

Elektroniczne instrumenty muzyczne

SYNTEZA METODĄ MODELOWANIA FIZYCZNEGO

Metoda falowodowa

Wprowadzenie

- Dotychczasowe metody syntezy nie pozwalały na wierne naśladowanie fizycznych instrumentów.
- Sampling: nie umożliwia zróżnicowania brzmienia (zastosowania artykulacji).
- Metody modelowania stosują odmienne podejście: **modelujemy instrument, a nie dźwięk!**
- Wirtualny model instrumentu powstaje w komputerze.
- **Parametry** modelu mogą być zmieniane tak jak zmienia się sposób gry na fizycznym instrumencie.
- Model reaguje na zmiany parametrów zmianami wytwarzanego brzmienia.

Modelowanie matematyczne

- Opis procesu powstawania dźwięku w instrumencie muzycznym za pomocą równań matematycznych.
- Powstaje „funkcja”: dźwięk = model (parametry).
- Rozwiązanie równań za pomocą komputera powoduje obliczenie dźwięku.
- Zmiany parametrów powodują powstawanie różnego brzmienia, tak jak w fizycznym instrumencie.

Modelowanie matematyczne

Wady podejścia matematycznego:

- Bardzo trudno jest opisać powstawanie dźwięku za pomocą równań matematycznych.
- Obliczanie takich równań (różniczkowych, parametrycznych) wymaga metod numerycznych.
- Obliczenia są złożone i długotrwałe.
- Jest to więc synteza dźwięku, ale wyłącznie badawcza, nie ma zastosowania w praktycznych instrumentach.

Modelowanie falowodowe

Metoda cyfrowego modelowania falowodowego

ang. *digital waveguide modeling*

- Opracowana na uniwersytecie w Stanford (USA) na początku lat 90. (J.O. Smith, P. Cook).
- Polega na modelowaniu fal bieżących składających się na falę stojącą w danym instrumencie przy pomocy cyfrowego falowodu (*waveguide*).
- Nie wymaga obliczania żadnych równań, jest to algorytm cyfrowy, który może działać w czasie rzeczywistym.

Model i parametry modelu

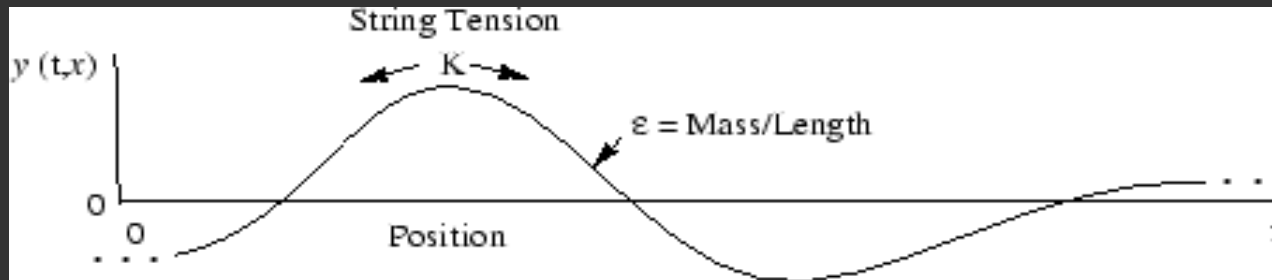
Model falowodowy – opis zjawisk fizycznych prowadzących do powstania dźwięku.

Parametry modelu – czynniki mające wpływ na to jaki będzie dźwięk syntetyczny:

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

Model drgającej struny

Idealna (bezstratna i nieskończona) drgająca struna - falowód



Aktualne wychylenie (stan) struny p jest funkcją czasu t oraz położenia x : $p(x, t)$

Równanie falowe (jednowymiarowe):

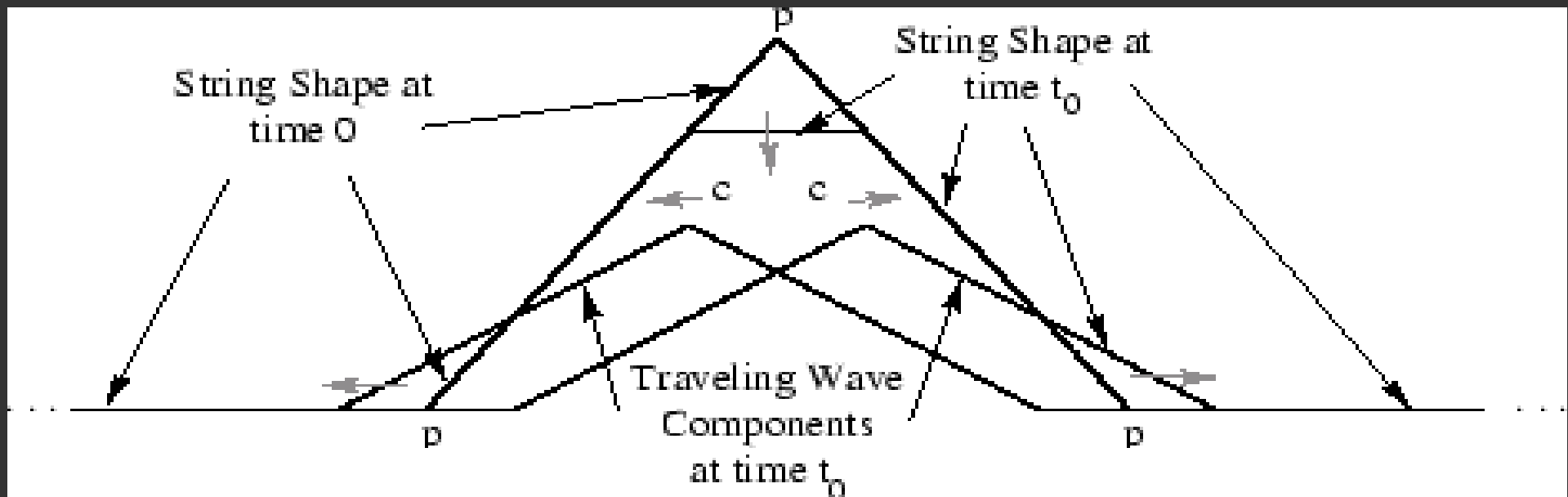
$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}$$

Model bezstratnej drgającej struny

Rozwiązanie ogólne jednowymiarowego równania falowego dla idealnej drgającej struny:

suma dwóch **fal bieżących** (*travelling waves*) przemieszczających się po strunie w przeciwnych kierunkach:

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



Próbkowanie modelu struny

Przejdźcie do dziedziny cyfrowej – kwantyzacja czasu i położenia na strunie:

$$\begin{array}{lcl} x & \rightarrow & x_m = mX \\ t & \rightarrow & t_n = nT \end{array}$$

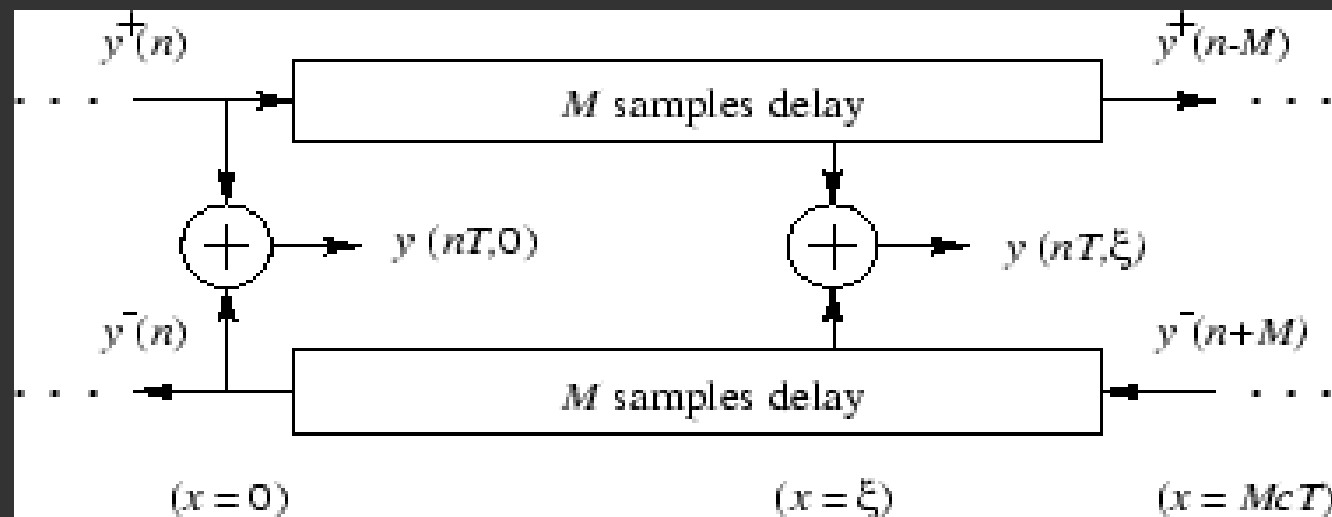
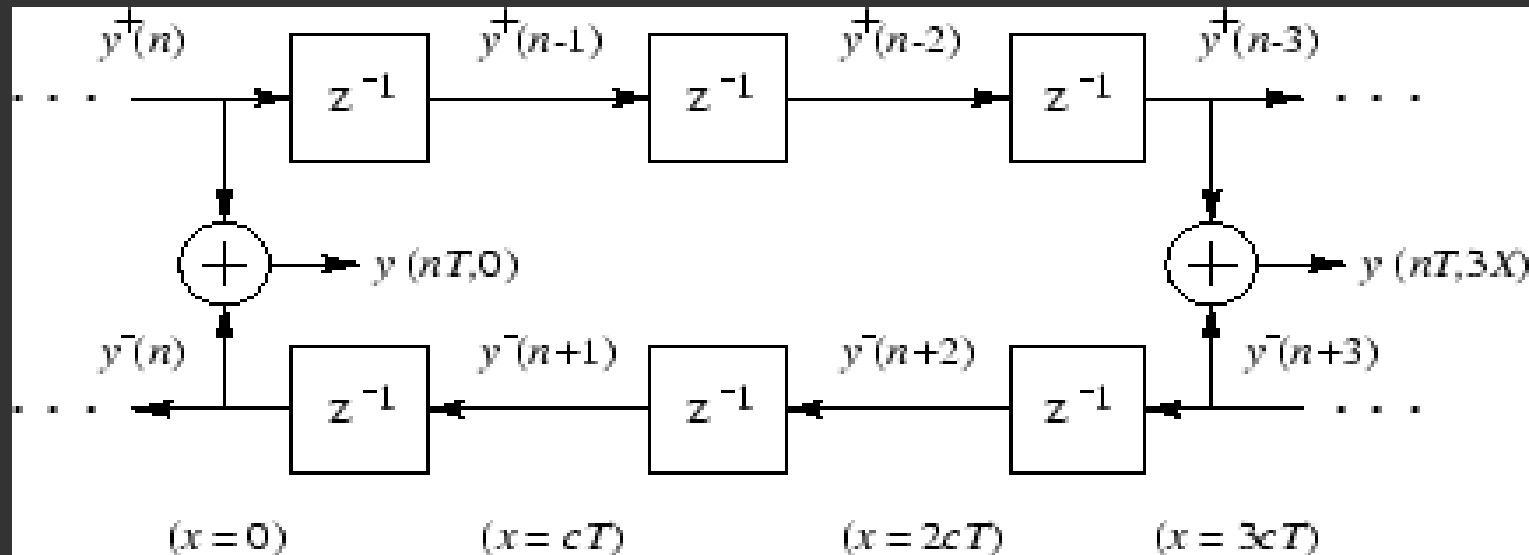
$$y^+(n) \triangleq y_r(nT) \qquad y^-(n) \triangleq y_l(nT)$$

