

*Elektroniczne instrumenty muzyczne*

**SYNTEZA METODĄ  
KSZTAŁTOWANIA FALI  
(*WAVESHAPING*)**

**ORAZ ZNIEKSZTAŁCANIA FAZY  
(*PHASE DISTORTION, PD*)**

## Matematyczne metody syntezy

---

Cyfrowe metody syntezy dźwięku wykorzystywane w pierwszej połowie lat 80. XX wieku można określić mianem **metod matematycznych**.

Synteza na drodze matematycznych operacji prowadzących do obliczenia dźwięku syntetycznego.

Metody:

- modulacji częstotliwości (FM)
- kształtowania fali (*waveshaping*)
- zniekształcania fazy (*phase distortion*)

## *Metoda kształtowania fali*

---

Metoda kształtowania fali,  
ang. *waveshaping synthesis*

- Zaprojektowana we wczesnych latach 80. jako alternatywna do metody FM, ze względu na możliwość symulowania widma dźwięku rzeczywistego instrumentu.
- Podstawy teoretyczne: Marc Le Brun: „*Digital Waveshaping Synthesis*”. AES Journal, Vol. 27, No. 4, 1979.
- Nie została wykorzystana komercyjnie w zaproponowanej postaci.

## *Kształtowanie fali*

---

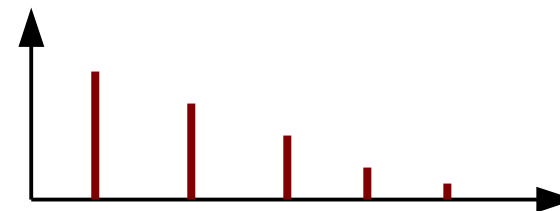
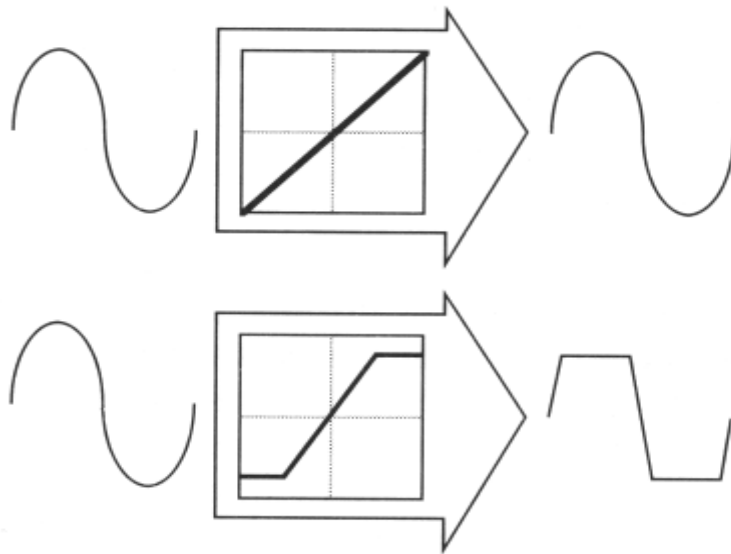
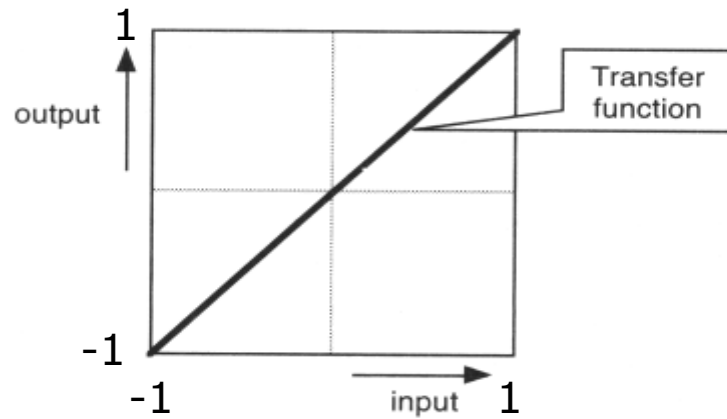
Metoda przekształcania fali umożliwia generowanie sygnałów o złożonym widmie poprzez przekształcanie **tonów prostych** przez **element o nieliniowym wzmocnieniu**.

Zasadnicze bloki syntezy:

- generator tonów prostych (cosinus)
- blok nieliniowej funkcji przekształcającej (*waveshaper*)
- wzmacniacz, generator obwiedni

