

# SYNTEZA SUBTRAKTYWNA

# Wprowadzenie

---

## Synteza subtraktywna (*subtractive synthesis*)

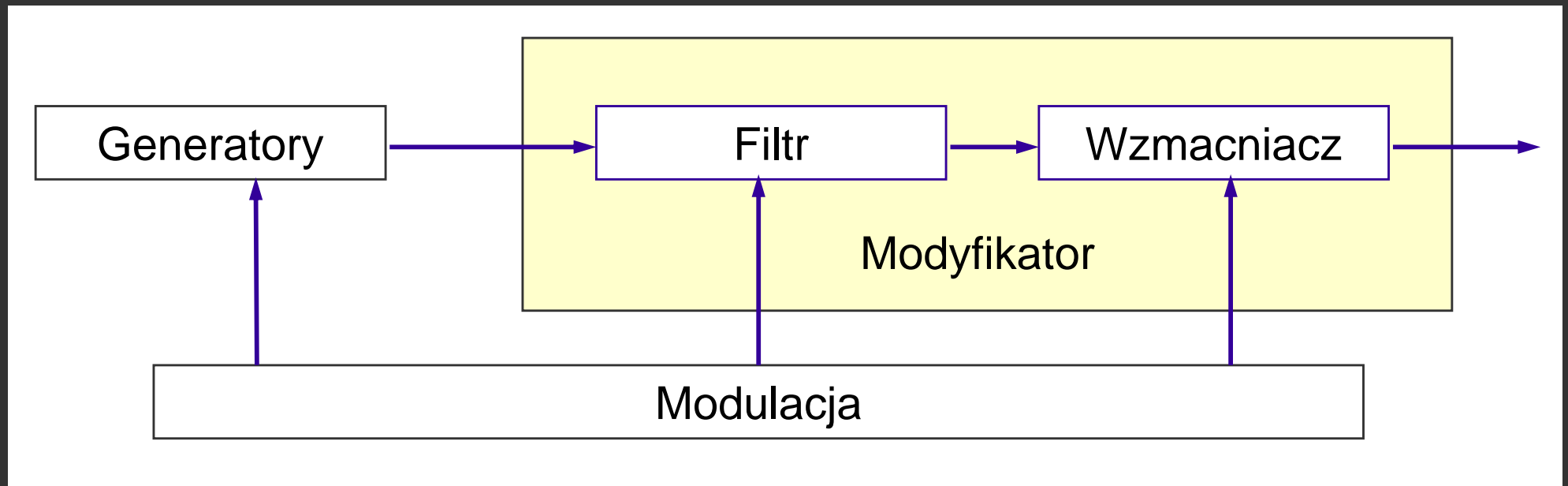
- Nie „sub**s**traktywna”! Od łac. *subtractio*- odejmowanie
- Metoda syntezy: pierwsza, analogowa, modularna, najbardziej popularna, najlepsza 😊
- Nadal często stosowana sprzętowo i programowo
- Ogólna zasada:
  - **generatory** tworzą złożony sygnał harmoniczny
  - **filtry** kształtują statyczne widmo
  - **modulatory** nadają dźwiękowi życie

# „Źródło - modyfikator”

---

Metoda subtraktywna działa w oparciu o zasadę  
”źródło – modyfikator”

- źródło – generator
- modyfikator – filtry i modulatory



# „Źródło - modyfikator”

---

	Gitara	Syntezytor
Źródło	Drgająca struna	Sygnały z generatorów
Modyfikator	Pudło rezonansowe	Filtry
Modulacja	Zmiana sposobu uderzania i przyciskania strun	Układ modulujący parametry źródła i modyfikatora

# Generator VCO

---

VCO – generator sterowany napięciowo

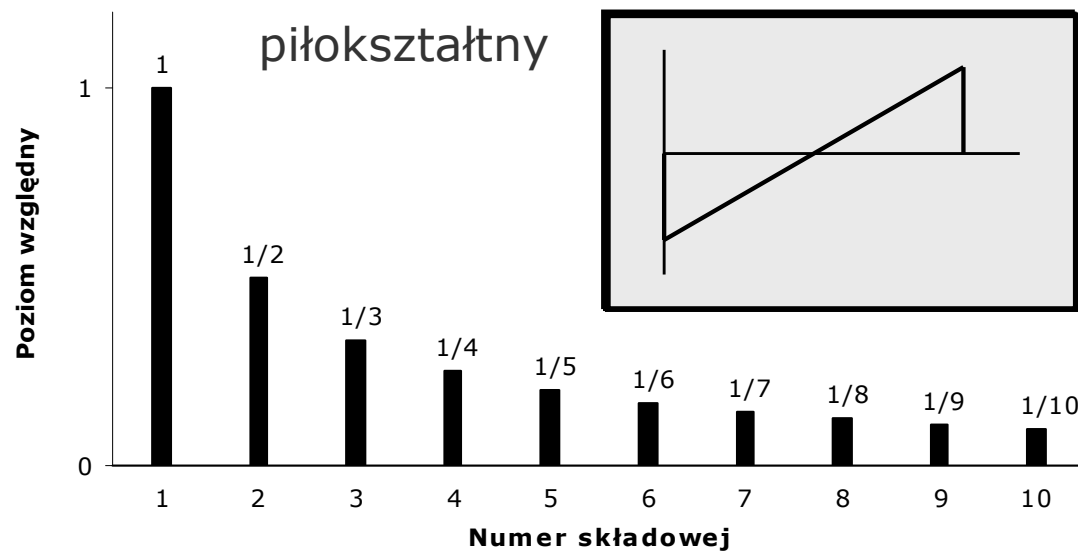
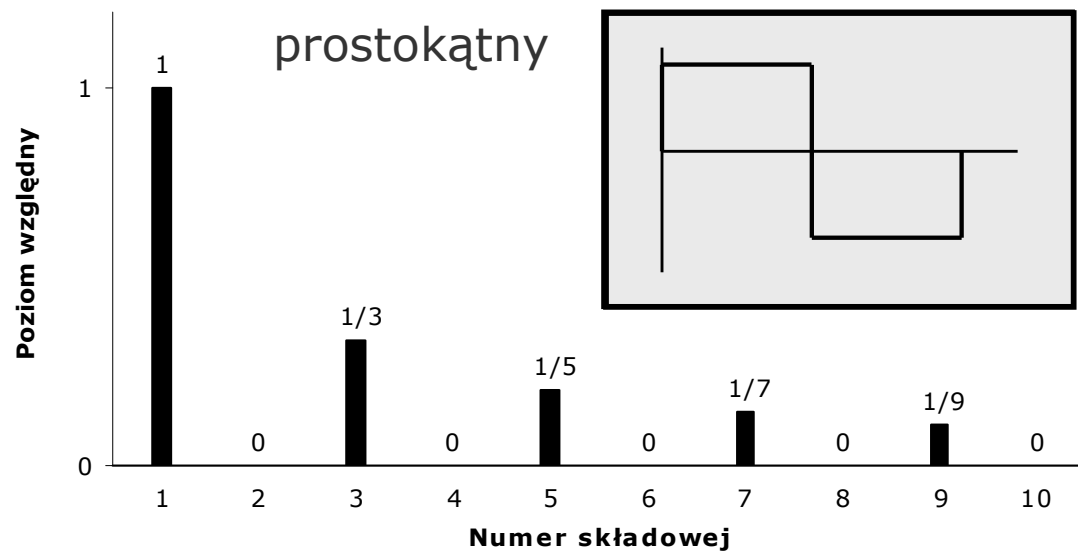
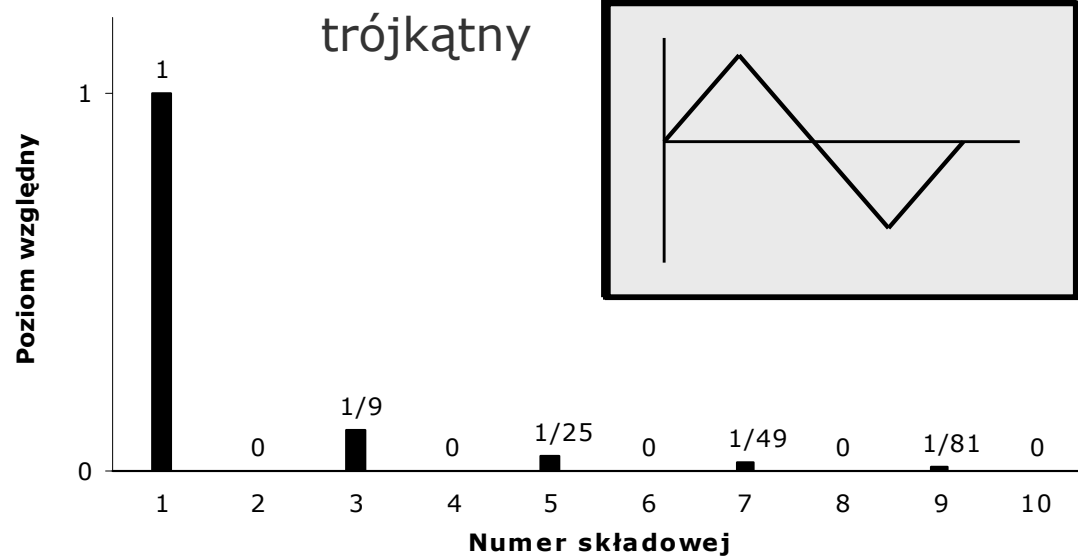
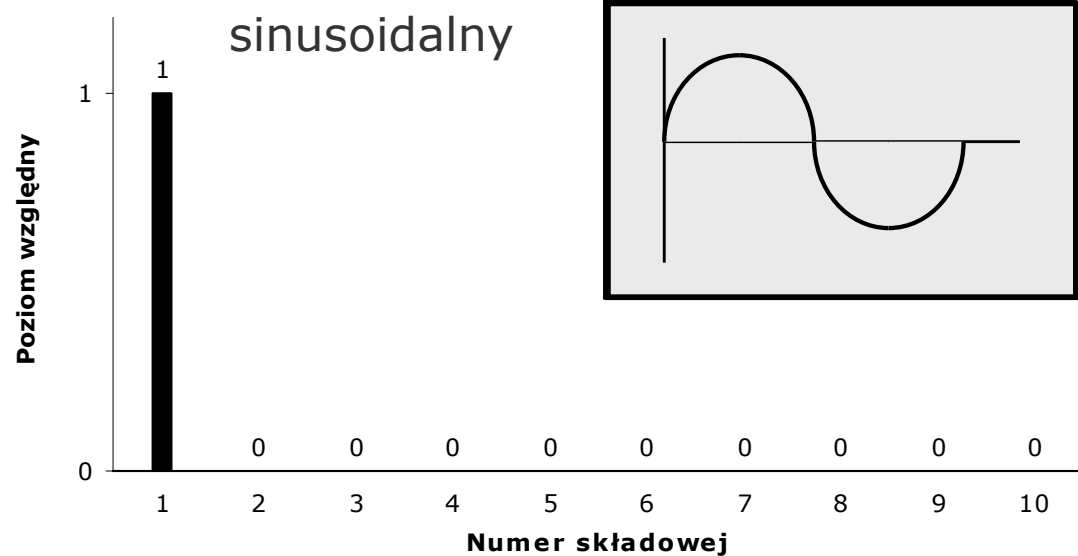
ang. *Voltage Controlled Oscillator*

Sygnały harmoniczne w klasycznych VCO:

- fala sinusoidalna (*sine*)
- fala trójkątna (*triangle*)
- fala prostokątna (*square*)
  - zmienny współczynnik kształtu fali (*pulse width*)
- fala piłokształtna (*sawtooth*)

