

Elektroniczne instrumenty muzyczne

**SYNTEZA METODĄ
MODULACJI
CZĘSTOTLIWOŚCI (FM)**

Wprowadzenie

Metoda modulacji częstotliwości
- ang. *Frequency modulation* (**FM**)

Wykorzystuje metodę stosowaną w telekomunikacji (transmisja sygnałów).

1973 – **John Chowning** publikuje pracę:

„The Synthesis of Complex Audio Spectra by Means of Frequency Modulation”

podstawy teoretyczne zastosowania metody FM w syntezie dźwięku. Patent w latach 1975-1995.

Wyniki tych prac zostały wykorzystane przez firmę Yamaha.



Wprowadzenie

Metoda FM była pierwszą komercyjnie wykorzystaną metodą syntezy dźwięku opartą wyłącznie na technice cyfrowej.

Wykorzystanie metody FM w syntezie dźwięku:

- lata 80. – syntezatory, gł. Yamaha (DX7)
- lata 90. – komputerowe karty dźwiękowe z układami Yamaha OPL2 (AdLib) i OPL3 (Creative SoundBlaster 2/Pro/16 oraz ich „klony”)
- synteza programowa – np. *Native Instruments FM7, FM8*

Modulacja częstotliwości

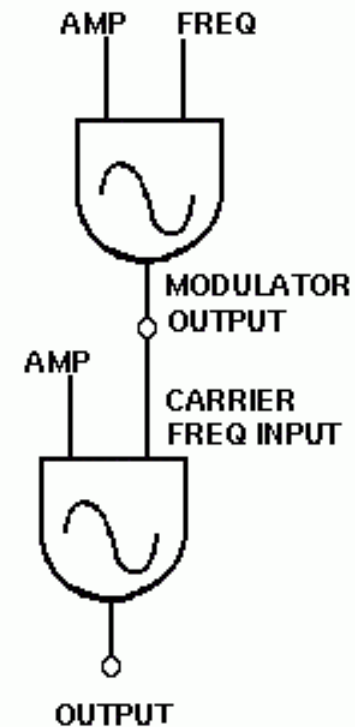
Modulacja częstotliwości – cykliczna zmiana częstotliwości sygnału **nośnej** (*carrier*) przez sygnał **modulujący** (*modulator*).

Częstotliwość modulująca < 20 Hz

- → efekt wibrato (płynna zmiana wysokości)

Częstotliwość modulująca > 20 Hz

- → modyfikacja widma sygnału
– pojawienie się nowych prążków w widmie



Synteza FM

Mamy dwa sygnały sinusoidalne:

- sygnał nośny (*carrier*)

$$x_c(t) = A \sin(\omega t)$$

- sygnał modulujący (*modulator*)

$$x_m(t) = I \sin(\beta t)$$

Używamy sygnału modulującego, aby zmieniać (modulować) częstotliwość sygnału nośnego:

$$x(t) = A \sin[\omega t + x_m(t)]$$

$$x(t) = A \sin[\omega t + I \sin(\beta t)]$$

Cyfrowa synteza FM

To samo zapiszemy w dziedzinie cyfrowej:

$$x(n) = A(n) \sin\{2\pi f_c nT + I(n) \sin(2\pi f_m nT)\}$$

f_c – częstotliwość sygnału nośnego

f_m – częstotliwość sygnału modulującego

$A(n)$ – amplituda zmodulowanego sygnału

T – okres próbkowania

$I(n)$ – indeks modulacji

Indeks modulacji

Indeks modulacji = amplituda modulatora

$$I = \frac{\Delta f}{f_m}$$

Δf – odchyłka częstotliwości

f_m – częstotliwość modulująca

Odchyłka częstotliwości (*frequency deviation*)
– zakres zmian częstotliwości zmodulowanego sygnału. Inaczej: głębokość modulacji.

Przykład: $f_c = 1000$ Hz, $f_m = 200$ Hz, $I = 2$

Częstotliwość będzie zmieniać się w zakresie $(f_c \pm I \cdot f_m)$, czyli od 600 do 1400 Hz.

Widmo w syntezie FM

Modulacja częstotliwości powoduje pojawienie się w widmie sygnału dodatkowych prążków.

Im **większy** jest indeks modulacji (a więc im większa głębokość modulacji), tym **więcej** prążków pojawi się w widmie.

Szerokość pasma sygnału syntetycznego (reguła Carsona):

$$BW = 2(\Delta f + f_m) = 2 f_m (I + 1)$$

Składowe widma syntetycznego

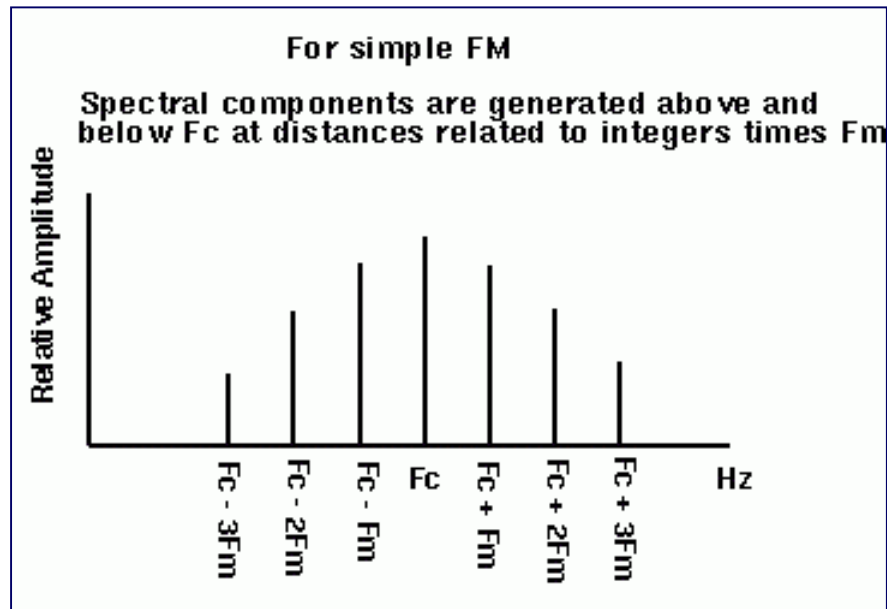
Położenie prążków w widmie dźwięku syntetycznego:

- częstotliwości składowych:

