

SYNTEZA METODĄ MODULACJI CZĘSTOTLIWOŚCI (FM)

oraz metody kształtowania fali

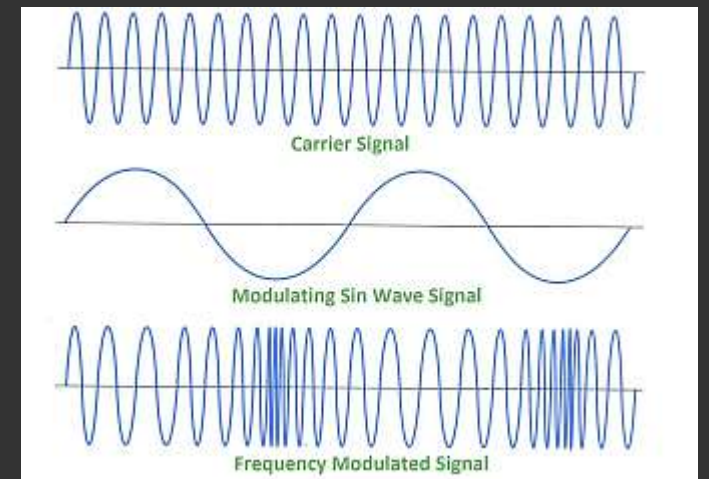


Wprowadzenie

- Na początku lat 80. dominowały analogowe syntezatory oparte na syntezie subtraktywnej. Wczesne cyfrowe instrumenty były bardzo drogie.
- Koszt syntezatorów był wysoki, nie każdy muzyk mógł sobie na nie pozwolić. Skomplikowana budowa analogowego instrumentu.
- Firma **Yamaha** zamierzała wypuścić na rynek elektroniczny instrument muzyczny, który byłby stosunkowo tani i prosty w obsłudze.
- Zdecydowano się na **cyfrowy** syntezator, ale bez konieczności korzystania z kosztownej pamięci RAM. Potrzebna była nowa metoda syntezy.
- Wykorzystano metodę **modulacji częstotliwości (FM)**.
- Yamaha skonstruowała szereg instrumentów, z których zdecydowanie największy sukces odniósł syntezator **DX7**.

Modulacja częstotliwości

- Modulacja częstotliwości (*frequency modulation*, FM) jest stosowana od początku 20. wieku do transmisji fal radiowych.
- Sygnał użyteczny – o ograniczonym paśmie, np. mowa i muzyka.
- Sygnał **nośny** (ang. *carrier*) – sinus o wysokiej częstotliwości (np. 100 MHz),
- **Częstotliwość** sygnału nośnego jest **modulowana** przez **amplitudę** sygnału użytecznego (modulującego).
- Przesyłamy zmodulowany sygnał szerokopasmowy.
- Po odebraniu: demodulacja, powrót do początkowego sygnału użytecznego.



Zastosowanie FM do syntezy dźwięku

- **John Chowning** z Uniwersytetu Stanford (USA) odkrył, że jeżeli oba sygnały – modulujący i nośny – mają częstotliwość w zakresie audio, to przy spełnieniu pewnych warunków możemy uzyskać dźwięk muzyczny.
- Wyniki prac opublikował w 1973 r. w *Computer Music Journal* w artykule pt.: „*The Synthesis of Complex Audio Spectra by Means of Frequency Modulation*”.
- Prosta i tania metoda **cyfrowej syntezy dźwięku**.
- Patent w latach 1975-1995 (20 milionów \$ zysku dla Stanford University).
- Wykorzystany przez firmę Yamaha – wyłączność na stosowanie metody FM w komercyjnych instrumentach muzycznych.



Modulacja częstotliwości

Mamy dwa sygnały sinus:

- sygnał nośny (*carrier*)

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

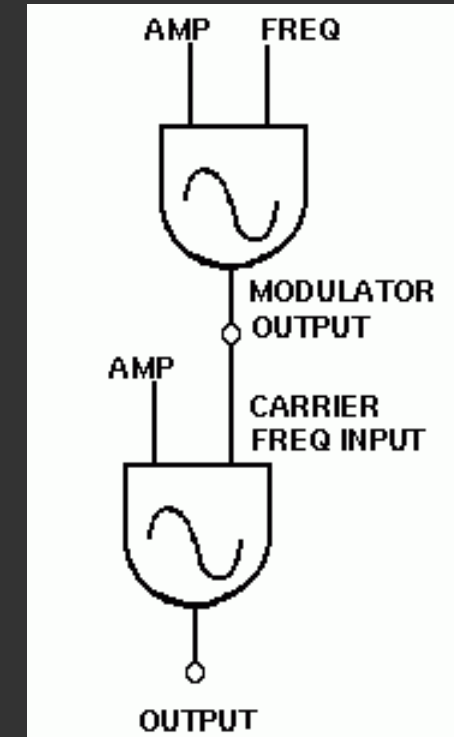
- sygnał modulujący (*modulator*)

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

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

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

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



(Formalnie jest to modulacja fazy, nie częstotliwości. Różnica wyniku jest niewielka.)

Efekty modulacji częstotliwości

Jak zmienia się dźwięk w zależności od częstotliwości modulującej?

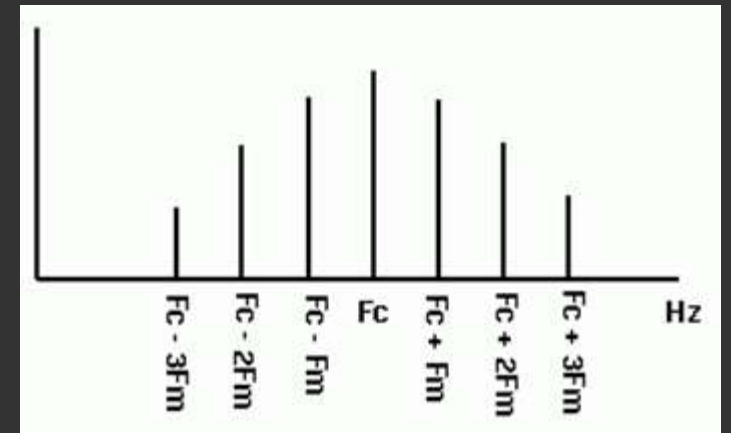
- Niskie częstotliwości (< 20 Hz): efekt **wibrato**, cykliczne oscylacje wysokości dźwięku (tak jak tradycyjne zastosowanie LFO do modulacji oscylatora).
- Większa częstotliwość modulująca – szybsze wibrato.
- Jeżeli przekroczymy 20 Hz i wejdziemy w pasmo słyszalne, modulacja będzie tak szybka, że w dźwięku pojawią się **nowe składowe widmowe**, w większości przypadków – nieharmoniczne (dźwięk będzie nieprzyjemny).
- Ale w pewnych kombinacjach, np. gdy częstotliwości obu sygnałów (modulującego i nośnego) są sobie równe, uzyskamy dźwięk **harmoniczny**.
- Dzięki modulacji częstotliwości, możemy zbudować dźwięk muzyczny używając do tego tylko dwóch „sinusów”.

Składowe widma FM

- Częstotliwość f_c sygnału nośnego jest modulowana sygnałem o częstotliwości f_m .
- W wyniku modulacji powstają składowe widma na częstotliwościach:

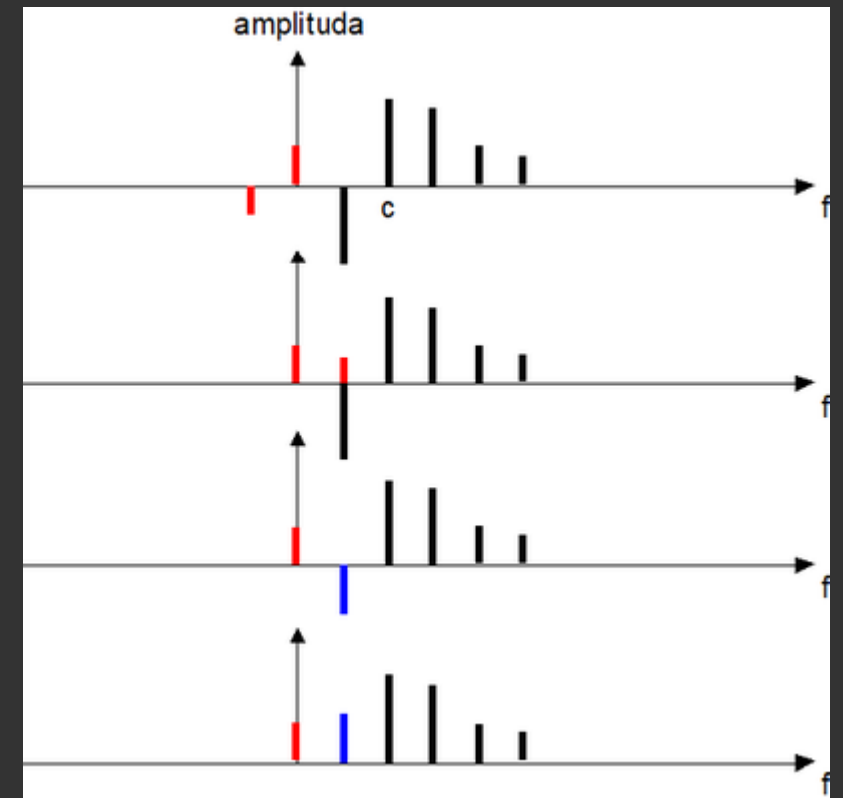
$$f_c \pm k f_m \quad (k = 0, 1, 2, \dots)$$

- W terminologii FM: wstęga dolna (poniżej f_c) i wstęga górna (powyżej f_c).
- Zatem trzeba tak dobrać stosunek $f_m : f_c$, aby składowe widmowe pojawiły się na częstotliwościach tworzących szereg harmoniczny.
- Np. $f_c = 500$ Hz, $f_m = 100$ Hz:
..., 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, ...



