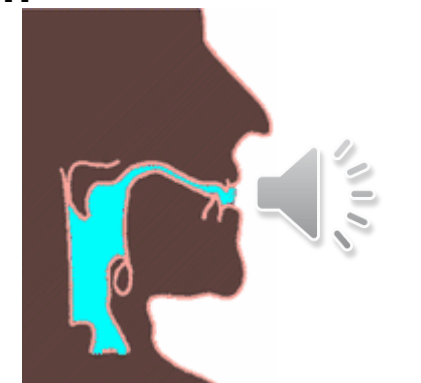
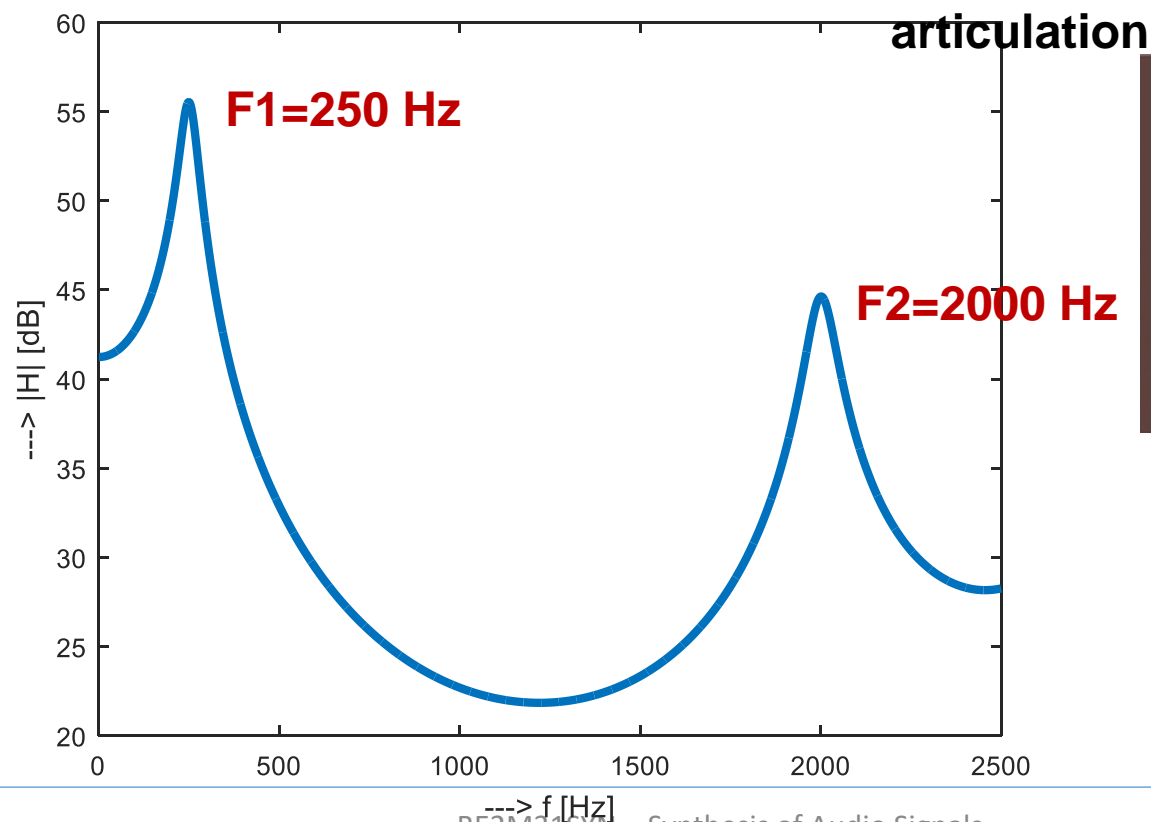
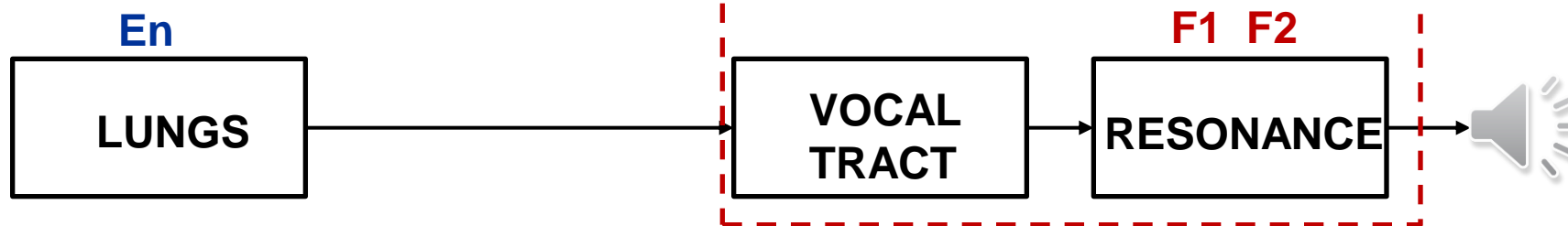
# Hlas a řeč

- Formantová syntéza samohlásek – neznělé buzení



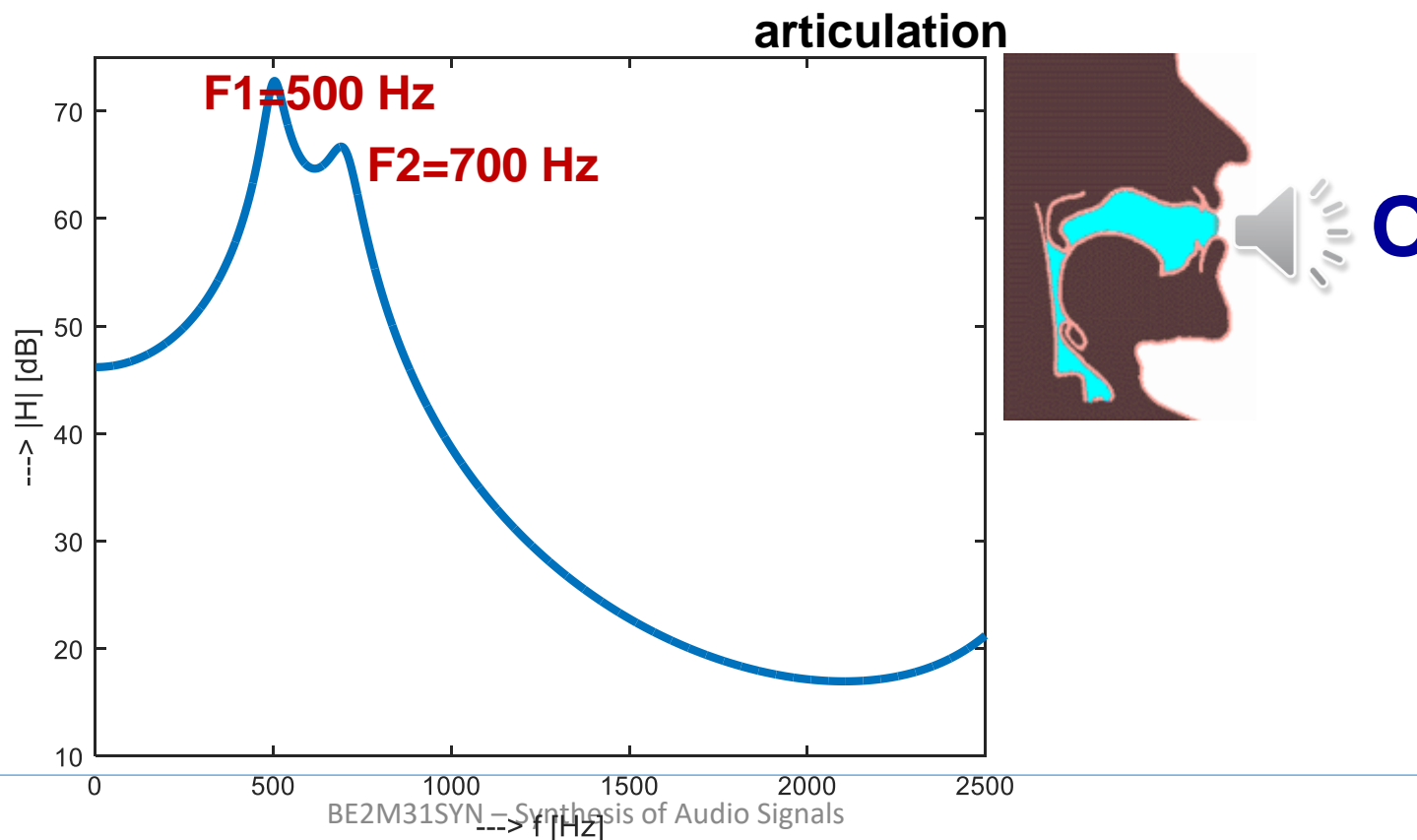
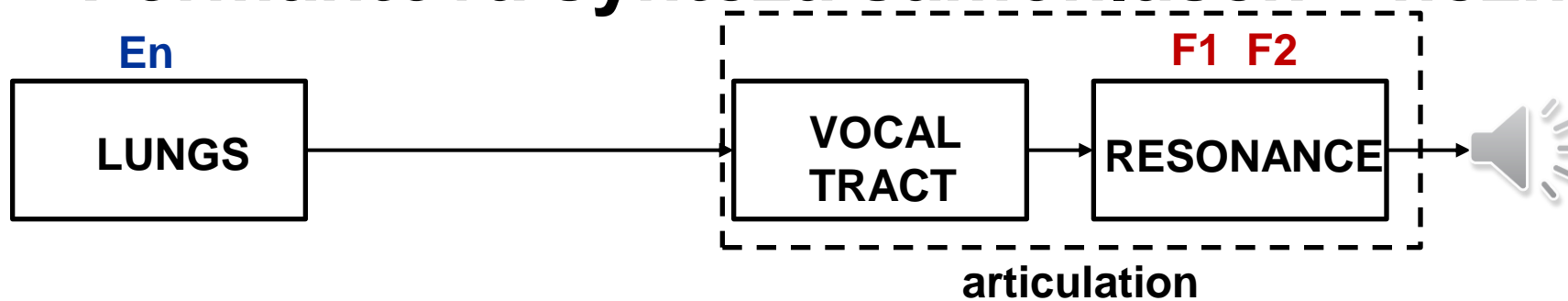
# Hlas a řeč

- Formantová syntéza samohlásek – neznělé buzení



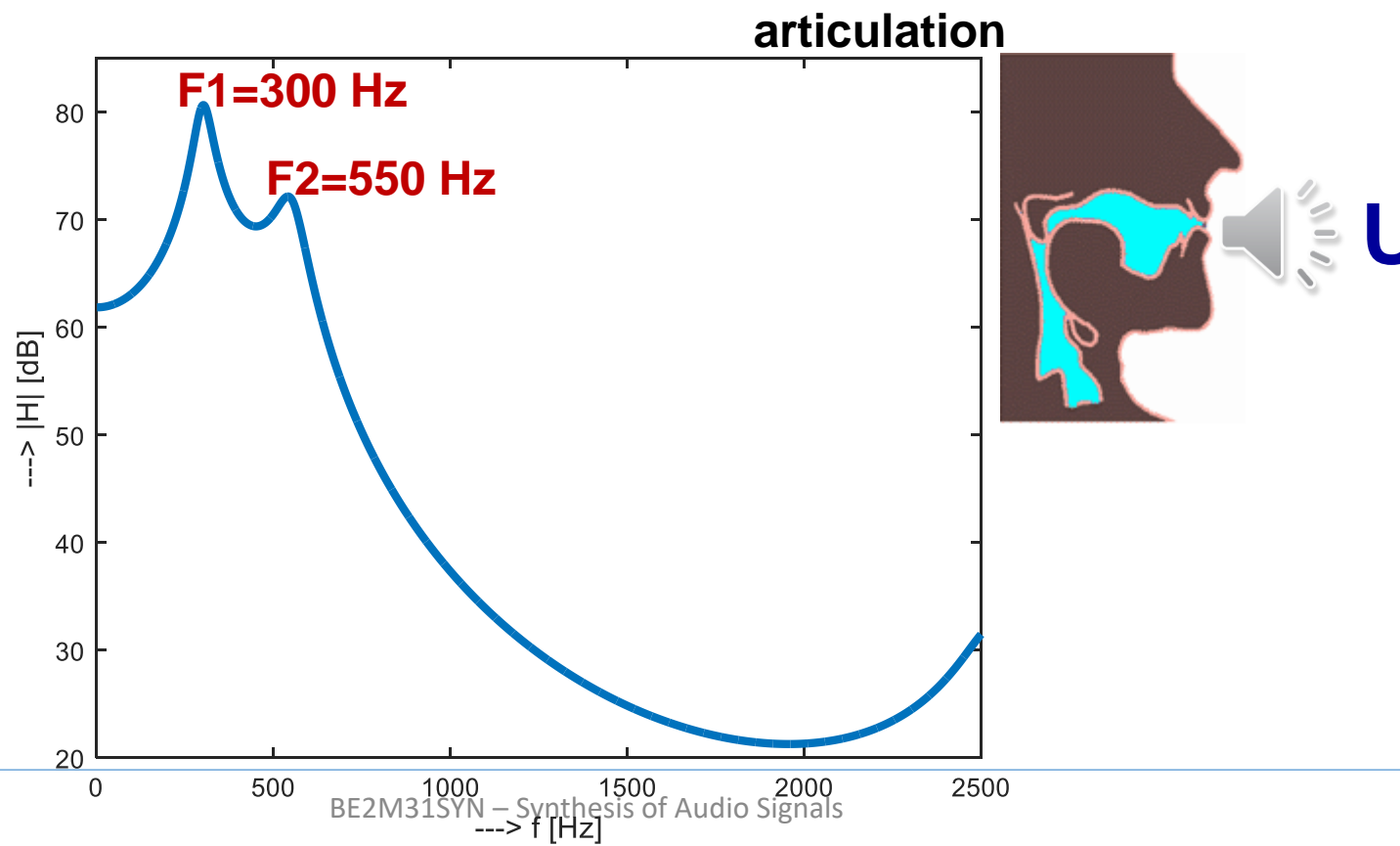
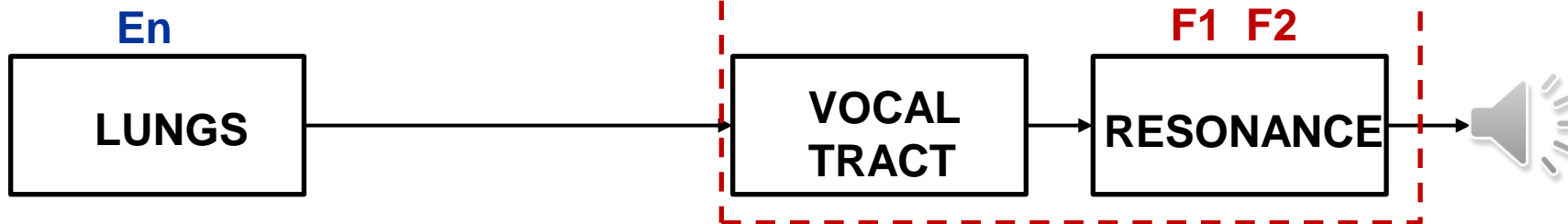
# Hlas a řeč

