

Czarodziejski flet

Analiza dźwięków zaskakuje już w najprostszych przypadkach, dźwięk fletu – zabawki wykazuje własności nieprzewidziane przez proste teorie. W artykule analizujemy szczegółowo widma dźwięków z zabawkowego fletu, który jest dla nas niejako przybliżeniem doświadczalnym teoretycznej otwartej lub zamkniętej rury akustycznej. Opisujemy też inne „przyrządy” akustyczne – rurki od odkurzacza, fletnie i skrzypce, a nawet grające kieliszki.

■ GRZEGORZ KARWASZ, ERYK RAJCH

Zjawiska falowe – obszar „działania” równań Maxwella i mechaniki kwantowej, a przez to telewizji, telefonów komórkowych i transmisji internetowych – to świat równań różniczkowych, warunków brzegowych, wartości własnych... Jeśli od tego zaczniemy, skutecznie odstraszymy i uczniów, i studentów. Okazuje się jednak, że można pokazać bogactwo zjawisk falowych za pomocą prostego sprzętu. Dla fal, które odbieramy nawet po zamknięciu oczu – dźwięków. W artykule tym pokazujemy system pomiarowy możliwy do zestawienia w każdej szkole, składający się z komputera klasy PC z dowolną kartą dźwiękową, mikrofonu za 30 zł i bezpłatnego programu do analizy dźwięku „Oscilloscope 2.51”, autorstwa K. Zeldovicha (<http://polly.phys.msu.ru/~zeld/oscill.html>).

Program „Oscilloscope” pozwala na wizualizację zapisanego sygnału i dokonuje analizy Fouriera składowych częstotliwości dźwięku. W naszych pomiarach dźwięki były rejestrowane za pomocą starego komputera PC 486 o zegarze 66 MHz (na Uniwersytecie w Trydencie). Uzyskane zapisy w formacie *.wav zostały przesłane przez Internet do Słupska i tam zanalizowane na innym komputerze, klasy Pentium III o zegarze 750 MHz. Wszystkie dźwięki opisane w tym artykule można usłyszeć pod adresem <http://lab.pap.edu.pl/~rajch/multimedia/sounds/index.html>.

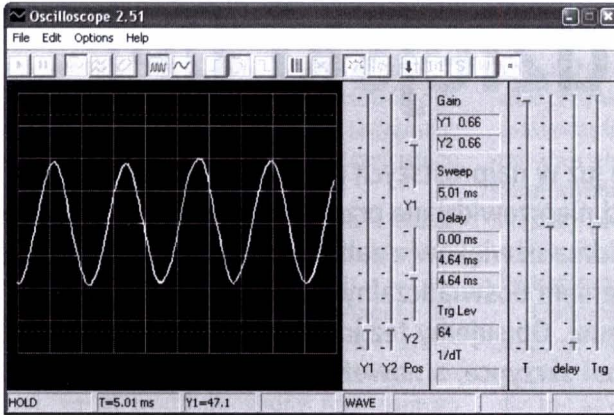
Czysty dźwięk

Zacznijmy od najprostszego przypadku dźwięku – tonu, czyli fali akustycznej o jednej, określonej częstotliwości, czyli fali sinusoidalnej. Wbrew pozorom, niełatwo taki dźwięk znaleźć w przyrodzie. Instrumenty muzyczne wytwarzają dźwięki złożone, o szerokim widmie częstotliwości, jak to pokazujemy nieco dalej. Okazuje się, że sinusoidalne fale akustyczne z dobrym przybliżeniem wytwarza „grające” szkło [1].

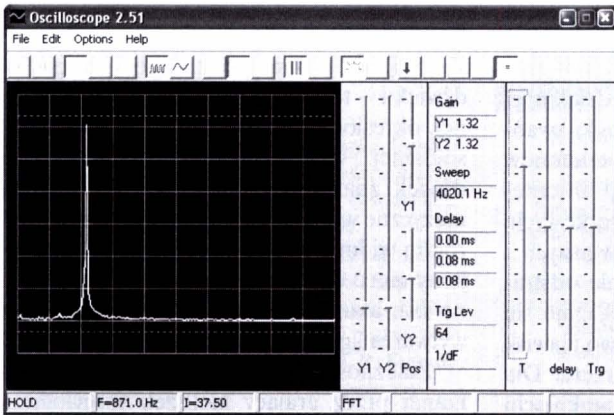
Zależność od czasu amplitudy fali wytwarzanej przez grający kieliszek (oscylogram fali) przedstawia rys. 1a, a wynik analizy Fouriera (amplitudy fal składowych w funkcji częstotliwości) rys. 1b. Jak widać z zapisu na rys. 1b, w widmie „kieliszka” dominuje jedna, dobrze zdefiniowana częstotliwość (około 900 Hz), a sama fala jest prawie „doskonałą” sinusoidą. Jakość analizy za pomocą „oscyloskopu wirtualnego” okazała się lepsza, niż analiza dokonana za pomocą profesjonalnego mikrofonu ze wzmacniaczem akustycznym i oscyloskopu cyfrowego o paśmie przenoszenia 200 MHz i częstości próbkowania 1 Gb/s (na wyposażeniu laboratorium w Trydencie).

