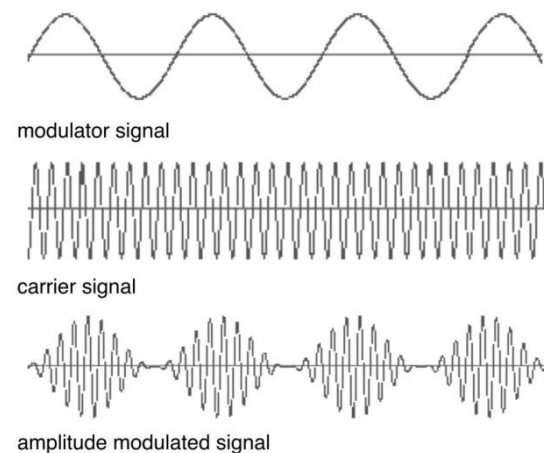
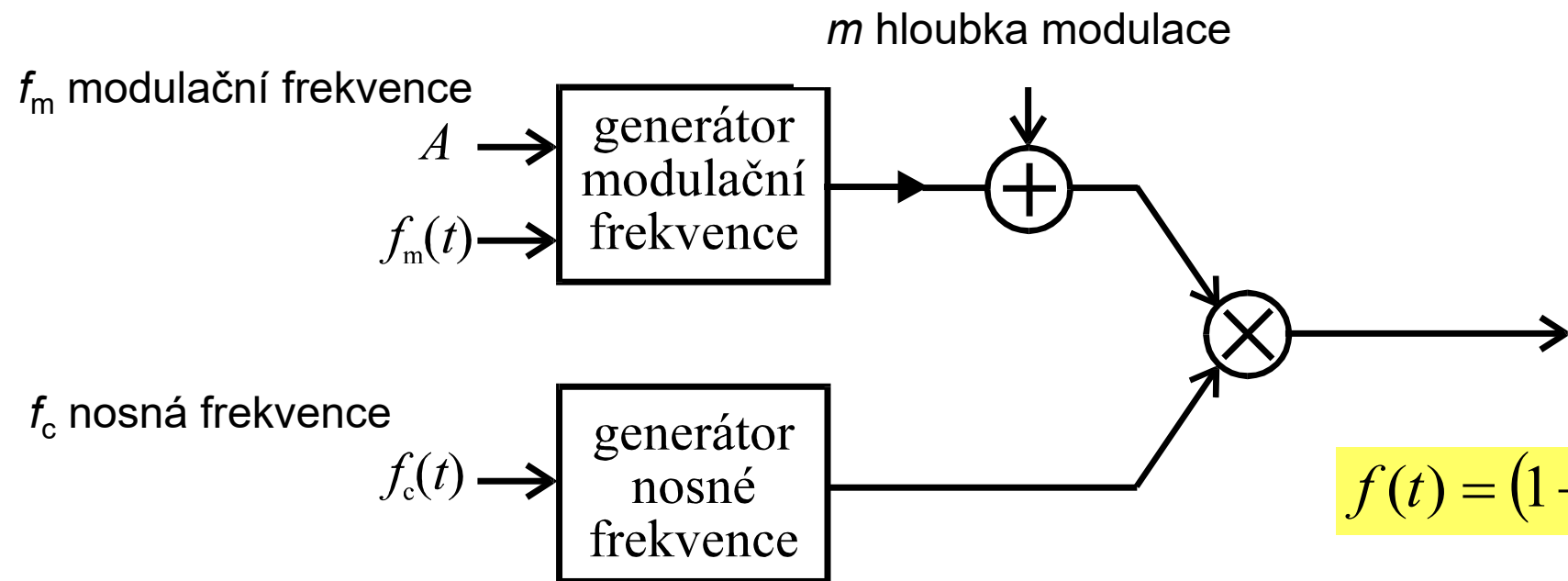


# 8. PŘEDNÁŠKA – Modulační syntézy

- **Amplitudová modulace (AM)**
- **Frekvenční modulace (FM)**
  - **Příklady audio FM – syntetické zvuky a hudební nástroje**

# Amplitudová modulace (AM)

- Amplituda se mění podle jiného signálu



$$f(t) = (1 + m \cdot \sin 2\pi f_m t) \sin 2\pi f_c t$$

# Amplitudová modulace

- **Trigonometrické identity**  
užitečné pro modulační analýzy:

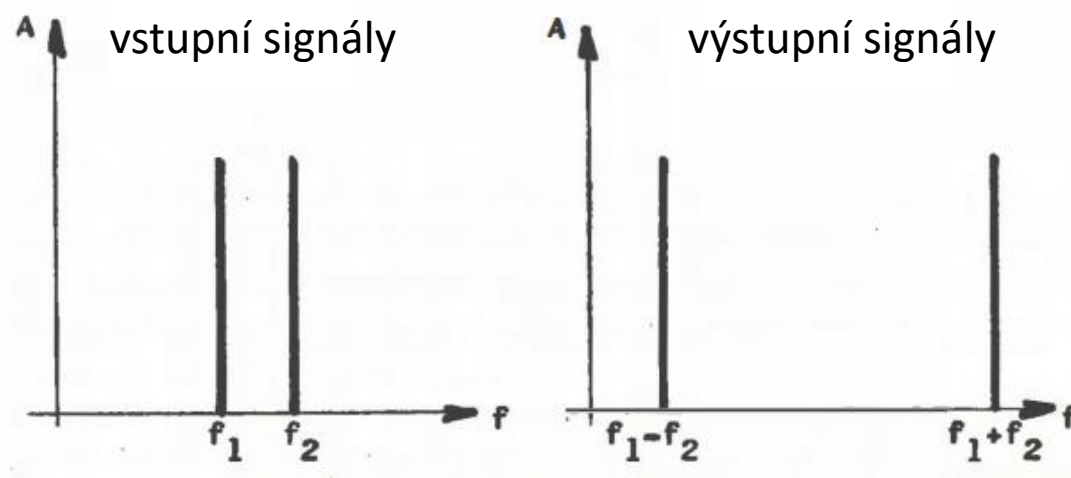
$$\sin \alpha \cdot \sin \beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)]$$
$$\cos \alpha \cdot \cos \beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha - \beta) + \cos(\alpha + \beta)]$$
$$\sin \alpha \cdot \cos \beta = \frac{1}{2} [\sin(\alpha - \beta) - \sin(\alpha + \beta)]$$

$$(1 + m \cdot \sin(2\pi f_m t)) \sin(2\pi f_c t) =$$
$$\sin(2\pi f_c t) + m_d \cdot \sin(2\pi f_m t) \sin(2\pi f_c t) =$$
$$\sin(2\pi f_c t) + \frac{m_d}{2} \cos(2\pi(f_c - f_m)t) - \frac{m_d}{2} \cos(2\pi(f_c + f_m)t)$$

# Kruhová modulace

- **Princip kruhové modulace:**

- Pokud jsou oba signály sinusové, pak výsledné spektrum má dvě postranní pásma.
- Nosná frekvence ve spektru není obsažena.
- Původní frekvence nosného signálu je kruhovou modulací změněna.



- **Příklady použití:**

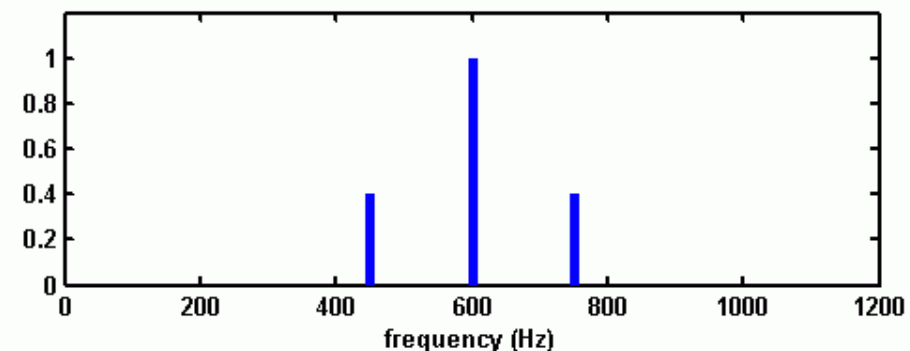
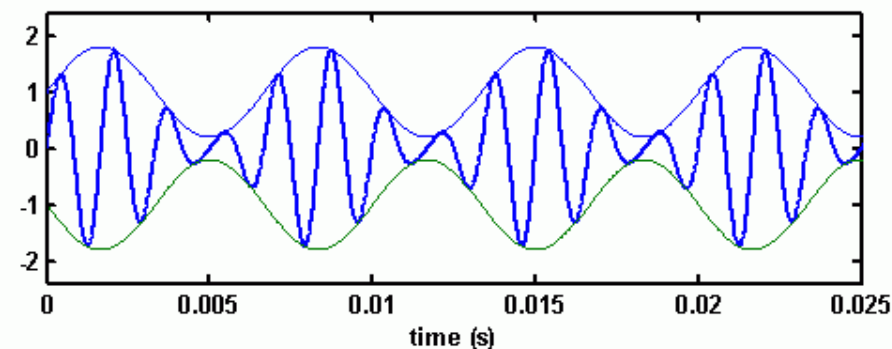
- Běžné u zvukových efektů sci-fi nebo hororových filmů..

# Amplitudová modulace

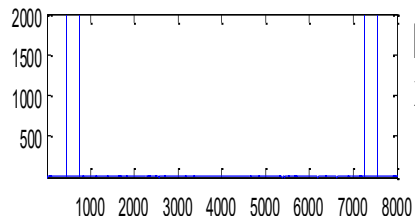
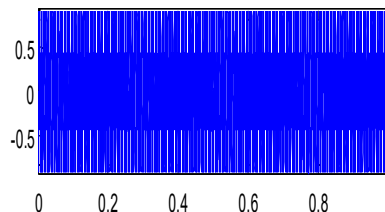
## • Příklady amplitudové modulace

- Libozvučné tóny
- Nelibozvučné tóny
- Oblast vnímání drsnosti
- Oblast tremola
- Pomalý rytmičkový efekt

	$f_c$	$f_m$
• Libozvučné tóny	<b>600</b>	<b>150</b>
• Nelibozvučné tóny	<b>600</b>	<b>170</b>
• Oblast vnímání drsnosti	<b>600</b>	<b>50</b>
• Oblast tremola	<b>600</b>	<b>70</b>
• Pomalý rytmičkový efekt	<b>600</b>	<b>1</b>



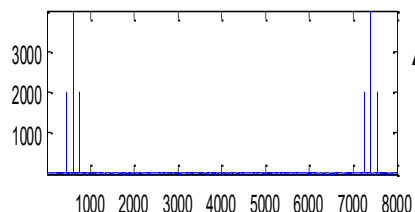
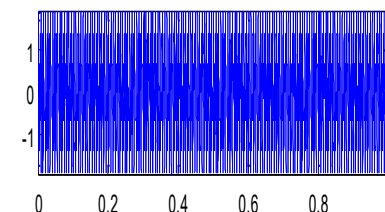
# Amplitudová modulace



**Kruhová modulace**

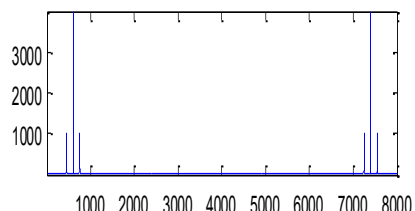
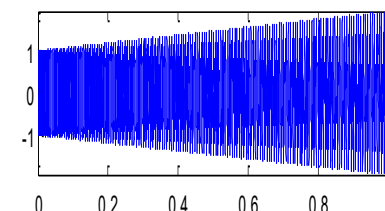
$$x = \cos(2\pi \cdot 600 \cdot t) \cdot \cos(2\pi \cdot 150 \cdot t)$$

$$x = 0.5 \cdot \cos(2\pi \cdot 750 \cdot t) + 0.5 \cdot \cos(2\pi \cdot 450 \cdot t)$$



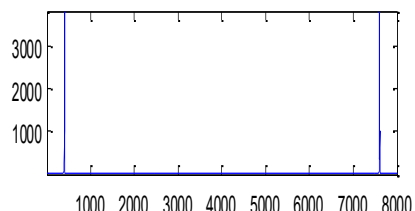
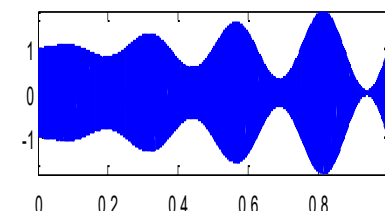
**Amplitudová modulace**

$$x = (1 + 1 \cdot \sin(2\pi \cdot 150 \cdot t)) \cdot \sin(2\pi \cdot 600 \cdot t)$$



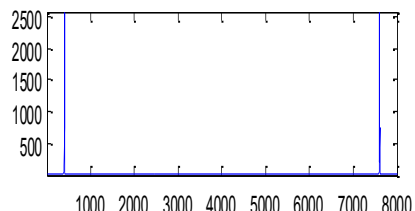
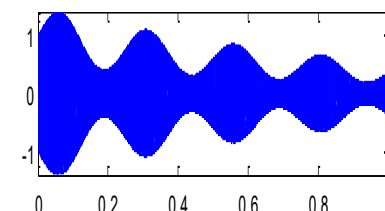
**Modulační index  $m_i$  = od 0 do 1**

$$x = (1 + m_i \cdot \sin(2\pi \cdot 150 \cdot t)) \cdot \sin(2\pi \cdot 600 \cdot t)$$



**Modulační index  $m_i$  = od 0 do 1**

$$x = (1 + m_i \cdot \sin(2\pi \cdot 4 \cdot t)) \cdot \sin(2\pi \cdot 400 \cdot t)$$



**Exponenciální tlumení  $m_i = 0.5$**

$$x = (1 + m_i \cdot \sin(2\pi \cdot 4 \cdot t)) \cdot \sin(2\pi \cdot 400 \cdot t) \cdot \exp(-t)$$



# Amplitudová modulace – vnímání

$$f_c = 600 \text{ Hz}$$

## Oblast ustáleného tónu

Subharmonické modulační frekvence

## Oblast ustáleného tónu

Neharmonické modulační frekvence

## Oblast drsného zabarvení

## Oblast vnímání rytmu

(tremolo)

## Oblast slyšitelného kolísání amplitudy



$f_m$  je v řádu **stovek Hz**

$f_m = 300, 200, 150, 120, 100 \dots$  **vnímání konsonance**



$f_m$  je v řádu **stovek Hz**

$f_m = 317, 229, 169, 129, 92 \dots$  **vnímání disonance**



$f_m$  je v řádu **desítek Hz**

$f_m = 94, 60, 47, 30, 20 \text{ Hz}$



$f_m$  je v řádu **desítek Hz**

$f_m = 9.4, 6, 4.7, 3, 2 \text{ Hz}$

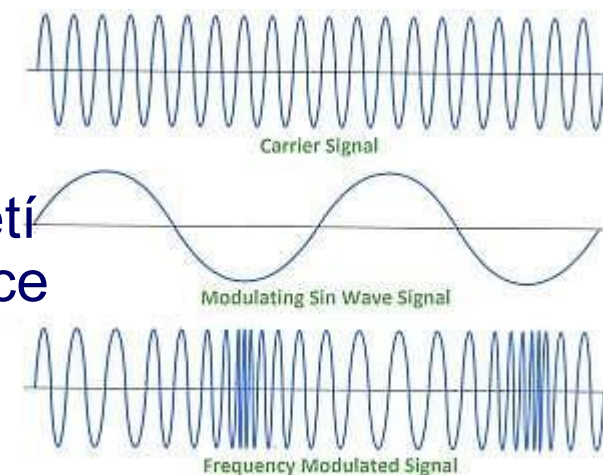


$f_m$  je v řádu **desetin Hz**

$f_m = 0.6, 0.45, 0.20, 0.15 \text{ Hz}$

## Úvod do frekvenční modulace (FM)

- Historie:
  - **FM rozhlasové vysílání:** používáno od 20. let 20. století k přenosu rozhlasových signálů pomocí změny frekvence nosné vlny.
  - **FM syntéza audia:** poprvé formalizována v roce 1973 díky práci Johna Chowninga na digitální syntéze zvuku.
- Základní složky:
  - **Modulační signál:** signál, který mění frekvenci nosné vlny (např. audio nebo řídicí signál).
  - **Nosný signál:** sinusový signál s vyšší frekvencí (např. 99,8 MHz u FM rádia).
- Princip FM:
  - Amplituda modulačního signálu mění frekvenci nosné vlny, přičemž modulovaný signál může být na přijímači znovu demodulován.

