



Konrad Zacharski

## Bez fizyki nie da rady!

Brzmienie organów, brzmienie głosów, brzmienie piszczałek... Osoba dysponująca wrażliwym i wprawnym uchem słysząc organy potrafi przeanalizować ich dźwięk i wyodrębnić z niego brzmienie poszczególnych głosów. Oczywiście taka analiza odbywa się w głowie słuchacza, a jej efektem jest świadomość tego jakie głosy organowe słycać w tej magicznej miksturze brzmień. Zagłębiając się w brzmienie jeszcze bardziej, w kolejnym kroku można się skupić na konkretnych głosach organowych, a właściwie na piszczalkach wybranych głosów. Tutaj, w brzmieniu pojedynczych piszczałek też usłyszeć można mnóstwo różnic. Większych i mniejszych. Takich, które wychyci nawet mniej wprawiony słuchacz, ale również i takich, które odnaleźć można dopiero na poziomie najdrobniejszych niuansów brzmieniowych praktycznie niedostępnych dla przeciętnego słuchacza.

W wielu przypadkach można się oprzeć na tym co słyszymy. I to dobrze, bo organy służą przede wszystkim do słuchania. Ale jak wiadomo organoznawstwo to niezwykle melanż wielu dziedzin i dyscyplin w tym również akustyki, fizyki i matematyki. Wielu z nas, pewnie już na samą myśl o matematyce czy fizyce, poczuło włos jeżący się na głowie, ale nie ma rady, zanim będzie o rzeczach przyjemnych odrobina teorii. Bez tego ani rusz! Ale spróbujmy przez to przebrnąć bez nadmiernego teoretyzowania i przytaczania rozbudowanych i "ciężkostrawnych" wzorów. A ponieważ dalsze rozważania (zarówno w tym, jak i w kolejnych artykułach kontynuujących tę tematykę) będą w wielu fragmentach bardziej pogładowe niż teoretyczne, mogą one zawierać pewne nieścisłości. Jest to cena, którą postanowiłem zapłacić za przedstawienie możliwie przystępnego opisu zjawisk i analiz, bo zdaję sobie sprawę z tego, że niektóre kwestie (które w efekcie zaprowadzą nas np. w rejony składowych harmoniczných), nawet na takim poziomie

uproszczeń i tak są wystarczająco skomplikowane i niełatwe do zrozumienia. Tematy te są niezwykle istotne - nie ma wątpliwości. Podejście do poszczególnych kwestii „z wielu stron”, z niekiedy może nazbyt łopatologicznym tłumaczeniem, to też pewnego rodzaju koszt, który trzeba ponieść aby problemy te próbować przedstawić bez zbytniego zagłębiania się w suchą teorię. A dobre zrozumienie tej problematyki ma w organoznawstwie bardzo duże znaczenie, gdyż jest bazą m.in. dla swobodnego poruszania się w zakresie głosów alikwotowych, ale też orientowania się w tematyce menzuracji czy intonacji.

Sprawa dotyczy dźwięku. Dźwięku, który odbiera nasze ucho, a który dociera doń jako fala.

Dźwięk organów to dźwięk piszczałek. Jak wiemy, ze względu na mechanizm powstawania dźwięku, piszczałki dzielimy na dwie główne grupy: piszczałki wargowe i piszczałki języczkowe. W obydwu przypadkach, bez względu na charakter drgającego ciała, stykamy się z tzw. falą stojącą, przy czym praktycznie zawsze punktem wyjścia analiz jest fala „idealna” czyli taka, której graficzną ilustracją jest krzywa zwana sinusoidą. Falą stojącą zajmiemy się w dalszej części tekstu, ale póki co skupmy się na wyjaśnieniu czym w ogóle jest fala. Fala, która rozchodzi się np. w powietrzu, która może ulec odbiciu, która w sprzyjających warunkach może doprowadzić do powstania fali stojącej, itd.

