

Mieczysław
DROBNER

Instrumentoznawstwo i akustyka

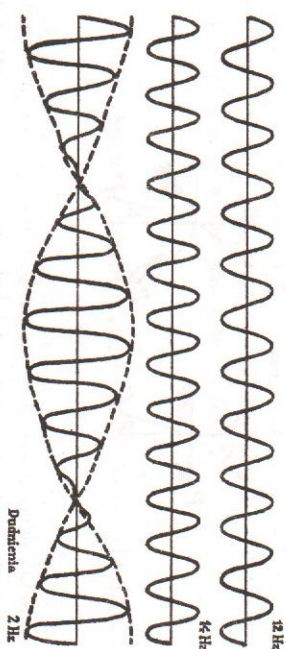


Polskie
Wydawnictwo
Muzyczne
1997



Biblioteka IMuz UW

1074003709



10. Dudnienie

3. Przy nakładaniu się dwu fal o różnych częstościach i amplitudach, lecz przesuwających się w przeciwnych kierunkach, powstaje tzw. fala stojąca. Fala taka nie przesuwa się; w określonych miejscach powstają stałe nieruchome węzły, podczas gdy w innych miejscach cząstki wychylają się na przemian w kierunku grzbietu i w kierunku doliny fali (są to tzw. strzałki fali stojącej). Opisane zjawisko powstaje najczęściej tam, gdzie jakaś fala spotyka się z własnym odbiciem od prostopadłej płaszczyzny.

1.1. Rezonans

Jeśli w polu działania fali dźwiękowej znajdzie się ciało sprężyste zdolne do wykonywania drgań o tej samej częstości co częstość fali, wówczas ciało to pod wpływem impulsów fali rozpocznie ruch drgający o tej własnej częstości. Zjawisko powstawania ruchu drgającego ciał sprężystych pod wpływem fali dźwiękowej nazywamy rezonansem (łac. *resonare* — odbrzmiwać) lub współdrganiem.

Istnieją dwa rodzaje rezonansu z punktu widzenia właściwości ciał rezonujących. W jednym wypadku ciało nie posiada określonej częstości swych drgań i drgać może z różnymi częstościami. Fala dźwiękowa narzuci mu wobec tego swoją częstość; niemniej jednak to samo ciało sprężyste może rezonować na wiele różnych fal dźwiękowych. Tego rodzaju rezonans nosi nazwę rezonansu wymuszonego. W drugim przypadku ciało rezonujące posiada z natury swej określoną częstość drgań i tylko fala dźwiękowa o tej właśnie częstości jest w stanie wywołać jego drgania. Jest to rezonans swobodny.

Przykładem rezonansu wymuszonego może być drganie pudła rezonansowego skrzypiec: pudło to drgać będzie bowiem zawsze z częstością narzuconą przez struny. Przykładem rezonansu swobodnego może być natomiast często spotykane drganie szyby okiennej pod wpływem dźwięku o określonej wysokości, granego na fortepianie lub innym instrumencie muzycznym.

Niektóre ciała rezonujące mogą ze względu na swe właściwości rezonować w sposób wymuszony (i wzmacniać w ten sposób drgania źródła), lecz tylko w pewnym nie ulegającym zmianie rejonie częstości.

W takim wypadku wzmocnieniu rezonansowemu podlegają nie tylko dźwięki tego rejonu, ale i tony składowe niższych dźwięków przypadające w tym rejonie (patrz rozdz. III, 15). Zjawisko wzmocnienia dźwięków i tonów składowych w określonym rejonie częstości przez rezonans wymuszony nazywamy formantem.

Przykładu formantu dostarcza brzmienie oboju, który wzmacnia w rejonie 1200–1500 Hz nie tylko przypadające w tym rejonie dźwięki $dis^3 - f^{is^3}$, ale i tony składowe (np. dla dźwięku $e^1 = 256$ Hz piąty ton składowy $e^3 = 1280$ Hz).