Instrumenty strunowe i dęte

Instrumenty muzyczne dzielimy na dęte i strunowe. Dla fizyka różnią się one „warunkami brzegowymi fali stojącej”: w instrumentach strunowych na końcach struny fala ma węzły (rys. 2). Długość fali tonu podstawowego



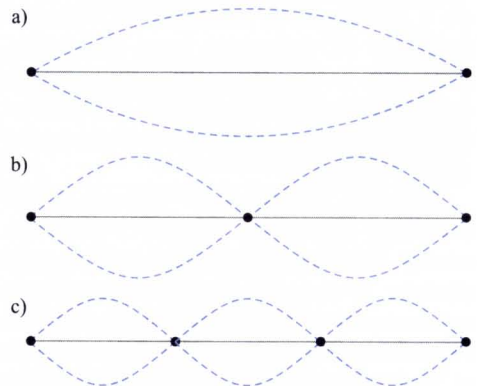
Rys. 1a. Program wirtualnego oscyloskopu – pokazane są „potencjometry” kontrolne oraz przebieg amplitudy fali akustycznej w funkcji czasu, wytwarzanej przez kieliszek do szampana pocierany wzdłuż górnej krawędzi.



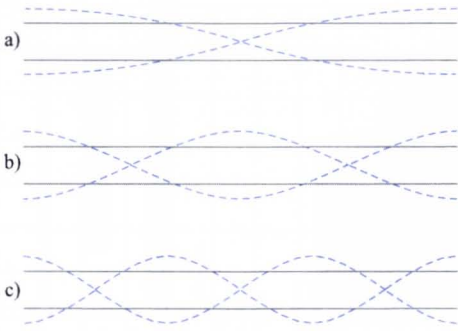
Rys. 1b. Widmo częstotliwości (transformata Fouriera) dźwięku wytwarzanego poprzez pocieranie górnej krawędzi kieliszka, zarejestrowane za pomocą programu Oscilloscope. Zakres częstotliwości na skali „wirtualnego oscyloskopu” $f = 0-4020$ Hz. Zwraca uwagę obecność praktycznie jednej tylko częstotliwości składowej.

struny wynosi $\lambda_0 = 2L$ (rys. 2a), a częstotliwość wynosi $f_0 = v/2L$. Wyższe tony, tzw. harmoniczne (druga, trzecia itd.) lub alikwoty tonu podstawowego, mają częstotliwości będące całkowitymi wielokrotnościami częstotliwości podstawowej f_0 . I tak na przykład częstotliwość drugiej harmonicznej różni się od tonu podstawowego o czynnik 2. Dla muzyków jest to interwał zwany oktawą – na klawiaturze fortepianu różnica tonu między jakimkolwiek klawiszem białym a ósmym kolejnym, na gitarze różnica tonu między struną wolną (bez przyciskania progów) a struną przyciśniętą w połowie jej długości.

W instrumentach dętych – rurach z drgającym powietrzem – długości fal stojących zależą od tego, czy rura jest otwarta czy zamknięta, por. rys. 3 i 4. W rurze obustronnie otwartej powstają na obu końcach strzałki,



Rys. 2. Częstotliwości fal powstających w drgającej strunie, zamocowanej na obu końcach, są całkowitymi wielokrotnościami częstotliwości fali podstawowej, o długości $\lambda_0 = 2L$ (rys. 2a). Falę o częstotliwości $2f_0$ nazywamy drugą harmoniczną (rys. 2b), o częstotliwości $3f_0$ trzecią harmoniczną (rys. 2c) itd.