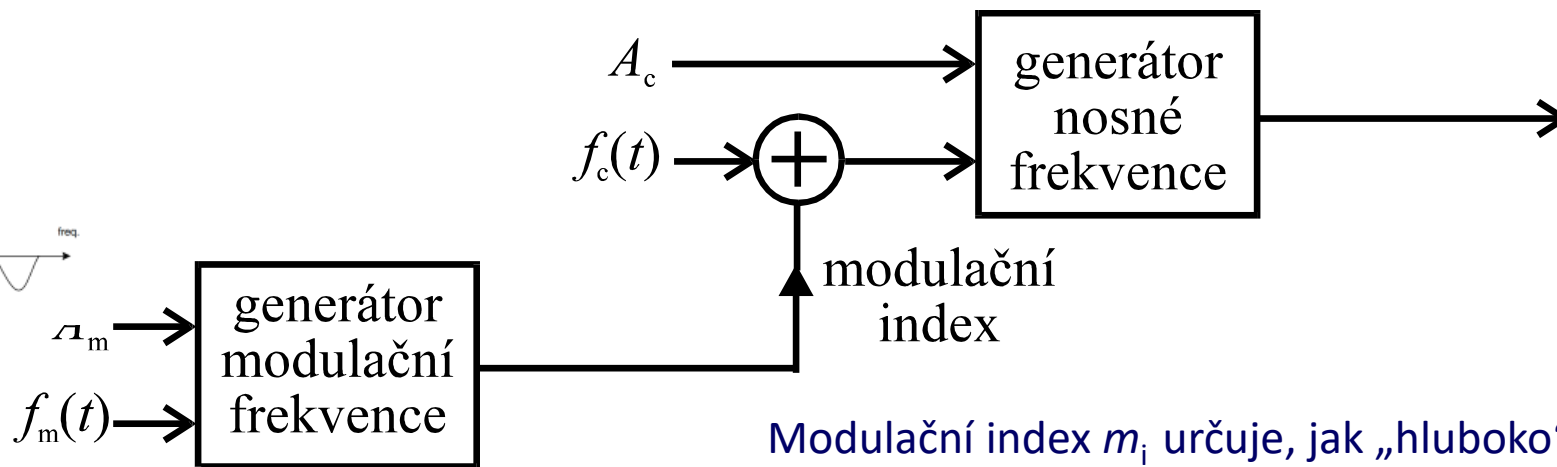
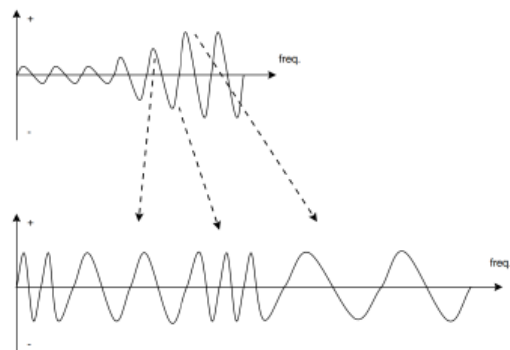


## • Aplikace audio FM

- Vývoj v hudbě:
  - Přínos Johna Chowninga (1973):  
Položil základy pro číslicovou FM syntézu.
- Výhody FM syntézy:
  - Nákladově efektivní, jednoduchá a vyžaduje méně parametrů.
  - Široce používaná v digitálních syntezátorech, zejména Yamaha DX7 a Casio CZ.
- Klíčový princip:
  - Změny amplitudy modulační frekvence ovlivňují barvu zvuku (timbre).



# Frekvenční modulace



Modulační index  $m_i$  určuje, jak „hluboko“ je nosný tón modulován  
 malý  $m_i \rightarrow$  úzké spektrum (jemná vibrace)  
 velký  $m_i \rightarrow$  široké spektrum (bohatý, zvukově „plný“ tón)

$$f(t) = \sin((2\pi f_c t) + m_i \cdot \sin(2\pi f_m t))$$

Jednoduchý sinusový signál modulovaný jinou sinusoidou lze rozložit jako součet nekonečné řady sinusových složek s různými frekvencemi.

$$\sin(2\pi f_c t + m_i \sin(2\pi f_m t)) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} I_k(m_i) \sin(2\pi(f_c + k f_m)t + \phi_k)$$

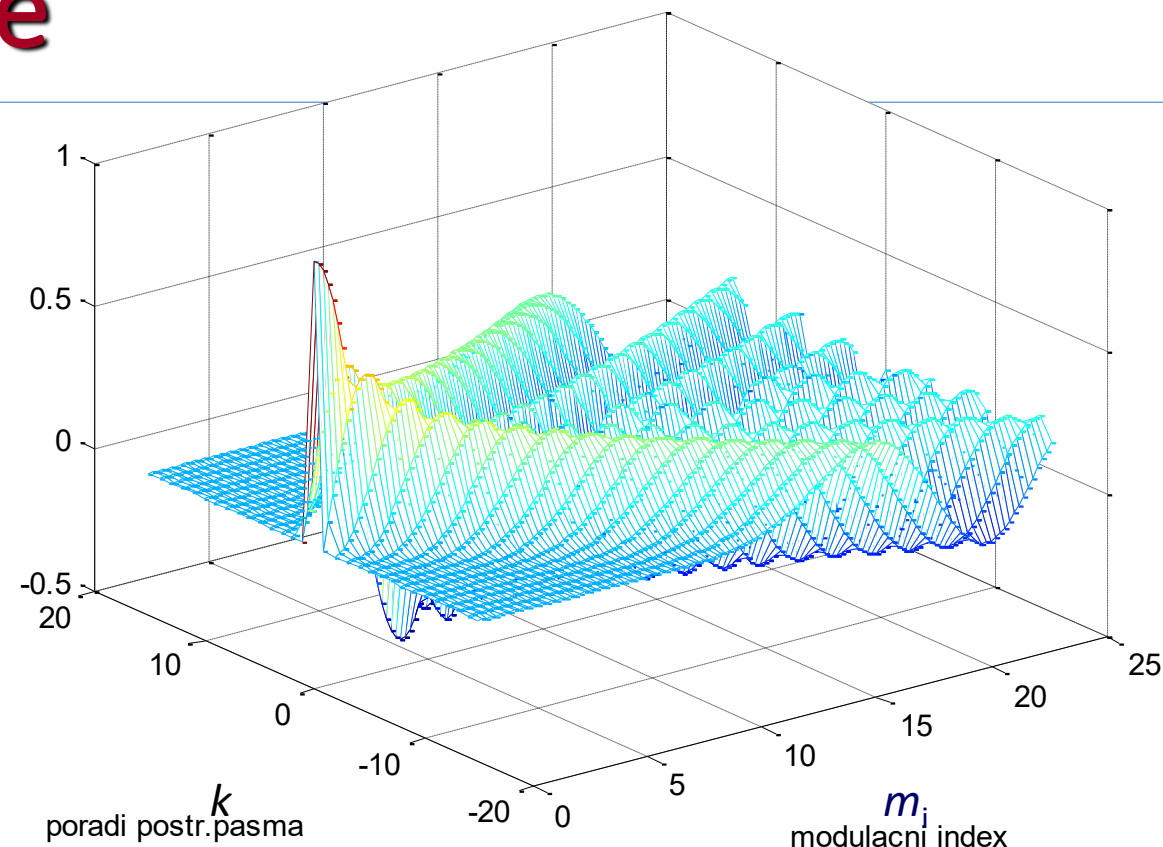
## • Spektrální vlastnosti FM

### ○ Detaily frekvenčního spektra:

- Postranní pásma se objevují okolo  $f_c$ , vzájemně vzdálená o  $f_m$ .
- Koeficienty Besselových funkcí  $I_k(m_i)$  určují amplitudy postranních pásem.

### ○ Vliv modulačního indexu:

- Malý  $m_i$ : dominující nosná složka.
- Velký  $m_i$  ( $>1$ ): postranní pásma se zesilují, spektrum se rozšiřuje, klesá dominance nosné frekvence.



$$\sin(2\pi f_c t + m_i \sin(2\pi f_m t)) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} I_k(m_i) \sin(2\pi(f_c + k f_m)t + \phi_k)$$

## • FM spektrum a Besselovy funkce

### ○ FM Spektrum:

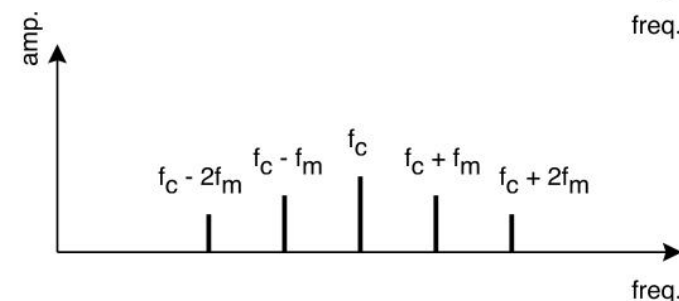
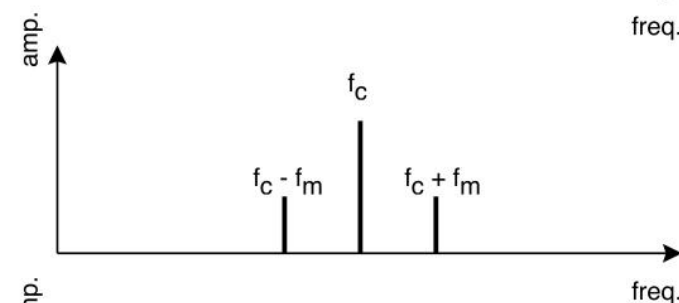
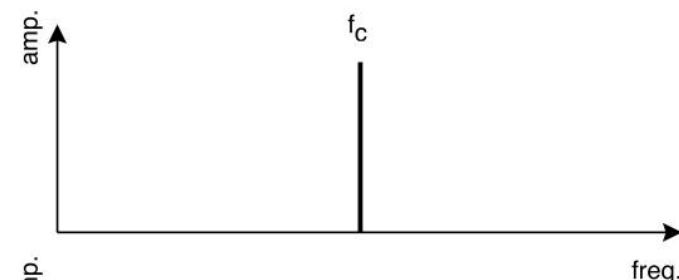
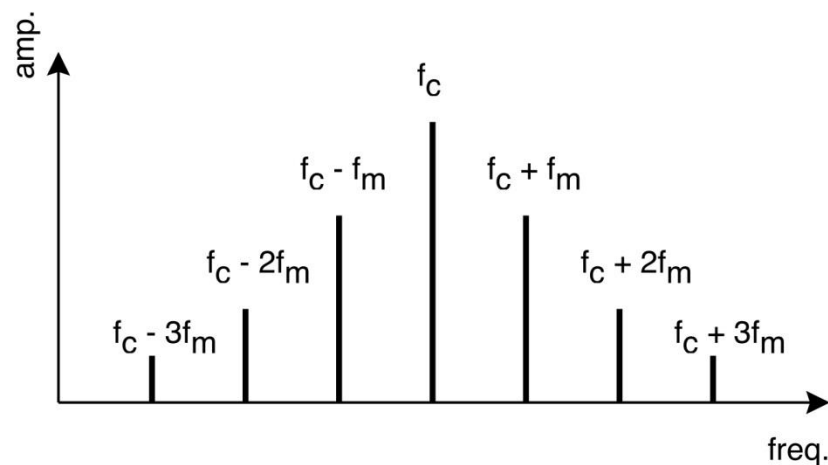
- Nosná frekvence  $f_c$
- Postranní pásma: rozložena symetricky okolo  $f_c$ , se vzdáleností určenou  $f_m$ .

### • Modulační index:

- Vyšší  $m_i$  zvětšuje šířku pásma a přidává postranní pásma.
- Vliv  $m_i$  se zobrazuje graficky ve spektrech.

$$f_c + k \times f_m$$

$$f_c - k \times f_m$$

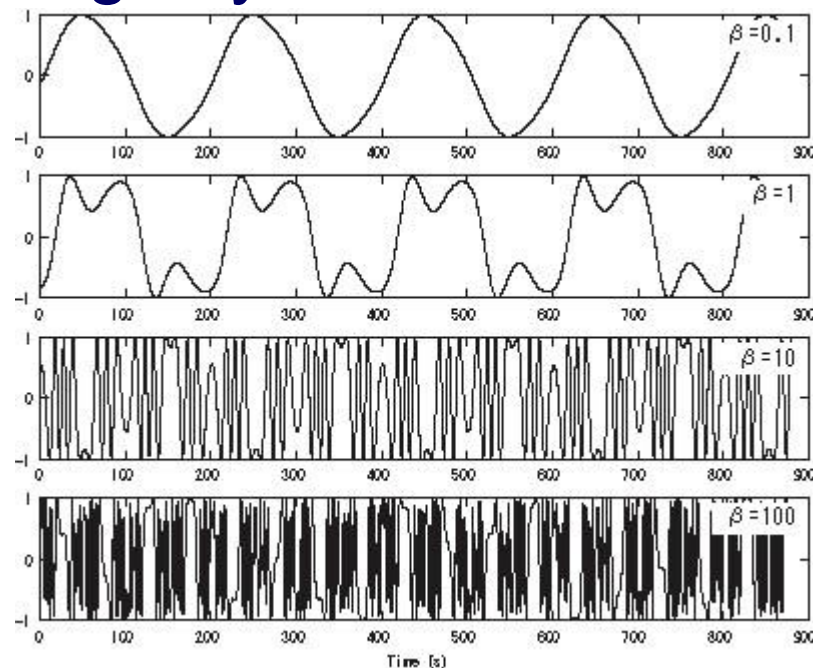


# Frekvenční modulace

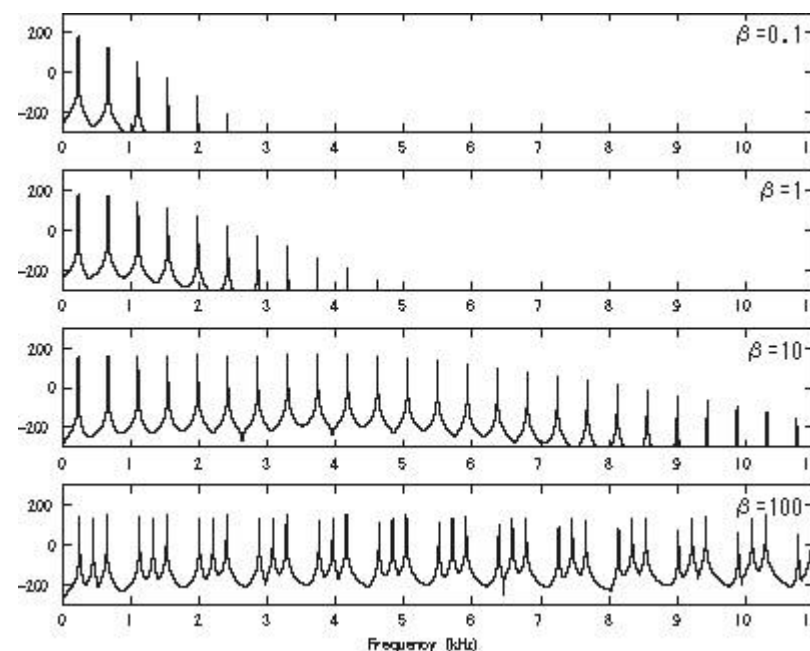
## • Příklady v časové a frekvenční oblasti