„Odbijanie” składowych widma

- Co ze składowymi o ujemnej częstotliwości?
Np. dla $f_c = 400$ Hz i $f_m = 100$ Hz dostajemy:
 $f_c - 5f_m = 400 - 500 = -100$ Hz
- Składowa „ujemna” zostaje przeniesiona na częstotliwość dodatnią (odbicie względem zera).
- Następuje zmiana fazy: amplituda „odbitej” składowej zmienia znak.
- Jeśli na tej częstotliwości już jest inna składowa, amplitudy się sumują (z uwzględnieniem znaku!).
- W ten sposób widmo traci symetrię wokół nośnej.



Współczynnik modulacji

- Współczynnik modulacji (*modulation ratio*) decyduje o **harmoniczności widma**.
- Jest równy stosunkowi częstotliwości nośnej do modulującej: $w_m = f_c / f_m$.
- **Unormowany** współczynnik modulacji spełnia warunek: $f_m \geq 2 f_c$ lub $f_c / f_m = 1$.
- Jeżeli warunek nie jest spełniony, obliczamy: $f_c = |f_c - f_m|$ tak długo, aż warunek zostanie spełniony.
- Aby widmo było harmoniczne, unormowany współczynnik modulacji musi być równy **1:N**.
- Najczęściej używa się niskich współczynników: 1:1, 1:2, 1:3, 3:2, itp.
- Przykłady współczynnika dającego widmo nieharmoniczne: 2:5, 2:7, 3:5.

Szczegółowe obliczenia: <http://www.sfu.ca/~truax/fmtut.html>

Współczynnik modulacji

Typowe przykłady praktycznie stosowanych współczynników modulacji f_c / f_m (przykładowe częstotliwości dla $f_c = 400$ Hz):

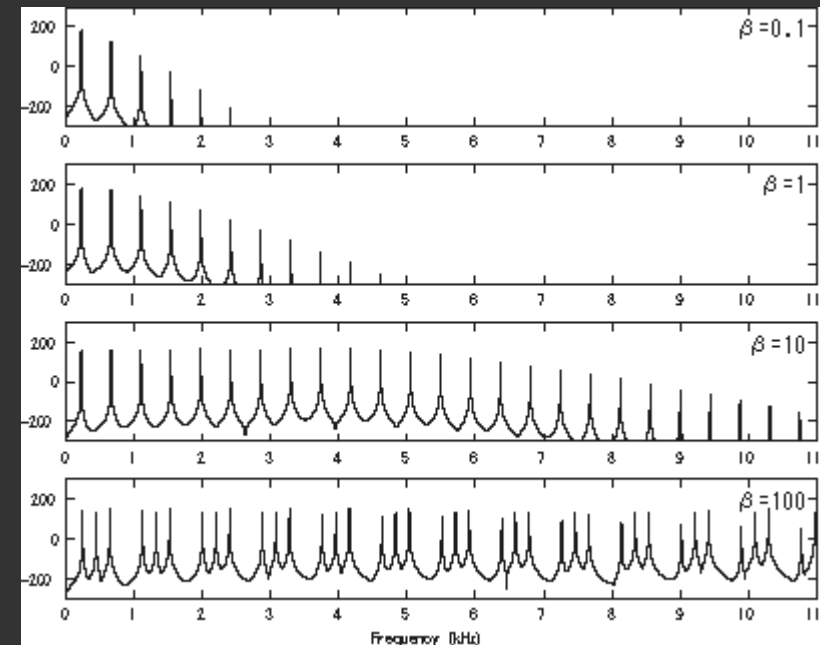
- **1:1** ($f_m = 400$) – wszystkie składowe harmoniczne widma 400, 800, 1200, 1600, 2000, ...
- **1:2** ($f_m = 800$) – co druga składowa widma jest zerowa 400, –, 1200, –, 2000, –, 2800, ...
- **1:3** ($f_m = 1200$) – co trzecia składowa widma jest zerowa, itd. 400, 800, –, 1600, 2000, –, 2800, ...

Przykład widma **nieharmonicznego**: 2:5 ($f_c = 800, f_m = 2000$)
800, 1200, 2800, 3200, 4800, 5200, 6800, 7200, ...

UWAGA: częstotliwość podstawowa (pierwsza w szeregu harmonicznym) nie zawsze równa się częstotliwości nośnej.

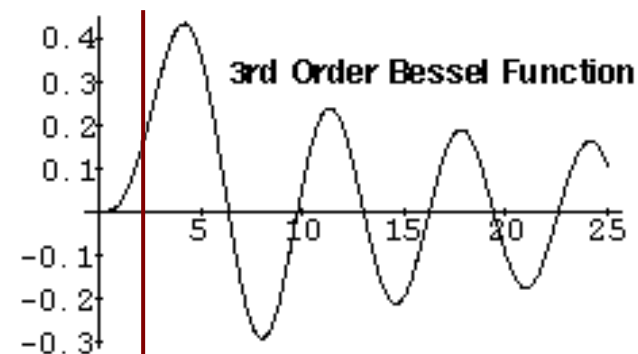
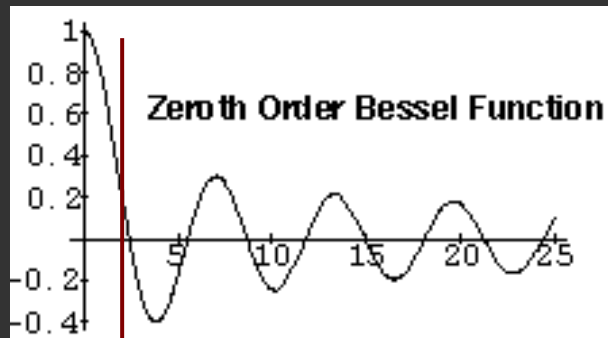
Indeks modulacji

- Indeks modulacji (I , *modulation index*) to **amplituda sygnału modulującego**.
- Wyznacza zakres częstotliwości, w jakim zachodzi modulacja ($\Delta f = I \cdot f_m$).
- Ma wpływ na **liczbę składowych** widma: większy indeks to bogatsze widmo.
- Decyduje o **amplitudach** składowych widma, przez co ma decydujący wpływ na **barwę** (brzmienie) dźwięku!