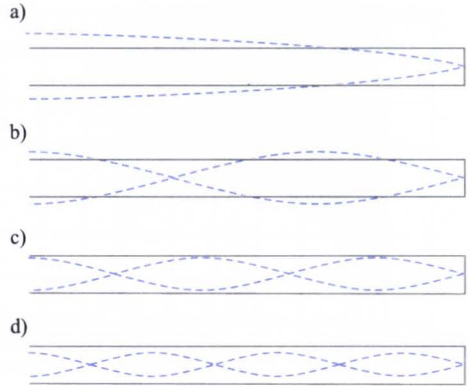


Rys. 3. Przebieg amplitudy drgań podłużnych słupa powietrza w piszczalce obustronnie otwartej (występują zarówno parzyste jak i nieparzyste harmoniczne, tzn. wielokrotności częstotliwości podstawowej);
 a) drgania podstawowe o częstotliwości f_0 ($\lambda = 2L$),
 b) druga harmoniczna o częstotliwości $2f_0$ ($\lambda = L$),
 c) trzecia harmoniczna o częstotliwości $3f_0$.

długość fali podstawowej wynosi $\lambda_0 = 2L$ (rys. 3a), a widmo częstotliwości jest (teoretycznie) takie samo jak dla zamocowanej obustronnie struny¹.

Najniższa częstotliwość w rurze jednostronnie zamkniętej jest (teoretycznie) niższa niż dla rury otwartej – w rurze otwartej powstaje ćwiartka fali, zob. rys. 4a. Przyjmijmy jako f_0 częstotliwość podstawową rury obustronnie otwartej. Wtedy najniższa częstotliwość w rurze jednostronnie zamkniętej wynosi $f_0/2$. Wyższe harmoniczne są nieparzystymi wielokrotnościami tej wartości: $3/2 f_0$, $5/2 f_0$, $7/2 f_0$ itd. Zatem widmo częstotliwości instrumentów dętych (fletu, fagotu, oboju, ale też saksofonu, puzonu i trąbki) jest teoretycznie inne niż widmo częstotliwości skrzypiec, wiolonczeli, kontrabasu i gitary.

Problem praktyczny pojawia się, kiedy chcemy zbudować „matematycznie doskonałą” rurę akustyczną, wytwarzającą tylko jedną, podstawową częstotliwość – takowych w przyrodzie nie ma. Kiedyś na wyposażeniu



Rys. 4. Przebieg amplitudy drgań podłużnych słupa powietrza w piszczalce jednostronnie zamkniętej o długości L
 a) drgania podstawowe – długość fali $\lambda = 4L$; częstotliwość fali $f_1 = f_0/2$, gdzie f_0 jest częstotliwością podstawową dla rury obustronnie otwartej z rys. 3a;
 b) drgania harmoniczne o częstotliwości $3f_1$;
 c) drgania harmoniczne o częstotliwości $5f_1$;
 d) drgania harmoniczne o częstotliwości $7f_1$.

szkół były kwadratowe rury o regulowanej długości – dziś musimy się zadowolić plastikowym fletem, takim jak na rys. 5, kupionym w sklepie „Wszystko za 5 zł”. Ale do grania nawet flet nie jest potrzebny, wystarczy jakkolwiek rurka.



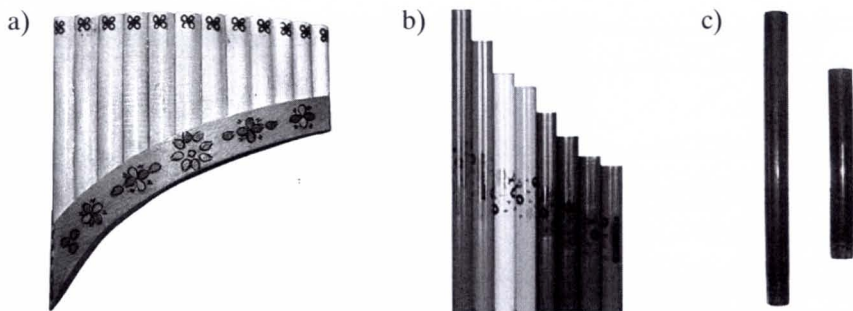
Rys. 5. Flet Yamaha YRS23.

Muzyka na rurkach

Grać można na jakimkolwiek „słupie powietrza” – szklanej menzurce, różnego rodzaju rurkach, butelkach (częściowo wypełniając je wodą, zmienimy długość słupa powietrza wewnątrz, a przez to wysokość tonu).