$$y(t_n, x_m) = y^+(n - m) + y^-(n + m)$$

„Przejdźcie” fali między punktami odległymi o X zajmuje czas T – opóźnienie o jedną próbkę (z^{-1})

Cyfrowy model falowodowy

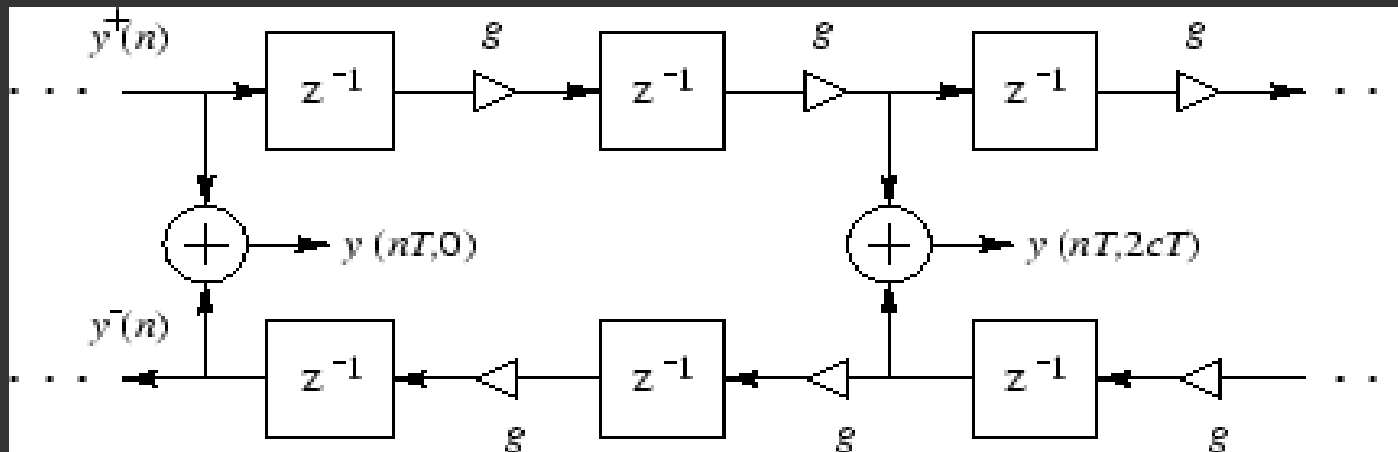
Model cyfrowy idealnego, bezstratnego falowodu



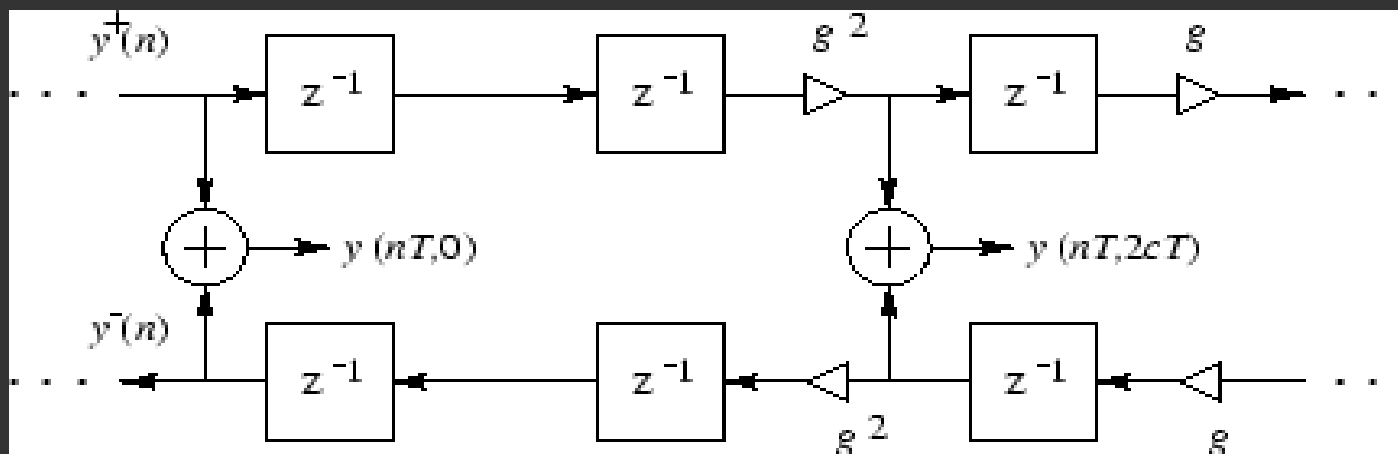
Model z uwzględnieniem tłumienia struny

Uwzględnienie tłumienia drgań w modelu falowodowym

$$y(t, x) = e^{-(\mu/2\epsilon)x/c} y_r(t - x/c) + e^{(\mu/2\epsilon)x/c} y_l(t + x/c)$$