- Nosná frekvence: např. 220 Hz
- Modulační frekvence: např. 440 Hz

### Signály v časové oblasti



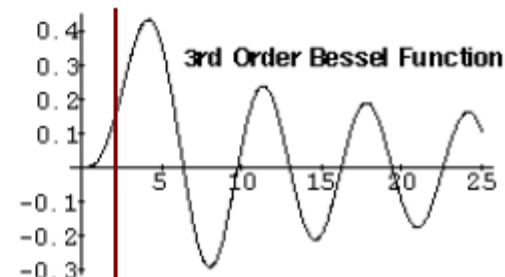
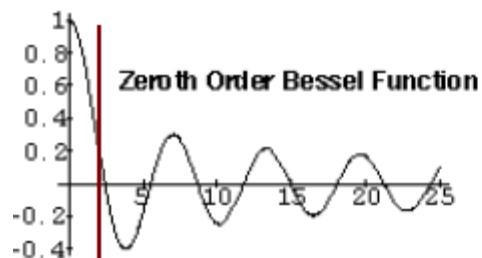
### Spektra



# Frekvenční modulace

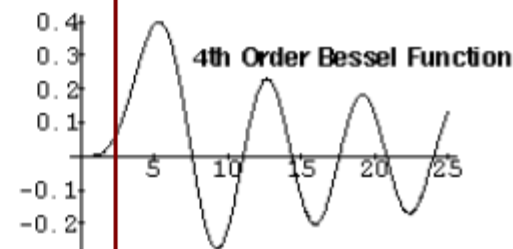
- Amplitudy jednotlivých složek odpovídají hodnotám Besselových funkcí prvního druhu.

nosná frekvence  $f_c$



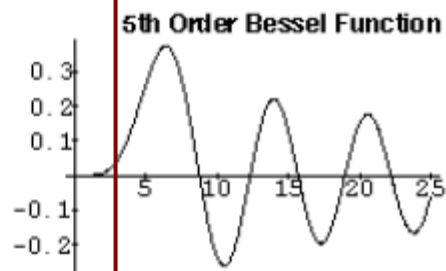
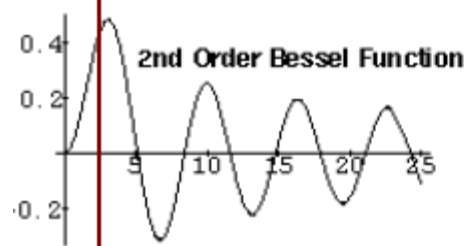
$f_c \pm 3f_m$

postranní pásma  $f_c \pm f_m$



$f_c \pm 4f_m$

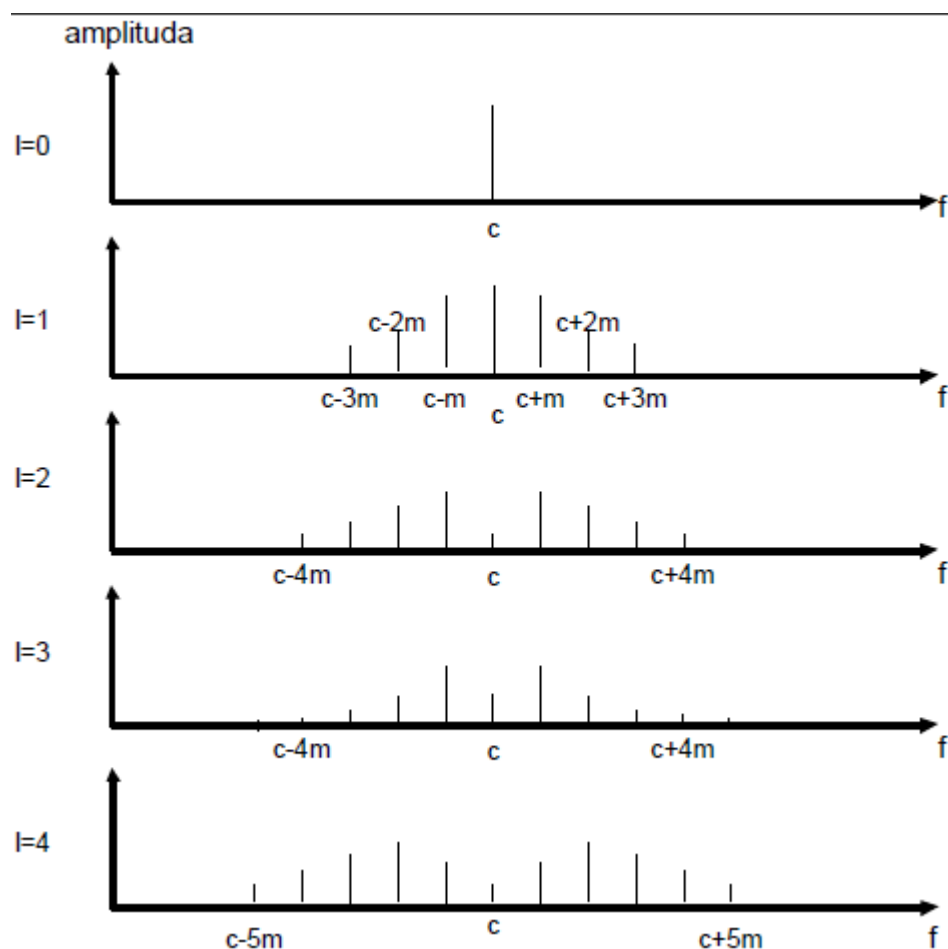
$f_c \pm 2f_m$



$f_c \pm 5f_m$

**Příklad:**  $f_c = 500$  Hz,  $f_m = 100$  Hz  $\rightarrow$  postranní pásma se nacházejí na 400, 600, 300, 700 Hz atd.

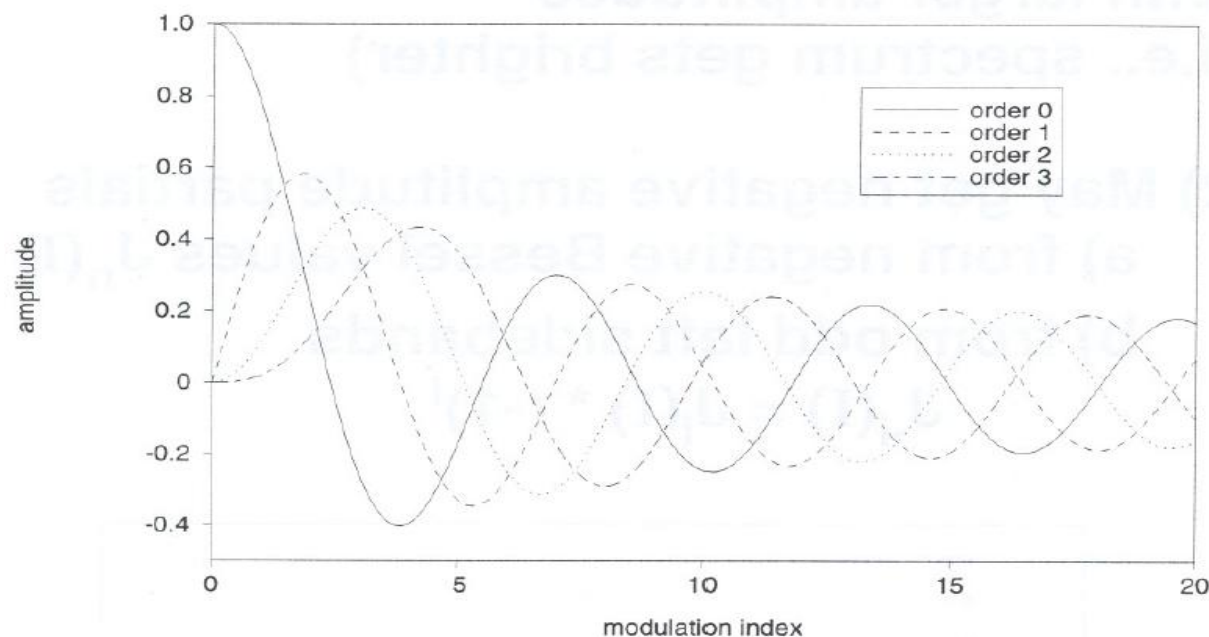
## • Vliv modulačního indexu na spektrum



- Při růstu modulačního indexu  $I$ :
  - se **zvětšuje šířka pásma** a
  - vznikají **další postranní pásma**.
- Při malých hodnotách  $I$  je spektrum úzké, při větších hodnotách  $I$  je bohatší a komplexnější.

# Frekvenční modulace

- Závislost amplitudy na modulačním indexu (řády 0, 1, 2, 3)



- Každý řád Besselovy funkce určuje amplitudu příslušného postranního pásma.
- Jak roste modulační index  $I$ , energie se přerozděluje mezi vyšší řády.
- To vysvětluje, proč FM zvuky mohou měnit zabarvení i při konstantní základní frekvenci.

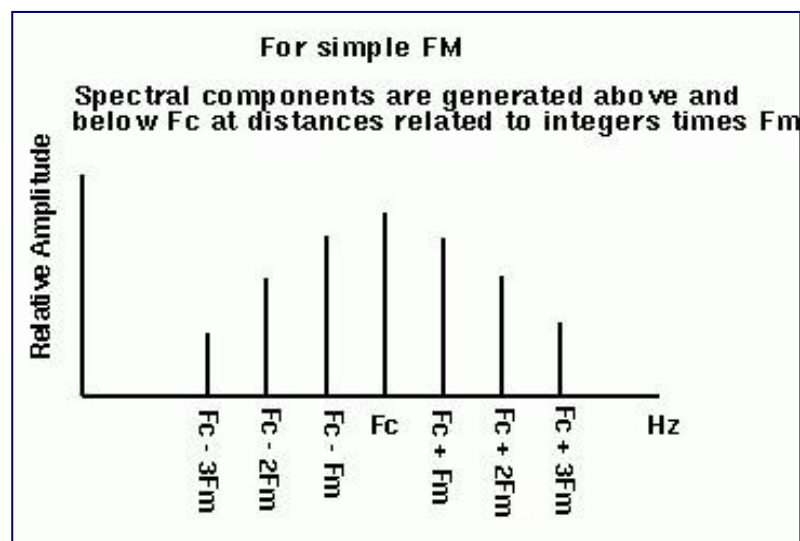
## • Spektrální složky

- Spektrální složky modulovaného signálu:

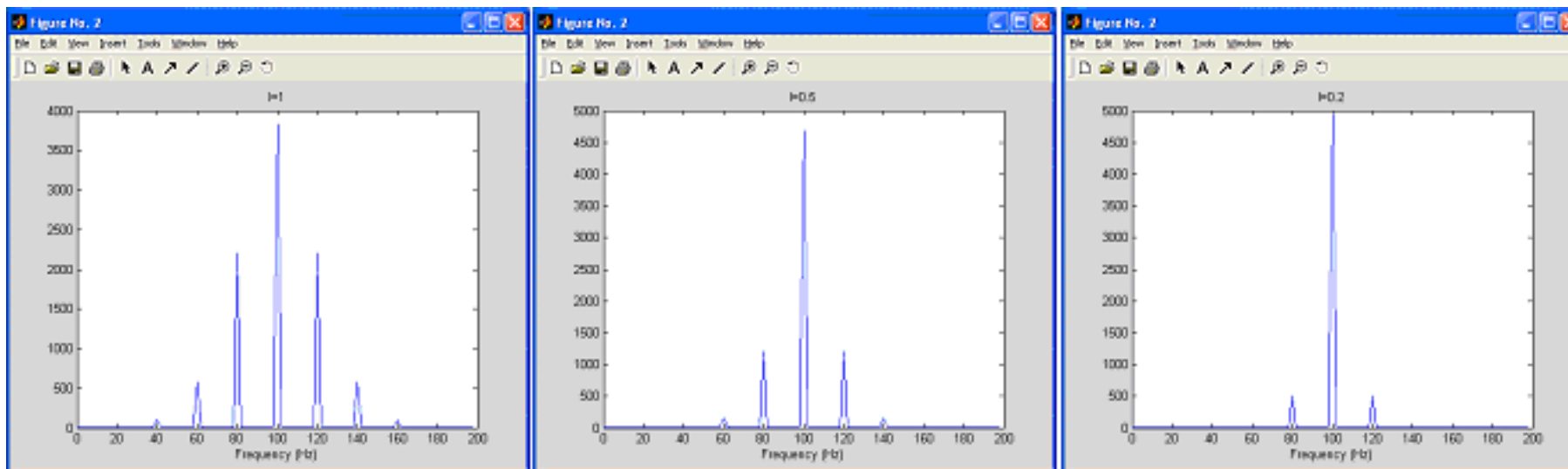
$$f_c \pm k f_m \quad (\text{kde } k = 0, 1, 2, \dots)$$

- Ve frekvenční modulaci rozlišujeme **dolní a horní postranní pásma** (pod a nad  $f_c$ )).

- **Příklad:** pokud  $f_c = 500$  Hz and  $f_m = 100$  Hz:  
..., 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, ...