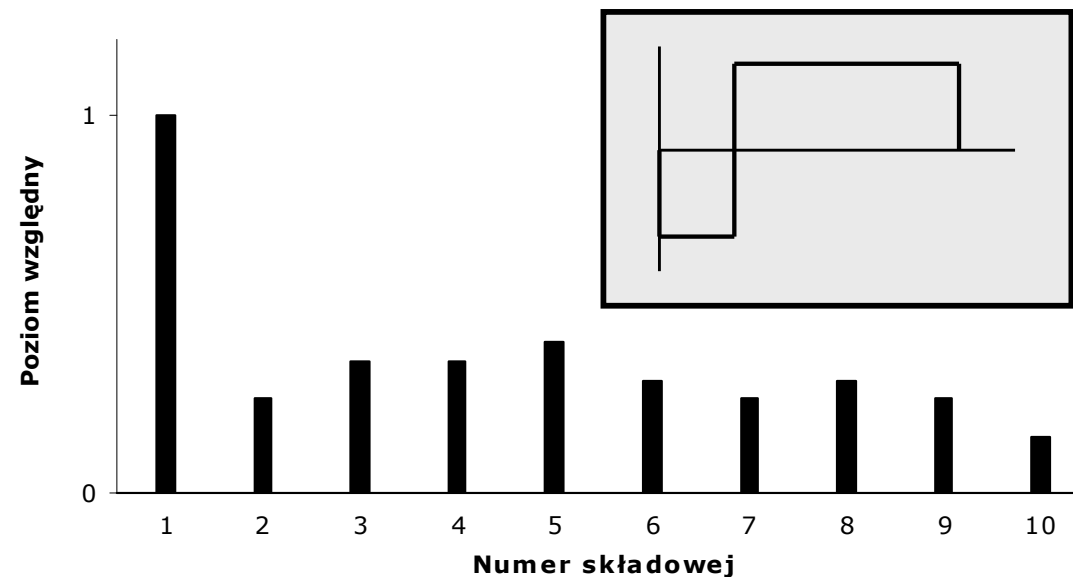
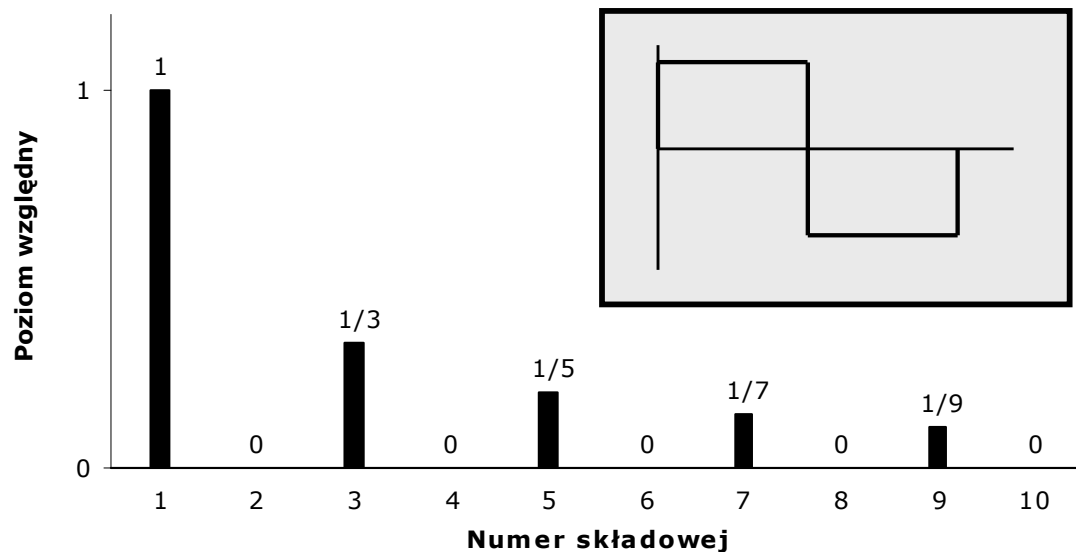
W nowszych implementacjach spotyka się również inne, bardziej złożone kształty fali.

# Widma prostych sygnałów



# Widma prostych sygnałów

Sygnal prostokątny o zmiennym współczynniku kształtu  
(*fill rate* lub *pulse width*)

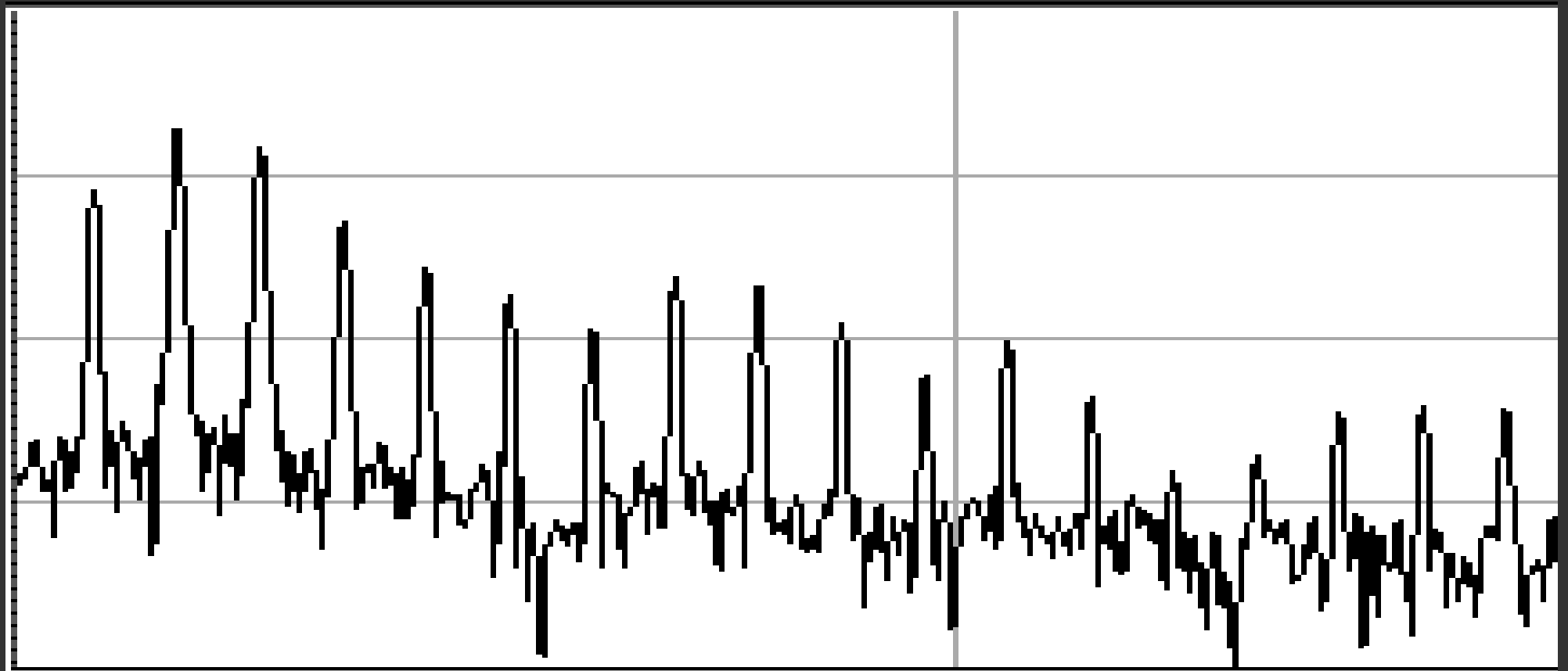


Widmo sygnału zależy od współczynnika wypełnienia fali.  
Im bardziej różni się on od 50%, tym bardziej rośnie poziom prążków parzystych i maleje poziom prążków nieparzystych.

# Widma dźwięków muzycznych

---

Czy to nam coś przypomina?

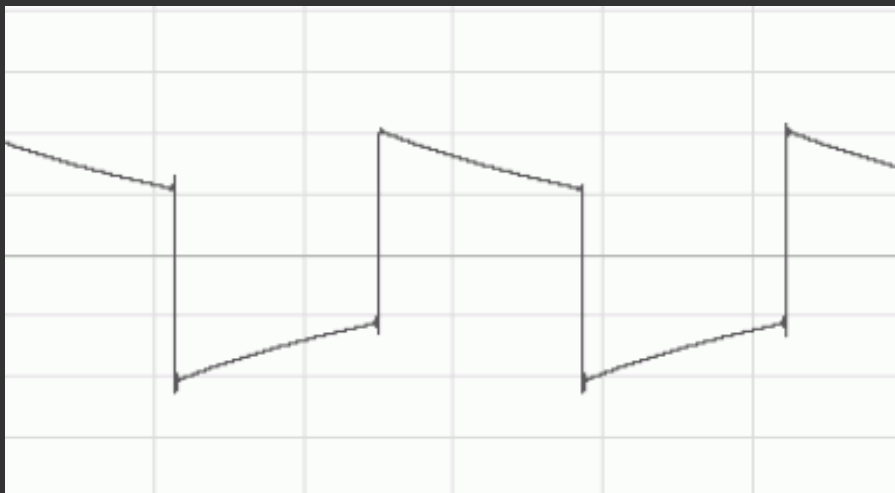
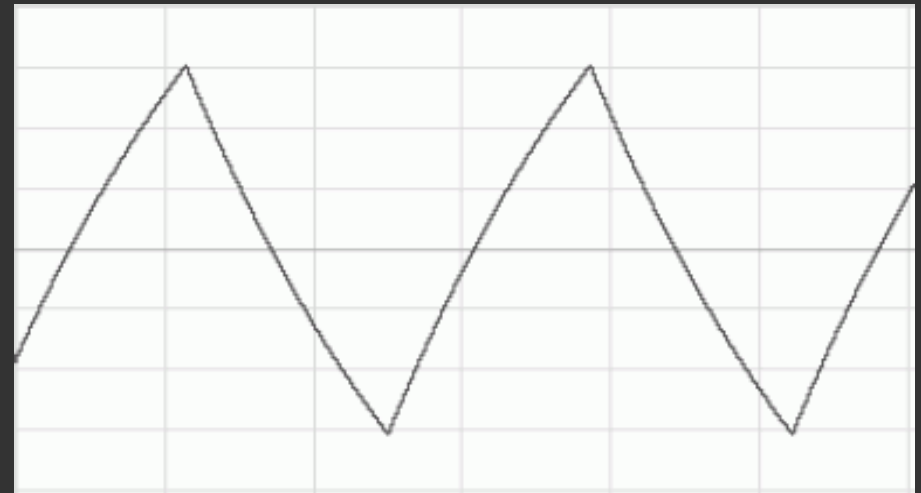
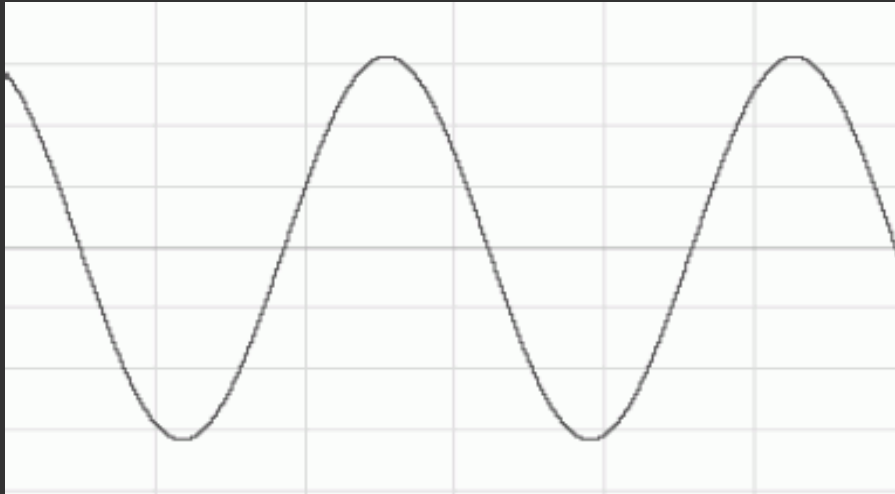




# Sygnaly generowane przez analogowe VCO

---

Rzeczywiste kształty fali w *Moog Modular*



# Sterowanie napięciowe generatora

---

Co to znaczy „*voltage controlled*”?

**Sterowanie napięciowe** (VC) oznacza, że parametry generatora (częstotliwość, współczynnik kształtu) zależą od wartości **napięcia sterującego**.

Skąd wziąć to napięcie sterujące?