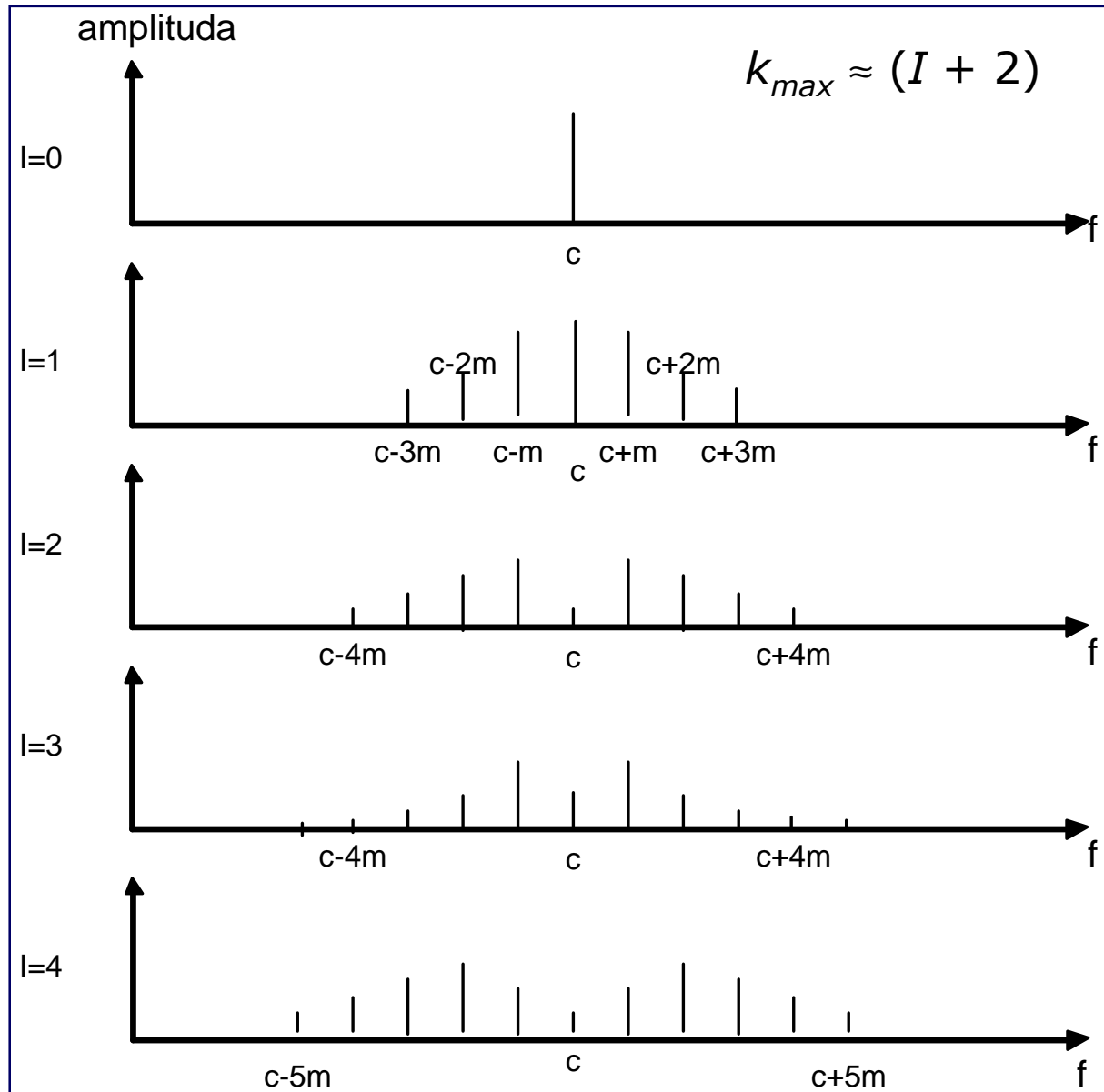
$$f_c \pm k f_m \quad (k = 0, 1, 2, \dots)$$

- liczba składowych widma (w przybliżeniu):

$$k_{max} \approx (I + 2) \quad (\text{gdy } I > 0)$$



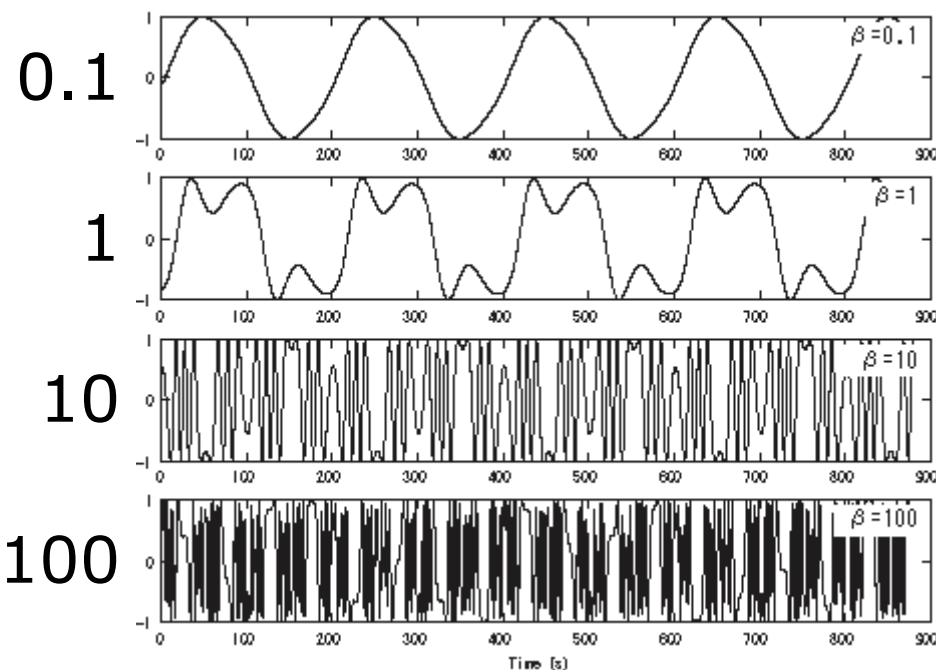
Wpływ indeksu modulacji na widmo



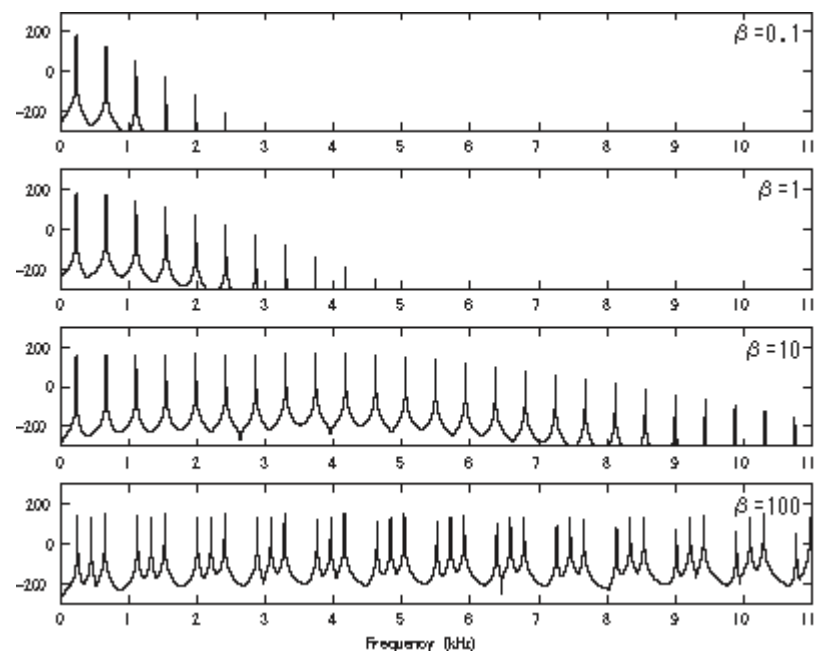
Przykłady sygnałów syntetycznych

Częstotliwość nośna 220 Hz, modulująca 440 Hz,
zmienny indeks modulacji (β)

