

Elektroniczne instrumenty muzyczne

SYNTEZA METODĄ MODELOWANIA FIZYCZNEGO

Metoda matematyczna i falowodowa

Wprowadzenie

Metody modelowania fizycznego należą do najnowszych metod syntezy dźwięku.

Odmienne podejście do syntezy dźwięku:
bepośrednia symulacja zjawisk fizycznych zachodzących w rzeczywistych instrumentach.

Symulujemy instrument, a nie dźwięk przez niego wytwarzany!

Główne metody modelowania fizycznego:

- modelowanie matematyczne
- metoda falowodowa

MODELOWANIE MATEMATYCZNE

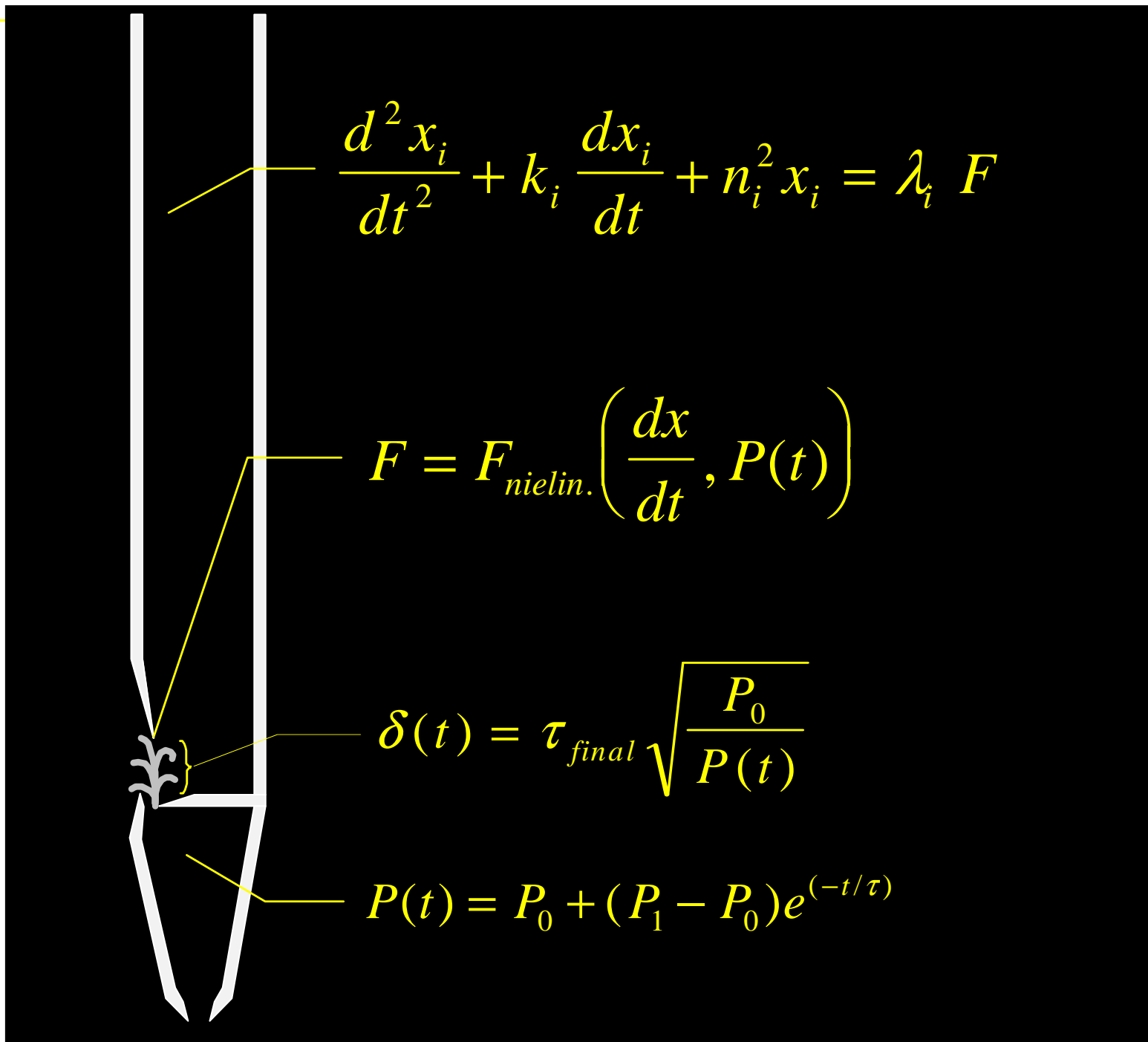
- Metoda modelowania matematycznego oparta jest na bezpośrednim rozwiązywaniu równania falowego opisującego powstawanie dźwięku w instrumencie.
- Funkcja będąca rozwiązaniem równania falowego stanowi przebieg czasowy dźwięku syntetycznego.
- Rozwiązanie równania falowego wymaga złożonego aparatu matematycznego (układy równań różniczkowych).
- Głównym problemem jest tu właściwy opis matematyczny procesu powstawania dźwięku w instrumencie.

Modelowanie matematyczne

Etapy modelowania matematycznego:

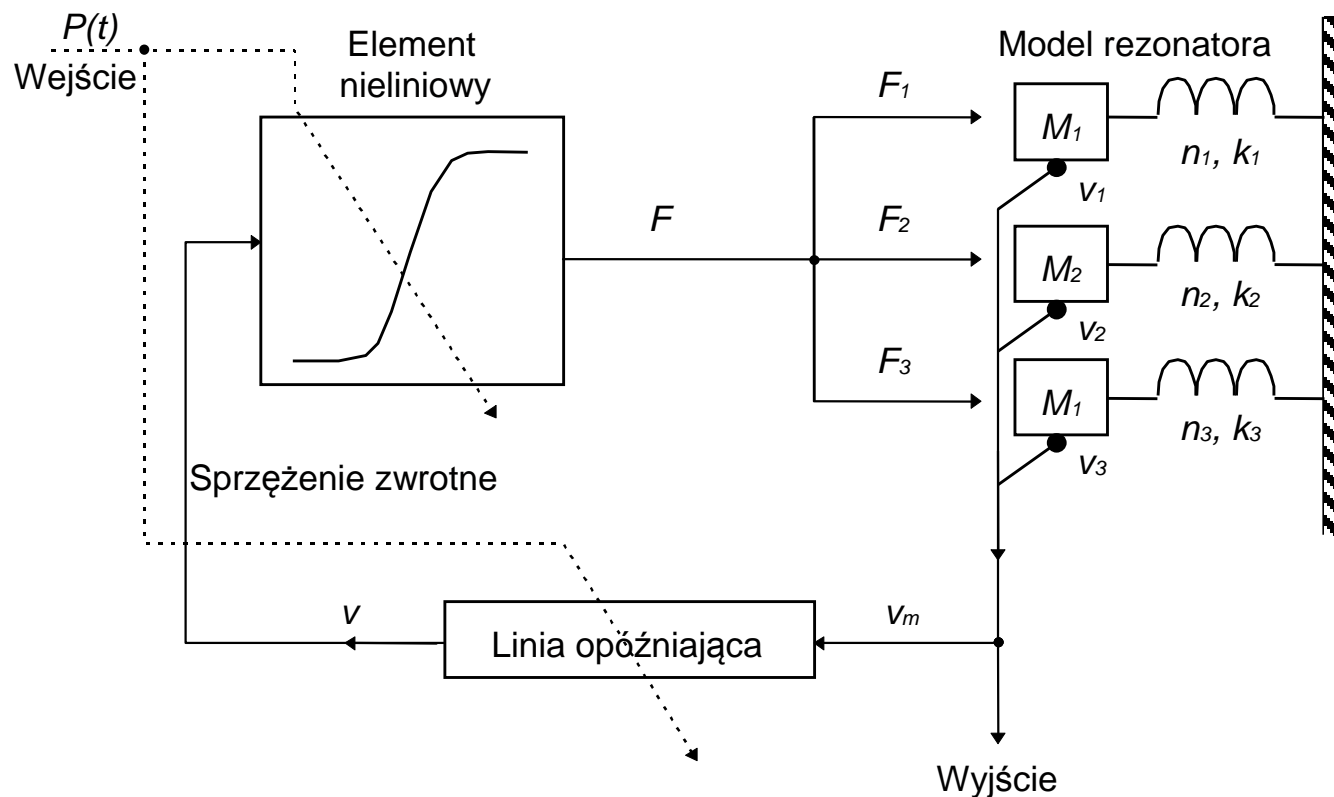
- sformułowanie systemu, który odzwierciedla proces wytwarzania dźwięku w rzeczywistym instrumencie
- wyznaczenie wartości parametrów wykorzystywanych w równaniach
- przeprowadzenie symulacji numerycznych
- badanie wpływu zmian parametrów modelu na jego charakterystyki

Model mat. puszczatki organowej



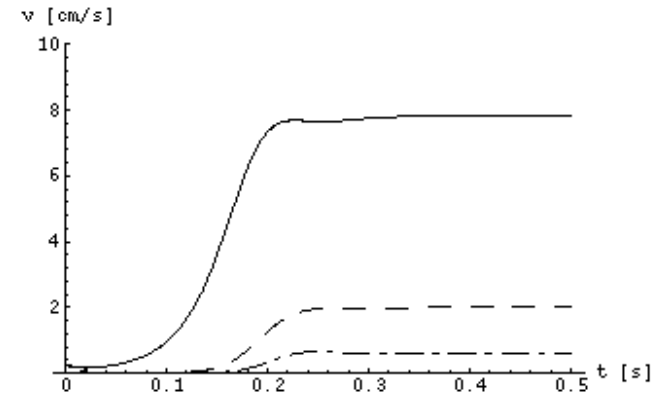
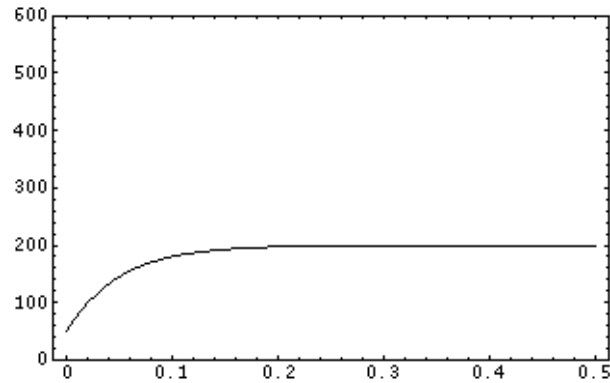
Model mat. piszczałki organowej

Organowa piszczałka wargowa – model blokowy

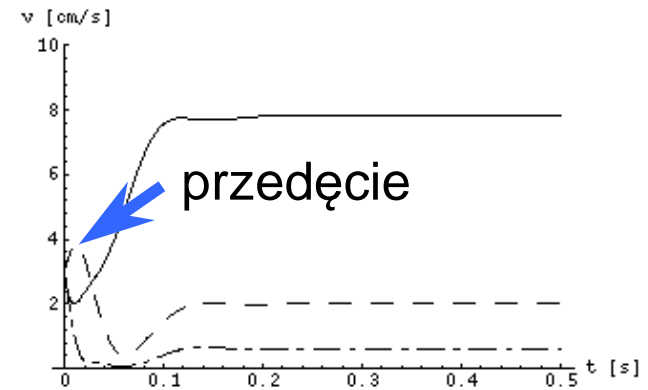
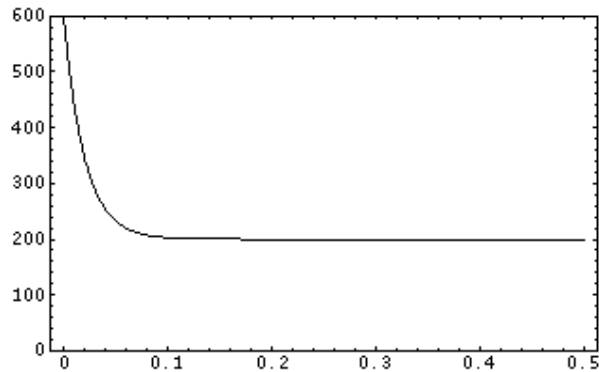


Model matematyczny piszczatki

Symulacja dla ataku wolnego



Symulacja dla ataku wybuchowego



Metoda matematyczna

Zalety metody matematycznej:

- możliwość dokładnej symulacji rzeczywistych instrumentów (wierność brzmienia)
- możliwość uwzględnienia zjawisk artykulacyjnych

Wady metody:

- duża złożoność obliczeniowa – konieczność rozwiązywania układu nieliniowych równań różniczkowych
- trudność opisu matematycznego instrumentu

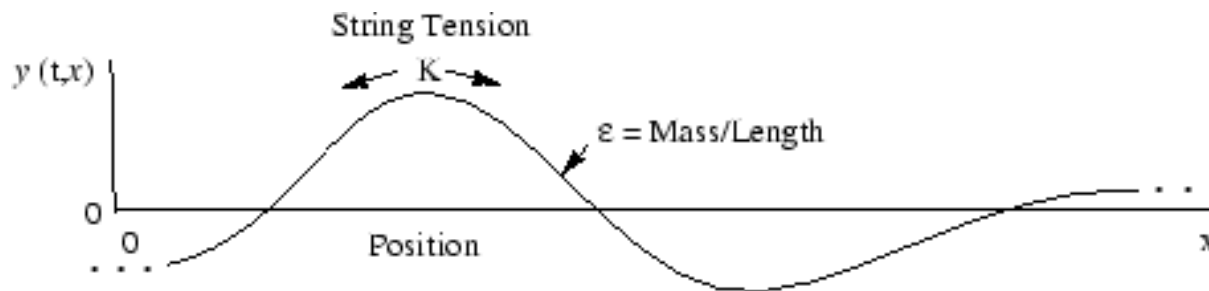
METODA FALOWODOWA

Metoda cyfrowego modelowania falowodowego
ang. *digital waveguide modeling*

- Opracowana na uniwersytecie w Stanford (USA) na początku lat 90.
- Polega na modelowaniu przy pomocy cyfrowego falowodu fal bieżących składających się na falę stojącą w danym instrumencie.
- Implementacja: algorytm cyfrowy, np. program komputerowy.