3

Dźwięki

1.2. Wysokość dźwięku

Dźwięki rozprzestrzeniające się za pośrednictwem fal dźwiękowych wykazują cztery cechy wynikające z cech fizycznych fal dźwiękowych. Pierwsza cecha dźwięku wynika z faktu, że każda fala dźwiękowa posiada określoną częstość; cecha ta nazywa się wysokością dźwięku. Wysokość określamy nazwami dźwięków i zapisujemy ją na pięciolinii. Określenia wysokości są jednak względne, to znaczy że określają one nie bezwzględną częstość, lecz stosunek częstości do częstości tonu wzorcowego, zwanego kamertonem. Od roku 1939 obowiązuje w całym świecie na mocy konwencji zawartej w tymże roku w Londynie kamerton 440 Hz dla tonu a^1 .

Dźwięk posiada w zasadzie częstość tę samą co źródło fali dźwiękowej. Wyjątek stanowi wypadek, gdy źródło dźwięku i obserwator poruszają się względem siebie. Jeśli źródło przybliża się do obserwatora (lub obserwator do źródła) — wówczas pozorna wysokość dźwięku będzie nieco wyższa od wysokości pierwotnej, wynikającej z częstości drgań źródła; jeśli natomiast odległość między obserwatorem a źródłem wzrasta — wysokość ta będzie nieco niższa od pierwotnej. Jest to tzw. zjawisko Dopplera.

Częstość dźwięku f określa wzór:

$$f = f_0 \cdot \left(1 \pm \frac{p}{v}\right)$$

gdzie f_0 oznacza częstość źródła dźwięku, p — prędkość wzajemną źródła i obserwatora, a v — prędkość fali dźwiękowej. Obie prędkości (p i v) winny być wyrażone w tych samych jednostkach, np. m/s. Znak „+” stosuje się przy zmniejszaniu, a znak „—” przy zwiększaniu się odległości.

Przyjmijmy dla przykładu, że obserwatora stojącego na szosie wymiata z prędkością 72 km/h (tj. 20 m/s) samochód, nadający syreną stały ton *des*¹ (częstość 272 Hz). Częstość pozorną w pierwszej fazie, tzn. gdy samochód zbliża się do obserwatora, wyniesie

$$f = 272 \cdot \left(1 + \frac{20}{340}\right) = 288 \text{ Hz } (= d^1)$$

w drugiej zaś fazie, tzn. gdy samochód minie obserwatora i będzie się od niego oddalał, wyniesie

$$f' = 272 \cdot \left(1 - \frac{20}{340}\right) = 256 \text{ Hz } (= c^1)$$

Między oboma usłyszczanymi dźwiękami zaistnieje zatem interwał o stosunku częstości $\frac{288}{256} = 9:8$, czyli cały ton (patrz rozdz. XVI, 71).

13. Poziom natężenia dźwięku

Druga cecha dźwięku wiąże się z amplitudą fali dźwiękowej; cecha ta nazywa się poziomem natężenia dźwięku. Jednostka poziomu natężenia nazwana została bel (od nazwiska wynalazcy telefonu, Bella), a w powszechnym użyciu znajduje się mniejsza jednostka, stanowiąca $\frac{1}{10}$ bel, czyli decybel (skrót: dB). Skala decybeli dostosowana jest do działania ucha ludzkiego w ten sposób, że dla dźwięków ledwie słyszalnych poziom natężenia zbliża się do 0 dB, podczas gdy dla najgłośniejszych efektów dźwiękowych osiąga on około 120 dB.

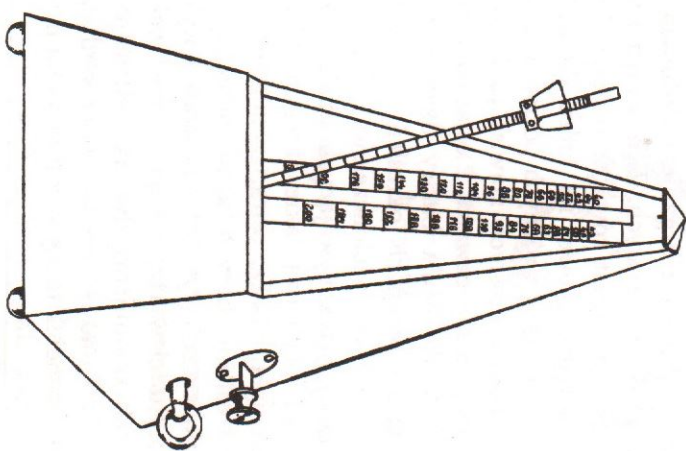
Poziom natężenia jest cechą dźwięków wymierzalną jedynie przy użyciu specjalnych aparatów pomiarowych. W praktyce muzycznej skalę decybeli zastępujemy mało precyzyjną skalą ośmiu oznaczeń dynamicznych od *ppp* do *fff*, pozwalającą jedynie w bardzo ogólny sposób określić intensywność zjawiska. Możemy ustalić w przybliżeniu powiązanie oznaczeń dynamicznych z pewnymi zakresami poziomu natężenia:

Oznaczenie dynamiczne	<i>ppp</i>	<i>pp</i>	<i>p</i>	<i>mp</i>	<i>mf</i>	<i>f</i>	<i>ff</i>	<i>fff</i>
Poziom natężenia (w dB)	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100

Należy zwrócić uwagę, że skala decybeli nie dopuszcza do arytmetycznego sumowania poziomów natężenia. Jeżeli np. grają razem dwa instrumenty, każdy o poziomie 40 dB, to łączny poziom natężenia obu wyniesie załadowie 43 dB. Zdwojenie instrumentu powoduje bowiem zawsze wzrost poziomu natężenia o 3 dB, potrójnie o 5 dB itd., przy dziesięciokrotnej obsadzie wzrost wyniesie 10 dB. Przy źródłach o różnym poziomie natężenia łączny poziom będzie natomiast tylko nieznacznie wyższy od poziomu źródła głośniejszego.

14. Wartość metronomiczna dźwięku

Trzecia z kolei cecha zjawiska dźwięku wynika z tego, że fala dźwiękowa zaczyna docierać do odbiorcy w określonym momencie, jak też w określonym momencie docierać do niego przestaje. Możemy zatem określić w jednostkach czasu (sekundach) czas trwania dźwięku. W praktyce muzycznej stosujemy nie bezwzględne, ale względne określenie czasu trwania dźwięków, dokonując tego przez użycie wartości muzycznych (o, j, j, j, itp.) w połączeniu z określeniem tempa utworu muzycznego; tempo określa się zaś oznaczeniami metronomicznymi według metronomu Mälzla (rys. 11), np. M. M. j = 60. Wartość muzyczna wraz z oznaczeniem metronomicznym tworzy wartość metronomiczną dźwięku.



11. Metronom Mälzla

W nowszych wydawnictwach nutowych opuszcza się zwykle litery M. M., np. j = 60. Oznaczenie metronomiczne podaje wzorcową wartość muzyczną i ilość takich wartości mieszczącą się w jednej minucie. Przybliżony czas trwania każdej nuty (w sekundach) można zatem obliczyć przy pomocy wzoru:

$$s = \frac{60}{m} \cdot p$$

w którym *s* oznacza czas trwania, *m* — liczbę zawartą w oznaczeniu metronomicznym, zaś *p* stosunek wartości nuty mierzonej do wartości nuty wzorcowej, wynikający z powszechnie stosowanych zasad podziału wartości nut.

