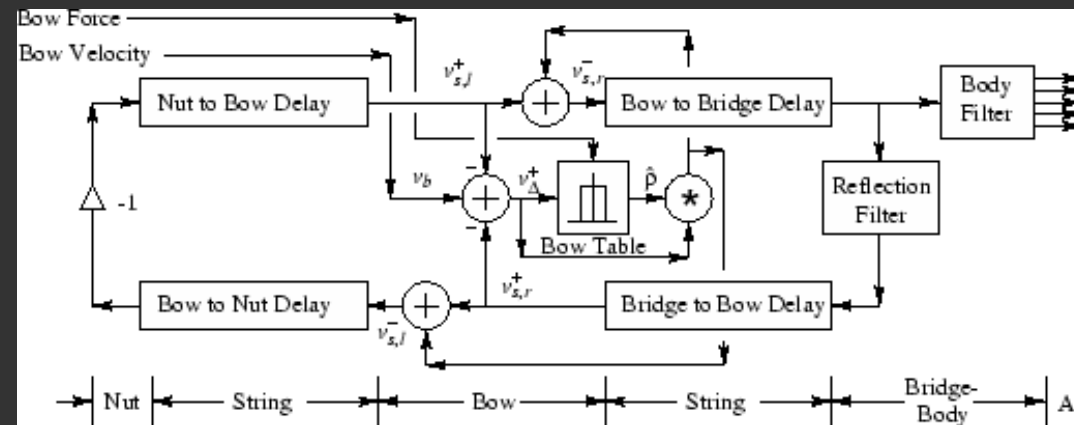


# MODELOWANIE FIZYCZNE INSTRUMENTÓW MUZYCZNYCH



# Wprowadzenie

---

- Stosowane metody syntezy dźwięku służą do tworzenia syntetycznych brzmień.
- Synteza brzmień rzeczywistych instrumentów muzycznych polega na dostosowywaniu parametrów synteзаторa, tak aby uzyskać podobny dźwięk (synteza imitacyjna).
- Poza syntezą addytywną (w trybie resyntezy), znane metody syntezy nie umożliwiają wiernego naśladowania rzeczywistych instrumentów.
- Stąd popularność instrumentów opartych na nagranych próbkach brzmień.
- Ale instrument samplingowy brzmi tylko tak, jak nagrane próbki. Nie daje takiej różnorodności brzmienia, jak rzeczywisty instrument. Brzmienie jest jednostajne i nieciekawe.

# Artykulacja

---

- **Artykulacja to sposób wydobywania dźwięku z instrumentu muzycznego.**
- W gitarze klasycznej: siła uderzenia w strunę, sposób uderzenia (palce, kostka), miejsce pobudzenia, sposób przyciskania strun do gryfu, ruchy palców w trakcie tworzenia dźwięku, itd.
- W klarncie: siła wdmuchiwanie powietrza, siła przyciskania ust do ustnika, kąt ułożenia ust względem ustnika, modulacja siły wdmuchiwanie powietrza.
- Artykulacja pozwala wprowadzić ekspresję do gry na instrumencie, zróżnicować brzmienie dźwięku.
- Możliwości artykulacji w instrumentach samplingowych są bardzo ograniczone. Słysząc, że gra syntezator, a nie „żywy” instrument.

# Modelowanie fizyczne

---

- Aby umożliwić wierne naśladowanie dźwięków rzeczywistych instrumentów, z uwzględnieniem artykulacji, wymyślono ideę **modelowania fizycznego** (*physical modelling synthesis*).
- **Model fizyczny** instrumentu, najczęściej cyfrowy algorytm, odtwarza zjawiska fizyczne, które prowadzą do powstania dźwięku w instrumencie.
- Model posiada **parametry**, którymi może sterować muzyk. Parametry odpowiadają za sposób tworzenia dźwięku w instrumencie. Zatem **zmiany parametrów** umożliwiają uzyskanie **artykulacji**.
- Powstało kilka metod modelowania fizycznego, żadna nie rozwiązała w pełni problemu wiernego odwzorowania instrumentów.
- Problemem nie są skomplikowane obliczenia, a trudność w sformułowaniu wystarczająco dokładnego modelu fizycznego instrumentu.