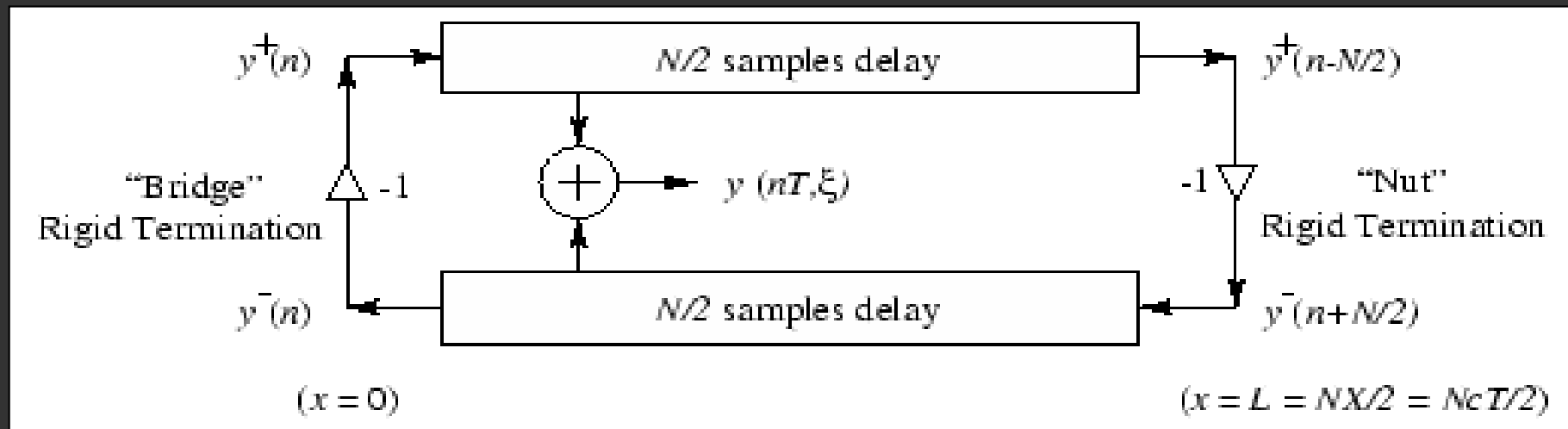
$$g = e^{-\mu T/2\epsilon}$$



Modelowanie sztywnych zakończeń

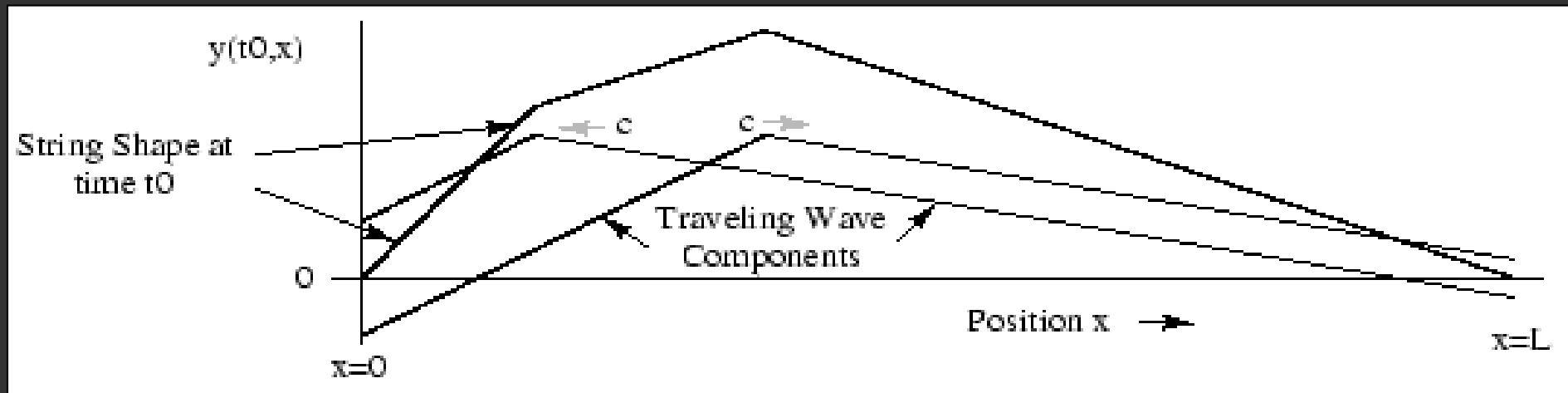
Modelowanie drgającej struny ze sztywnymi zakończeniami:
warunki początkowe

$$y(t, 0) \equiv 0 \quad y(t, L) \equiv 0$$

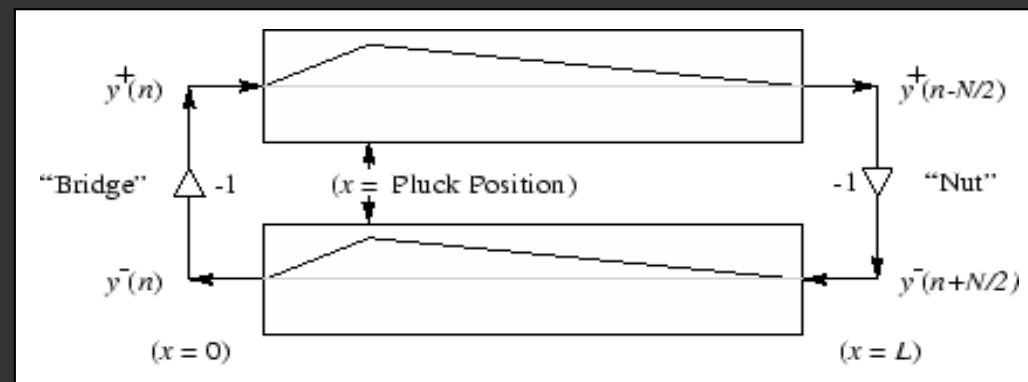


Model szarpniętej struny

Struna ze sztywnymi zakończeniami, pobudzona szarpnięciem (*plucked string*), np. gitara

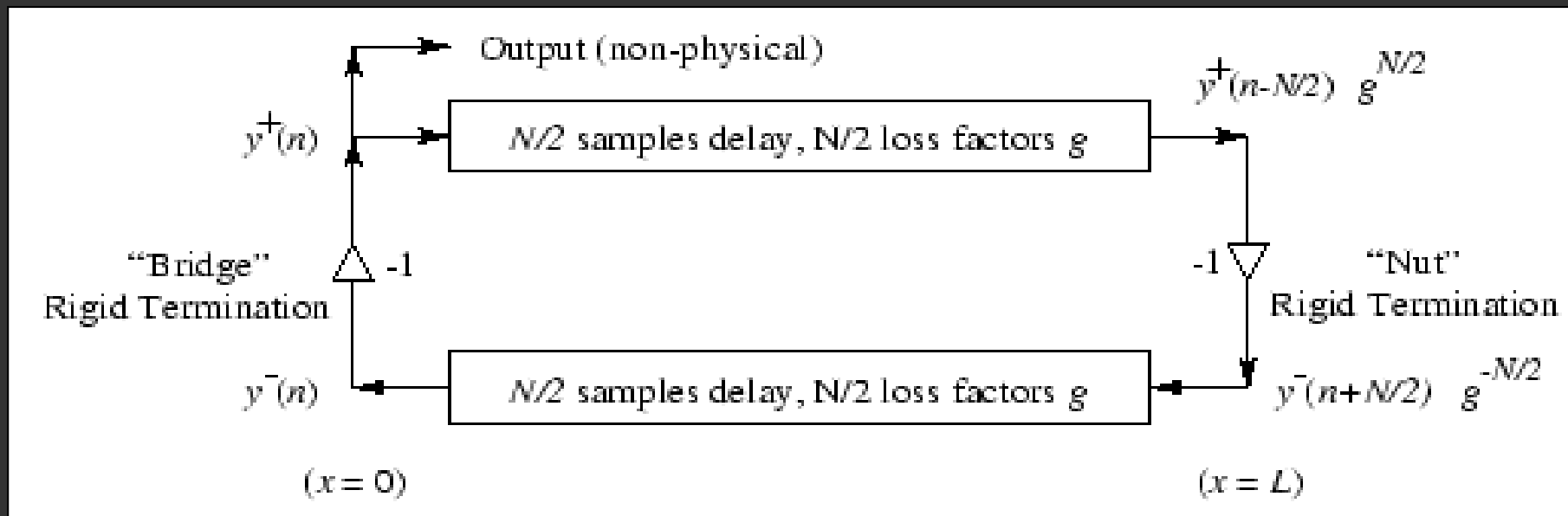


warunki
początkowe:



Model szarpniętej struny

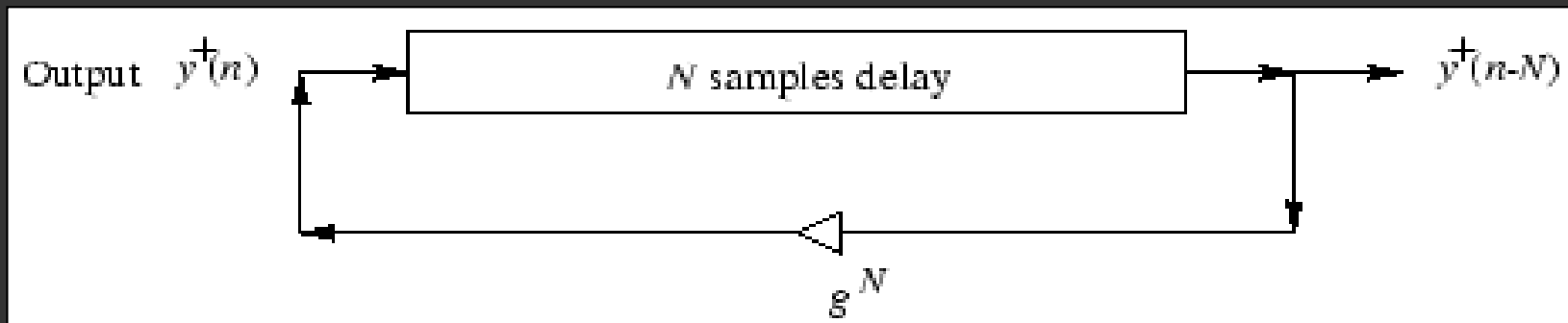
Model struny z uwzględnieniem tłumienia drgań



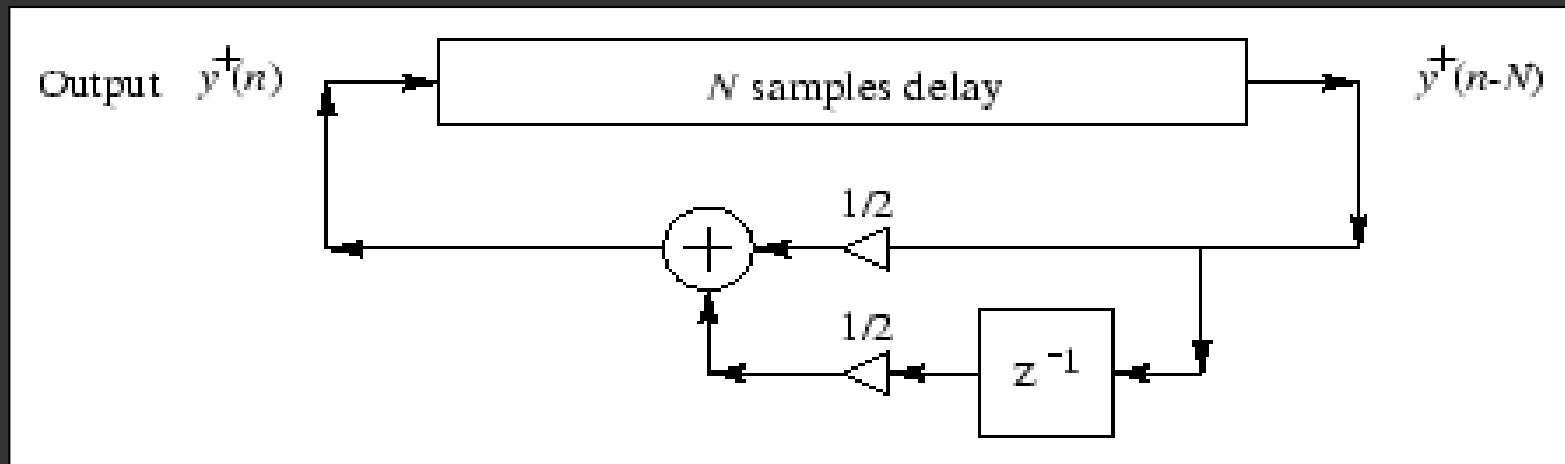
- Bufor dla próbek nazywa się **linią opóźniającą** (*delay line*).
- Długość linii opóźniającej ($N/2$) zależy od długości struny.
- Współczynnik g wyznacza tłumienie drgań na jednostkę długości struny.