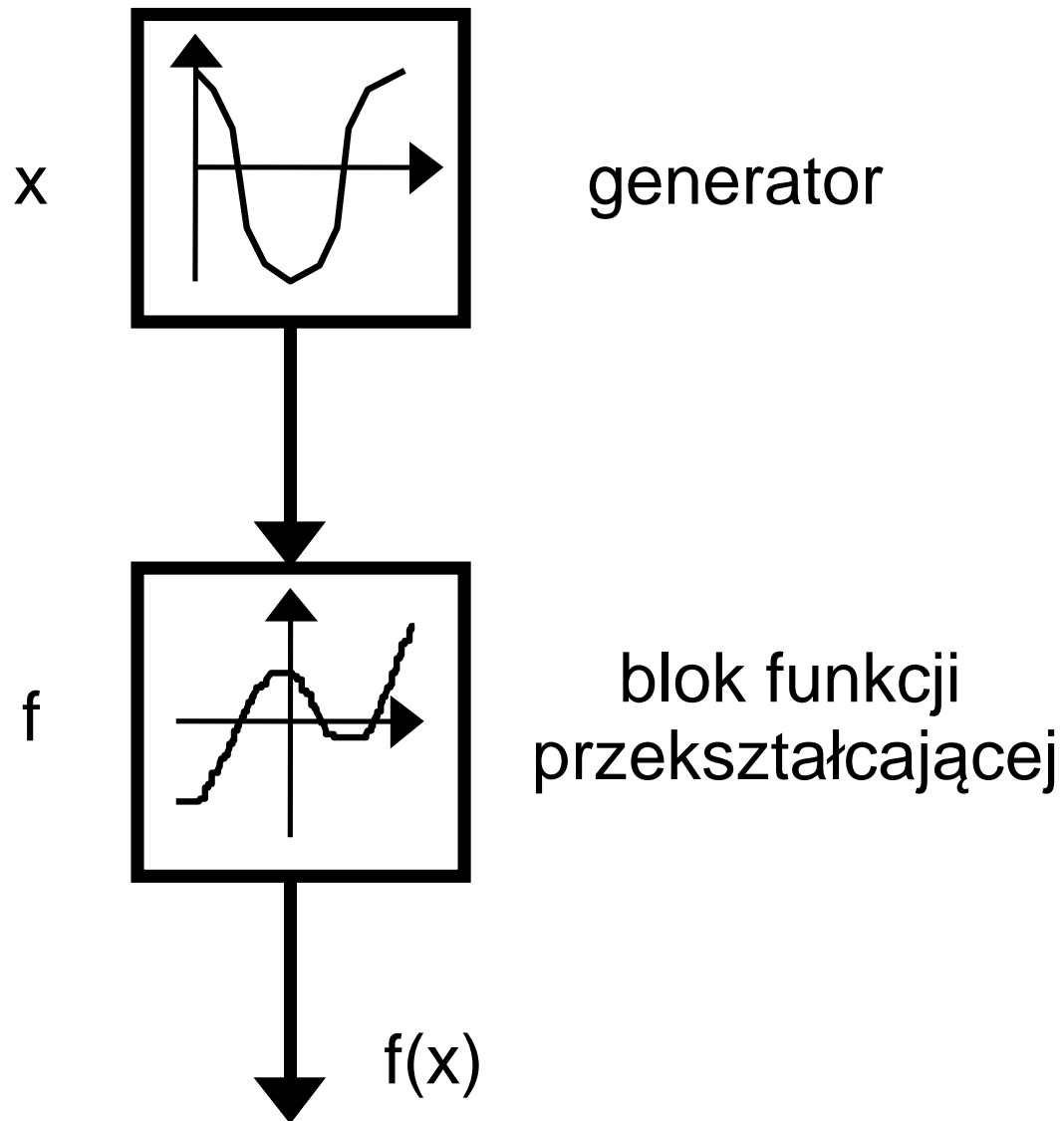
# Przekształcanie fali - idea

---



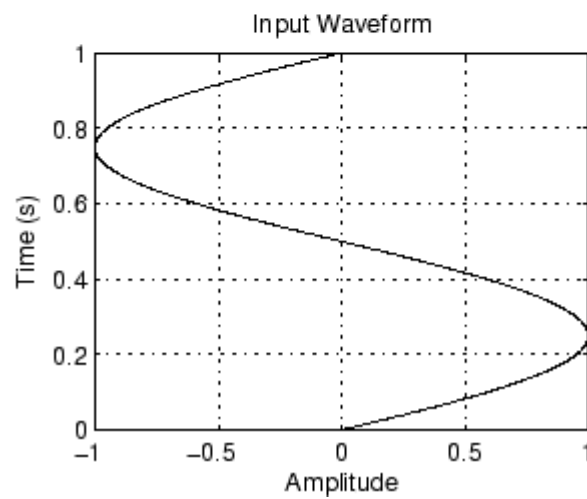
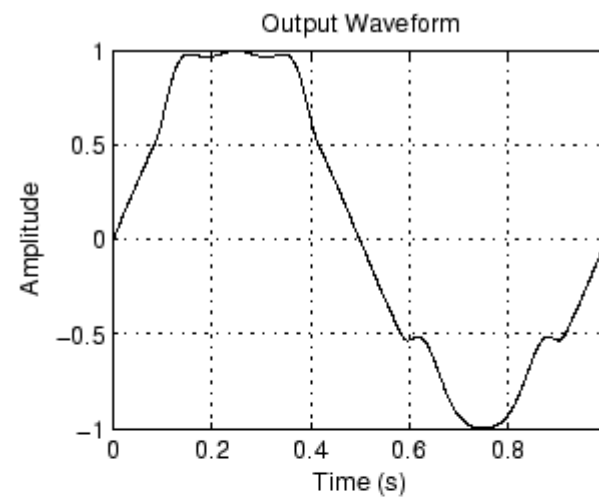
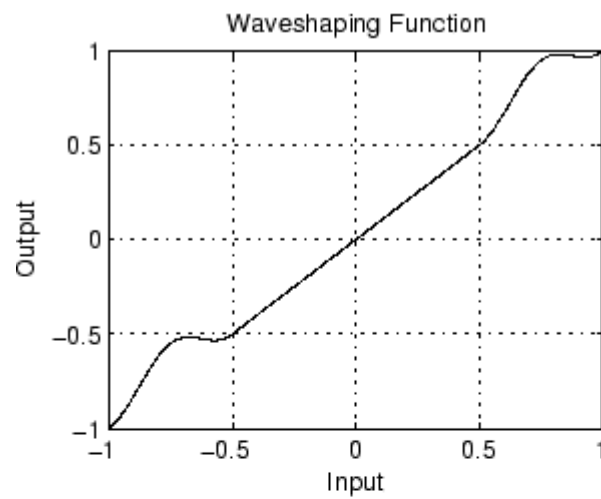
# *Schemat metody*

---



# Przekształcanie fali - przykład

---

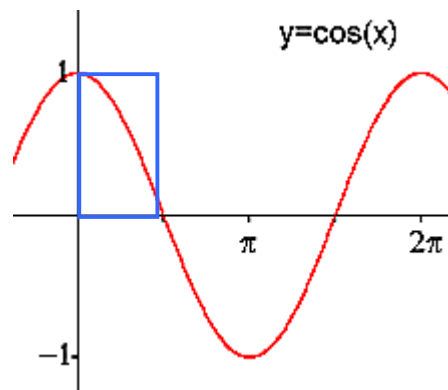


# Generator

---

Generator sygnału:

- tablica próbek sygnału cosinus
- przeskalowanie amplitudy do zakresu  $[-1, 1]$
- wystarczy zapisać  $\frac{1}{4}$  okresu, pozostałą część można otrzymać przez zmianę kierunku odczytywania tablicy oraz odwracanie fazy; dzięki temu oszczędza się pamięć

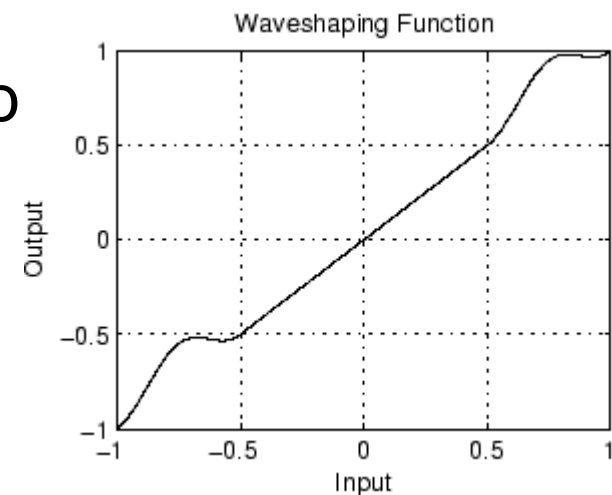


# Funkcja przekształcająca

---

Element o nieliniowym wzmacnieniu (*waveshaper*) realizuje **funkcję przekształcającą**:

- wartości wejściowe  $x \in [-1, 1]$
- ograniczenie wartości wyjściowych  $F(x) \in [-1, 1]$
- funkcja przekształcająca jest zapisana w pamięci – jednowymiarowej tablicy (*lookup table*), nie ma konieczności matematycznego obliczania  $F(x)$



## *Funkcja przekształcająca*

---

- Jeżeli funkcja przekształcająca jest liniowa, na wyjściu otrzymamy też cosinus (jeden prążek widma).
- Jeżeli funkcja przekształcająca będzie nieliniowa, zostaną wprowadzone **zniekształcenia harmoniczne** – pojawią się dodatkowe prążki w widmie sygnału.
- W tym przypadku zniekształcenia harmoniczne są pożądane, kontrolowane przez nas – przekształcamy ton prosty na dźwięk o złożonym widmie.