- Z klawiatury (sterowanie wysokością dźwięku)
- Z pokręteł na panelu (zmiana oktawy, odstrojenie)
- Z sygnału podanego na **wejście sterujące**, wysłanego z innego modułu (z **modulatora**)

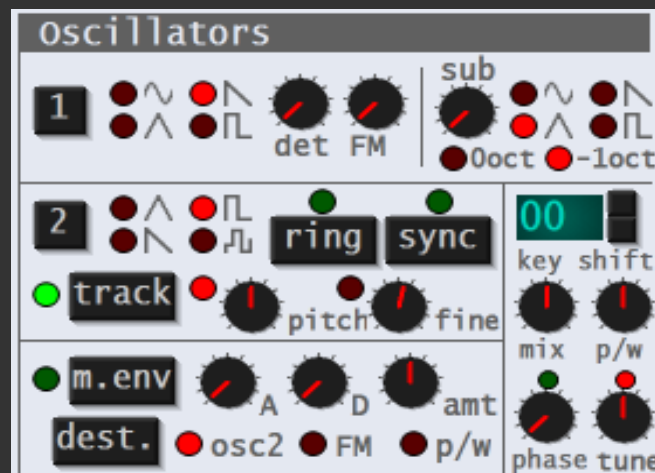
# VCO - generator

## Parametry generatora VCO:

- kształt sygnału (rodzaj fali)
- częstotliwość (odstrojenie)
  - zgrubne (*coarse*) - oktawy
  - dokładne (*fine*) - centy
- współczynnik kształtu fali prostokątnej (PWM)

## Wejścia modulujące:

- częstotliwość
- wsp. kształtu

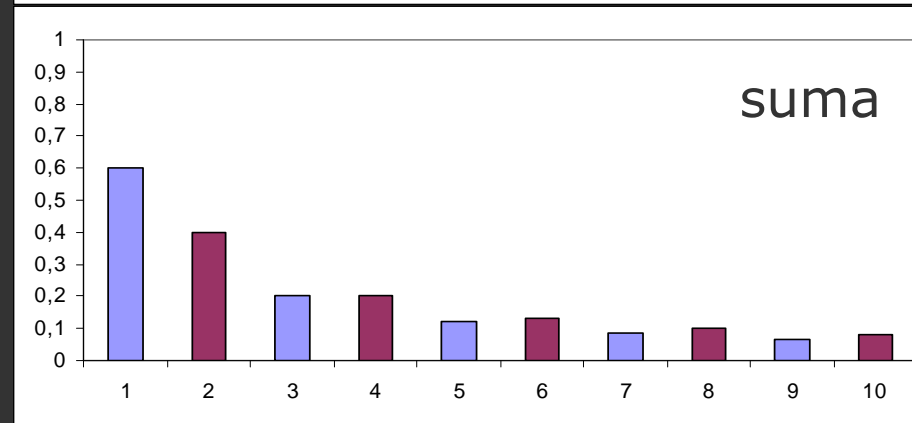
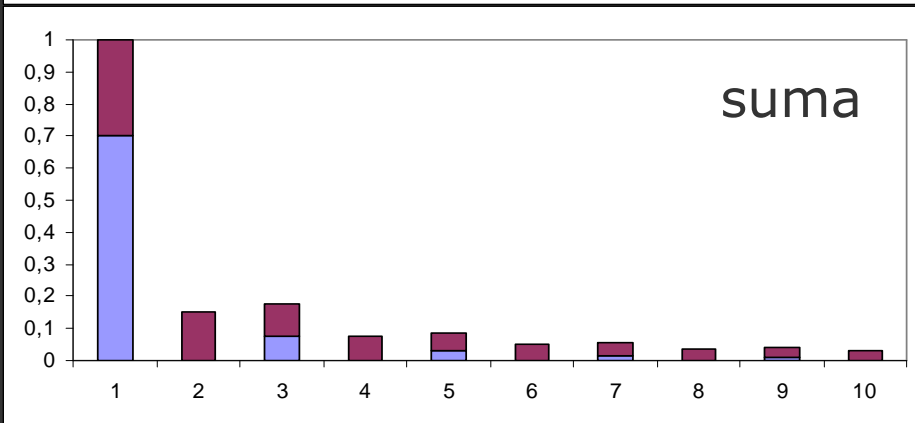
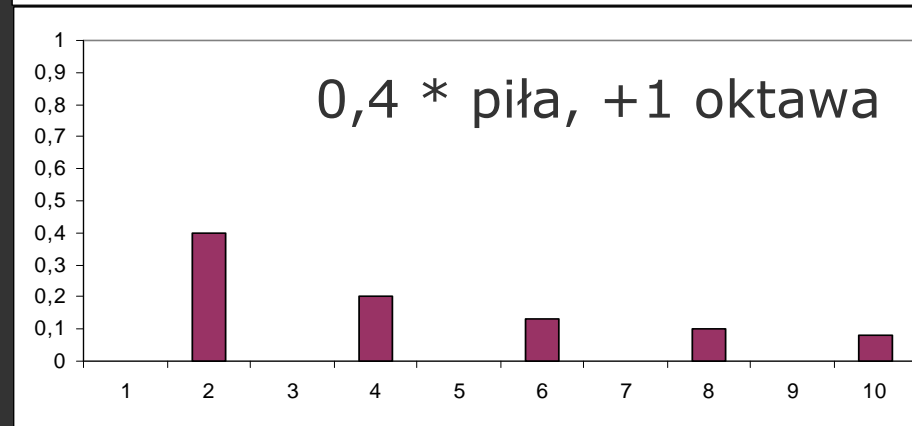
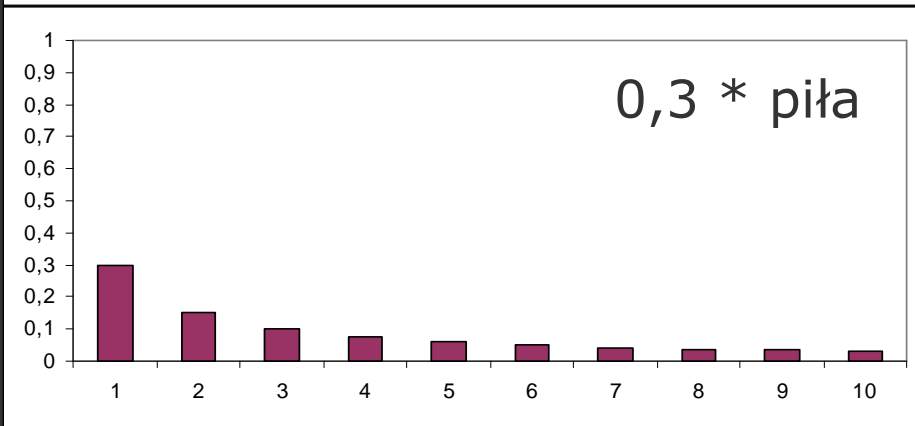
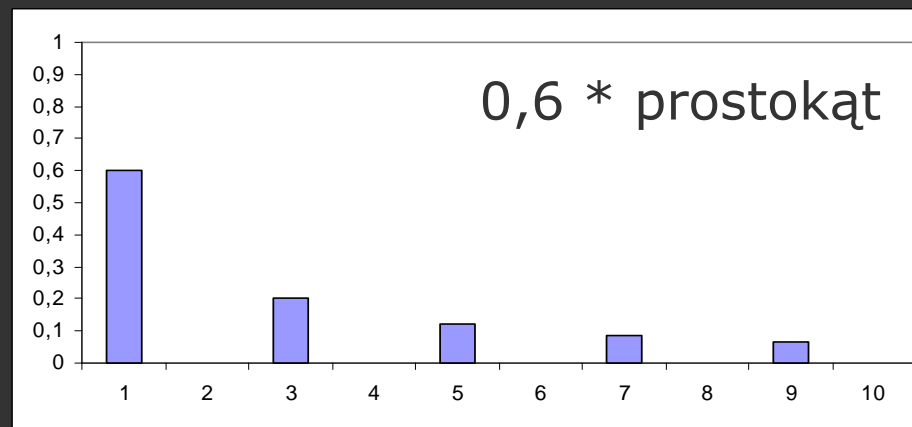
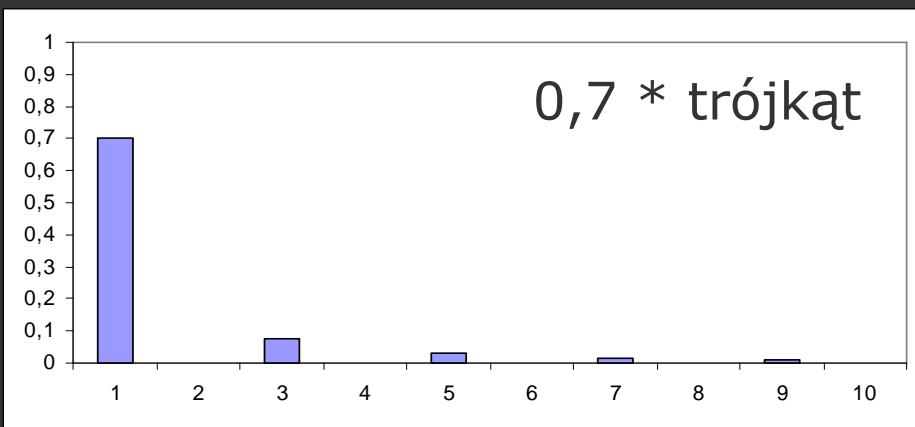


# Zastosowanie kilku generatorów

---

- Jeden generator to trochę mało. W praktyce łączy się (sumuje) sygnały z kilku (zwykle 2-3) generatorów VCO
- Można ustawiać proporcje między sygnałami
- Typowe przypadki:
  - różne kształty fali, ta sama częstotliwość
  - odstrojenie jednego sygnału o jedną lub więcej oktaw w górę lub w dół
  - nieznaczne odstrojenie częstotliwości jednego sygnału – efekt zdudnienia
- Możemy wstępnie ukształtować obwiednię widma sygnału – pozbyć się regularności

# Zastosowanie kilku generatorów



# Zastosowanie kilku generatorów

---

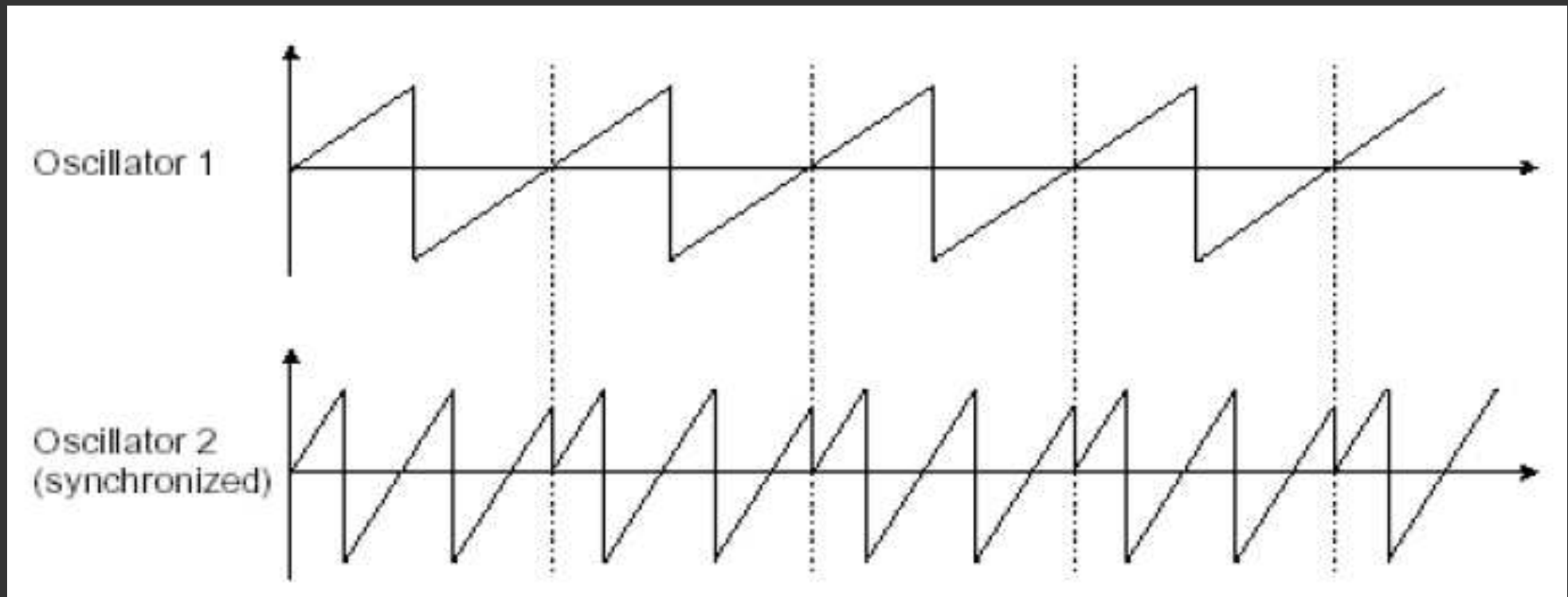
Inne sposoby łączenia kilku generatorów VCO:

- **modulacja częstotliwości (FM)** – częstotl. generatora 1 jest zmieniana przez sygnał z generatora 2; wytwarza sygnały o gęstym widmie
- **modulacja kołowa (ring modulation)** – mnożenie sygnałów z dwóch generatorów, wytwarza głównie sygnały nieharmoniczne (do efektów dźwiękowych)
- **synchronizacja (sync)** – początek okresu generatora 1 „resetuje” fazę generatora 2 – wytwarzane są sygnały harmoniczne o bardziej złożonym widmie

# Synchronizacja generatorów VCO

---

VCO1 synchronizuje VCO2:  
każdy początek okresu fali w VCO1 powoduje  
„wyzerowanie fazy” w VCO2



# Filtr VCF

---

VCF – filtr sterowany napięciowo (*Voltage Controlled Filter*)

Układ modyfikujący widmo sygnału z generatorów

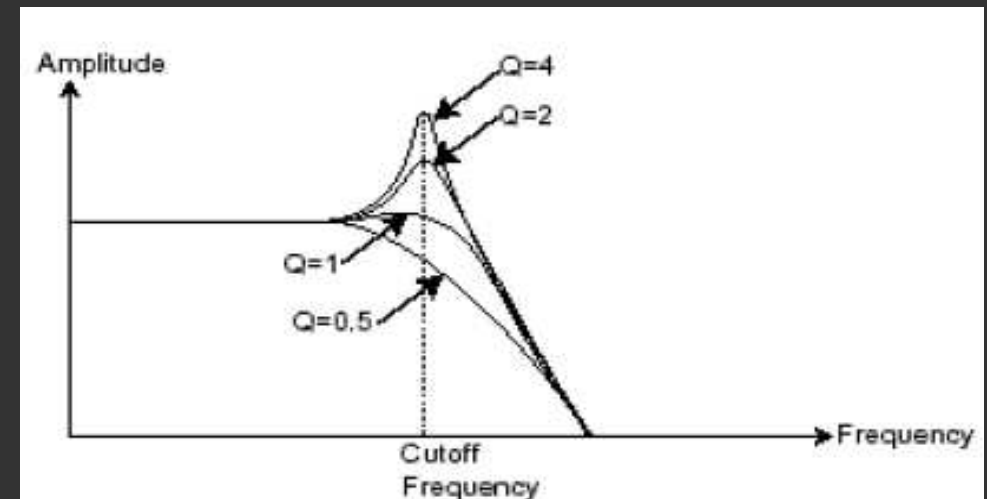
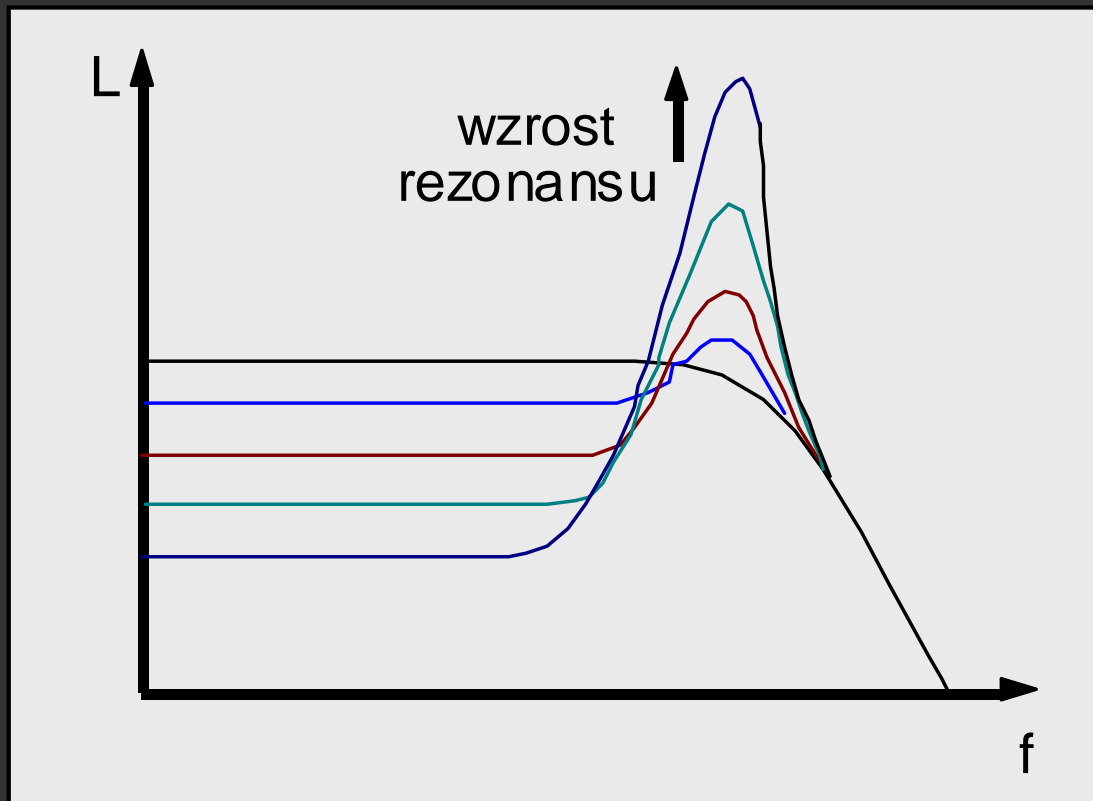
- **stłumienie** wybranego zakresu częstotliwości, ustalanego przez **częstotliwość graniczną** (*cut-off*)
- charakterystyka: dolnoprzepustowy, górnoprzepustowy, pasmowo-przepustowy
- szerokość pasma przejściowego – nachylenie zbocza charakterystyki (typowo: 12, 18, 24 dB/okt)
- **rezonans** (*resonance, emphasis, Q*) – wzmocnienie widma w pobliżu częstotliwości granicznej



# VCF - przykładowe charakterystyki

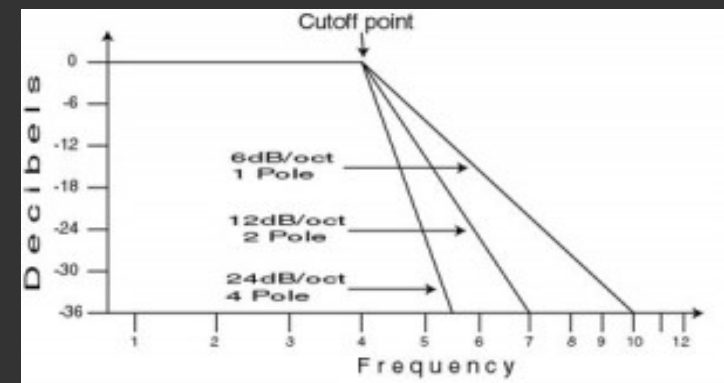
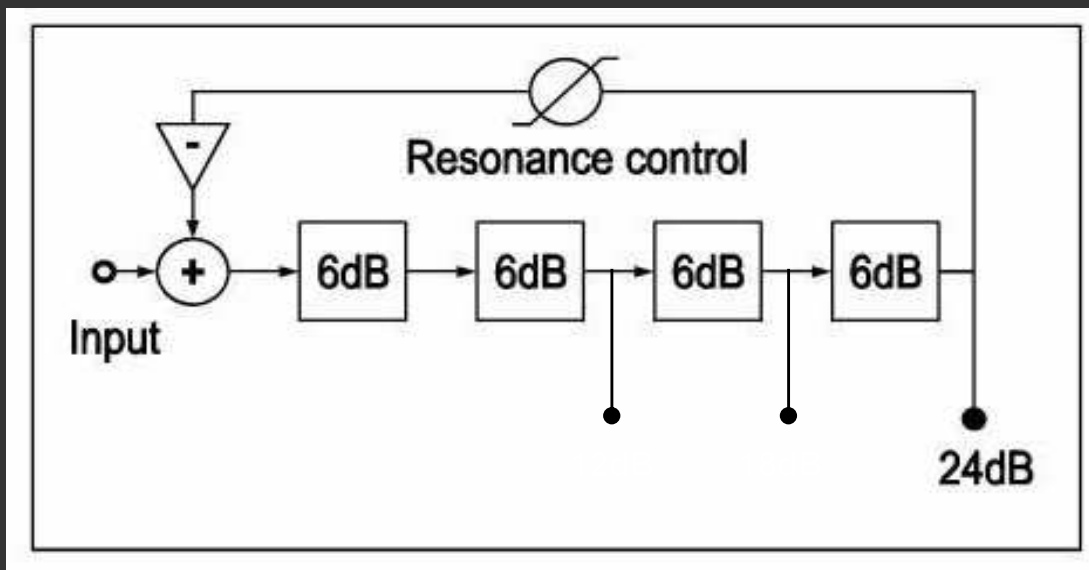
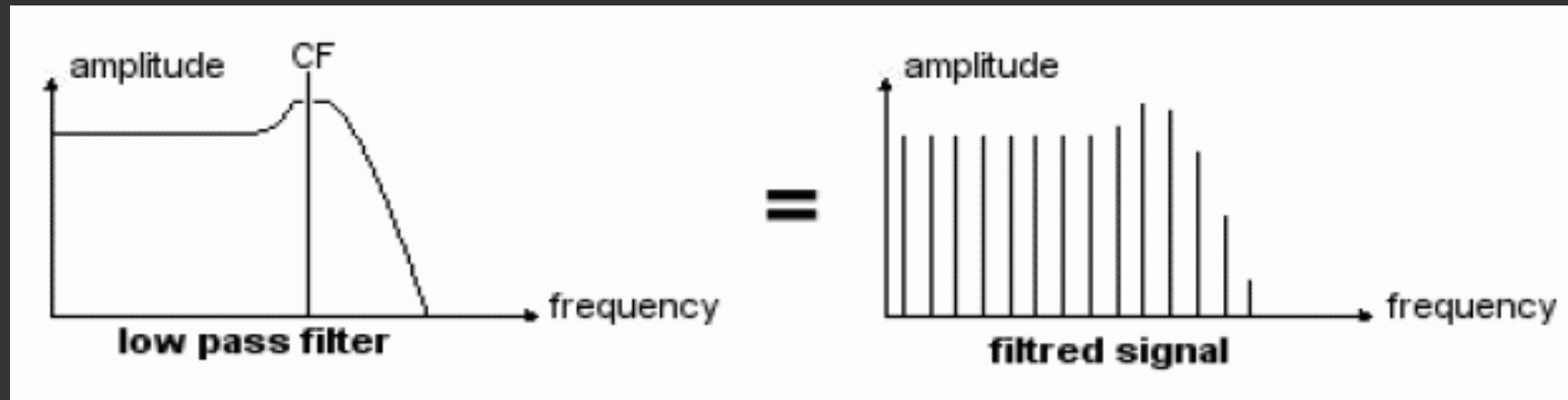
Filtr dolnoprzepustowy (DP) – najczęściej używany w syntezie subtraktywnej

- $Q$  – rezonans, podbicie widma
- *cutoff* – początek pasma tłumienia



# Nachylenie filtru VCF

Nachylenie charakterystyki filtru decyduje o zakresie modyfikowanych częstotliwości sygnału