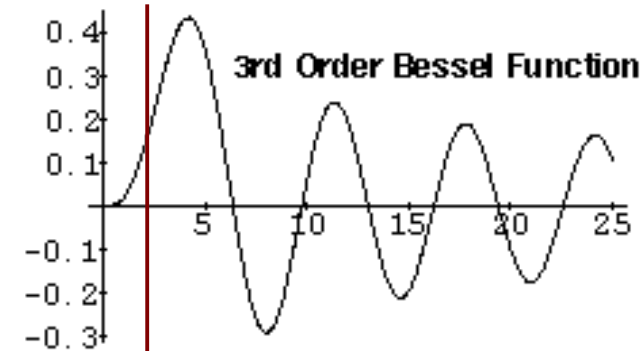
Postać czasowa



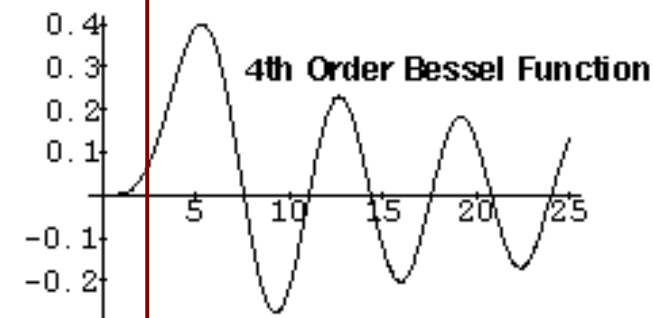
Widmo



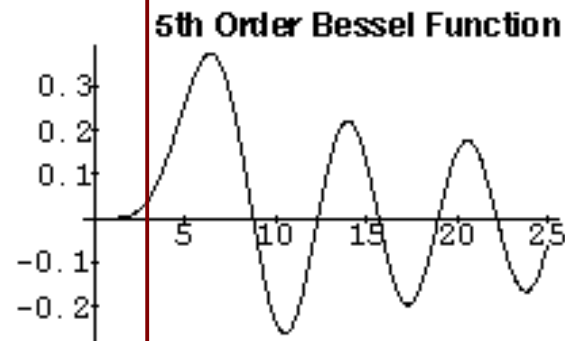
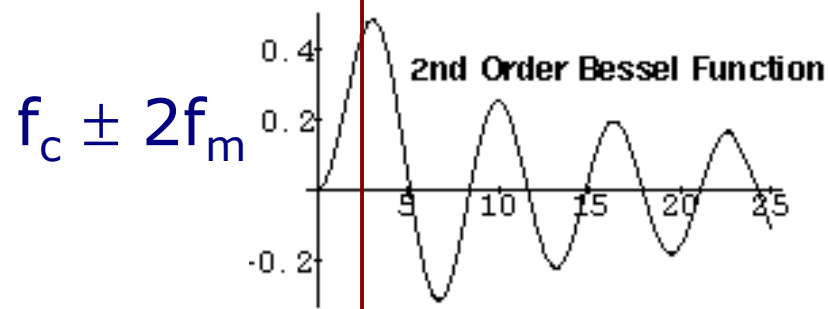
Funkcje Bessela pierwszego rodzaju (J)



$$f_c \pm 3f_m$$



$$f_c \pm 4f_m$$



$$f_c \pm 5f_m$$

Składowe w zakresie ujemnych cz.

W syntezie FM często zdarza się, że częstotliwość prążków wstęgi dolnej „schodzi” poniżej zera.

Np. dla $f_c = 400$ Hz i $f_m = 100$ Hz dostajemy:

$$f_c - 5f_m = -100 \text{ Hz}$$

Wiemy jednak, że $\sin(-x) = -\sin(x)$

Zatem:

- składowa „ujemna” zostaje przeniesiona na częstotliwość dodatnią (odbicie względem zera),
- następuje zmiana fazy – amplituda „odbitej” składowej zmienia znak.

W praktyce występuje *aliasing* widma.

Składowe w zakresie ujemnych cz.

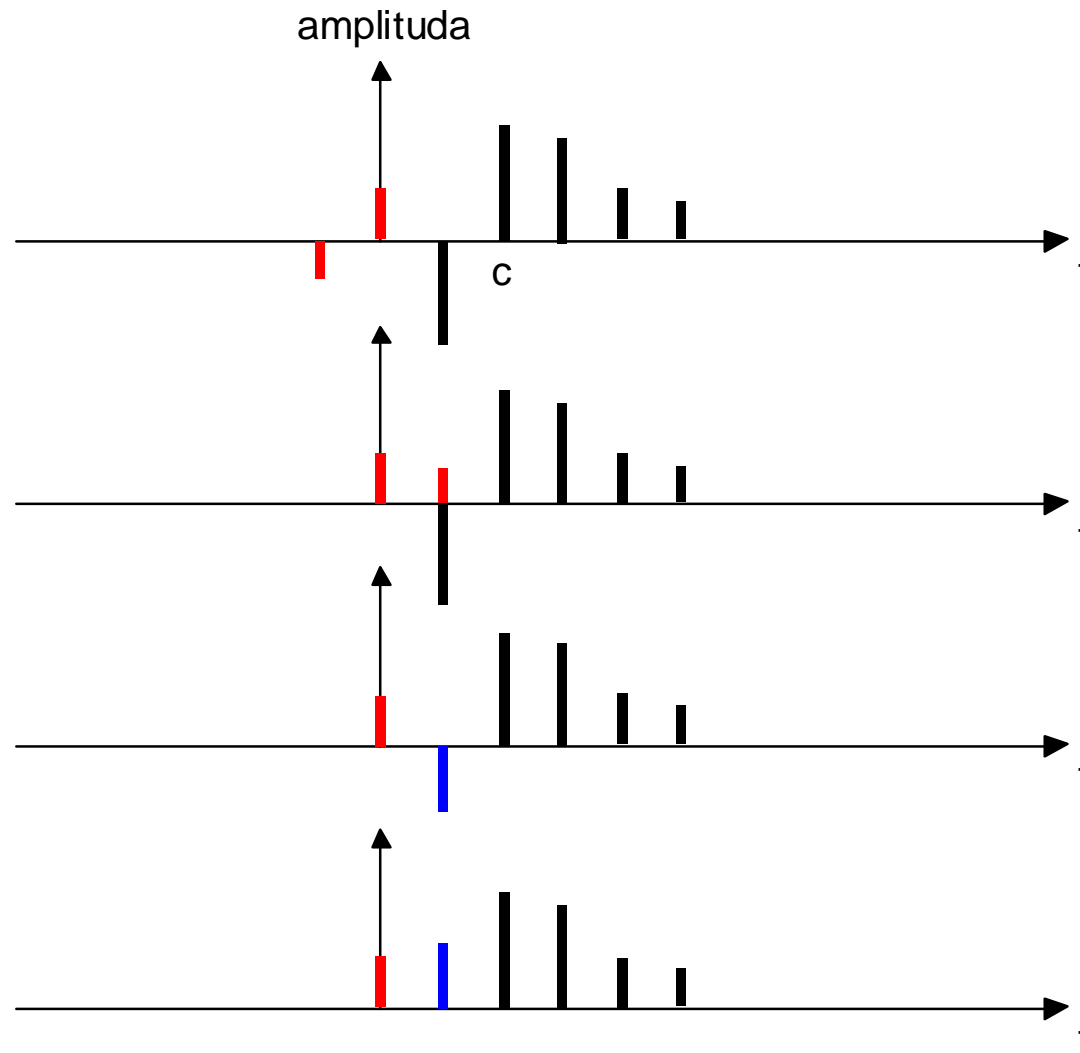
Po „odbiciu” składowej widma może się okazać, że na tej częstotliwości jest już prążek.

Wtedy sumujemy amplitudy obu prążków, np:

- dla $f_1 = -100$ Hz mamy $A_1 = 0,5$
- dla $f_2 = +100$ Hz mamy $A_2 = 0,2$
- odbijamy ze zmianą znaku i sumujemy:
 $A = (A_1 + A_2) = -0,5 + 0,2 = -0,3$
- interesuje nas wartość bezwzględna, a więc ostatecznie amplituda prążka dla $f = 100$ Hz wynosi $A = 0,3$.

W wyniku odbicia składowych widmo przestaje być symetryczne względem częstotliwości nośnej.

Składowe w zakresie ujemnych cz.



Obliczanie widma syntetycznego

Założenia: częstotliwość nośna f_c , modulująca f_m , indeks modulacji I .