- Formantová syntéza samohlásek – neznělé buzení



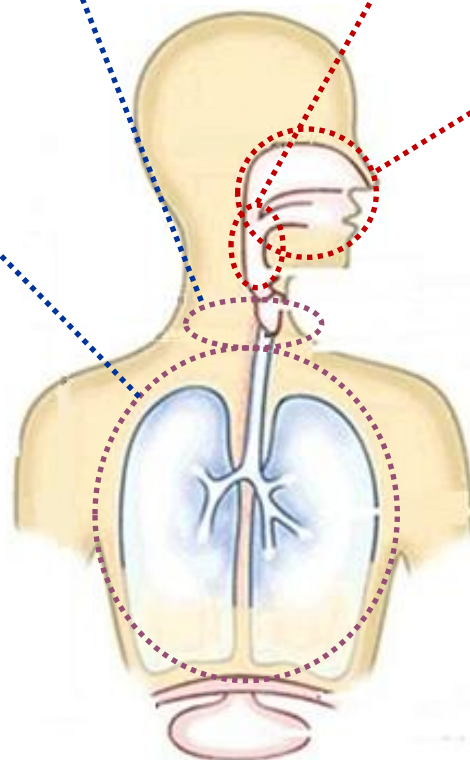
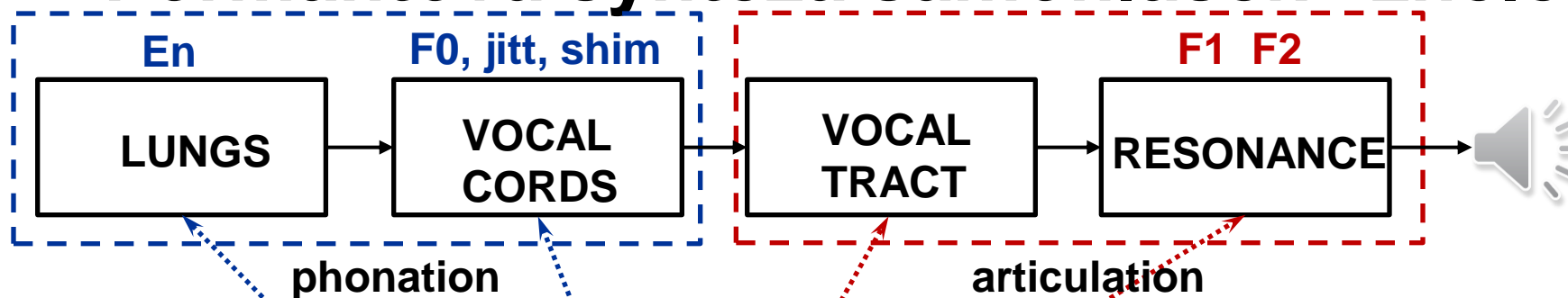
# Hlas a řeč

- Formantová syntéza samohlásek – neznělé buzení



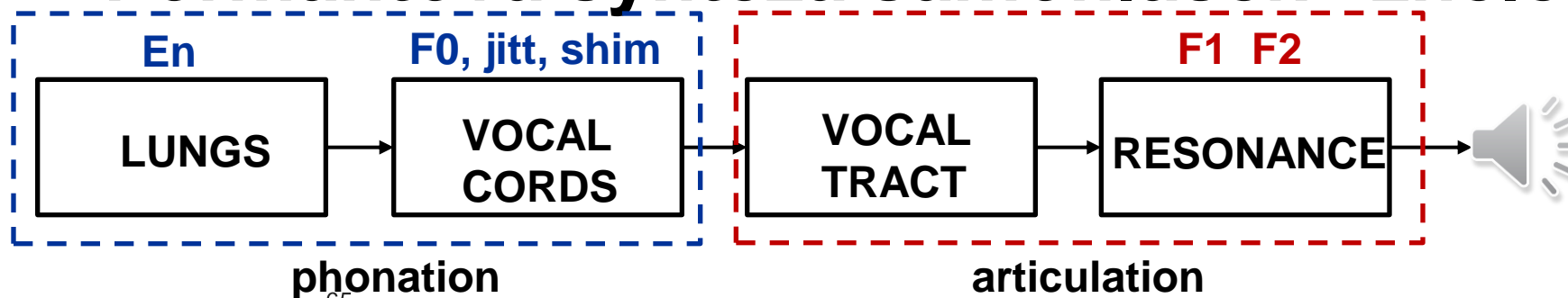
# Hlas a řeč

## • Formantová syntéza samohlásek –znělé buzení



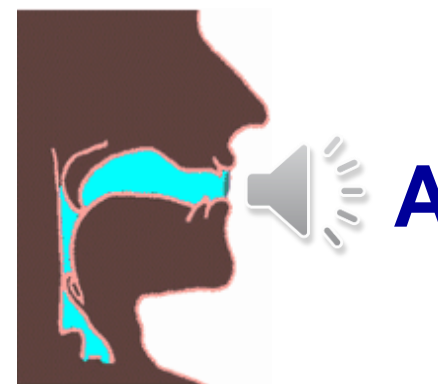
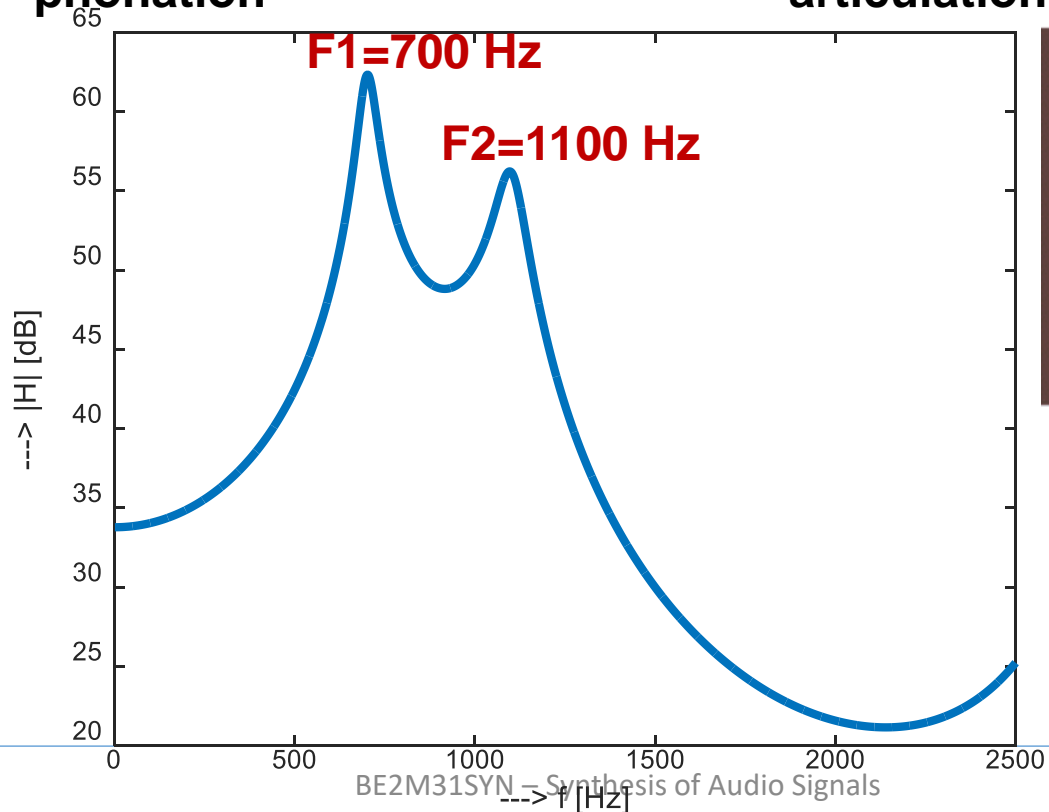
# Hlas a řeč

## • Formantová syntéza samohlásek –znělé buzení



phonation

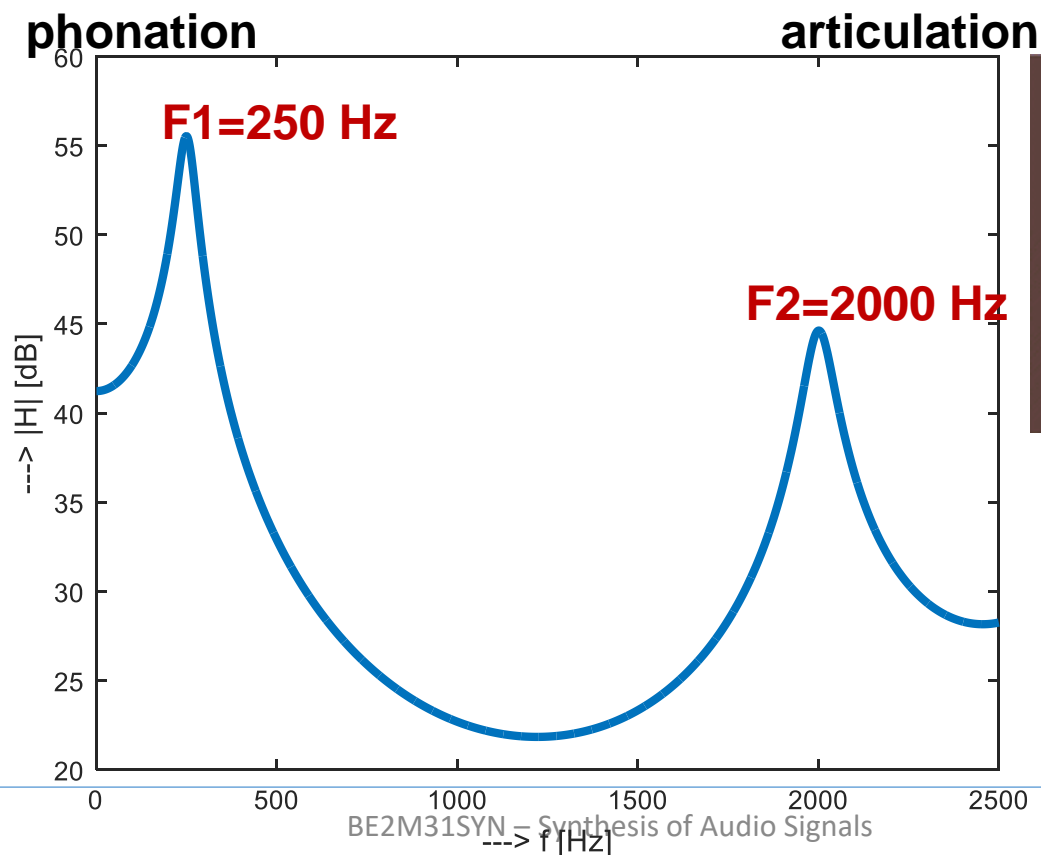
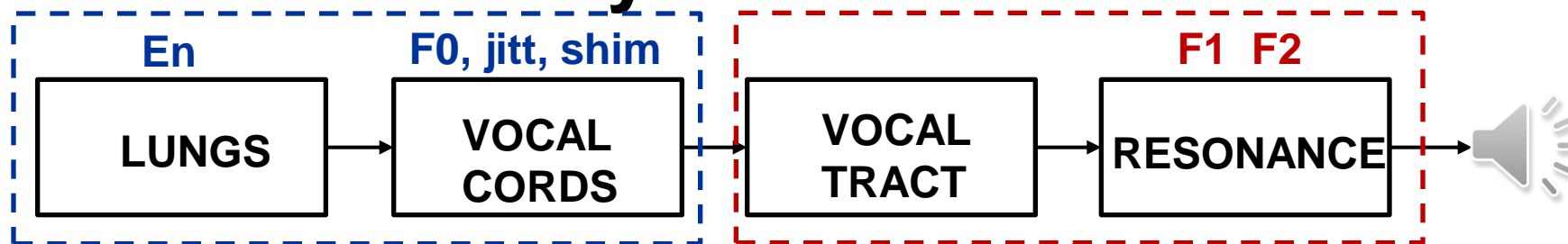
articulation





# Hlas a řeč

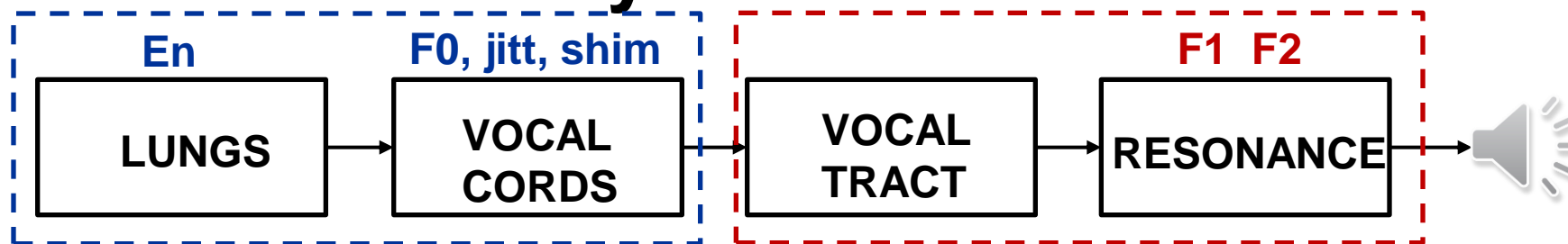
## • Formantová syntéza samohlásek –znělé buzení





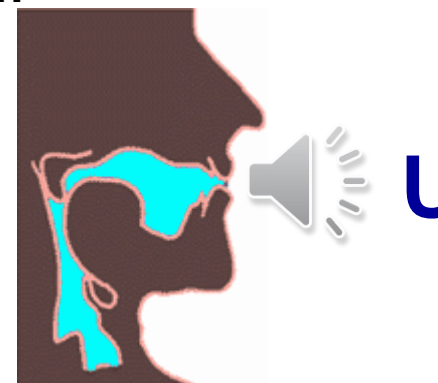
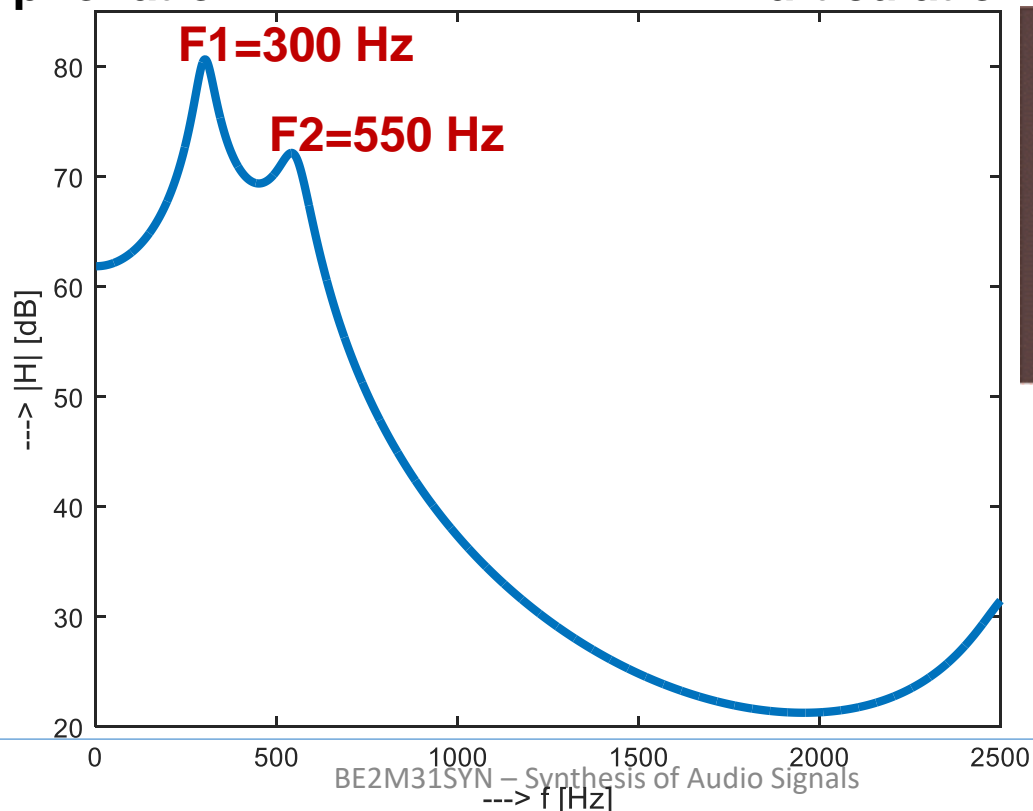
# Hlas a řeč