- Příklady FM spekter



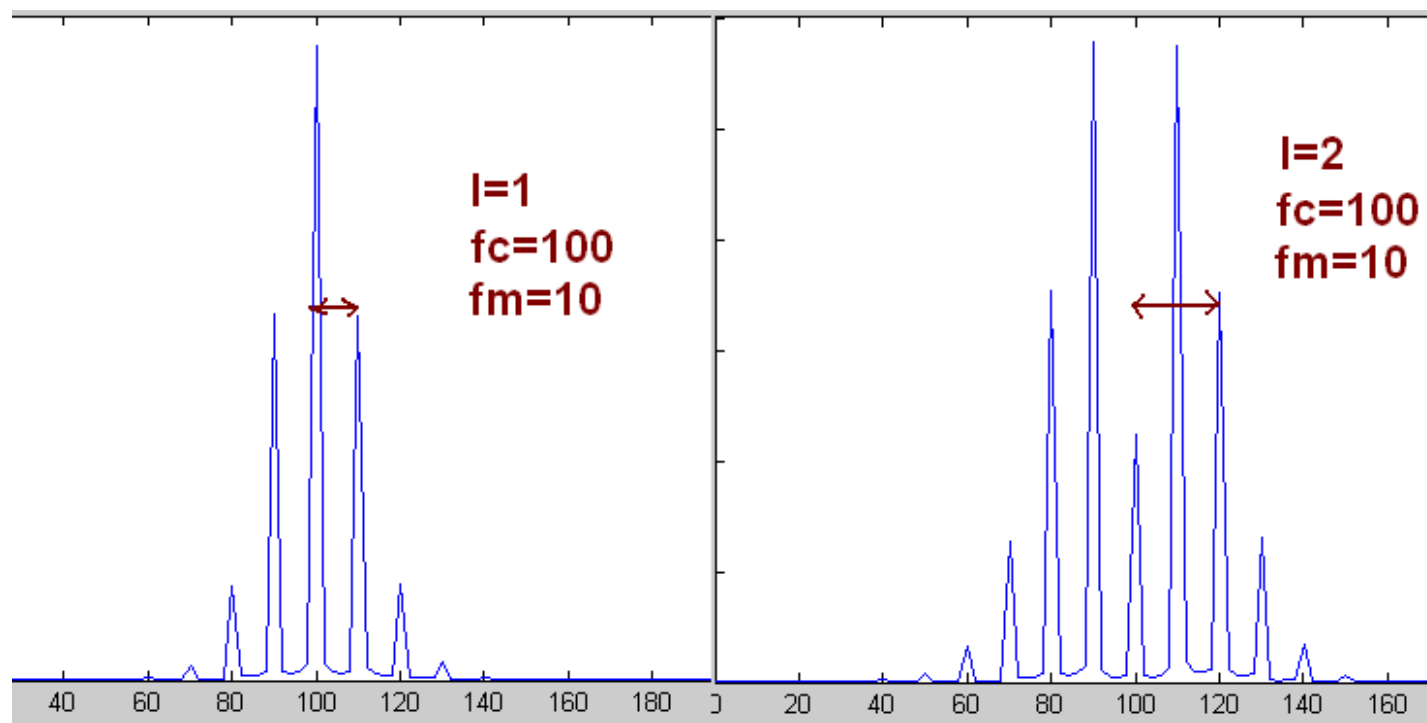
$I=1$

$I=0.5$

$I=0.1$

# Frekvenční modulace

- Příklady nosných a modulačních frekvencí

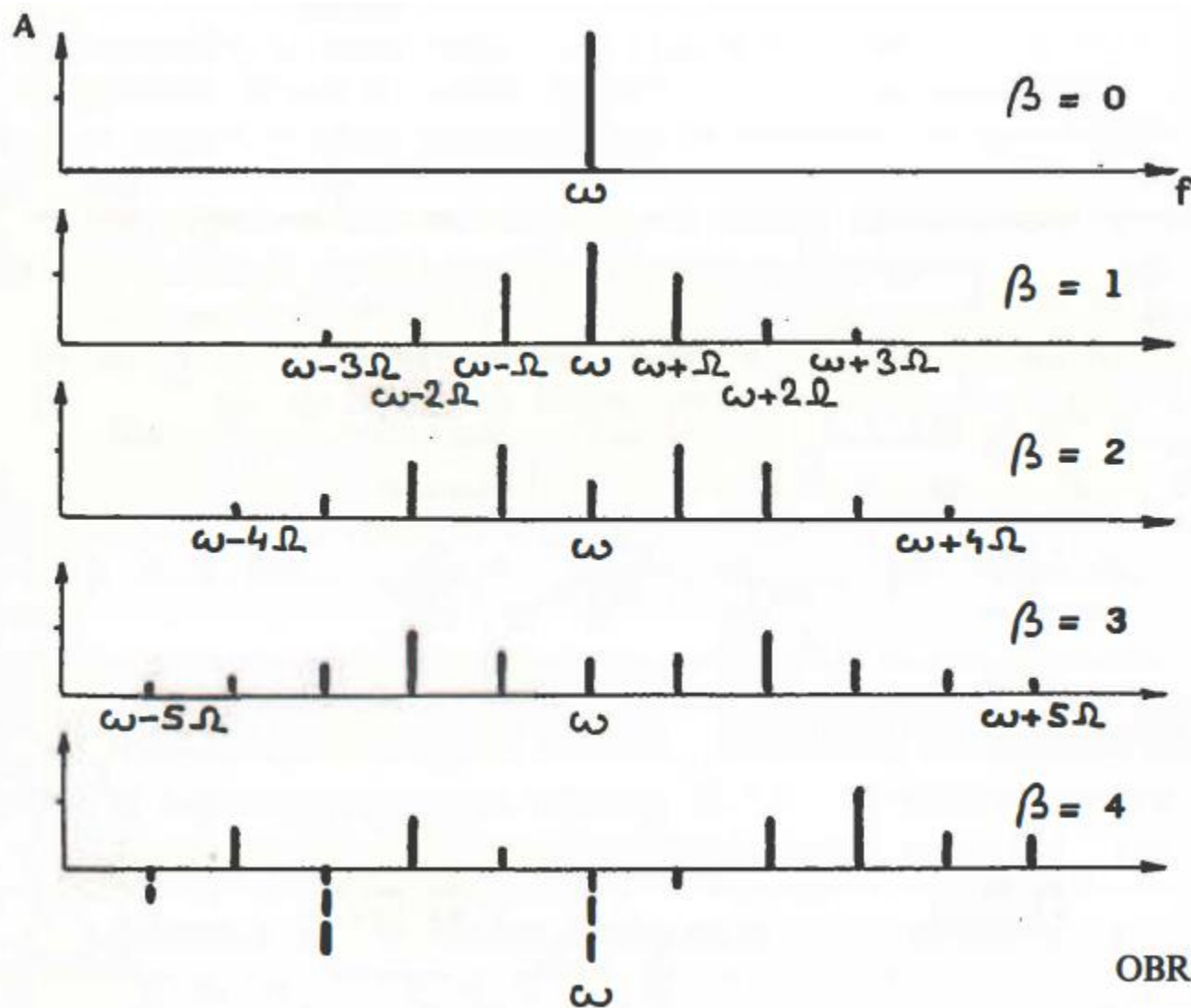


# Frekvenční modulace

## List of scaling factors (not exhaustive)

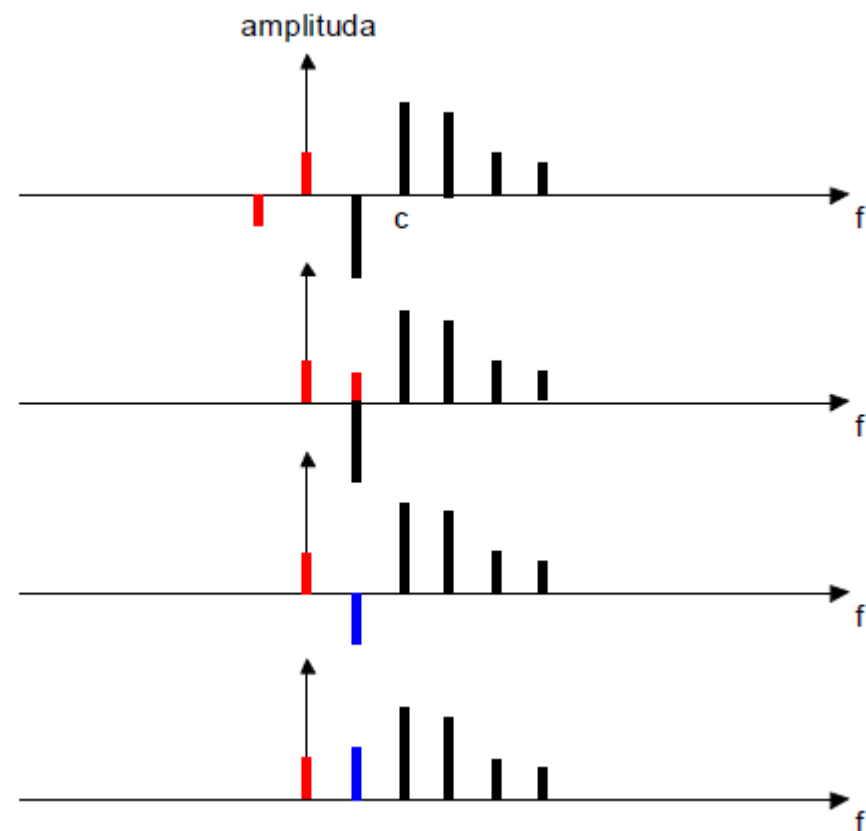
$i$	$B_0(i)$	$B_1(i)$	$B_2(i)$	$B_3(i)$	$B_4(i)$	$B_5(i)$	$B_6(i)$	$B_7(i)$	$B_8(i)$
0.0	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.5	0.938	0.242	0.030	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.0	0.765	0.440	0.115	0.019	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000
1.5	0.512	0.558	0.232	0.060	0.011	0.001	0.000	0.000	0.000
2.0	0.223	0.576	0.352	0.129	0.034	0.007	0.001	0.000	0.000
2.5	-0.048	0.500	0.446	0.216	0.073	0.020	0.004	0.000	0.000
3.0	-0.260	0.340	0.486	0.309	0.132	0.043	0.011	0.002	0.000
3.5	-0.380	0.137	0.458	0.386	0.204	0.080	0.025	0.006	0.001
4.0	-0.400	-0.066	0.364	0.430	0.281	0.132	0.050	0.015	0.004
4.5	-0.032	-0.231	0.217	0.424	0.348	0.194	0.084	0.030	0.009
5.0	-0.177	-0.327	0.046	0.364	0.391	0.261	0.131	0.053	0.018
5.5	-0.006	-0.341	-0.117	0.256	0.396	0.320	0.186	0.086	0.033
6.0	0.150	-0.276	-0.242	0.115	0.357	0.362	0.245	0.130	0.056
6.5	0.260	-0.153	-0.307	-0.035	0.274	0.373	0.300	0.180	0.088
7.0	0.300	-0.004	-0.301	-0.167	0.157	0.347	0.340	0.233	0.128
7.5	0.266	0.135	-0.230	-0.258	0.023	0.283	0.354	0.283	0.174
8.0	0.171	0.234	-0.113	-0.291	-0.105	0.185	0.337	0.320	0.223
8.5	0.041	0.273	0.022	-0.262	-0.207	0.067	0.287	0.337	0.270
9.0	-0.090	0.245	0.145	-0.180	-0.265	-0.055	0.204	0.327	0.305
9.5	-0.194	0.161	0.228	-0.065	-0.270	-0.161	0.100	0.286	0.323
10.0	-0.245	0.043	0.254	0.058	0.220	-0.234	-0.014	0.216	0.317

# Frekvenční modulace



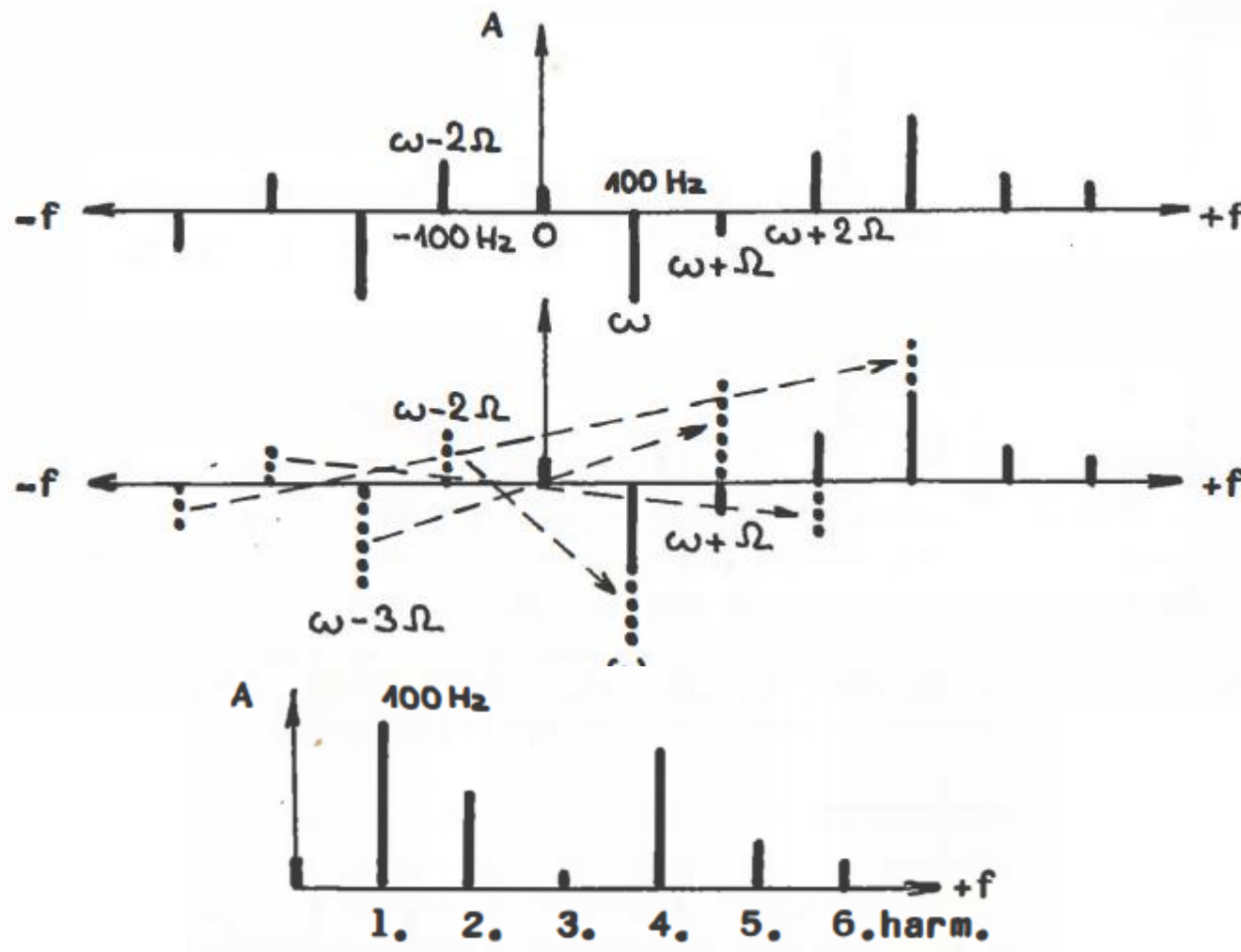
## • Odraz spektrálních složek

- Spektrum se „zápornou“ složkou.
- **Složky se zrcadlí** a jejich znaménka se obrací.
- **Složky se sčítají** podle jejich fáze.
- Berou se **absolutní hodnoty** amplitud.



# Frekvenční modulace

$f_c = 100 \text{ Hz}$ ,  $f_m = 100 \text{ Hz}$



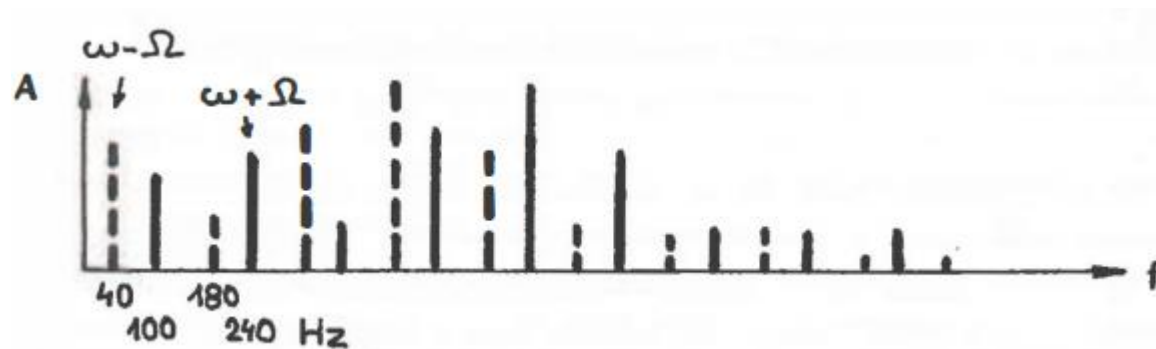
# Frekvenční modulace

- **Nosná a modulační frekvence**

- Nosná frekvence  $f_c = 100$  Hz
- Modulační frekvence  $f_m = 140$  Hz

- **Výsledné frekvence:**

- **Součet:**  $f_c + f_m = 240$  Hz  
(a další postranní pásma na 480 Hz, 620 Hz, atd.)
- **Rozdíl:**  $f_c - f_m = -40$  \) Hz  
(odpovídající kladné frekvence na 180 Hz, atd.)



## Modulační index

- Určuje **rozsah frekvencí** ovlivněných modulací:

$$\Delta f = l \cdot f_m.$$

- Ovlivňuje **počet významných spektrálních složek**.
  - Vyšší modulační index → bohatší spektrum.
- Carsonovo pravidlo:  $B = 2(\Delta f + f_m) = 2 f_m (l + 1)$
- Modulační index ovlivňuje jak **amplitudu spektrálních složek**, tak i **barvu zvuku** (timbre).