Przykłady: czas trwania ósemki w tempie M. M. j = 72 wynosi

$$s = \frac{60}{72} \cdot \frac{1}{3} = 0,28 \text{ s,}$$

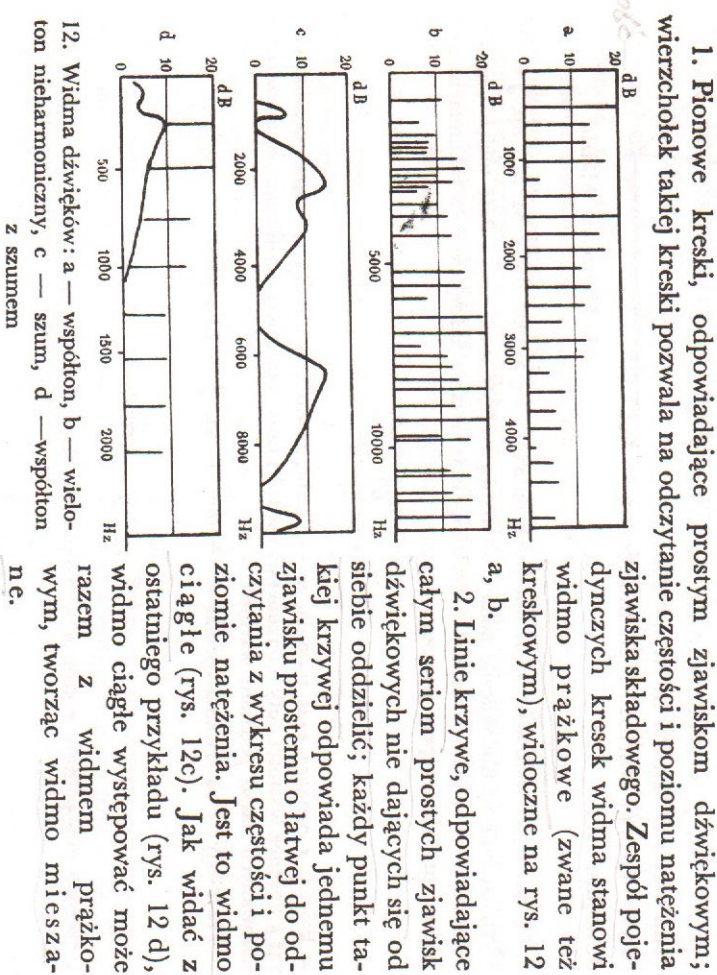
a czas trwania półnuty z kropką w tempie M. M. j = 60 wynosi

$$s = \frac{60}{60} \cdot \frac{3}{2} = 1,5 \text{ s.}$$

15. Barwa dźwięku

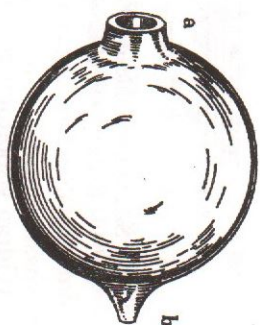
Ciała sprężyste bardzo rzadko wykonują drgania proste; zwykle mamy do czynienia z drganiem złożonym, będącym wynikiem nakładania się szeregu dźwięków prostych. Tym samym i fala dźwiękowa wysyłana przez tak drgające źródło jest również złożona. Do słuchacza dociera zatem złożone zjawisko dźwiękowe, na które składa się szereg zjawisk prostych o różnych wysokościach i różnych poziomach natężenia. Od ilości, wysokości i poziomu natężenia prostych zjawisk dźwiękowych, składających się na zjawisko złożone, zależy czwarta i ostatnia cecha dźwięku — jego barwa.

Do określenia barwy dźwięków terminologia muzyczna używa jedynie bardzo ogólnych określeń: są to bądź nazwy instrumentów (np. barwa klarinetowa, wiolonczelowa), bądź określenia zaczerpnięte z bardziej lub mniej przekonywających analogii z kolorami, temperaturą, kształtem itp. Stąd pochodzą takie określenia barwy, jak: jasna, ciemna, ciepła, zimna, okrągła, płaska, ostra, metaliczna, nosowa itp. Fizyka zna jednak ściślejsze określenie barwy, a to przez rysunek widma akustycznego. Widmo akustyczne (rys. 12) przedstawia wykres, na którego osi odciętych znajdujemy częstości w Hz, zaś na osi rzędnych poziomy natężenia w dB. W widmach tych znajdujemy dwójakie elementy:



12. Widma dźwięków: a — współton, b — wieloton nieharmoniczny, c — szum, d — współton z szumem

Do stwierdzenia w zjawisku złożonym zjawiska prostego o określonej wysokości wystarczą kuliaste rezonatory Helmholtza (rys. 13), przyłączone do ucha. Natomiast do analizy ilościowej konieczne jest użycie bardziej skomplikowanych sposobów. Za pośrednictwem mikrofonu dźwięki zaniżają się na ekranie oscyloskopu na krzywą, będącą obrazem graficznym fali dźwiękowej. Krzywą tę analizuje się następnie różnymi metodami: metodą matematyczną (tzw. szeregi Fouriera), metodą mechanicznych analizatorów (Henrici, Mader), metodą graficzno-rachunkową lub przy użyciu specjalnej elektroakustycznej aparatury. Na podobnych podstawach prowadzi się próby syntezy (sztucznego wytwarzania) złożonych zjawisk dźwiękowych.