Aby obliczyć widmo syntetyczne, należy:

- obliczyć liczbę istotnych składowych
 $f_{max} = -f_{min} = f_c + (I+2) f_m$
- obliczyć częstotliwości składowych ($f_c \pm k f_m$)
- obliczyć amplitudy składowych [$J_k(I)$]
- uwzględnić odbicie i sumowanie amplitud prążków widma
- obliczyć wartości bezwzględne amplitud prążków

Naśladowanie brzmień instrumentów

Znając parametry syntezy FM jesteśmy w stanie obliczyć widmo dźwięku syntetycznego.

Jeżeli natomiast chcielibyśmy obliczyć parametry syntezy, które pozwolą uzyskać pożądany kształt widma, to metoda FM **nie udostępnia** takiej możliwości.

Z tego względu naśladowanie brzmień rzeczywistych instrumentów jest możliwe tylko metodą prób i błędów, nie da się jednak uzyskać dokładnego dopasowania.

Współczynnik modulacji

Współczynnik modulacji w_m – stosunek częstotliwości modulującej do częstotliwości nośnej.

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

Jeżeli można znaleźć liczby naturalne N_2 i N_1 spełniające tą zależność, to prążki odbite pokryją się z prążkami o cz. dodatnich.

Widmo sygnału będzie **harmoniczne**.

Współczynnik modulacji

Jeżeli współczynnik modulacji nie jest liczbą wymierną, odbite prążki znajdują się pomiędzy prążkami o cz. dodatnich.

Widmo będzie wtedy **nieharmoniczne**.

Przykłady widm harmoniczných ($f_m/f_c = N_2/N_1$):

- $w_m = 1/1; 2/1; 3/1;$
- $N_2 = 1$: wszystkie prążki w widmie
- $N_2 = 2$: tylko prążki parzyste ($k = 0, 2, 4, \dots$)
- $N_2 = 3$: co trzecia harmoniczna zerowa

Przykłady widm nieharmonicznych:

- $w_m = 1.3333\dots/1; \pi/\sqrt{3}$

Współczynnik modulacji

Przypadek praktyczny - synteza dźwięków muzycznych:

$$W_m = 1, 2, 3, \dots$$

$$\text{czyli } f_m = k \cdot f_c, k = 1, 2, 3, \dots$$

Otrzymujemy:

- widmo harmoniczne,
- częstotliwość podstawowa = f_c

Parametry syntezy FM

Podsumujmy:

- **częstotliwości** fali nośnej (f_m) i modulującej (f_m) decydują o położeniu prążków w widmie syntetycznym,
- **indeks modulacji** (I) decyduje o amplitudach prążków (pośrednio o liczbie znaczących prążków w widmie),
- **współczynnik modulacji** (w_m) decyduje o tym, czy widmo jest harmoniczne czy nieharmoniczne

Widmo dynamiczne

Widmo syntetyczne uzyskane w opisany sposób jest statyczne (niezmienne w czasie).

Aby uzyskać widmo **dynamiczne**, zmienne w czasie (co daje bardziej realistyczne brzmienie dźwięku), można zastosować **zmienny w czasie indeks modulacji**.

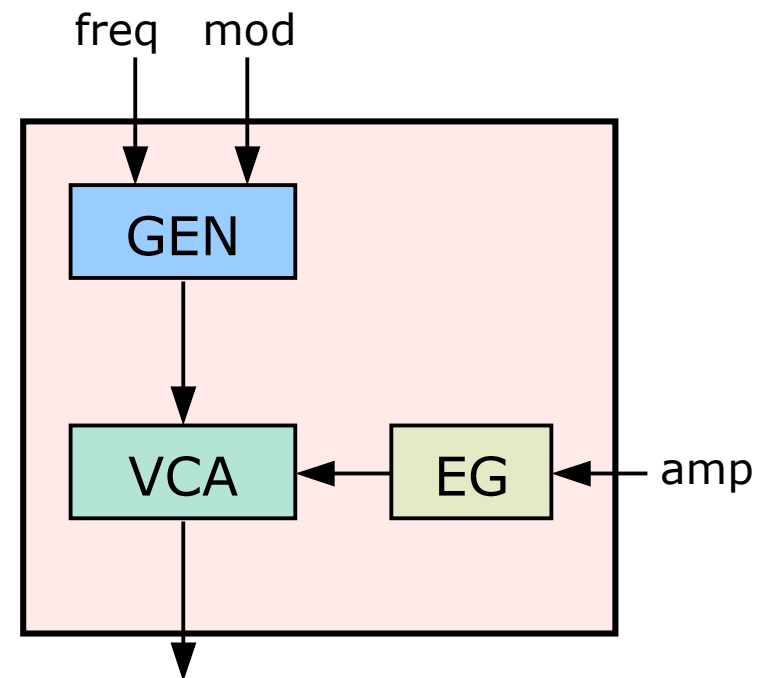
W syntezatorach FM wartość indeksu modulacji może być modyfikowana za pomocą generatora obwiedni, dzięki czemu uzyskuje się zmiany struktury widma w trakcie trwania dźwięku.

Operator

Operator jest podstawowym blokiem układu syntezy FM.

Składa się on z:

- generatora sygnału sinusoidalnego
- wzmacniacza VCA
- generatora obwiedni (*pitch EG*)

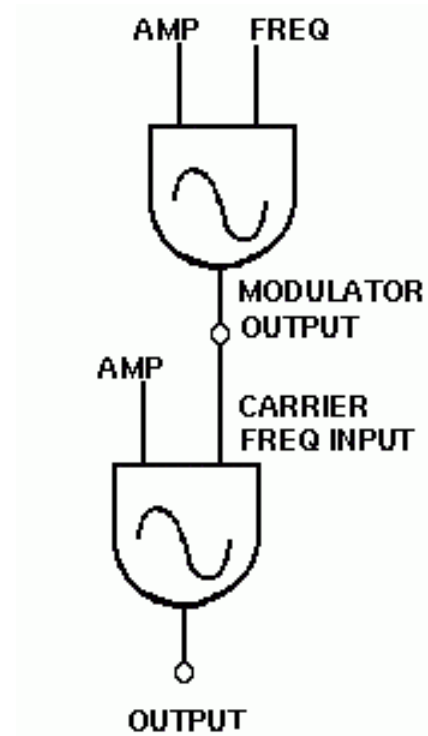


Algorytm

Połączenie kilku operatorów tworzy **algorytm** syntezy FM.

Do tej pory rozpatrywaliśmy najprostszymi możliwy algorytm FM (*Simple FM*), złożony z dwóch operatorów:

- modulatora,
- generatora nośnej.