Zauważmy, że we fletni Pana z rys. 6a najkrótsza rurka jest połową rurki najdłuższej –

¹ Częstotliwość fali powstającej w strunie zależy od jej długości, ale również od prędkości rozchodzenia się fali w strunie v . Ta ostatnia zależy z kolei od siły naciągu struny T i jej gęstości liniowej ρ , zgodnie ze wzorem $v = \sqrt{T/\rho}$. I tak kolejne struny kontrabas, gitary, skrzypiec różnią się grubością (gęstością liniową), a dokładną regulację wysokości tonu podstawowego uzyskuje się przez *strojenie*, czyli zmianę naciągu struny.



Rys. 6. a) Fletnia Pana z Rumunii. b) „Gama za dolary” – Boomwhackers, Arbor Scientific, USA. c) Rury do odkurzacza.

czyli powstający w niej ton ma częstotliwość dwukrotnie wyższą (oktawa). Rurek jest dwanaście – kolejne częstotliwości różnią się o tzw. półton – jak czarny i sąsiedni biały klawisz fortepianu. Zauważmy, że dolna krawędź fletni tworzy fragment krzywej wykładniczej, zgodnie z tym, że kolejna o wyższym tonie piszczałka musi być $\sqrt[12]{2}$ (czyli 1,0595) razy krótsza od poprzedniej.

Z kolei zestaw ośmiu rurek z rys. 6b też tworzy oktawę, ale składającą się tylko z dźwięków białych klawiszy fortepianu – jak w gamie do, re, mi, fa, sol, la, si, do.

Ale grać można nawet na rurach od odkurzacza, rys. 6c, albo na rurach z szarego PCV, których używają hydraulicy i elektrycy w instalacjach domowych. Na rurach gra się bądź przez zadęcie, bądź przez uderzenie dłonią w jeden koniec (powstaje „tępy” dźwięk, ale o dobrze określonej wysokości). Rozdając w klasie po kilka rurek o różnych długościach i odpowiednio dyrygując uderzeniami, można zrobić małą orkiestrę [1].

Widmo dźwięków wytwarzanych przez rury jest jednak dość skomplikowane. Instrumenty muzyczne to przyrządy akustyczne, konstruowane przez pokolenia mistrzów, tak aby wytwarzały dźwięki o ściśle określonej charakterystyce. Nasz flet nie jest doskonały, ale za to pozwala na wydobycie całego bogactwa dźwięków.

Flet pozornie prosty

Flet „pionowy”, taki jak nasz, nazywany jest fletem prostym (rys. 5), zaś taki z błyszczącego metalu, z ustnikiem z boku, który podczas

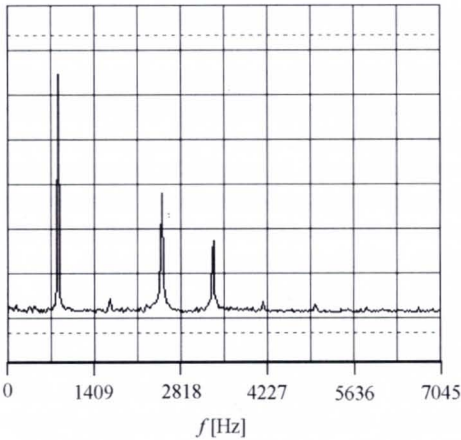
gry ustawiony jest poziomo – fletem poprzecznym. Wbrew pozorom, flet prosty wcale nie jest taki prosty.

Flety (trąbki, saksofony) są wyposażone w serię otworów (rejestrów), które pozwalają na skracanie słupa powietrza drgającego wewnątrz, a przez to na zmianę wysokości powstającego dźwięku. Aby uprościć zagadnienie, zakleiliśmy wszystkie rejestry w naszym flecie i przeprowadziliśmy doświadczenie w dwóch konfiguracjach – otwierając lub zamykając wylot rurki fletu.

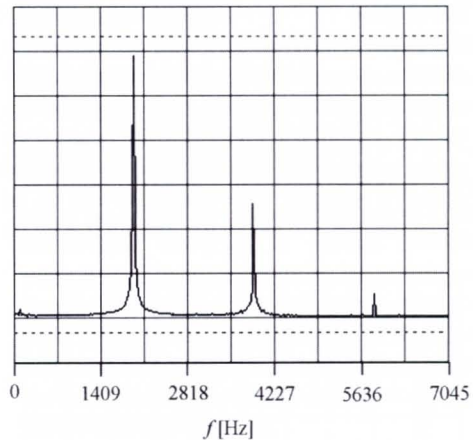
Teoretycznie, najniższa częstotliwość we flecie zamkniętym to „ćwiartka” fali stojącej, z węzłem na zatkanym wylocie fletu, zgodnie z rys. 4a. W suchym powietrzu prędkość dźwięku v_0 wynosi 343,4 m/s w temperaturze 20°C a 331,5 m/s w temperaturze 0°C. Przy długości fletu 29 cm częstotliwość podstawowa wynosiłaby $f_1 = 296$ Hz.