Model drgającej struny

Idealna (bezstratna) drgająca struna



Ciśnienie p jest funkcją czasu t oraz miejsca x :

$$p(x, t)$$

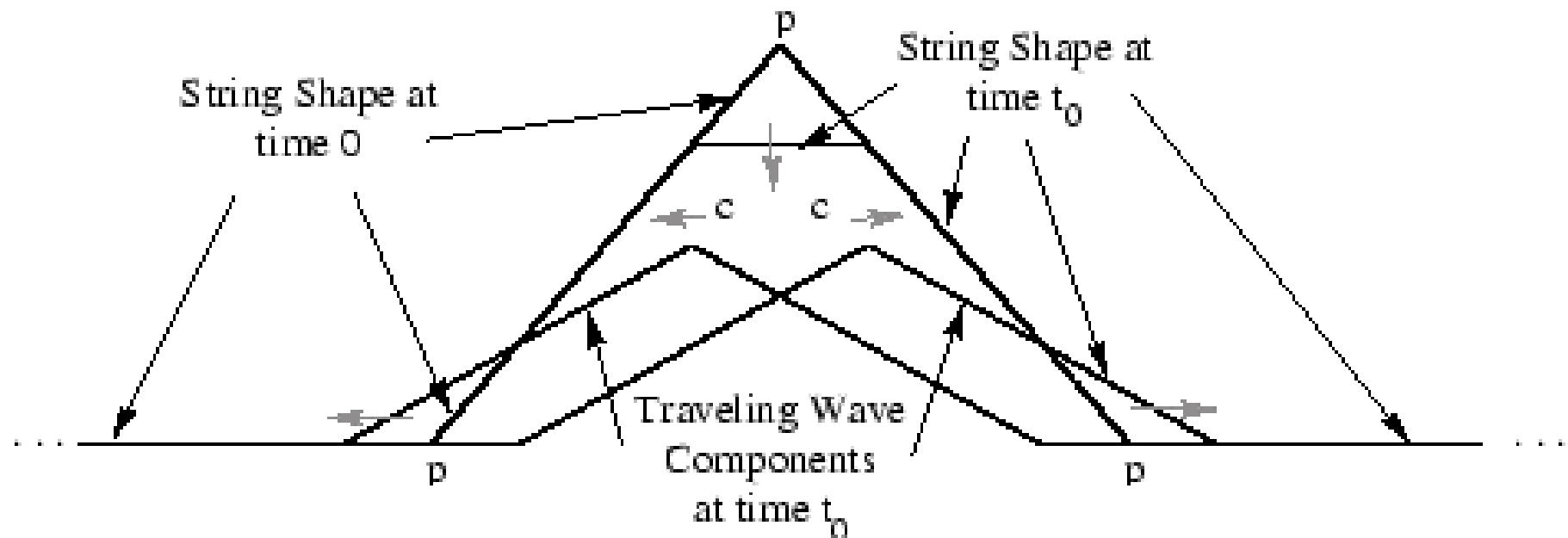
Równanie falowe (jednowymiarowe):

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

Model bezstratnej drgającej struny

Rozwiązanie ogólne równania falowego dla idealnej (bezstratnej) drgającej struny:
suma dwóch **fal bieżących** (*travelling waves*)
propagowanych 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:

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

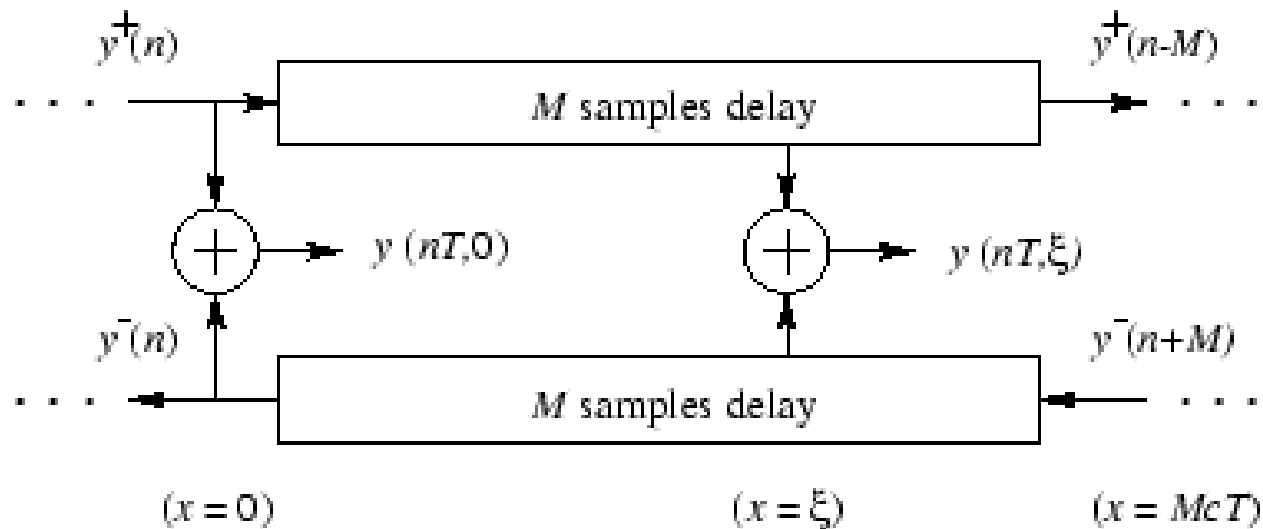
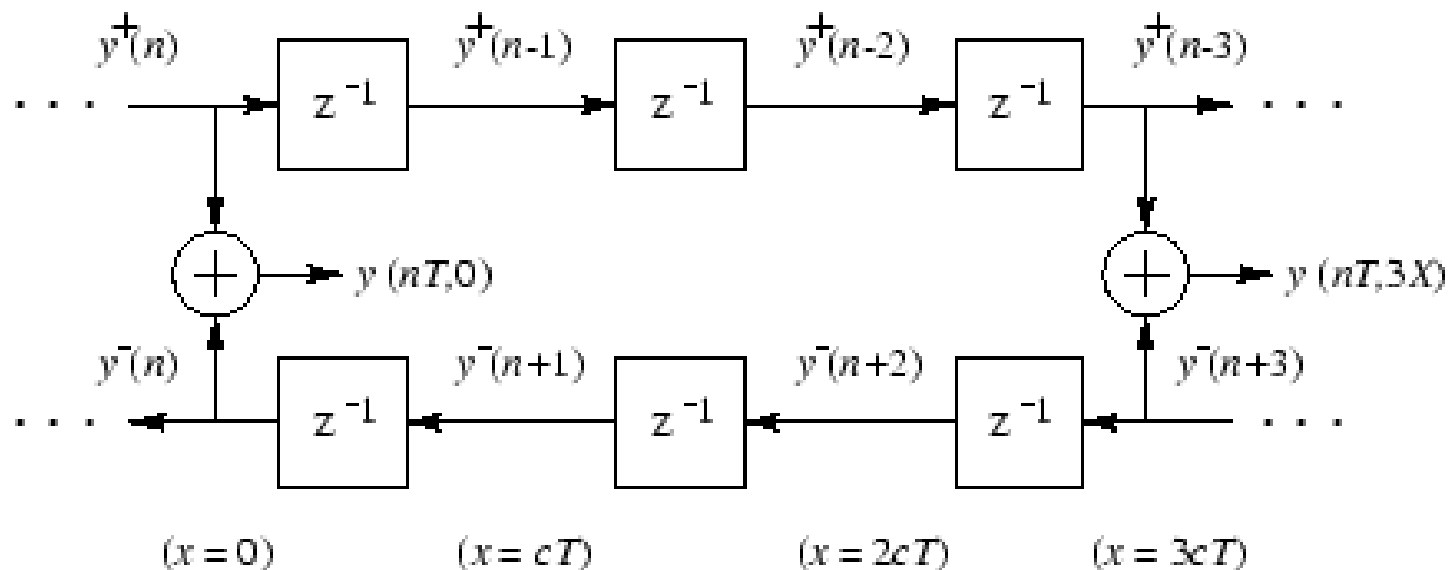
$$y^+(n) \triangleq y_r(nT) \qquad y^-(n) \triangleq y_l(nT)$$

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

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

Cyfrowy model falowodowy

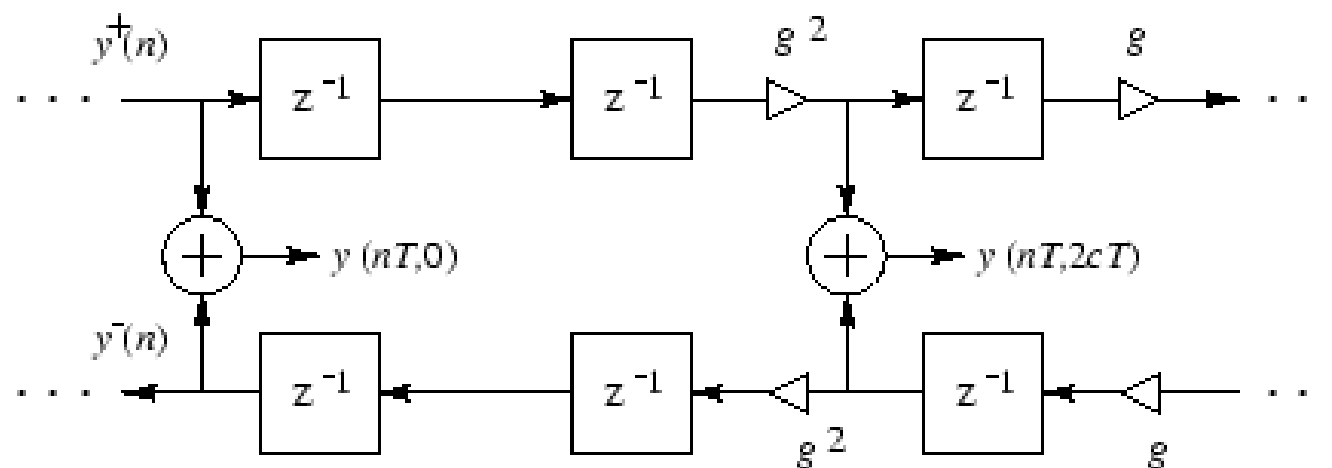
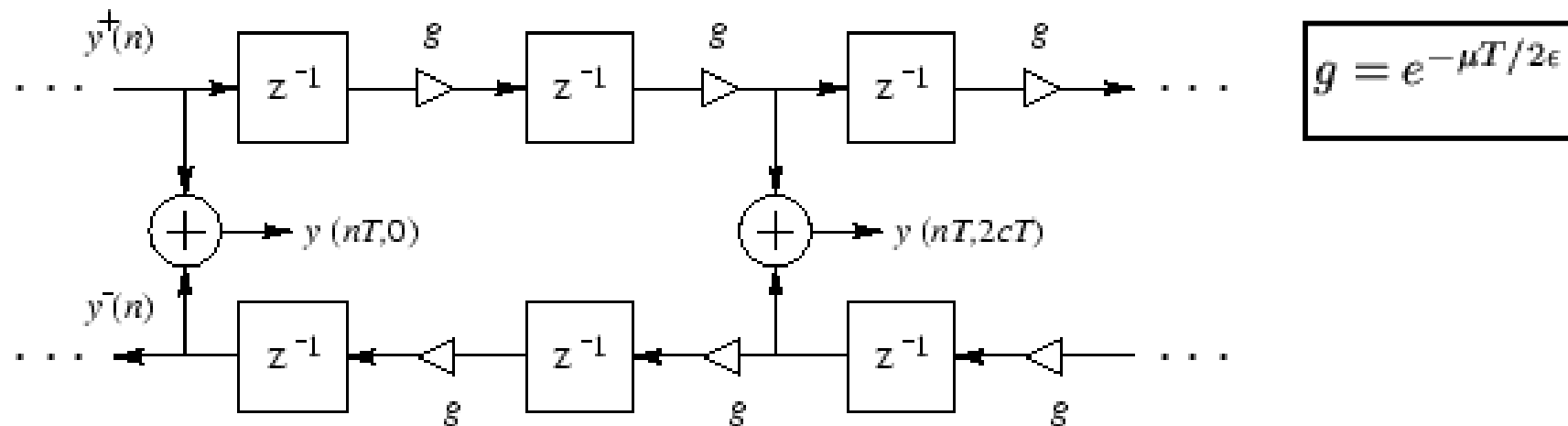
Model cyfrowy idealnego, bezstratnego falowodu