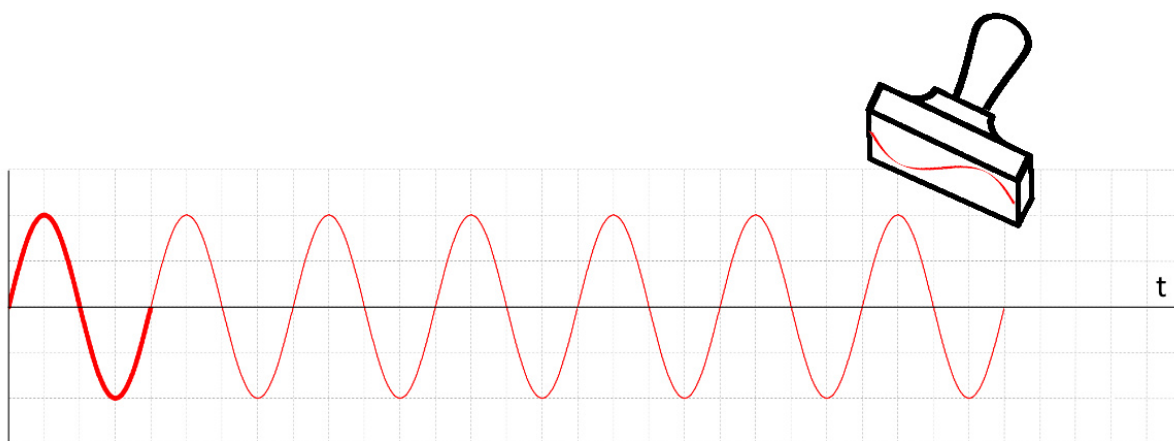
Fale, których graficzne przedstawienia będziemy analizować, są swego rodzaju zaburzeniami gęstości i ciśnienia rozchodzącymi się w danym ośrodku. Ośrodkiem, najbardziej interesującym z naszego punktu widzenia jest oczywiście powietrze. Źródłem fali dźwiękowej zawsze jest jakiś obiekt, który drga. Może to być struna, membrana czy - jak w przypadku piszczałek organowych - języczek albo słup powietrza. Ten ostatni obiekt czyli słup powietrza w pierwszej chwili może wydawać się nieco trudny do uchwycenia czy wyobrażenia bo przecież nie można go dotknąć tak jak struny czy języczka. Słup powietrza to nic innego jak po prostu powietrze zamknięte w jakimś kanale czy rurze o właściwie dowolnym przekroju (co do rozmiaru i co do kształtu). Taki słup powietrza też może drgać, a co za tym idzie może być źródłem fali dźwiękowej rozchodzącej się w powietrzu i docierającej do naszych uszu.

Jak to się dzieje, że języczek czy słup powietrza drga? O tym była już mowa w jednym z poprzednich artykułów. Nie będziemy się zatem zastanawiać nad przyczyną drgania, ale przyjrzymy się drganiu samemu w sobie. Ciało, które zostało pobudzone do drgań najczęściej nie drga w sposób prosty. Zwykle wykonuje ono jednocześnie wiele niezależnych drgań o różnych amplitudach i częstotliwościach (jest to tzw. drganie złożone). Nie jest to więc na ogół drganie, które da się przedstawić jednym, pięknym, równym i gładkim wykresem o kształcie sinusoidy. Jedną sinusoidą się nie da, ale wieloma już tak. Jak to wieloma? Drgania tego typu można przedstawić jako sumę szeregu drgań składowych, z których każde zobrazować się da odpowiednim przebiegiem sinusoidalnym (bo jest to drganie harmoniczne). I tutaj już stajemy przed drzwiami z napisem „analiza harmoniczna”, ale póki co nie zaglądamy za nie bo tam aż roi się od drgań i fal,