Wbrew przewidywaniom teorii, częstotliwości $f_1 = 296$ Hz w widmie fletu zamkniętego nie widać – najniższa częstotliwość, którą udało się nam uzyskać przy najłagodniejszym zadęciu, to częstotliwość 840 Hz (zob. rys. 7a). Jest ona nieco niższa niż trzykrotna wielokrotność (888 Hz) teoretycznej częstotliwości podstawowej f_1 . Najniższa częstotliwość obserwowana przy najłagodniejszym zadęciu odpowiada mieszczącemu się wewnątrz fletu trzech czwartych długości fali, jak na rysunku 4b.

Najniższa częstotliwość pojawiająca się przy średnim zadęciu to 1396 Hz; ma się ona do częstotliwości najniższej z rys. 7a (840 Hz) dokładnie jak 5 : 3, zgodnie z zależnościami z rys. 4b i 4c dla rury jednostronnie zamkniętej.



Rys. 7a. Widmo częstotliwości (transformata Fouriera) fletu–zabawki, przy najłabszym zadęciu – flet jednostronnie otwarty (czyli zamknięty na dolnym końcu). Najniższej teoretycznie możliwej częstotliwości $f_1 = 296$ Hz odpowiadającej fali stojącej o długości $4L$ (zob. rys. 4a) nie obserwuje się. Najniższa obserwowana częstotliwość, odpowiadająca fali stojącej z rys. 4b, to 840 Hz, nieco mniej niż $3f_1$. Wyższe składowe dźwięku są całkowitymi wielokrotnościami częstotliwości najniższej.

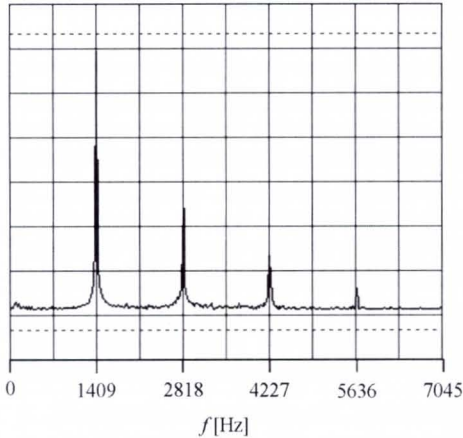


Rys. 7c. Widmo częstotliwości (transformata Fouriera) fletu–zabawki, zamkniętego na końcu, przy najsilniejszym zadęciu. Najniższa częstotliwość w widmie równa 1975 Hz ma się jak 7:5 w stosunku do najniższej częstotliwości z rys. 7b.

można uzyskać różne częstotliwości podstawowe, odpowiadające rysunkom 4b–4d. Ale oprócz częstotliwości podstawowej we wszystkich trzech widmach na rys. 7 występują również wyższe składowe.

Można by oczekiwać, że te wyższe częstotliwości tworzą z częstotliwością podstawową szereg 1 : 3 : 5 : 7, jak na rysunku 4a–4d. Ale nasze pomiary pokazują co innego. Okazuje się, że wyższe składowe są dokładnie kolejnymi całkowitymi wielokrotnościami obserwowanej częstotliwości podstawowej. I tak na rysunku 7b obserwujemy składowe o częstotliwości $2\times$, $3\times$, $4\times$ 1410 Hz, o stopniowo malejącym natężeniu; na rysunku 7c obserwujemy jedynie składowe $2\times$ i $3\times$ 1975 Hz, o szybko malejącym względnym natężeniu. Ale nie zawsze natężenia wyższych składowych zmieniają się w sposób regularny – na rysunku 7a druga wielokrotność częstotliwości podstawowej ma takie samo natężenie jak piąta i szósta.

Powstawanie wyższych harmonicznych przy silniejszym zadęciu jest związane z energią fali akustycznej – moc P fali akustycznej, przy ustalonej amplitudzie drgań, rośnie z kwadratem częstotliwości. Silniejsze zadęcie pozwala więc na wygenerowanie wyższych częstotliwości.