## • Formantová syntéza samohlásek –znělé buzení



phonation

articulation



- **Základní frekvence  $f_0 = 1 / T_0$**

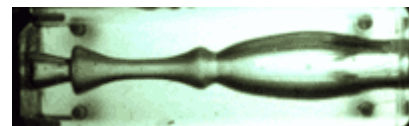
- vnímaná jako výška tónu v řeči
- změny jsou způsobeny změnami v rychlosti vibrací hlasivek, která je ovlivněna elasticitou, hmotností a délkou hlasivek

	$f_{0\text{typ}}$ [Hz]	$f_{0\text{min}}$ [Hz]	$f_{0\text{max}}$ [Hz]
Muži	125	80	200
Ženy	225	150	350
Děti	300	200	500

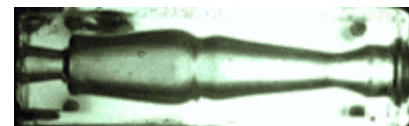
## • Generování samohlásek



A



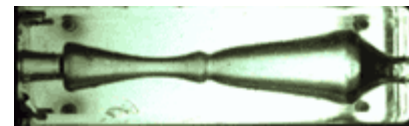
E



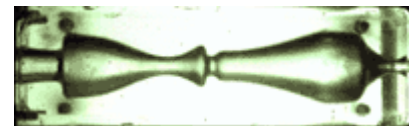
I



O

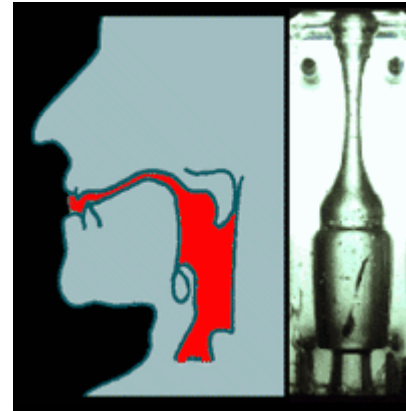
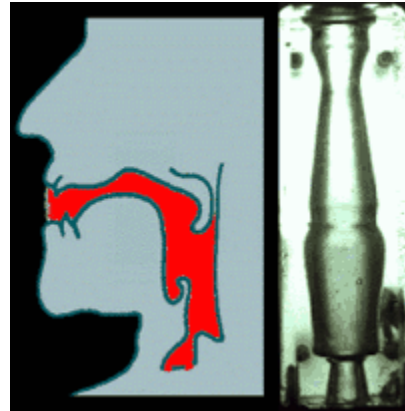
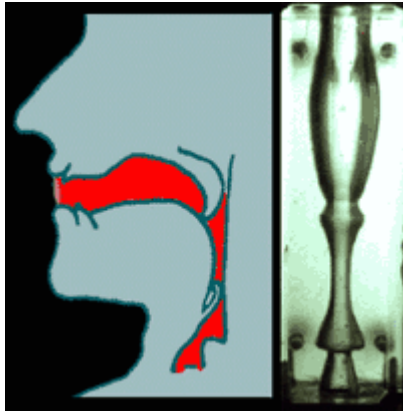


U



Zvuková demonstrace modifikace harmonického zdroje pomocí „tvarování hlasového traktu“  
[*San Francisco Exploratorium*]