# Model fizyczny instrumentu

---

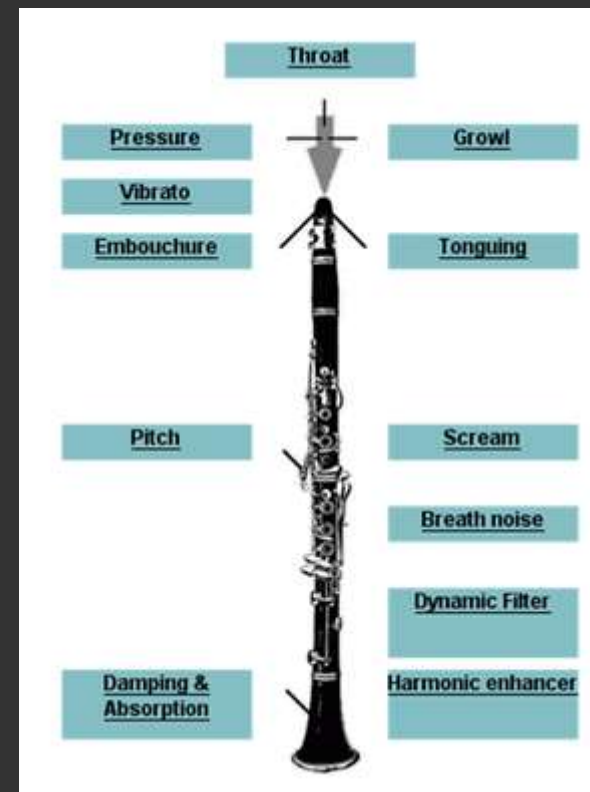
W modelu fizycznym można wyróżnić trzy główne części:

- **pobudzenie** (*exciter*) – symuluje pobudzenie instrumentu do wytwarzania dźwięku (wdmuchnięcie powietrza, szarpnięcie struny);
- **rezonator** (*resonator*) – w nim powstaje fala stojąca, tworząca dźwięk; rezonatorem jest struna, powietrze zamknięte wewnątrz instrumentu, membrana lub powierzchnia instrumentu perkusyjnego;
- **modyfikator** (*modifier*) – działa jak filtr kształtujący brzmienie dźwięku, np. pudło rezonansowe gitary klasycznej, czara klarnetu.

# Parametry modelu fizycznego

Parametry modelu – czynniki mające wpływ na dźwięk:

- **statyczne** – związane z **budową** instrumentu,
  - decydują o wysokości i barwie dźwięku,
  - np. długość i sprężystość struny;
- **dynamiczne** – związane z **artykulacją**,
  - reakcja instrumentu na pobudzenie,
  - zmiany barwy dźwięku związane z ekspresją gry,
  - np. siła uderzenia w strunę, siła wdmuchiwanie powietrza do ustnika.



Parametry modelu mogą być zmieniane w trakcie tworzenia dźwięku i mają natychmiastowy wpływ na tworzony dźwięk.

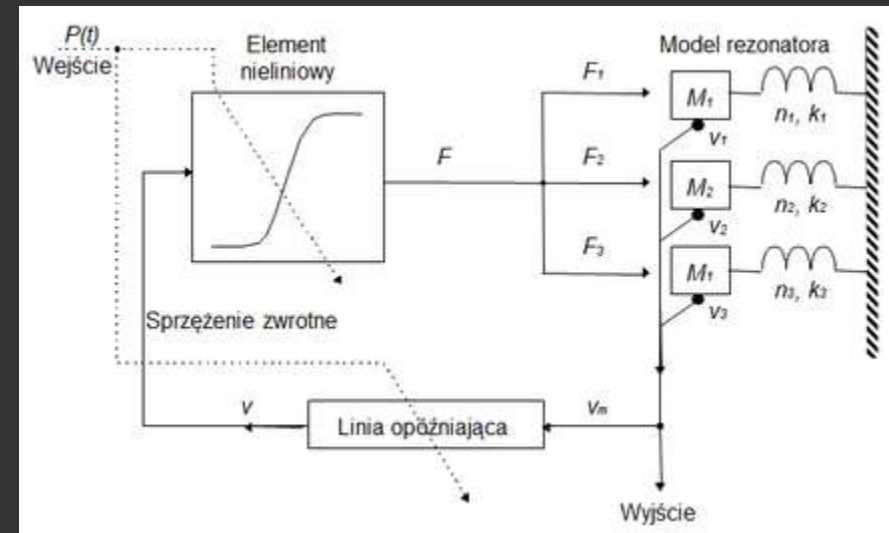
# Modelowanie matematyczne

---

- Modele matematyczne są najstarszym podejściem do modelowania instrumentów muzycznych (1971, Hiller & Ruiz).
- Polegają na opisaniu procesu powstawania dźwięku w instrumencie za pomocą skomplikowanych **układów równań** matematycznych.
- Metoda wyłącznie **badawcza**, nie do rozwiązań komercyjnych.
- Równania rozwiązywane **numerycznie**, np. metodą różniczkową (FD, *finite difference*).
- Problemem są zarówno skomplikowane obliczenia, jak i trudność sformułowania równań opisujących tworzenie dźwięku.
- W dalszym ciągu naukowcy podejmują próby praktycznego zastosowania matematycznego podejścia do syntezy dźwięku.