Uwzględnienie strat energii

Model struny z uwzględnieniem tłumienia stałego



Model falowodowy szarpniętej struny **Karplusa-Stronga** z uwzględnieniem tłumienia zależnego od częstotliwości



Składniki modelu falowodowego

Modele falowodowe budujemy z:

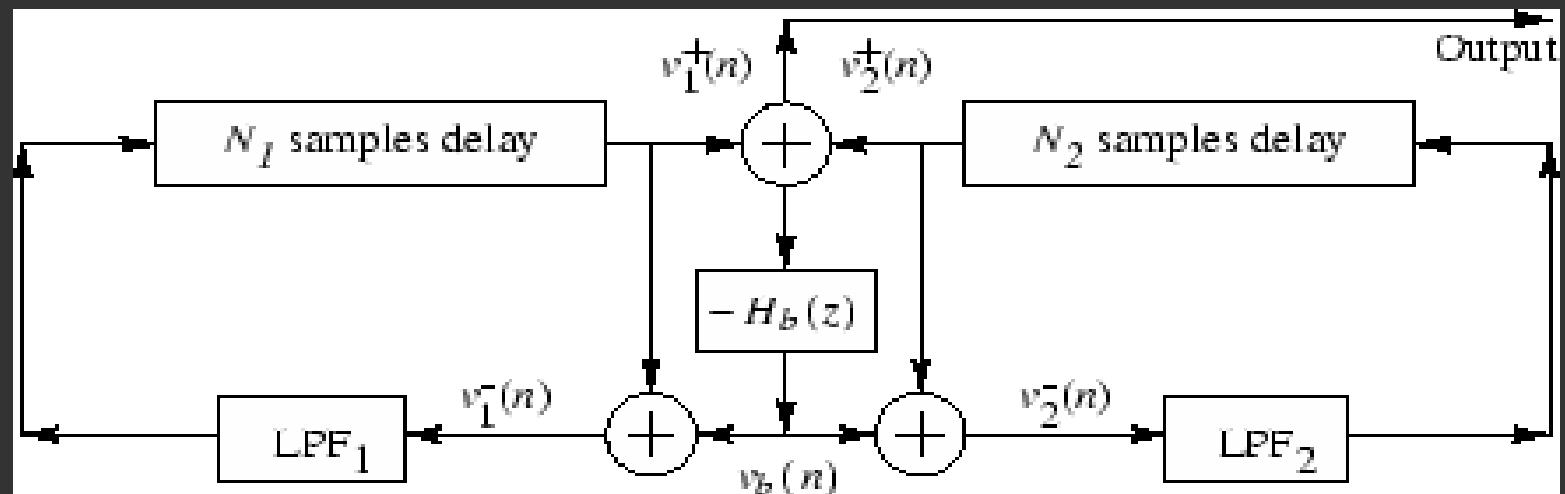
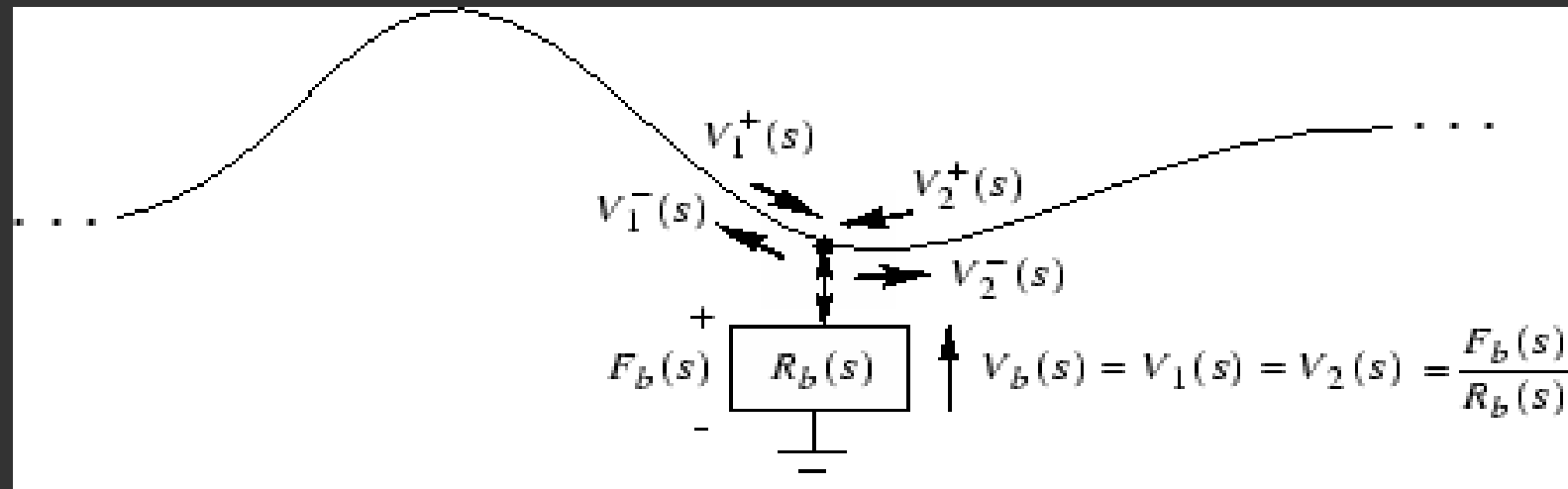
- linii opóźniających (buforów próbek),
- filtrów cyfrowych,
- współczynników skalujących,
- stablicowanych funkcji (*lookup table*).

Model falowodowy nie ma wejścia. Pobudzenie wprowadza się wpisując odpowiedni kształt pobudzenia do linii opóźniających.

Parametry modelu mogą być zmieniane w trakcie odtwarzania dźwięku – efekt jest natychmiastowy!

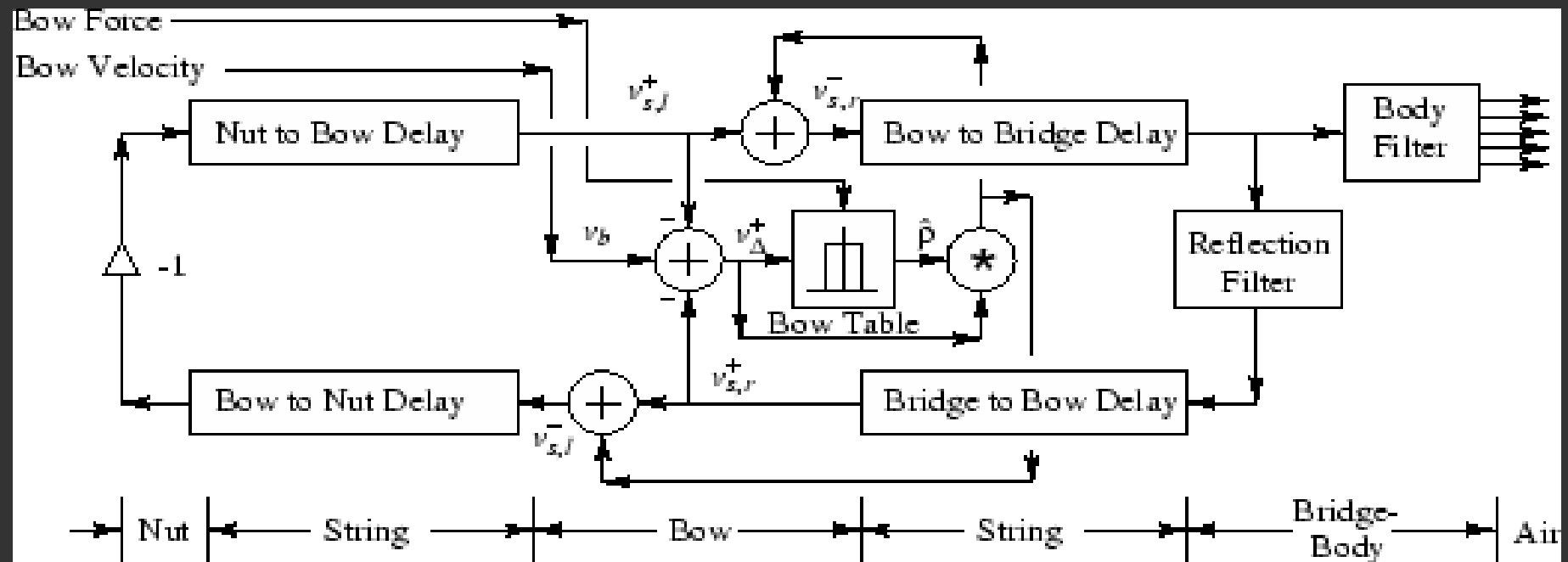
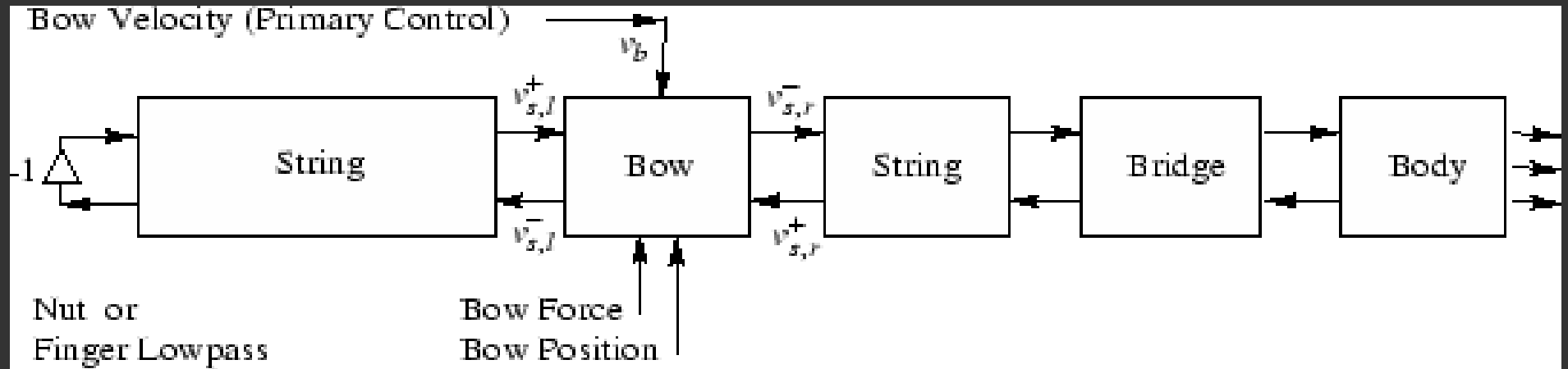
Sprężenie strun (model gitary)