Model z uwzględnieniem strat energii

Uwzględnienie strat energii w modelu falowodowym

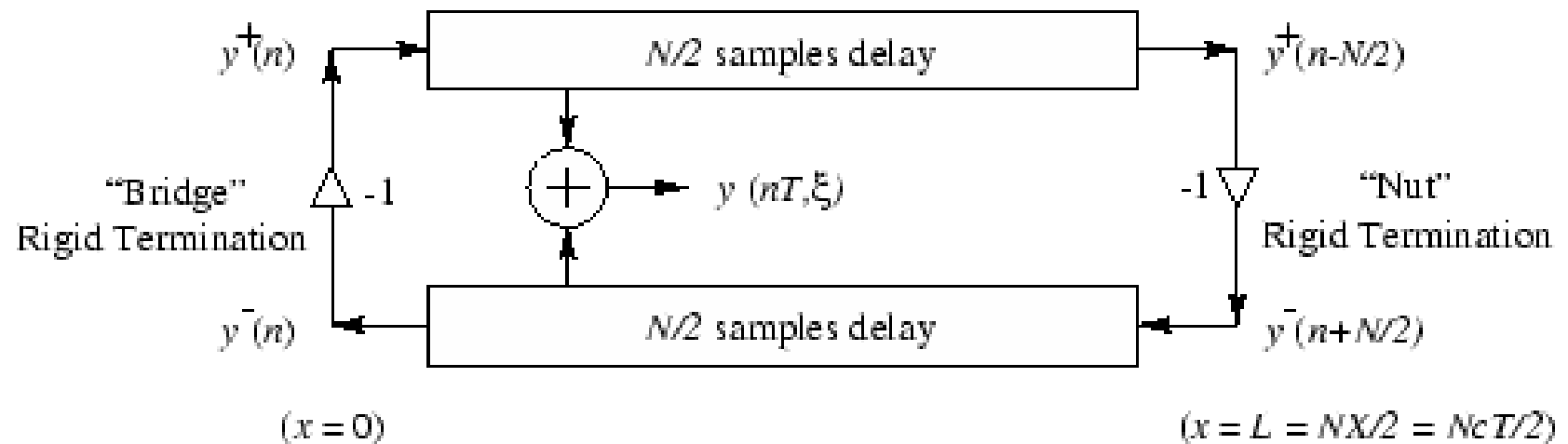
$$y(t, x) = e^{-(\mu/2\epsilon)x/c} y_r(t - x/c) + e^{(\mu/2\epsilon)x/c} y_l(t + x/c)$$



Modelowanie sztywnych zakończeń

Modelowanie drgającej struny ze sztywnymi zakończeniami:

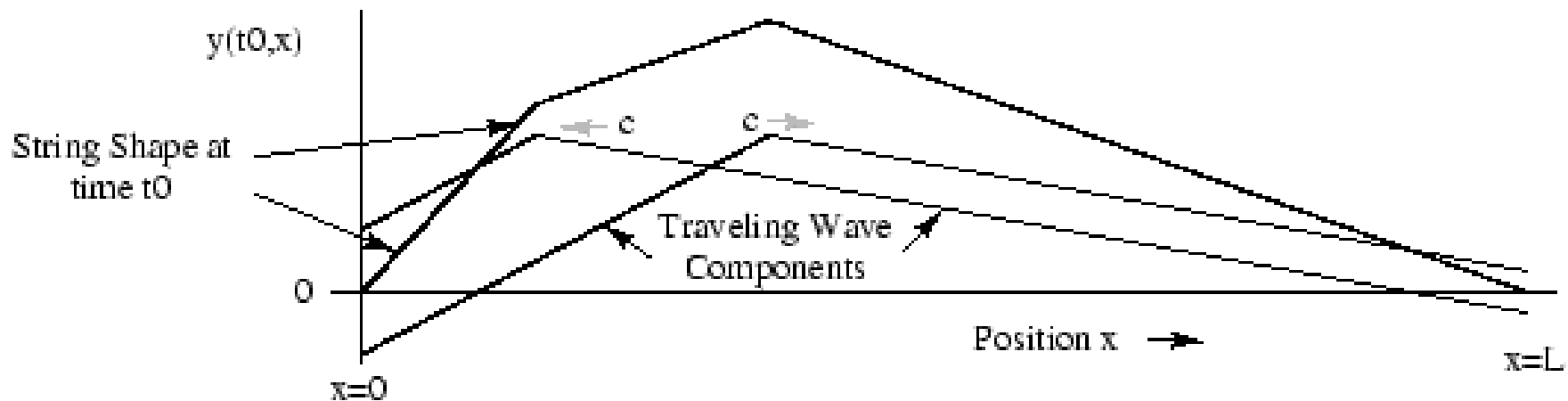
warunki początkowe $y(t, 0) \equiv 0$ $y(t, L) \equiv 0$



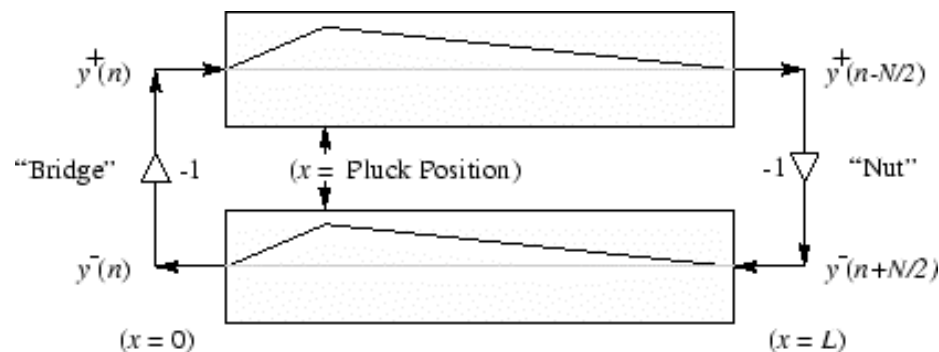
Model szarpniętej struny

Idealna struna ze sztywnymi zakończeniami,
pobudzona szarpnięciem (*plucked string*)

np. gitara

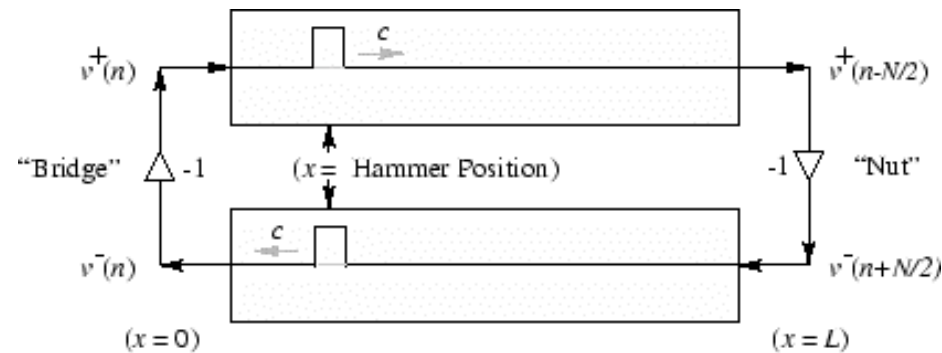


warunki
początkowe:

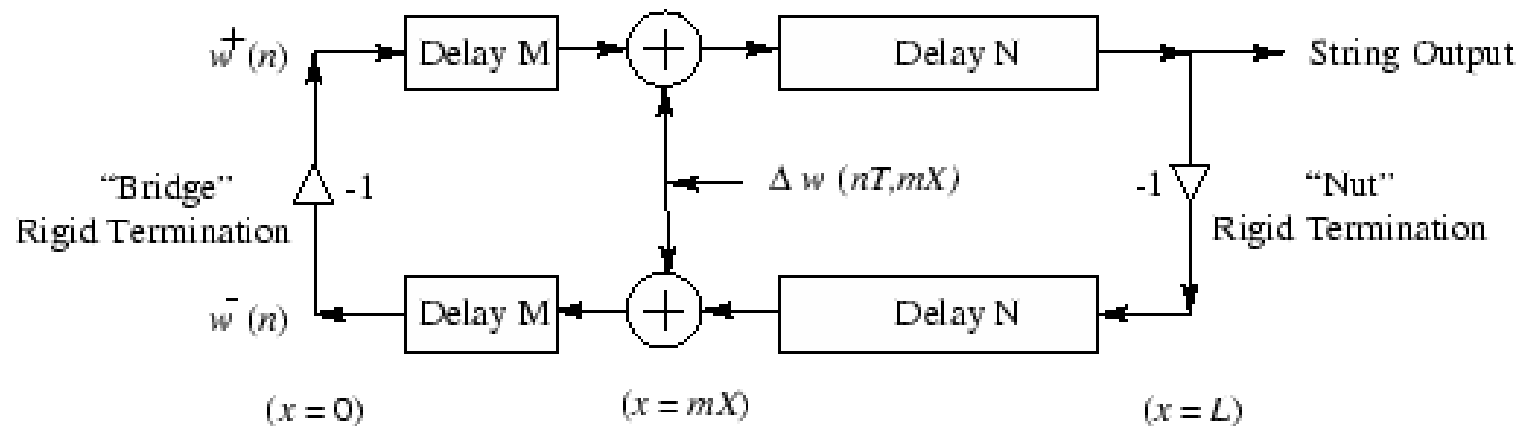


Inne modele struny

Model idealnej struny uderzonej (*struck string*), np. fortepian

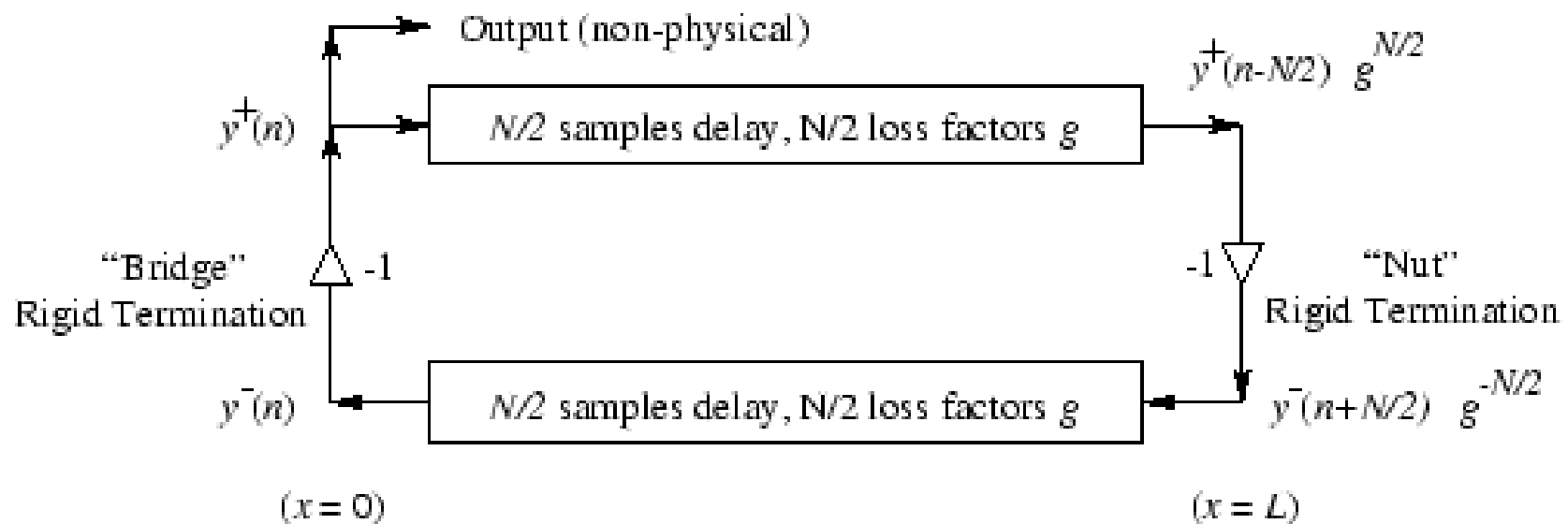


Model struny pobudzonej zewnętrznie:



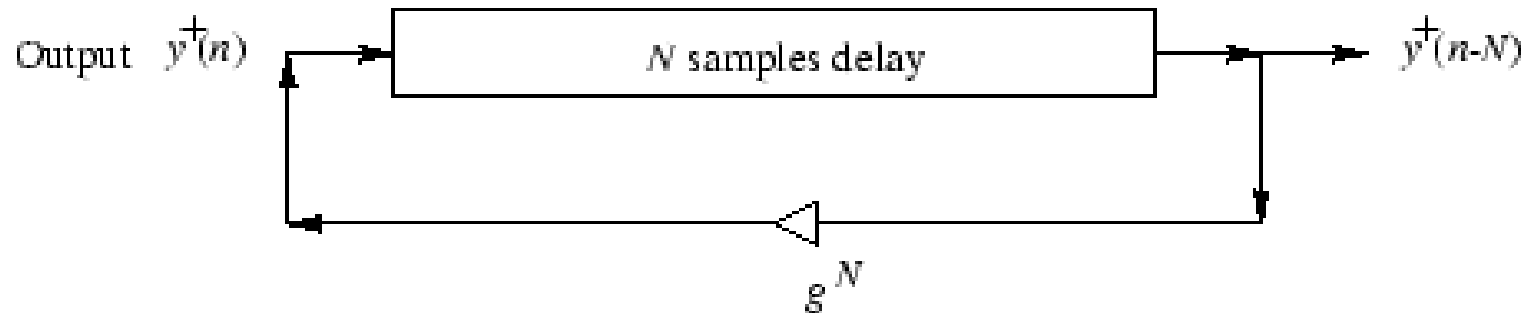
Uwzględnienie strat energii

Model struny z uwzględnieniem strat energii (tłumienia fali)

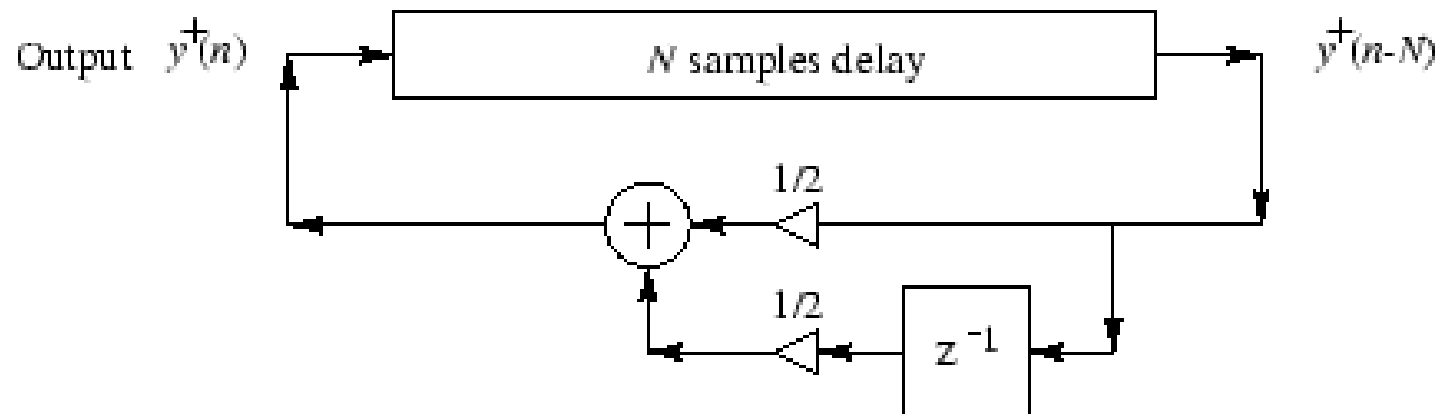


Uwzględnienie strat energii

Model struny z uwzględnieniem tłumienia stałego

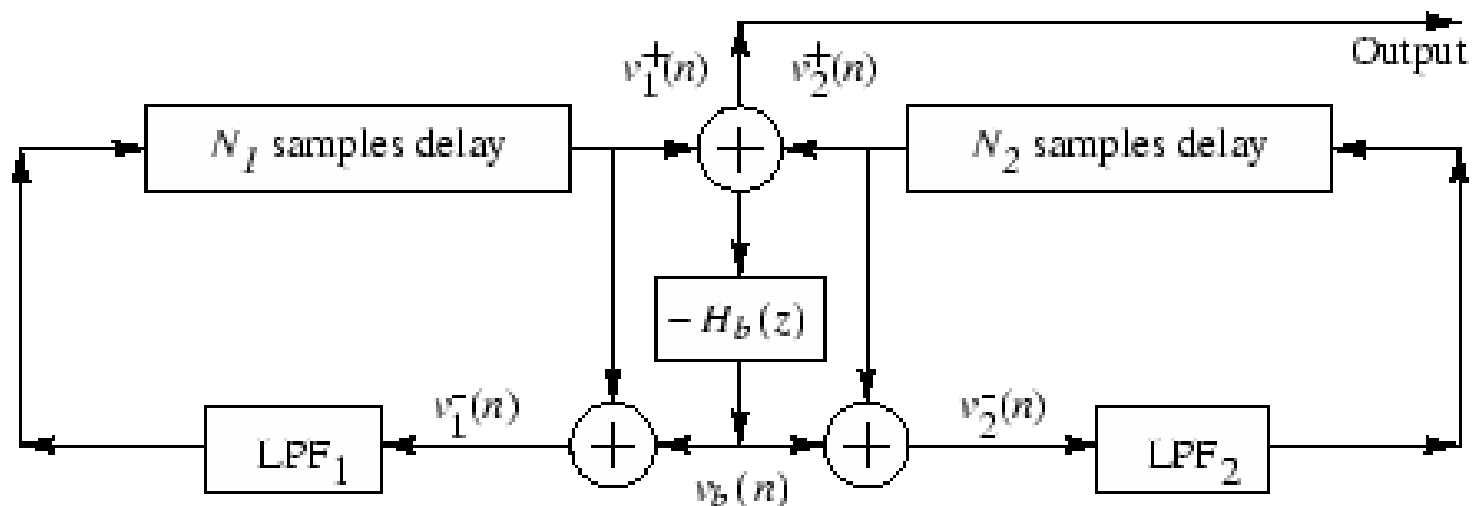
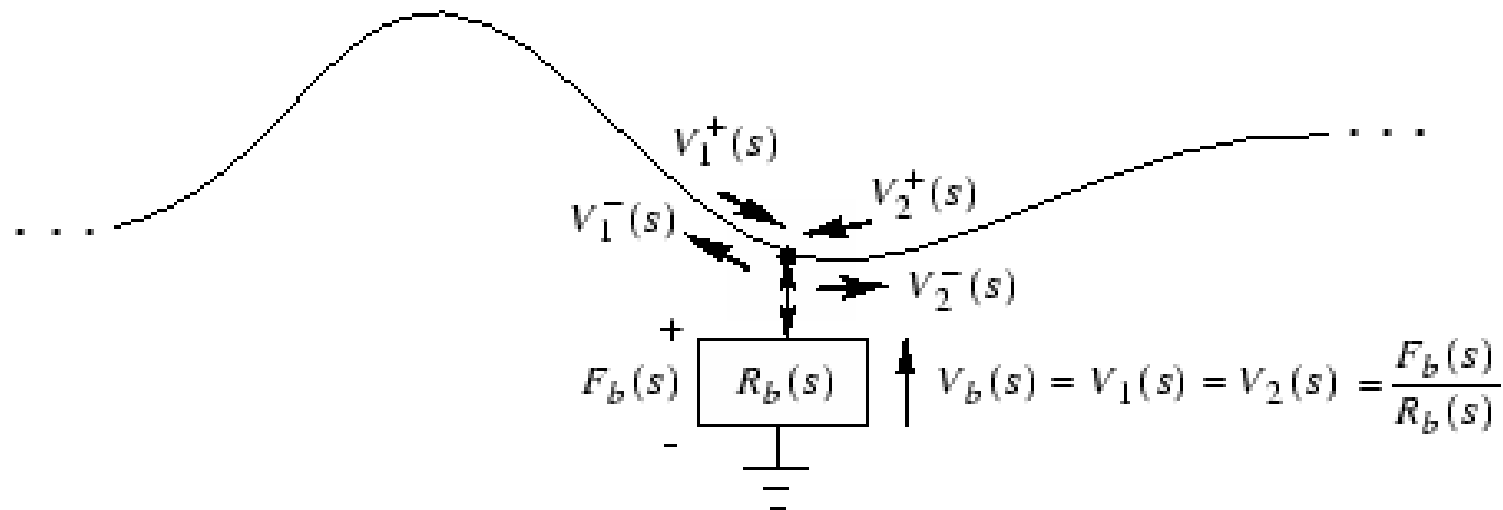


Model struny **Karplusa-Stronga** z uwzględnieniem tłumienia zależnego od częstotliwości

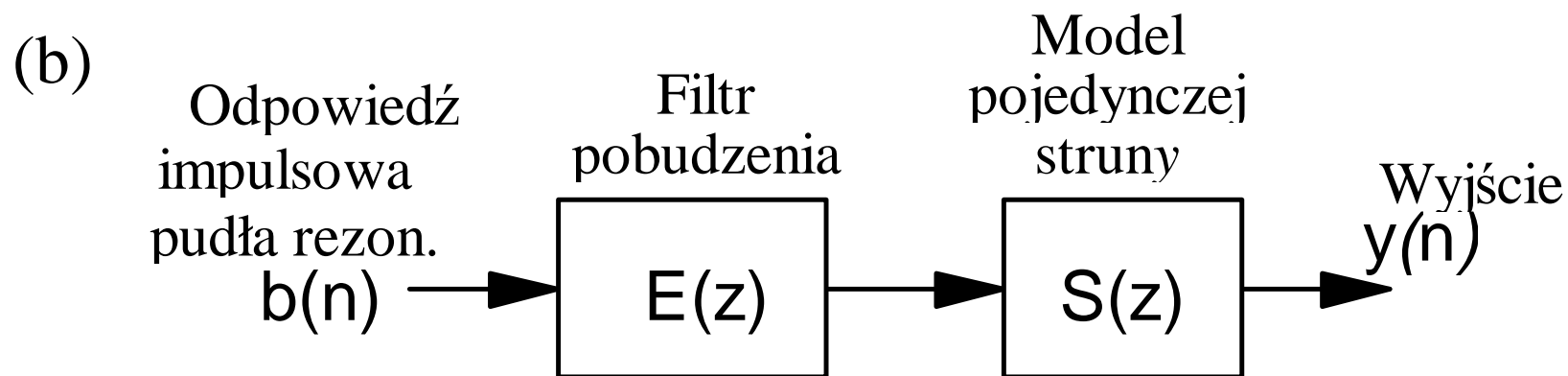
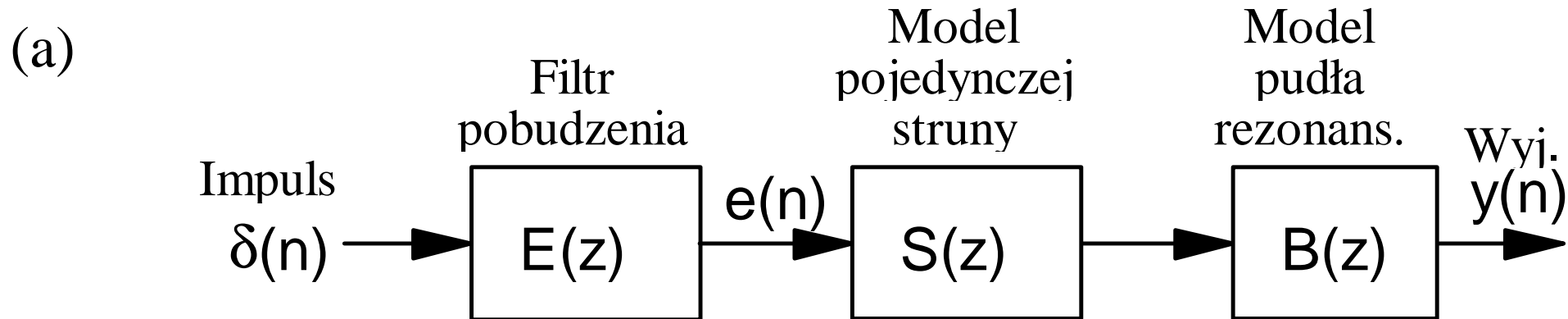