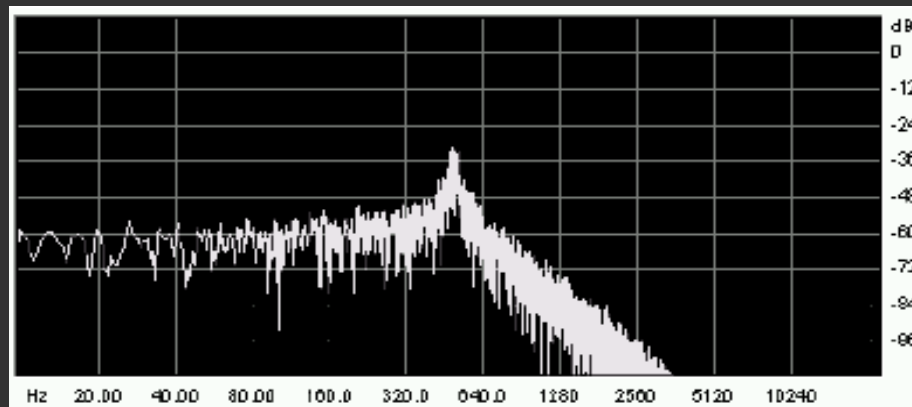


# VCF - wynik działania

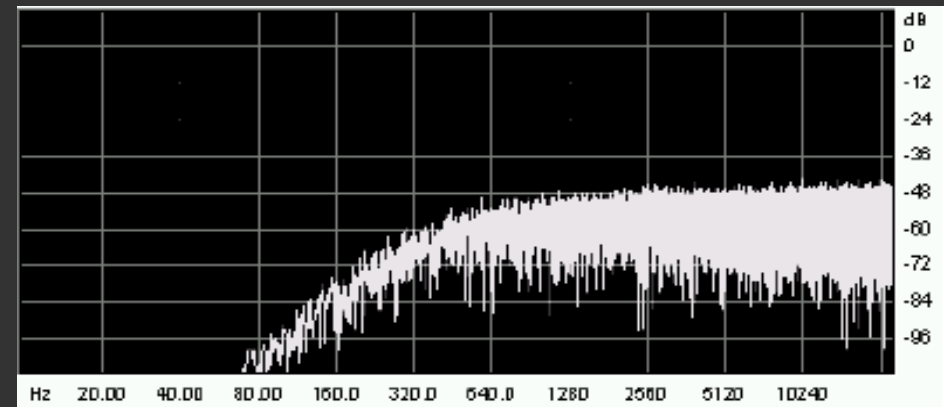
---

Widmo szumu białego po filtracji

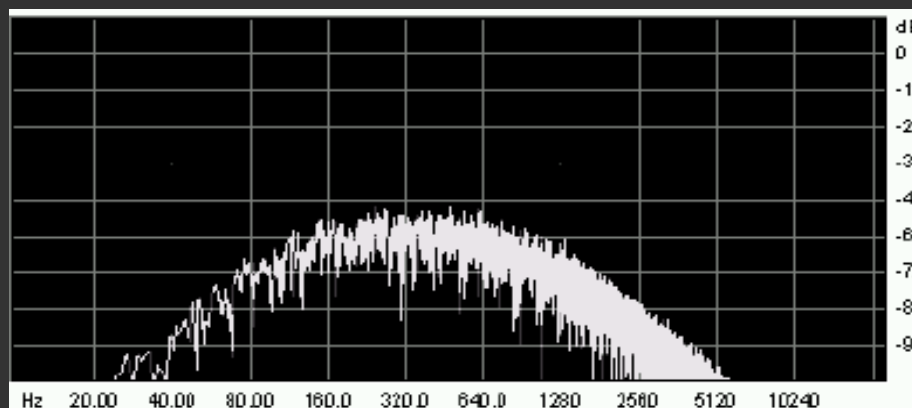
**LP** (dolnoprzepustowy)



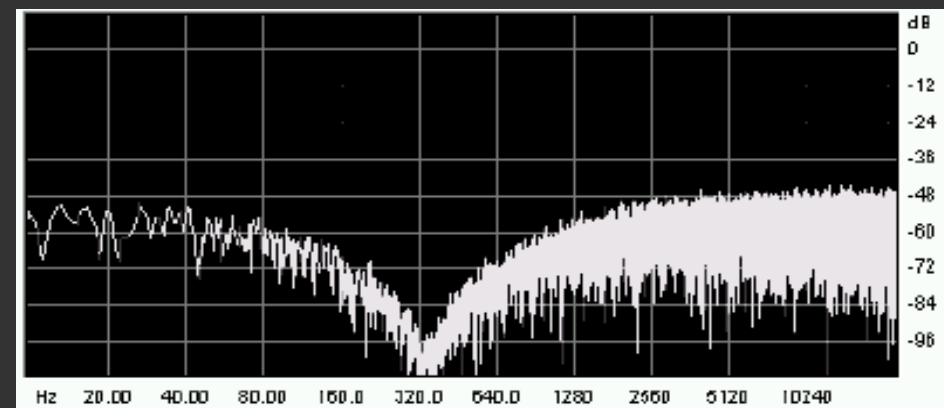
**HP** (górnoprzepustowy)



**BP** (pasmowo-przepustowy)



**BR** (pasmowo-zaporowy)



# VCF - filtr

## Parametry filtru VCF:

- rodzaj charakterystyki – LP, HP, BP, *notch*
- częstotliwość graniczna
- rezonans (Q, *res*)
- nachylenie zbocza

## Wejścia modulujące:

- cz. graniczna
- rezonans (rzadko)



# Keyboard follow

---

*Key follow* pozwala sterować parametrami modułu za pomocą napięcia z klawiatury, a więc zależnie od wciśniętego klawisza.

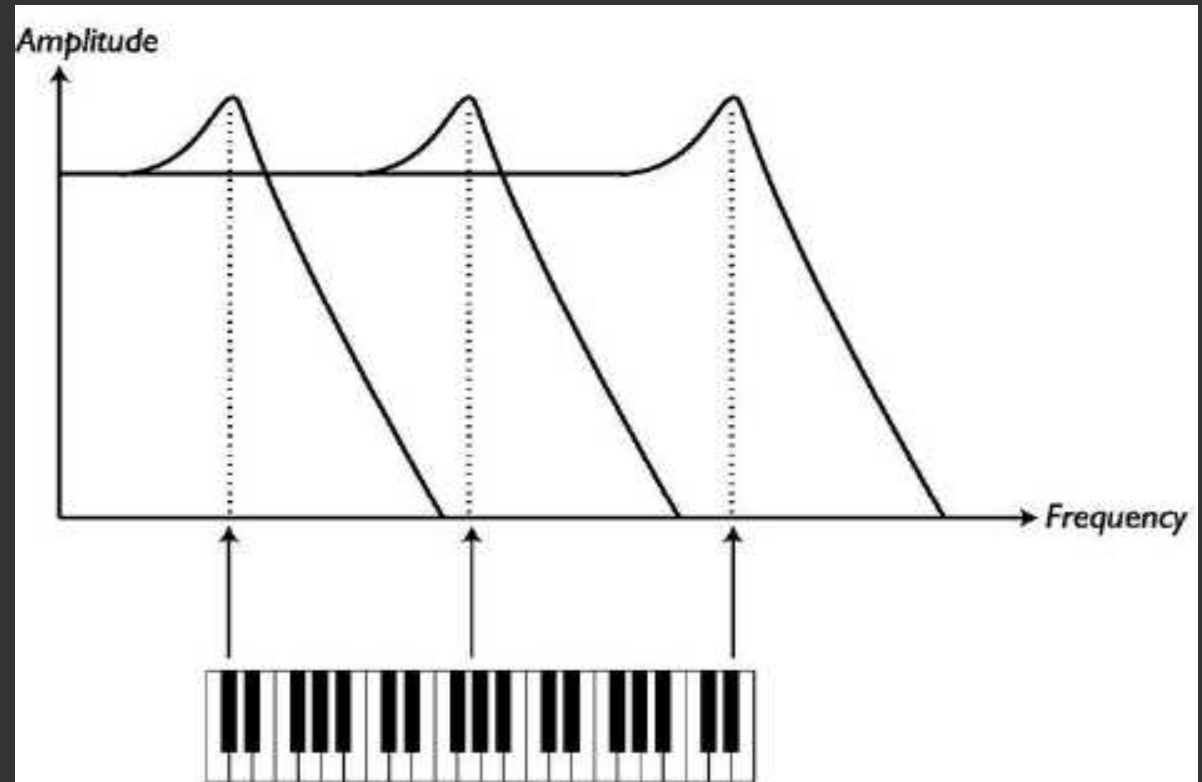
Założmy, że ustawiamy filtr DP na stałą częstotliwość 2,6 kHz.

- Dźwięk o cz. podstawowej 500 Hz – przepuszczone będą składowe widmowe do piątej włącznie.
- Dźwięk o cz. podstawowej 4 kHz – nic nie usłyszymy, bo jest w paśmie zaporowym filtru.

# Keyboard follow

---

- Za pomocą funkcji *key follow* możemy ustawić filtr tak, że zawsze będzie przepuszczał np. pierwszych 8 składowych widma. Wielkość zmiany jest regulowana.
- Częstotliwość graniczna filtru będzie przestrajając się w zależności od wciśniętego klawisza.
- W podobny sposób można sterować innymi parametrami modułów.



# VCA - wzmacniacz + generator obwiedni EG

---

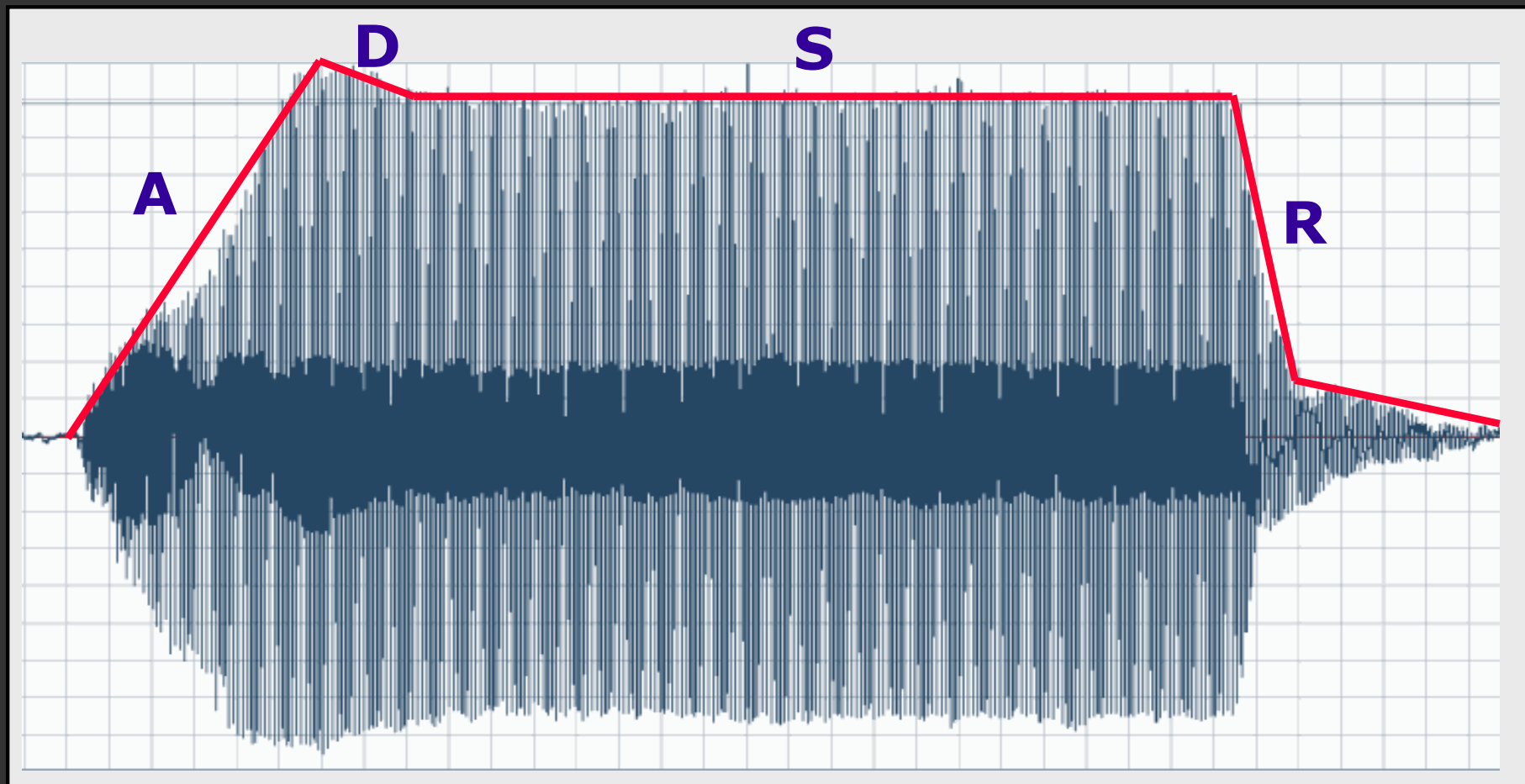
## VCA – wzmacniacz sterowany napięciowo

