



Konrad Zacharski

Wszystkie piszczałki duże i małe

Bogatsi o wiedzę z zakresu fizyki drgań i fal (patrz poprzednie artykuły „Bez fizyki ani rusz!” i “Octavus znaczy ósmy”) możemy próbować wykreślić przebieg fali podstawowej w piszczałkach różnych typów. Pomoże nam to zrozumieć jak długa fala może powstać w każdej z tych piszczałek. Długość fali, jak wiadomo, powiązana jest z częstotliwością, a ta z kolei przekłada się na wysokość dźwięku wydawanego przez piszczałkę i docierającego do naszych uszu. Skupiamy się na razie tylko na składowej podstawowej, bo to ona decyduje o wysokości dźwięku.

Przypomnijmy zasady tworzenia się **strzałek** i **węzłów fali stojącej** w piszczałkach różnych typów: 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 szczegółach zaś wygląda to tak:

- Piszczałka wargowa zamknięta: przy zamkniętym końcu piszczałki (szpunt, czapka) tworzy się węzeł, przy końcu otwartym (w okolicy wycięcia) – strzałka.
- Piszczałka wargowa otwarta: na obydwu końcach piszczałki (obydwa są otwarte) tworzą się strzałki fali stojącej.
- Piszczałka wargowa 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

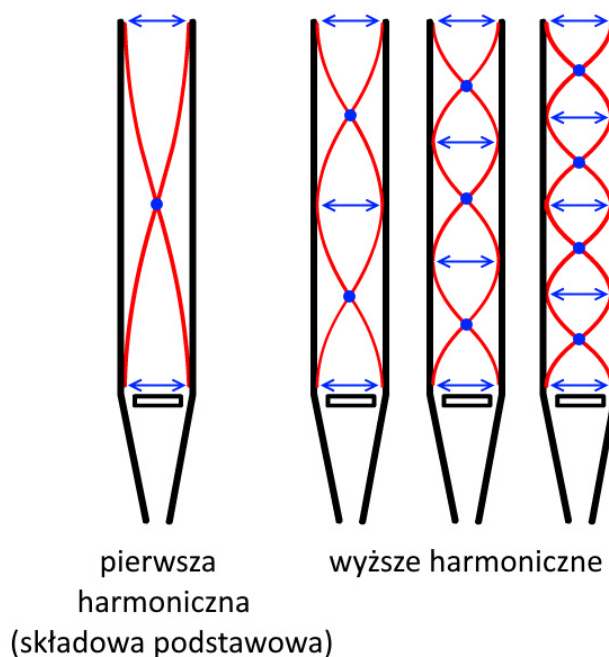
jeszcze jedną strzałkę – w miejscu gdzie wywiercono dodatkowy otwór (w omawianym przykładzie to połowa długości korpusu).

- Piszczalka języczkowa: na nieruchomym końcu języczka zawsze tworzy się węzeł, na przeciwnym końcu – swobodnie drgającym – tworzy się strzałka.