których podstawowe parametry przypomnimy dopiero za chwilę. Każde drganie powoduje powstanie fali (w naszym przypadku chodzi o falę akustyczną), a - jak już wspomniano - zdecydowana większość drgań w naszym otoczeniu (również tych, które interesują nas z punktu widzenia muzyki) to drgania złożone. Złożone czyli takie - przypomnijmy raz jeszcze - w czasie których obiekt równocześnie wykonuje wiele niezależnych drgań. Każde z tych drgań generuje odpowiadającą mu falę, a wszystkie wygenerowane fale nakładają się na siebie (interferują) i z takiego złożenia powstaje fala wypadkowa, zwykle okresowa i odkształcona (czyli o przebiegu niesinusoidalnym). Ta fala właśnie dociera do naszych uszu i interpretowana jest jako dźwięk o określonej wysokości, głośności i barwie.

Przyjrzyjmy się pojedynczemu drganiu i pojedynczej związanej z nim fali, takiej o przebiegu sinusoidalnym. I od razu uczynimy jedno zastrzeżenie: zajmiemy się przebiegami okresowymi. Takie właśnie przebiegi, z punktu widzenia drgań słupa powietrza czy języczka interesują nas przede wszystkim. Nie będziemy się przy tym zajmować szczegółową analizą ani samego momentu zadęcia, ani zanikania drgań w chwili odcięcia dopływu powietrza - są to stany dynamiczne, których analiza jest jeszcze bardziej skomplikowana niż stanów ustalonych.

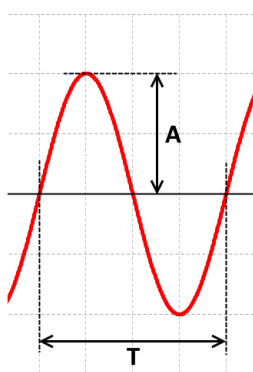
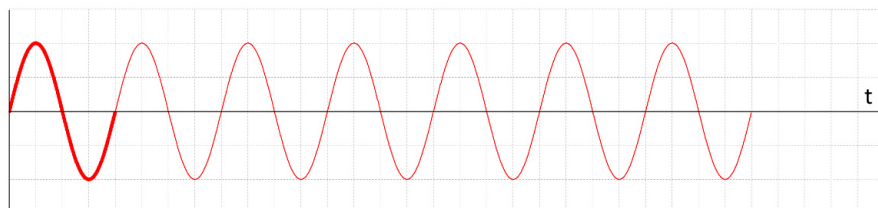
Czym zatem są przebiegi okresowe? Jak wyglądają ich interpretacje graficzne? Jakie są ich podstawowe parametry? Przebiegi okresowe pamiętamy być może z lekcji fizyki, często spotykamy je np. w mechanice czy nauce o elektryczności. W szczególności mogą to być również przebiegi ilustrujące falę, którą zdołamy usłyszeć - falę dźwiękową (akustyczną). O okresowym przebiegu drgań możemy mówić (w największym uproszczeniu) wtedy, gdy obserwując ich wykres zauważymy, że pewien jego fragment, powtarza się raz za razem. Trochę tak jakbyśmy zrobili pieczętkę z takim fragmentem wykresu (ten fragment zwany jest okresem) i przybijali ją jedna za drugą.



■ **il.1.** Przykład przebiegu okresowego - fala sinusoidalna.

Pierwszy okres drgania narysowano powyżej pogrubioną kreską. Drugi okres zaczyna się tam gdzie kończy pierwszy, trzeci zaczyna tam gdzie kończy drugi, itd... W ten sposób otrzymujemy ciągły wykres drgań okresowych – okresowych czyli takich, w których punkt drgający co pewien

czas (co 'okres' właśnie) wraca do punktu wyjścia i powtarza swój ruch od początku. I tak „w kółko”. Okres (oznaczany literą  $T$ ) to jeden z podstawowych parametrów charakteryzujących funkcję okresową. Jest to pewien przedział czasu, a więc wyrażany jest np. w sekundach. Okres to tyle czasu ile potrzebuje punkt drgający aby wykonać jedno pełne drganie i powrócić do punktu wyjścia. Oczywiście powrót do punktu wyjścia w tym przypadku nie oznacza zakończenia drgania. Ruch trwa nadal, zakończył się jeden okres i rozpoczyna kolejny – to istota drgań okresowych. Wolne drgania mają dłuższy okres (dłuższy czas na wykonanie pełnego drgania), drgania szybsze to okres krótszy. Im dłuższy okres tym drganie jest wolniejsze.