# Frekvenční modulace






- **Poměr modulace** (modulation ratio) je poměr modulační frekvence k frekvenci nosné:

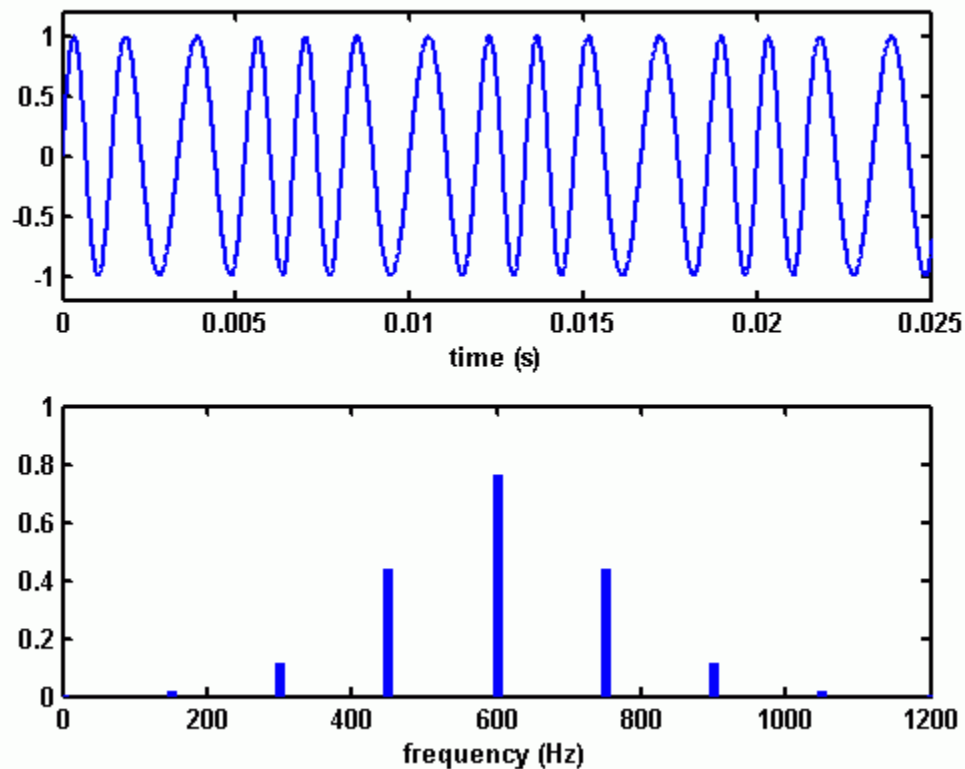
$$w_m = \frac{f_m}{f_c} = \frac{N_2}{N_1}$$

- Aby byl výsledný signál harmonický, měl by být tento poměr vyjádřen jako poměr celých čísel  $N_2$  a  $N_1$ .
- V praxi se často používají malé celočíselné poměry, například: 1:1, 2:1, 3:1, a 3:2.

# Frekvenční modulace

## • Příklady frekvenční modulace

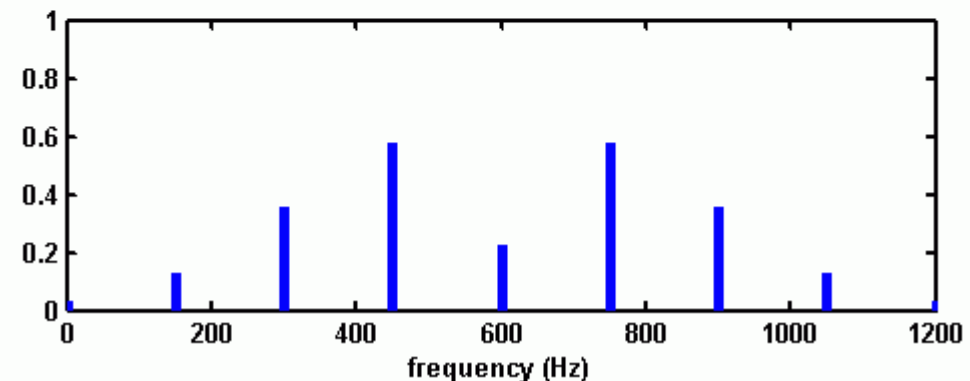
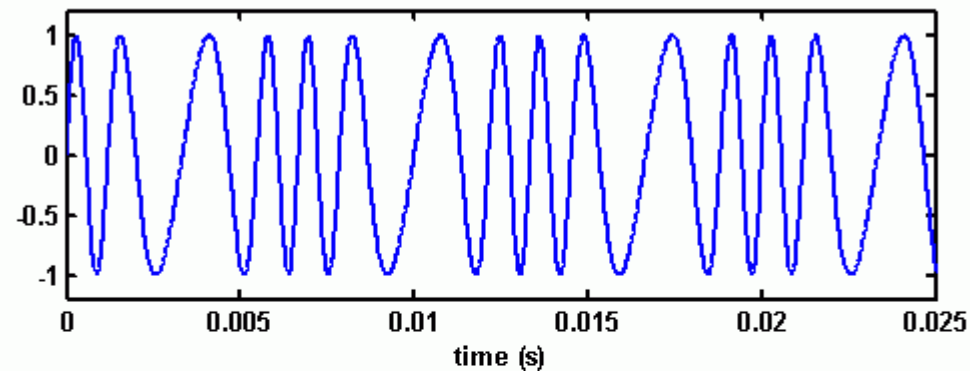
$f_c$	$f_m$	$m_i$	
600	150	1	
600	1	1	
600	5	1	
600	50	1	
600	70	1	



# Frekvenční modulace

## • Příklady frekvenční modulace

$f_c$	$f_m$	$m_i$	
600	150	2	🔊
600	170	2	🔊



# Frekvenční modulace – vnímání

$$f_c = 600 \text{ Hz}$$

## Oblast libozvučného ustáleného tónu

Subharmonické modulační frekvence

## Oblast nelibozvučného ustáleného tónu

Neharmonické modulační frekvence

## Oblast drsného zabarvení

## Oblast vnímání rytmu

(vibráto)

## Oblast slyšitelných pomalých modulací

$f_m$  je v řádu **stovek Hz**

$f_m$  je v řádu **stovek Hz**

$f_m$  je v řádu **desítek Hz**

$f_m$  je v řádu **desítek Hz**

$f_m$  je v řádu **desetin Hz**

- **FM – frekvenční poměry & návrh zvuku**
- FM lze řídit pomocí dvou parametrů:
  - Modulační index  $I$
  - Frekvenční poměr  $H = f_m : f_c$
- Pokud jsou  $I$  a  $H$  konstantní, barva zvuku zůstává stejná, i když se  $f_c$  změní.

## FM – parametry pro tvorbu zvukového zabarvení:

- Zvýšení modulačního indexu / obecně rozšiřuje efektivní šířku pásma FM spektra.

## FM – parametry pro tvorbu zvukového zbarvení:

- Zvýšení modulačního indexu / obecně rozšiřuje efektivní šířku pásma FM spektra.
- Užitečný parametr pro spektrální analýzu jednoduché FM je poměr frekvencí  $H = f_m / f_c$ .

## FM – parametry pro tvorbu zvukového zabarvení:

- Zvýšení modulačního indexu / obecně rozšiřuje efektivní šířku pásma FM spektra.
- Užitečný parametr pro spektrální analýzu jednoduché FM je poměr frekvencí  $H = f_m / f_c$ .
  - Pro  $H = 1$ , nosná a modulační frekvence jsou shodné → vzniká harmonické spektrum (např. žesťové nástroje).
    - Spektrum:  $\dots, f_c - 2f_m, f_c - f_m, f_c, f_c + f_m, f_c + 2f_m, \dots = \dots, -f_c, 0, f_c, 2f_c, 3f_c, \dots$

## FM – parametry pro tvorbu zvukového zabarvení:

- Zvýšení modulačního indexu / obecně rozšiřuje efektivní šířku pásma FM spektra.
- Užitečný parametr pro spektrální analýzu jednoduché FM je poměr frekvencí  $H = f_m / f_c$ .
  - Pro  $H = 1$ , nosná a modulační frekvence jsou shodné → vzniká harmonické spektrum (např. žesťové nástroje).
    - Spektrum:  $\dots, f_c - 2f_m, f_c - f_m, f_c, f_c + f_m, f_c + 2f_m, \dots = \dots, -f_c, 0, f_c, 2f_c, 3f_c, \dots$
  - Pro  $H = 1/2$ , nosná frekvence je dvojnásobkem modulační → vzniká harmonické spektrum, kde modulátor určuje základní frekvenci (např. zvony).

## FM – parametry pro tvorbu zvukového zabarvení:

- Zvýšení modulačního indexu  $I$  obecně rozšiřuje efektivní šířku pásma FM spektra.
- Užitečný parametr pro spektrální analýzu jednoduché FM je poměr frekvencí  $H = f_m / f_c$ .
  - Pro  $H = 1$ , nosná a modulační frekvence jsou shodné → vzniká harmonické spektrum (např. žesťové nástroje).
    - Spektrum:  $\dots, f_c - 2f_m, f_c - f_m, f_c, f_c + f_m, f_c + 2f_m, \dots = \dots, -f_c, 0, f_c, 2f_c, 3f_c, \dots$
  - Pro  $H = 1/2$ , nosná frekvence je dvojnásobkem modulační → vzniká harmonické spektrum, kde modulátor určuje základní frekvenci (např. zvony).
  - Pro  $H = 2$  spektrum je harmonické s lichými celočíselnými násobky základní frekvence  $f_c$ .

## FM – parametry pro tvorbu zvukového zabarvení:

- Zvýšení modulačního indexu  $I$  obecně rozšiřuje efektivní šířku pásma FM spektra.
- Užitečný parametr pro spektrální analýzu jednoduché FM je poměr frekvencí  $H = f_m / f_c$ .
  - Pro  $H = 1$ , nosná a modulační frekvence jsou shodné → vzniká harmonické spektrum (např. žesťové nástroje).
    - Spektrum:  $\dots, f_c - 2f_m, f_c - f_m, f_c, f_c + f_m, f_c + 2f_m, \dots = \dots, -f_c, 0, f_c, 2f_c, 3f_c, \dots$
  - Pro  $H = 1/2$ , nosná frekvence je dvojnásobkem modulační → vzniká harmonické spektrum, kde modulátor určuje základní frekvenci (např. zvony).
  - Pro  $H = 2$  spektrum je harmonické s lichými celočíselnými násobky základní frekvence  $f_c$ .
  - Obecně, pokud  $H = N_1 / N_2$ , kde  $N_1$  a  $N_2$  jsou kladná celá čísla, spektrum je **harmonické** a výsledný tón libozvučný (konsonantní).

## FM – parametry pro tvorbu zvukového zbarvení:

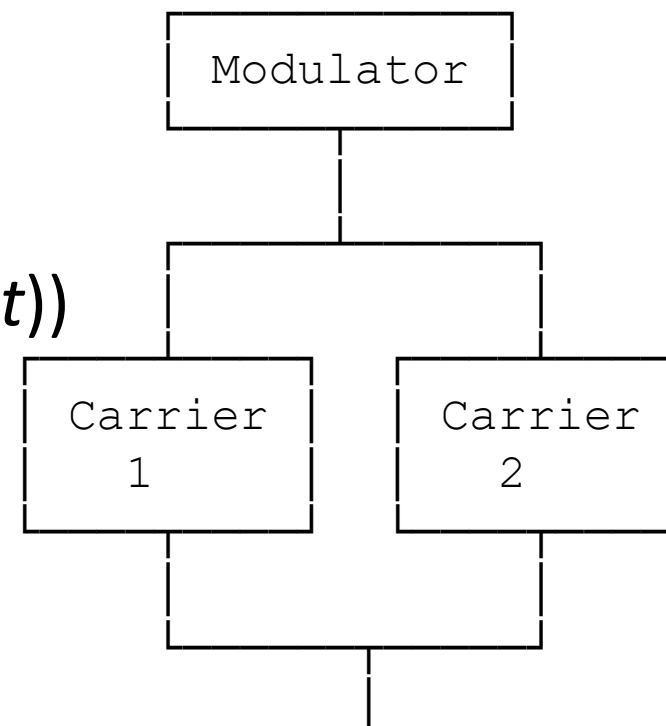
- Zvýšení modulačního indexu / obecně rozšiřuje efektivní šířku pásma FM spektra.
- Užitečný parametr pro spektrální analýzu jednoduché FM je poměr frekvencí  $H = f_m / f_c$ .
  - Pro  $H = 1$ , nosná a modulační frekvence jsou shodné → vzniká harmonické spektrum (např. žesťové nástroje).
    - Spektrum:  $\dots, f_c - 2f_m, f_c - f_m, f_c, f_c + f_m, f_c + 2f_m, \dots = \dots, -f_c, 0, f_c, 2f_c, 3f_c, \dots$
  - Pro  $H = 1/2$ , nosná frekvence je dvojnásobkem modulační → vzniká harmonické spektrum, kde modulátor určuje základní frekvenci (např. zvony).
  - Pro  $H = 2$  spektrum je harmonické s lichými celočíselnými násobky základní frekvence  $f_c$ .
  - Obecně, pokud  $H = N_1 / N_2$ , kde  $N_1$  a  $N_2$  jsou kladná celá čísla, spektrum je **harmonické** a výsledný tón libozvučný (konsonantní).
  - Pokud  $H$  nelze vyjádřit jako poměr celých čísel, spektrum bude **neharmonické** a výsledný tón nelibozvučný (disonantní).

# FM – konfigurace oscilátorů (operátory)

## • Více nosných frekvencí

- **Spektrum:** Použití více nosných frekvencí umožňuje vytvořit bohaté, vícevrstvé spektrum s rozmanitým zabarvením. Tato metoda umožňuje, aby každá nosná složka přispívala k jiné části výsledného spektra.
- **Příklady:** Smyčcové barvy, vrstvené syntetické zvuky, zvony.

$$f(t) = \sin(\omega_{c1}t + I \sin(\omega_m t)) + \sin(\omega_{c2}t + I \sin(\omega_m t))$$

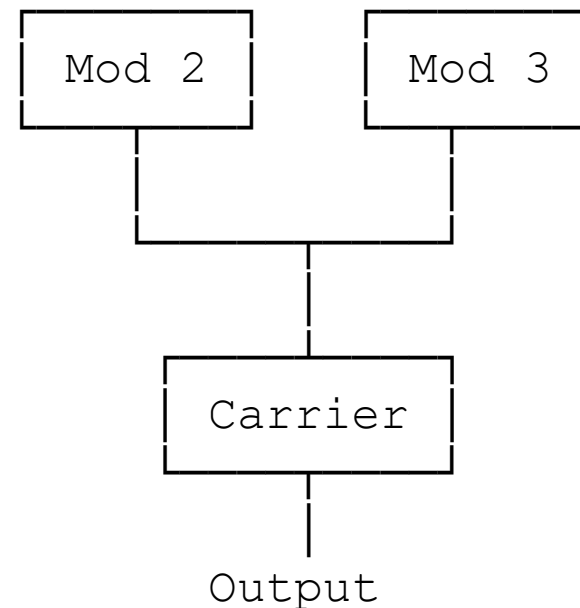


# FM – konfigurace oscilátorů (operátory)

- **Více modulátorů**

- **Spektrum:** Kombinace dvou nebo více modulačních frekvencí vytváří složité spektrální struktury, často s výraznými postranními pásmy kolem nosné frekvence.
- **Příklady:** Elektrické piano, kovové perkuse (např. zvony, gongy).