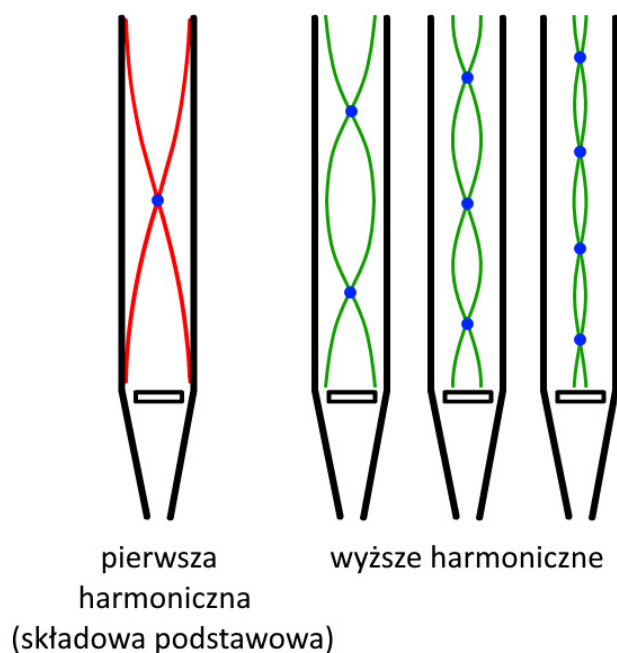
Powyższe reguły to absolutne minimum jeśli chodzi o występowanie strzałek i węzłów w piszczałkach różnych typów. Efektem zastosowania tego minimum przy próbie wykreślenia kształtu fali w każdej z piszczałek, będzie obraz **składowej podstawowej** dźwięku (zwanej również **podstawową harmoniczną** bądź **pierwszą harmoniczną**). Składowej podstawowej czyli tej, która decyduje o wysokości dźwięku wydawanego przez piszczałkę. Aby zatem wrysować w kontur piszczałki kształt składowej podstawowej trzeba odtworzyć możliwie najprostszy fragment fali. Taki najprostszy fragment fali to jednocześnie jej fragment najkrótszy z możliwych, bez „zbędnych” dodatkowych węzłów i strzałek. Oczywiście dodatkowe węzły i strzałki trzeba uwzględniać przy wyznaczaniu kolejnych harmoniczných, ale składowa podstawowa w narysowanym przebiegu mieć ich nie będzie.

Wracając do fal stojących tworzących się w piszczałkach...

Przyjrzyjmy się konkretnemu przykładowi przedstawionemu na ilustracji obok. Pokazano tutaj kilka wybranych fal, które mogą powstać we wnętrzu piszczałki otwartej. Oczywiście wszystkie przebiegi spełniają przytoczone powyżej warunki powstawania fal w piszczałkach tego typu (w piszczałkach otwartych), czyli przy obydwu otwartych końcach piszczałki powstają strzałki fali stojącej. Reguła ta dotyczy wszystkich składowych harmoniczných, tzn. zarówno składowej podstawowej, jak i składowych harmoniczných. I tak też przedstawiono to na ilustracji. Wyraźnie jednak widać, że narysowane fale różnią się między sobą. Czym? Ilością węzłów i strzałek. Ilość ta w przypadku każdej składowej harmoniczných jest inna. Im wyższa harmoniczna tym węzłów i strzałek jest więcej. Składowa pierwsza czyli podstawowa ma ich oczywiście najmniej.



■ **il.1.** Kształt fal składowej podstawowej oraz wyższych składowych harmoniczných (z uwzględnieniem rozmieszczenia strzałek i węzłów) powstających w piszczałce otwartej.

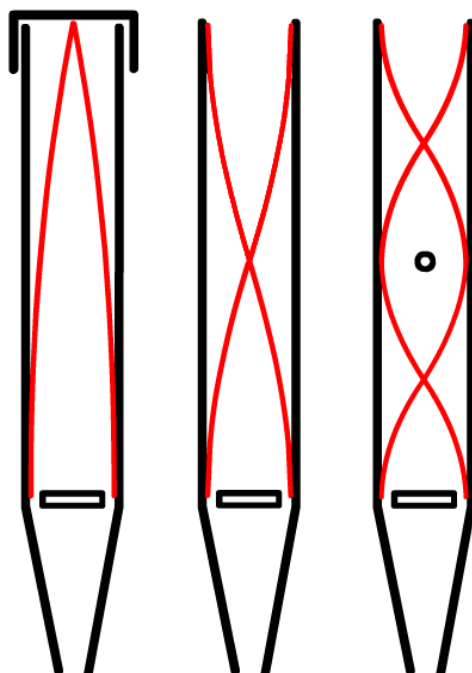


■ **il.2.** *Kształt fal składowej podstawowej oraz wyższych składowych harmonicznych w piszczalce otwartej (różne amplitudy drgań dla poszczególnych harmonicznych).*