$T$  - okres [s]  
 $f$  - częstotliwość [Hz=1/s]  
 $f = 1/T$   
 $A$  - amplituda

■ **il.2.** Funkcja okresowa - najważniejsze parametry (na przykładzie fali sinusoidalnej).

Parametrem bezpośrednio powiązanim z okresem jest częstotliwość drgań (oznaczana literą  $f$ ). Wyliczana jest jako odwrotność okresu ( $f=1/T$ ). Częstotliwość mówi nam o tym ile pełnych drgań wykonuje punkt drgający w ciągu jednej sekundy. Wielkość ta wyrażana jest w hercach (Hz). Im większa częstotliwość tym drganie jest szybsze. Dla przykładu można się odnieść do napięcia panującego w gniazdach elektrycznych w naszych domach. Częstotliwość napięcia zasilającego w Polsce wynosi 50Hz. Co to znaczy? To znaczy, że gdybyśmy obserwowali przebieg napięcia np. za pomocą oscyloskopu, to naliczylibyśmy aż 50 pełnych okresów w ciągu sekundy. Ile trwa pełne drganie w tym przypadku? Tyle ile wynosi okres. Częstotliwość znamy więc wyliczymy go ze wzoru:  $T=1/f=1/50\text{Hz}=0,02\text{s}=20\text{ms}$ . Okres, a więc czas jednego pełnego cyklu to w tym przypadku 20ms (milisekund czyli tysięcznych części sekundy). To dość szybko, ale nie jest to prędkość zawrotna, bo jeśli wrócimy na grunt muzyczny, to w pierwszej kolejności pewnie

natkniemy się na częstotliwość wzorcową dźwięku  $a_1$ , która bardzo często określana jest na poziomie 440Hz. Tak, 440Hz to 440 pełnych drgań w ciągu sekundy. A to dopiero oktawa razkreślna! Im większa częstotliwość tym wyższy dźwięk.

I jeszcze jeden parametr – amplituda ( $A$ ). To największe wychylenie punktu drgającego z położenia równowagi. Parametr ten w przypadku drgań wywołujących falę dźwiękową powiązany jest z głośnością dźwięku. Im większa amplituda tym dźwięk odbieramy jako głośniejszy.

Uzbrojeni w tych kilka podstawowych informacji o funkcjach okresowych musimy uchylić nieco drzwi, przed którymi zatrzymaliśmy się kilka akapitów wyżej (chodzi o drzwi z napisem „analiza harmoniczna”). Jak już wspomniano, element pobudzony do drgań najczęściej nie drga w sposób prosty. Zwykle wykonuje on jednocześnie wiele niezależnych drgań o różnych amplitudach i częstotliwościach. I nie zastanawiamy się w tej chwili nad tym ile tych drgań może być, jakie mają amplitudy i częstotliwości. Z tego jedynego w swoim rodzaju tygła, w którym wszystkie te drgania konkretnego elementu i związane z nimi fale mieszają się i nakładają na siebie, wyciągnijmy w tej chwili tylko jeden przebieg, jedno drganie - to o najniższej częstotliwości, podstawowe. Wszystkimi pozostałymi składowymi, tzn. tymi o wyższych częstotliwościach w tym momencie w ogóle się nie zajmujemy. Fala wywoływana drganiem o najniższej częstotliwości jest składową podstawową dźwięku (składową główną) i to ona odpowiedzialna jest za częstotliwość tego dźwięku (czyli za wysokość dźwięku, który słyszemy). Być może ktoś spyta w tym momencie: skoro to podstawowa składowa decyduje o częstotliwości, to po co nam pozostałe drgania (składowe)? Odpowiedź jest krótka: pozostałe składowe (tzw. wyższe harmoniczne) odpowiadają za barwę dźwięku. Ale o tym w kolejnych artykułach...