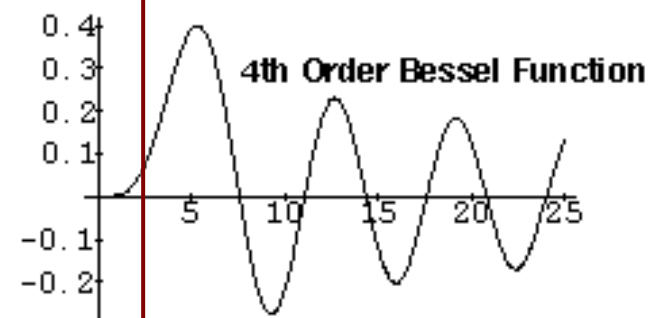
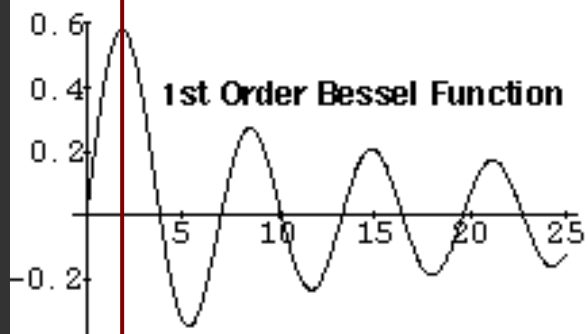
Funkcje Bessela pierwszego rodzaju (J)

$$f_c$$



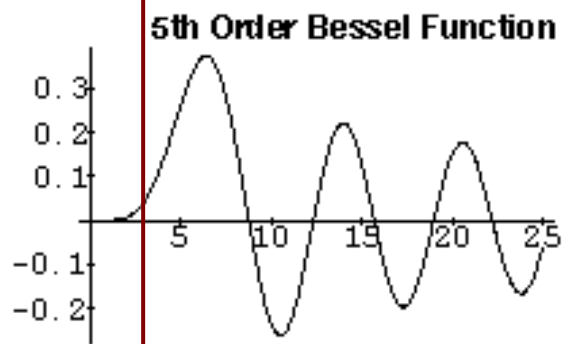
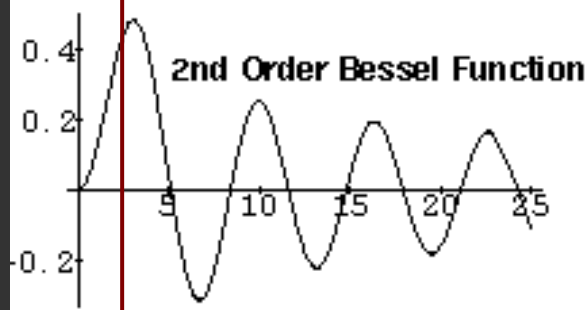
$$f_c \pm 3f_m$$

$$f_c \pm f_m$$



$$f_c \pm 4f_m$$

$$f_c \pm 2f_m$$



$$f_c \pm 5f_m$$

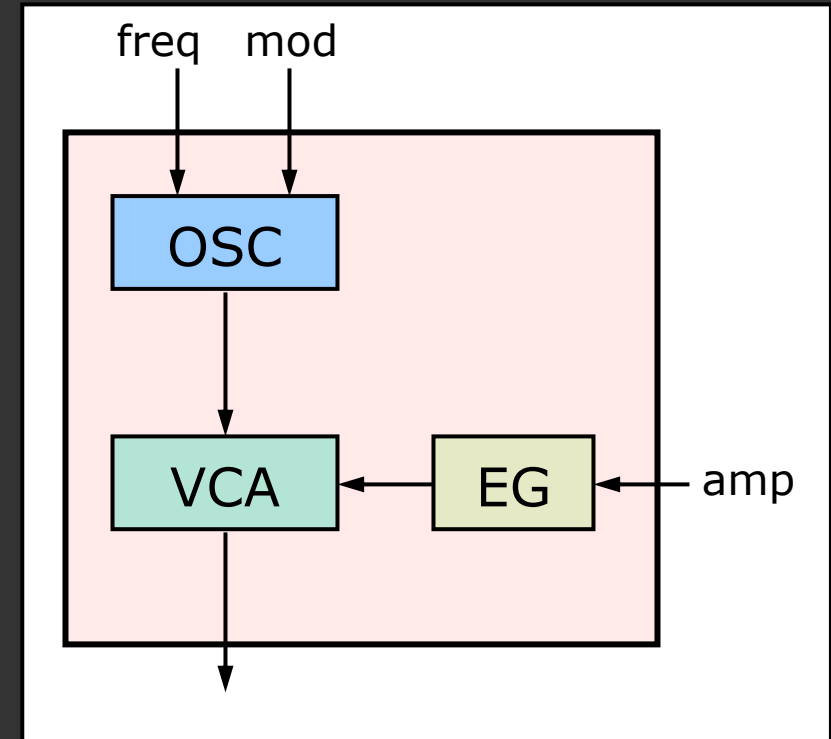
Parametry syntezy FM

- **Częstotliwości:** nośna (f_c) i modulująca (f_m):
 - mają wpływ na położenie składowych w widmie syntetycznego dźwięku,
 - ich stosunek decyduje o harmonicznosci widma (a więc o brzmieniu),
 - dla widma harmonicznego: wyznaczają wysokość dźwięku.
- **Indeks modulacji (I)** – amplituda sygnału modulującego:
 - decyduje o liczbie składowych widma i o ich amplitudach,
 - ma decydujący wpływ na brzmienie dźwięku,
 - aby brzmienie zmieniało się w czasie trwania (aby dźwięk był „żywy”), musimy zmieniać (modulować) wartość indeksu modulacji.

Operator

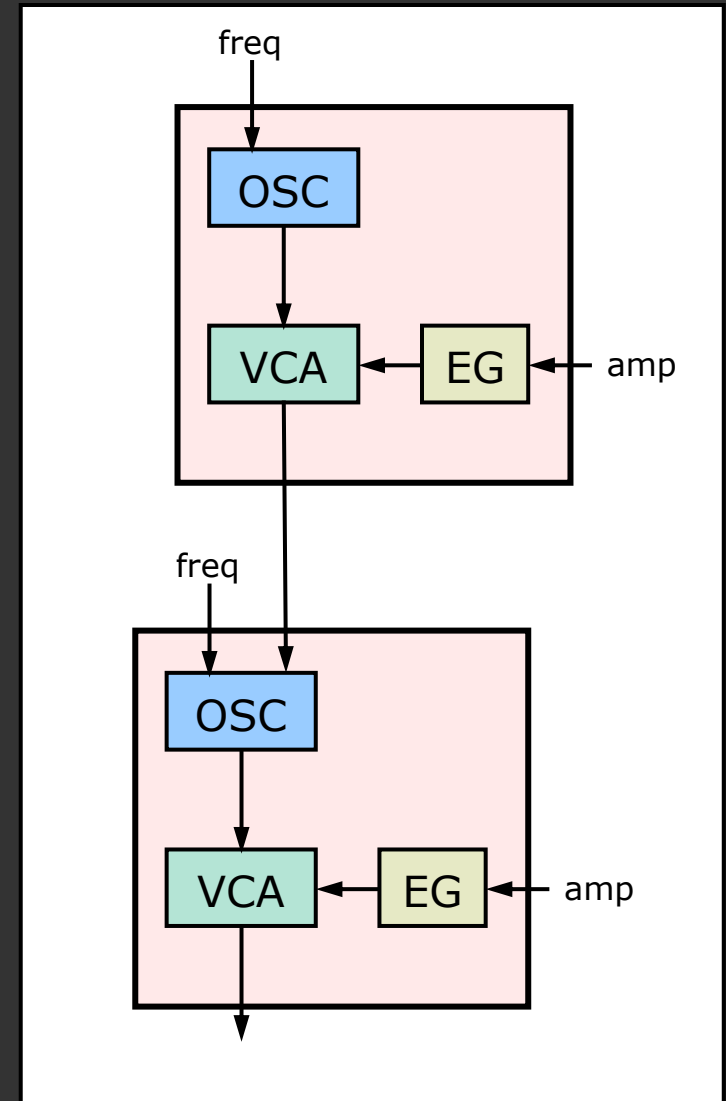
Operator jest podstawowym blokiem układu syntezy FM. Składa się on z:

- generatora sygnału sinusoidalnego (OSC)
 - *freq*: stała częstotliwość sinusa (przy braku modulacji),
 - *mod*: wejście modulacji częstotliwości,
 - częstotliwość generowana przez OSC:
 $f = freq + mod$
- wzmacniacza (VCA), sterowanego
- generatorem obwiedni (EG).