W tej chwili co prawda interesuje nas przede wszystkim składowa podstawowa a więc przebieg pierwszy od lewej, ale zauważmy już przy tej okazji, że choć na powyższym rysunku wszystkie fale (również wyższe harmoniczne) mają taką samą amplitudę, to w rzeczywistości parametry te dla każdej z wyższych harmonicznych mogą być (i na ogół są) zupełnie różne. Taki właśnie, nieco zmodyfikowany przykład pokazano na ilustracji obok; w kontur piszczalki kolorem zielonym wrysowano przebiegi fal wyższych harmonicznych, węzły i strzałki są tam gdzie były, ale amplituda drgań “w strzałkach” dla każdej harmonicznej przyjmuje inną wartość. I taki obraz jest o wiele bliższy temu z czym spotykamy się w rzeczywistości, bo

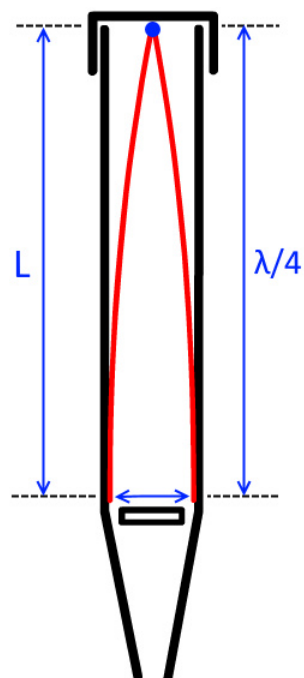
z reguły wyższe harmoniczne mają amplitudy znacznie niższe niż składowa podstawowa. Pamiętajmy również o tym, że składowych harmonicznych może powstać w piszczalce nieskończenie wiele; tutaj oprócz składowej podstawowej pokazano tylko trzy z nich. Wykres składowej podstawowej (przedstawiony na przebiegu pierwszym od lewej) to, jak wiadomo, najkrótszy i najprostszy fragment fali jaki można wykreślić w tym przypadku. Zgodnie z zasadami, na obydwu otwartych końcach piszczalki tego typu pojawiają się strzałki. Pomiedzy nimi (w połowie odległości) znajdziemy oczywiście węzeł fali stojącej (dwie kolejne strzałki muszą być rozdzielone węzłem; inaczej się nie da, tak po prostu „działa” fala stojąca). Więcej węzłów ani strzałek w przebiegu składowej podstawowej (w piszczalce otwartej) nie znajdziemy. Dodatkowe węzły i strzałki pojawiają się natomiast w przebiegach kolejnych składowych harmonicznych (przebiegi narysowane kolorem zielonym). Ale nas, jak wiemy, w tym momencie interesuje składowa podstawowa i dlatego zajmujemy się przebiegami o kształtach możliwie najprostszymi.

Jak zatem przebiegi te wyglądać będą w przypadku trzech głównych, znanych nam typów piszczalek?



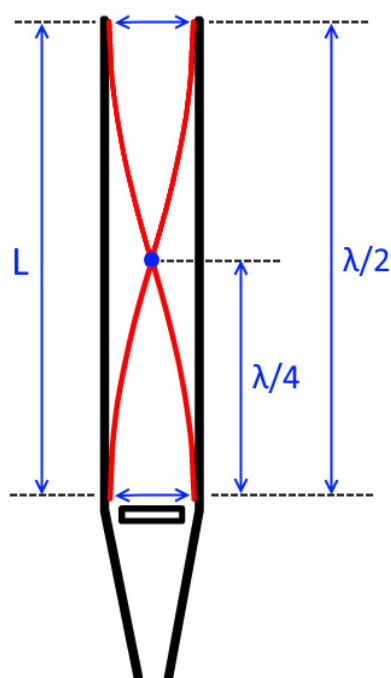
■ **il.3.** Kształt fal (składowej podstawowej) powstających w pischczalkach różnych typów akustycznych (od lewej: pischczalka kryta, pischczalka otwarta, pischczalka przedęta o oktawę).