Model strun sprzężonych poprzez mostek



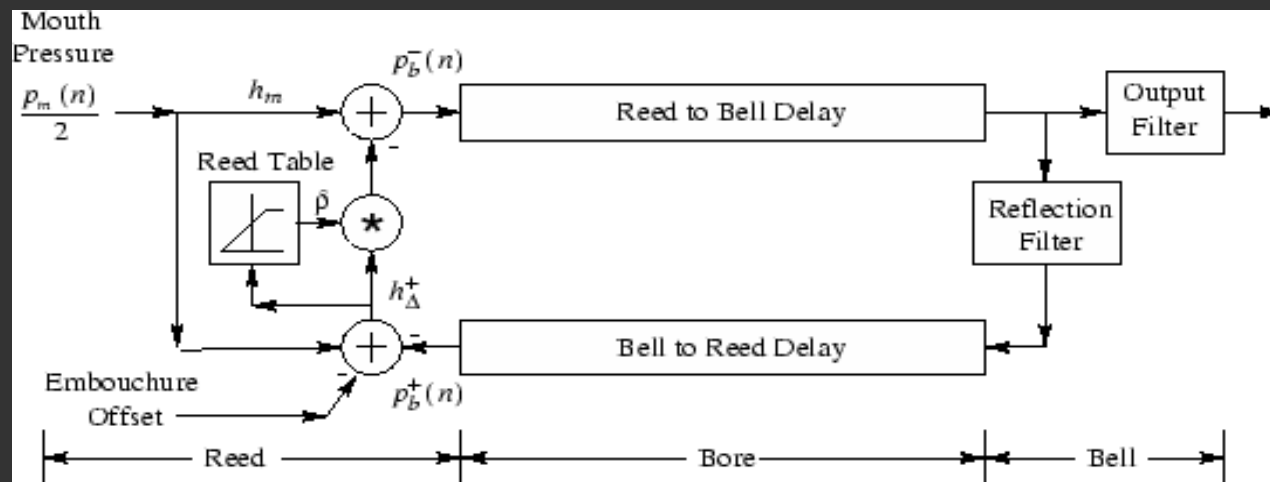
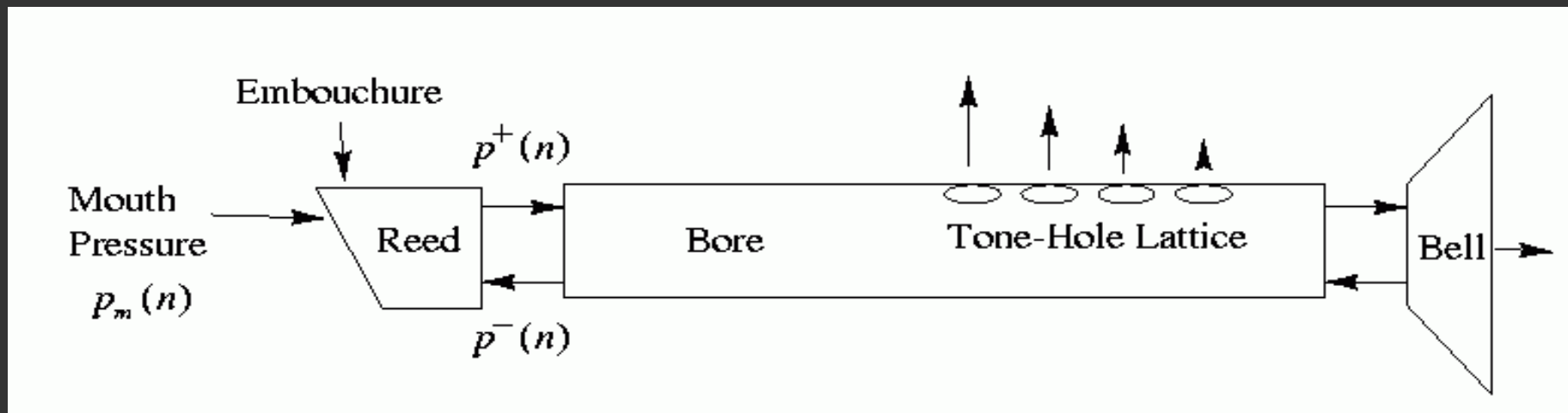
Model instrumentu smyczkowego

Model instr. smyczkowego (np. wiolonczela)



Model instrumentu dętego

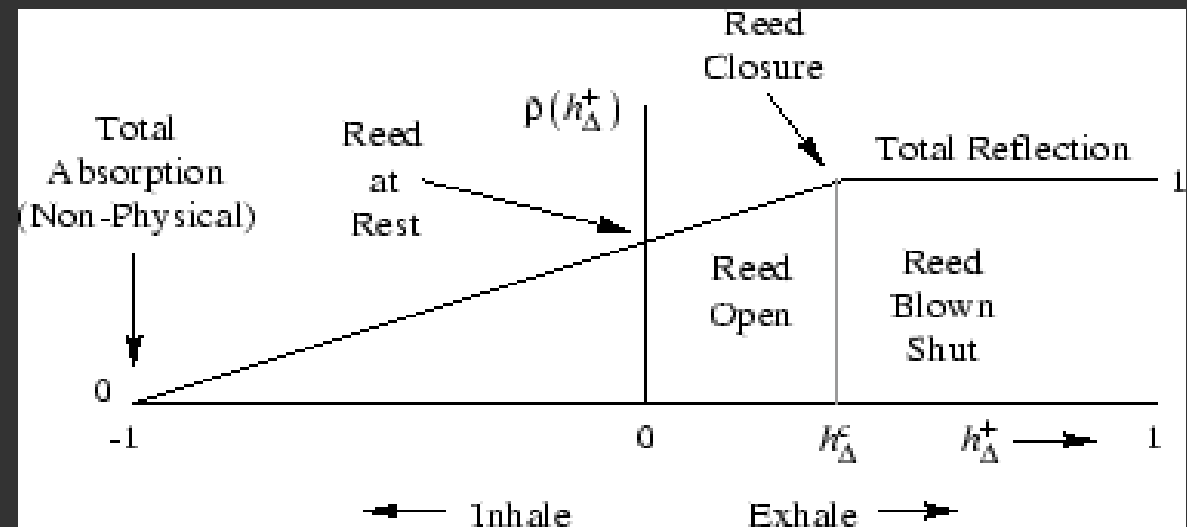
Model instrumentu dętego z pojedynczym stroikiem (*single reed*), np. klarnet – tutaj falowodem jest słup powietrza w korpusie, a model jest pobudzany szumem.