Sprężenie dwóch strun

Model dwóch strun sprzężonych poprzez mostek



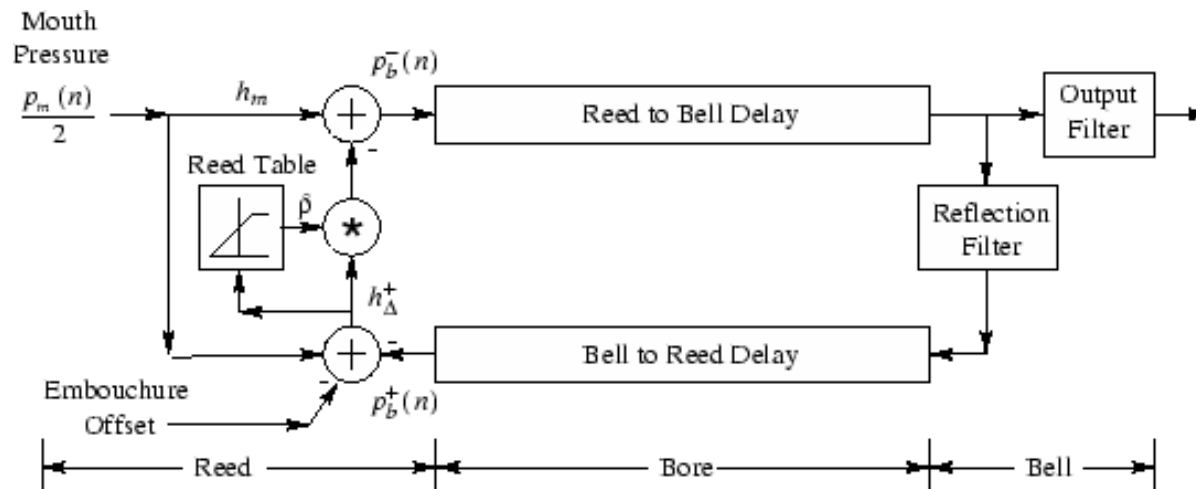
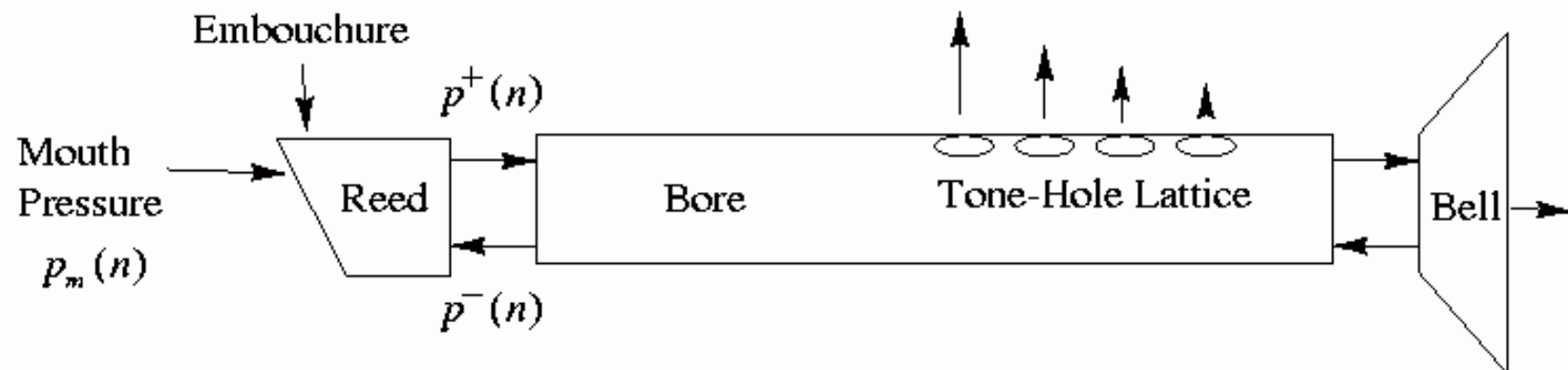
Uwzględnienie pudła rezonansowego



$$y(n) = e(n) * s(n) * b(n) = b(n) * e(n) * s(n)$$

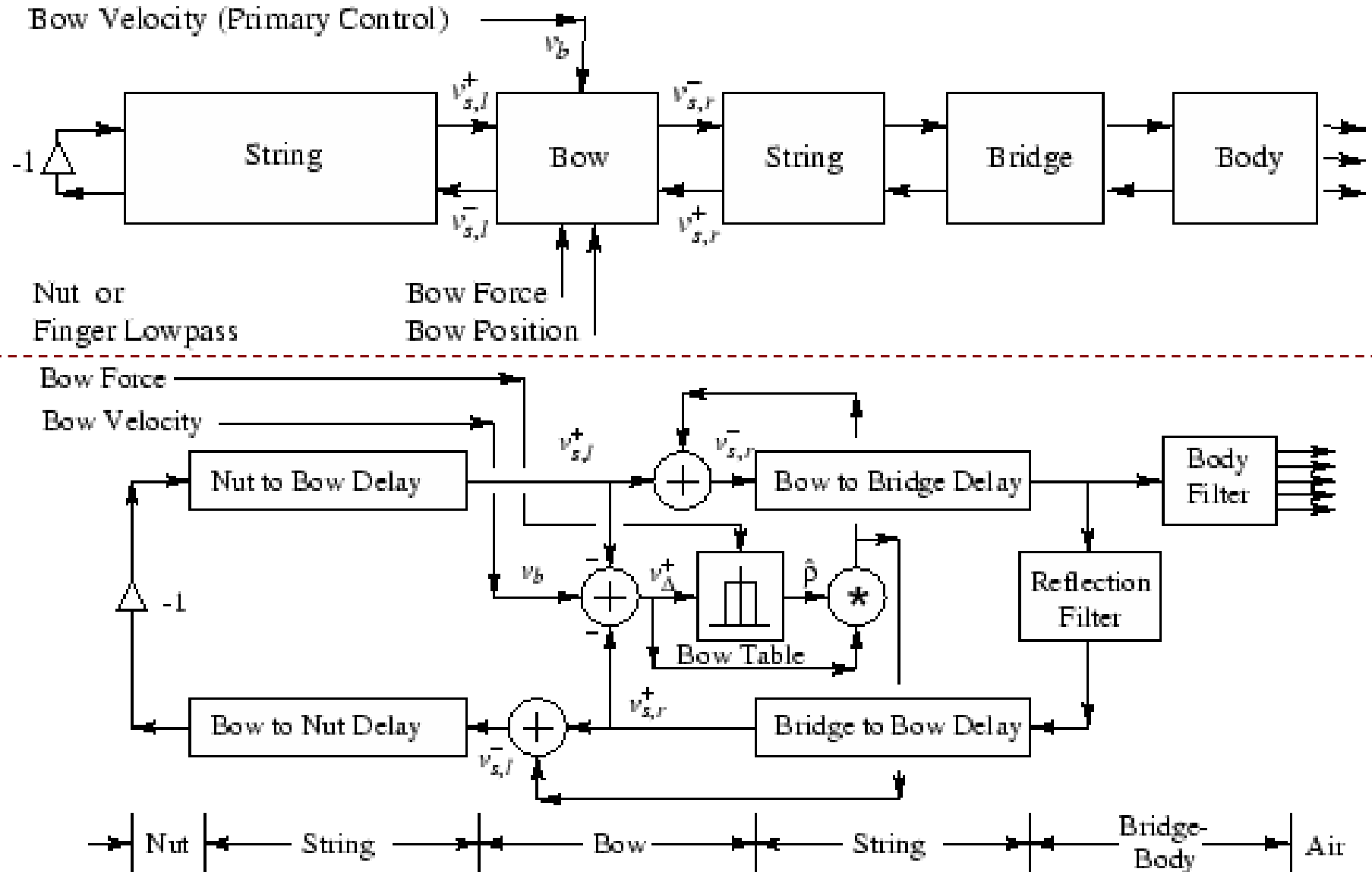
Model instrumentu dętego

Model instrumentu dętego z pojedynczym stroikiem (*single reed*), np. klarnet



Model instrumentu smyczkowego

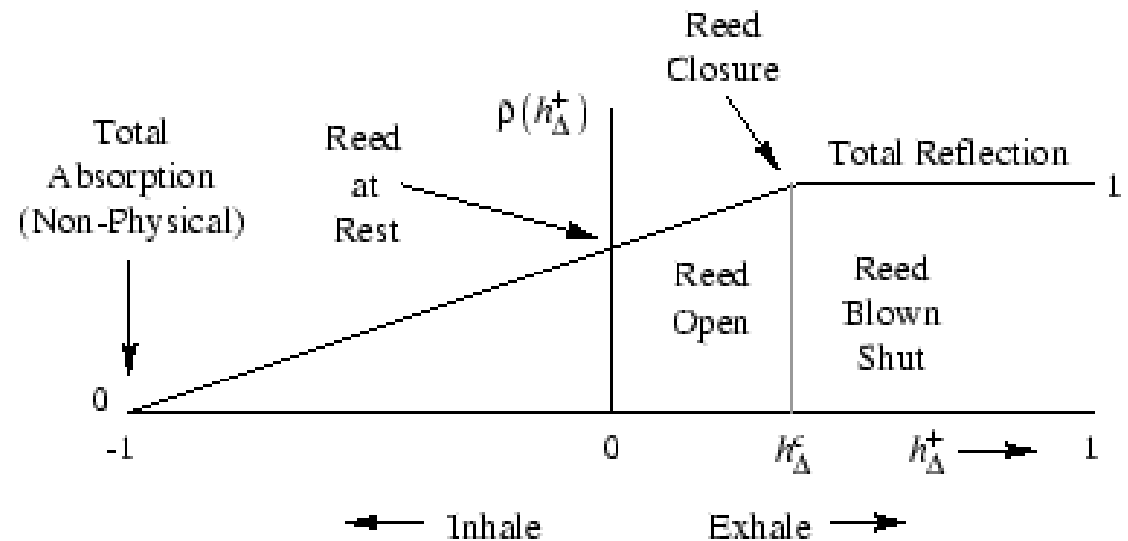
Model instr. smyczkowego (np. wiolonczela)