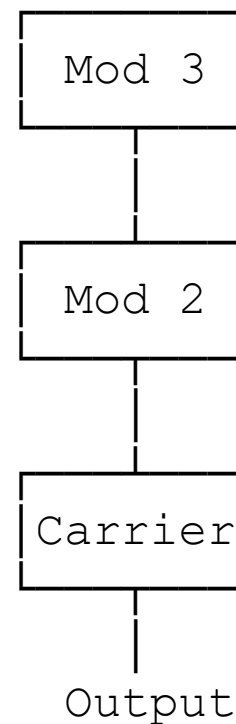
$$f(t) = \sin(\omega_1 t + I_2 \sin(\omega_2 t) + I_3 \sin(\omega_3 t))$$



## • Kaskádní konfigurace

- **Spektrum:** V kaskádních konfiguracích vznikají složitá spektra s vysokým podílem jemných harmonických složek, které dodávají zvuku hloubku a bohatost.
- **Příklady:** Hlasově znějící textury (např. syntetické sbory), zvuky strunných nástrojů, tóny připomínající flétnu.

$$f(t) = \sin(\omega_1 t + I_2 \sin(\omega_2 t + I_3 \sin(\omega_3 t)))$$

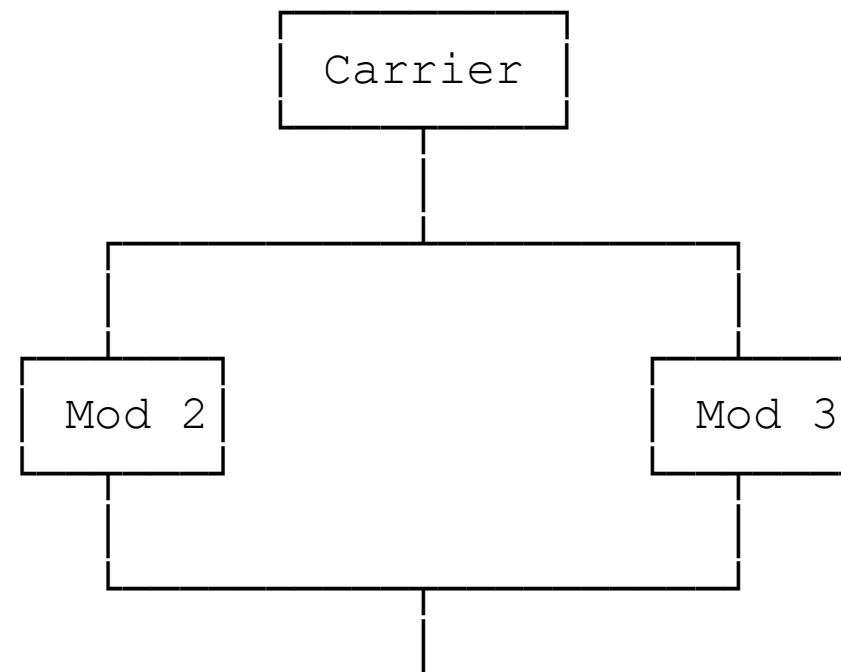


# FM – konfigurace oscilátorů (operátory)

## • Paralení konfigurace

- **Spektrum:** Každý modulátor přidává vlastní sadu harmonických složek, čímž vzniká bohaté spektrum s nezávislými vrstvami.
- **Příklady:** Vicehlasá syntéza, vrstvené syntetické textury, hybridní zvuky (např. kombinace charakteru hlasu a dechových nástrojů).

$$f(t) = \sin(\omega_1 t + I_2 \sin(\omega_2 t)) + \sin(\omega_1 t + I_3 \sin(\omega_3 t))$$

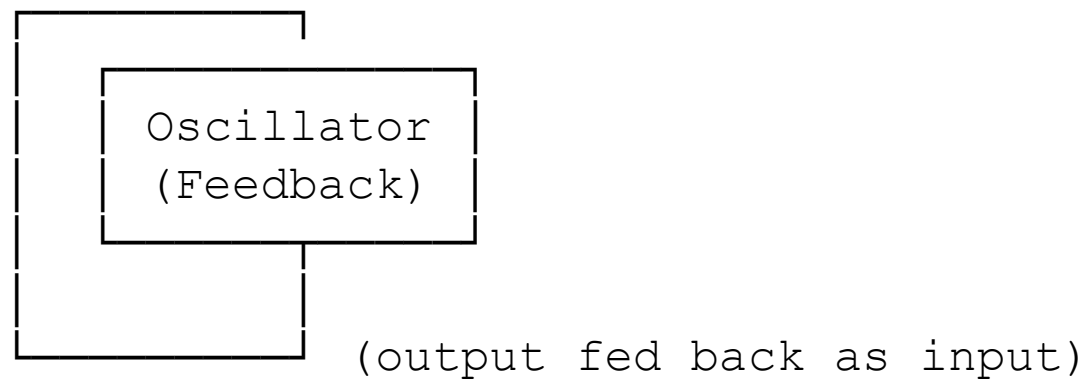


# FM – konfigurace oscilátorů (operátory)

- **Zpětnovazební konfigurace**

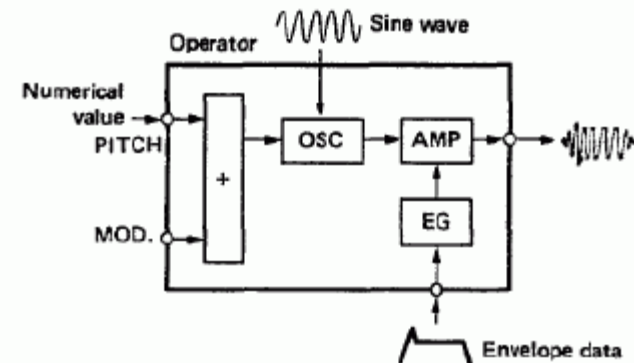
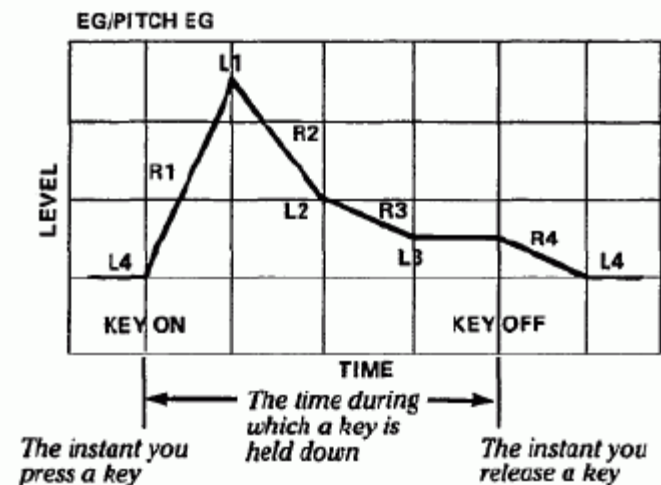
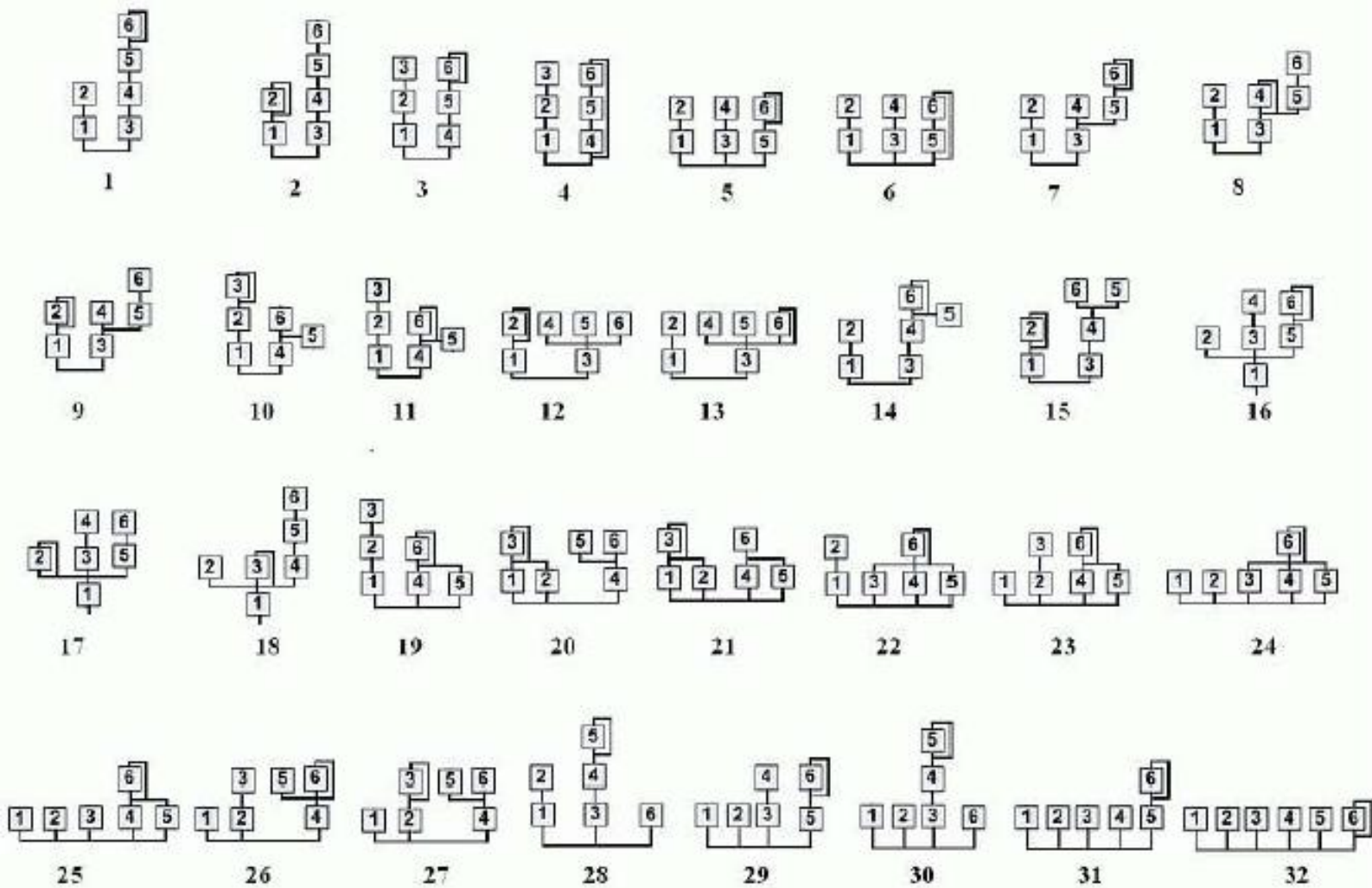
- **Spektrum:** Zpětná vazba vytváří více harmonických složek a přidává do signálu nepravidelnosti. S rostoucím indexem zpětné vazby se zvuk stává nelineárnějším a „divočejším“.
- **Příklady:** Trubka, drsné basové zvuky, ostře syntetické barvy.

$$f(t) = \sin(\omega_c t + I f(t))$$



# FM – konfigurace oscilátorů (operátory)

## • Yamaha DX7 –32 algoritmů



- **Algoritmy 1–8**

- Vhodné pro klávesové zvuky — elektrická piana, varhany, syntetické klavíry.
- Jednoduché paralelní nebo kaskádní struktury zajišťují jasný a čistý tón.

- **Algoritmy 9–16**

- Určeny pro basové zvuky.
- Sériové zapojení více operátorů vytváří hluboké, bohaté a dynamické basy.

- **Algoritmy 17–24**

- Používané pro metalické, zvonivé nebo experimentální barvy.
- Zpětná vazba a komplexní propojení operátorů vytvářejí složité spektrální struktury.

- **Algoritmy 25–32**

- Vhodné pro sólové nástroje a zvuky s vysokým stupněm modulace.
- Často využívány pro flétnové, píšťalové a syntetické zvuky s výraznou dynamikou.

- **Shrnutí FM syntézy**

- **Výhody**

- Umožňuje tvorbu unikátních zvuků s širokou paletou barev a textur.
- Úsporná na výpočetní výkon – vhodná pro reálný čas i starší hardware.
- Nabízí velkou rozmanitost – od realistických po zcela abstraktní zvuky.
- Dobře se kombinuje s jinými typy syntézy (additivní, subtraktivní, wavetable).

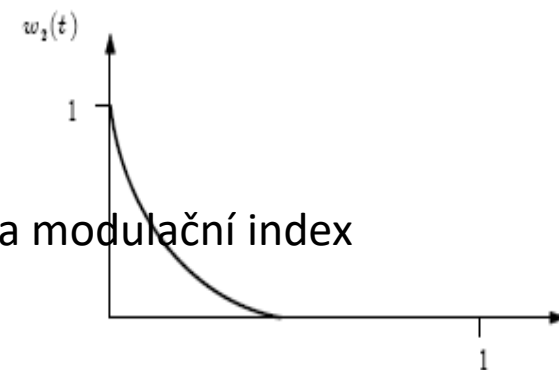
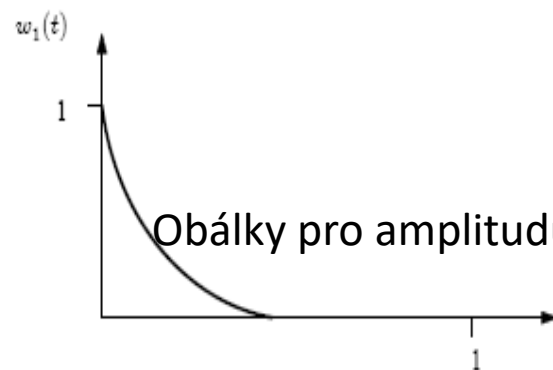
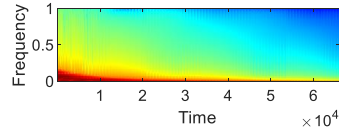
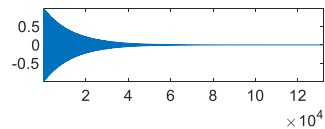
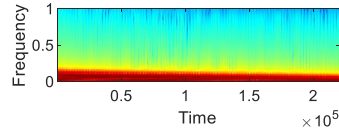
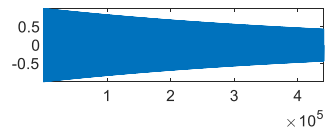
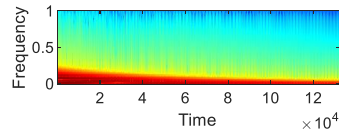
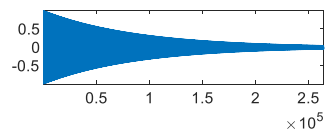
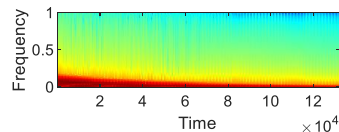
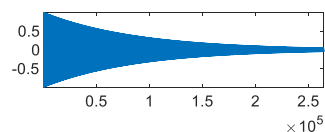
- **Nevýhody**

- Nelineární vztahy mezi parametry – obtížnější intuitivní ovládání.
- Výsledné zvuky mohou působit příliš synteticky nebo „kovově“.
- Při extrémních hodnotách parametrů vzniká náchylnost k aliasingu.
- Větší počet operátorů může ztížit zvukový design a ladění výsledku.