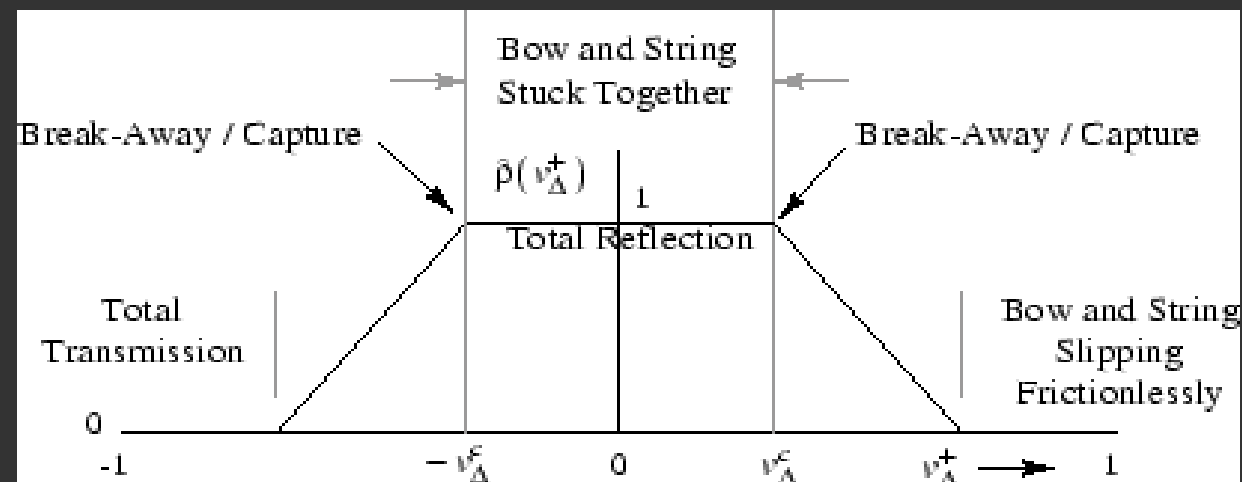
Modele pobudzenia

Modele pobudzenia zapisywane są w tablicy

Instr. stroikowy
reed table

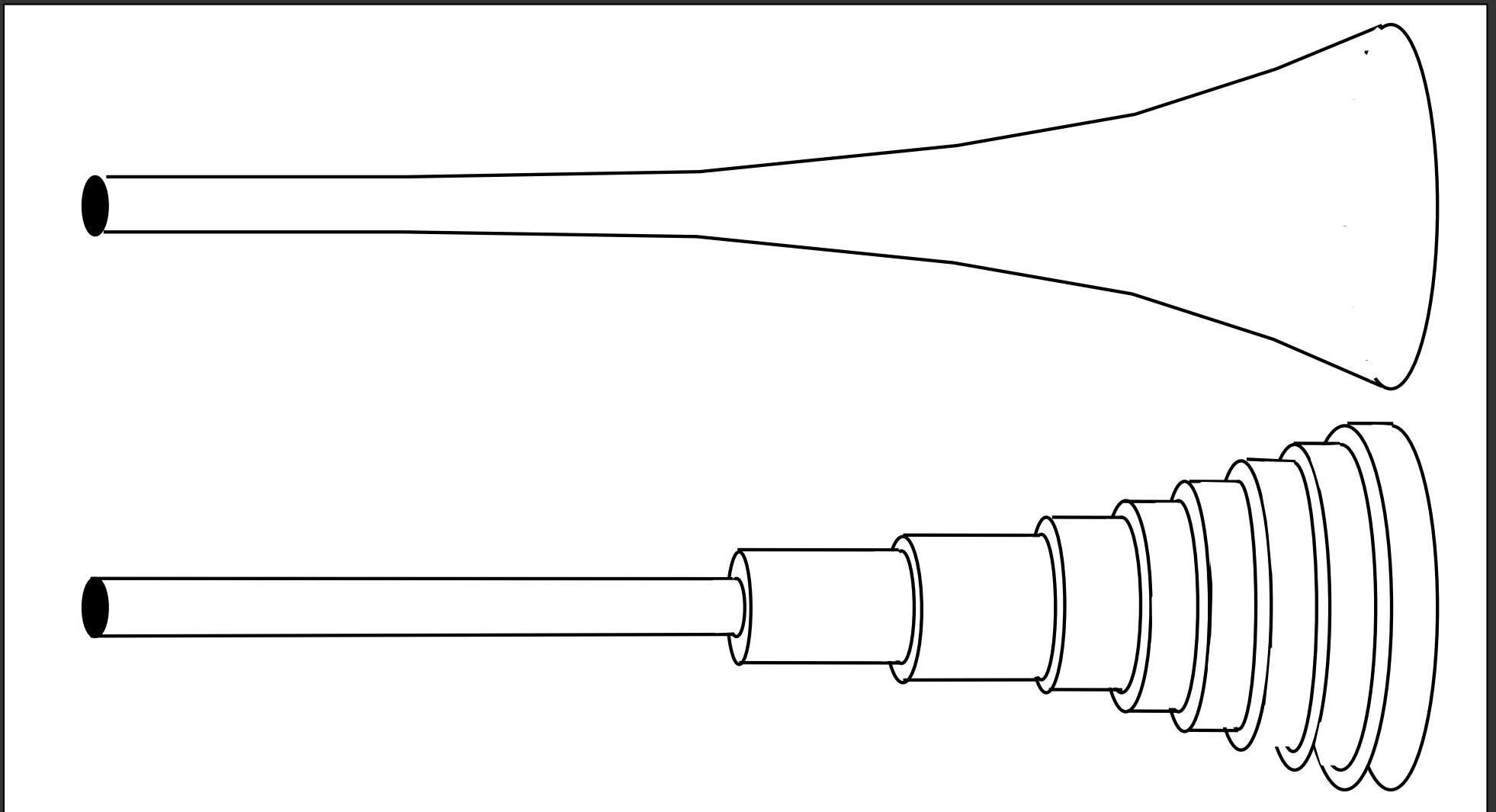


Instr. smyczkowy
bow table



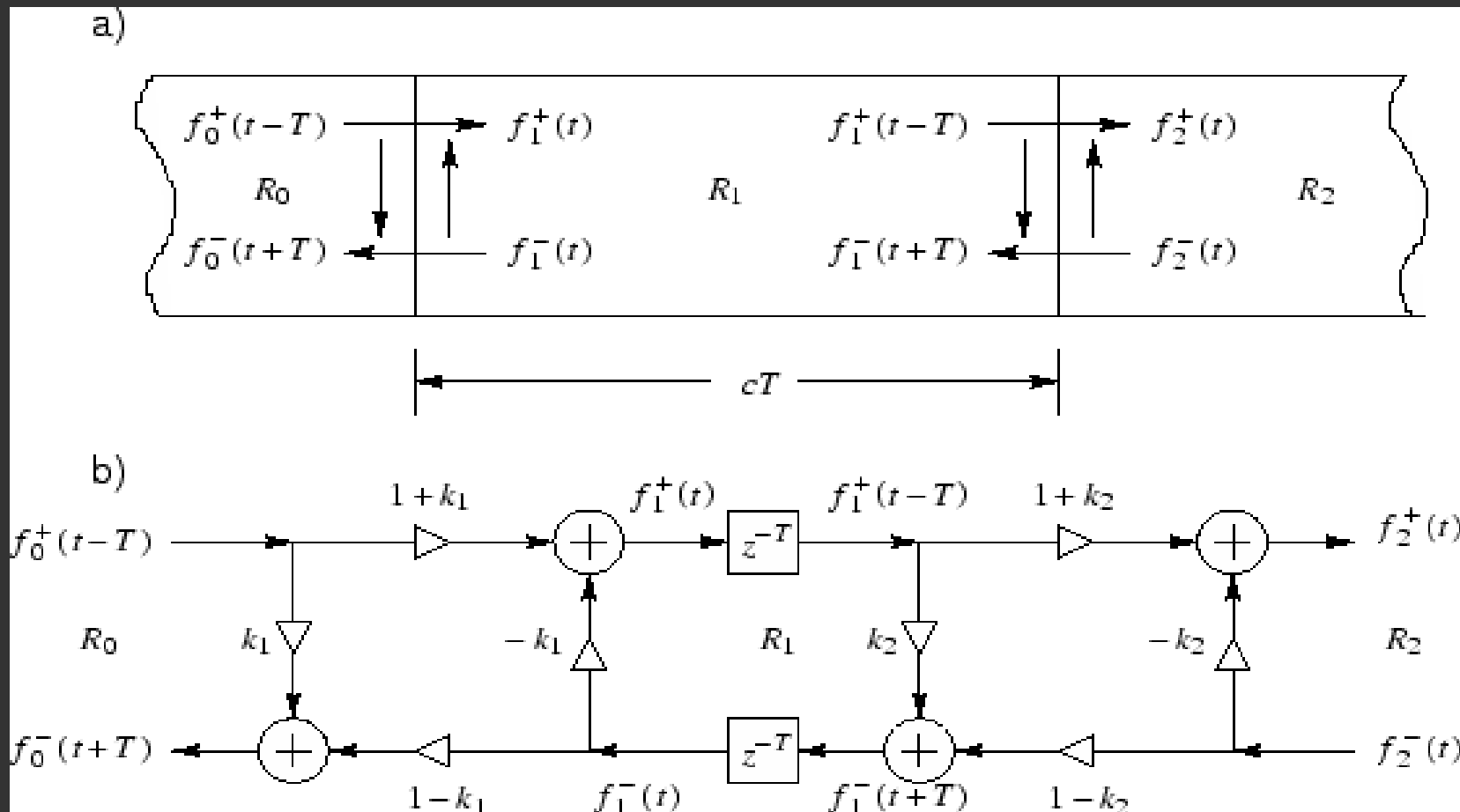
Modelowanie kształtu instrumentu

Kształt instrumentu jest aproksymowany za pomocą układu falowodów cylindrycznych.