## • Generování samohlásek



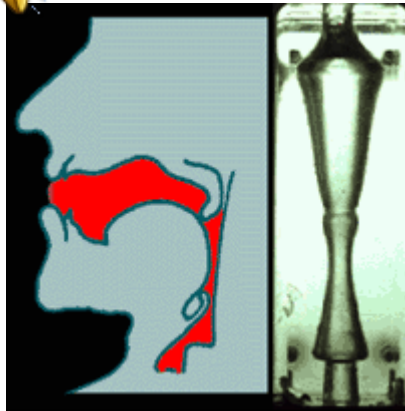
A



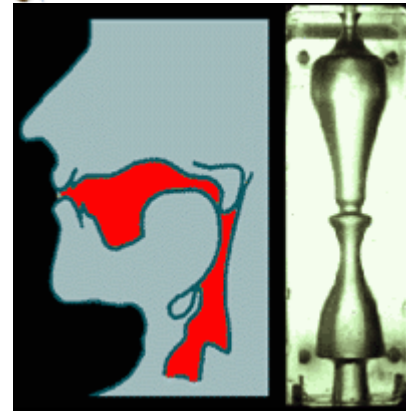
E



I



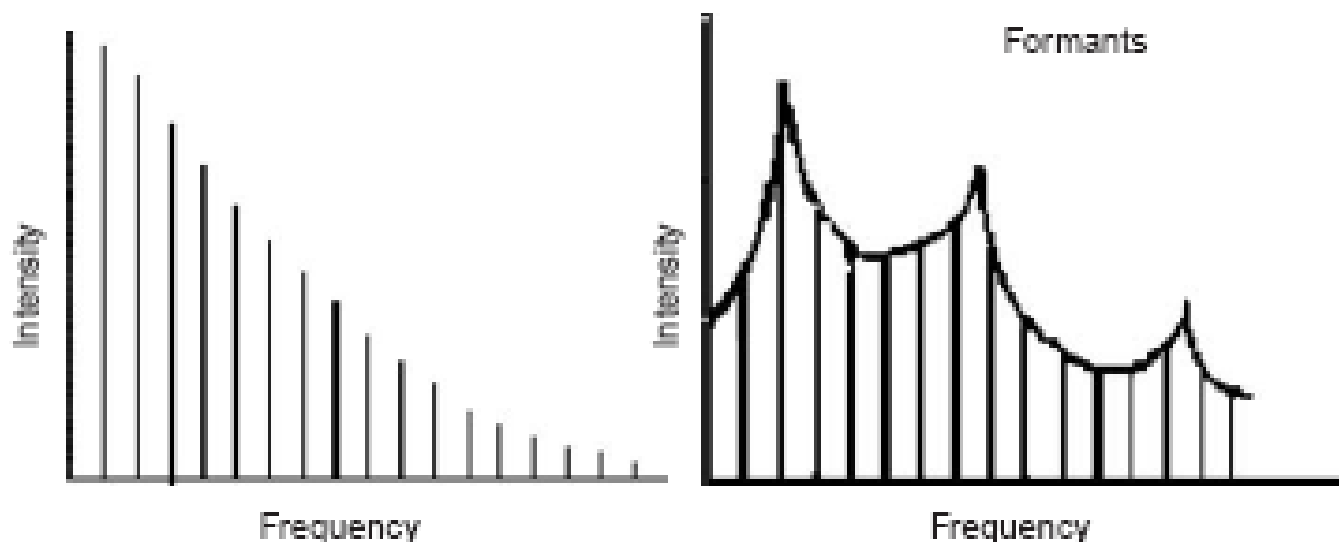
O



U



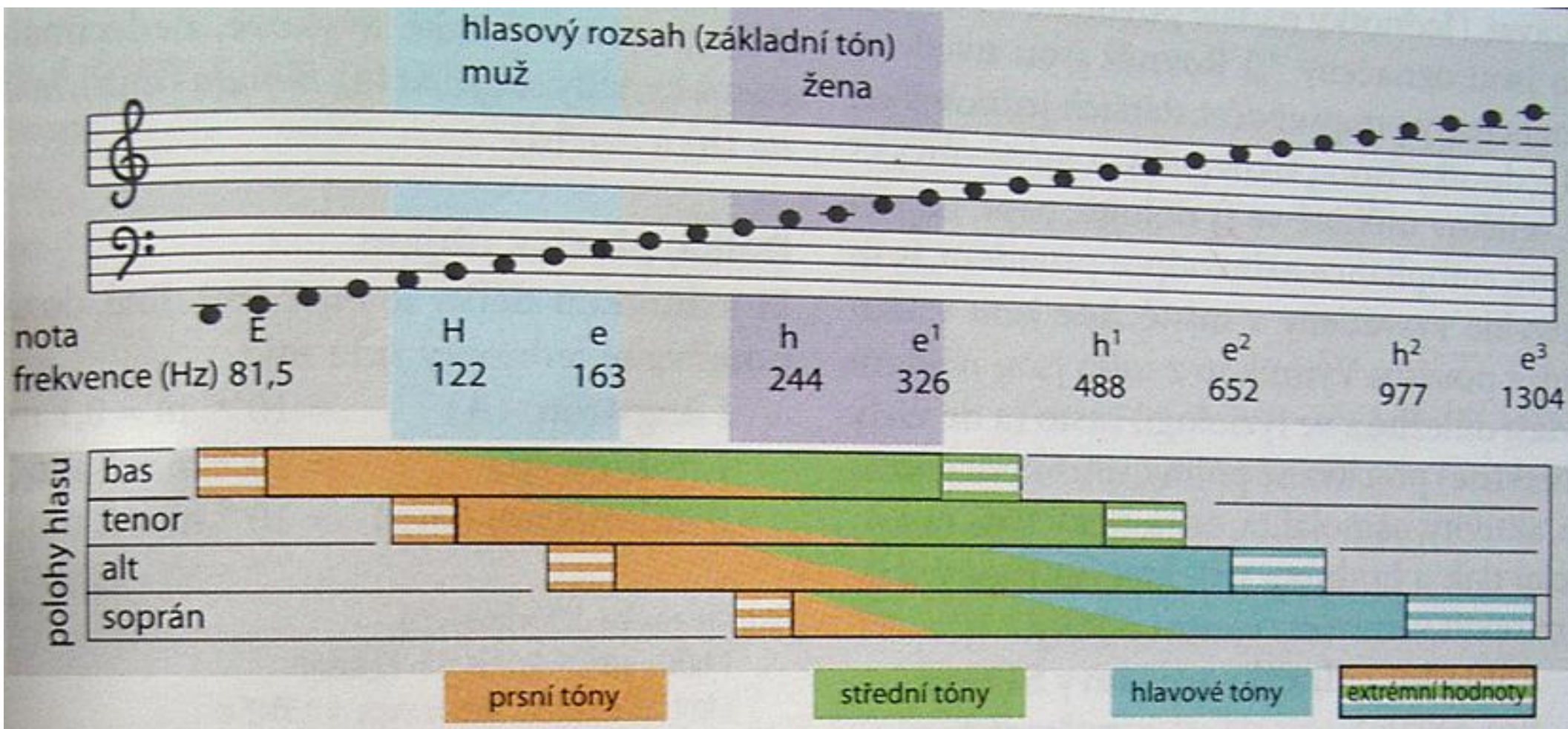
## • Hlasový trakt



Spektrum hlasivkového tónu + Spektrum hlasového ústrojí

- F0
  - F1, F2, F3, F4
  - energie
- ← Parametry hlasu

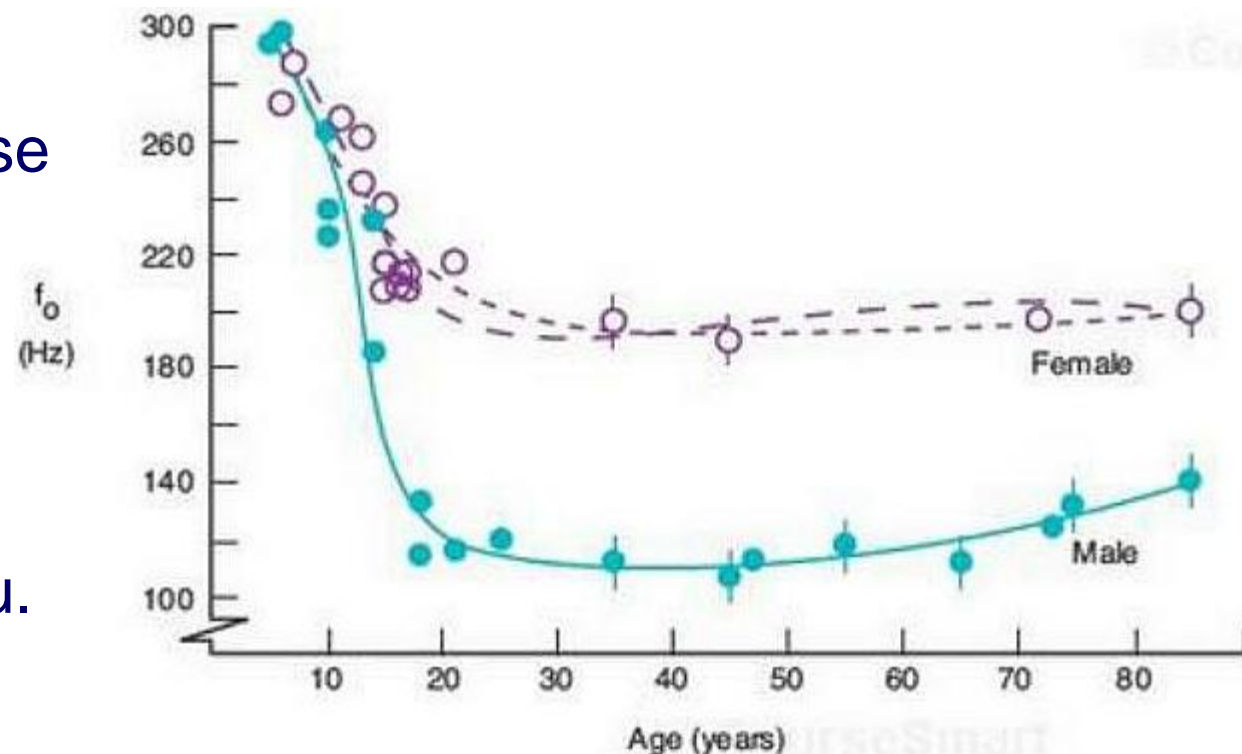
- Rozsah základního tónu



- **Základní tón**

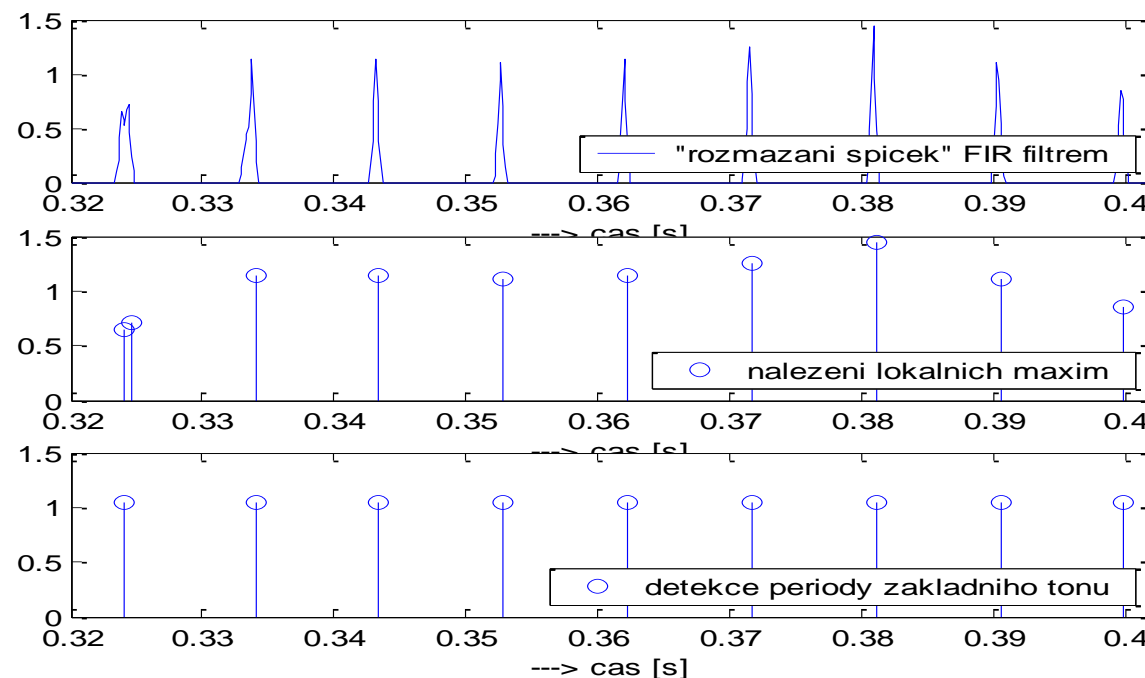
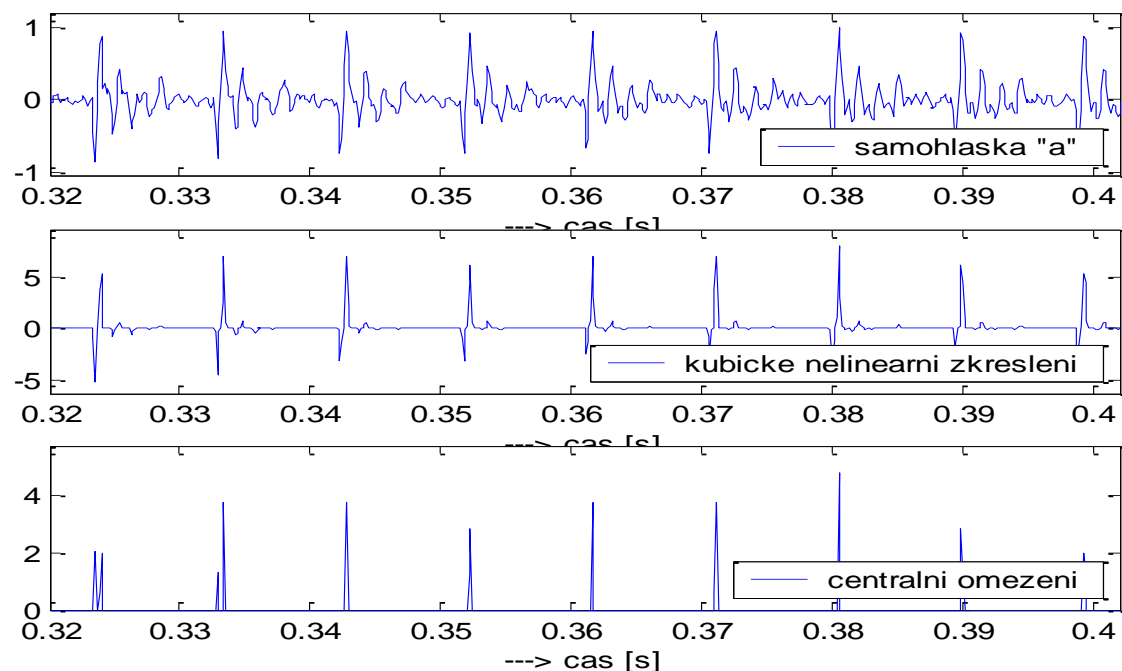
- Vývoj hlasu:

- Od kojeneckého věku do dospělosti se délka hlasivkového traktu přibližně zdvojnásobuje.
- Dochází k významným změnám v geometrických proporcích tkání vzhledem k délce hlasivkového traktu.
- Různé struktury dosahují dospělých rozměrů mezi 7. a 18. rokem věku.



## • Detekce základní frekvence v časové doméně

- Délka segmentu alespoň 20 ms;
- Filtrování DP až do 500 Hz
- Nelineární zkreslení pro potlačení formantové struktury
- MA (klouzavý průměr) filtr a detekce lokálního maxima
- Logická filtrace



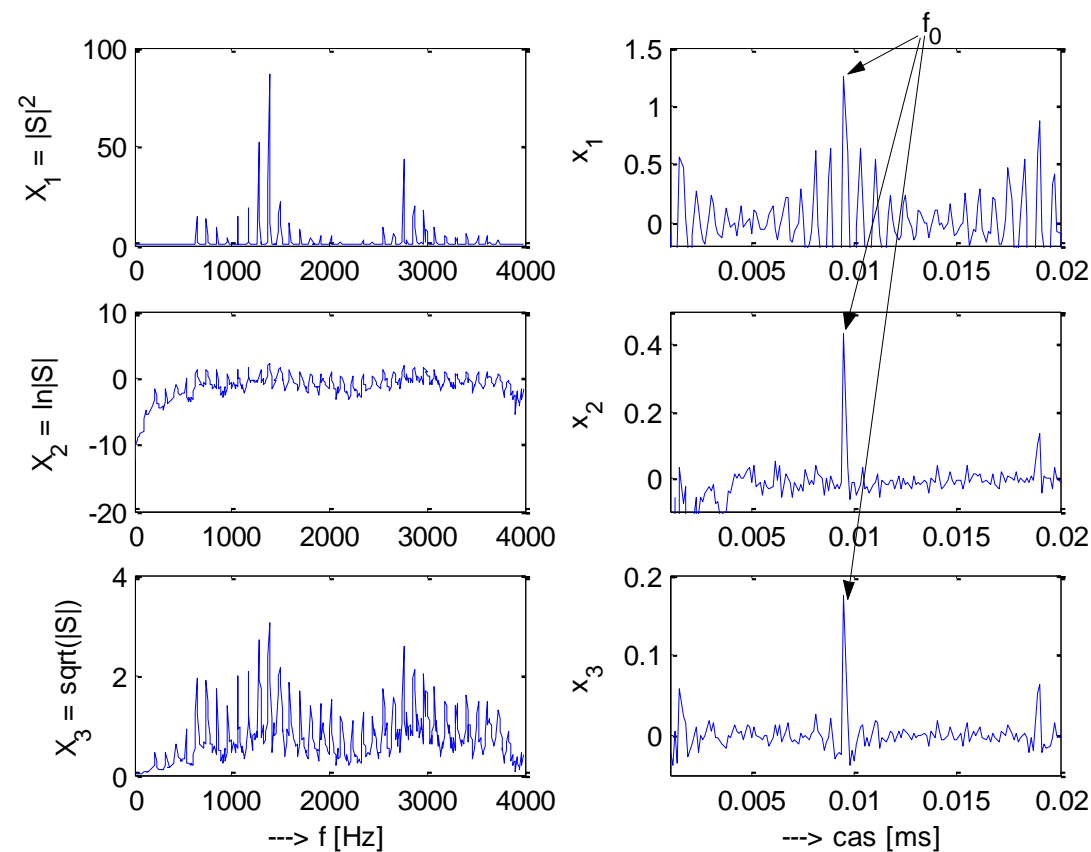
## • Detekce základní frekvence ve frekvenční doméně

- Příklady detekce základní periody pomocí algoritmů

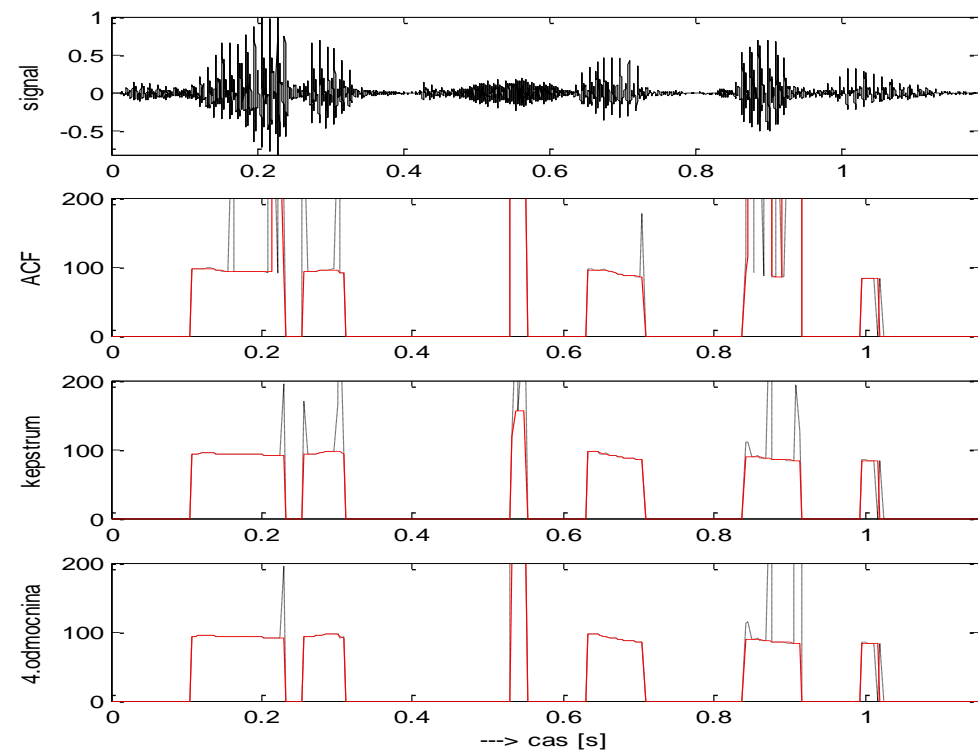
- DFT  $\rightarrow |S(\omega)|^2 \rightarrow$  IDFT  $\rightarrow$   $a_{fc}(t)$

- DFT  $\rightarrow \ln|S(\omega)| \rightarrow$  IDFT  $\rightarrow$   $c_{eps}(t)$

- DFT  $\rightarrow |S(\omega)|^{0.5} \rightarrow$  IDFT  $\rightarrow$   $x(t)$



- Detekce základní frekvence
- Postprocessing
  - Všechny detekční metody vyžadují vyhlazení odhadu základní frekvence, **minimálně pomocí mediánové filtrace.**
- Moderní trendy
  - Kombinace časových a frekvenčních přístupů
  - Pravděpodobnostní modely
  - Hluboké učení s využitím neuronových sítí
  - Online metody umožňují průběžné aktualizace výstupů na základě nových dat



- **Parametry kvality hlasu**

- **Nestability:**

- **Jitter** – Nestabilita frekvence základní periody.

- **Shimmer** – Nestabilita amplitudy základní periody.

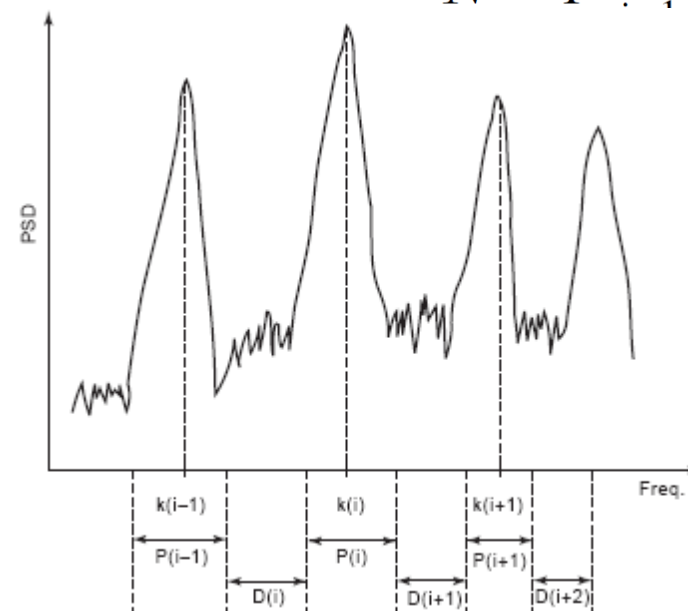
- **Parametry šumu:**

- **HNR** (Harmonic-to-Noise Ratio)  
Poměr harmonických složek k šumu v hlasovém signálu.

- **ACF** (Autocorrelation Function):  
Normalizovaná hodnota lokálního maxima autokorelační funkce.

$$\text{Jitter } (\mu\text{s}) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} |T_i - T_{i-1}|$$

$$\text{Shimmer (dB)} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} \left| 20 \log_{10} \frac{A_{i+1}}{A_i} \right|$$

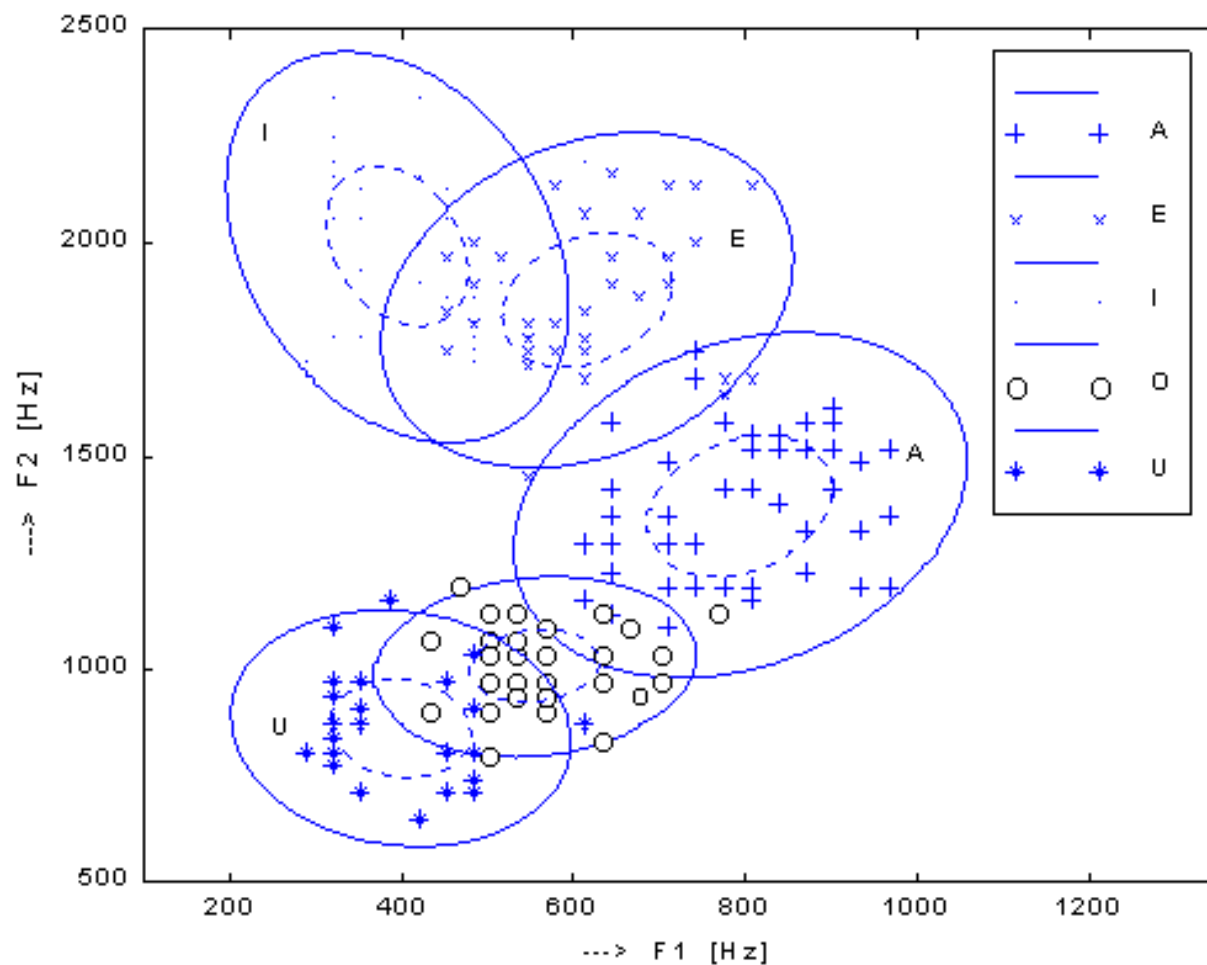


- **Formanty** jsou významné energetické frekvence, které odpovídají rezonančním frekvencím hlasového aparátu.