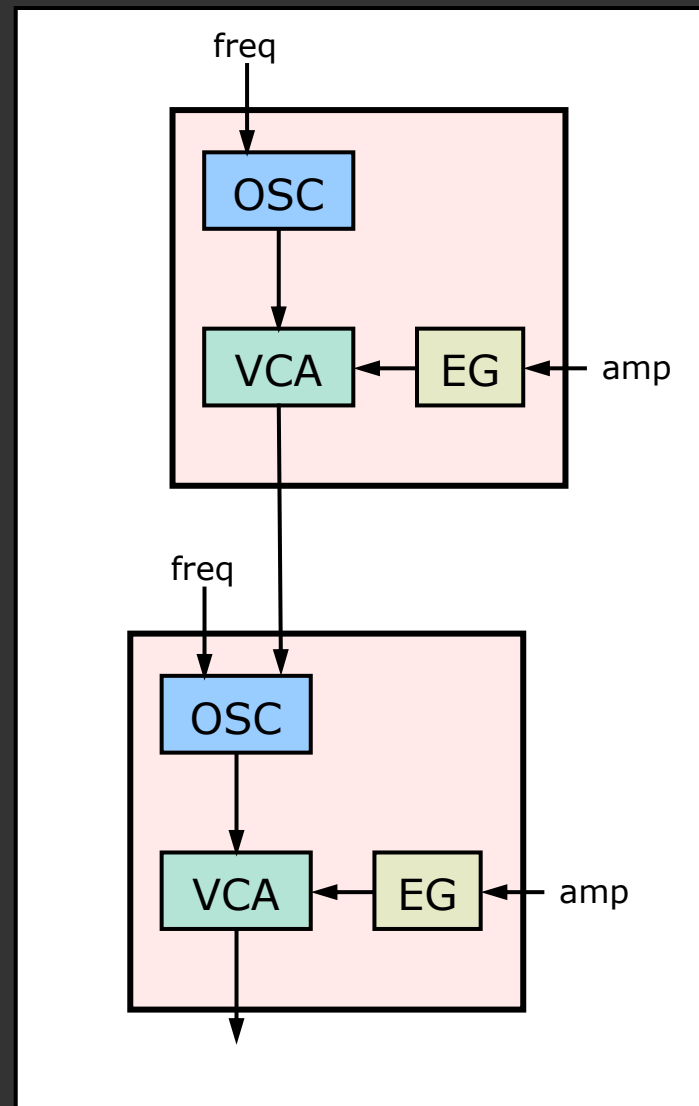
Algorytm *Simple FM*

- Algorytm FM – sposób połączenia operatorów.
- Najprostszy algorytm to połączenie dwóch operatorów:
 - jeden (górny) jest **modulatorem**,
 - drugi (dolny) – **generatorem nośnej**.
- Takie połączenie nazywa się *Simple FM* lub *2-op FM*.



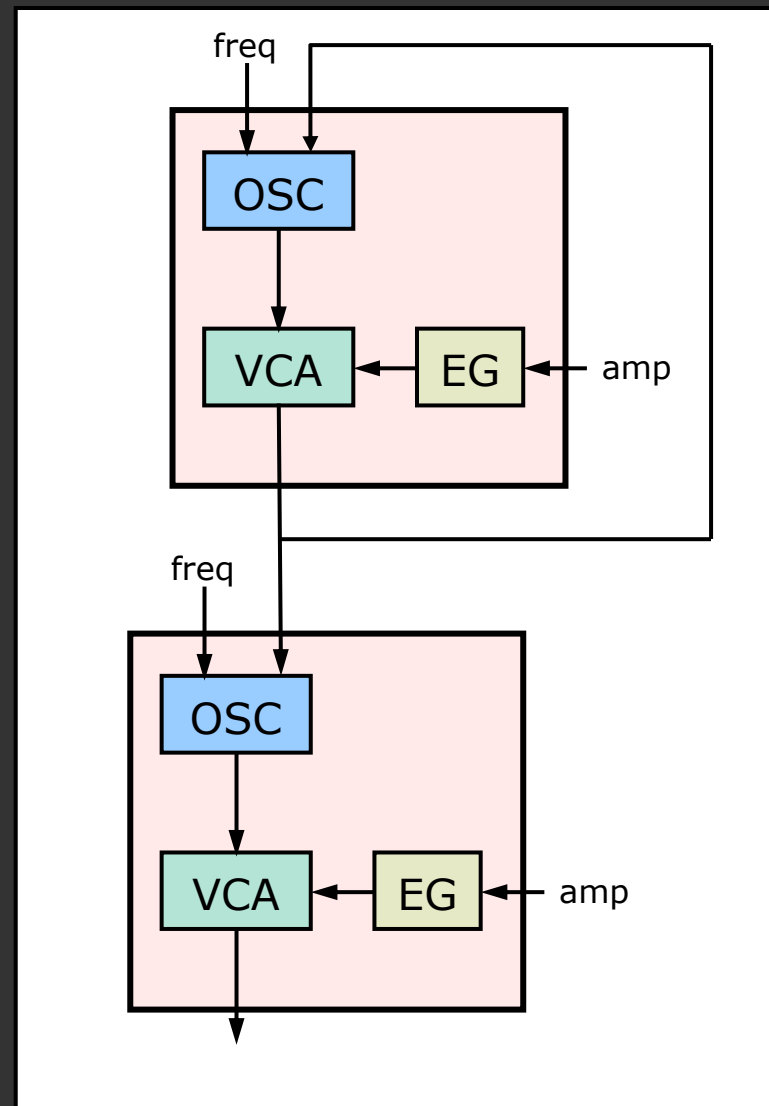
Generatory obwiedni

- Operatory FM są identyczne, ale ich rola zmienia się w zależności od algorytmu.
- Generator obwiedni (EG) kształtuje amplitudę sygnału na wyjściu operatora.
- Dla operatora „nośnej” (**wyjściowego**): EG tworzy **obwiednię czasową** dźwięku (jak w klasycznym syntezatorze).
- Dla operatora **modulującego** (wyjście steruje innym operatorem): EG kształtuje indeks modulacji, a więc zmienia **brzmienie** dźwięku.



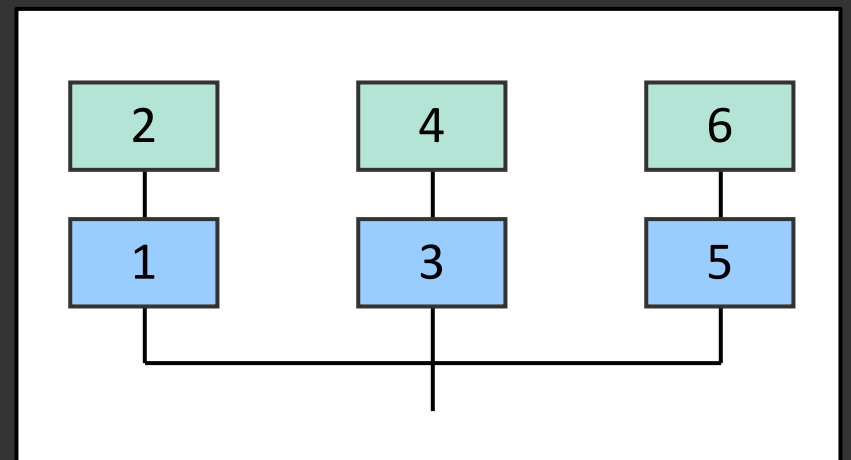
Sprzężenie zwrotne

- W niektórych algorytmach możliwe jest włączenie regulowanego sprzężenia zwrotnego (*feedback*).
- Zmodulowany sygnał z wyjścia jest ponownie podawany na wejście.
- Modulacja jest zwielokrotniana.
- W ten sposób mogą powstawać dźwięki o bardzo złożonym widmie.



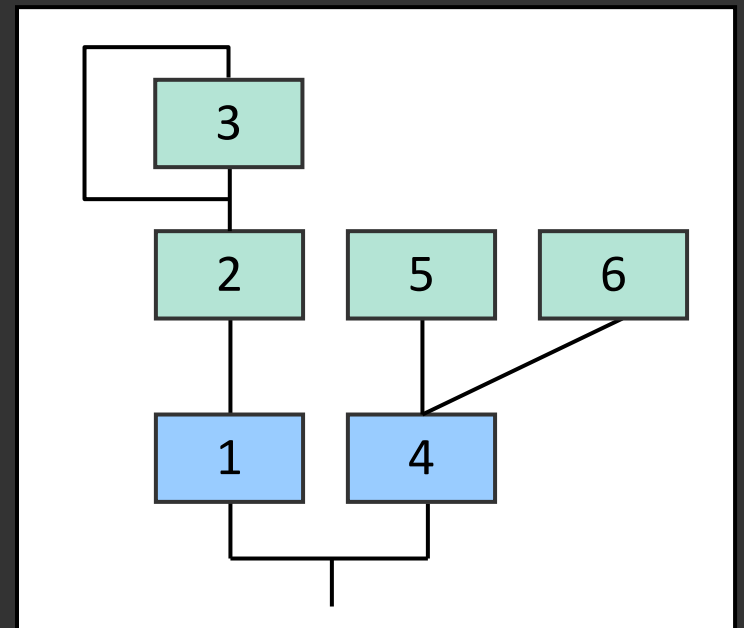
Złożona synteza FM

- W komercyjnych instrumentach z syntezą FM stosuje się więcej niż dwa operatory (zwykle 4, 6 lub 8).
- Powstaje w ten sposób **złożona synteza FM** (*complex FM*).
- Algorytm może np. składać się z par 2-op, które są miksowane na wyjściu - **uwarstwianie** syntezy FM (*layering*).
- Pary mogą tworzyć dźwięki równocześnie.
- Za pomocą obwiedni można też ustawić pary tak, aby włączały się „po kolei”, tworząc kolejne fazy dźwięku.