*(Voltage Controlled Amplifier)*

- Jest ostatnim (wyjściowym) modułem syntezy
- Praktycznie zawsze jest połączony z **generatorem obwiedni EG** (*envelope generator*), aby możliwe było kształtowanie obwiedni czasowej sygnału i uzyskanie zmian głośności
- EG wewnętrznie steruje wzmacnieniem VCO zgodnie z zadaną funkcją „wzmocnienie vs. czas”

# Obwiednia czasowa dźwięku muzycznego

---

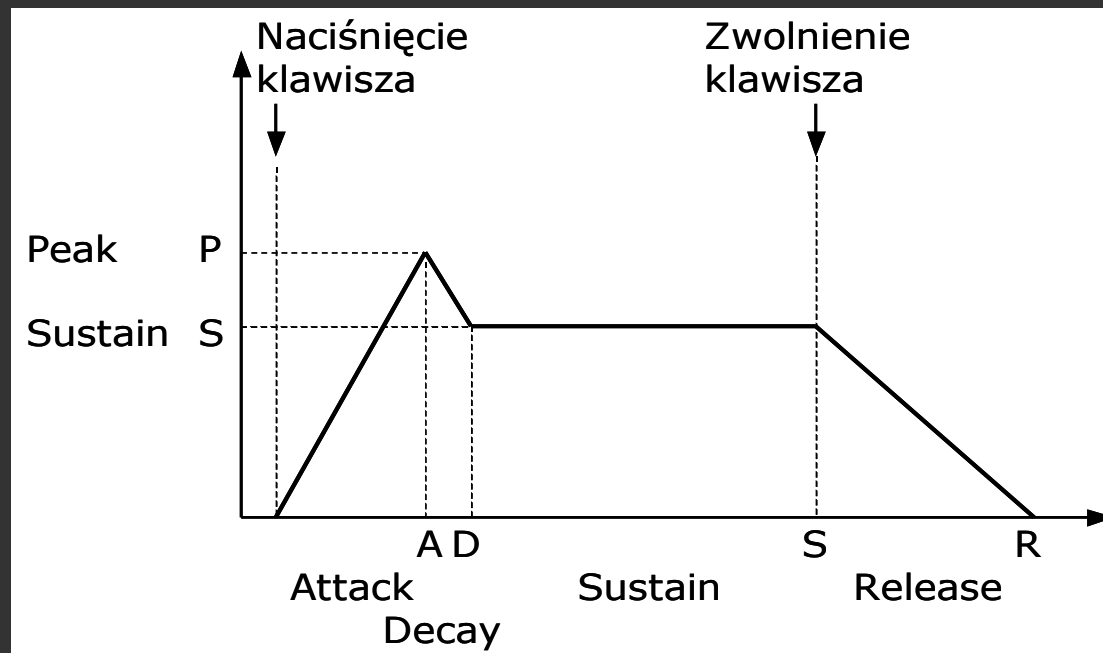




# Obwiednia ADSR

Parametry obwiedni ADSR w module EG:

- **A**: czas trwania fazy ataku (*attack*)
- **D**: czas trwania fazy zaniku (*decay*)
- **S**: poziom stanu ustalonego (*sustain*)
- **R**: czas trwania fazy wybrzmiewania (*release*)

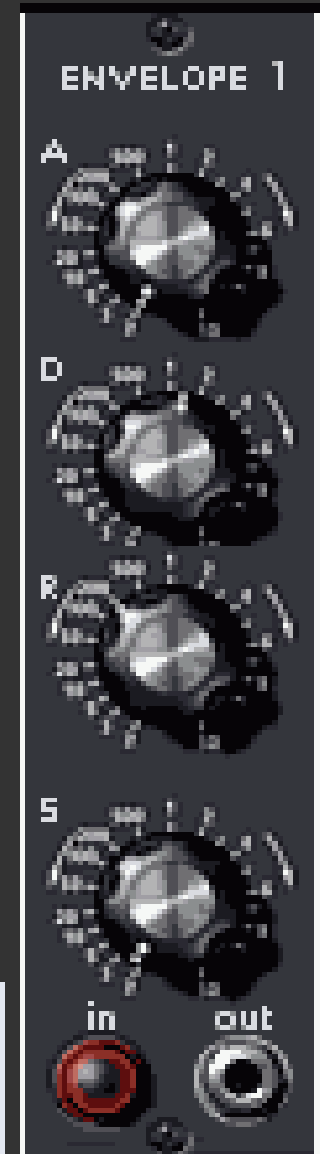
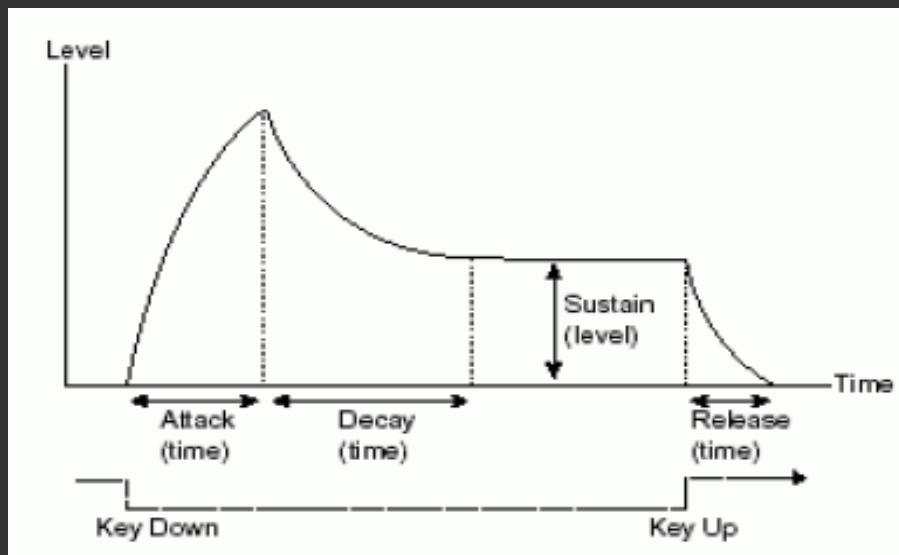


# EG - generator obwiedni

## EG - Generator obwiedni (*envelope generator*)

Zastosowany we wzmacniaczu VCO, pozwala ustawić przebieg czasowy zmian wzmocnienia, a więc zmian amplitudy dźwięku na wyjściu.

Sygnał z EG ma kształt kilku (zwykle 4) odcinków liniowych lub wykładniczych.



# EG - praktyczne przykłady obwiedni

---

Dźwięk instrumentu dętego:

- czasy A, R – wyraźnie zaznaczone
- czas D – występuje, dość krótki
- poziom S – nieco poniżej maksymalnego

Dźwięk instrumentu strunowego:

- czas A – bardzo krótki
- czas D – bardzo długi
- poziom S – zerowy (brak)
- czas R – zerowy
- zwolnienie klawisza nie powinno przerywać fazy D

# Parametr *velocity*

---

- Wszystkie profesjonalne sterowniki mają klawiaturę **dynamiczną**, wyposażoną w czujniki prędkości („siły”) naciskania klawisza – *velocity*
- Standardowo, wartość *velocity* jest używana do automatycznej zmiany (w regulowanym stopniu) głośności wyjściowego sygnału (wzmocnienia VCA)
- Możemy też wykorzystać parametr *velocity* do innych celów, np. do sterowania częstotliwością graniczną filtru (przymykania i otwierania filtru w zależności od prędkości wciskania klawisza)



# Modulacja

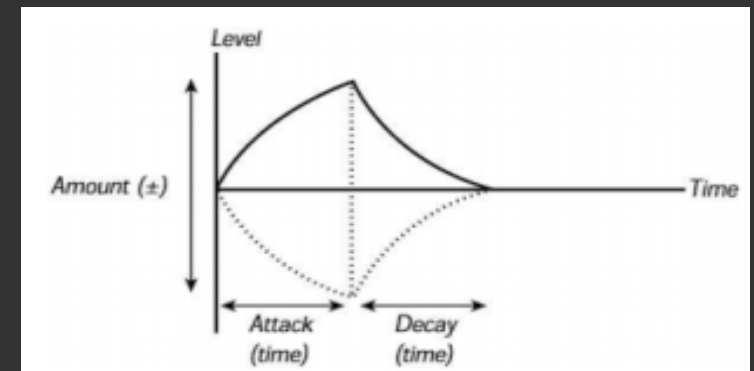
---

- Dźwięki syntetyczne generowane przez VCO + VCF + VCA są **statyczne**, o barwie niezmiennej w czasie. Przez to nie brzmią zbyt ciekawie.
- Aby brzmienie było **dynamiczne**, żywe, musimy zmieniać parametry modułów w trakcie tworzenia dźwięku.
- **Modulacja** w syntezie jest to **modyfikacja parametrów modułów** za pomocą **napięcia sterującego**, wytwarzanego przez:
  - generatory obwiedni EG (zmiany liniowe),
  - generatory LFO (zmiany cykliczne)
- Proszę zapamiętać: to właśnie modulacja sprawia, że efekty syntezy subtraktywnej brzmią ciekawie!

# EG jako modulator

---

- Generator obwiedni wytwarza napięcie sterujące (nie sygnał dźwiękowy) – jest przykładem **modulatora**
- Napięciem z EG można sterować parametrami innych modułów, wysyłając go na ich wejścia sterujące:
  - obwiednia generatora – sterowanie częstotliwością generatora (np. zmiany wysokości w fazie ataku), często używa się tu uproszczonej obwiedni AD
  - obwiednia filtracji – sterowanie (modyfikowanie) częstotliwości granicznej filtru – modyfikacja brzmienia, np. w fazie ataku

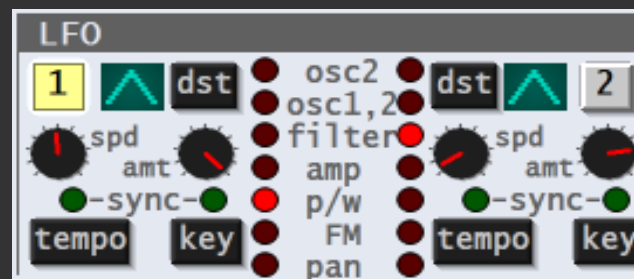


# LFO - generator niskich częstotliwości

LFO (*Low Frequency Oscillator*) wytwarza sygnały sterujące (!) o częstotliwościach z zakresu (typowo) 0,1 Hz – 20 Hz.