## *Kształtowanie widma*

---

O kształcie widma syntetycznego decyduje wyłącznie funkcja przekształcająca.

Im bardziej gwałtowne są zmiany nachylenia funkcji  $F(x)$ , tym więcej harmonicznnych będzie w widmie i tym wyższe będą ich amplitudy.

Funkcja przekształcająca może być opisana **wielomianem** rzędu  $n$ :

$$F(x) = c_n x^n + c_{n-1} x^{n-1} + \dots + c_2 x^2 + c_1 x + c_0$$

## *Kształtowanie widma*

---

W jaki sposób uzyskać dźwięk syntetyczny, którego składowe widmowe mają ustalone amplitudy?

Należy odpowiednio dobrać współczynniki wielomianu funkcji przekształcającej  $F(x)$ .

Zdefiniujmy wielomian stopnia  $n$  taki, że dla  $x = \cos \theta$  :

$$F_n(x) = F_n(\cos \theta) = \cos n\theta$$

## Kształtowanie widma

---

$$F_n(\cos \theta) = \cos n\theta$$

a więc jeżeli na wejście bloku przekształcającego z funkcją  $F_n(x)$  podamy sygnał cosinus, to widmo sygnału wyjściowego będzie zawierało **pojedynczy prążek** o częstotliwości  **$n$  razy większej**, niż częstotliwość sygnału wejściowego.

Pierwsze dwie funkcje:

$$F_0(x) = \cos 0 = 1$$

$$F_1(x) = \cos \theta = x$$

## *Kształtowanie widma*

---

Wielomiany wyższych rzędów można obliczyć na podstawie przekształceń trygonometrycznych:

$$F_2(x) = \cos 2\theta = 2(\cos \theta)^2 - 1 = 2x F_1(x) - F_0(x)$$

$$\begin{aligned} F_3(x) &= \cos 3\theta = 4(\cos \theta)^3 - 3 \cos \theta = \\ &= 2 \cos \theta [2(\cos \theta)^2 - 1] - \cos \theta = \\ &= 2x F_2(x) - F_1(x) \end{aligned}$$

Mamy więc zależność rekurencyjną (dla  $n \geq 2$ ):

$$F_n(x) = 2x F_{n-1}(x) - F_{n-2}(x)$$

Są to wielomiany Czebyszewa

## *Kształtowanie widma*

---

Dziesięć pierwszych wielomianów Czebyszewa  
( z *Wikipedii PL*):

$$T_0(x) = 1$$

$$T_1(x) = x$$

$$T_2(x) = 2x^2 - 1$$

$$T_3(x) = 4x^3 - 3x$$

$$T_4(x) = 8x^4 - 8x^2 + 1$$

$$T_5(x) = 16x^5 - 20x^3 + 5x$$

$$T_6(x) = 32x^6 - 48x^4 + 18x^2 - 1$$

$$T_7(x) = 64x^7 - 112x^5 + 56x^3 - 7x$$

$$T_8(x) = 128x^8 - 256x^6 + 160x^4 - 32x^2 + 1$$

$$T_9(x) = 256x^9 - 576x^7 + 432x^5 - 120x^3 + 9x.$$

## Kształtowanie widma

---

Wielomian Czebyszewa  $T_n$  rzędu  $n$  daje  $n$ -krotne zwiększenie częstotliwości sygnału wejściowego.

Funkcja przekształcająca o postaci  $A_n \cdot T_n(x)$  daje zatem prążek:

- o częstotliwości  $n$  razy większej niż częstotliwość sygnału z generatora
- o amplitudzie  $A_n$  razy większej niż amplituda sygnału z generatora (która jest równa 1, więc amplituda prążka =  $A_n$ )

## Dopasowanie widma

---

A więc znając amplitudy  $A_n$  prążków docelowego widma, możemy obliczyć funkcję przekształcającą jako liniową kombinację wielomianów Czebyszewa:

$$F(x) = \sum_{k=1}^N A_k T_k(x)$$

Zastosowanie takiego wielomianu jako funkcji przekształcającej pozwoli więc uzyskać widmo o pożądanym kształcie!

## Przykład projektowania funkcji

---

Pomierzone amplitudy harmoniczných:

$$A_1=9, A_2=3, A_3=5, A_4=7, A_5=1$$

$$9T_1(x) = \qquad \qquad \qquad 9x$$

$$3T_2(x) = \qquad \qquad \qquad 6x^2 \qquad -3$$

$$5T_3(x) = \qquad \qquad 20x^3 \qquad -15x$$

$$7T_4(x) = \qquad \qquad 56x^4 \qquad -56x^2 \qquad +7$$

$$1T_5(x) = 16x^5 \qquad -20x^3 \qquad +5x$$

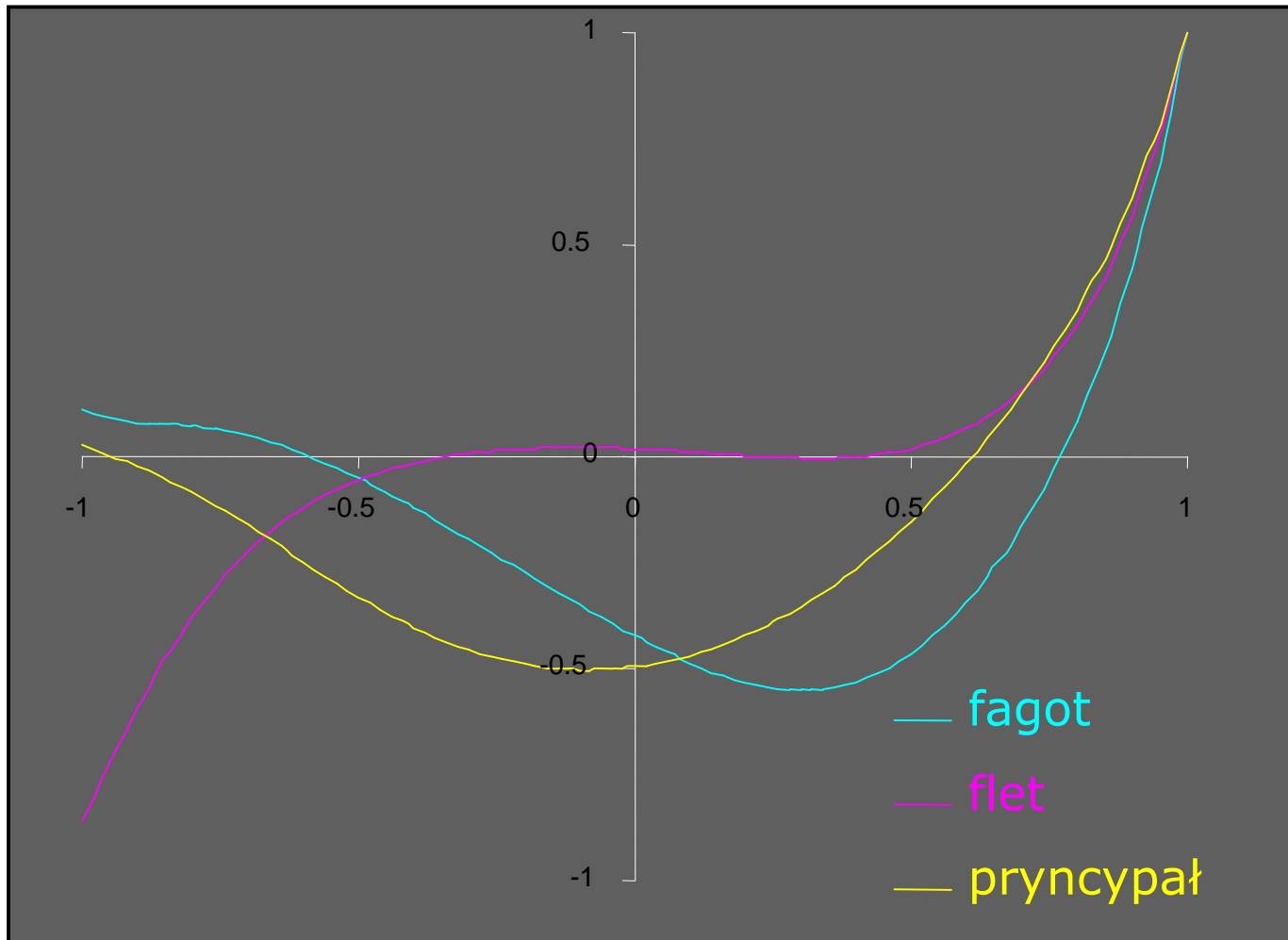
---

$$f(x) = 16x^5 + 56x^4 \qquad - 50x^2 - x + 4$$

# Przykładowe funkcje przekształcające

---

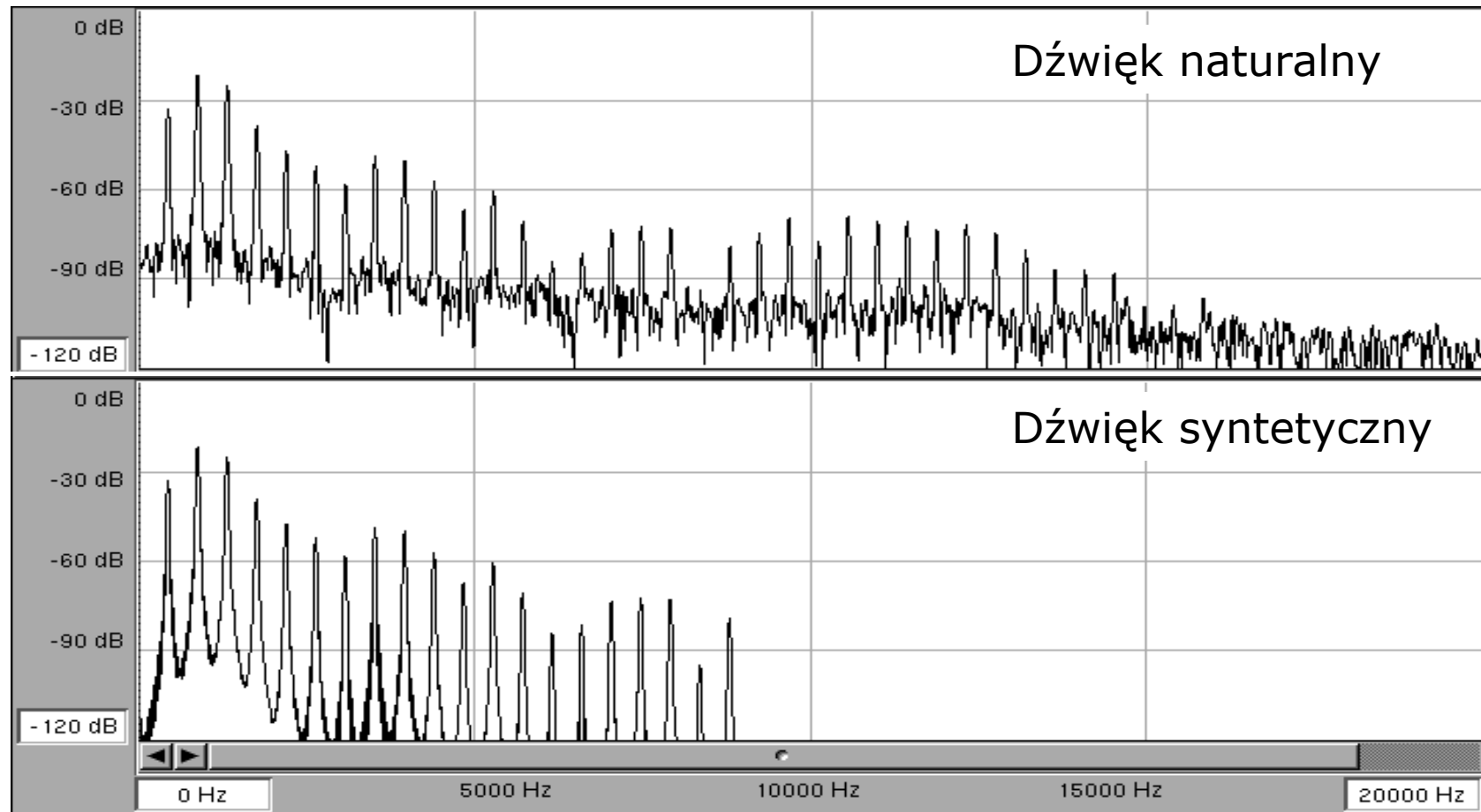
Funkcje przekształcające dla 8 harmonicznym