Złożona synteza FM

- Można również połączyć więcej niż dwa operatory w **stos** (*stacking*).
- Sygnał już zmodulowany jest stosowany do modulacji kolejnego (niższego) operatora w stosie.
- Tworzy się w ten sposób zwielokrotnioną modulację, uzyskując dźwięki o bogatym widmie.



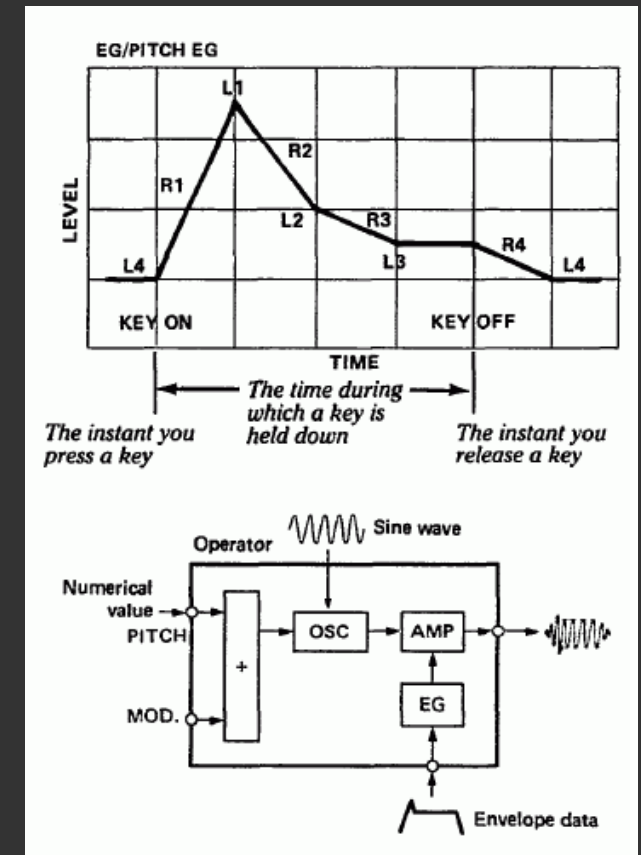
Ustawianie parametrów w synteźatorze FM

- Wciśnięty klawisz wyznacza częstotliwość bazową (zalecane: = częstotliwości podstawowej).
- Dla każdego operatora ustawia się **mnożnik** częstotliwości. Np. ustawienie go na 2,0 oznacza, że generowana częstotliwość będzie dwukrotnie większa od częstotliwości bazowej.
- Obwiednie operatorów – kształtują amplitudę sygnału na wyjściu operatora, zależnie od jego funkcji: regulują indeks modulacji (barwę) w modulatorze lub poziom wyjściowy (głośność) w operatorze nośnej.
- Sygnał na wyjściu operatora może też być **modulowany przez LFO**.
Możliwa jest modulacja częstotliwości oraz amplitudy operatora.

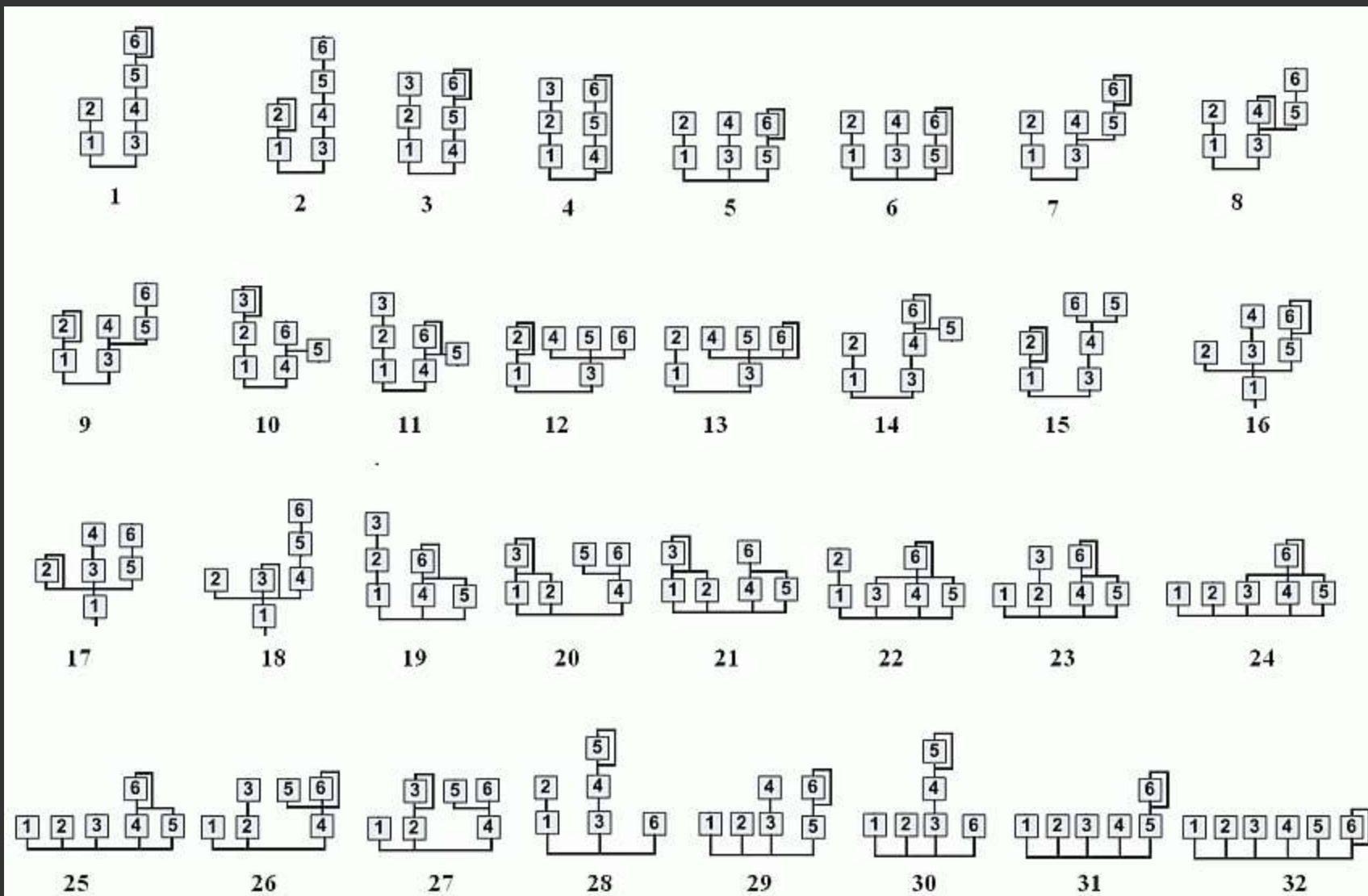
Yamaha DX7

Yamaha DX7 (1983 r.) – najpopularniejszy instrument FM:

- 6 operatorów,
- 32 ustalone algorytmy,
- w każdym operatorze: ustawianie mnożnika częstotliwości, amplitudy, obwiedni, skalowania;
- obwiednia – 4 odcinki, regulowane nachylenie i poziom,
- modulatory (LFO, generator obwiedni),
- 16-głosowa polifonia,
- pamięć wewnętrzna i zewnętrzna dla programów.

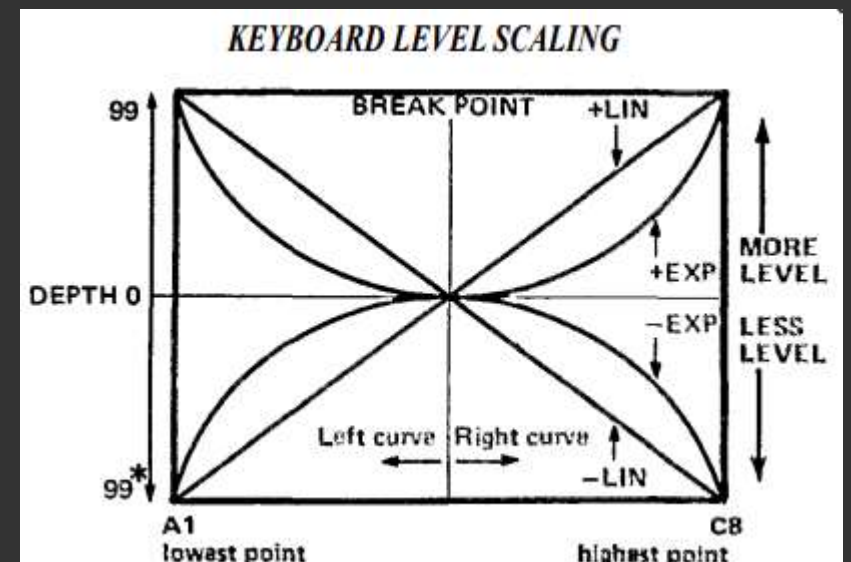


Yamaha DX7 - wszystkie 32 algorytmy



Yamaha DX7 - skalowanie klawiatury

- DX7 pozwalał ustawić niezależnie w każdym operatorze sposób **skalowania klawiatury** (*keyboard level scaling*). **Amplituda operatora** zmienia się wraz z **numerem klawisza** muzycznego.
- Klawisz *break point* dzieli klawiaturę na dwie części. Można ustawić stopień modyfikacji amplitudy (*depth*) i kształt funkcji skalującej.
- Każdy operator może mieć inny sposób skalowania.
- Dzięki temu, możliwe jest elastyczne „miksowanie” brzmień pochodzących z różnych gałęzi algorytmu, w różnych proporcjach, zależnie od wciśniętego klawisza.