# Příklady audio FM

## • Jednoduché syntetické FM nástroje – perkusní zvuky

• ZVONY 1	tau (s)	$f_c$ (Hz)	$H = f_m/f_c$	$I_{\max}$	$I_{\min}$
	12	110	2	10	0
	2	110	2	10	0
	2	220	2	5	0
	0.3	110	2	10	0

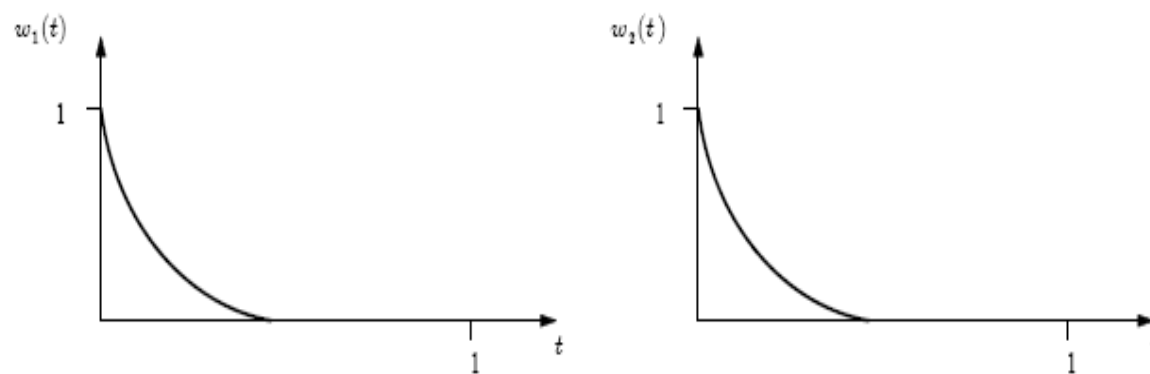
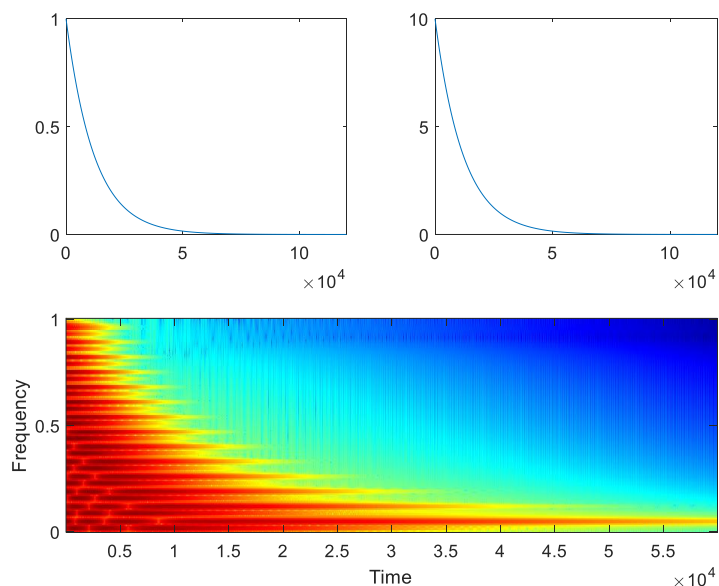


Obálky pro amplitudu a modulační index

# Příklady audio FM

- **Jednoduché syntetické FM nástroje – perkusní zvuky**

- **ZVONY 2** délka (ms)  $f_c$  (Hz)  $H = f_m/f_c$   $I_{\max}$   $I_{\min}$   
 15 200 1.4 10 0

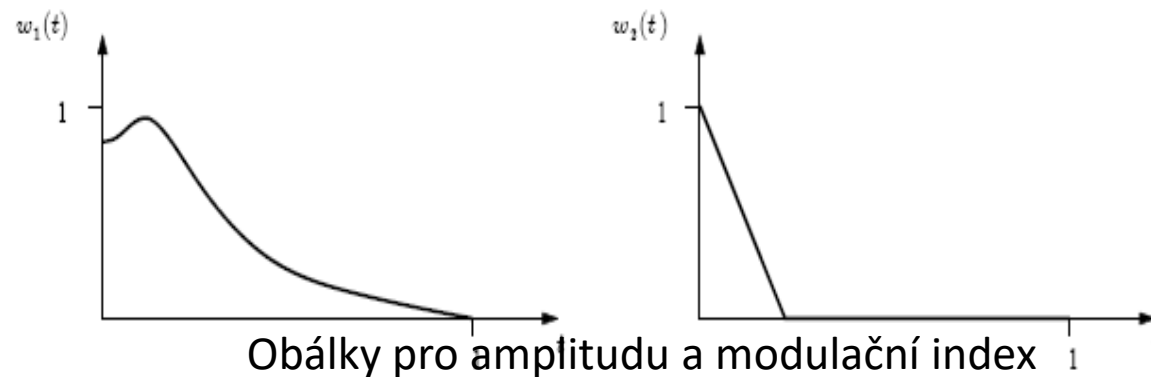
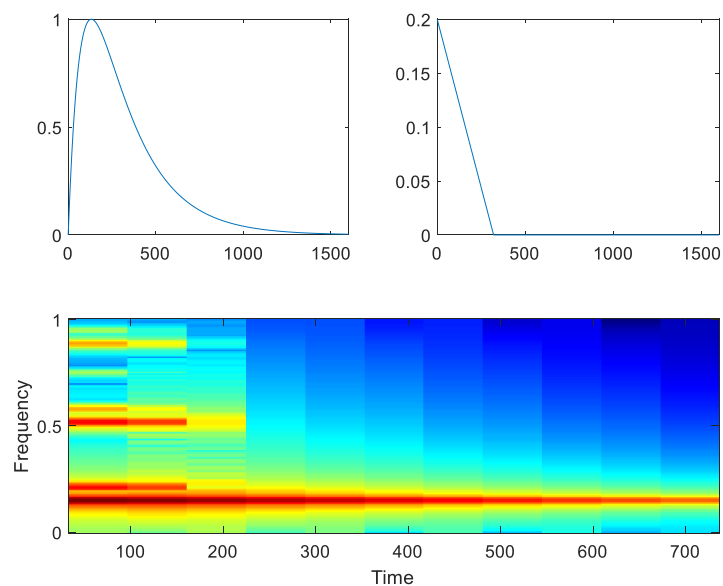


Obálky pro amplitudu a modulační index

# Příklady audio FM

- **Jednoduché syntetické FM nástroje – perkusní zvuky**

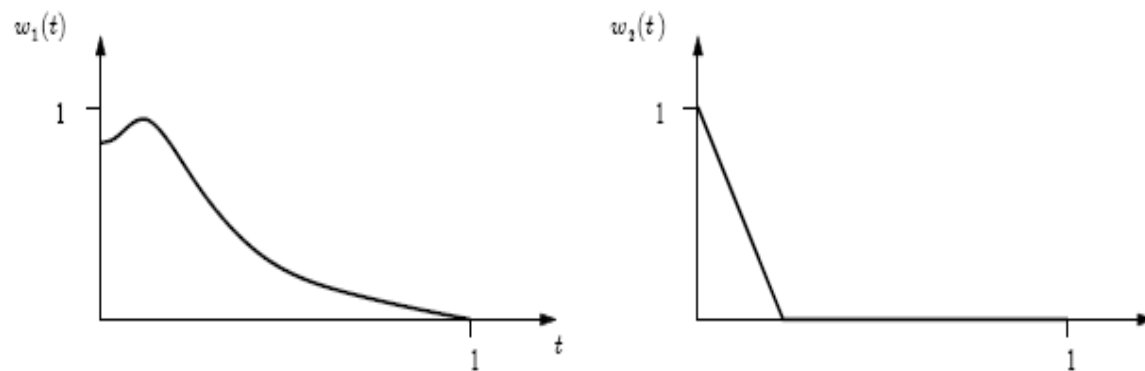
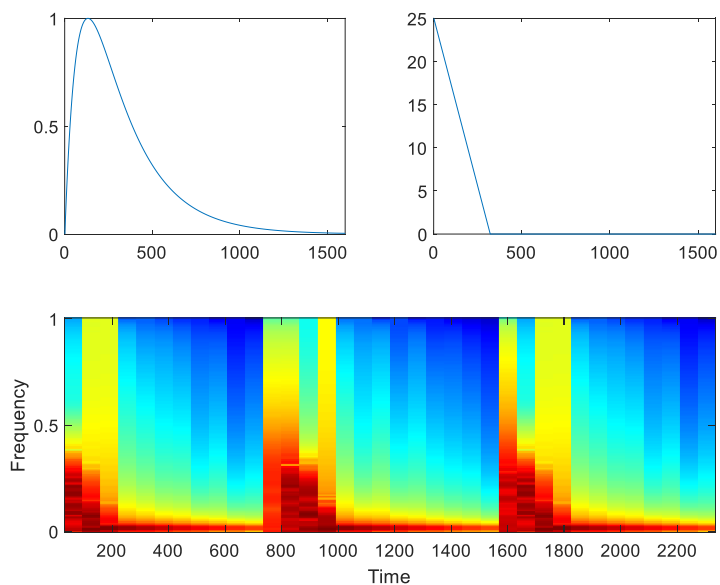
- **MARIMBA** délka (ms)  $f_c$  (Hz)  $H = f_m/f_c$   $I_{\max}$   $I_{\min}$   
0,2 610 2.4 0.2 0



# Příklady audio FM

- **Jednoduché syntetické FM nástroje – perkusní zvuky**

- **BICÍ** length (ms)     $f_c$  (Hz)     $H = f_m/f_c$      $I_{\max}$      $I_{\min}$
- dřevo            0.2            80            0.688            25            0



Obálky pro amplitudu a modulační index

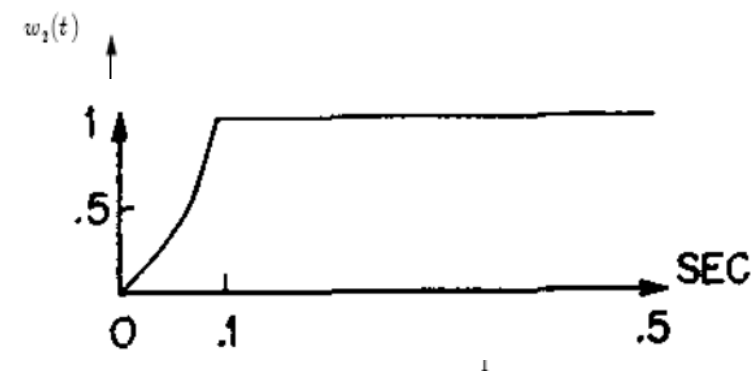
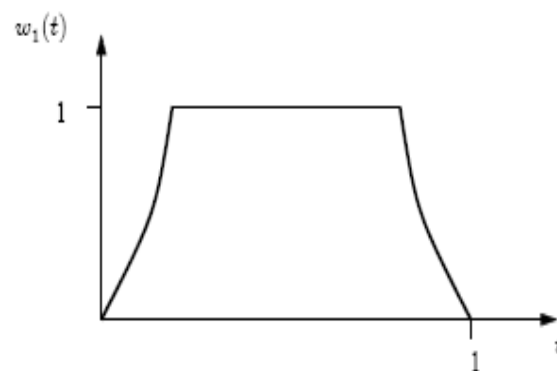
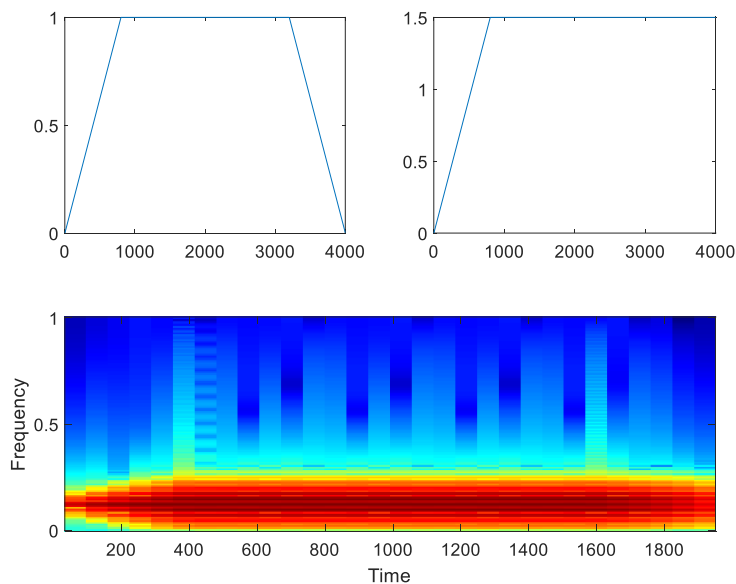


# Příklady audio FM

- **Jednoduché syntetické FM nástroje – dřevěné dechové**

- **FAGOT**

délka (ms)	$f_c$ (Hz)	$H = f_m/f_c$	$I_{max}$	$I_{min}$
0.5	400	0.2	1.5	0

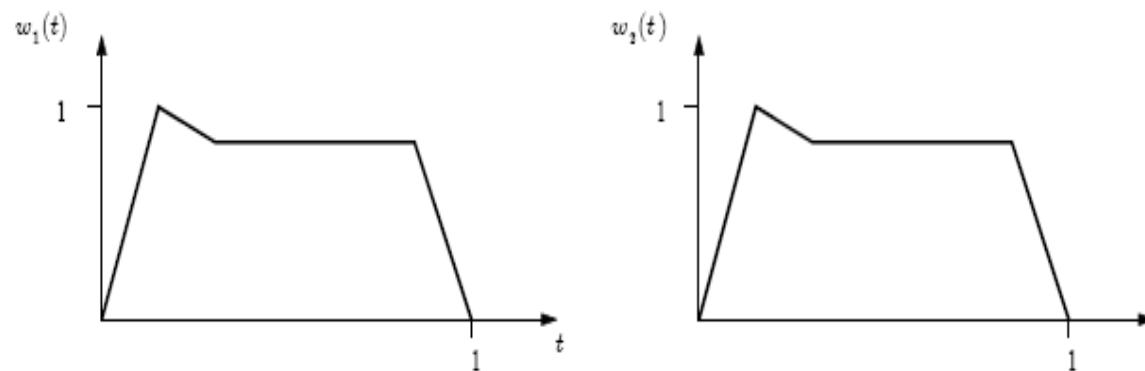
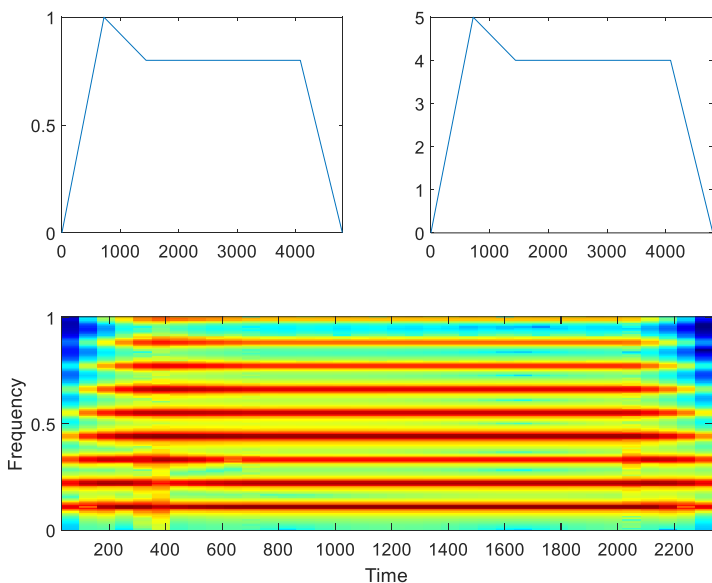


Obálky pro amplitudu a modulační index

# Příklady audio FM

- **Jednoduché syntetické FM nástroje – žestě**

- **ŽESTĚ**      délka (ms)       $f_c$  (Hz)       $H = f_m/f_c$        $I_{\max}$        $I_{\min}$
- 0.6                      440                      1.0                      5                      0