Pischczalka pierwsza od lewej na powyższej ilustracji to **pischczalka kryta** (schemat takiej pischczalki przedstawia również rysunek obok). Najprostszy możliwy fragment fali, jaki można wrysować w ten schemat to $1/4$ (ćwiartka) całej długości fali. Oczywiście spełnione są tutaj zasady, które wymagają aby na końcu zamkniętym pischczalki utworzył się węzeł, na otwartym zaś (w okolicy wycięcia) – strzałka. I nic więcej. Żadnych dodatkowych węzłów ani strzałek, bo to składowa podstawowa. Jaki dźwięk wyda taka pischczalka? Dźwięk o długości fali równej λ . W korpusie pischczalki mieści się co prawda tylko $1/4$ tej długości (czyli $\lambda/4$), ale drganie które się tutaj wytworzy i tak wygeneruje falę o pełnej długości (λ). Przyjmując L jako oznaczenie długości korpusu pischczalki (teoretyczną długość) analizowany przypadek podsumować można sformułowaniem zależności: $L = \lambda/4$. Zależność ta oznacza, że długość (teoretyczna) korpusu pischczalki krytej (L) równa jest $1/4$ długości powstającej w nim fali (λ). Przekształcając ten wzór możemy wyliczyć długość fali powstającej w tym przypadku: $\lambda = 4L$. Wynika stąd, że długość fali (składowej podstawowej) powstającej w pischczalce krytej równa jest czterokrotności długości korpusu.



■ **il.4.** Kształt fali składowej podstawowej powstającej w pischczalce krytej.

Zwróćmy uwagę na uproszczenia, które tutaj czynimy, a które sprawiają, że prezentowane analizy są zdecydowanie łatwiejsze do zrozumienia. Oczywiście, jak każde uproszczenia, tak i te, wprowadzają do rozumowania pewnego rodzaju niedoskonałości czy błędy. Jednak na tym poziomie wtajemniczenia nie będziemy do nich przywiązywać zbyt dużej wagi, ciesząc się raczej z faktu, że uproszczone założenia ułatwią nam zrozumienie prezentowanych zasad teoretycznych. Na analizę rozmaitych szczegółów i niuansów zapewne przyjdzie czas; dla każdego prawdopodobnie w innym momencie. Z największą ilością rozbieżności wynikających z przyjętych uproszczeń zetkniemy się zapewne na styku teorii z praktyką. Praktyka weryfikuje te uproszczenia. Niektórzy wręcz uważają, że teoria kończy się dokładnie tam gdzie zaczyna się praktyka. No ale od czegoś trzeba zacząć. Zauważmy więc choćby kwestię sygnalizowaną już w jednym z poprzednich artykułów - kwestię dotyczącą rzeczywistego miejsca tworzenia się strzałek przy otwartych końcach piszczałek wargowych. Strzałki te tak naprawdę tworzą się nieco poza krawędziami korpusów piszczałek (a nie dokładnie na krawędziach). Co z tego wynika? To, że długości korpusów piszczałek wyliczone z zależności teoretycznych (zarówno tej przytoczonej powyżej jak i tych, które pojawią się w dalszej części tekstu), mogą odbiegać nieco od wartości rzeczywistych, spotykanych w praktyce. Korpus piszczałki, która jest źródłem dźwięku o określonej długości fali, w rzeczywistości będzie nieco krótszy niż wynika to z długości wyliczonej. Ta wyliczona długość jest daną teoretyczną i dlatego określana jest niekiedy jako „teoretyczna długość korpusu piszczałki” (lub zamiennie, choć niezbyt ściśle, “teoretyczna długości piszczałki”).

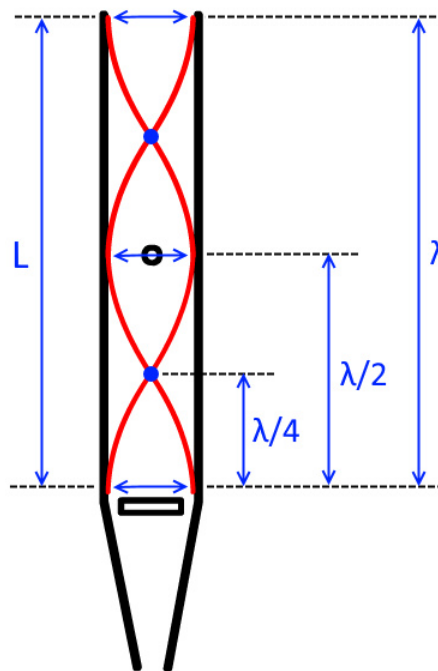


■ **il.5.** *Kształt fali składowej podstawowej powstającej w piszczałce otwartej.*