# Model masa-sprężystość

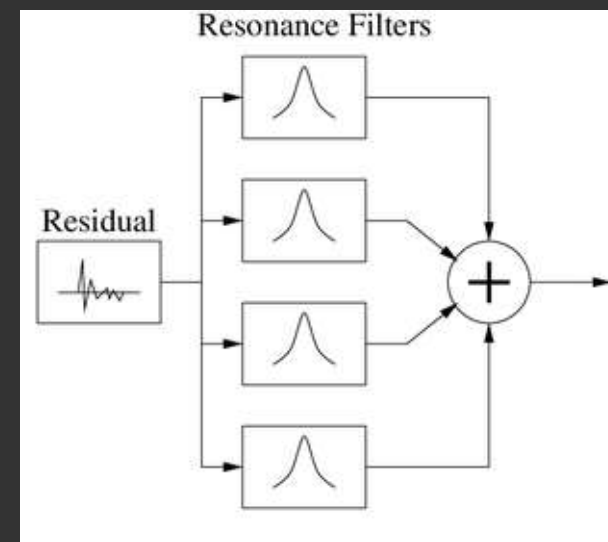
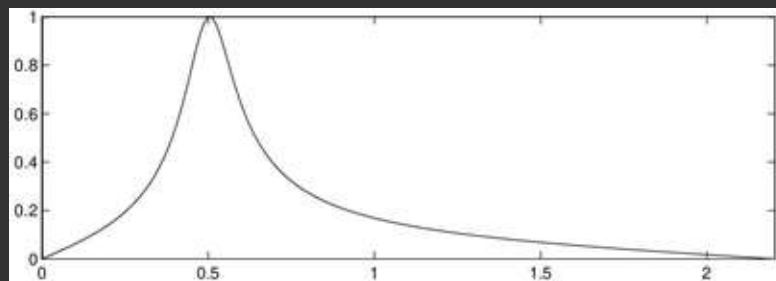
- Alternatywne podejście to podział instrumentu na **dyskretne elementy** i modelowanie poszczególnych elementów.
- Rezonator instrumentu może być zamodelowany jako układ dwóch elementów: **masy** (*mass*) i **sprężystości** (*spring*).
- Sprężystość przekazuje siłę (drgania) pomiędzy elementami masy.
- Modele instrumentów są uproszczone. Trudno jest zamodelować bardziej złożone zjawiska, szczególnie nieliniowe.





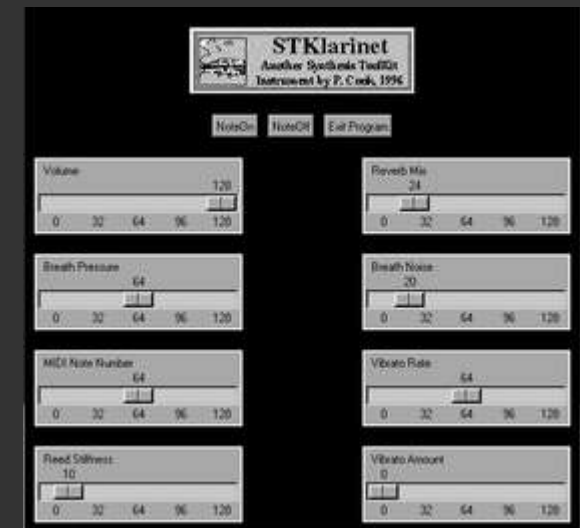
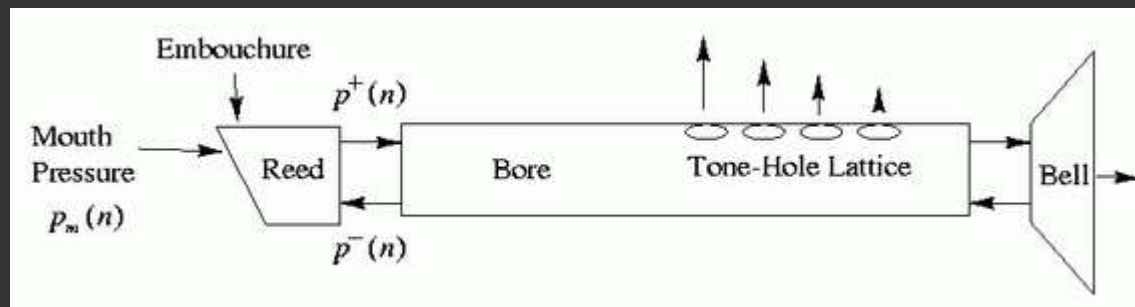
# Synteza modalna (*modal synthesis*)

- Drgania w instrumencie muzycznym charakteryzują się występowaniem wielu maksimów widmowych (rezonansów), nazywanych **modami** (*mode*).
- Mody są symulowane za pomocą **filtrów** szczytowych o regulowanym wzmacnieniu, częstotliwości środkowej i szerokości pasma (dobroci).
- W odróżnieniu od syntezy subtraktywnej, tutaj pobudzeniem dla filtrów jest zwykle szum lub impuls.
- Parametry filtrów wynikają z budowy instrumentu.
- Szczególnie przydatne do brzmień perkusyjnych.
- Przykład: Mutable Instruments *Elements*.