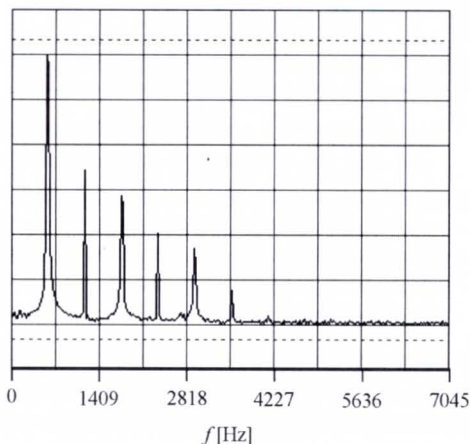
Rys. 7b. Silniejsze zadęcie wytwarza częstotliwość podstawową 1396 Hz równą $5/3$ częstotliwości z rys. 5a; nie jest to „harmonijna” oktawa jak dla fletu otwartego, zob. rys. 8a i 8b, ale seksta – odległość między do i la na skali muzycznej.

Najsilniejsze zadęcie, zob. rys. 7c, generuje częstotliwość najniższą 1975 Hz, tj. 7 : 5 w stosunku do częstotliwości najniższej z rys. 7b.

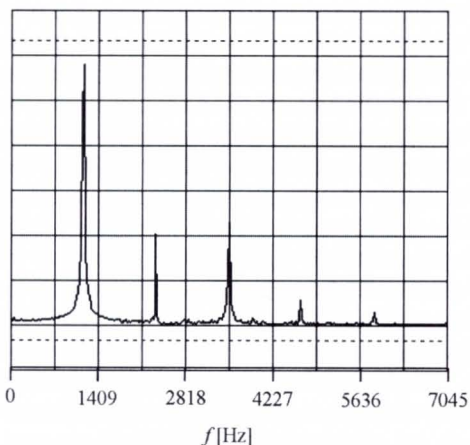
Reasumując, zmieniając jedynie siłę zadęcia, przy niezminionej długości fletu

Flet otwarty

We flecie otwartym, czyli tak, jak normalnie służy on do gry, strzałka fali powstaje zarówno przy ustniku jak i na wylocie (zob. rys. 8a–8c). Najniższa częstotliwość powstająca w tym przypadku to 587 Hz (należy dmuchać powoli i równo). Dla muzyków jest to re „dwukreślne” – na skali fortepianu trochę na



Rys. 8a. Widmo częstotliwości otwartego fletu–zabawki (transformata Fouriera w zakresie częstotliwości 0–7045 Hz), przy najsłabszym zadęciu. Wyższe składowe częstotliwości podstawowej są dokładnie całkowitymi wielokrotnościami częstotliwości podstawowej.

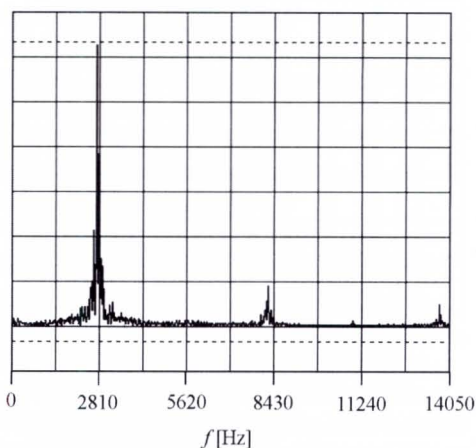


Rys. 8b. Silniejsze zadęcie we flecie otwartym wytwarza częstotliwość podstawową równą dokładnie podwójnej wartości częstotliwości podstawowej przy zadęciu słabym (rys. 8a), czyli dźwięk o oktawę wyższy.

prawo od środka klawiatury. Częstotliwość jest niższa niż obserwowana przez nas częstotliwość 840 Hz we flecie zamkniętym. Ale, podobnie jak poprzednio, nie jest to częstotliwość jedyna.

Okazuje się, że w widmie fletu otwartego jest aż siedem częstotliwości. Teoretyczna, najniższa możliwa częstotliwość dla fletu otwartego, odpowiadająca długości fali $\lambda = 2L$ z rys. 3a, przy $L = 29$ cm (od „gwizdka” do końca fletu) powinna wynosić $f_0 = v_0/2L = 592$ Hz (zakładając $v_0 = 343$ m/s). „Efektywna” długość fletu jest więc niewiele (1%) większa niż długość geometryczna. Wynika to z faktu, że zmiany ciśnienia powietrza związane z falą stojącą z rys. 3a zachodzą również nieco dalej, poza geometrycznym końcem rury. Zwracamy uwagę, że „efektywna” długość fletu zamkniętego jest aż o 6% większa od geometrycznej.