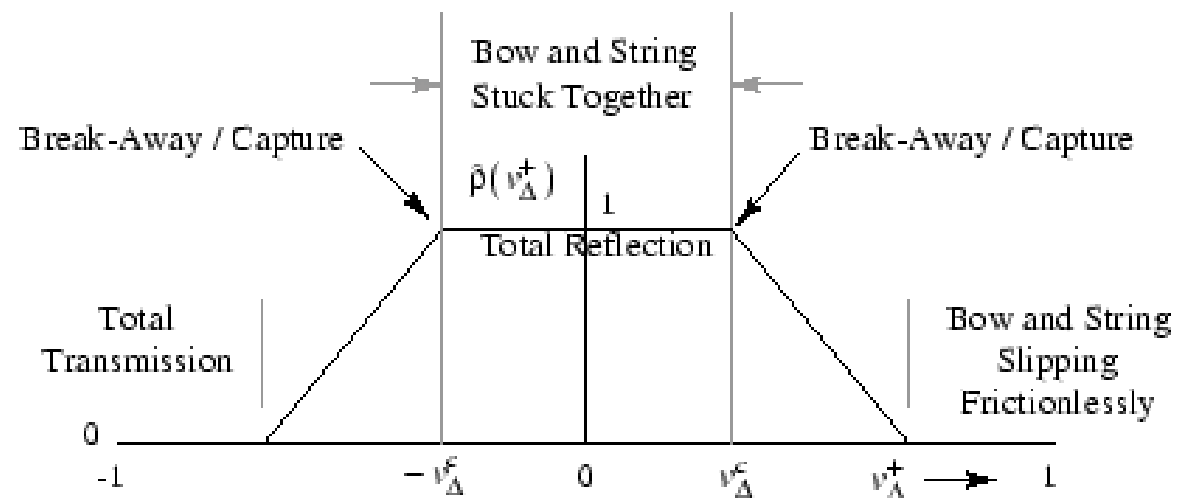
Modele pobudzenia

Modele pobudzenia zapisywane są w tablicy

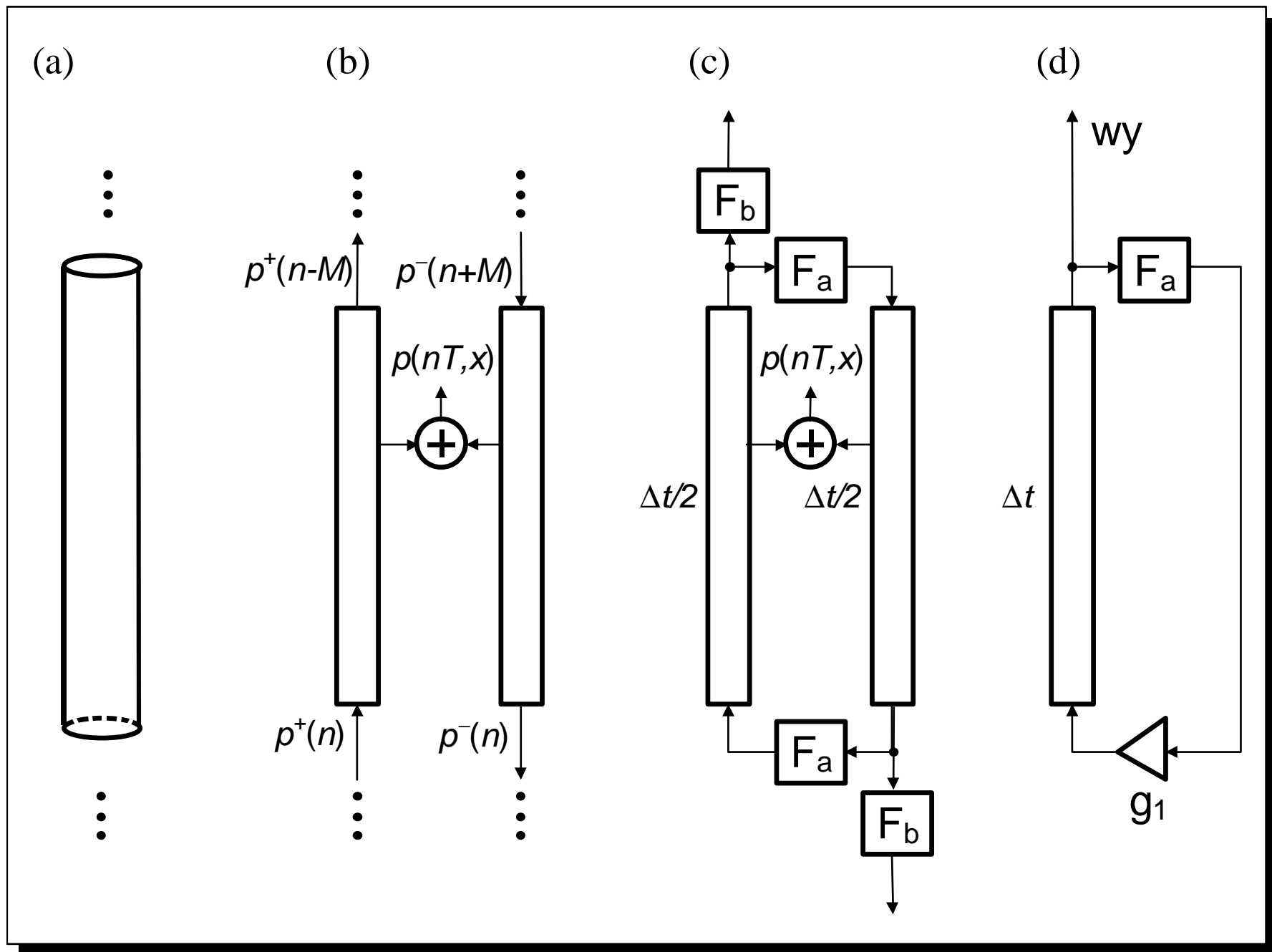
Instr. stroikowy
reed table



Instr. smyczkowy
bow table

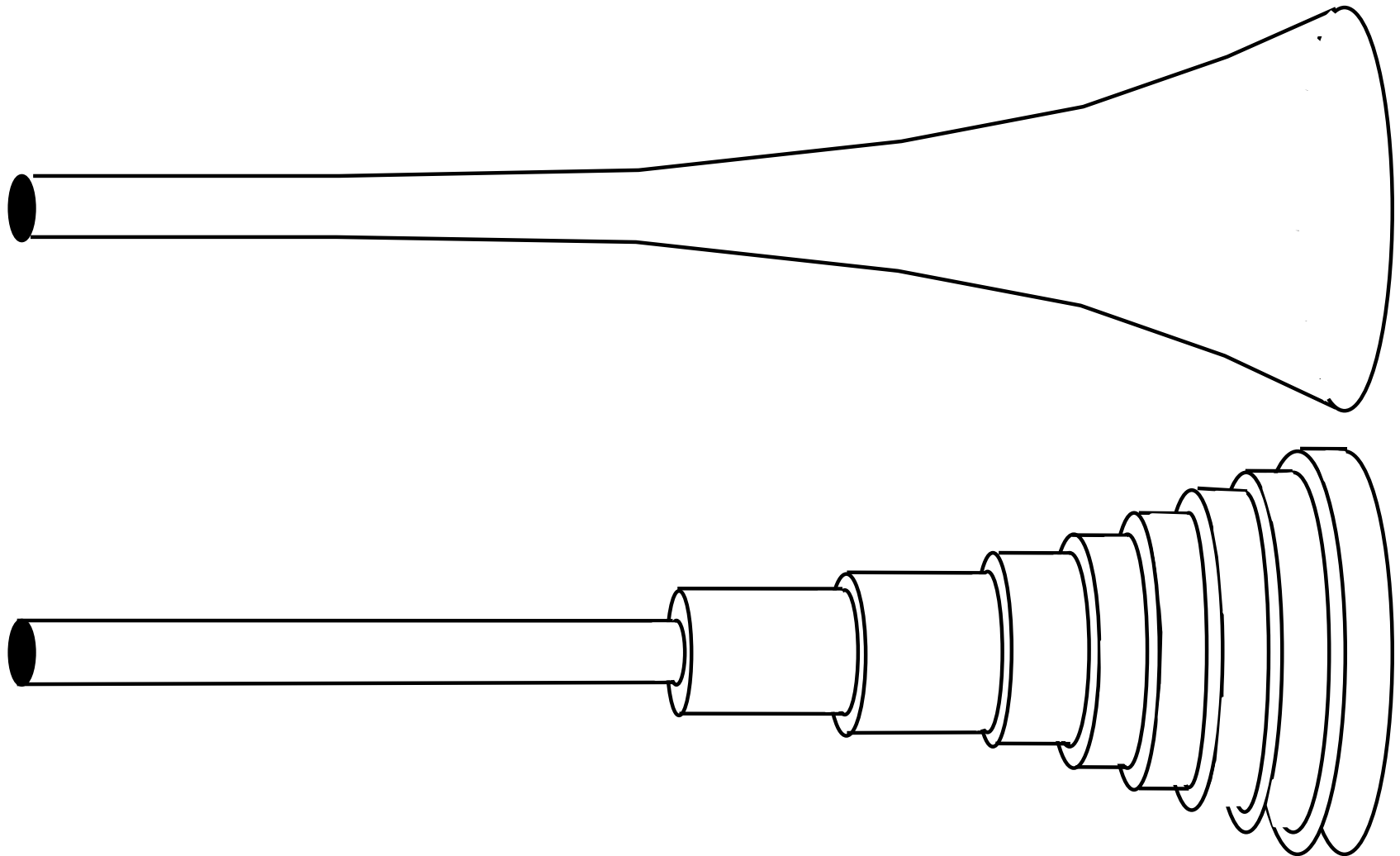


Modelowanie falowodu cylindrycznego



Modelowanie kształtu instrumentu

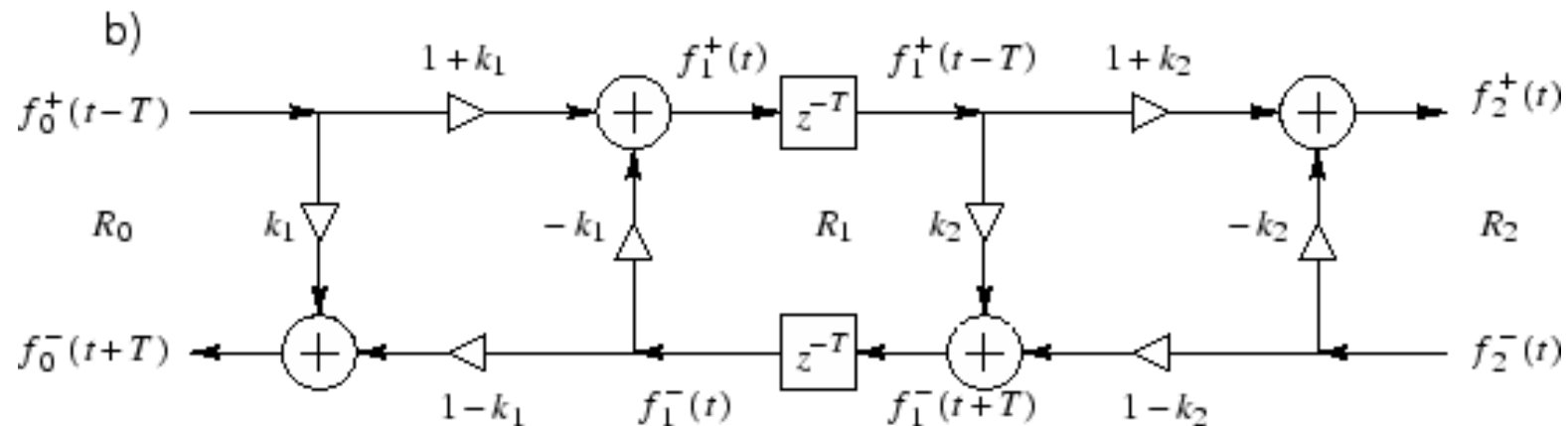
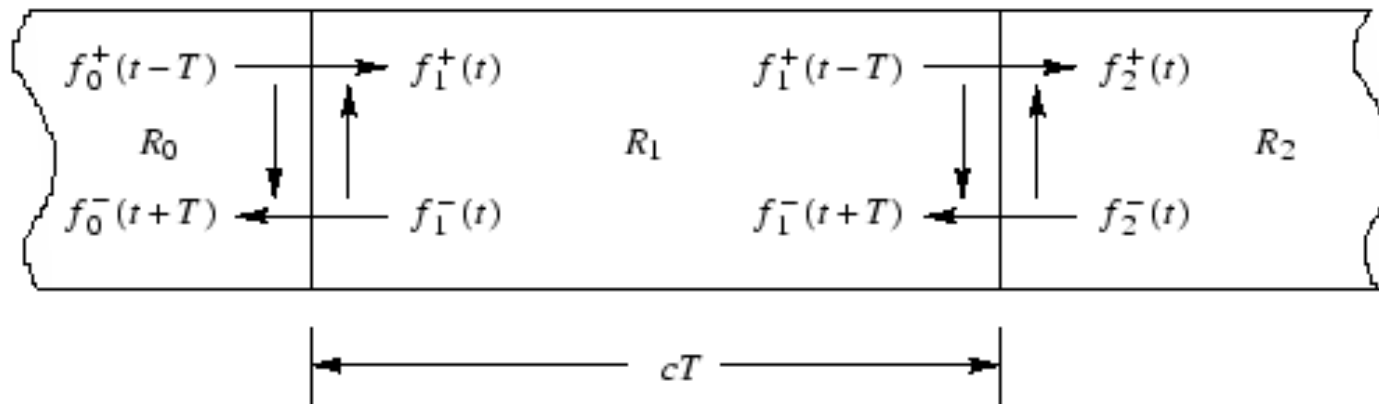
Kształt instrumentu jest aproksymowany za pomocą układu falowodów cylindrycznych.



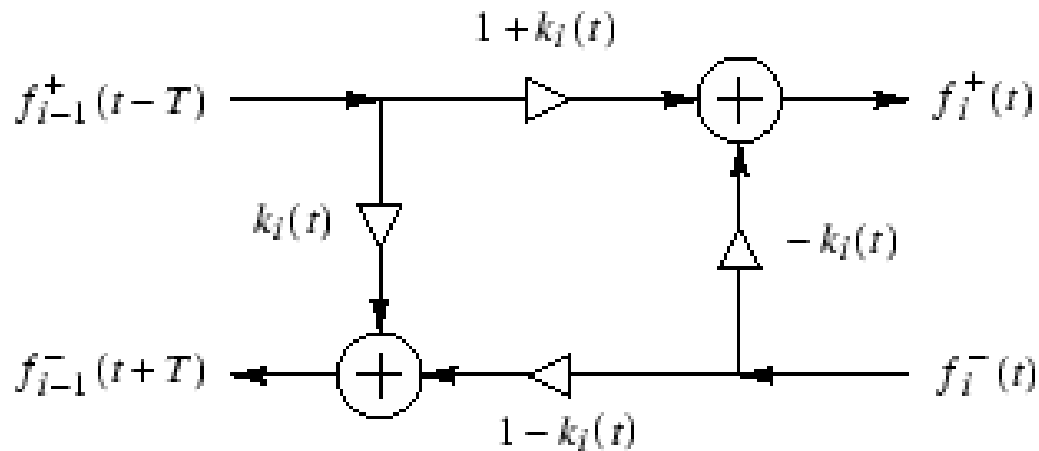
Modelowanie kształtu instrumentu

Różnica impedancji akustycznych jest modelowana za pomocą połączeń rozpraszających

a)