# Synteza falowodowa

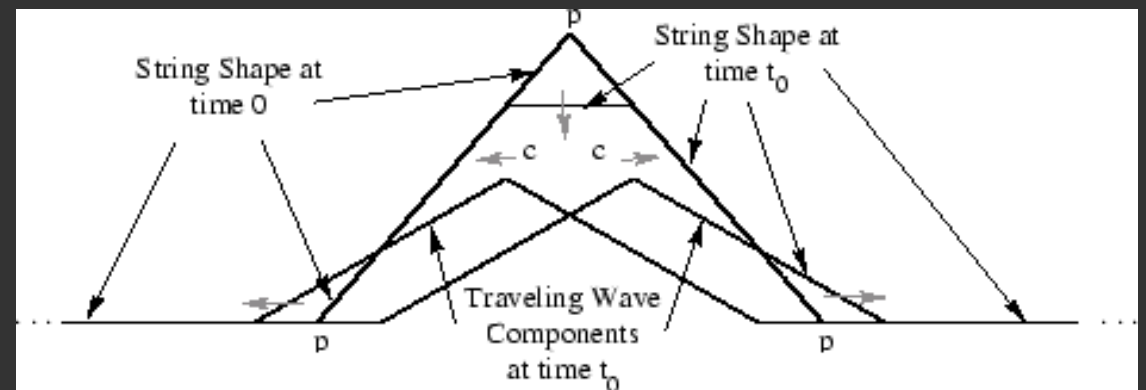
- Synteza falowodowa (*waveguide synthesis*) została opracowana w latach 90. na Uniwersytecie Stanford w USA (Perry R. Cook, Julius O. Smith). Była rozwijana w ramach grantu od firmy Yamaha.
- Model symuluje propagację fal w falowodzie za pomocą cyfrowego algorytmu.
- Model jest prosty obliczeniowo, był w stanie działać w czasie rzeczywistym na procesorach DSP dostępnych w latach 90.
- Główny problem do rozwiązania to dokładne opisanie procesów fizycznych za pomocą modelu falowodowego.



# Synteza falowodowa

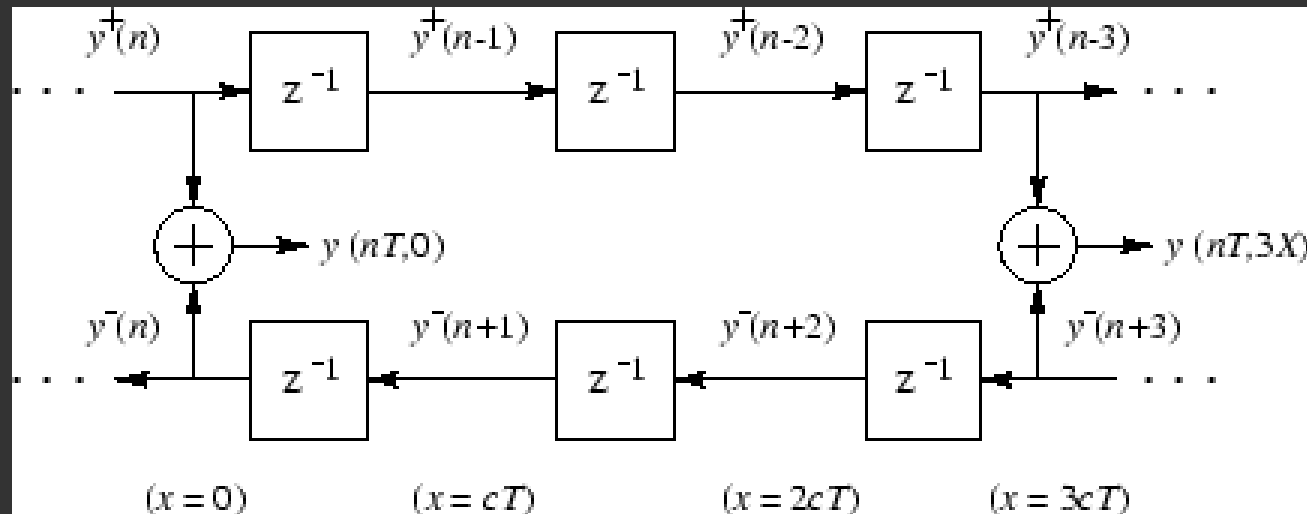
- **Falowód** (*waveguide*) – urządzenie, w którym **fala** rozchodzi się **jednowymiarowo**.
- Struna lub słup powietrza w korpusie instrumentu dętego są traktowane jako falowody – np. propagacja fali wzdłuż struny.
- Jest to uproszczenie: pomija się drgania poprzeczne i zjawiska nieliniowe.
- Po pobudzeniu falowodu powstają dwie **fale bieżące** (*travelling waves*):
  - przesuwają się one wzdłuż falowodu w przeciwnych kierunkach,
  - odbijają się od zakończeń falowodu,
  - ich energia jest stopniowo tłumiona.
- Suma obu fal bieżących tworzy **falę stojącą**.