## Przykład syntezy

---

### Synteza dźwięku fagotu (20 harmonicznnych)



## Synteza widma dynamicznego

---

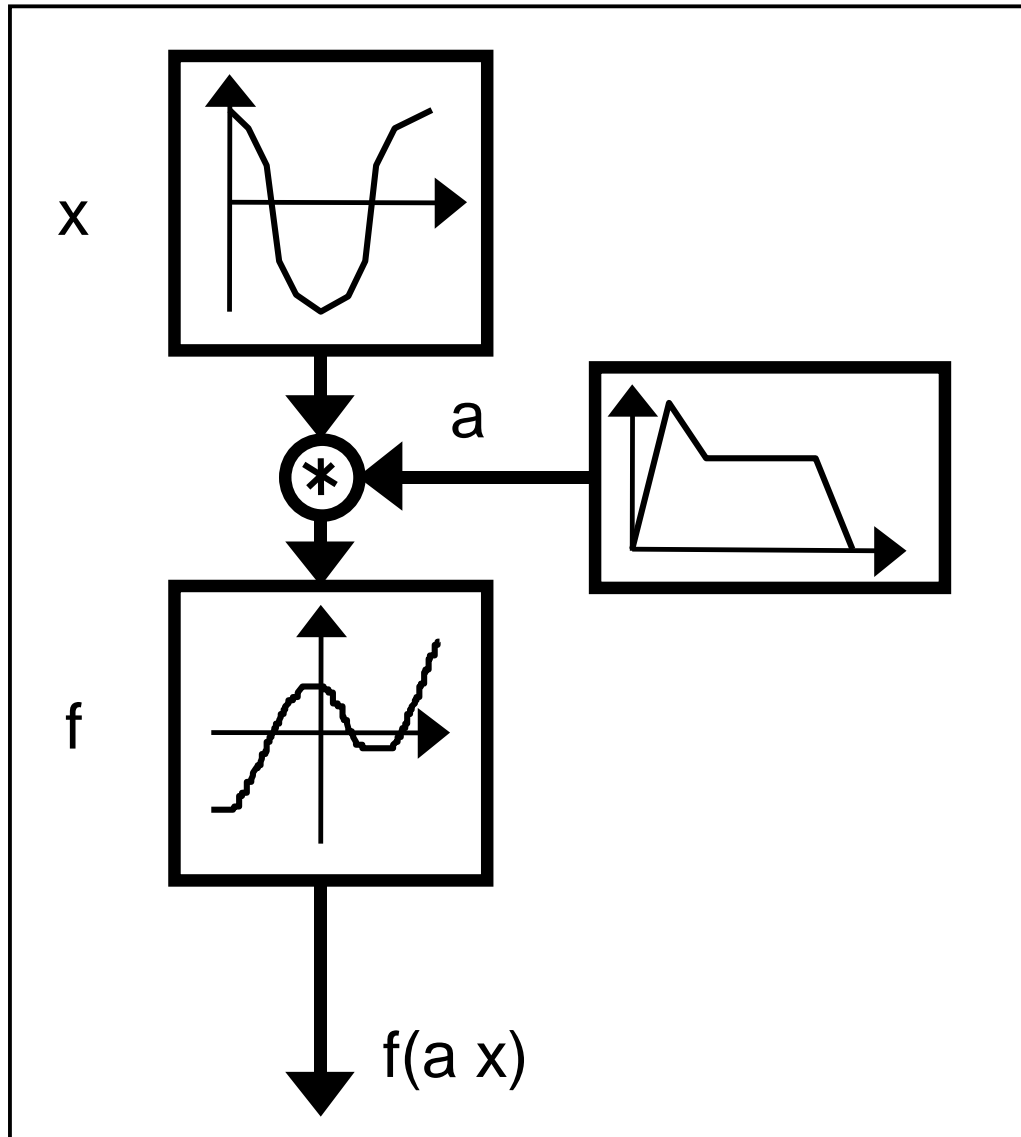
Widmo obliczone w podany sposób jest widmem statycznym – nie zmienia się w czasie trwania dźwięku.

Metoda uzyskania widma dynamicznego

– skalowanie sygnału:

- sygnał cosinus odczytany z tablicy jest mnożony przez współczynnik  $a$  ( $0 \leq a \leq 1$ ), zmienny w czasie
- korzystamy tylko z części funkcji przekształcającej (indeksy od  $-a$  do  $a$ )
- poprzez zmianę funkcji przekształcającej uzyskuje się dynamiczną zmianę widma dźwięku syntetycznego

## Synteza widma dynamicznego



Skalowanie  
sygnału  
wejściowego  
pozwala uzyskać  
zmiennność widma  
w czasie

## Synteza widma nieharmonicznego

---

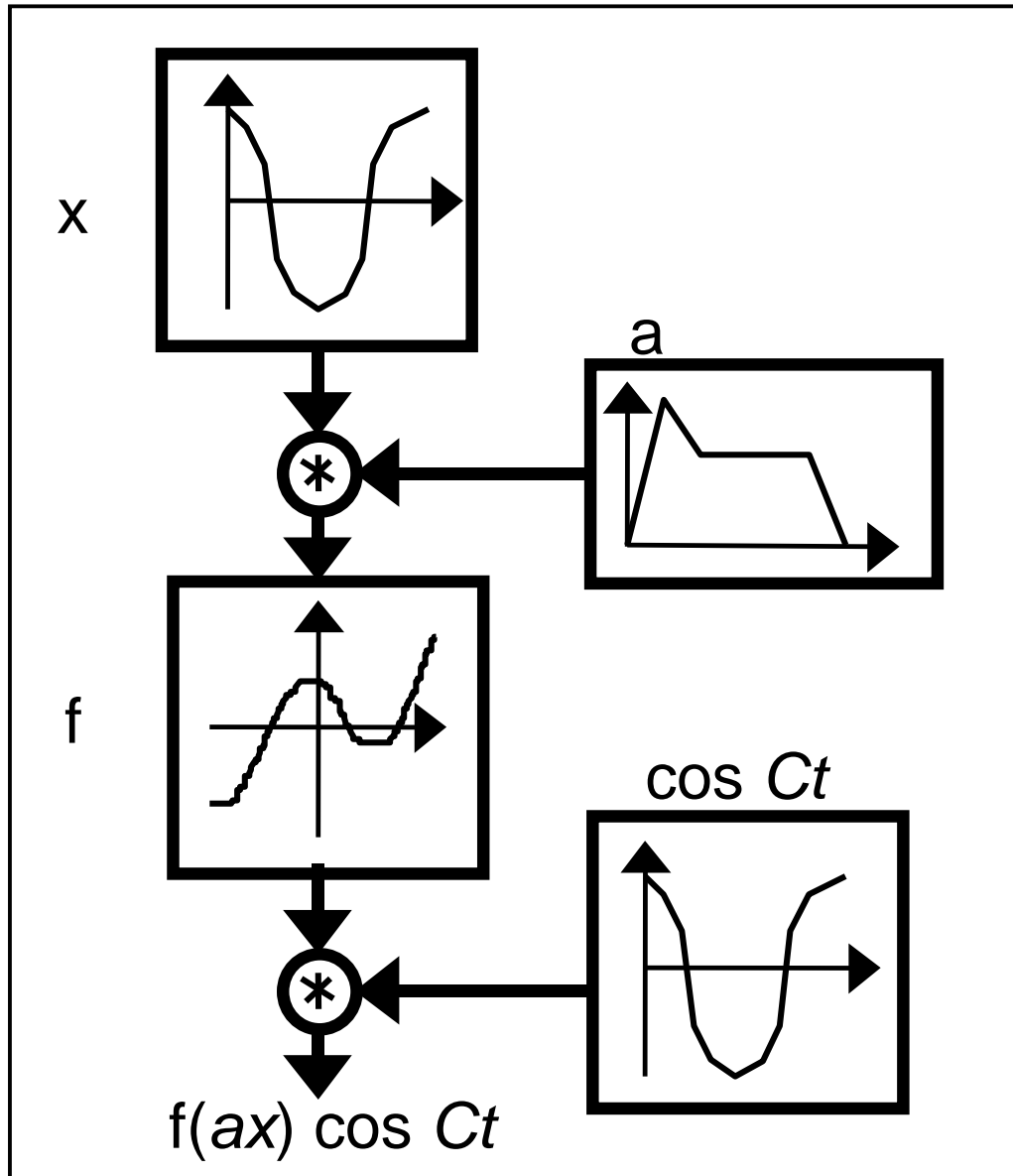
Za pomocą nieliniowej funkcji przekształcającej można uzyskać tylko widmo harmoniczne.