Zwróćmy tutaj jeszcze uwagę na powiązanie parametrów fali akustycznej z cechami dźwięku. Powiązanie to nie jest proste, bo trzeba sobie zdać sprawę z tego, że próbujemy zestawić obiektywnie mierzalne parametry fizyczne fali akustycznej z cechami dźwięku, które zwykle oceniane są naszym uchem całkiem subiektywnie (niekiedy wręcz na poziomie wrażeń). Ale spróbujmy zdefiniować te pary:

- częstotliwość fali (częstotliwość składowej podstawowej) powiązana jest z wysokością dźwięku,
- amplituda fali decyduje o głośności dźwięku docierającego do naszych uszu,
- ilość i amplituda drgań składowych (wyższych harmonicznych) decyduje o barwie odbieranego przez nas dźwięku.

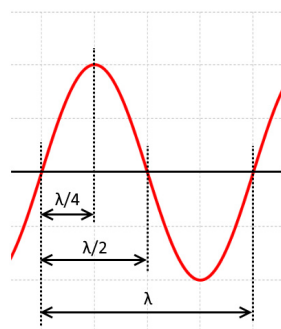
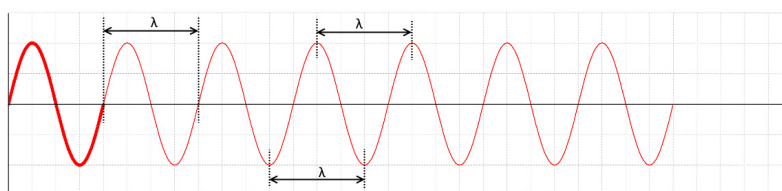
Jeśli odbiorcą dźwięku będzie nasze ucho, mniej lub bardziej wprawne, ale nieuzbrojone w żadne skomplikowane urządzenia pomiarowe, to w przełożeniu o którym mowa powyżej dostrzeżemy być może miejscami swego rodzaju zderzenie „mędrca szkiełka i oka” z „czuciem i wiarą”. Trochę tak to właśnie wygląda.



■ **il.3.** Parametry fali akustycznej i cechy dźwięku.

A co ucho słyszy, a czego nie słyszy? Nasz zmysł słuchu jest w stanie zarejestrować (usłyszeć) fale akustyczne o częstotliwościach mieszczących się w przedziale od około 16 Hz do ok. 20 kHz (20 kiloherców = 20000 herców). Jak zatem widać, nie wszystkie fale akustyczne zdoła usłyszeć ludzkie ucho. Nie usłyszymy np. infradźwięków (poddźwięków) czyli fal akustycznych o częstotliwościach niższych niż 16 Hz (choć niekoniecznie pozostają one całkiem obojętne dla organizmu ludzkiego). Nie usłyszymy również ultradźwięków (naddźwięków) czyli fal akustycznych o częstotliwościach przekraczających 20 kHz. Granice przedziału słyszalności należy traktować jako dane orientacyjne, ponieważ każdy człowiek może mieć nieco inną czułość słuchu, a dodatkowo czułość ta zmienia się wraz z wiekiem.

Wracając do mierzalnych parametrów fali, trzeba wspomnieć o jeszcze jednym z nich, dotychczas nie omówionym, ale bardzo istotnym. Chodzi o długość fali - wielkość oznaczaną grecką literą  $\lambda$  (lambda). To najkrótszy odcinek łączący dwa punkty fali o tej samej fazie drgań, lub mówiąc inaczej: to odległość między kolejnymi powtórzeniami kształtu fali.