$$p(x,t) = p_1\left(t - \frac{x}{c}\right) + p_2\left(t + \frac{x}{c}\right)$$



# Cyfrowy model falowodu

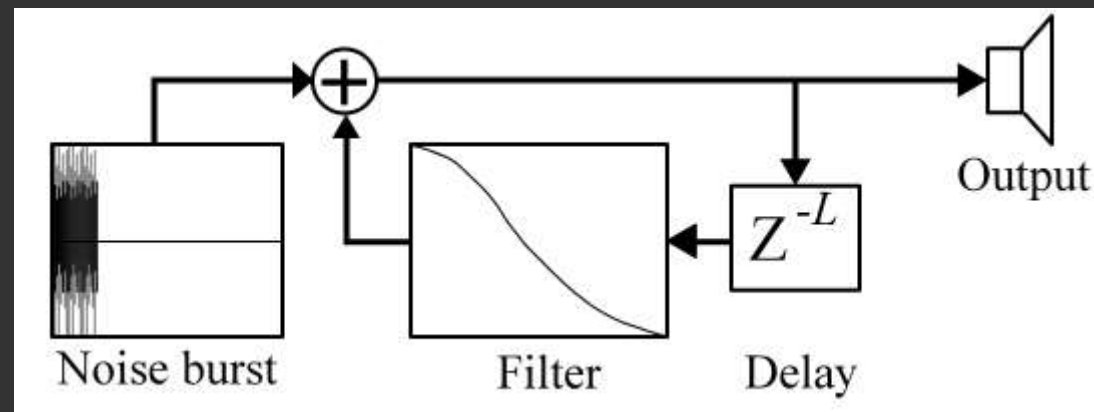
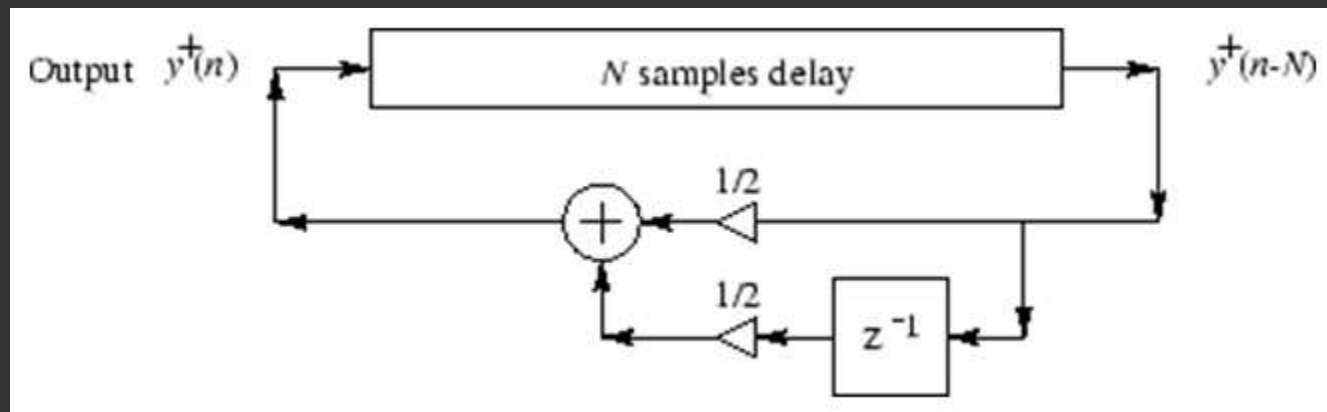
- Kwantyzacja skali czasu: obserwujemy stan falowodu w punktach czasu co  $T$  (okres próbkowania).
- Fala przesuwa się po falowodzie z prędkością  $c$ .
- Podczas okresu  $T$ , fala przesunie się w falowodzie o jednostkę  $c \cdot T$ .
- Przesunięcie to zapisuje się za pomocą opóźnienia jednostkowego (o jeden okres próbkowania):  $z^{-1}$ .



# Model Karplusa-Stronga

Model Karplusa-Stronga: klasyczny model fizyczny **szarpniętej struny** (*plucked string*):

- **linia opóźniająca** (*delay line*) – bufor na próbki, rozmiar zależny od aktywnej długości struny, symuluje **rezonator** (falę stojącą),
- **filtr** dolnoprzepustowy symuluje tłumienie energii,
- model jest zwykle pobudzany krótkim impulsem szumu.