Algorytmy wielooperatorowe

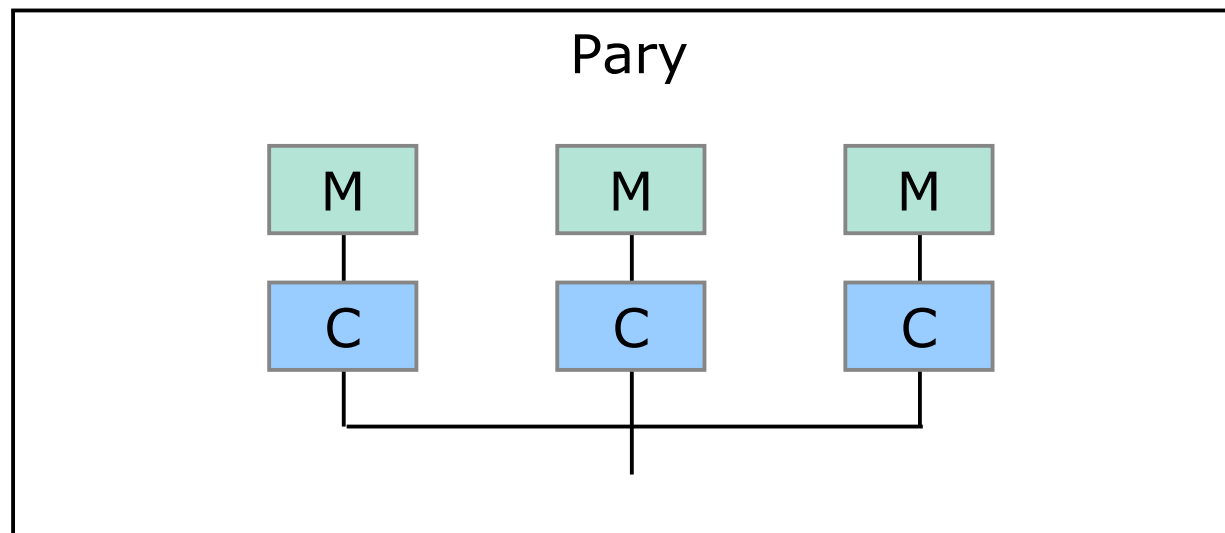
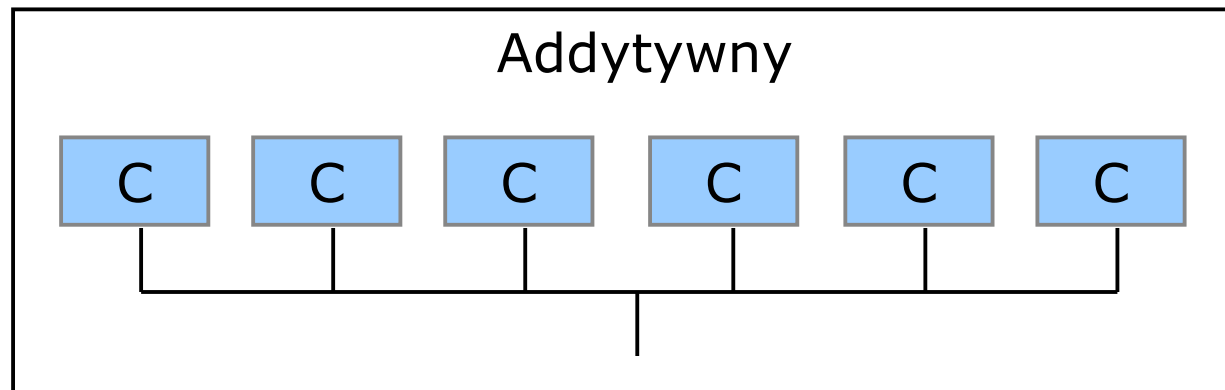
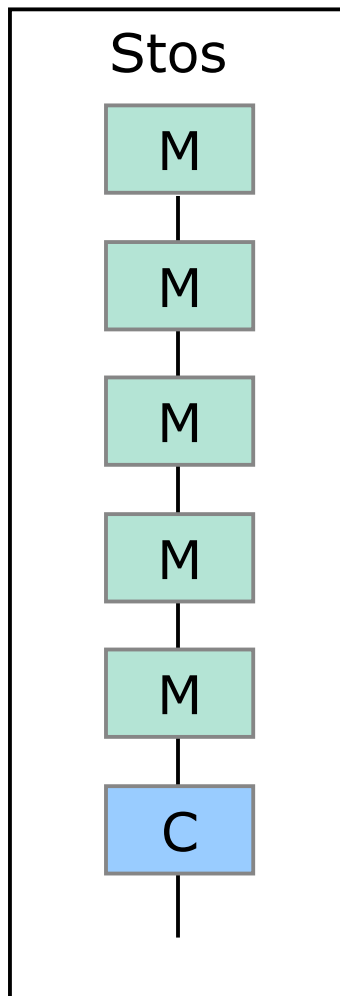
Zbudowanie algorytmu FM z więcej niż dwóch operatorów pozwala znacznie zwiększyć możliwości syntezy. Możemy np. uzyskać wielokrotną modulację częstotliwości.

W komercyjnych instrumentach stosowano zwykle 6 operatorów. Można je łączyć na wiele różnych sposobów, tworząc rozmaite algorytmy.

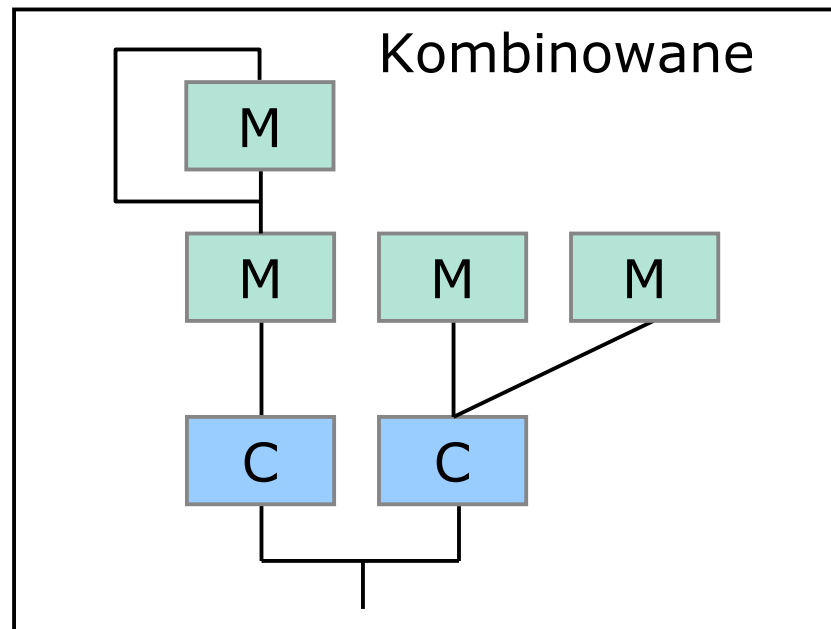
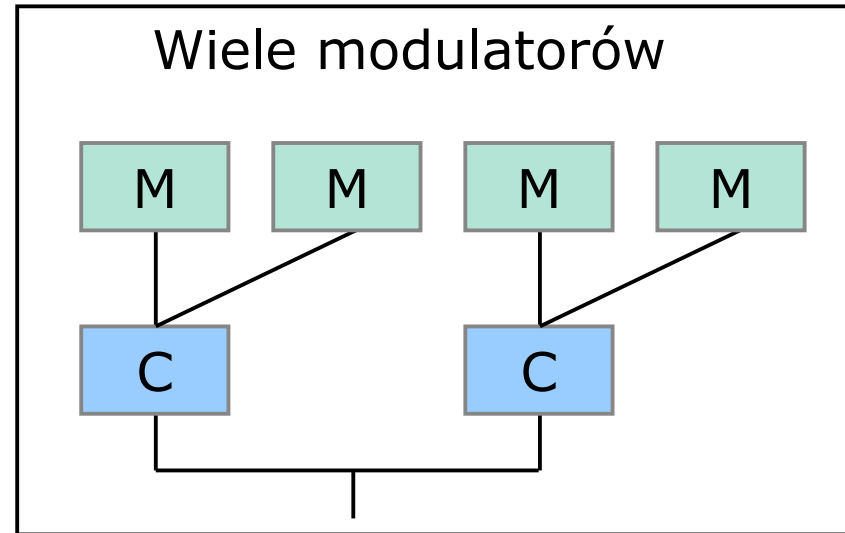
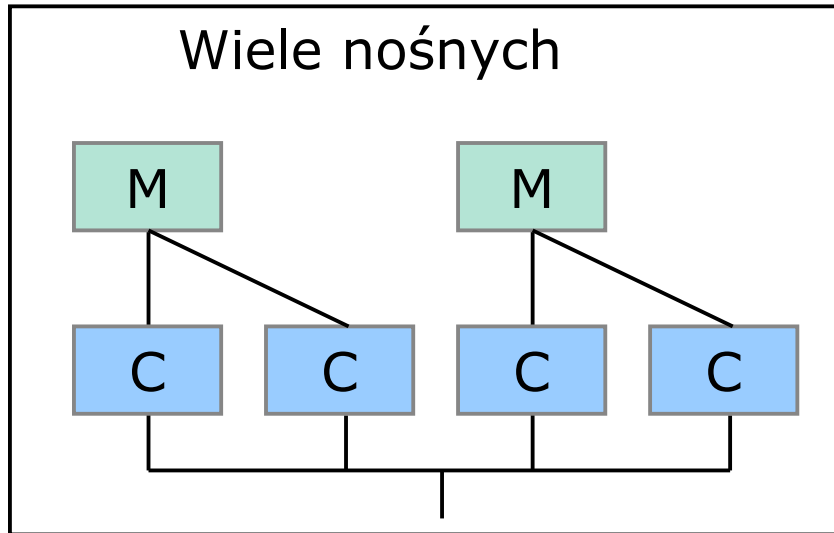
Komercyjne instrumenty FM dostarczały zwykle predefiniowany zestaw algorytmów. Użytkownik mógł jednak zmieniać parametry operatorów (niektóre mogły być wyłączane).