Inną ciekawą obserwacją z widm na rys. 8a–8c jest to, że mimo iż teoretycznie możliwe są wszystkie wyższe harmoniczne częstotliwości najniższej to te nieparzyste (np. trzecia



Rys. 8c. Widmo częstotliwości przy silnym zadęciu. Zwraca uwagę, że położenie pików częstotliwości nie jest tak dobrze określone jak na rys. 5a i 5b (flet „skrzeczy”) oraz, że znikają składowe parzyste najniższej częstotliwości, jak gdyby flet samoczynnie „zatkan” się na końcu. Pierwsza wyższa składowa nie jest dokładnie potrójną wielokrotnością częstotliwości najniższej – flet „falszuje” (trzeba to usłyszeć w wersji internetowej). Zwraca się uwagę na zmienioną skalę osi poziomej (0–14050 Hz) w stosunku do pozostałych widm.

na rys. 8b) mają względne natężenia wyższe niż harmoniczne parzyste. Dominacja składowych nieparzystych jest szczególnie dobrze widoczna przy najsilniejszym zadęciu, jak na rys. 8c. Zwracamy uwagę również, że „piki” częstotliwości składowych, szczególnie tych najniższych, są szersze niż to było w przypadku drgań kieliszka (rys. 1b).

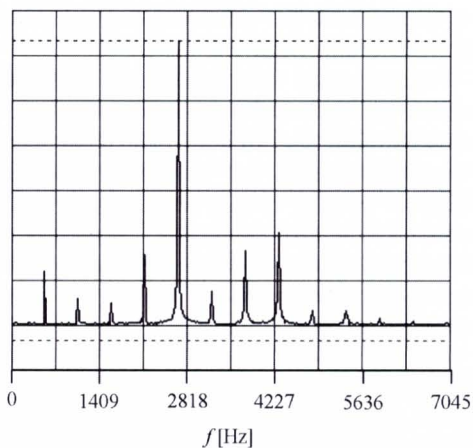
Najsilniejsze zadęcie pokazuje jeszcze inny efekt. Co prawda częstotliwość rośnie, podobnie jak dla fletu zamkniętego, ale długość drgającego słupa powietrza nie jest już tak dobrze określona i stała jak w pozostałych przypadkach. Generowana najniższa częstotliwość na rys. 8c (około 1400 Hz) nie jest już wielokrotnością całkowitą najniższej częstotliwości z rys. 8a, jak to było przy „średnim” zadęciu. Najniższa częstotliwość przy silnym zadęciu pokrywa się natomiast z częstotliwością podstawową fletu zamkniętego, jak na rys. 7c, jak gdyby flet się samoczynnie „zatkał”.

Ogólnie, w piszczałce jednostronnie zamkniętej, liczba składowych harmonicznych jest nieco mniejsza niż w piszczałce otwartej, ale wynika to z większej odległości między częstotliwościami składowymi (które, jak mówiliśmy wcześniej, są nieparzystymi wielokrotnościami częstotliwości najniższej). Z drugiej strony najwyższa obserwowana częstotliwość w obu przypadkach (fletu otwartego i zamkniętego) jest podobna i zależy od siły zadęcia, np. dla średniego zadęcia – 5600 Hz na rys. 7b (o wysokości 1/20 pikę podstawowego) i 5850 Hz na rys. 8b (ostatni, ledwie widoczny pik).

Reasumując: częstotliwość podstawowa w rurach akustycznych jest określona przez warunki brzegowe – we flecie zamkniętym na końcu (czyli rurze jednostronnie otwartej) na końcu powstaje węzeł fali, we flecie otwartym – strzałka. Poza tym, „wszystkie chwytły są dozwolone” – i dla fletu otwartego i dla zamkniętego obserwuje się wiele częstotliwości wyższych, które są całkowitymi wielokrotnościami częstotliwości podstawowej. Względne natężenia tych częstotliwości decydują o barwie dźwięku.