$\lambda$  - długość fali [m]

$$\lambda = v/f$$

$v$  - prędkość fali [m/s]

$f$  - częstotliwość [Hz=1/s]

■ **il.4.** Długość fali (na przykładzie fali sinusoidalnej).

Jak widać na powyższej ilustracji, długość fali można wskazać najprościej jako odległość między dwoma sąsiednimi szczytami bądź dwoma sąsiednimi dolinami fali. Może to być również odległość między kolejnymi punktami przejścia fali przez oś zerowej amplitudy, ale tutaj trzeba dokładnie zwrócić uwagę na fazę, bo obydwa takie przejścia przez zero muszą być albo w fazie wzrastania przebiegu, albo też w fazie opadania (faza jest tutaj bardzo istotna, bo jeśli nie zwrócimy uwagi na to czy przebieg się wznosi czy opada, to jako dwa sąsiednie przejścia fali przez zero uznamy punkty odległe od siebie o połowę długości fali - a nie o to nam chodzi).

Ktoś być może zwróci uwagę na podobieństwo graficznej interpretacji długości fali ( $\lambda$ ) i przedstawionego już wcześniej okresu drgań ( $T$ ). Podobieństwo jest rzeczywiście zauważalne, tyle tylko że w przypadku drgań mowa była o czasie (okres to przedział czasu) potrzebnym na wykonanie pełnego drgania, a w przypadku długości fali analiza dotyczy graficznego przedstawienia fali, która rozchodzi się w jakimś ośrodku (długość fali do pewna odległość). Oczywiście drgania i fale są w tym przypadku ze sobą powiązane, bo to drgania właśnie powodują powstawanie fal. Częstotliwość fali jest taka sama jak częstotliwości drgania źródła, które ją wywołuje.

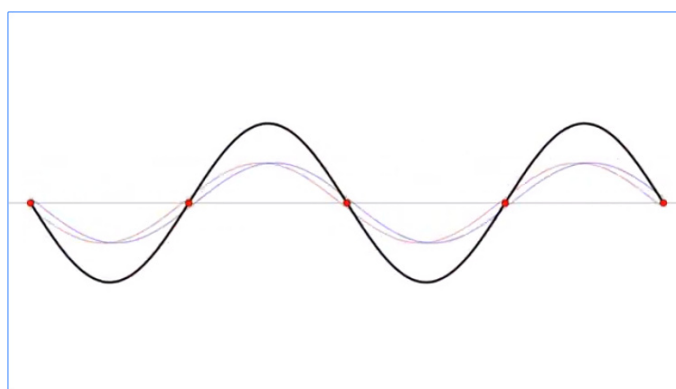
Długość fali, jak wspomniano, jest odległością, a to znaczy, że parametr ten wyrażany jest w jednostkach długości, np. w metrach. Długość fali powiązana jest z jej częstotliwością i prędkością zgodnie z zależnością:  $\lambda = v/f$  (gdzie  $v$  jest prędkością fali, a  $f$  jej częstotliwością). Analizując parametry fali rozchodzącej się w wybranym ośrodku i przyjmując jej prędkość jako wielkość stałą, zauważymy że długość fali jest odwrotnie proporcjonalna do jej częstotliwości. To znaczy: im większa częstotliwość tym mniejsza długość fali (krótsza fala) i na odwrót: im częstotliwość mniejsza tym fala dłuższa.

Wracając do podstawowej harmoniczej (składowej podstawowej)... przyjrzyjmy się jak można powiązać długość fali z długością piszczałki (w przypadku piszczałek języczkowych - długością języczka) i jej typem akustycznym.