Przykłady algorytmów dla 6 operatorów

M – modulator, C – generator nośnej

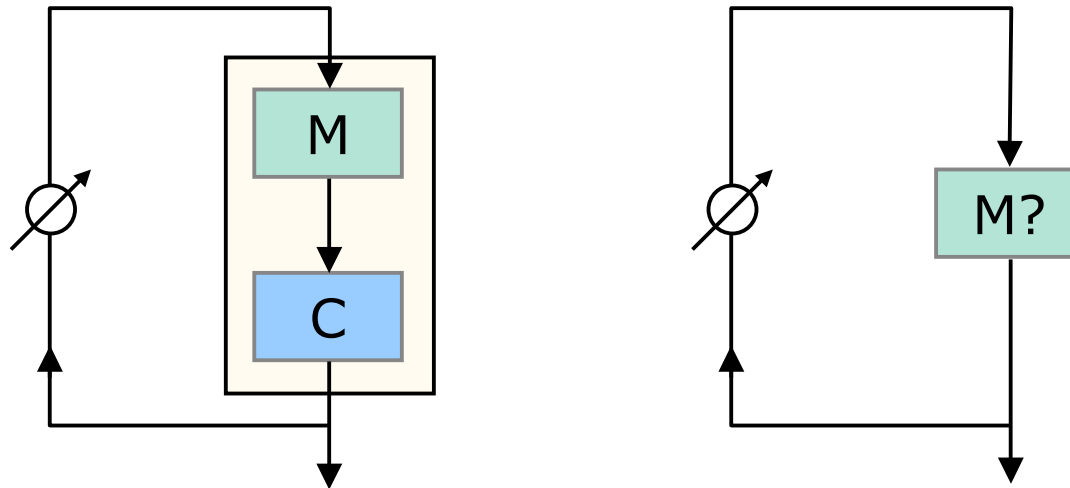


Przykłady algorytmów - cd.



Sprężenie zwrotne

Wprowadzenie w algorytmie FM pętli sprzężenia zwrotnego o regulowanym wzmacnieniu umożliwia tworzenie interesujących brzmień, głównie o charakterze szumowym.



Budowa syntezy FM

- Generatory sygnału – początkowo wyłącznie sygnał sinusoidalny, w późniejszym okresie również „zniekształcone sinusy”;
generator cyfrowy – próbki zapisane w pamięci (1/4 okresu).
- Generatory obwiedni – wiele odcinków liniowych o regulowanym czasie trwania i poziomie, sterowanie indeksem modulacji oraz wzmocnieniem końcowym
- LFO i inne modulatory – sterowanie częstotliwością i wzmocnieniem operatorów
- Wzmacniacze

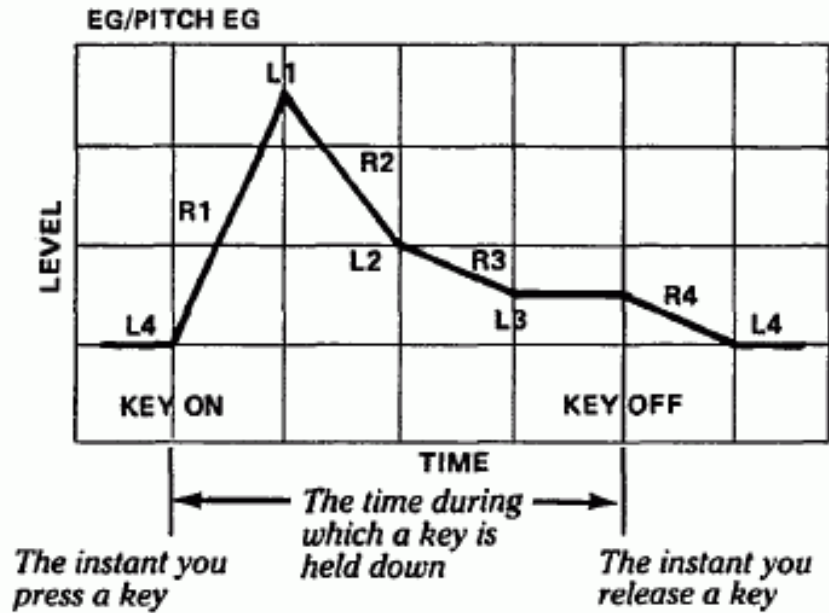
Yamaha DX7

Przykład implementacji metody – Yamaha DX7 (najpopularniejszy instrument FM) – 1983 r.

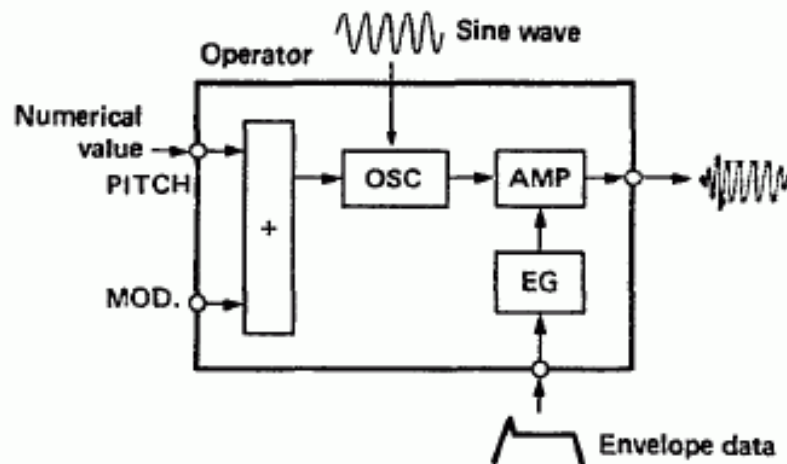
- 6 operatorów
- 32 algorytmy
- generowany sygnał sinusoidalny
- możliwość regulacji współczynnika i indeksu modulacji oraz stopnia sprzężenia (0 – 7)
- obwiednia – 4 odcinki, regulowany czas trwania i poziom
- pamięć wewnętrzna (32 głosy) i zewnętrzna (karty RAM)