13. Rezonator Helmholtza:

a — otwór wlotowy,
b — rurka słuchowa

16. Cztery rodzaje dźwięków

W praktyce muzycznej spotykamy się z czterema rodzajami dźwięków. Są nimi: ton, współton, wieloton nieharmoniczny i szum.

1. Ton jest dźwiękiem prostym, jego wykresem jest sinusoida (rys. 2), a widmo składa się z jednej pionowej kreski. Ton posiada jedną ściśle wymierzalną częstość i określony poziom natężenia.

Uzyskanie oddzielnego tonu jest praktycznie niemal niemożliwe; do barwy tonu, będącej czymś w rodzaju elementarnej barwy muzycznej, zbliża się natomiast brzmienie czelesty (rozdz. XXXV, 156) — ale dopiero po zniknięciu innych tonów, pojawiających się w momencie uderzenia płytki.

2. Współton, czyli wieloton harmoniczny, jest dźwiękiem złożonym z ograniczonego szeregu tonów zwanych w tym wypadku tonami składowymi, tonami harmonicznymi lub alikwotami. Tony składowe współtonu zestawione są w ten sposób, że częstości ich niezależnie od siły brzmienia stanowią wielokrotność częstości pierwszego (najniższego) tonu składowego; częstości te tworzą zatem szereg o stosunku liczbowym 1:2:3:4:5:6 itd. W szeregu takim, zwanym harmonicznym, każdy ton składowy numerowany jest kolejno według jego miejsca w szeregu. Numeracja ta jest stała bez względu na to, czy dany ton składowy pojawia się, czy też nie.

Przykład pełnego szeregu harmonicznego: Przykład niepełnego szeregu harmonicznego:

- | | |
|--|---|
| 1. ton składowy: 100 Hz | 1. ton składowy: 440 Hz |
| 2. ton składowy: $2 \times 100 = 200$ Hz | 3. ton składowy: $3 \times 440 = 1320$ Hz |
| 3. ton składowy: $3 \times 100 = 300$ Hz | 5. ton składowy: $5 \times 440 = 2200$ Hz |
| 4. ton składowy: $4 \times 100 = 400$ Hz | id. |
| id. | |

W zapisie nutowym harmoniczny szereg tonów składowych o liczbach porządkowych od 1 do 16 przedstawia się dla dźwięku C następująco (przykład 14):



14. Szereg harmoniczny. Znaki > nad tonami składowymi 7, 11, 13 i 14 oznaczają, że dany ton składowy jest nieco niższy od tonu określonego nutą

Widmo współtonu zobrazowane jest szeregiem pionowych kresk o różnych wysokościach, ale znajdujących się od siebie w równych odstępach (rys. 12 a — widmo dźwięku skrzypiec).

Ucho ludzkie ma zdolność przyjmowania współtonu jako jednego zjawiska, którego ogólną częstość określa pierwszy ton składowy (nawet jeśli wykazuje on stosunkowo mały poziom natężenia w porównaniu z innymi tonami składowymi). Stąd też nazwa i zapis nutowy współtonu pokrywają się z nazwą i zapisem pierwszego tonu składowego.

3. Wieloton nieharmoniczny jest również dźwiękiem złożonym, pokrewnym współtonowi, a więc składającym się z ograniczonego szeregu tonów składowych. W wielotonie nieharmonicznym szereg ten nie jest jednak harmoniczny, tzn. że częstości poszczególnych tonów składowych nie pozostają z sobą w żadnym określonym stosunku liczbowym.

Przykładu wielotonu nieharmonicznego dostarczają widełki strojowe, które w pierwszej fazie brzmienia dają dwa następujące tony składowe:

I ton składowy: 440 Hz

II ton składowy: 2758 Hz

Przez użycie rzymskiej numeracji podkreślamy w takim wypadku, że nie są to tony składowe szeregu harmonicznego.