Drugi typ piszczałki - **piszczałka otwarta**. W jej wnętrzu wytworzy się fragment fali o długości równej $\lambda/2$. Dlaczego tym razem połowa długości a nie $1/4$? Dlatego, że piszczałka tego typu ma obydwa końce otwarte, a zgodnie z zasadami, przy końcach otwartych piszczałki zawsze powstają strzałki. Aby na obydwu końcach powstały strzałki pomiędzy nimi musi się pojawić węzeł. I to jest właśnie najkrótszy i najprostszy fragment fali jaki można wykreślić w tym przypadku. W takiej piszczałce zatem wytworzy się fragment fali, który ma długość $\lambda/2$ (jest to “połówka” fali o długości λ). Ale znowu trzeba pamiętać, że drganie które tutaj powstanie będzie przyczyną wygenerowania fali akustycznej o pełnej długości λ (a nie $\lambda/2$). Zależność między teoretyczną długością korpusu piszczałki (L) a długością powstającej w nim fali (λ) jest dla tego typu piszczałki następująca: $L = \lambda/2$. Długość (teoretyczna) korpusu piszczałki otwartej równa jest zatem $1/2$ długości powstającej w nim fali (λ). Po prze-

kształceniu wzoru otrzymujemy zależność: $\lambda=2L$, z której wynika, że długość fali (składowej podstawowej) powstającej w piszczałce otwartej równa jest podwojonej długości korpusu.

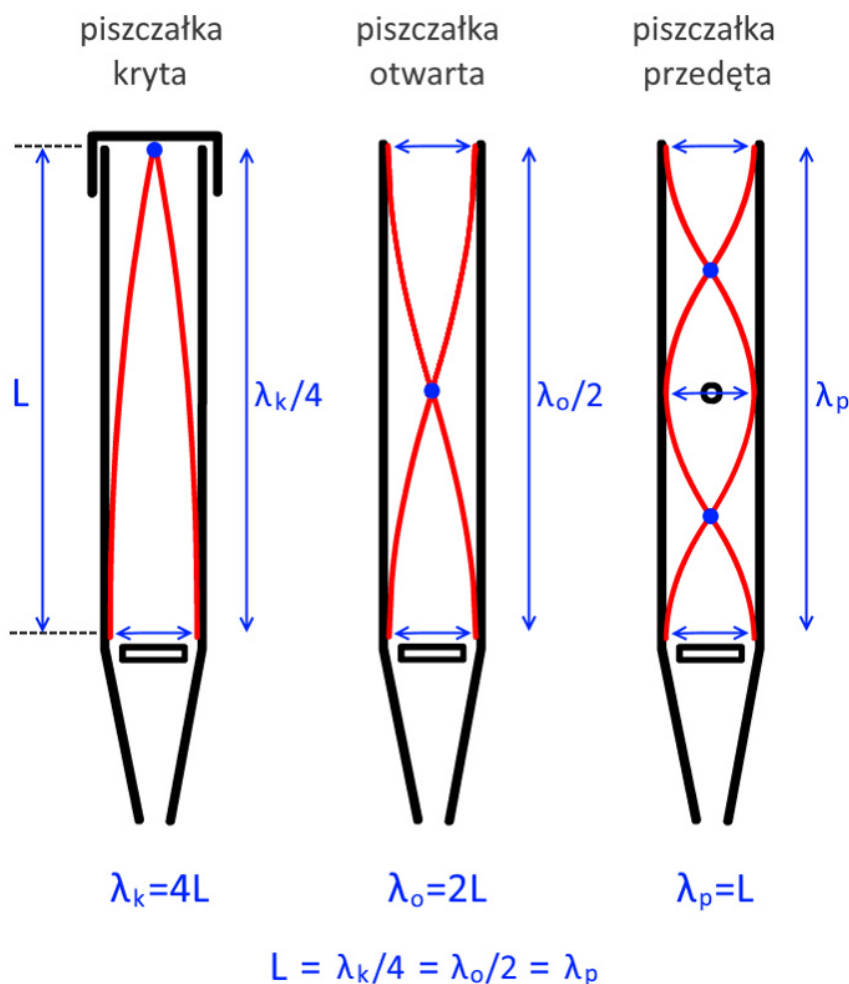
I trzeci typ, **piszczałka przedęta** o oktawę. W takiej piszczałce, jako podstawowa składowa wytworzy się cała fala (pełna długość λ). Piszczałka przedęta to pewna odmiana piszczałki otwartej. Dlaczego zatem pierwszej składowej odpowiada w tym przypadku przebieg o kształcie bardziej skomplikowanym niż w przypadku zwykłej piszczałki otwartej? Dlatego, że w połowie długości korpusu piszczałki przedętej o oktawę znajduje się dodatkowy otwór, który wymusza powstanie w tym miejscu jeszcze jednej strzałki. Zatem oprócz strzałek znajdujących się na obydwu otwartych końcach piszczałki, trzecia strzałka musi się pojawić dodatkowo w połowie korpusu (przy otworze). Oczywiście pomiędzy wszystkimi strzałkami, w połowie odległości między nimi, utworzą się węzły fali stojącej. W piszczałce tego typu wytworzy się zatem pełna długość fali, którą usłyszymy jako dźwięk docierający do naszych uszu. W tym przypadku zależność między długością korpusu piszczałki (L) a długością powstającej w nim fali (λ) jest bardzo prosta: $L= \lambda$. Długość (teoretyczna) korpusu piszczałki przedętej o oktawę równa jest długości powstającej w nim fali (λ). Innymi słowy: długość fali (składowej podstawowej) powstającej w piszczałce przedętej o oktawę równa jest długości korpusu tej piszczałki. Oczywiście aby dźwięk w piszczałce tego typu powstał musi ona być odpowiednio wykonana (wymagana jest odpowiednio wąska menzura) i musi zostać zadęta powietrzem o odpowiednim ciśnieniu (w końcu to piszczałka przedęta czyli przedmuchiwana).