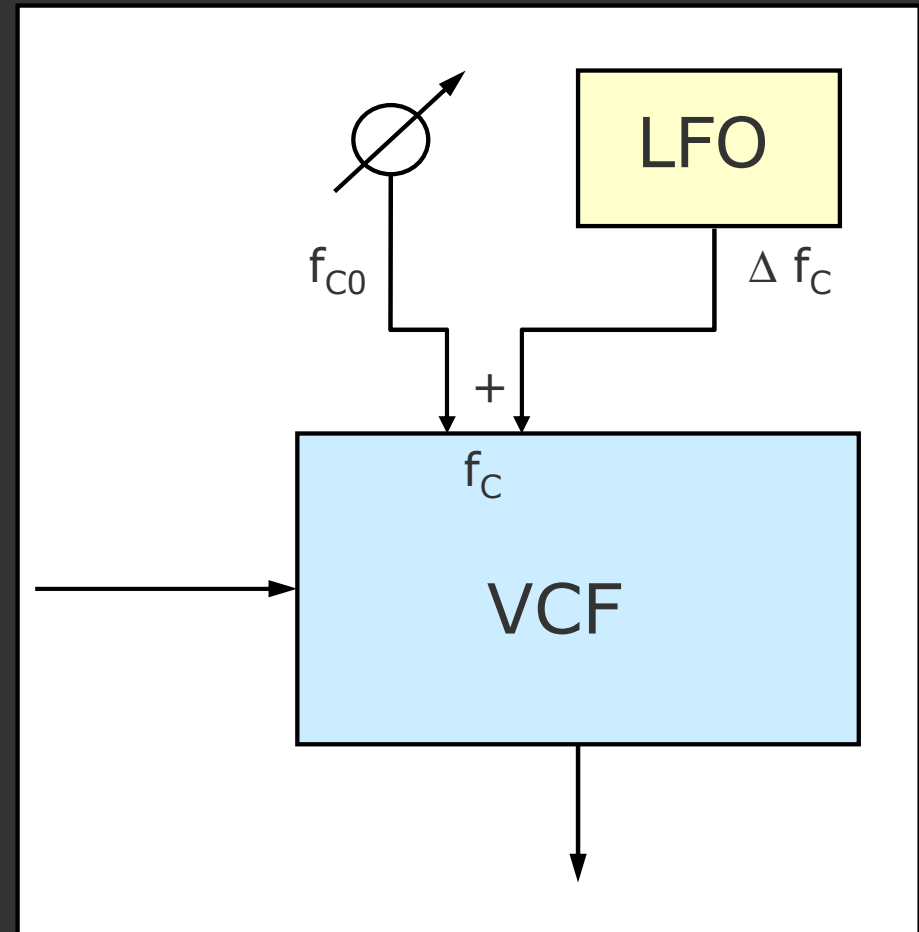
Parametry LFO:

- kształt sygnału
- częstotliwość sygnału  
- szybkość zmian (*speed*)
- amplituda sygnału  
- zakres zmian (*amount*)  
(głębokość modulacji)



# LFO - przykłady

Typowe zastosowanie LFO to modulacja częstotliwości odcięcia filtru. Powstaje efekt płynnych, cyklicznych zmian brzmienia (ciemny-jasny), tzw. efekt *sweep*





# LFO - przykłady

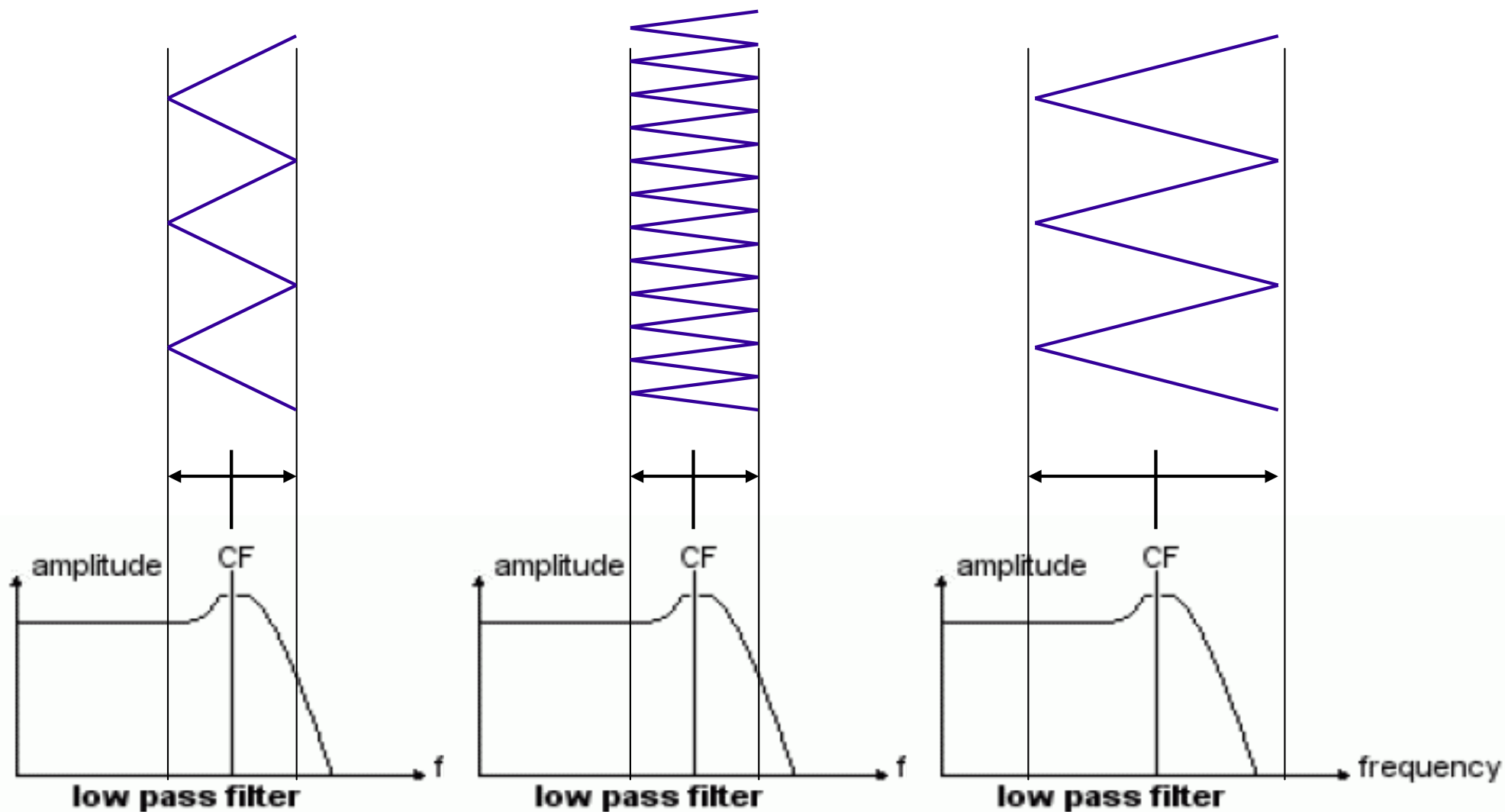
---

Parametry modulacji w tym przykładzie:

- typ sygnału w LFO – charakter zmian (sinus i trójkąt – płynne, piła i prostokąt – skokowe),
- **częstotliwość** LFO – **szybkość** zmian barwy
- **amplituda** LFO – **zakres** zmian barwy

Uwaga: zbyt duża amplituda spowoduje efekt tremolo – cykliczne zanikanie dźwięku (częstotliwość graniczna spada poniżej cz. podstawowej). Nie można przesadzać z parametrami.

# LFO - modulacja filtru



Większa częstotliwość  
LFO

Większa amplituda  
LFO

# Co można modulować przez LFO?

---

VCO:

- częstotliwość sygnału (efekt *vibrato*)
- współczynnik wypełnienia fali prostokątnej (barwa)

VCF:

- częstotliwość graniczna filtru (barwa)
- wielkość rezonansu (rzadko)

VCO:

- poziom wyjściowy (efekt *tremolo*)
- panorama sygnału stereofonicznego

Można modulować wszystkie parametry, które mają wejście sterowania napięciowego.



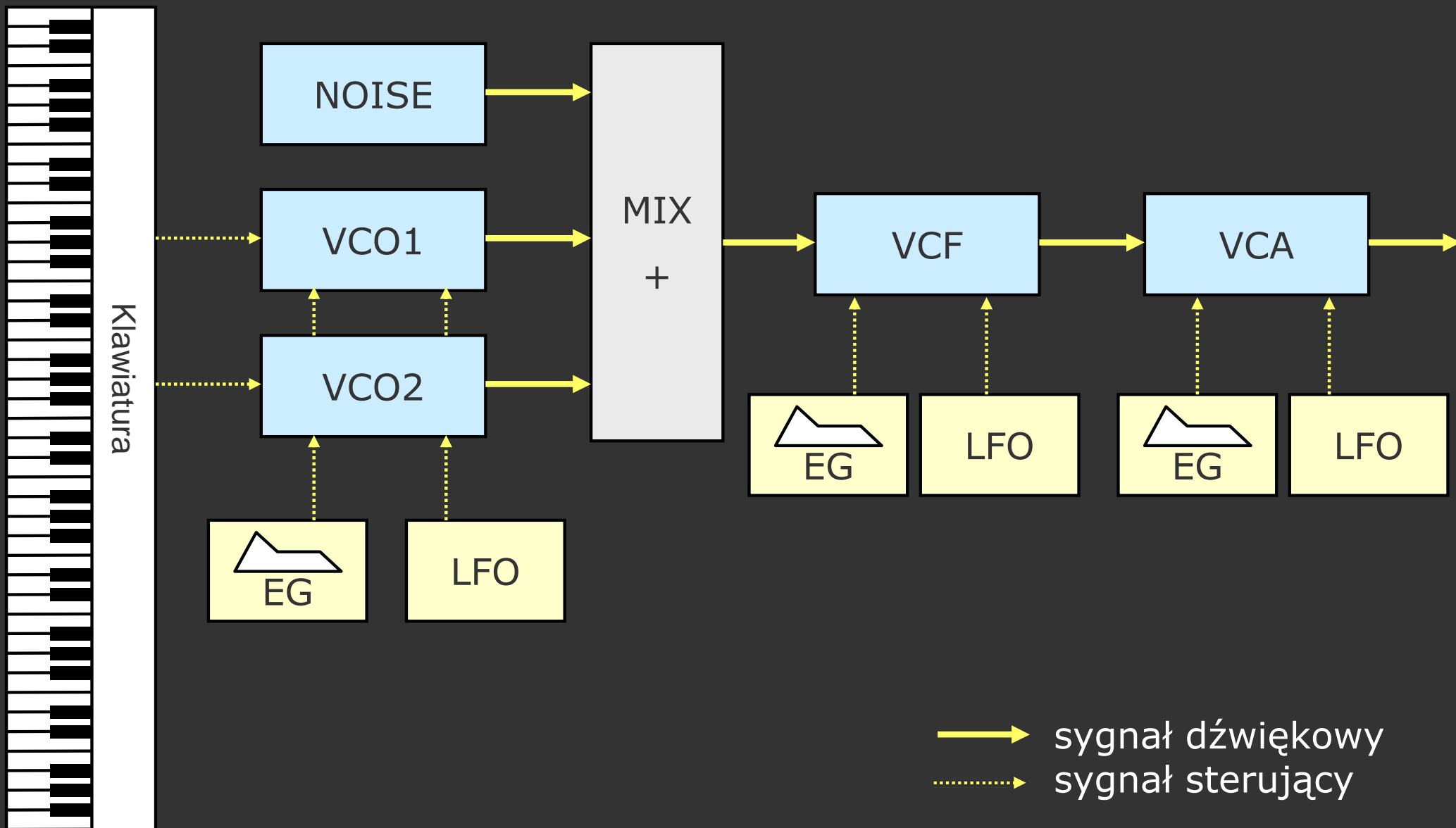
# Modułowa budowa syntezy

---

Syntezy subtrakcyjny może być zbudowany na dwa sposoby:

- moduły dowolnie łączone ze sobą przez użytkownika (np. *Moog Modular*) – znacznie większe możliwości brzmieniowe kosztem trudniejszej obsługi, muzyk sam tworzy algorytm syntezy!
- stałe połączenia między modułami – ustalony algorytm syntezy; tak działa większość współczesnych syntezy subtrakcyjnych

# Ogólny schemat syntezy subtraktywnej



# Moduły dodatkowe

---

Inne moduły syntezy (nie zawsze spotykane):

- efekty brzmieniowe (*delay, chorus, phaser, itp.*)
- generator szumu (RNG – *Random Noise Generator*)
- sekwencer
- arpeggiator
- układy wyzwalające (*trigger*)
- układ próbkująco-pamiętający (*sample & hold*)
- układ śledzenia obwiedni (*envelope follower*)
- inne

# Sekwencer

Sekwencer krokowy (*step sequencer*):

- generuje sygnały sterujące syntezatorem
- programowanie za pomocą „gałek”
- wyzwala z klawiatury lub wewnętrznym sygnałem prostokątnym.