W elemencie drgającym, którym w piszczałkach jest słup powietrza bądź języczek (w zależności od typu piszczałki) może wytworzyć się fala stojąca. Powstaje ona jako efekt nakładania się (interferencji) fali biegnącej i fali odbitej, które poruszają się wzdłuż drgającego ośrodka, w przeciwnie strony. Fala biegnąca przesuwa się w jedną stronę drgającego elementu, a w chwili dotarcia do jego granicy odbija się i zaczyna przesuwać w stronę przeciwną, następnie ponownie się odbija od przeciwległego końca, itd. Właśnie te dwie poruszające się fale, po nałożeniu się na siebie wytwarzają falę stojącą. Stojącą czyli taką, której grzbiety i doliny nie przemieszczają się. Zwróćmy uwagę na fakt, że np. w przypadku piszczałki wargowej fala odbija się nie tylko od zamkniętego końca piszczałki, ale również od końca otwartego. Odbicie co prawda w takim przypadku nie jest całkowite, ale takie jakie jest w zupełności wystarcza do tego aby w sprzyjających warunkach wytworzyła się fala stojąca. Sprzyjające warunki, czyli warunki które muszą być spełnione aby wytworzyła się fala stojąca to przede wszystkim odpowiednia długość fali dźwiękowej - musi ona

być dopasowana do długości korpusu piszczałki (bądź języczka). W przypadku piszczałki wargowej długość ta odpowiada częstotliwości rezonansowej korpusu piszczałki (a ta ściśle wynika z jej wymiarów). W takich przypadkach właśnie powietrze ograniczone ściankami piszczałki drga z dużą amplitudą (co w tym przypadku jest efektem jak najbardziej pożądanym), a na otwartym końcu (bądź końcach) piszczałki wytwarza się fala akustyczna rozchodząca się w przestrzeni. Częstotliwość tej fali dźwiękowej jest oczywiście równa częstotliwości drgań powietrza w piszczałce.

Animacja zamieszczona poniżej przedstawia trzy fale: biegnącą i odbitą (kolor niebieski i czerwony), które poruszają się w przeciwne strony, oraz falę stojącą (kolor czarny) będącą efektem nałożenia się tych dwóch pierwszych.

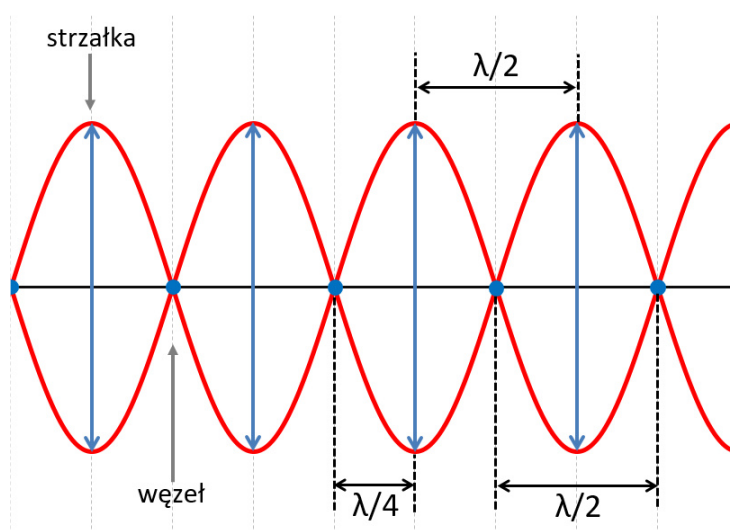


■ **il.5.** Fala stojąca - efekt nałożenia się fali biegnącej i fali odbitej.

Oryginalną ilustrację można obejrzeć pod adresem:

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/7d/Standing\\_wave\\_2.gif](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/7d/Standing_wave_2.gif)

W opisie fizycznym fali stojącej wskazuje się dwa charakterystyczne rodzaje punktów, w których drgania osiągają amplitudę maksymalną bądź minimalną. To tzw. węzły i strzałki. Węzły to te punkty, w których ośrodek nie drga czyli amplituda drgań jest równa zero. Strzałki natomiast to punkty, w których drgania osiągają amplitudę maksymalną (w tych punktach drgania są największe). Węzły i strzałki fali



■ **il.6.** Fala stojąca - rozkład węzłów i strzałek, długość fali.

stojącej nie przemieszczają się. Odległości między sąsiednimi strzałkami bądź też sąsiednimi węzłami równe są połowie długości fali.