■ il.6. Kształt fali składowej podstawowej powstającej w piszczałce przedętej o oktawę.

Przypomnijmy raz jeszcze (choć może się to już wydawać trochę nudne i natrętne), że we wszystkich przeanalizowanych powyżej przypadkach omówiono składową podstawową dźwięku. Czyli tę, której odpowiada przebieg o najprostszym kształcie, będący możliwie najkrótszym fragmentem fali, z jak najmniejszą ilością strzałek i węzłów. Z przytoczonych powyżej zależności między teoretycznymi długościami korpusów (L) a długościami powstających w nich fal składowych podstawowych (λ) wynika, że – mówiąc już bardzo potocznie, ale dość obrazowo – aby piszczałka brzmiała dźwiękiem o określonej długości fali (λ), w jej korpusie wcale nie musi się „zmieścić” cała fala. Wystarczy, że zmieści się w niej tylko fragment fali, a dźwięk który powstanie w takim przypadku i tak będzie miał wysokość wynikającą z całej długości fali. Nieważne jest zatem czy w takiej piszczałce „zmieści się” cała fala, czy jej połowa, czy może tylko ćwiartka. Fala i tak wytworzy się w całości, a to że w piszczałce „zmieści się” tylko jej część, to zupełnie inna historia,

która ma związek z konstrukcją piszczałki. Na podstawie tego fragmentu fali, który utworzy się w korpusie piszczałki można wyliczyć całkowitą długość fali (i częstotliwość drgań). I to dopiero ten parametr decyduje o wysokości dźwięku (częstotliwości) wydawanego przez analizowaną piszczałkę. Zobaczmy ilustrację podsumowującą trzy powyższe przypadki i wyciągnijmy wnioski.