Yamaha DX7 - programy

- Tworzenie brzmień (programowanie syntezy FM) było trudne, szczególnie dla muzyków bez przygotowania technicznego.
- Wpływ zmian parametrów na brzmienie dźwięku nie jest oczywisty.
- Interfejs instrumentu DX7 nie ułatwiał programowania brzmień.
- Z tego względu, zdecydowana większość użytkowników DX7 stosowała wyłącznie „fabryczne” programy (2 × 32 brzmień), przywoływanych z pamięci urządzenia.
- Można było zakupić dodatkowe moduły pamięci (*cartridge*), każdy zawierał 64 programy.
- Możliwe było też wgrywanie programów przez MIDI.



Instrumenty programowe FM

- Instrumenty programowe FM – emulacja sprzętowych syntezatorów (*Dexed*) lub własne implementacje (*NI FM8*).
- Zachowują wszystkie cechy klasycznej syntezy FM.
- Instrument *NI FM8* wprowadza udoskonalenia, np. różne kształty fali (nie tylko sinusy), dowolne łączenie operatorów w algorytmy (macierze modulacji), itp.

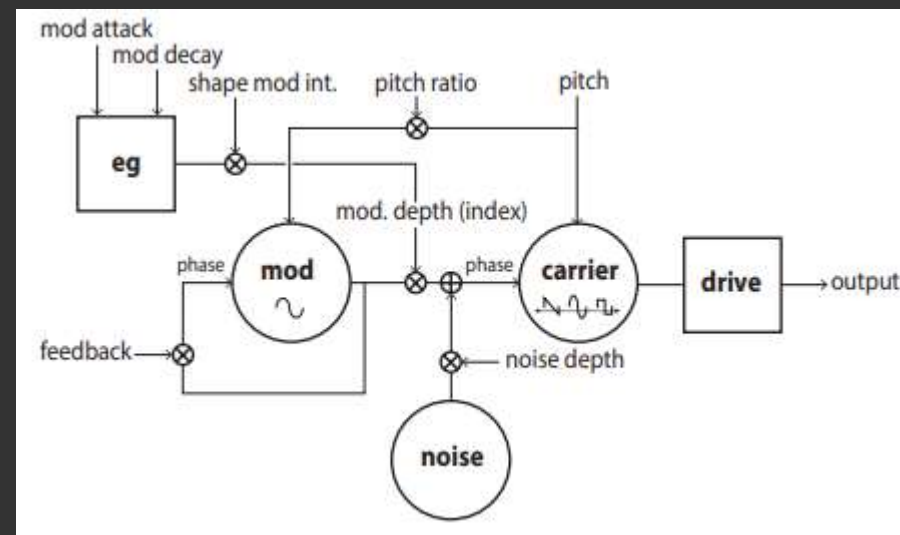


Udoskonalenia syntezy FM

Współczesne implementacje FM dodają nowe możliwości.

Przykład: *Variable Phase Modulation* (VPM) firmy Korg.

- Tylko dwa operatory (nośna i modulator).
- Operator może wytwarzać nie tylko sinusa, ale również inne fale (np. piętę).
- Zachodzi wielokrotna modulacja - składowe sygnałów „każda z każdą”.
- Dodatkowa modulacja za pomocą obwiedni i generatora szumu.



Współczesne instrumenty sprzętowe FM

Korg Volca FM



Korg Opsix



Elektron Digitone



Yamaha Montage
(+ sample)



Zalety i wady metody FM

Zalety metody modulacji częstotliwości:

- prosta i tania metoda w porównaniu z instrumentami analogowymi,
- ciekawe, nowatorskie brzmienia (z punktu widzenia ówczesnego muzyka),
- duże możliwości wpływania na brzmienie,
- możliwość naśladowania instrumentów (np. dzwonów),
- łatwość korzystania z gotowych brzmień (programów).

Wady metody modulacji częstotliwości:

- nieintuicyjny dla muzyka proces syntezy (w porównaniu z subtraktywną),
- trudne programowanie, wymaga eksperymentowania,
- zdaniem niektórych: zbyt „plastikowe” brzmienia, bardziej ostre i zimne niż w analogowych syntezatorach.

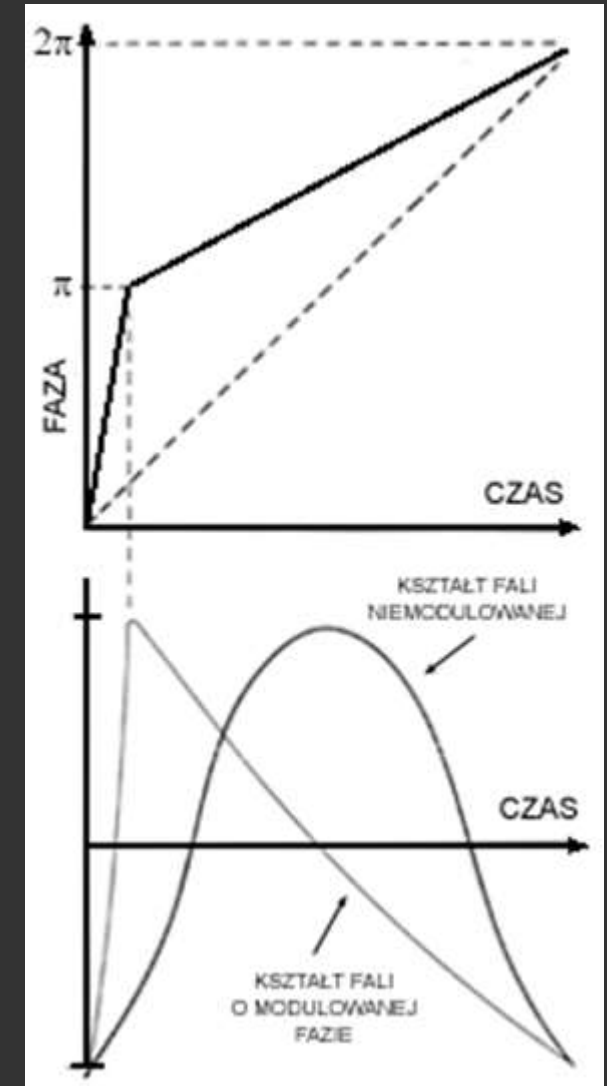
METODA ZNIEKSZTAŁCANIA FAZY (PD)

Metoda **zniekształcania fazy** (*phase distortion*, PD)

- Metoda syntezy opracowana i wykorzystana komercyjnie przez firmę **Casio** w instrumentach serii CZ (1985-1988).
- Należy również do cyfrowych metod matematycznych.
- Charakteryzuje się „mocno syntetycznym” brzmieniem.
- Polega na dynamicznej zmianie fazy sygnału sinusoidalnego odczytywanego z tablicy (pamięci), poprzez ciągłą **zmianę prędkości odczytu**.
- Na skutek zniekształcania fazy, do sygnału dodawane są harmoniczne.