Wszystkie powyższe informacje niezbędne są do tego, aby przy znajomości reguł tworzenia się węzłów i strzałek w falach stojących, móc określić jak długa fala zdoła się wytworzyć w danej piszczałce (czyli jaką częstotliwość będzie miał dźwięk wydawany przez taką piszczałkę).

A jakie są reguły tworzenia się strzałek i węzłów w przypadku drgań interesujących nas elementów? Przy zamkniętym końcu piszczałki i na nieruchomym końcu języczka zawsze tworzy się węzeł, na otwartym końcu piszczałki a także na swobodnie drgającym końcu języczka tworzy się strzałka. W przypadku piszczałki wargowej, przy jej otwartym końcu strzałka tworzy się tak naprawdę nieco poza jej krawędzią, stąd też mogą pojawić się rozbieżności między obliczonymi wymiarami piszczałek, a tymi które spotykamy w praktyce. W związku z tym wszystkie obliczenia dotyczące długości korpusów piszczałek, należy traktować jako czysto teoretyczne (niekiedy można się spotkać z określeniami typu: „teoretyczna długość korpusu”).

Jak zatem w szczegółach wygląda rozkład strzałek i węzłów w piszczałkach znanych nam typów?

- Piszczałka języczkowa: na nieruchomym końcu języczka zawsze tworzy się węzeł, na przeciwnym końcu – swobodnie drgającym – tworzy się strzałka.
- Piszczałka zamknięta: przy zamkniętym końcu piszczałki (szpunt, czapka) tworzy się węzeł, przy końcu otwartym (w okolicy wycięcia) – strzałka.
- Piszczałka otwarta: na obydwu końcach piszczałki (obydwa są otwarte) tworzą się strzałki fali stojącej.
- Piszczałka przedęta (np. piszczałka przedęta o oktawę czyli z dodatkowym otworem w połowie długości korpusu): podobnie jak w zwykłej piszczałce otwartej czyli przy obydwu końcach (otwartych) tworzą się strzałki fali stojącej, ale wytworzona fala musi mieć jeszcze jedną strzałkę – w miejscu gdzie wywiercono dodatkowy otwór (w omawianym przykładzie to połowa długości korpusu).

Są to oczywiście reguły pokazujące absolutne minimum, które trzeba uwzględniać w analizach. Takie minimum (i nic więcej) dotyczy przebiegu fali dla podstawowej harmonicznej (składowej podstawowej). Pomiedzy tymi skrajnymi węzłami i strzałkami (które wynikają z powyższego minimum) mogą się oczywiście pojawiać jeszcze kolejne węzły i strzałki, ale te występują już w przebiegach tzw. wyższych harmonicznych (może ich być właściwie dowolnie dużo). Ich ilości i amplitudy zależą od typów piszczałek i ich konstrukcji.

W kolejnych artykułach postaramy się wykorzystać omówione tutaj podstawy teoretyczne do analizy fal powstających w piszczałkach różnych typów.

---

**Źródła ilustracji:**

**nagłówek:** K. Zacharski

**il.1-4.** K. Zacharski

**il.5.** LucasVB [Public domain], via Wikimedia Commons, źródło:  
[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/7d/Standing\\_wave\\_2.gif](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/7d/Standing_wave_2.gif) [dostęp: 22.10.2019]

**il.6.** K. Zacharski

**Bibliografia:**

- J. Chwałek, *Budowa organów. Wprowadzenie do inwentaryzacji i dokumentacji zabytkowych organów w Polsce*, Warszawa 1971
- D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, *Podstawy Fizyki 2*, Warszawa 2006

28 PAŹDZIERNIKA 2019

Copyright © 2019 Konrad Zacharski. Wszelkie prawa zastrzeżone.