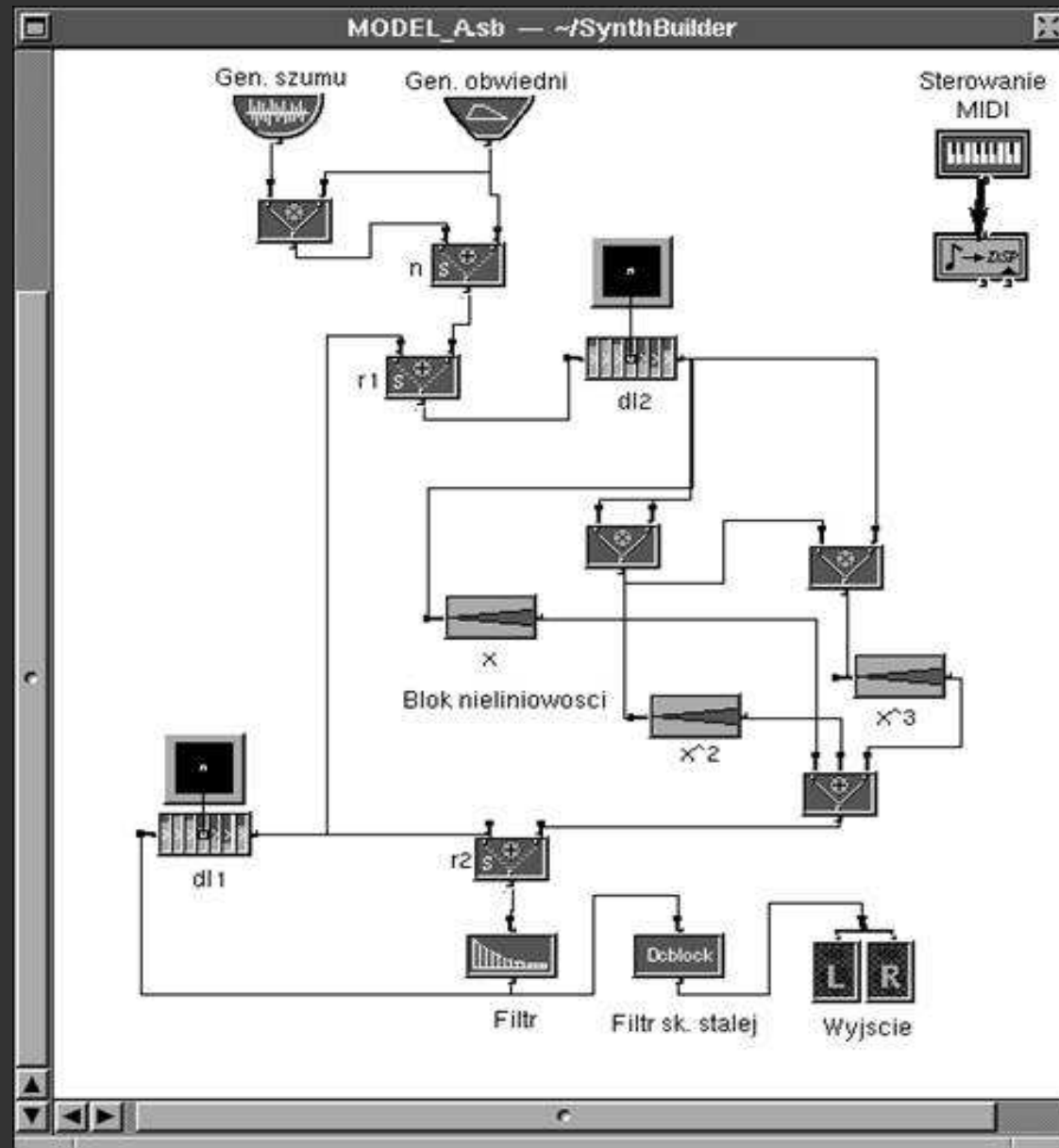
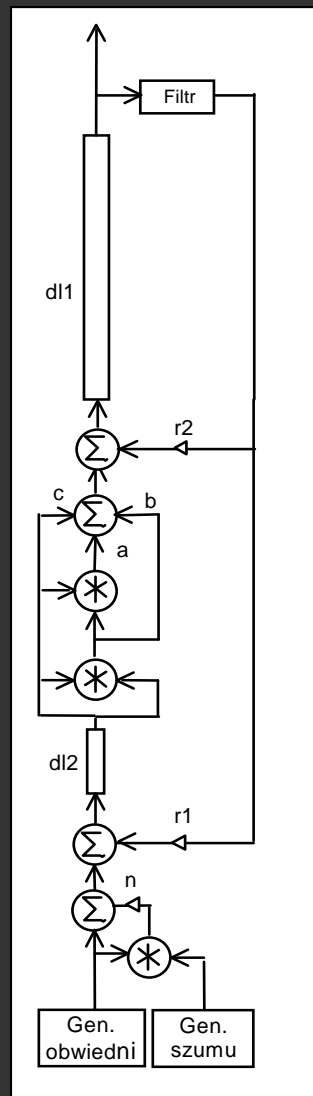
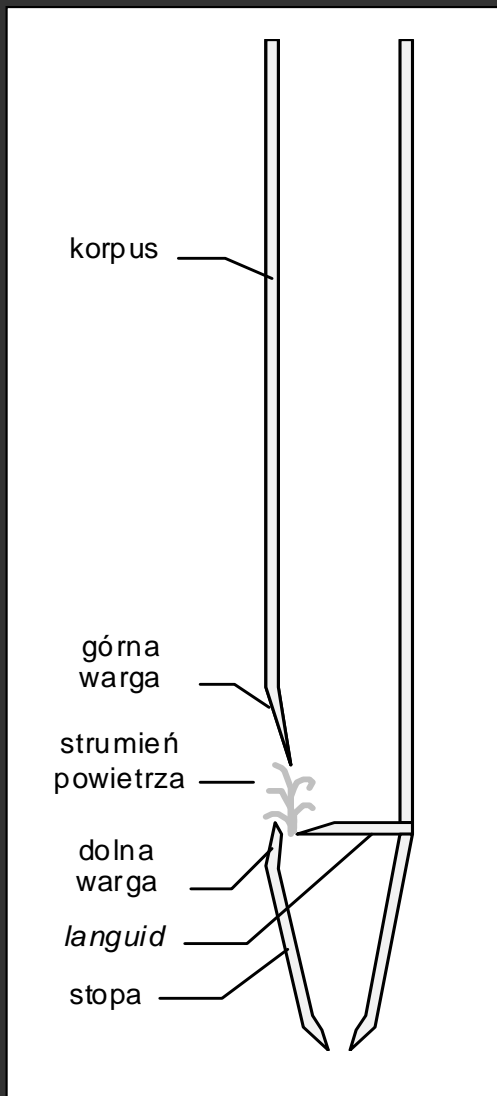


Modelowanie kształtu instrumentu

Odcinki falowodu są łączone za pomocą bloków symulujących tłumienie energii na styku odcinków.

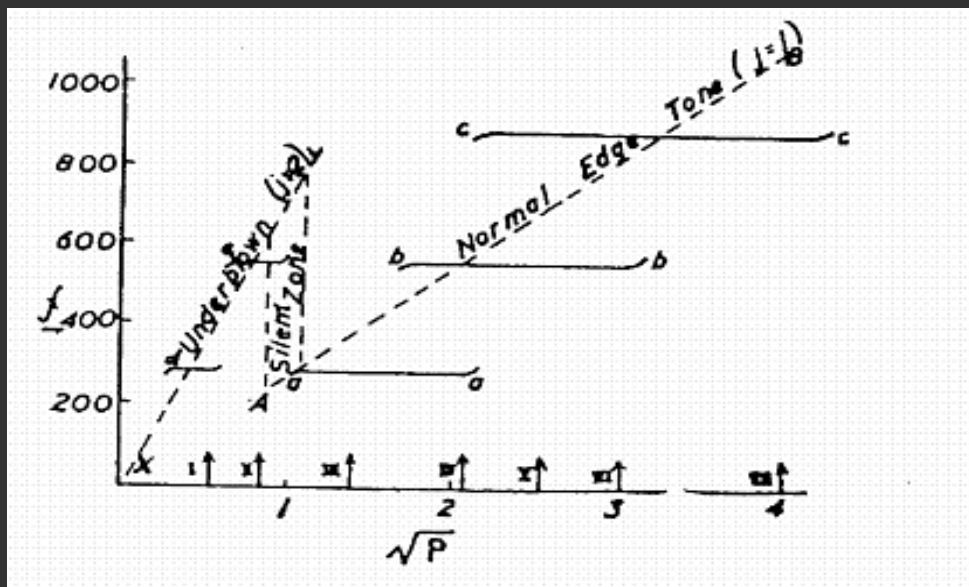


Model piszczałki organowej wargowej

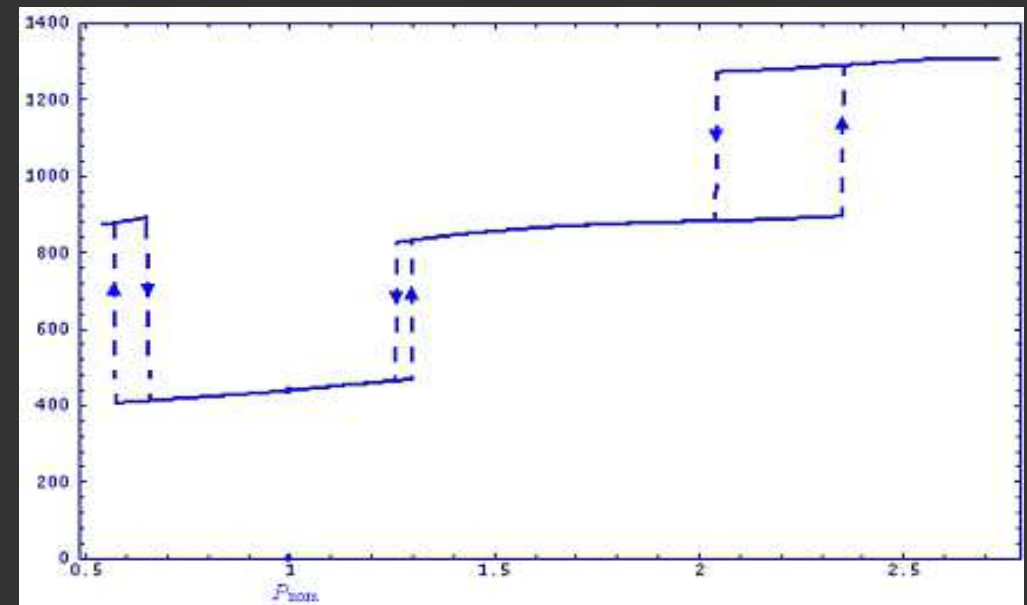


Model piszczałki organowej wargowej

Odpowiedź piszczałki organowej na zmiany ciśnienia
(częstotliwość dźwięku vs. ciśnienie wtłaczane do piszczałki)



Rzeczywista piszczałka
(wyniki pomiarów)



Model falowodowy
(wyniki symulacji)

Problemy modelowania falowodowego

Dlaczego ta metoda się nie przyjęła?