Yamaha DX7

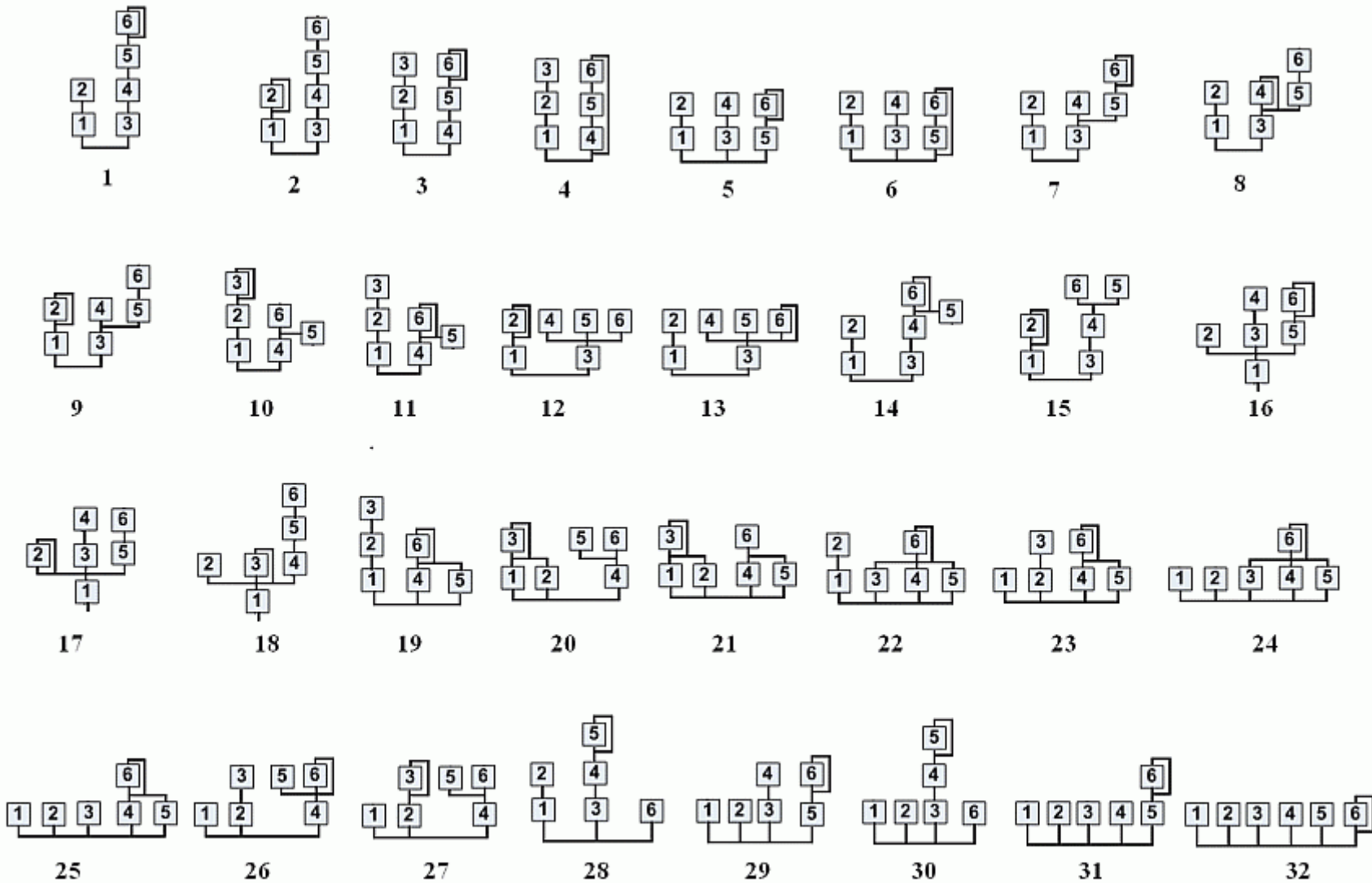


Obwiednia



Operator

Yamaha DX7 - wszystkie 32 algorytmy

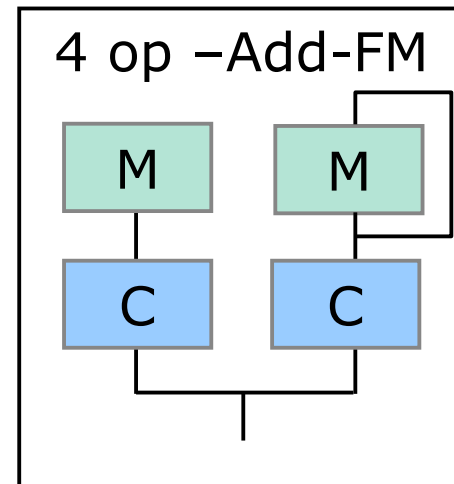
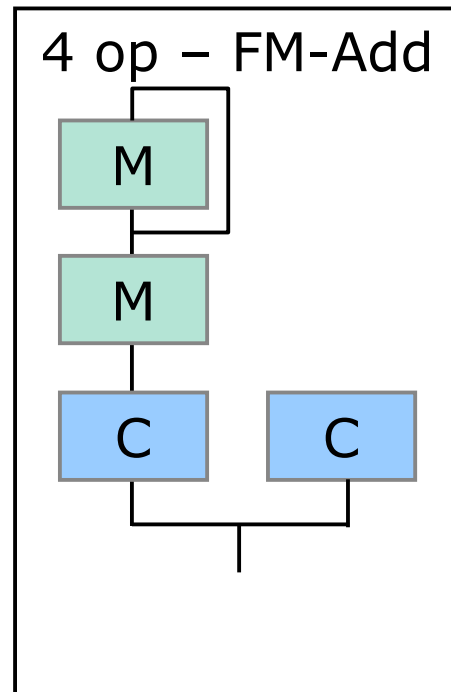
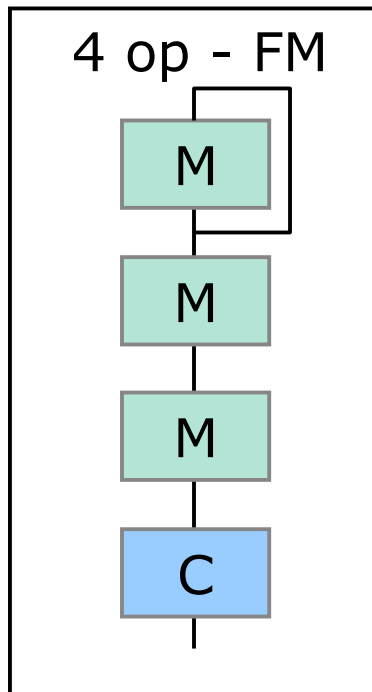
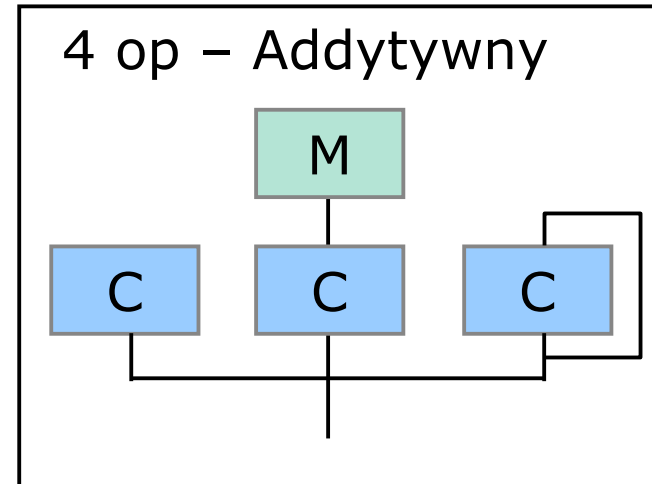
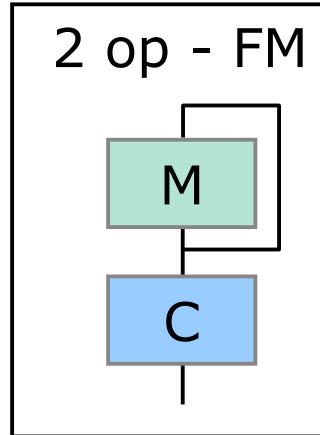
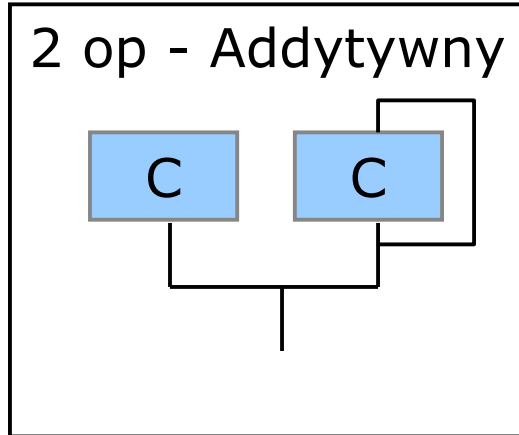