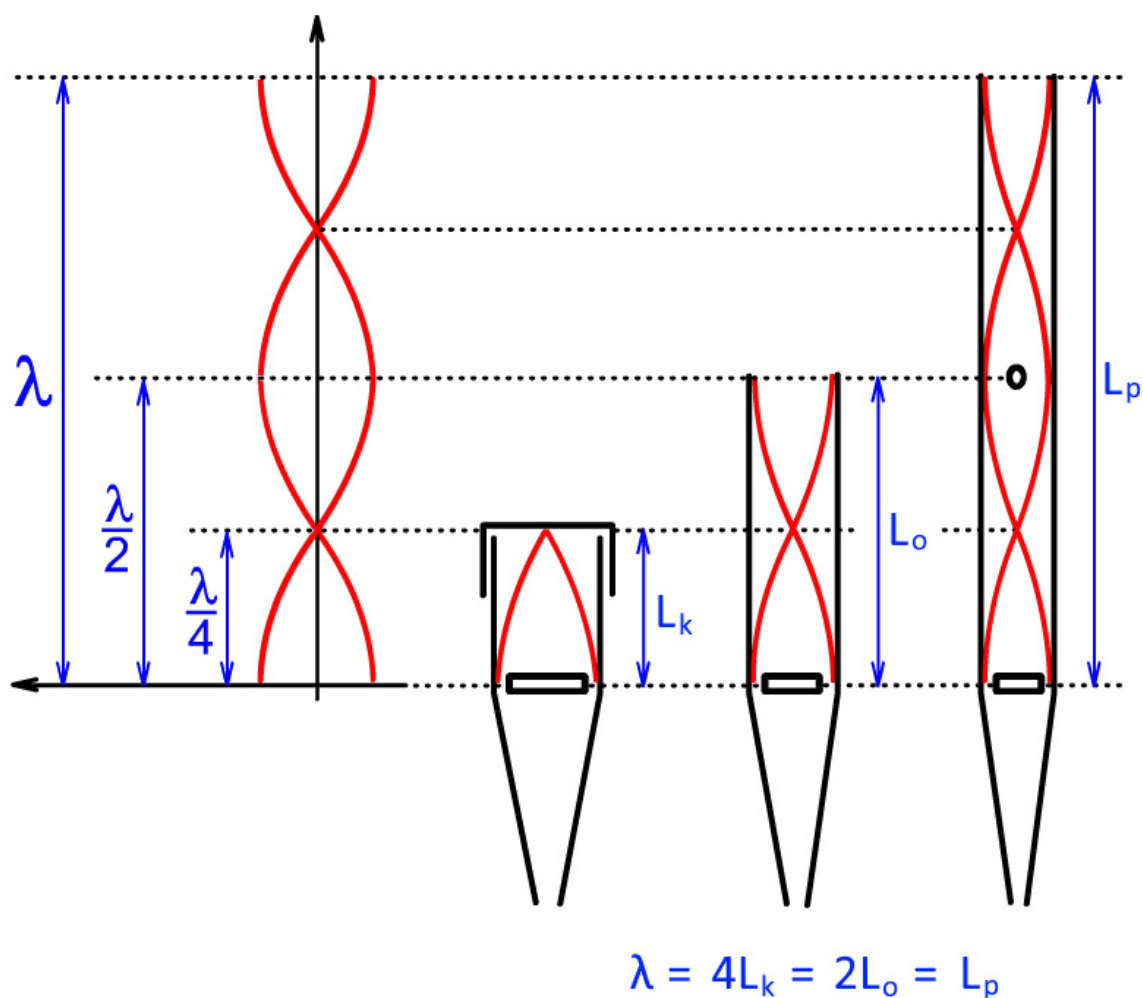


■ **il.7.** *Kształt fal (składowej podstawowej) powstających w piszczałkach różnych typów akustycznych o tej samej długości (od lewej: piszczałka kryta, piszczałka otwarta, piszczałka przedęta o oktawę). Zależności między długością fali i długością korpusu piszczałki.*