Zniekształcanie fazy

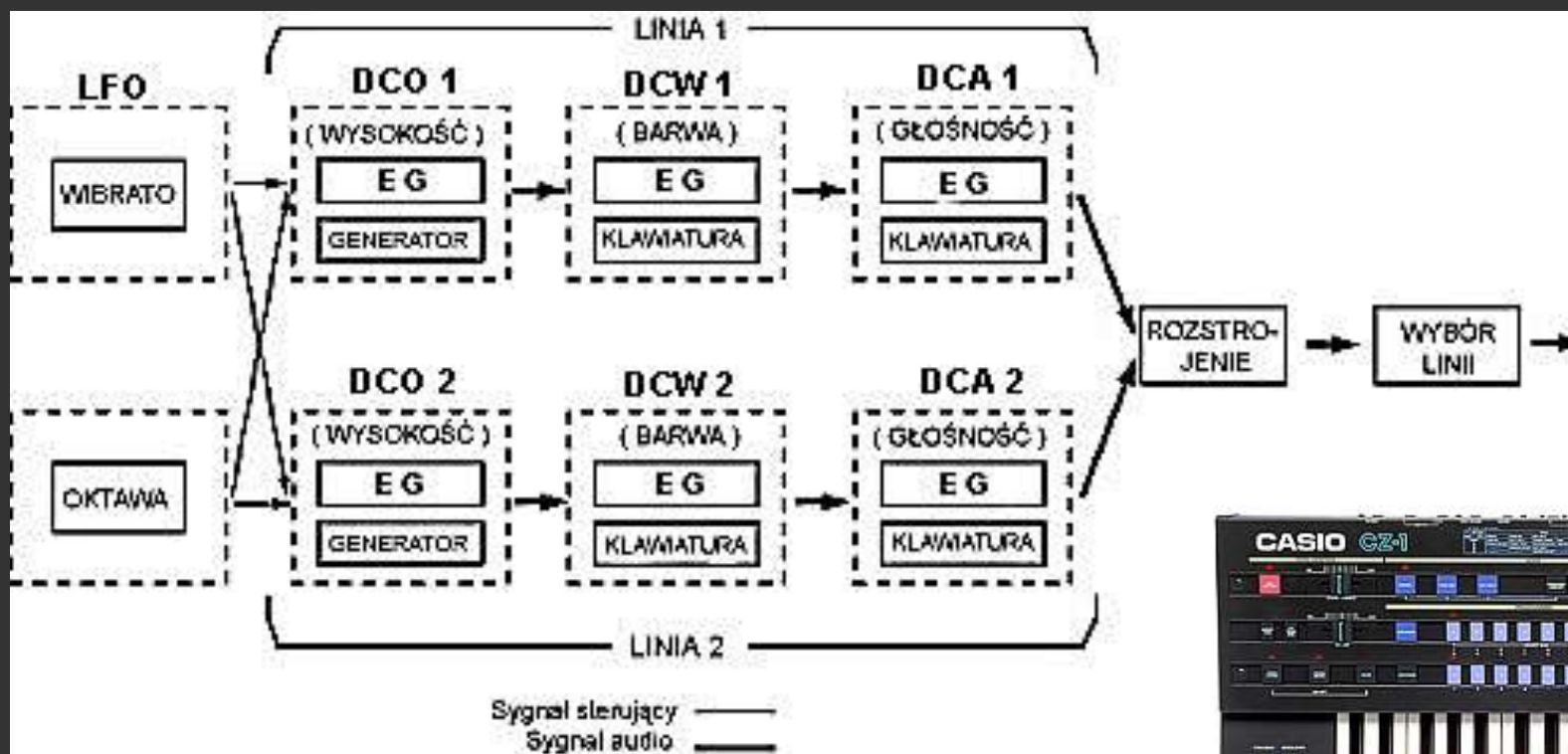
- Mamy próbki sygnału sinus zapisane w pamięci.
- Generujemy sygnał, cyklicznie odczytując próbki.
- Czytając je ze stałą prędkością, otrzymujemy sinusa (liniowa faza).
- Jeżeli będziemy **zmieniali prędkość odczytu** (czyli krok przesuwania indeksu po tablicy) w trakcie generowania sygnału, **faza zostanie zniekształcona**, a do sygnału zostaną **dodane harmoniczne**.
- Stopień zniekształcenia fazy może być **modulowany**, przez co uzyskujemy dynamiczne **zmiany brzmienia** dźwięku.



Przykład instrumentu PD

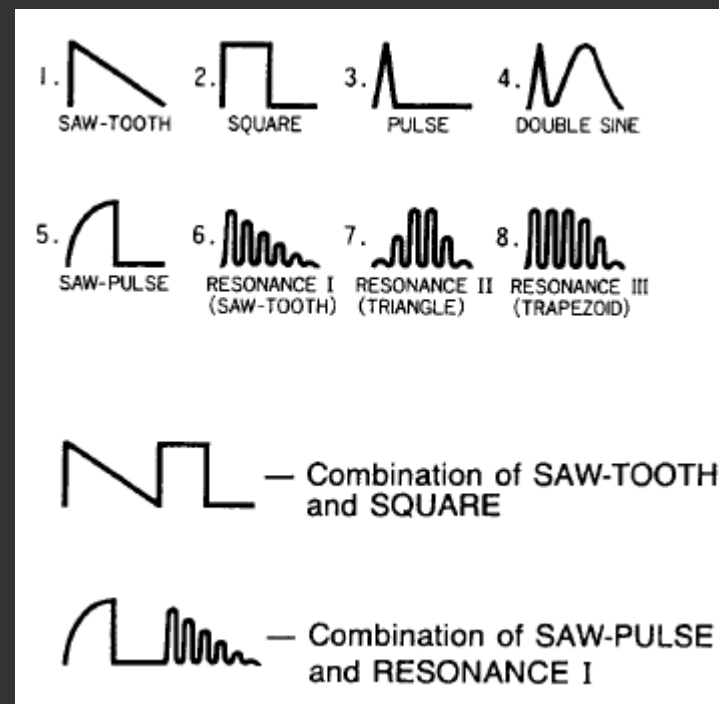
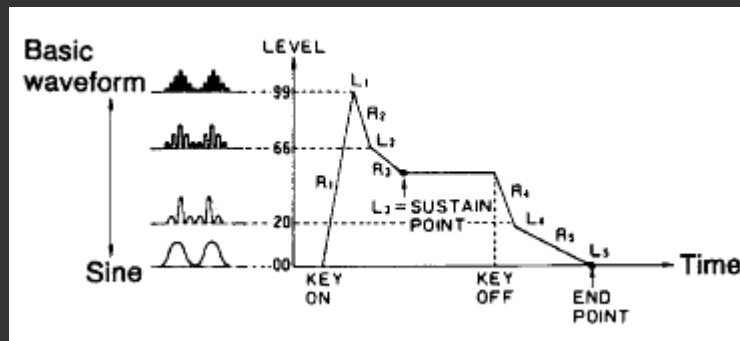
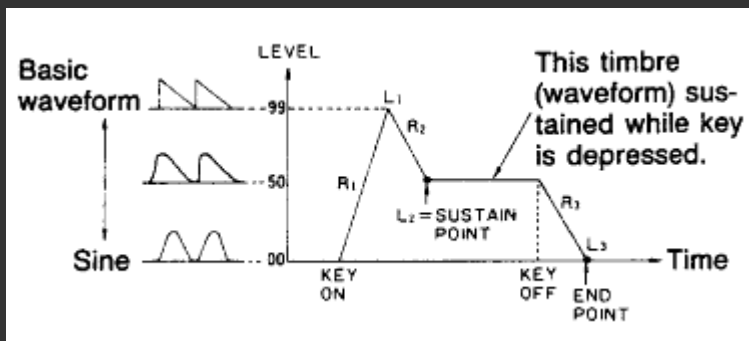
Casio CZ-1 (1986): dwa niezależne tory.

DCO generuje sinusa, DCW (*digitally controlled waveshaper*) zniekształca fazę.



Przykład instrumentu PD

- 8 docelowych kształtów fali. Możliwe łączenie w pary – 33 kombinacje.
- Stopień zniekształcenia fazy: od 0 (czysty sinus) do 99 (docelowy kształt).
- Generator obwiedni, LFO, numer klawisza i prędkość (*velocity*) mogą sterować stopniem zniekształcenia.