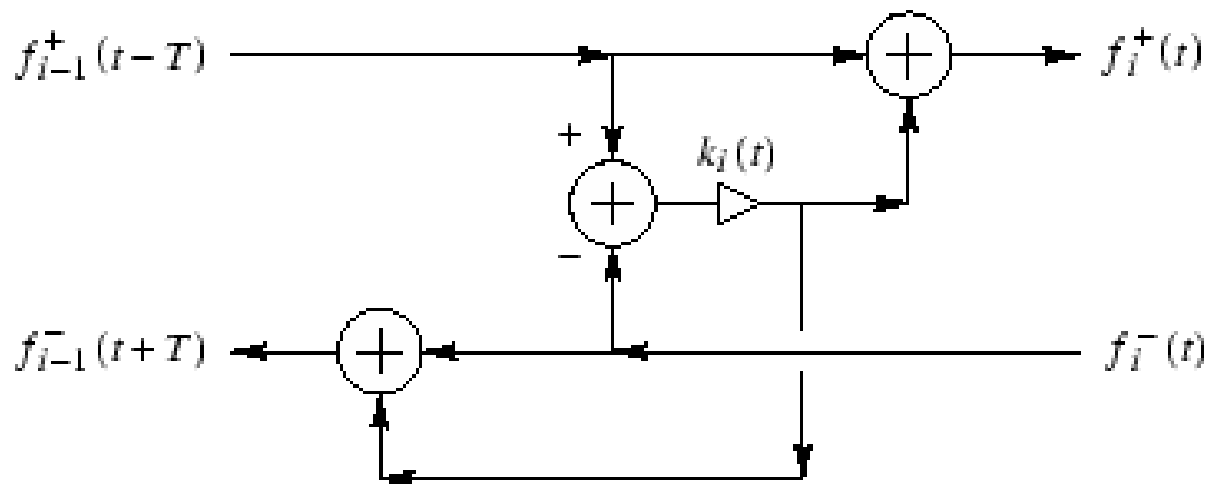


Połączenie rozpraszające

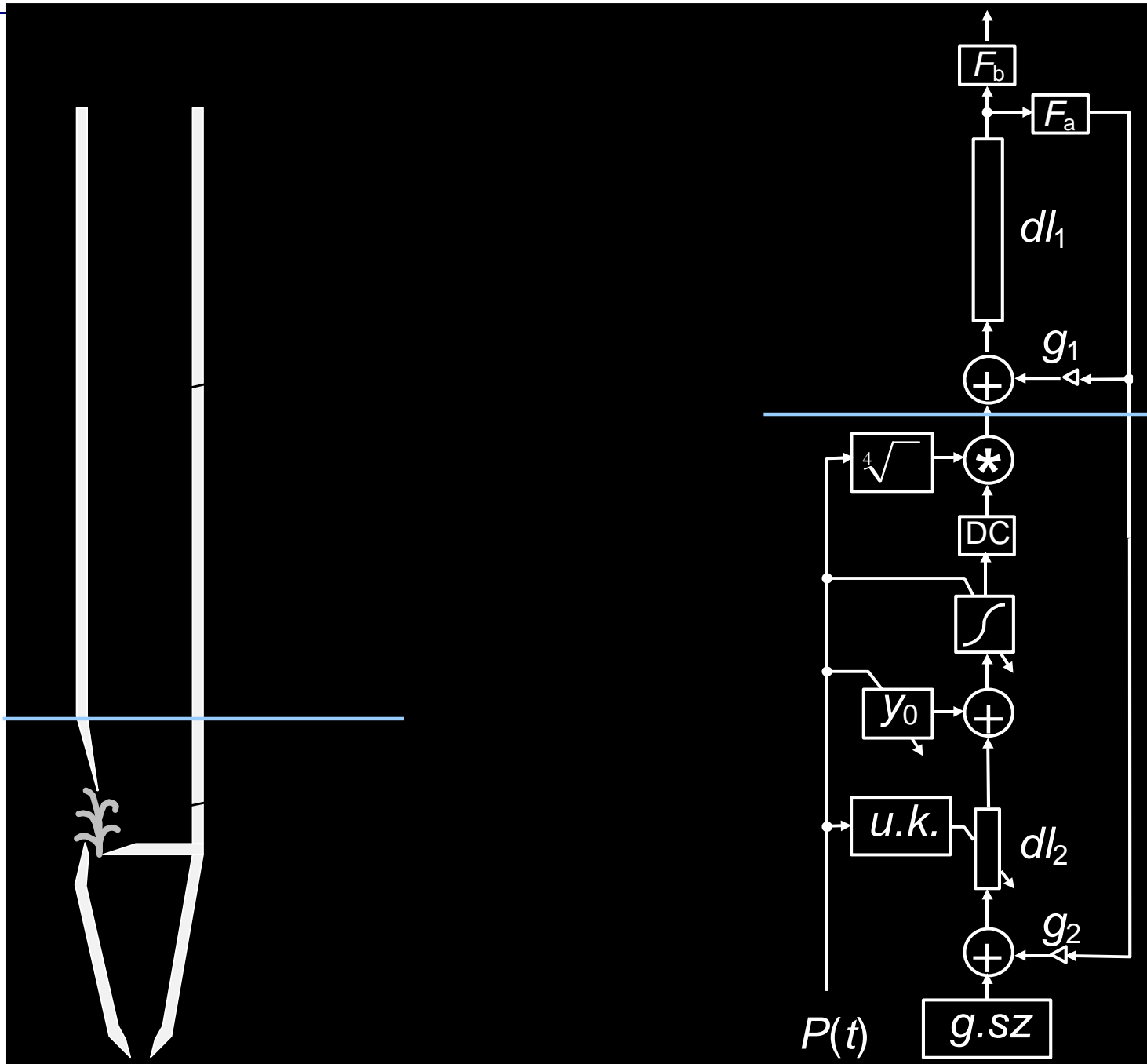


$$k_i(t) \triangleq \frac{R_i(t) - R_{i-1}(t)}{R_i(t) + R_{i-1}(t)}$$

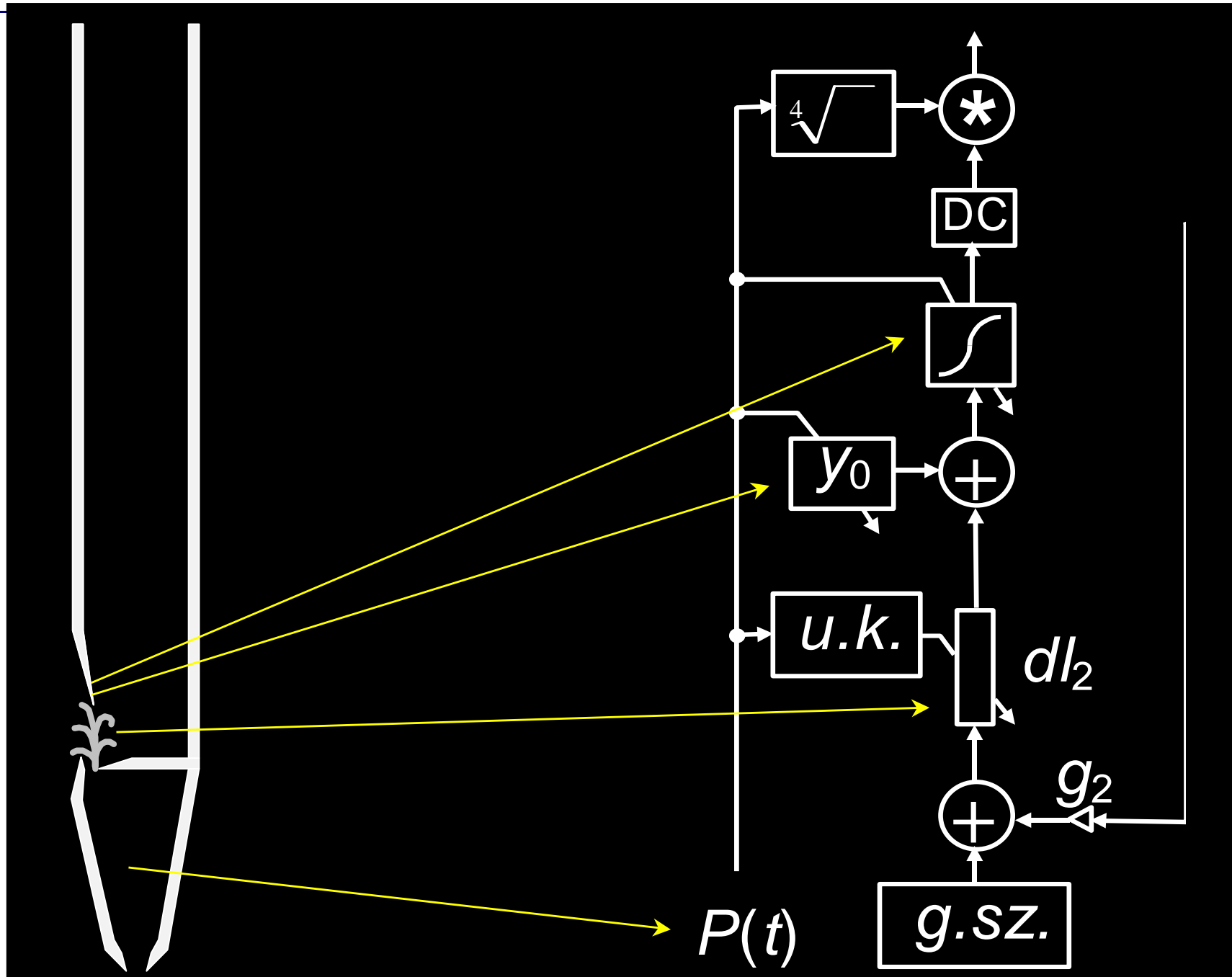
R – pole powierzchni przekroju falowodu



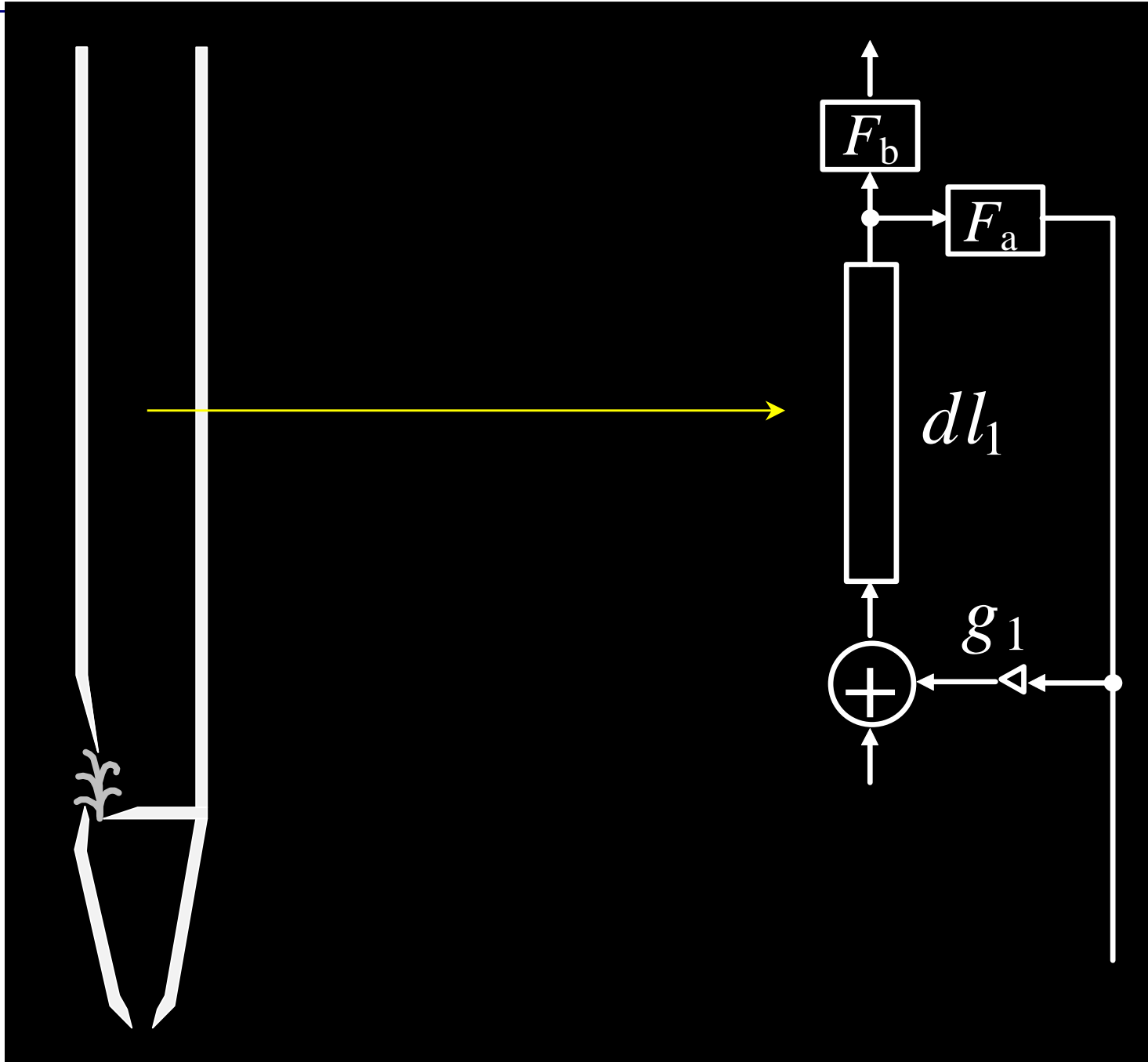
Model piszczatki organowej wargowej



Model strumienia powietrza

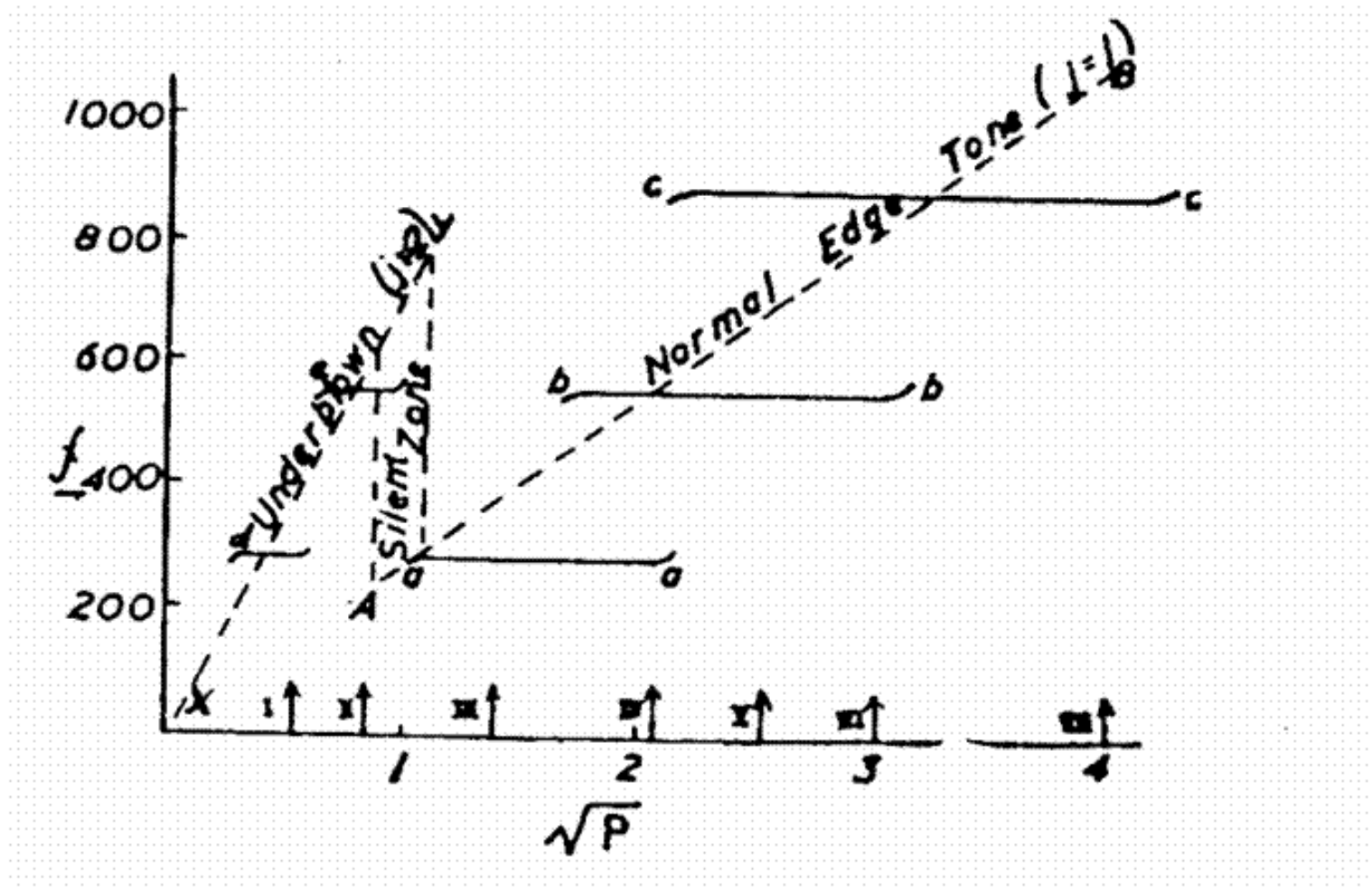


Model korpusu puszczatki



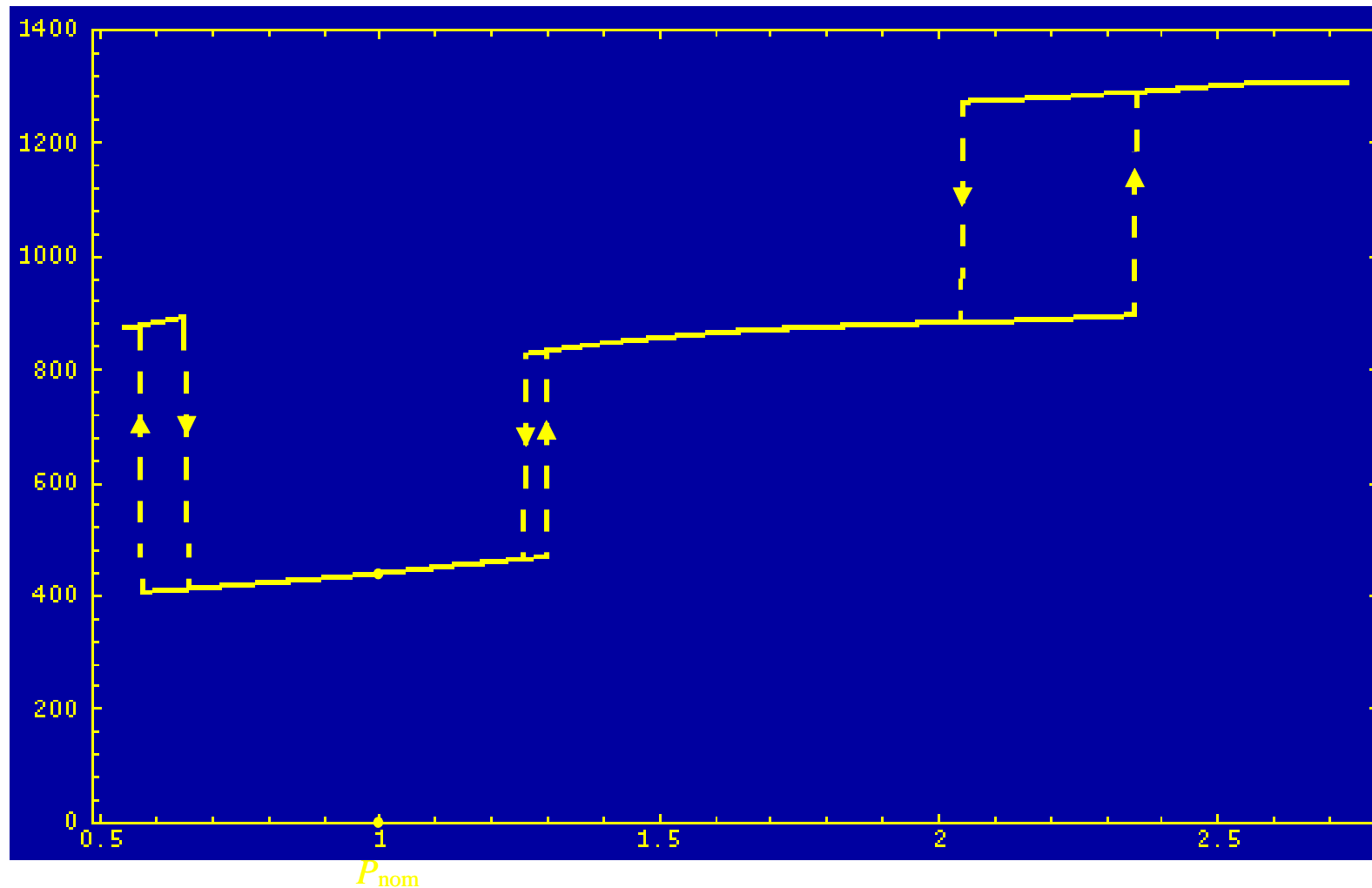
Modelowanie zmian ciśnienia

Odpowiedź rzeczywistej pizczalki na zmiany ciśnienia (pomiar)



Modelowanie zmian ciśnienia

Odpowiedź modelu pizczyłki na zmiany ciśnienia



Zalety i wady metody falowodowej

Zalety metody falowodowej:

- możliwość dokładnej symulacji rzeczywistych instrumentów (wierność brzmienia)
- możliwość uwzględnienia zjawisk artykulacyjnych
- działanie w czasie rzeczywistym
- mniejsza złożoność obliczeniowa niż w metodzie modelowania matematycznego

Zalety i wady metody falowodowej

Wady metody falowodowej:

- trudność w formułowaniu modelu fizycznego instrumentu
- duża złożoność obliczeniowa (w porównaniu z „klasycznymi” metodami syntezy)
- problem modelowania pewnych bardziej skomplikowanych procesów
- trudna obsługa instrumentu dla muzyka

Wykorzystanie modeli fizycznych

Zastosowanie fizycznych modeli instrumentów muzycznych w syntezie dźwięku:

- badania naukowe – Stanford (Smith), Helsinki; oprogramowanie - STK
- instrumenty muzyczne: Yamaha (VL1, VL1m, VL7, PLG), Korg, Technics
- karty dźwiękowe PC: SoundBlaster AWE 64 (wybrane instrumenty), chipsety YMF dla kart Yamaha DS-XG
- synteza programowa, np. Yamaha Sondius XG, instrumenty VSTi

Instrument falowodowy

Yamaha VL1 (1994)

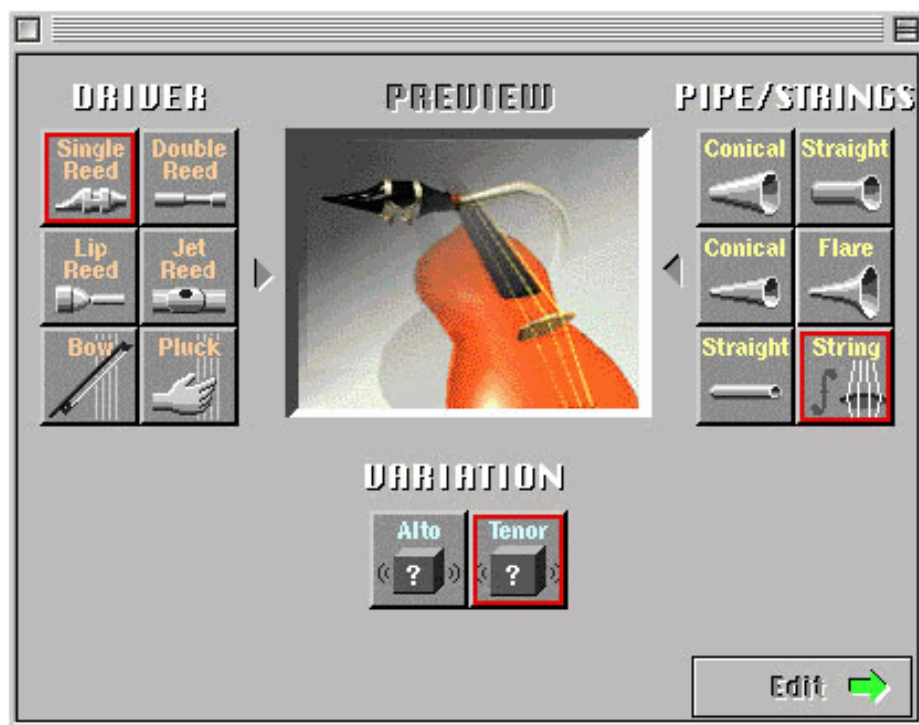
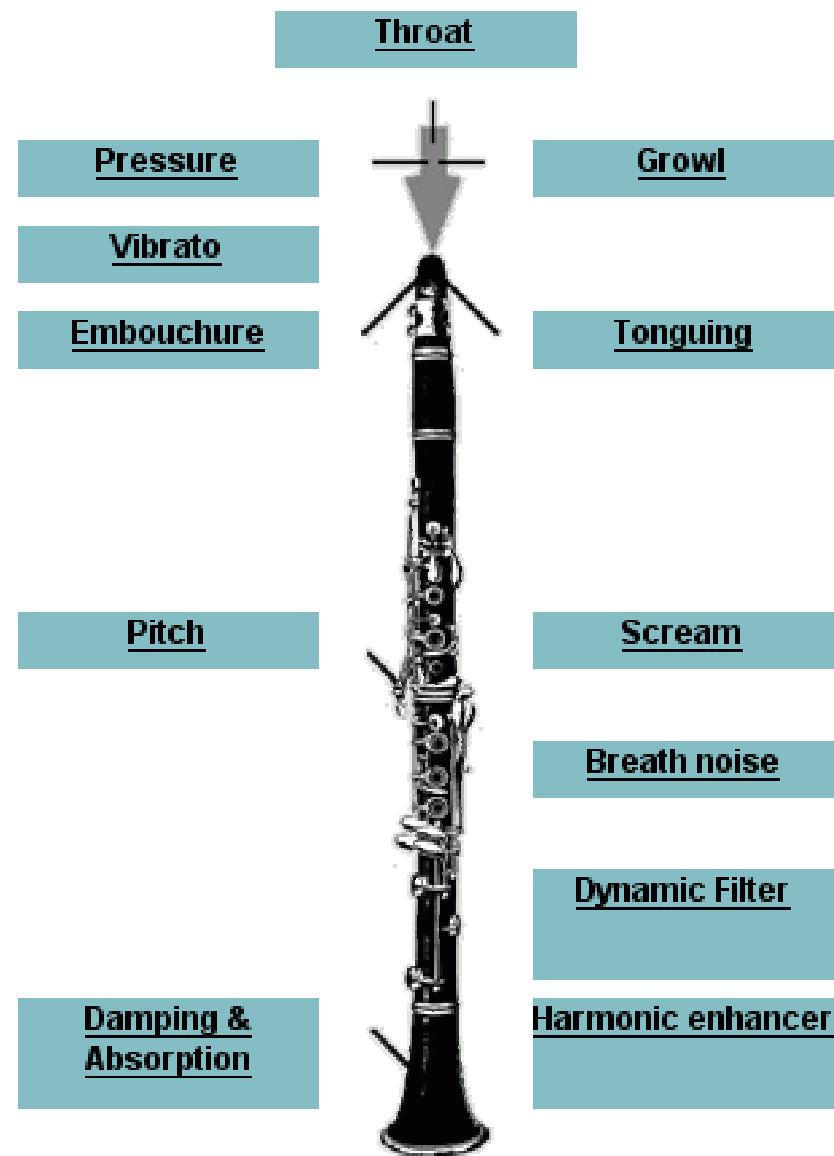
Virtual Acoustic Synthesizer

cena ok. 5000\$



Instrument falowodowy

Parametrami modelu można sterować za pomocą komunikatów MIDI oraz programu komputerowego



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*.
- Wikipedia (wersja angielska)