○ **Přibližné hodnoty formantů pro české samohlásky [Hz]**

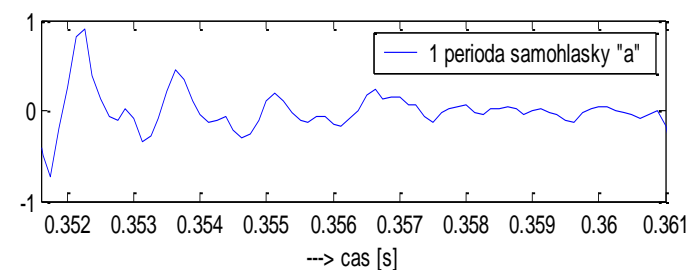
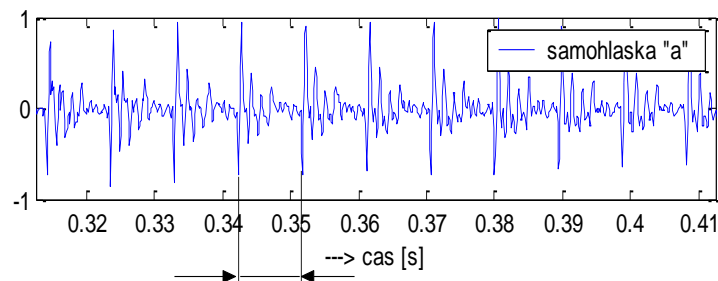
	I	E	A	O	U
F1	300 .. 500	480 .. 700	700 .. 1100	500 .. 700	300 .. 500
F2	2000 .. 2800	1560 .. 2100	1100 .. 1500	850 .. 1200	600 .. 1000
F3	2600 .. 3500	2500 .. 3000	2500 .. 3000	2500 .. 3000	2400 .. 2900

## • Formanty českých samohlásek

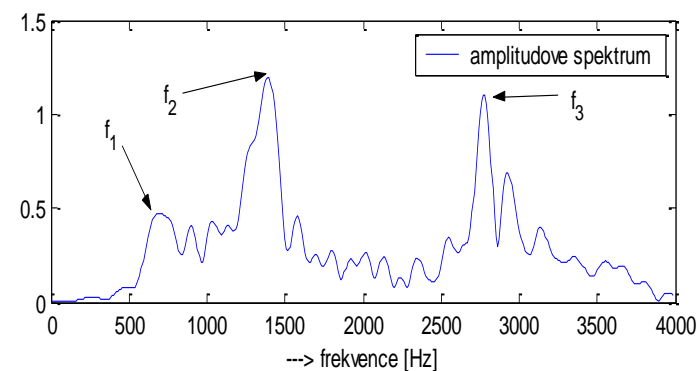
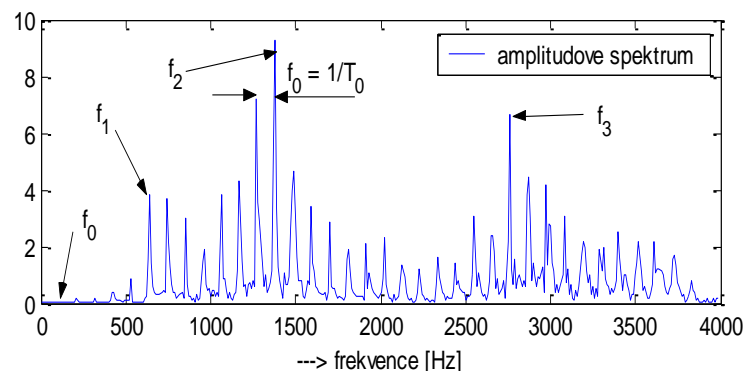


- **Vztah** mezi základní frekvencí, základní periodou a formantovými frekvencemi

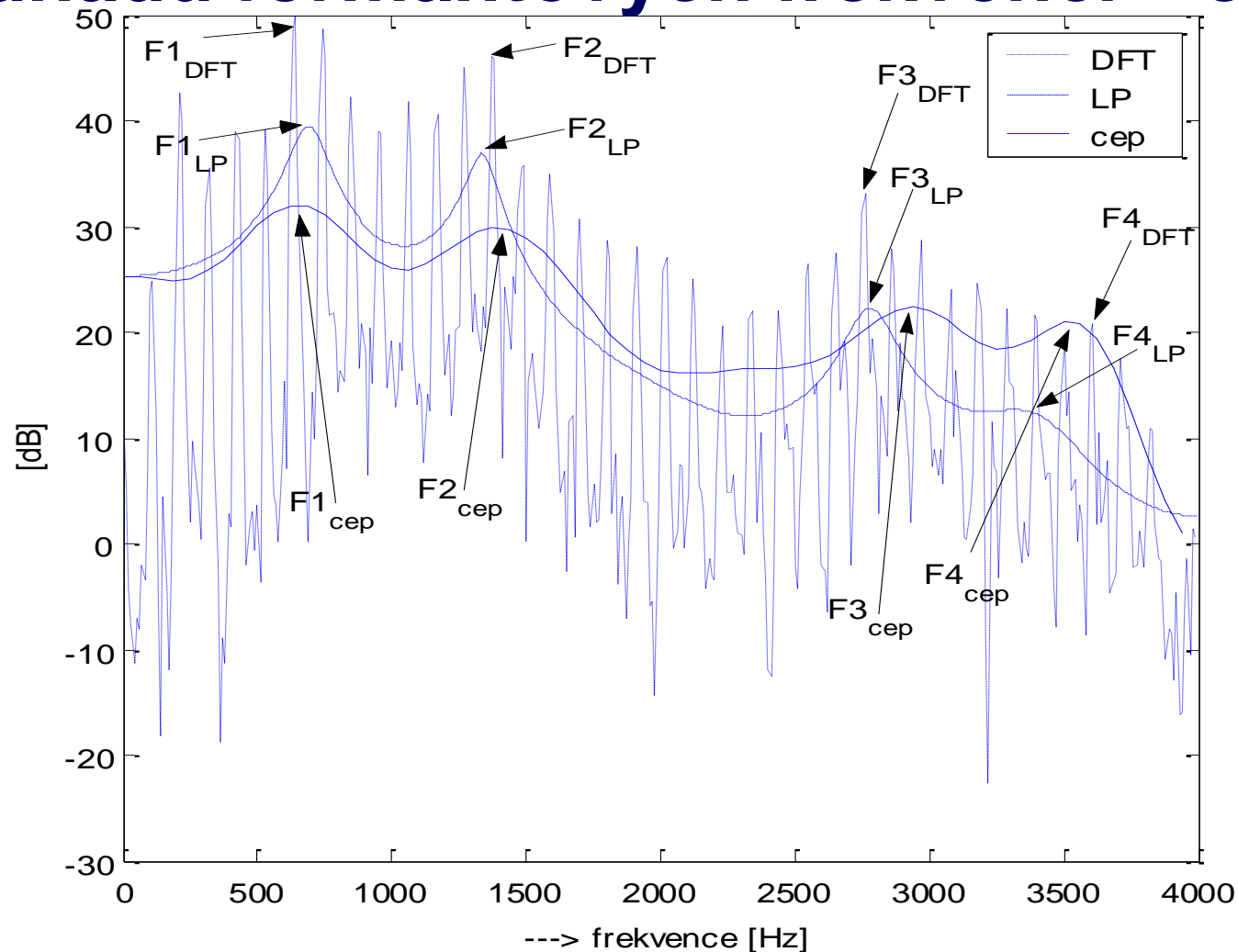
- Vlevo: Časová reprezentace prodlouženého segmentu samohlásky.
- Vpravo: Časová reprezentace jedné periody.



- Amplitudové spektrum samohlásky "A"



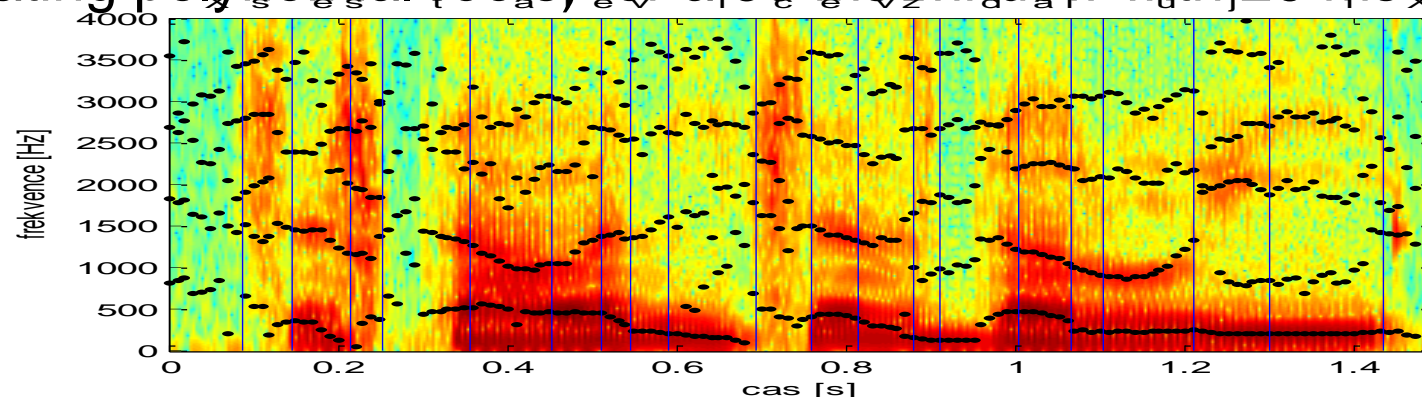
## • Metody odhadu formantových frekvencí – srovnání



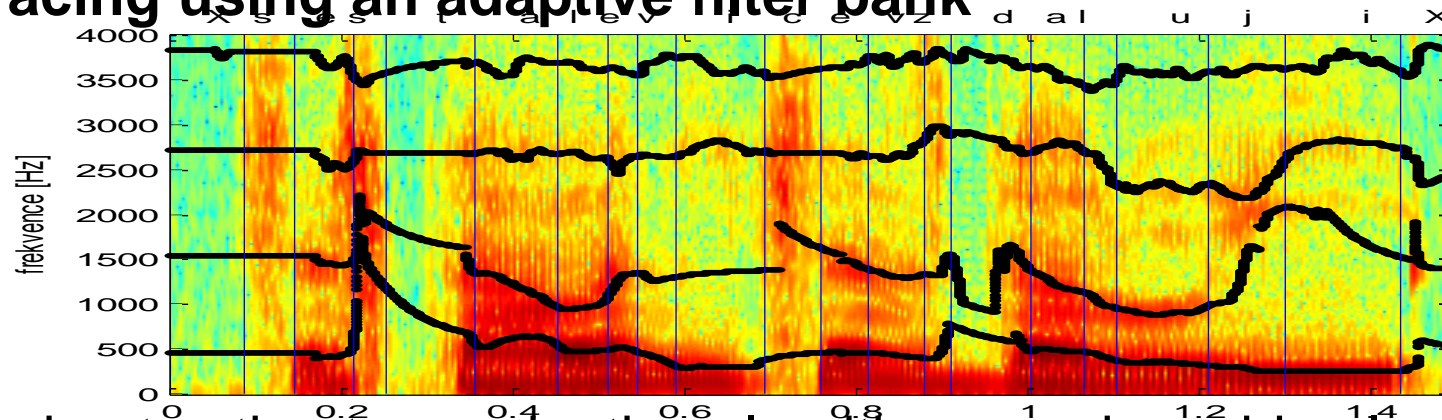
- **Metody odhadu formantových frekvencí – srovnání**

Formant frequencies obtained using 10th-order LPC analysis

- (by calculating polynomial roots) for a 30 ms window with 26 ms overlap



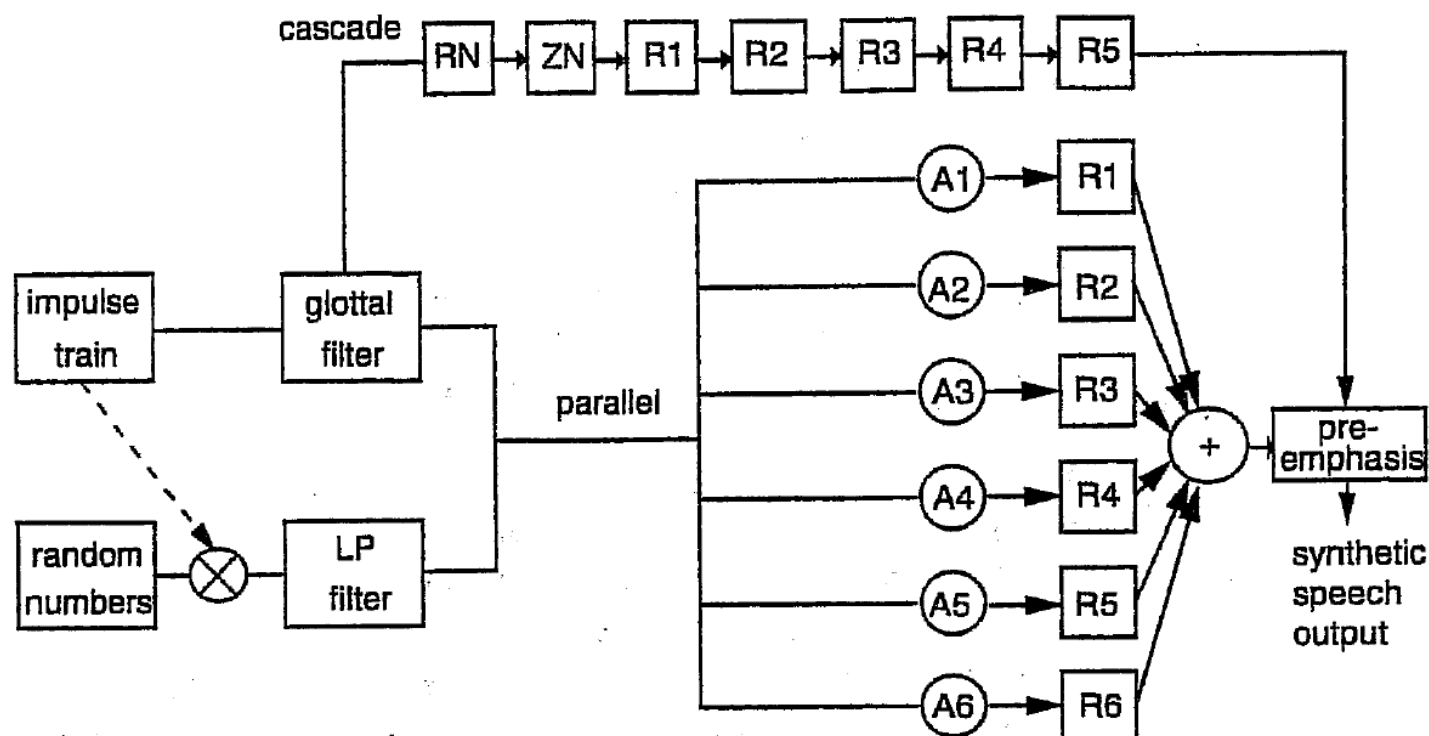
**Formant tracing using an adaptive filter bank**



- **Trends:** robust estimators, adaptive algorithms, and machine learning-based models

## • Klattův syntetizátor: Model pro realistickou syntézu řeči.

- Kombinuje kaskádní a paralelní nastavení filtrů.
- Umožňuje oddělené ovládání amplitud formantů, výšky tónu a šumů.
- Vhodné pro replikaci složitějších fonetických zvuků.