Stradivarius i spółka

W powietrzu prędkość rozchodzenia się dźwięku jest w przybliżeniu stała. W strunach prędkość ta zależy od naciągu T i gęstości liniowej ρ , zgodnie ze wzorem $v = \sqrt{T/\rho}$. Warunki brzegowe drgającej struny – z węzłami na końcach – są podobne jak dla rury obustronnie otwartej. W widmie powinny więc występować wszystkie harmoniczne, określone przez kolejne całkowite wielokrotności częstotliwości podstawowej. I rzeczywiście, w widmie na rys. 9 wszystkie kolejne harmoniczne są obecne, podobnie do widma fletu otwartego z rys. 8a.



Rys. 9. Widmo częstotliwości skrzypiec (transformata Fouriera w zakresie częstotliwości 0–7045 Hz).

Spójrzmy jednak dokładniej na dźwięk skrzypiec na rys. 9. Piękny dźwięk to całe bogactwo częstotliwości, w którym np. piąta wielokrotność częstotliwości podstawowej ma większe natężenie niż częstotliwość podstawowa (jest to dźwięk o dwie oktawy i tercję wyższy od tonu podstawowego). Paradoksalnie, to obecność wyższych częstotliwości czyni dźwięk skrzypiec „miłym” dla ucha, a ich brak dla szklanki – „piszczącym”.

Oczywiście, obecność tych wyższych harmonicznych i ich dość niezwykłe, w porównaniu z fletem natężenia, to efekt specjalnej konstrukcji skrzypiec, a w szczególności dziwnej z pozoru skrzynki rezonansowej. To ona wzmacnia selektywnie niektóre harmoniczne

i decyduje o jakości skrzypiec [2]. Skrzypce z rys. 9 były „strojone” przez lutnika z Weronny; tradycyjnie najlepsi, jak Stradivari, byli z Cremony. Ich umiejętności – dobór i sezonowanie drewna, skład lakieru, położenie „duszy”, czyli kołka łączącego górną i dolną pokrywkę pudelka rezonansowego – pozostają sekretem do dziś.

Wszystko gra

Eksperymenty z akustyką są niezwykle pocuzające. Liczby niewymierne zostały odkryte przez Pitagorasa, kiedy szukał harmonii między dźwiękami. Galileusz, syn lutnika, zaczął poszukiwać prostych prawidłowości w spadku ciał [3], zafascynowany prostotą zależności akustycznych.

Umiejętność rozpoznawania ludzkim uchem pojedynczych instrumentów w orkiestrze symfonicznej świadczy, jak skomplikowanym procesem jest percepcja dźwięku. Ludzkie ucho (i mózg), analizując dźwięk, dokonuje niejako „po drodze” transformaty Fouriera i bada stosunki między częstotliwościami składowymi. Ucho ludzkie jest więc swoistym oscyloskopem. □

LITERATURA

- [1] E. Rajch, G. Karwasz, *Szampańska muzyka*, „Foton” 85, Lato 2004, str. 40–45.
- [2] C.M. Hutchins, *The Acustics of violin plates*, „Scientific American”, vol. 245 (1981) str. 129.
- [3] Galileo Galilei, *Dialogo dei Due Massimi Sistemi*, Oscar Mondadori, 1996, str. 231–232. (tłumaczenie fragmentu dołączone jest do wersji internetowej niniejszego artykułu).

O AUTORACH

Prof. dr hab. inż. Grzegorz Karwasz
 Profesor fizyki w Pomorskiej Akademii Pedagogicznej w Słupsku, gdzie kieruje Zakładem Spektroskopii. Wykłada na Uniwersytecie w Trydencie we Włoszech. Jego dziedzina naukowa to rozpraszanie elektronów i pozytonów w gazach i defektoskopia ciała stałego metodą anihilacji pozytonów. Z pasją organizuje wystawy Fizyki Zabawek.



mgr Eryk Rajch
 asystent w Zakładzie Spektroskopii Instytutu Fizyki Pomorskiej Akademii Pedagogicznej w Słupsku. W pracy naukowej zajmuje się fizyką doświadczalną w zakresie spektroskopii optycznej wyładowań elektrycznych w gazach.



Fizyka w Szkole
 Nr 1 STYCZEŃ/LUTY 2006 282 (LII) Indeks 35810X CENA 8,00 ZŁ (wvt 0%)
 CZASOPISMO DLA NAUCZYCIELI

Czarodziejski flet

- Cząstki z kosmosu
- Skala wielkości
- Wyznaczanie odległości i rozmiarów Księżyca

PROSTE a cieszę