# Zaawansowana modulacja

---

Przykład wykorzystania dodatkowych modułów: losowa modulacja parametru syntezy.

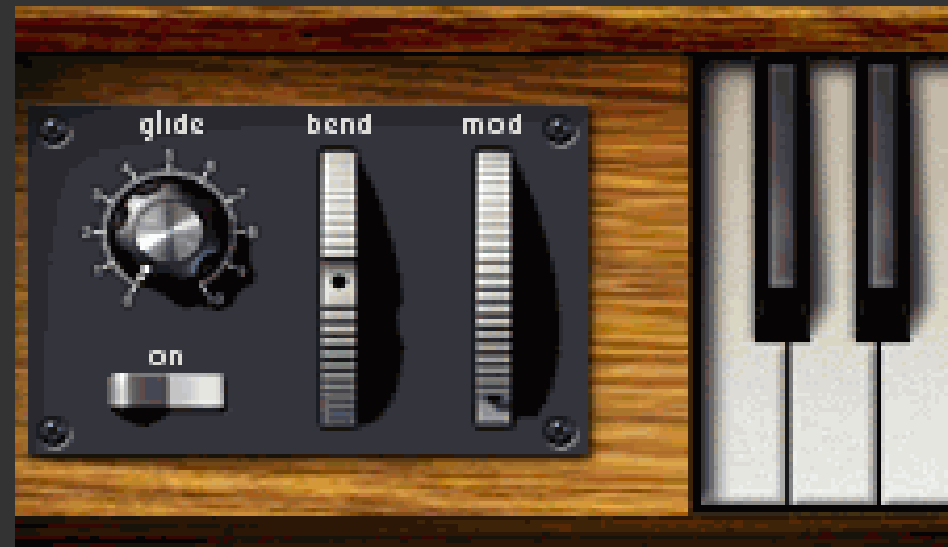
- Generator szumu - wytwarza losowe wartości.
- Układ *Sample & Hold* - próbkuje te wartości co ustalony czas (np. falą prostokątną).
- Wyjście S&H steruje np. częstotliwością graniczną filtru.
- Efekt: losowe zmiany barwy dźwięku.



# Sterowanie układem subtraktywnym

---

- Klawiatura muzyczna – sterowanie częstotliwością VCO (typowo 1V/oktawę), wyzwalamie obwiedni
- Potencjometry, przełączniki, włączniki, kable połączeniowe – sterowanie parametrami modułów syntezy
- *Pitch bend* – płynna zmiana wysokości dźwięku (pokrętło)
- *Modulation (mod) wheel* – płynna zmiana wybranego parametru (pokrętło)
- Sterowniki nożne



# Rodzaje syntezy subtrakcyjnej

---

- **Monofoniczny** – jest w stanie wytwarzać tylko jeden dźwięk na raz (zasada niższego klawisza lub ostatniego klawisza), np. *Moog Modular*. Aby skompensować ten brak, używano wiele generatorów (np. 16).
- **Polifoniczny** (wielogłosowy) – kilka torów syntezy, możliwość tworzenia wielu dźwięków naraz (liczba głosów – ang. *voices*), pozwala np. grać akordami. Wystarczają 2-3 generatory.

Wszystkie współczesne instrumenty subtrakcyjne są polifoniczne.

# Instrumenty subtraktywne

---

- Syntezatory Roberta Mooga  
– m.in. Moog Modular, MiniMoog, PolyMoog
- ARP, Buchla, Oberheim, Sequential Circuits Prophet, Yamaha CS, Roland, Korg MS & PS
- Późniejsze modele realizowały metodę hybrydowej syntezy subtraktywnej, z cyfrowymi generatorami.
- Emulatory cyfrowe (sprzętowe) – m.in. instrumenty firmy Clavia (np. Nord Lead 2X) - „wirtualna synteza analogowa”.
- Instrumenty programowe (VST) – bardzo wiele, np. darmowy *Synth1*

# Instrumenty Roberta Mooga

---



# Emulacja cyfrowa metody subtraktywnej

---

Metoda może być zaimplementowana cyfrowo:

- sprzętowo - cyfrowe instrumenty subtraktywne (*virtual analog*),
- programowo - instrumenty VSTi, często emulacja analogowych instrumentów
- programowo, w systemach modularnych
  - użytkownik sam tworzy algorytm syntezy poprzez łączenie bloków funkcjonalnych



# Problemy emulacji cyfrowej

---

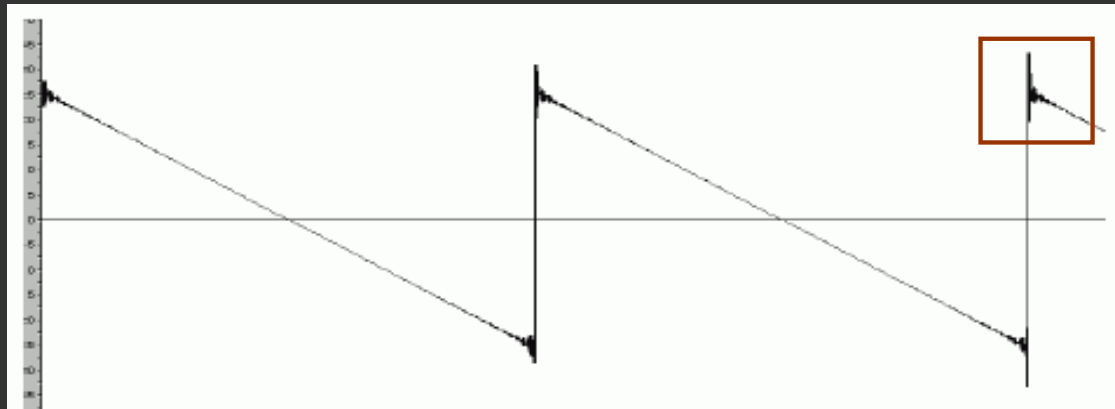
Emulacja cyfrowa instr. subtraktywnych: łatwo jest to zrobić, ale bardzo trudno jest zrobić to dobrze!

- Emulacja „niedoskonałości” układów analogowych:
  - niedokładności kształtu fali,
  - niestabilności parametrów (ale nie częstotliwości generatora!)
- Generatory - problem aliasingu
- Odwzorowane charakterystyk filtrów analogowych VCF
- Ogranicznik natężenia prądu (*soft clipping*)

# Problemy emulacji cyfrowej

---

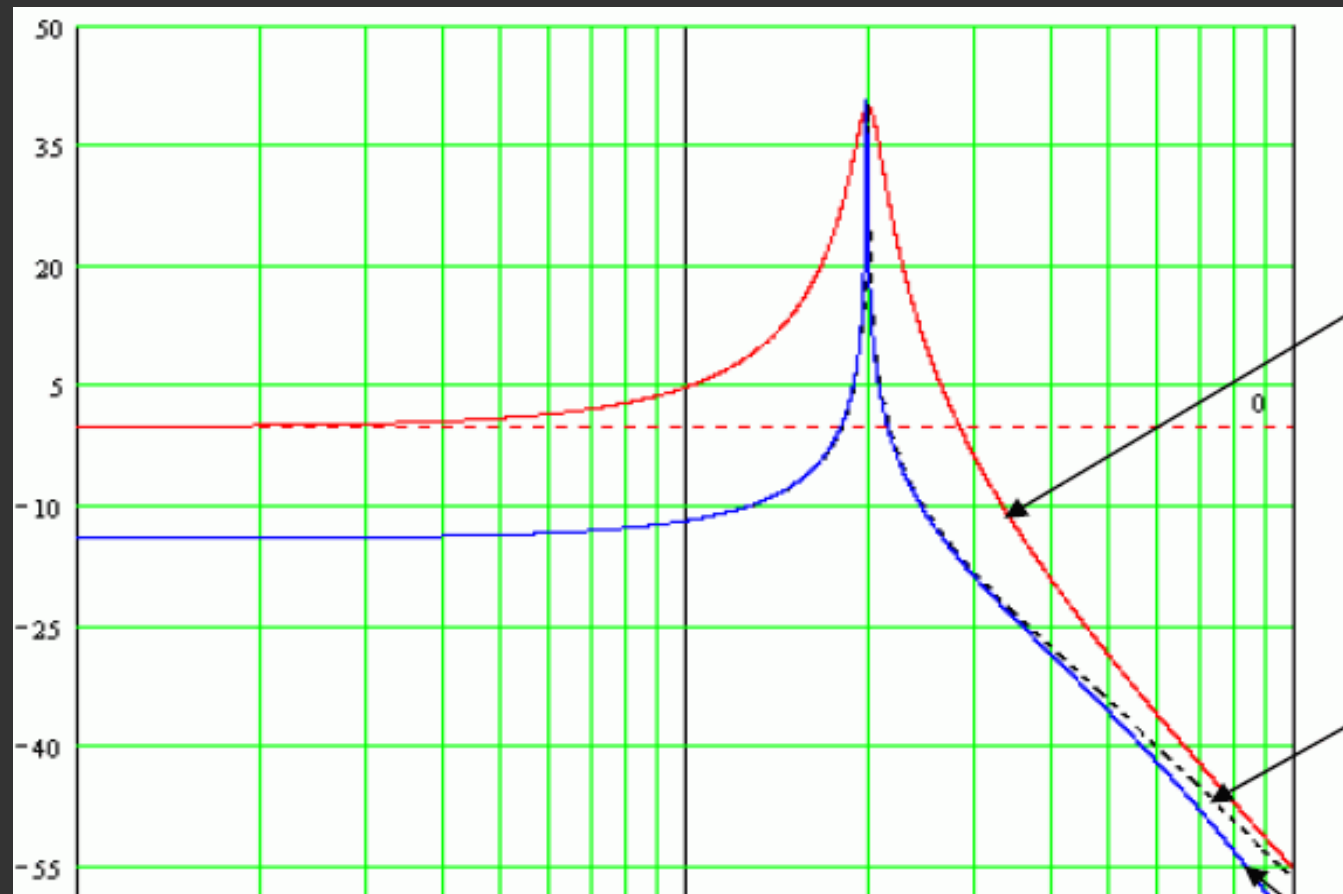
Przykład: kształt fali trójkątnej w generatorze analogowym VCO instrumentu Moog





# Problemy emulacji cyfrowej

## Charakterystyki filtru rezonansowego VCF



Typowy filtr cyfrowy  
LP, 24 db/oct

Filtr analogowy  
Moog Modular

# Zalety i wady metody

---

## Zalety:

- duża możliwość tworzenia nowych brzmień – wykorzystania inwencji muzyka
- oryginalność brzmienia (nic tak wcześniej nie grało)
- metoda prosta w implementacji

## Wady:

- trudność obsługi, dużo parametrów syntezy
- nie da się uzyskać brzmienia instrumentów naturalnych
- trudna cyfrowa emulacja „analogowego” brzmienia
- problemy układów analogowych – niestabilność częstotliwości generatorów, wysoki koszt wykonania

# Literatura

---

- [moogarchives.com](http://moogarchives.com)  
Moog Archive - baza danych o analogowych syntezatorach Roberta Mooga
- <http://www.geocities.jp/daichi1969/softsynth/>  
darmowy instrument programowy Synth1
- [http://downloads.arturia.com/products/modular-v/manual/ModularV\\_Manual\\_2\\_6\\_EN.pdf](http://downloads.arturia.com/products/modular-v/manual/ModularV_Manual_2_6_EN.pdf)  
instrukcja obsługi Arturia Moog Modular V, podstawy syntezy subtraktywnej
- [www.xs4all.nl/~rhordijk/G2Pages/](http://www.xs4all.nl/~rhordijk/G2Pages/)  
G2 Workshop - programowanie syntezatora G2, dużo teorii na temat syntezy dźwięku (j. angielski)
- [www.youtube.com/user/DoKashiteru](http://www.youtube.com/user/DoKashiteru)  
filmy prezentujące podstawy „programowania” syntezatora Moog Modular