## • Klattův syntetizátor parametry

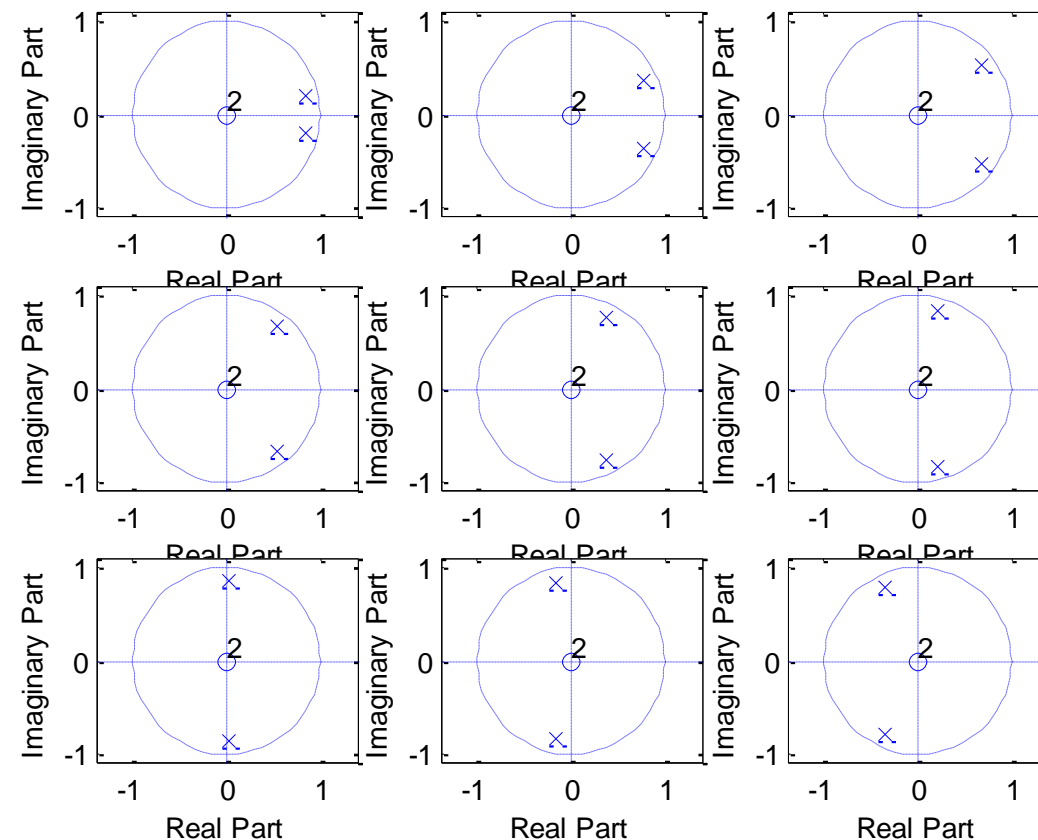
N	Symbol	Name	Min	Max	Typ
1	AV	Amplitude of voicing (dB)	0	80	0
2	AF	Amplitude of frication (dB)	0	80	0
3	AH	Amplitude of aspiration (dB)	0	80	0
4	AVS	Amplitude of sinusoidal voicing (dB)	0	80	0
5	F0	Fundamental frequency (Hz)	0	500	0
6	F1	First formant frequency (Hz)	150	900	500
7	F2	Second formant frequency (Hz)	500	2500	1500
8	F3	Third formant frequency (Hz)	1300	3500	2500
9	F4	Fourth formant frequency (Hz)	2500	4500	3500
10	FNZ	Nasal zero frequency (Hz)	200	700	250
11	AN	Nasal formant amplitude (Hz)	0	80	0
12	A1	First formant amplitude (Hz)	0	80	0
13	A2	Second formant amplitude (Hz)	0	0	0
14	A3	Third formant amplitude (Hz)	0	80	0
15	A4	Fourth formant amplitude (Hz)	0	80	0
16	A5	Fifth formant amplitude (Hz)	0	80	0
17	A6	Sixth formant amplitude (Hz)	0	80	0
18	AB	Bypass path amplitude (Hz)	0	80	0
19	B1	First formant bandwidth (Hz)	40	500	50
20	B2	Second formant bandwidth (Hz)	40	500	70
21	B3	Third formant bandwidth (Hz)	40	500	110

## • Příklad 6.1: Filtry se dvěma póly – rezonátory

- a) Zobrazení nul a pólů v Z-rovině Z

- MATLAB:

```
[x, fs] = audioread('banjo.wav');
f0 = 392; % Fundamental frequency
R = 1 - B * pi / fs; % Pole radius
for h = 1:9
    % Zero-pole plot
    zplane(1, [1, a(h), R^2]);
end
```



## • Příklad 6.1: Filtry se dvěma póly – rezonátory

- b) Normované amplitudové frekvenční charakteristiky pro banku filtrů

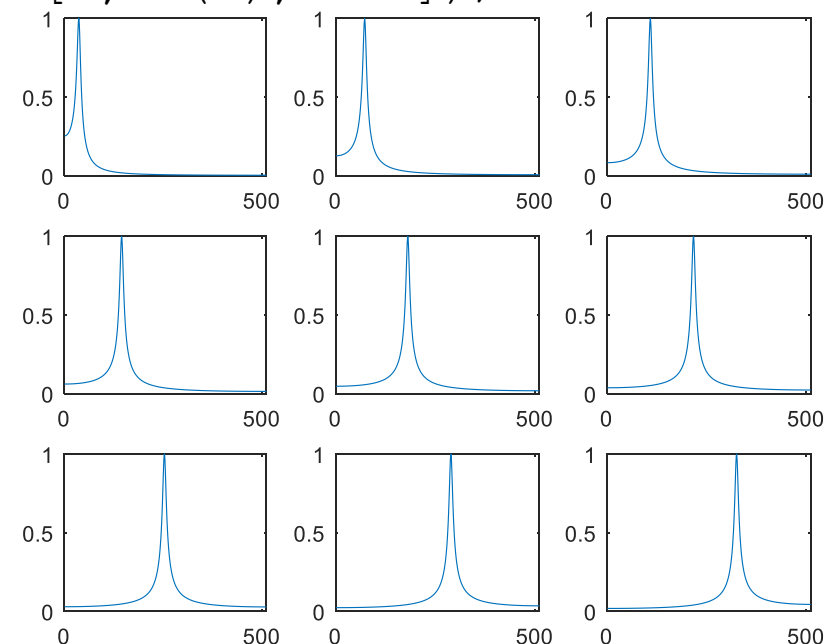
- MATLAB:

```
[Ha(:,h), w] = freqz(b0(h), [1, a(h), R^2], [], fs);
```

```
Han(:,h) = (1 / max(abs(Ha(:,h)))) * freqz(b0(h), [1, a(h), R^2]);
```

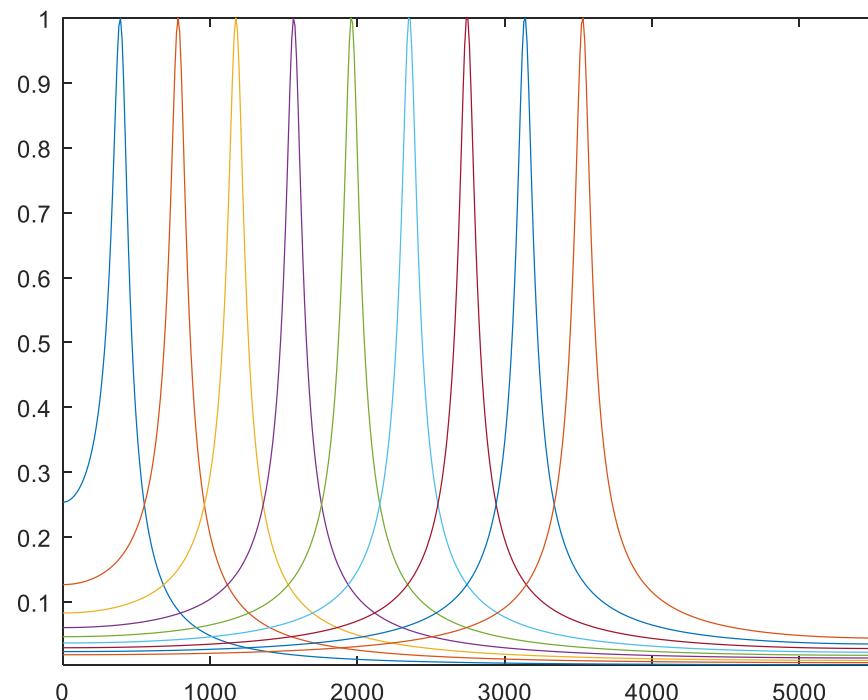
```
% Normalized frequency response
```

```
plot(abs(Han(:,h)));
```



- **Příklad 6.1: Filtry se dvěma póly – rezonátory**
  - c) Kombinované frekvenční charakteristiky všech filtrů
  - MATLAB:

```
plot(w, abs(Han)); % Combined frequency response
```



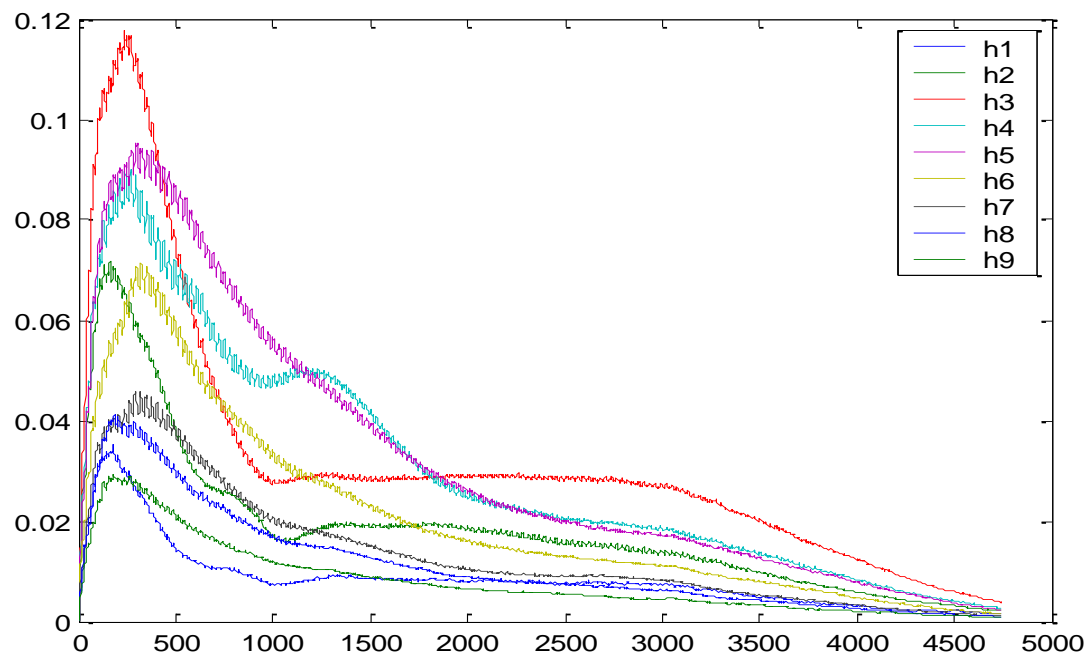
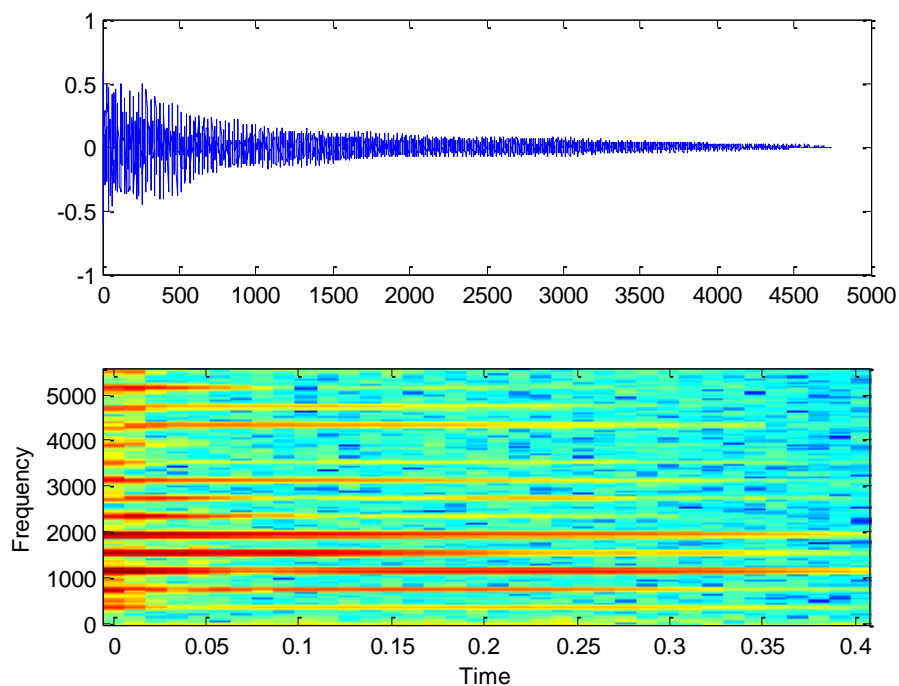
## • Příklad 6.1: Filtry se dvěma póly – rezonátory