- Niektóre zjawiska fizyczne w instrumencie jest trudno zamodelować w prosty sposób.
- Koszt badań nad modelowaniem instrumentów okazał się zbyt wysoki dla producentów.
- Muzycy narzekali na słabą wierność brzmienia falowodowych instrumentów.
- Sterowanie parametrami modelu przy graniu na żywo było bardzo trudne.
- Trudno było osiągnąć polifonię.

Zastosowanie modeli falowodowych w EIM

- Yamaha VL1 (wyłączna metoda syntezy)
- Korg Prophet (jedna z wielu metod)
- Chipsety do kart dźwiękowych (część instrumentów, pozostałe oparte na próbkach), np. Sound Blaster 64
- Syntezatory programowe – Yamaha S-YXG100plus, Seer Systems Reality, Cakewalk Dimension Pro
- STK (Synthesis Toolkit) – biblioteki dla programistów C++, zawierają proste modele falowodowe.

Instrument falowodowy

Yamaha VL1 (1994)

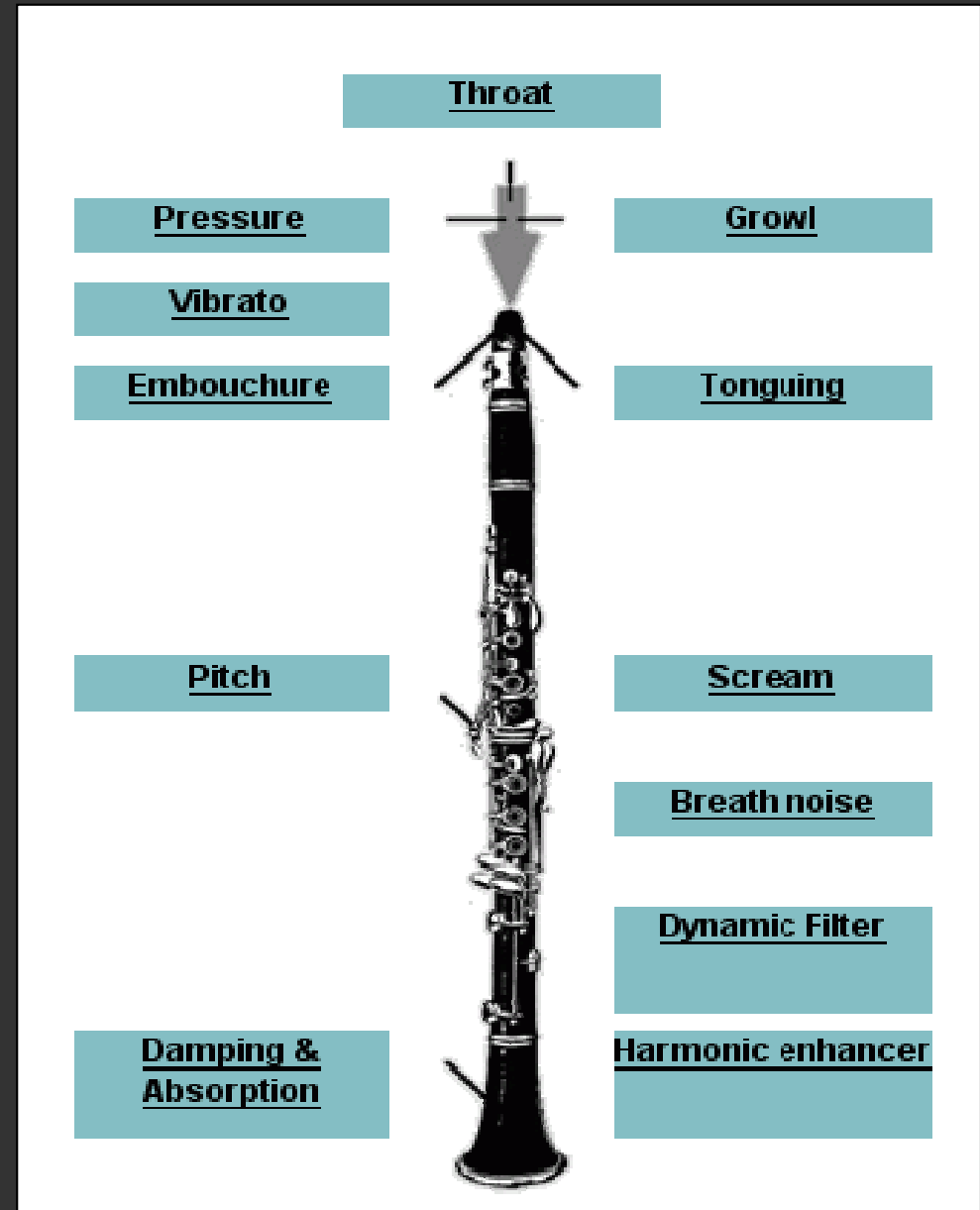
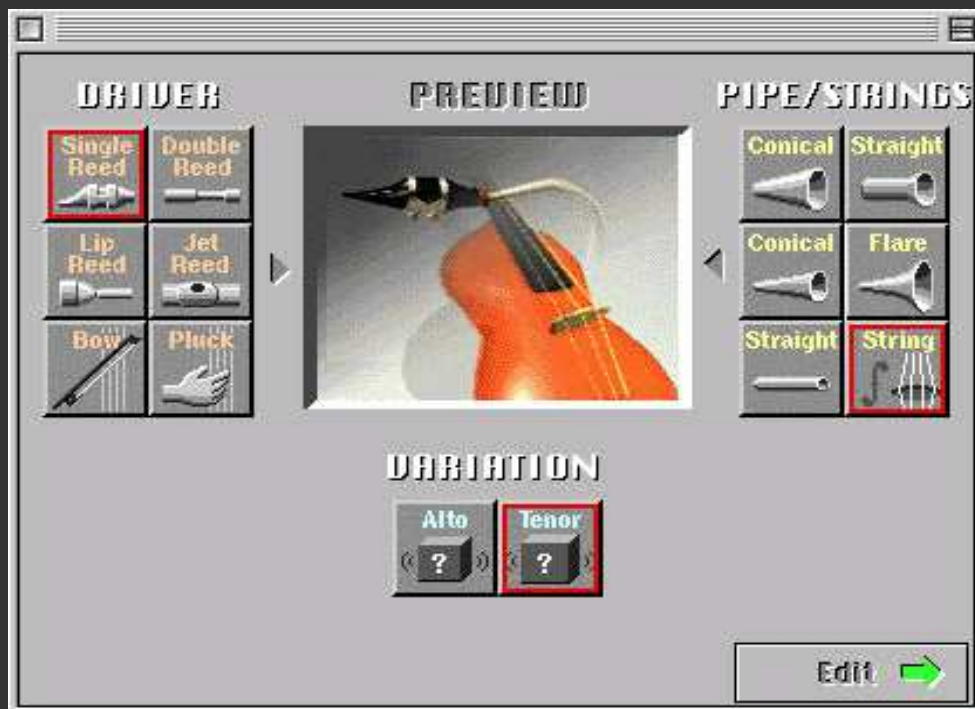
Virtual Acoustic Synthesizer

cena ok. 10 000\$



Instrument falowodowy

Parametrami modelu można sterować za pomocą komunikatów MIDI oraz programu komputerowego



Zalety i wady metody falowodowej

Zalety metody falowodowej:

- możliwość dokładnej symulacji rzeczywistych instrumentów (wierność brzmienia)
- możliwość uwzględnienia zjawisk artykulacyjnych – tego nie ma sampling

Wady metody falowodowej:

- trudność w formułowaniu modelu instrumentu
- uproszczenia – jednowymiarowy falowód, brak nieliniowości, drgań poprzecznych, itp, problem modelowania bardziej skomplikowanych procesów
- trudna obsługa instrumentu dla muzyka - duża liczba parametrów do sterowania

Literatura

- Julius O. Smith: *Digital waveguide synthesis*.
<https://ccrma.stanford.edu/~jos/wg.html>
- Julius O. Smith: *Physical audio signal processing*. W3K Publishing 2010.
https://ccrma.stanford.edu/~jos/pasp/Digital_Waveguide_Models.html
- Andrzej Czyżewski: *Dźwięk cyfrowy*. Exit 2001. Rozdział 8.4: *Modelowanie fizyczne*.
- 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