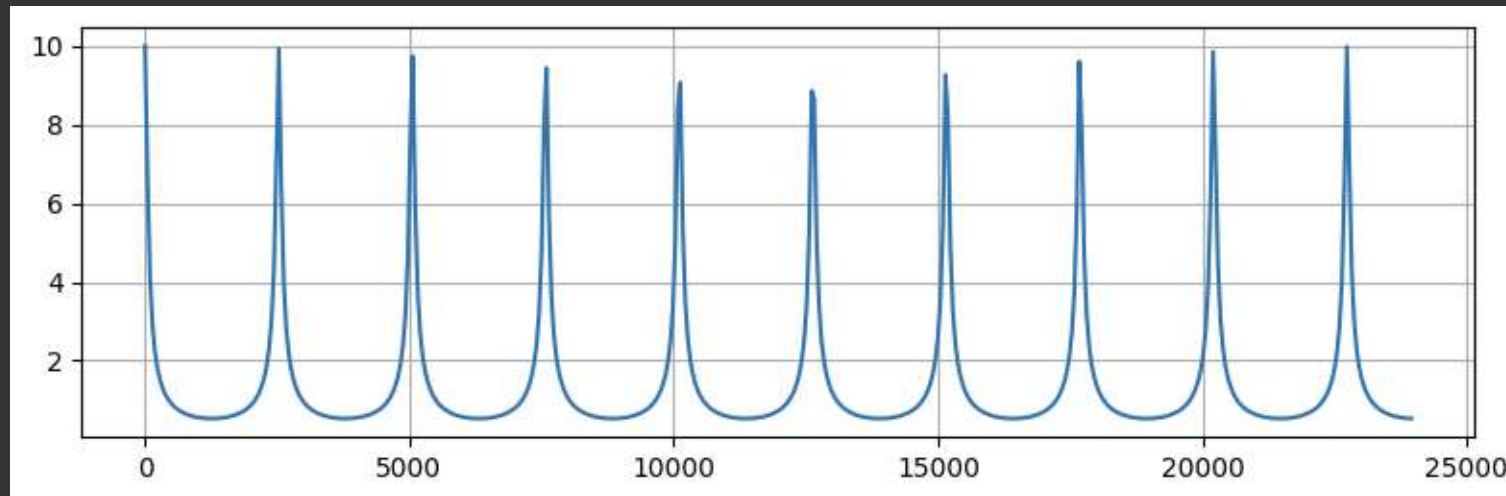


# Model Karplusa-Stronga

---

W jaki sposób to działa?

- Model struny K-S jest strukturą filtru z opóźnieniem i sprzężeniem zwrotnym.
- Jest to **filtr grzebieniowy** (*comb filter*).
- Liczba „zębów” grzebienia i ich położenie zależy od wielkości opóźnienia.
- Grzebień tworzy widmo harmoniczne.
- Filtr kształtuje obwiednię widma.