- d) Harmonická analýza s využitím rezonátorů

- MATLAB:

```
y(:,h) = filter(b0(h), [1, a(h), R^2], x); % Filter each harmonic
```

```
y(:,h) = filter((1 - k), [1 -k], abs(y(:,h))); % Envelope
```

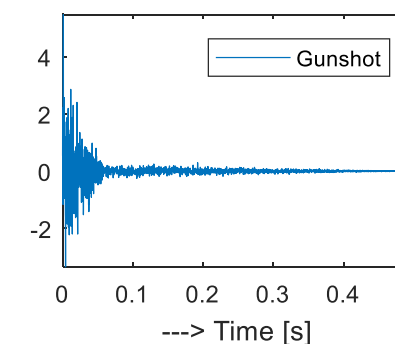
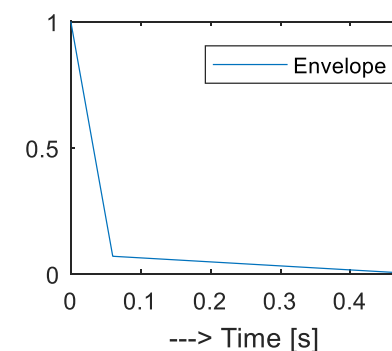
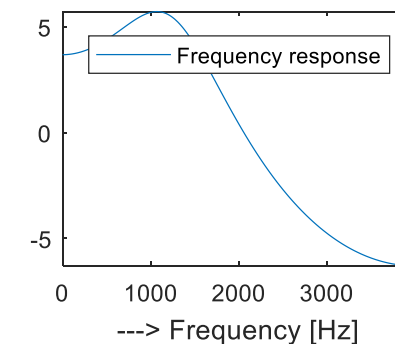
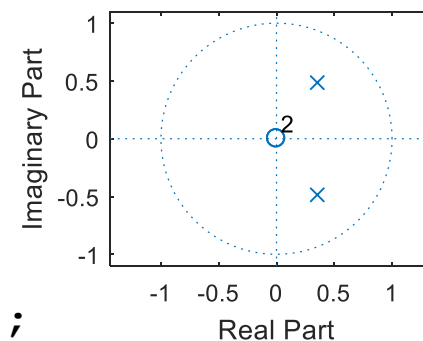


## • Příklad 6.2: Formantová syntéza se šumovým buzením

### ○ a) Simulace střelby

### ○ MATLAB:

```
% White noise
x1 = randn(1, duration * fs);
% Resonator
x = filter(1, [1 -2*r*cos(2*pi*f0/fs) r^2], x1);
plot(nT, 0 .* x); % Gunshot waveform
```

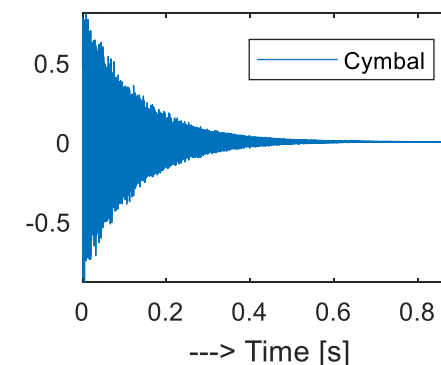
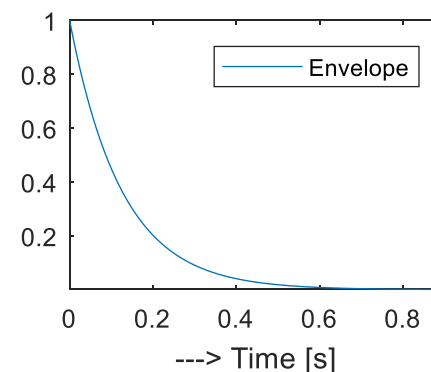
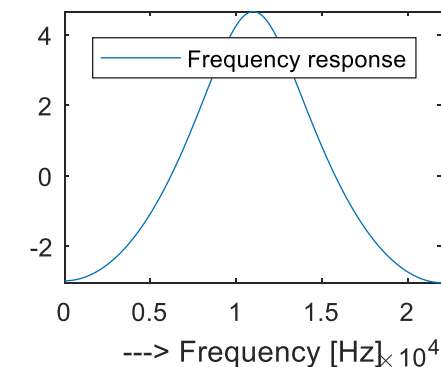
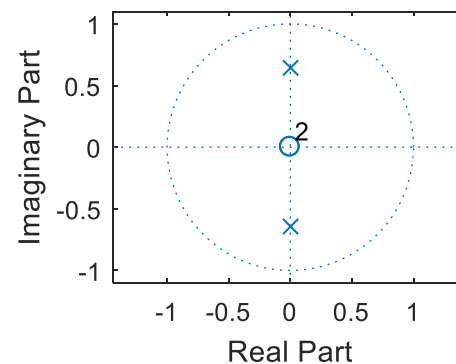


## • Příklad 6.2: Formantová syntéza se šumovým buzením

- b) Simulace zvuku činelu

- MATLAB:

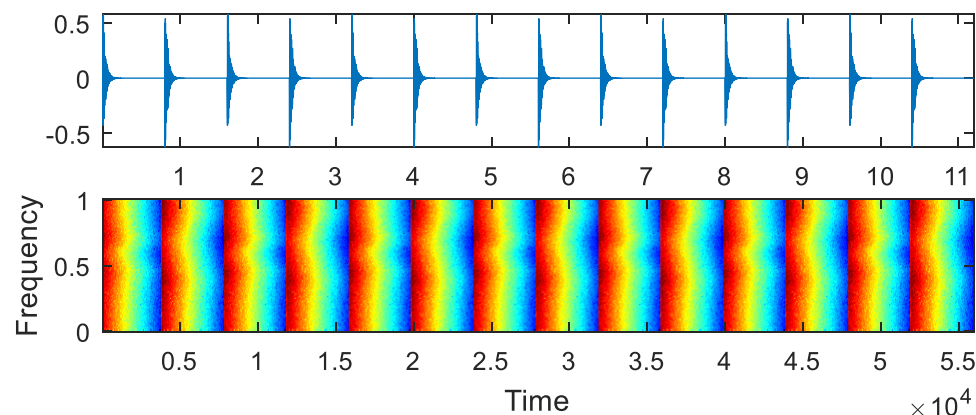
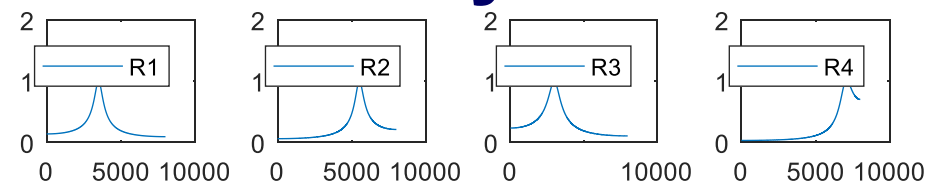
```
% Decay envelope
O = exp(-nT / 0.125);
% Apply resonator
y = filter(1, [1 a R^2], x);
plot(O .* y); % Cymbal waveform
```



## • Příklad 6.2: Formantová syntéza se šumovým buzením

- c) Simulace tikání hodin
- MATLAB:

```
sig = [sum(y1) .* exp(-nT / 0.02) sum(y2) .* exp(-nT / 0.02)];
out = repmat(sig, 1, 7); % Clock ticks
plot(out); % Combined output
```



$Fr=[3500 \ 5500]; B = 550;$

$Fr=[3000 \ 7000]; B = 750;$

## • Příklad 6.2: Formantová syntéza se šumovým buzením

- d) Simulace rotačních strojů (vlak, letadlo)

- MATLAB:

```
x1 = sawtooth(2 * pi * f1 * (0:1/fs:duration-1/fs)); % Sawtooth wave
```

```
x2 = randn(1, length(x1)); % White noise
```

```
X = [0 0.25 0.5 0.6 1];
```

```
Y = [0 0.75 1 0.45 0];
```

```
r = 0.99;
```

```
f0 = 1950;
```

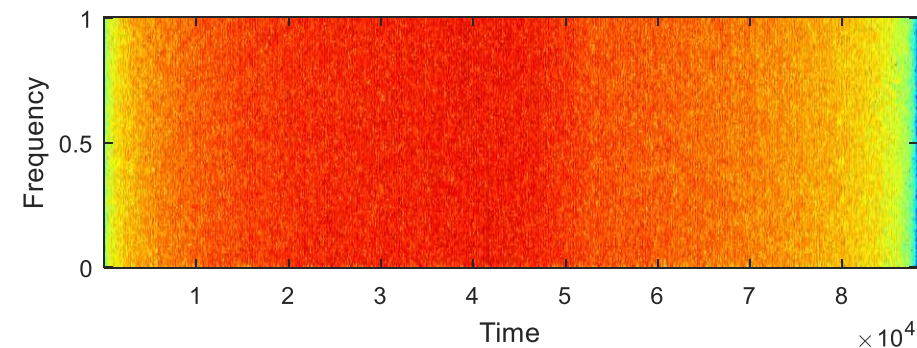
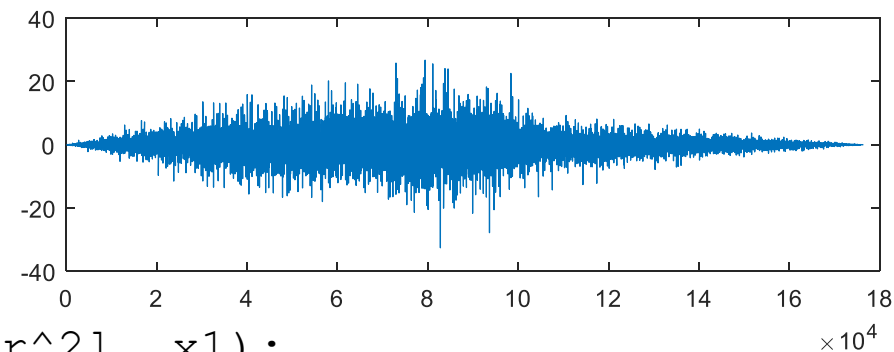
```
x = filter(1, [1 -2 * r * cos(2 * pi * f0 / fs) r^2], x1);
```

```
% Interpolated envelope
```

```
O = interp1(X, Y, nT / nT(end));
```

```
y = x .* x2;
```

```
soundsc(y .* O, fs)
```



## • Příklad 6.3: Syntéza s časově proměnnými filtry

- a) vítr
- MATLAB:

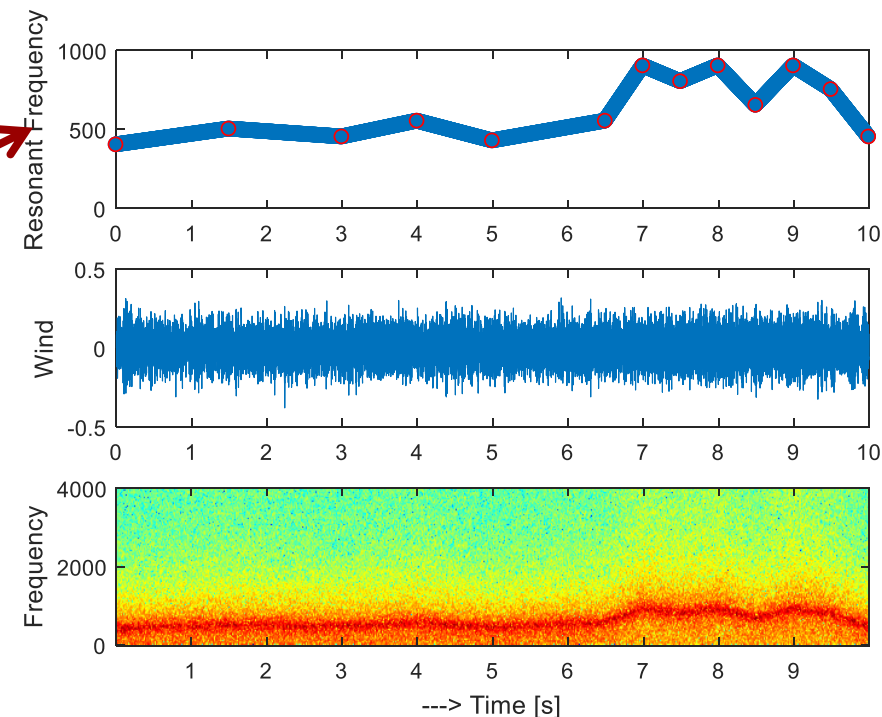
```

% Control points for wind strength
X = [0 .15 .3 .4 .5 .65 .7 .75 .8 .85 .9 .95 1];
Y = [0 .2 .1 .3 .05 .3 1 .8 1 .5 1 .7 .1];
Fmin = 400; Fmax = 900;
yn = (Fmax - Fmin) * Y + Fmin;

% Resonant frequency
resonantFreq = interp1(X, yn, timeAxis / timeAxis(end));

% Wind sound synthesis
y(n) = b0(n) * x(n) - a(n) * y(n-1) - (R(n)^2) * y(n-2);