Yamaha OPL3

Układ OPL3 firmy Yamaha przeznaczony był do kart dźwiękowych PC. Stosowano go w kartach *Creative Labs SoundBlaster 2/Pro/16* oraz pochodnych.

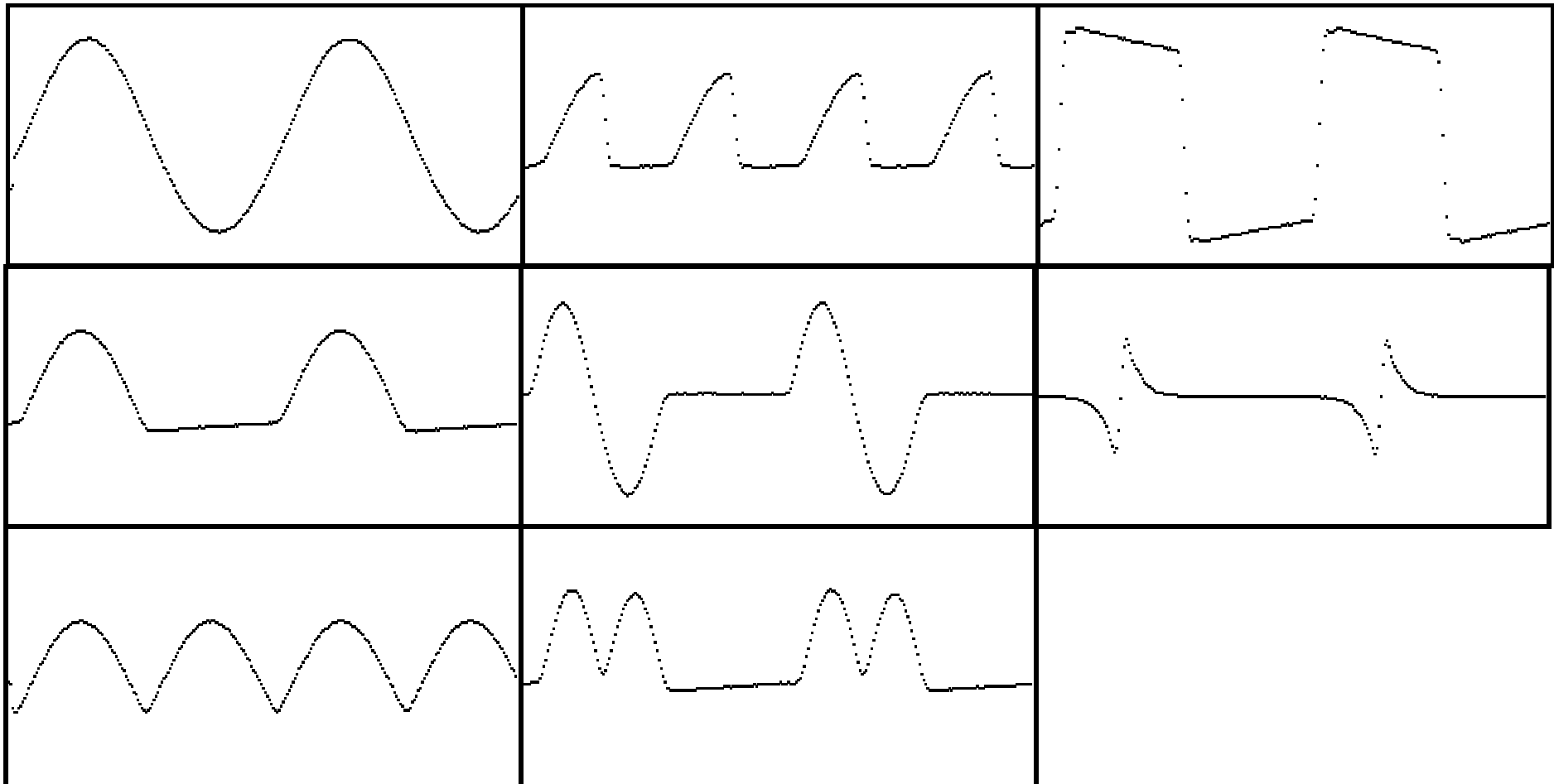
- 36 operatorów dla wszystkich kanałów
- 2 algorytmy 2-op, 4 algorytmy 4-op
- maks. 18 kanałów melodycznych i 5 perkusyjnych
- kanały melodyczne: 2-operatorowe oraz maksymalnie 6 kanałów 4-operatorowych
- kanały perkusyjne 1-2 operatorowe
- dźwięk stereo bez możliwości regulacji panoramy

Yamaha OPL3 - algorytmy



Yamaha OPL3 - sygnały

Sygnały możliwe do uzyskania z generatorów:



Instrumenty programowe FM

Udoskonalenia:

- dowolne łączenie operatorów w algorytmy
- większa liczba operatorów
- większa liczba sygnałów źródłowych, różne sygnały dla różnych operatorów
- dodatkowe moduły (efekty, modulatory)

Zalety metody FM

- mała złożoność obliczeniowa (łatwa implementacja)
- mniejszy koszt (prostsza budowa) w porównaniu z metodami analogowymi
- łatwość obsługi (mała liczba parametrów)
- stabilność pracy
- przenośność (wykorzystanie na scenie)
- ciekawe, nowatorskie brzmienia (z punktu widzenia muzyka we wczesnych latach 80.)
- technika cyfrowa – możliwość zastosowania pamięci dla ustawień

Wady metody FM

- Nie można w pełni kontrolować widma sygnału.
- Trudność uzyskiwania brzmień naturalnych instrumentów – nie można wyznaczyć parametrów syntezy FM, które spowodują powstanie dźwięku o określonym brzmieniu, „instrumenty” brzmią nienaturalnie. Z tego powodu FM w kartach dźwiękowych została później wyparta przez metody samplingowe.

Literatura

- J. Chowning: The Synthesis of Complex Audio Spectra by Means of Frequency Modulation. Journal of Audio Engineering Society, Vol. 21, No. 7, pp. 526-534.
- Yamaha DX7 - instrukcja obsługi i inne:
<http://www.maths.abdn.ac.uk/~bensondj/html/dx7.html>
- NI FM8 – wirtualny syntezytor FM:
<http://www.native-instruments.com/index.php?id=fm8>
- WaveFM – prosty syntezytor FM (j. francuski):
<http://hrsoft.free.fr/WaveFM/index.htm>
- Vintage Synthe Explorer: www.vintagesynth.com
- Wikipedia (wersja angielska)