# Model falowodowy

---

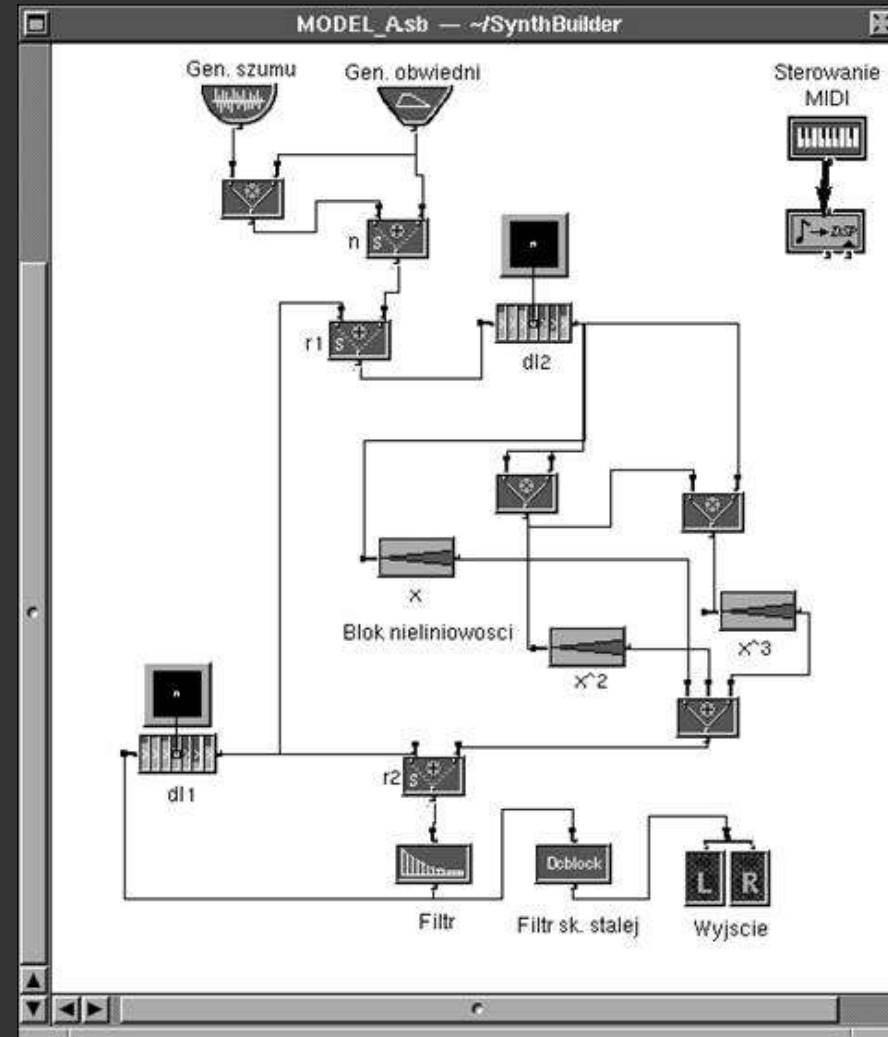
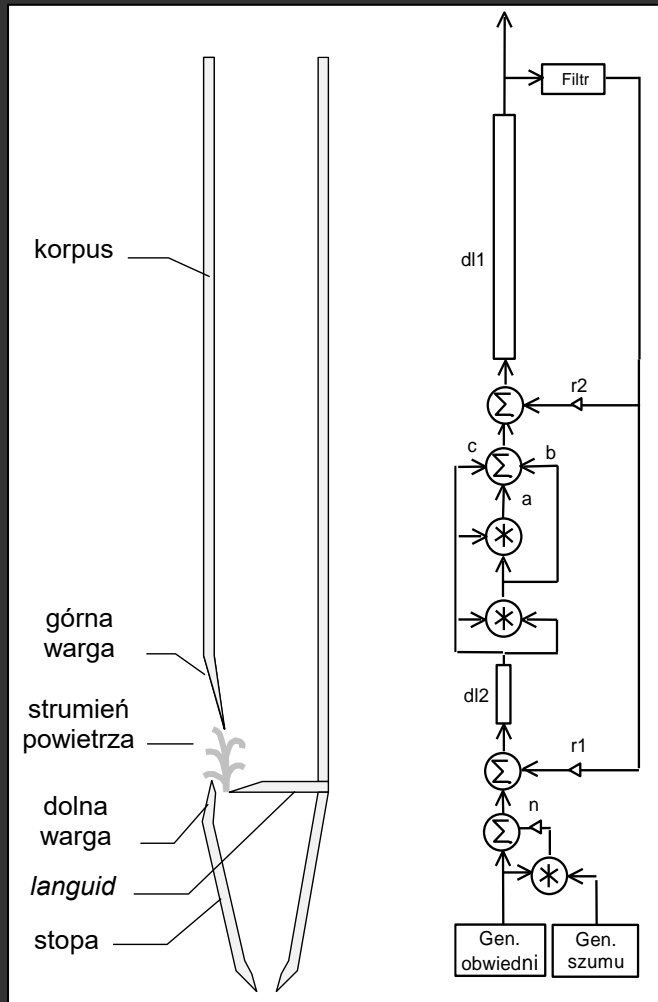
- Modele falowodowe instrumentów muzycznych są budowane z:
  - linii opóźniających (buforów próbek),
  - filtrów cyfrowych,
  - mnożników i sumatorów,
  - stablicowanych funkcji (*lookup table*), które opisują bardziej złożone procesy, np. zamykanie i otwieranie stroika.
- Model pobudza się zwykle wprowadzając do modelu biały szum lub impuls.
- Parametry modelu mogą być zmieniane w trakcie generowania dźwięku
  - efekt jest natychmiastowy.





# Model piszczałki organowej

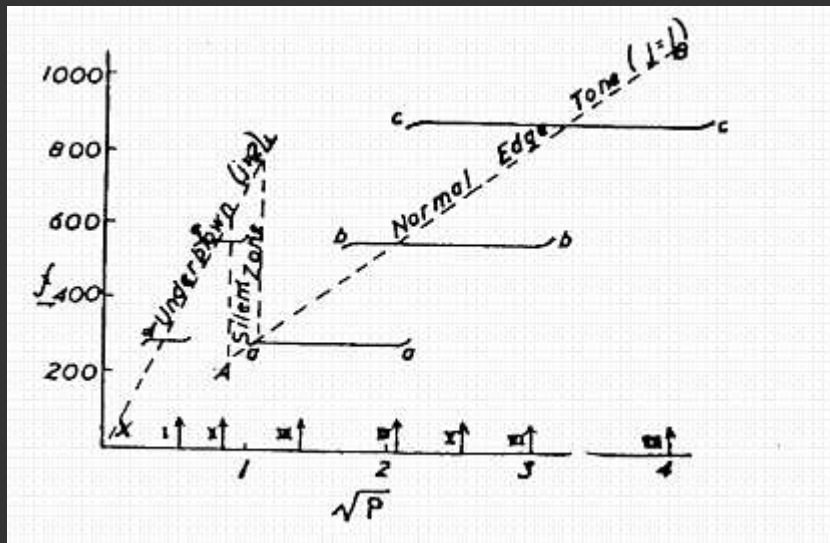
Opracowany przez Sławomira Zielińskiego, Katedra Inżynierii Dźwięku PG, 1997.