Trzy piszczałki różnych typów akustycznych. Wszystkie o takiej samej długości L (teoretycznej długości). Każda z nich wydaje dźwięk o innej wysokości. Jak bardzo innej? Bardzo. Różnice liczymy tutaj nie w półtonach czy całych tonach, ale w oktavach. Jeśli mamy trzy piszczałki takie jak przedstawiono na powyższej ilustracji, piszczałki różnych typów, ale wszystkie tej samej długości (chodzi oczywiście o długości korpusów), to piszczałka otwarta wyda dźwięk o oktawę wyższy niż piszczałka kryta, a piszczałka przedęta zagra o oktawę wyżej od piszczałki otwartej. Mamy swego rodzaju “kaskadę” dwóch skoków o oktawę, a patrząc na dwie skrajne piszczałki

z ilustracji zauważymy, że piszczałka przedęta wyda dźwięk aż o dwie oktawy wyższy niż piszczałka kryta o tej samej długości. To czysta fizyka, bo pamiętamy przecież z poprzednich artykułów, że dwukrotne wydłużenie fali to zmiana wysokości dźwięku o oktawę w dół, dwukrotne skrócenie zaś (podzielenie długości fali przez 2) to skok o oktawę w górę.

W powyższym podsumowaniu wyszliśmy od stałej długości piszczałek, a doszliśmy do różnej długości fal (w zależności od typu piszczałki). Dla dopełnienia analizy przeprowadźmy teraz rozumowanie od drugiej strony. Poniżej zamieszczono ilustrację dla takiego właśnie przypadku. Tym razem to długość fali jest stała, a w wyniku analizy dochodzimy do długości piszczałek, które - uprzedzając fakty - będą różne (oczywiście w zależności od typu piszczałki).



■ **il.8.** Kształt fal (składowej podstawowej) powstających w piszczałkach różnych typów akustycznych. Długości piszczałek, w których powstaje fala o takiej samej długości.

Jak widać, co już wcześniej zauważono, w piszczałkach różnych typów akustycznych “mieszczą się” różne fragmenty (“wycinki”) fali stojącej o określonej długości λ . Jednak długość fali w przedstawionych przypadkach zawsze jest taka sama - a to znaczy, że i wysokość dźwięku wydawanego

przez te piszczałki będzie taka sama. Oczywiście dźwięki te będą się różnić barwą. Ale wysokością nie. Patrząc od prawej strony, piszczałka przedęta wydająca dźwięk odpowiadający fali o długości λ musi mieć teoretyczną długość równą λ (teoretyczna długość piszczałki jest w tym przypadku równa długości powstającej w niej fali). Druga piszczałka - piszczałka otwarta, aby wydawać dźwięk o takiej samej wysokości (czyli odpowiadający fali o długości λ) jest o połowę krótsza. I piszczałka ostatnia - piszczałka kryta wydająca dźwięk o tej samej wysokości co dwie poprzednie będzie znowu dwukrotnie krótsza od otwartej, a czterokrotnie krótsza od przedętej. Zatem dwie piszczałki, np. otwarta i dwukrotnie krótsza kryta wydadzą dźwięki o tej samej wysokości, itd. Po co zatem robić piszczałki otwarte, albo przedęte, skoro wystarczyłyby dwu- lub czterokrotnie krótsze piszczałki kryte, które będą wydawały dźwięki o tej samej wysokości? Przecież byłyby to bardzo duża oszczędność i materiału, i miejsca. Odpowiedź jest prosta i znowu prowadzi w rejony wyższych harmonicznych. Piszczałki różnych typów, choć mogą wydawać dźwięki o tej samej wysokości, będą się zasadniczo różniły barwą. Będą po prostu zupełnie inaczej brzmiały. Dlatego też aby zapewnić różnorodność brzmienia poszczególnych głosów w organach ich projektanci i budowniczy decydują się na użycie piszczałek różnych typów akustycznych, co oczywiście związane jest m.in. z użyciem większej ilości materiału. Nie da się ukryć, że ma to wpływ zarówno na gabaryty instrumentu, jak i na jego koszt, ale musimy pamiętać, że jest to cena jaką płacimy za uzyskanie odpowiednio zróżnicowanego brzmienia poszczególnych głosów. Instrument z samymi tylko piszczałkami krytymi byłby co prawda tańszy i mniejszy, ale jego brzmienie byłoby ciemne, matowe, jakby nieco przytłumione...

... czy Państwo to słyszą? Barwa, ciemna, matowa, przytłumiona... o czym my tu właściwie rozprawiamy? O malarstwie czy o muzyce? 😊;-)

Źródła ilustracji:

naglówek: K. Zacharski

il.1-8. 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

2 STYCZNIA 2020