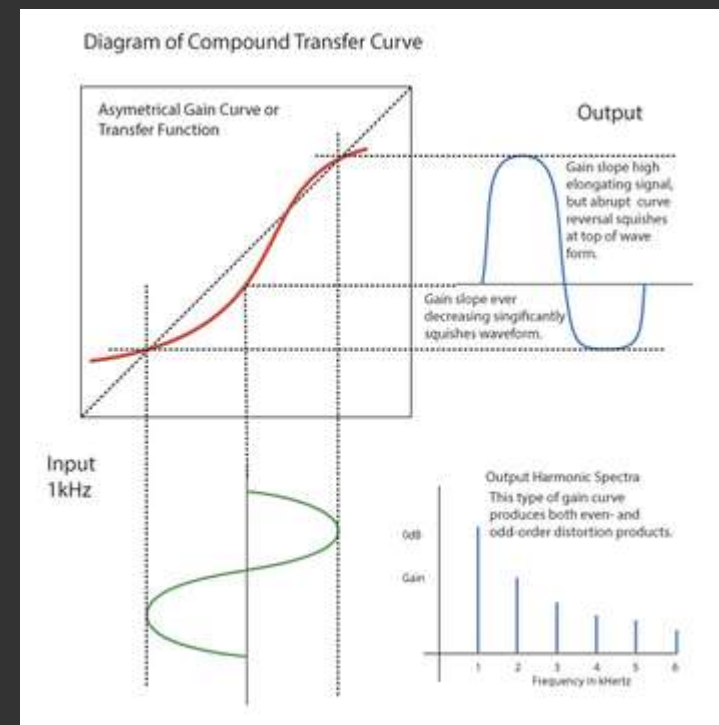
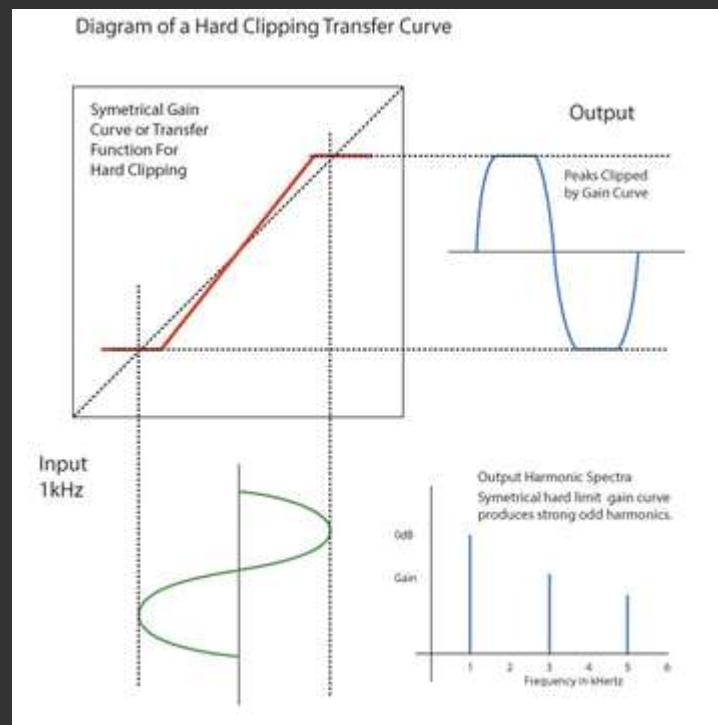
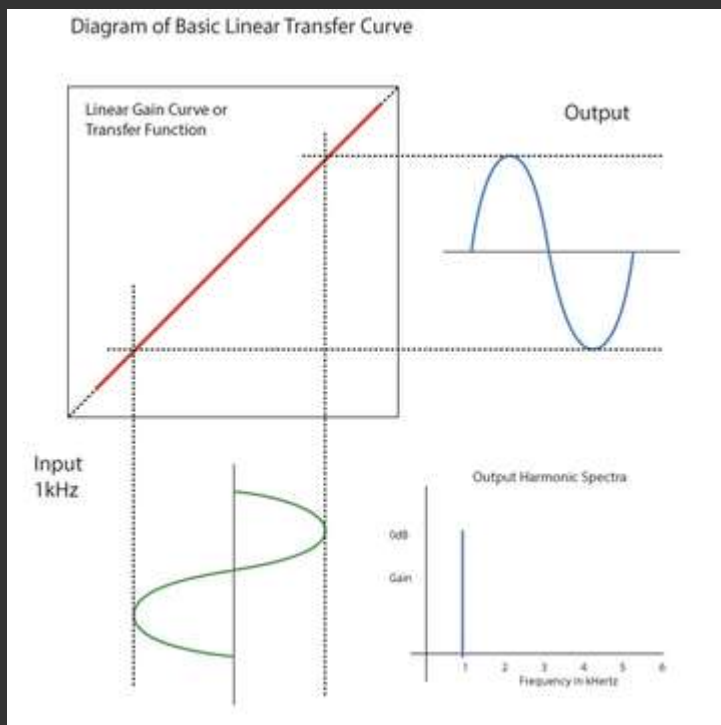


SYNTEZA METODĄ KSZTAŁTOWANIA FALI

- **Kształtowanie fali** (*waveshaping*) określa każdą metodę, w której kształt fali (okresowego sygnału) jest modyfikowany, tak aby uzyskać inny sygnał.
- Metoda zniekształcania fazy (PD) jest przykładem kształtowania fali.
- W 1979 r. Marc Le Brun opublikował w *AES Journal* pracę pt. „*Digital Waveshaping Synthesis*”.
- Zaproponował nową metodę syntezy dźwięku, opartą na przekształcaniu sygnału sinus przez element o nieliniowej charakterystyce.
- Metoda kształtowania fali nie została wykorzystana jako samodzielna metoda syntezy, ale pojawia się w niektórych instrumentach, głównie programowych.

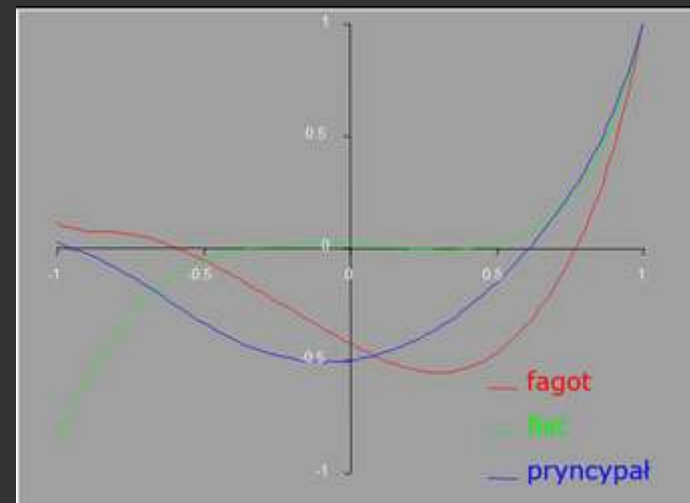
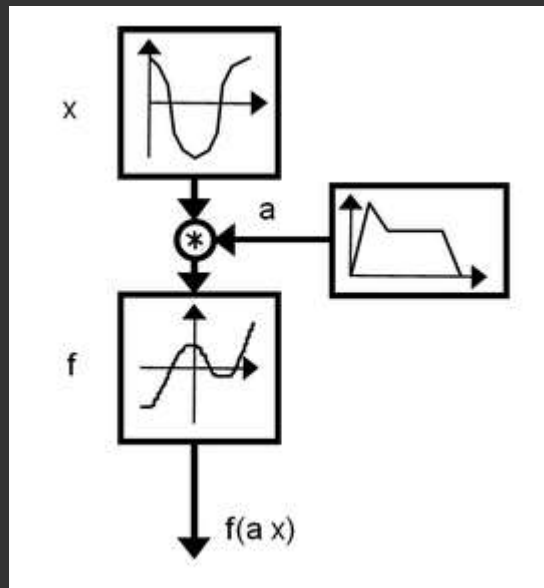
Zasada kształtowania fali

Jeżeli sygnał zostanie **przekształcony** przez układ (*waveshaper*) o **nieliniowej charakterystyce** przenoszenia, do sygnału zostaną dodane **zniekształcenia nieliniowe**, mające charakter składowych **harmonicznych**.



Synteza metodą kształtowania fali

- Za pomocą funkcji nieliniowej o wybranym kształcie można tworzyć harmoniczne dźwięki muzyczne z sygnału sinus.
- Dynamiczne zmiany brzmienia można uzyskać skalując funkcję przenoszenia lub modulując jej kształt.
- Le Brun zaproponował algorytm obliczania funkcji przenoszenia dającej pożądany kształt widma sygnału, z wykorzystaniem wielomianów Czebyszewa.



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: <https://homepages.abdn.ac.uk/mth192/pages/html/dx7.html>
- WaveFM – prosty syntezytor FM (j. francuski): <http://hrsoft.free.fr/WaveFM/>
- Casio CZ-1 Operation Manual: <http://www.synthzone.com/midi/casio/cz1/>
- Casio Sound Synthesis Handbook:
<http://www.vintagesynth.com/manuals/CasioCZSeries-SoundSynthesisHandbook.pdf>
- Vintage Synthe Explorer: www.vintagesynth.com
- Wikipedia (wersja angielska)

Materiały wyłącznie do użytku wewnętrznego dla studentów przedmiotu *Elektroniczne instrumenty muzyczne*, prowadzonego przez Katedrę Systemów Multimedialnych Politechniki Gdańskiej. Wykorzystywanie do innych celów oraz publikowanie i rozpowszechnianie zabronione.

This presentation is intended for internal use only, for students of Multimedia Systems Department, Gdansk University of Technology, attending the „Electronic musical instruments” course. Other uses, including publication and distribution, are strictly prohibited.