Decay envelope and modulation index envelope

# Příklady audio FM

- **Jednoduché syntetické FM nástroje – žestě a dvě nosné**

Více nosných

**$ff = 1500$  Hz**

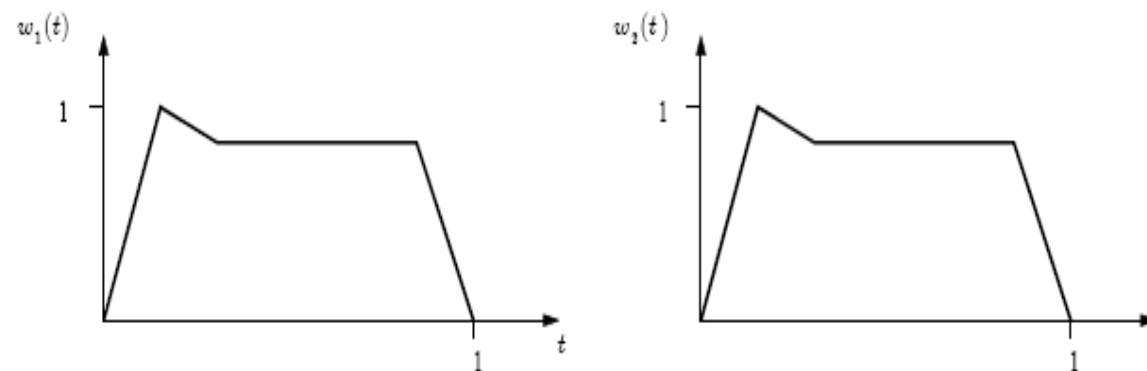
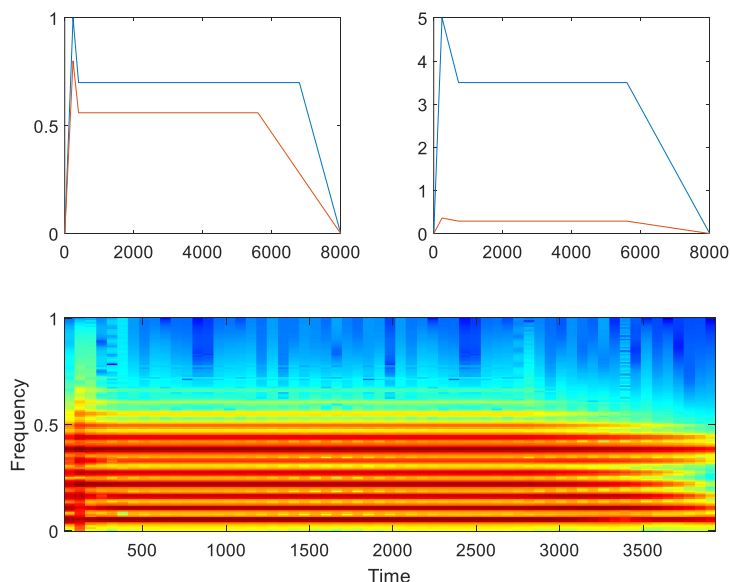
- **BRASS**

length (ms)  $f_c$  (Hz)  
0.6 440

$H = f_m/f_c$   
1.0

$I_{\max}$   
5

$I_{\min}$   
0

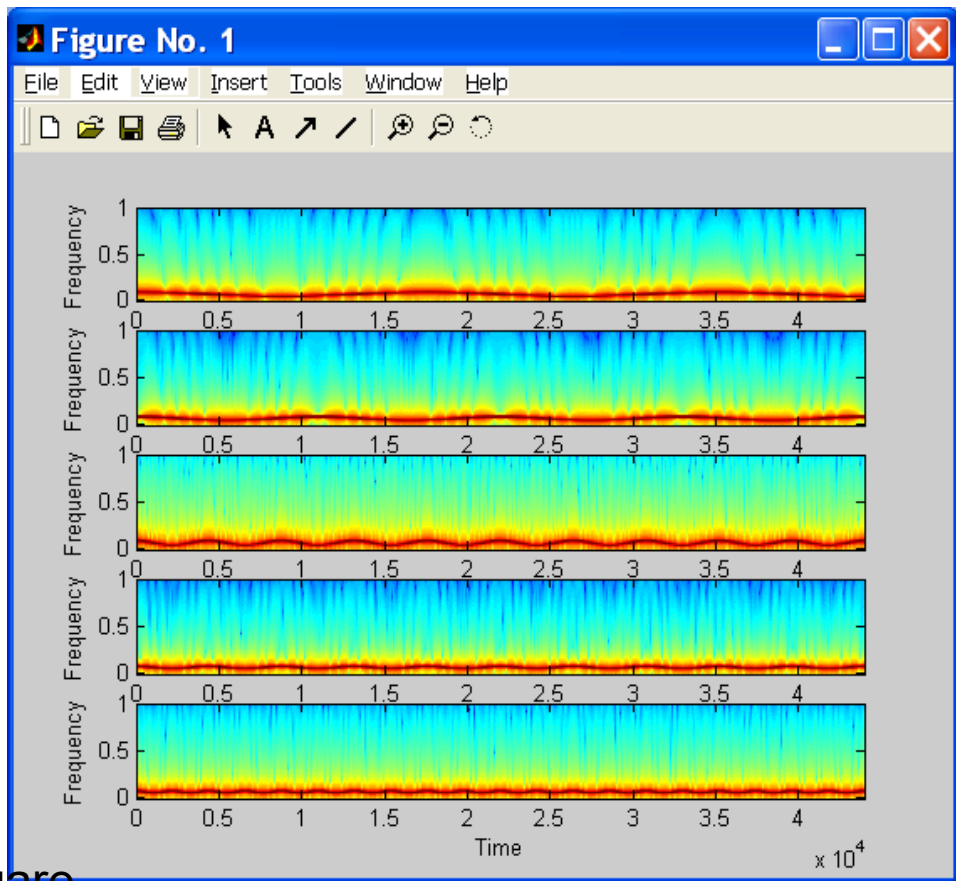


Decay envelope and modulation index envelope

# Příklady audio FM

- Alarmy

$$\Delta f = m_i \cdot f_m = 500 \text{ Hz}$$

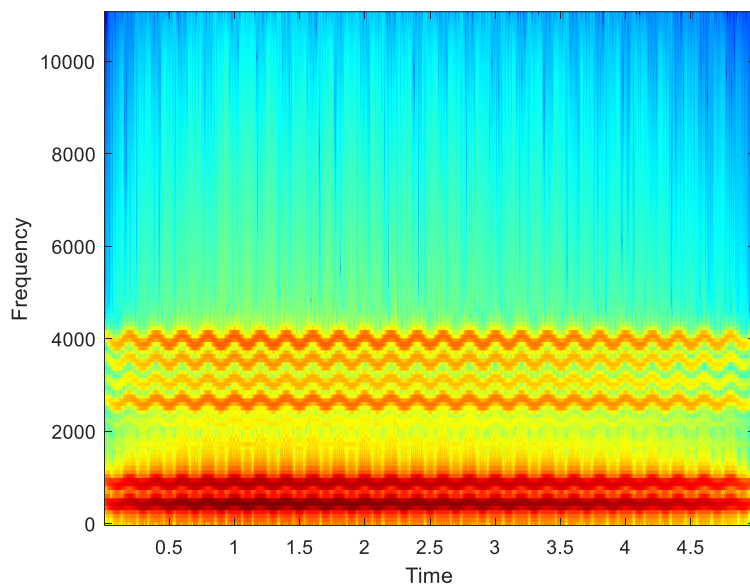


$m_i$	$f_c$	$f_m$
400	1500	1,25
250	1500	2
100	1500	5
50	1500	10
20	1500	25

square

sawtooth

- Vibráto



$$x(t) = O \cdot \sum_{n=1}^9 \alpha_n \sin(2\pi n f_c t + 7\sqrt{n} \cdot \sin(2\pi f_m t))$$

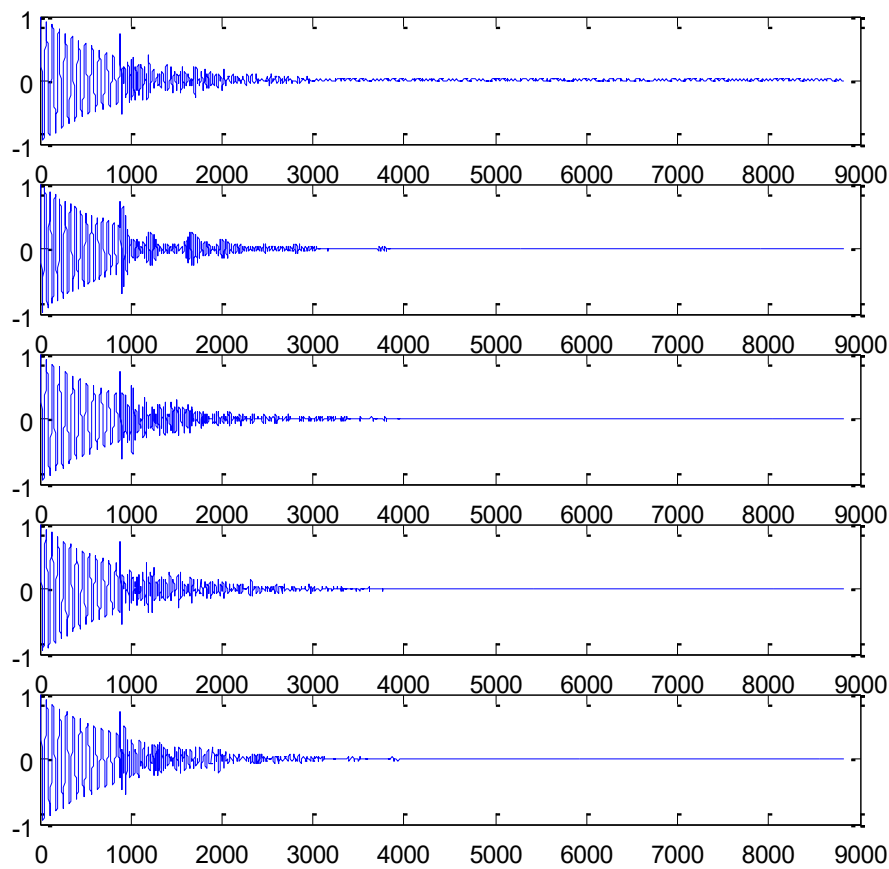
$$f_c = 440\text{Hz}, f_m = 5\text{Hz}$$

$$\alpha_n = 1000, 300, 0.01, 0.01, 0.01, 3, 0.5, 1, 4$$

$$O \dots X = [0.2 \ 8.951], Y = [0 \ 1 \ .3 \ 10]$$

# Příklady audio FM

- Vodní kapky



$$T_{envelope} = 20 \text{ ms}$$

$$m_i = 20$$

$$f_m = 7 \text{ Hz}$$

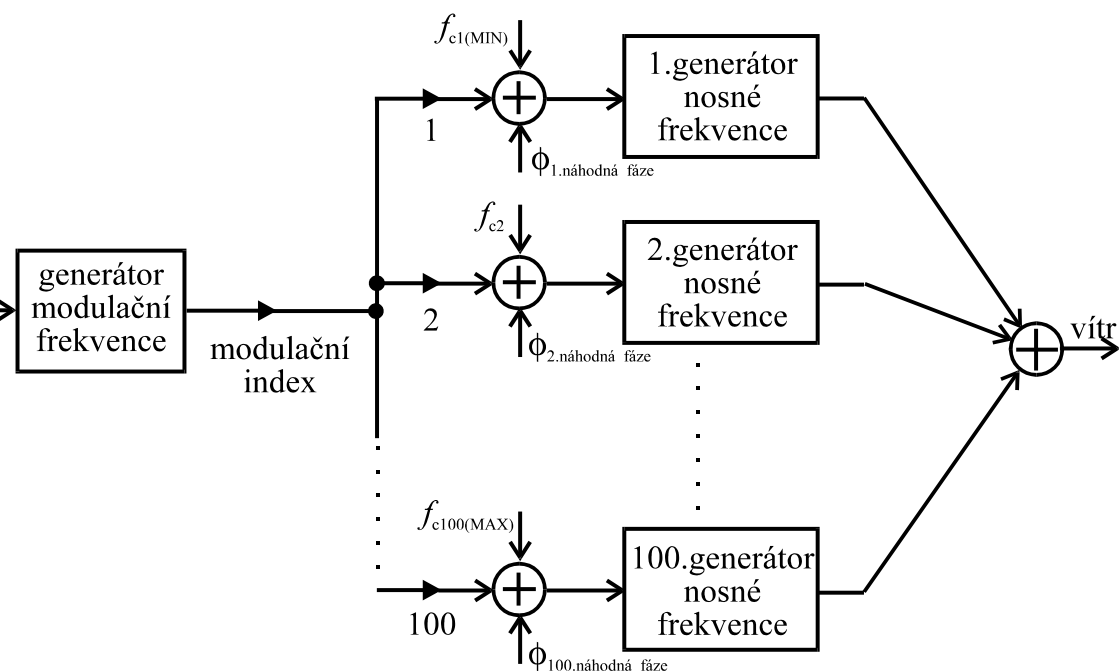
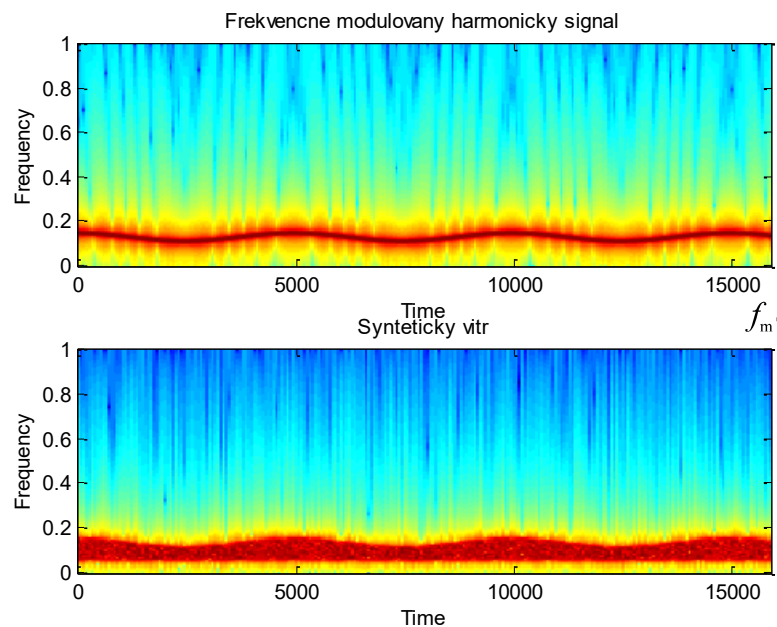
1. část 20 ms

$$f_c = 700 + 100 \text{randn}$$

2. část 180 ms

$$f_c = 1500 + 300 \text{randn}$$

## • Syntetický vítr



## Modulační syntéza

- Vytvořte dva odlišné a zajímavé zvuky pomocí modulační syntézy (AM nebo FM). Zvuky mohou být:
  - Hudební (např. zvon, klarinet, žestě, marimba)
  - Nehudební (např. vítr, kapky vody, siréna, alarm)
- Požadované součásti řešení:
  1. Kód: MATLAB skript použitý pro generování zvuku.
  2. Popis: Stručně popište typ zvuku a použité techniky syntézy.
  3. Parametry: Uveďte klíčové parametry (např. nosná a modulační frekvence, hloubka modulace, trvání).
  4. Zvukový soubor: Audio ve formátu .wav pro každý zvuk.
- Doporučené inspirace:
  - Vibrato a tremolo efekty
  - Zvuky bicích a perkusí
  - Zvuky prostředí (vítr, voda, sirény)
  - Hudební nástroje (klarinet, fagot, zvon, gong)
  - Experimentální syntetické zvuky