Aby uzyskać widmo nieharmoniczne, można zastosować następujące rozwiązanie:

- sygnał pobrany z wyjścia funkcji przekształcającej jest mnożony przez sygnał sinusoidalny o częstotliwości  $C$

Wprowadzona zostaje modulacja: dla częstotliwości sygnału z generatora  $f$ , każdy prążek widmowy  $k \cdot f$  zostaje zastąpiony przez parę prążków o częstotliwościach  $(C + kf)$  i  $(C - kf)$ . Uzyskujemy widmo nieharmoniczne.

## Synteza widma nieharmonicznego



Sygnal o widmie nieharmonicznym uzyskany przez wprowadzenie dodatkowej modulacji

## Zalety i wady metody waveshaping

---

### Zalety metody przekształcania fali:

- możliwość dopasowania widma – uzyskania realistycznych brzmień instrumentów
- jednocześnie możliwość tworzenia nowych brzmień
- mała złożoność obliczeniowa
- prostota realizacji

### Wady metody przekształcania fali:

- trudność w uzyskaniu dynamicznych zmian widma (transjentów)
- skomplikowane obliczanie funkcji przekształcających

# Metoda zniekształcania fazy

---

Metoda **zniekształcania fazy**

ang. *phase distortion* (PD)

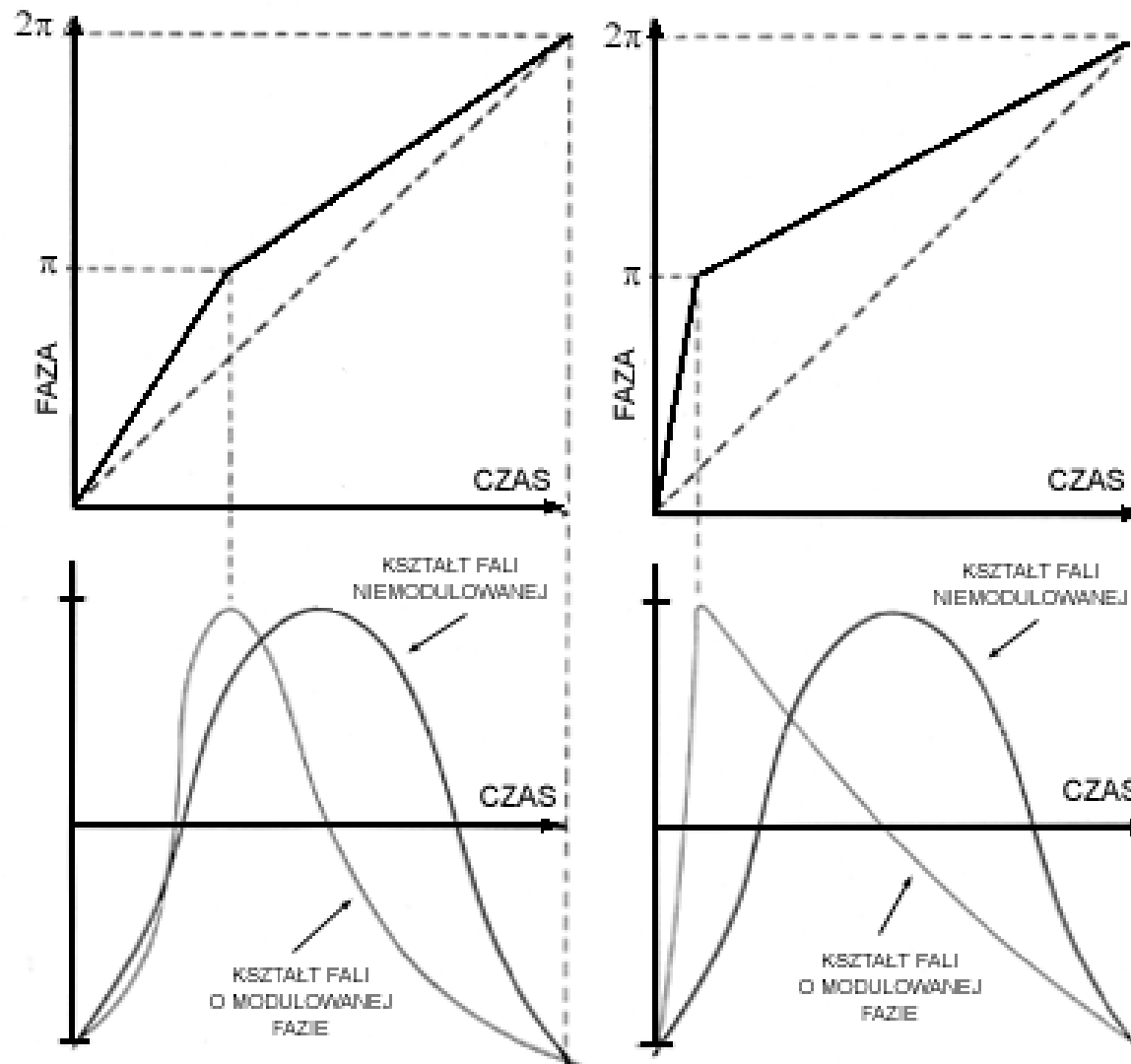
- Metoda syntezy opracowana i wykorzystana komercyjnie przez firmę Casio w instrumentach serii CZ (1985-1988).
- Należy również do cyfrowych metod matematycznych.
- Charakteryzuje się „mocno syntetycznym” brzmieniem

## *Metoda zniekształcania fazy*

---

- Metoda zniekształcania fazy polega na dynamicznej zmianie fazy sygnału sinusoidalnego odczytywanego z generatora tablicowego.
- Modulację fazy uzyskuje się poprzez ciągłe zmiany szybkości, z jaką próbki są odczytywane z pamięci.
- Na skutek zniekształcania fazy, do sygnału dodawane są harmoniczne, a częstotliwość podstawowa dźwięku równa jest częstotliwości sygnału pochodzącego z generatora.