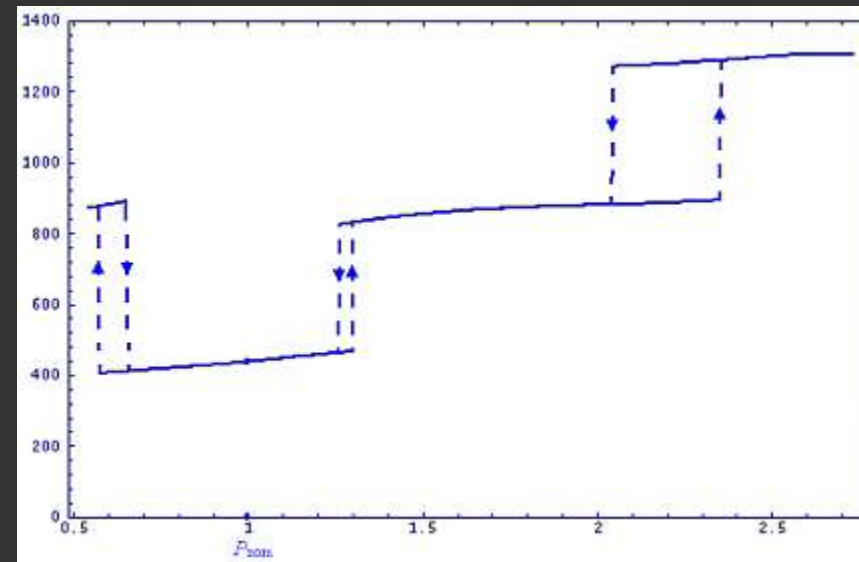
# Model piszczałki organowej

Odpowiedź piszczałki organowej na zmiany ciśnienia (częstotliwość dźwięku vs. pierwiastek ciśnienia wtłaczanego do piszczałki).

Model fizyczny reaguje podobnie do rzeczywistego instrumentu.



Rzeczywista piszczałka  
(wyniki pomiarów)



Model falowodowy  
(wyniki symulacji)

# Problemy syntezy falowodowej

---

Dlaczego ta metoda się nie przyjęła?

- Opracowanie dokładnego modelu każdego instrumentu jest problematyczne. Niektóre zjawiska fizyczne trudno jest uwzględnić w modelu. Metoda ma liczne uproszczenia, wpływające na brzmienie syntetycznego dźwięku.
- Koszt badań nad modelowaniem instrumentów okazał się zbyt wysoki dla producentów, jak i dla potencjalnych użytkowników.
- Duża liczba parametrów modelu powoduje trudność sterowania nim, zwłaszcza podczas grania na żywo.
- Wydajność była problemem w polifonicznych instrumentach.
- Muzycy nie byli przekonani, że metoda jest „wystarczająco lepsza” od instrumentów opartych na samplach, biorąc pod uwagę stosunek efektu do ceny. Nie było „rynku” na takie instrumenty.

# Yamaha VL1

Yamaha VL1 (1994) – „próbny” syntezytor oparty na metodzie falowodowej, nazwany *Virtual Acoustic Synthesizer*. Wysoka cena (ok. 10 000\$ w 1994).

Głównie instrumenty dęte i smyczkowe. Tylko dwa głosy.

Specjalny sterownik w formie ustnika, kontrolowany wdmuchiwanym powietrzem.



# Instrumenty programowe

Synteza dźwięku metodą modelowania fizycznego instrumentów rozwija się w formie programowych instrumentów.

*Sculpture* – część pakietu *Logic Pro* (MacOS)

- Model fizyczny instrumentów strunowych.
- Rozwinięcie modelu Karplusa-Stronga.
- *Component modeling*  
- model może zostać złożony z komponentów, np. struna, element rezonansowy, sposób pobudzenia, itp.
- Parametry każdego komponentu mogą być modyfikowane.



# Metody modelowania fizycznego - podsumowanie

---

## Zalety:

- (potencjalna) możliwość dokładnej symulacji rzeczywistych instrumentów,
- możliwość „budowania” nieistniejących instrumentów,
- możliwość uwzględnienia artykulacji – tego nie ma sampling,
- synteza falowodowa: prosta implementacja cyfrowa.

## Wady:

- trudność w formułowaniu dokładnych modeli instrumentów,
- uproszczenia modeli wpływające na brzmienie dźwięku,
- trudna obsługa dla muzyka - duża liczba parametrów do sterowania.

# Literatura

---

- J.O. Smith: *Digital waveguide synthesis*. <https://ccrma.stanford.edu/~jos/wg.html>
- J.O. Smith: *Physical audio signal processing*. W3K Publishing 2010.  
[https://ccrma.stanford.edu/~jos/pasp/Digital\\_Waveguide\\_Models.html](https://ccrma.stanford.edu/~jos/pasp/Digital_Waveguide_Models.html)
- G.P. Scandalis: *Music technology. Physical Models*.  
<http://scandalis.com/jarrah/PhysicalModels/index.html>
- STK: The Synthesis Toolkit. <https://ccrma.stanford.edu/software/stk/>
- Wikipedia (wersja angielska). [https://en.wikipedia.org/wiki/Digital\\_waveguide\\_synthesis](https://en.wikipedia.org/wiki/Digital_waveguide_synthesis)

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.