```



## • Příklad 6.3: Syntéza s časově proměnnými filtry

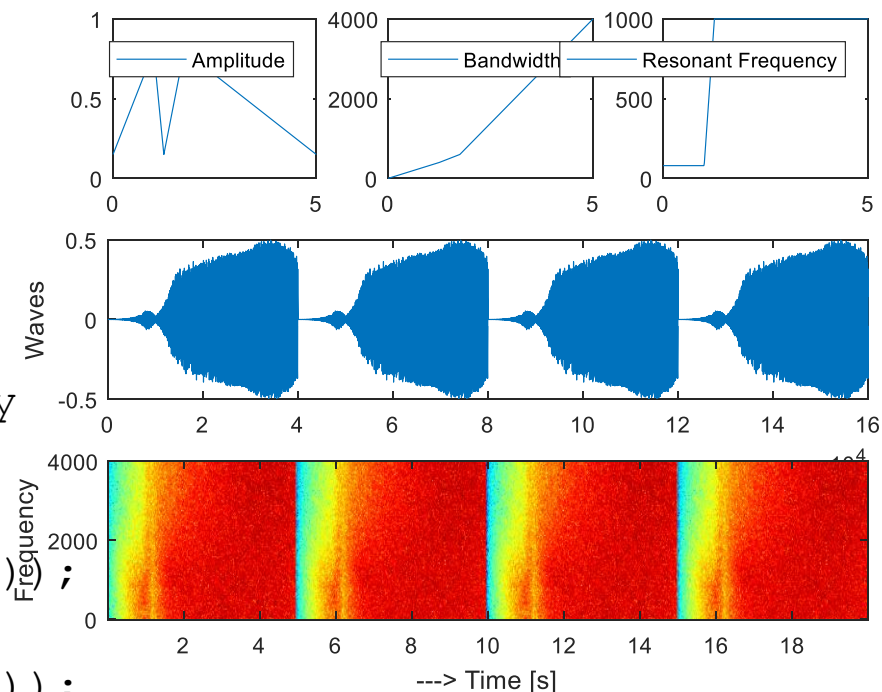
○ b) vlny

○ MATLAB:

```
% Control points for resonant parameters
X = [0 .2 .25 .35 1]; % Time axis
Y_A = [0.15 .8 .15 .8 0.15]; % Amplitude
Y_B = [0 320 400 600 4000]; % Bandwidth
Y_f = [80 80 1000 1000 1000]; % Resonant frequency

% Interpolated amplitude over time
amplitude = interp1(X, Y_A, timeAxis / timeAxis(end));
% Interpolated bandwidth over time
bandwidth = interp1(X, Y_B, timeAxis / timeAxis(end));
% Interpolated resonant frequency over time
resonantFreq = interp1(X, Y_f, timeAxis / timeAxis(end));

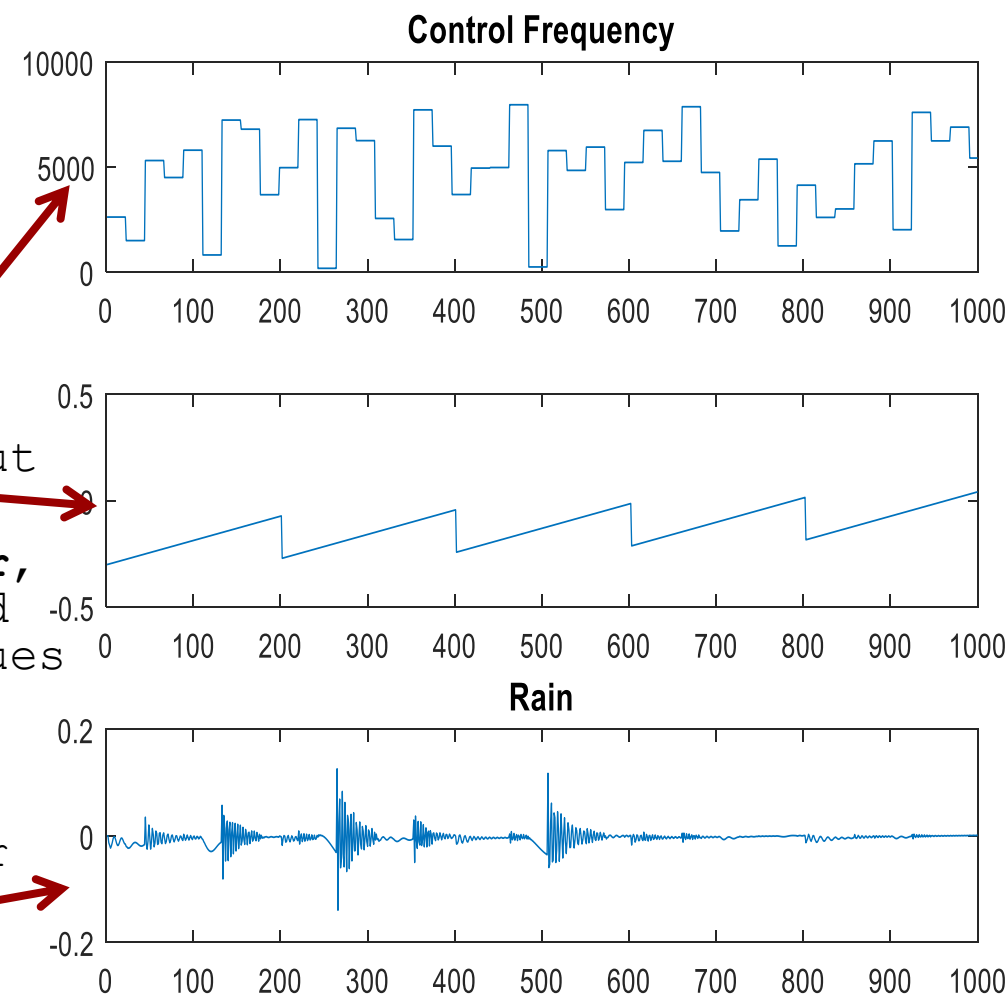
% Waves sound
y(n) = amplitude(n) * (b0(n) * x(n) - a(n) * y(n-1) - (R(n)^2) * y(n-2));
```



## • Příklad 6.3: Syntéza s časově proměnnými filtry

- c) voda
- MATLAB:

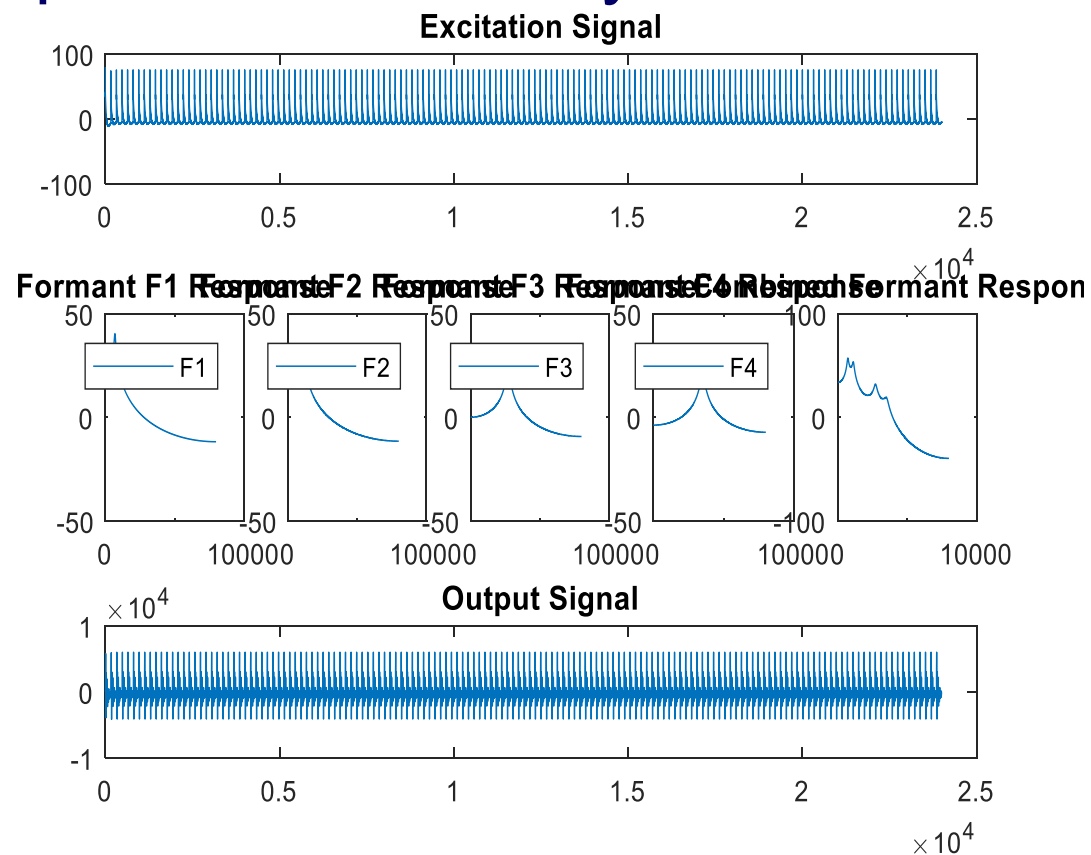
- A **sawtooth waveform** composed of three low frequencies ( $f_1, f_2, f_3$ ) serves as the input signal.
- This signal enters a **time-varying resonator**, where the resonator frequency is controlled by a sample-and-hold signal that holds values constant for 1 ms.
- The output from the resonator then passes through a **high-pass filter**, which removes lower frequencies and highlights the higher ones.
- The final output from the high-pass filter simulates the **sound of rain**.



## • Příklad 6.4: Formantová syntéza samohlásek

- Kaskádní syntéza samohlásek s impulsním a šumovým buzením
- MATLAB:

```
% Formants for vowel "A"
F = [700 1100 2700 3500];
% Cascaded formant filter
y = filter(b(k, :), a(k, :), y);
soundsc(y, fs); % Play synthesized vowel
```



## • Příklad 6.5: Formantová syntéza hudebních nástrojů

- a) Housle

- MATLAB:

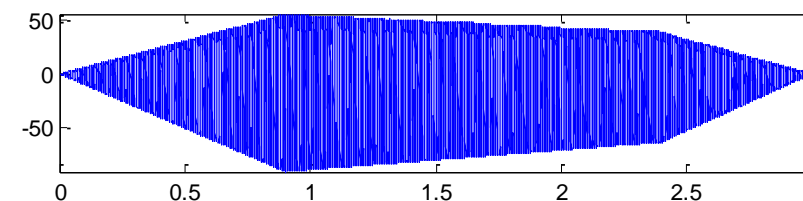
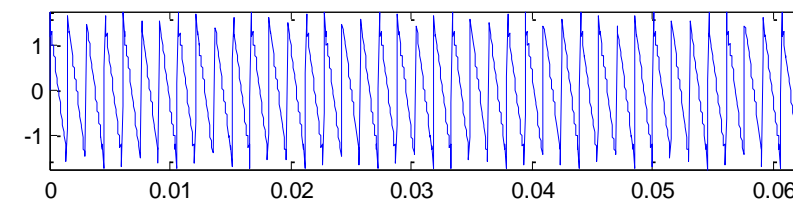
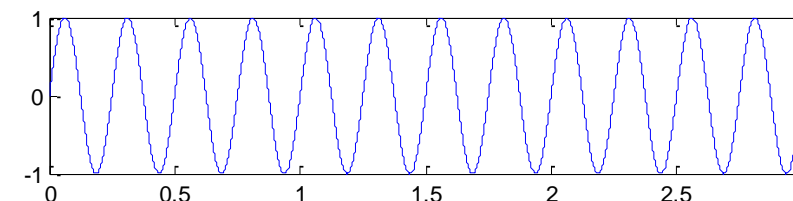
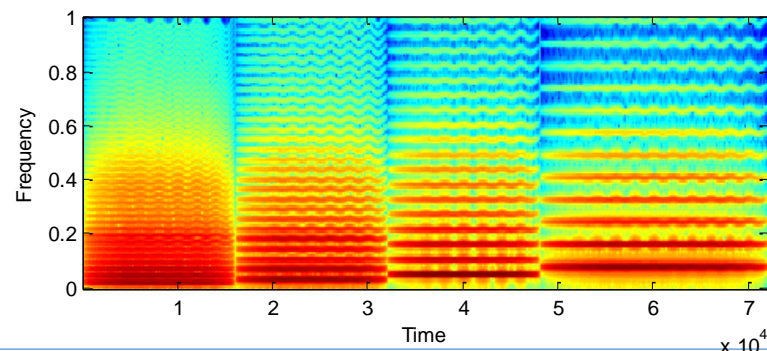
```
f0 = 196; % Fundamental frequency (Violin)
y = filter(1, [1, -B(4), -C(4)], y); % Apply violin resonators
violin = y_signal .* o2; % Apply ADSR envelope
```



```
% violin filters
```

```
F = [500, 1500, 3000, 4000];
```

```
BW = [300, 200, 700, 1500];
```

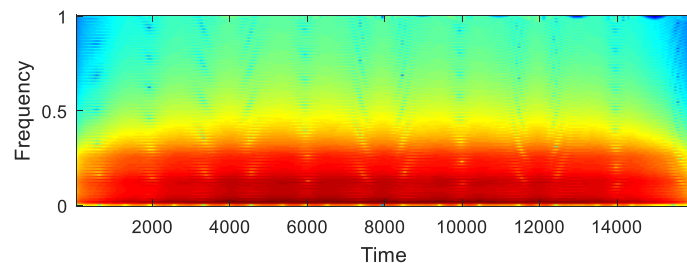
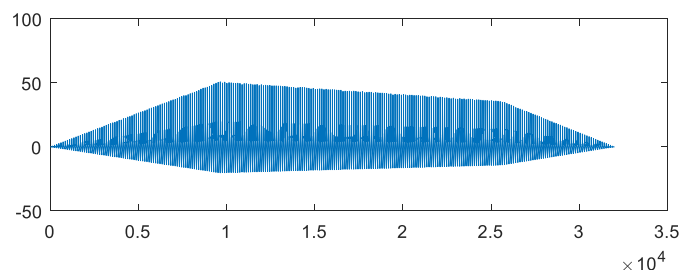


## • Příklad 6.5: Formantová syntéza hudebních nástrojů

- b) Cello

- MATLAB:

```
F = [991, 2003]; % Formants for cello
y = filter(1, [1, -B(2), -C(2)], y); % Cello resonators
cello = y_signal .* o2; % Apply ADSR envelope
```



## • Příklad 6.5: Formantová syntéza hudebních nástrojů

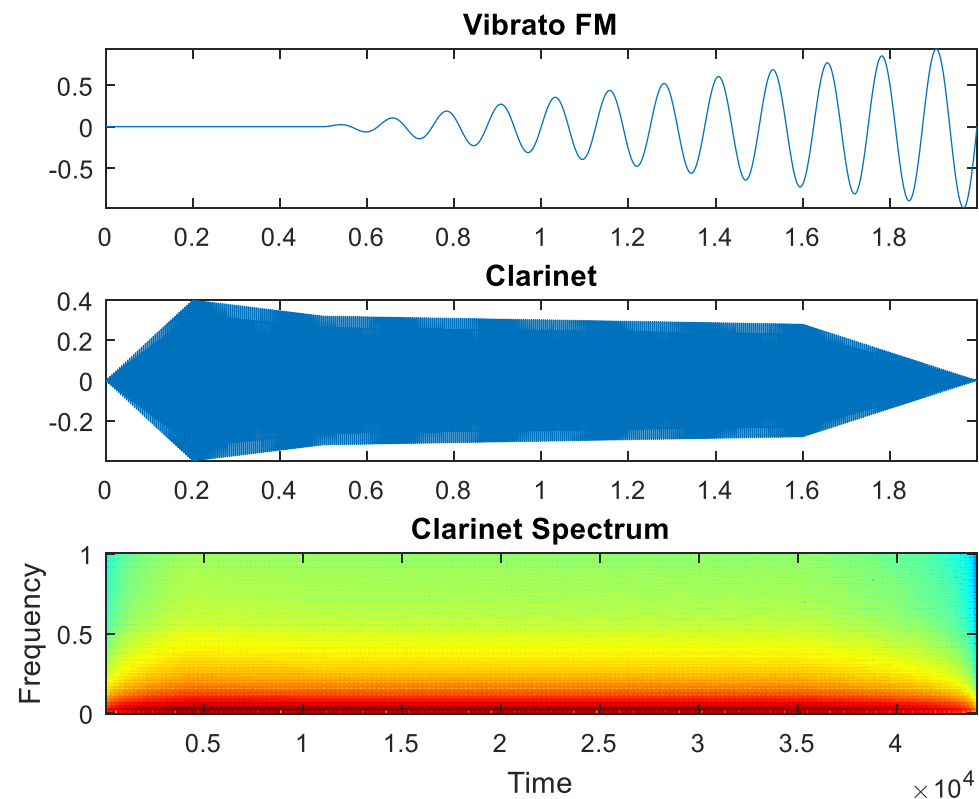
- c) Klarinet

- MATLAB:

```
fr = 900; % Clarinet resonance frequency
% Clarinet tone synthesis
x = filter(a0, [1, b, R^2], x);
x = x .* o2; % ADSR envelope
```



```
fr = 900; B = 1200;
```



## • Příklad: Formantová syntéza různých materiálů

- Dřevo, kov, sklo