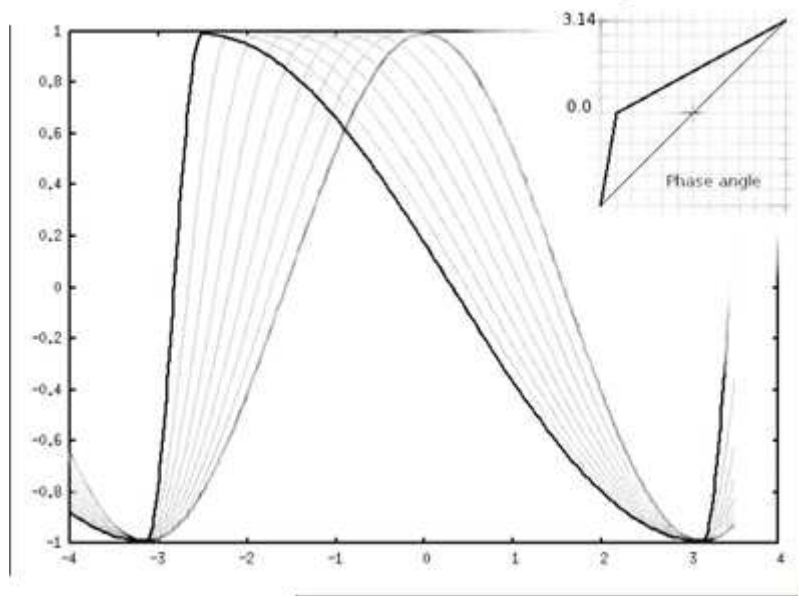
# Metoda zniekształcania fazy



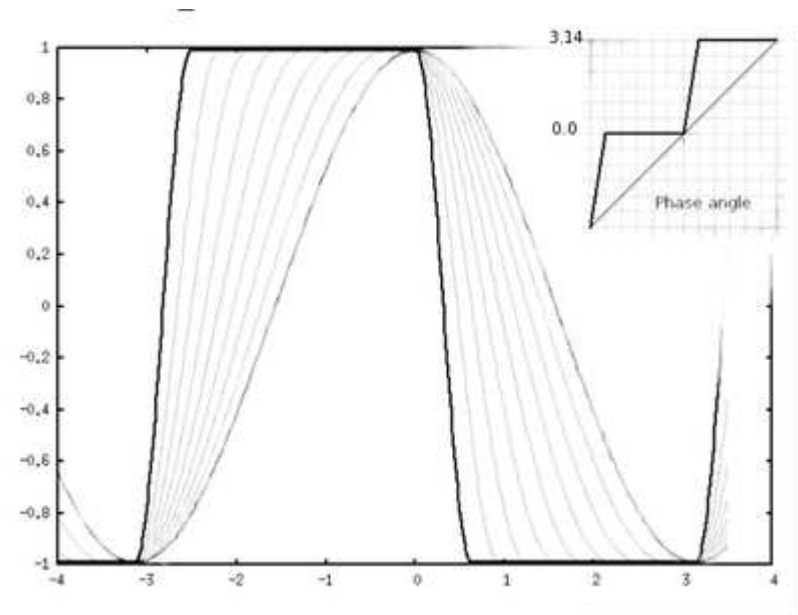
# Przykłady zniekształcania fazy

---

sinus  $\rightarrow$  piła



sinus  $\rightarrow$  prostokąt

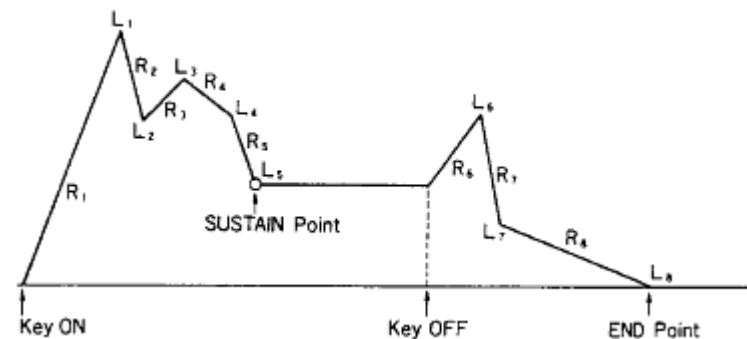


## Instrument PD

---

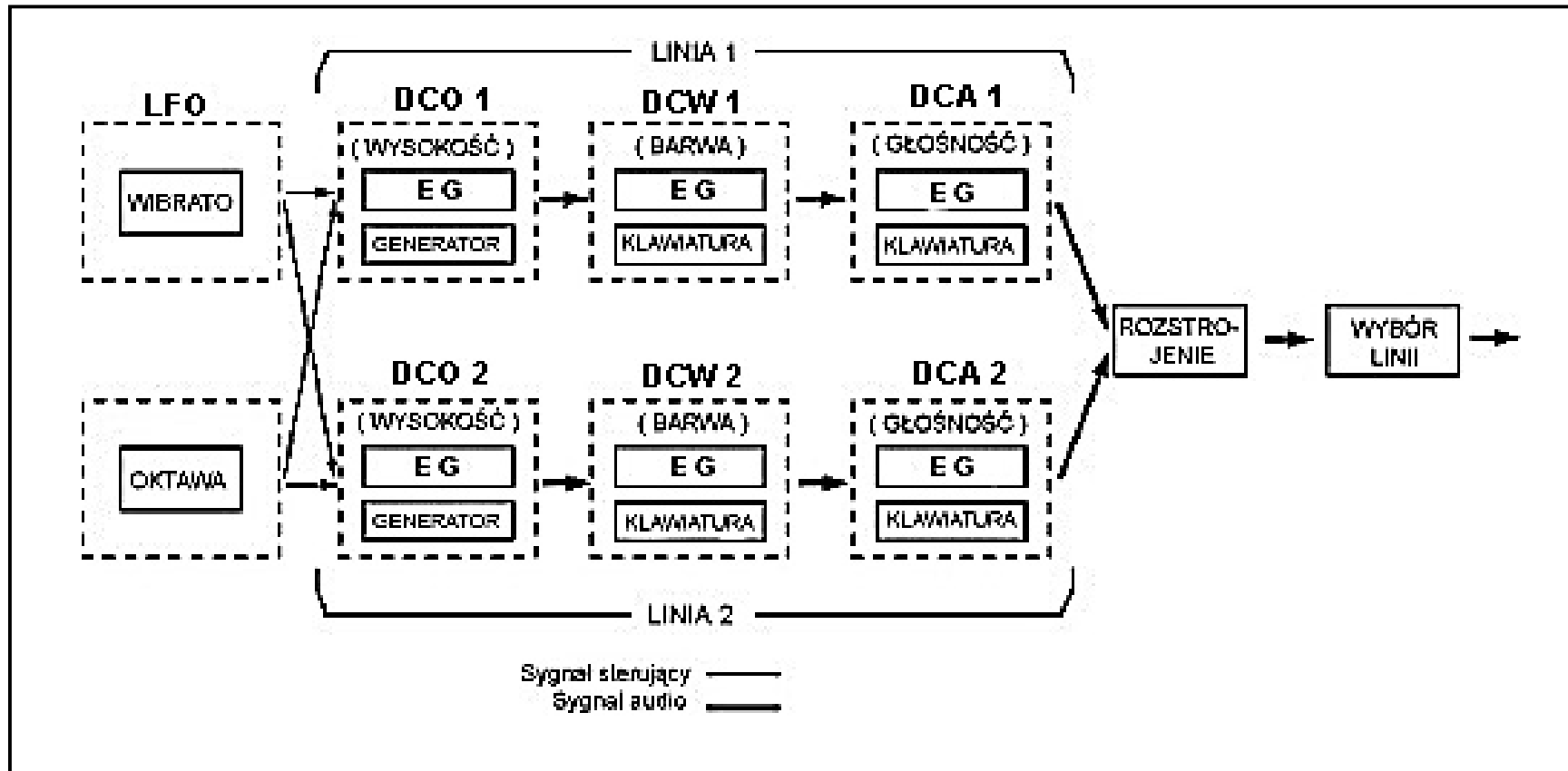
Budowa instrumentu działającego w oparciu o metodę zniekształcania fazy:

- generator DCO (*Digitally Controlled Oscillator*)
- blok zniekształcania fazy DCW (*Digitally Controlled Wave*)
- wzmacniacz DCA (*Digitally Controlled Amplifier*)
- generatory obwiedni EG (8 segmentów)
  - sterowanie blokami



# Instrument PD

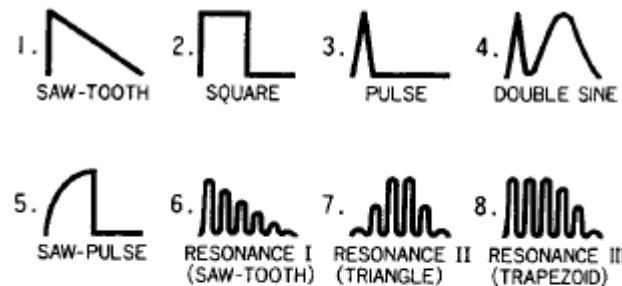
## Schemat instrumentu CASIO CZ-01




# Generator DCO

---

- Sygnały zapisane w tablicy próbek
- 8 podstawowych kształtów fali
- Możliwość łączenia kształtów w pary
- W sumie 33 możliwe kształty fali
- Obwiednia steruje wysokością dźwięku



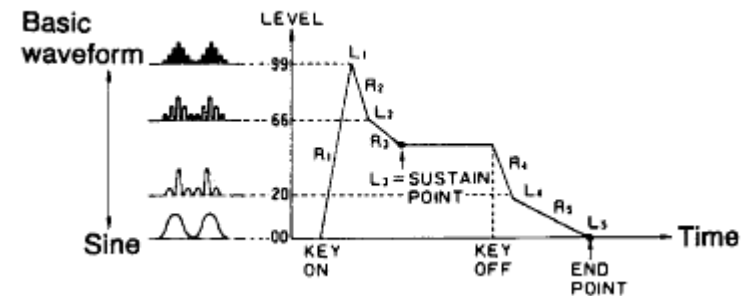
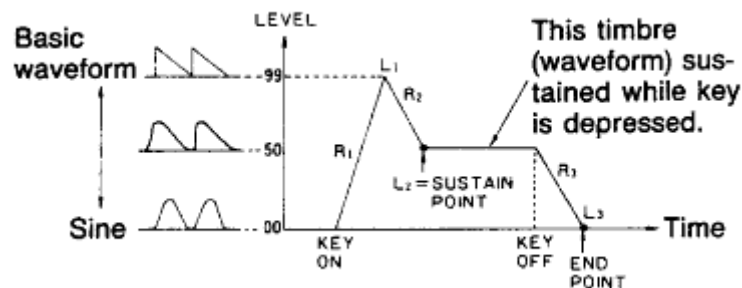
 — Combination of SAW-TOOTH and SQUARE

 — Combination of SAW-PULSE and RESONANCE I

## DCW - Digitally controlled wave

---

- Obwiednia steruje stopniem zniekształcenia sygnału (*morphing* kształtu fali):
  - 0: sinus (sygnał nie zniekształcony)
  - 99: wybrany kształt fali (pełne zniekształcenie)
- *Key follow*: maksymalne zniekształcenie zależne od numeru klawisza (9 funkcji)



# Wzmacniacz DCA i Velocity

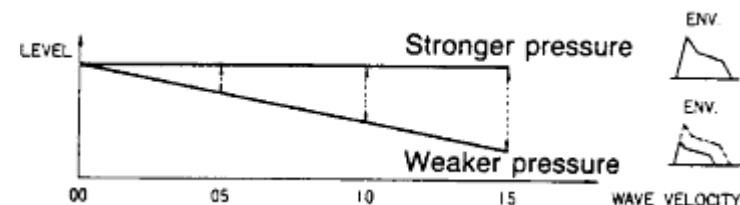
---

## Wzmacniacz DCA

- Obwiednia – steruje głośnością (transjenty)
- *Key follow* – skraca transjenty w zależności od numeru klawisza (9 funkcji)

## Funkcja *Velocity*

- skalowanie funkcji obwiedni w zależności od prędkości naciskania klawisza
- np. obwiednia *Wave* – zmiana maksymalnego stopnia zniekształcenia fali



## *Dodatkowe funkcje*

---

- *Vibrato* – modulacja generatora przez LFO
- *Octave*- podwyższanie/obniżanie dźwięku
- Łączenie sygnałów z dwóch torów syntezy:
  - *Detune* – rozstrojenie generatorów 1 i 2
  - *Line select* – wybór toru 1, 2 lub 1+2
  - *Ring modulation* – mnożenie sygnałów z obu torów
  - *Noise modulation* – sygnał wyjściowy modulowany przez szum

# *Instrumenty Casio CZ*

---

CZ-101 (1985)



CZ-5000 (1985)



CZ-1 (1986)



# Synteza programowa

---

Programowe synteza PD (wybór):

- Musicrow White Crow VST
- Algo Music M51galaxy
- PhadiZ (darmowy,  
<http://www.algomusic.net/freeware.html>)



## Zalety i wady metody PD

---

### Zalety metody zniekształcania fazy:

- możliwość tworzenia nowych brzmień
- mała złożoność obliczeniowa
- prostota realizacji, niski koszt, łatwa obsługa

### Wady metody przekształcania fali:

- brak możliwości dopasowania widma
- mała kontrola nad widmem sygnału
- mniejsze możliwości brzmieniowe niż w metodzie FM czy kształtowania fali

# Literatura

---

- Marc Le Brun: *Digital Waveshaping Synthesis*. AES Journal, Vol. 27, No. 4, pp. 250-266, 1979.
- Casio CZ-1 Operation Manual:  
<http://www.synthzone.com/midi/casio/cz1/>
- Casio Sound Synthesis Handbook:  
<http://www.vintagesynth.com/manuals/CasioCZSeries-SoundSynthesisHandbook.pdf>
- Phadiz – programowy syntezytor PD (VSTi):  
[http://www.algomusic.net/downloads/Phadiz\(P\).zip](http://www.algomusic.net/downloads/Phadiz(P).zip)
- Vintage Synthe Explorer: [www.vintagesynth.com](http://www.vintagesynth.com)  
(dział instrumentów firmy Casio)
- Wikipedia (wersja angielska)