Widmo wielotonu nieharmonicznego zobrazowane jest szeregiem pionowych kresk o różnej wysokości, nie wykazujących żadnej regularności we wzajemnych odstępach (rys. 12 b — widmo dźwięku trójkąta).

Ucho ludzkie przyjmuje wieloton nieharmoniczny także jako jedno, łączne zjawisko; ucho nie wyróżnia jednak żadnej częstości jako głównej i brzmienie z punktu widzenia wysokości może być określone jedynie w przybliżeniu (brzmienie wysokie, bardzo niskie, średnie itp.). Instrumenty tego rodzaju notowane są w zasadzie na jednej linii, przez co wskazówki nutowe ograniczają się do rytmiki i dynamiki.

4. Szum należy do dźwięków złożonych z nieskończonej ilości tonów składowych zbliżonych do siebie częstością. Za pomocą odpowiedniej aparatury można ustalić poziom natężenia szumu w określonej częstości, natomiast ilość tonów składowych jest nie do ustalenia. Widmo szumu jest ciągłe, niekiedy w postaci jednej krzywej, niekiedy kilku krzywych w różnych rejonach częstości (rys. 12 c — widmo dźwięku kastanietów).

Ucho ludzkie przyjmuje szum jako jedno, łączne zjawisko o przybliżonej wysokości (mówimy o szumach wysokich, niskich itp.), i tak jak w przypadku wielotonu nieharmonicznego, instrumenty tego rodzaju notujemy w zasadzie na jednej linii z uwzględnieniem jedynie rytmu i dynamiki.

Wielotony i szumy mogą występować równocześnie, tworząc jeden łączny dźwięk. Na przykład przy grze na wielu instrumentach strunowych do współtonu pochodzącego od strun dołącza się szum smyczka, mechanizmu młoteczkowego lub innych ubocznych czynników (rys. 12 d — widmo dźwięku fortepianu).

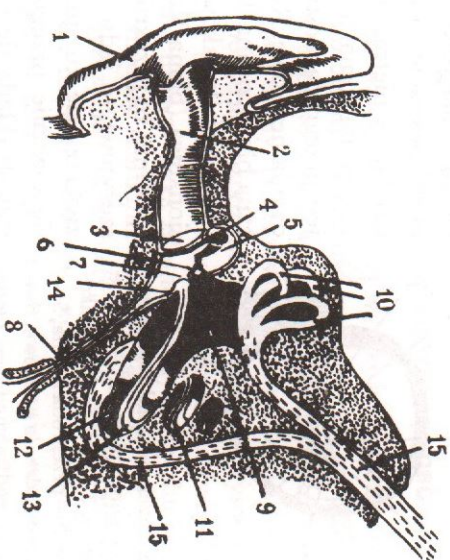
4

Ucho i słuch

17. Budowa i działanie ucha

Ucho ludzkie, jego budowa i działanie ma podstawowe znaczenie w zagadnieniach muzycznych, za jego bowiem pośrednictwem docierają do świadomości człowieka wszelkie zjawiska dźwiękowe. Ucho, którego przekrój w pomniejszeniu przedstawia rysunek 15, składa się z trzech zasadniczych części: ucha zewnętrznego, środkowego i wewnętrznego.

Ucho zewnętrzne tworzą: małżowina uszna i zewnętrzny przewód słuchowy. Małżowina uszna nie spełnia w istocie jakiegoś zasadniczego zadania; natomiast zewnętrzny przewód słuchowy, wąski i długi kanał wypełniony powietrzem, doprowadza fale dźwiękowe do błony bębenkowej, zamkniętej od strony ucha środkowego. Do błony tej, mającej około $\frac{1}{10}$ mm grubości i eliptyczny kształt, przyniesiony jest od wewnętrznej strony młoteczek (jedna z kośćki ucha środkowego), przez co tłumione są wszelkie drgania swobodne membrany.



15. Przekrój ucha: 1 — małżowina uszna, 2 — zewnętrzny kanał słuchowy, 3 — błona bębenkowa, 4 — młoteczek, 5 — kowadełko, 6 — strzemiączko, 7 — okienko owalne, 8 — trąbka Eustachiusza, 9 — przedsionek, 10 — kanały półkolistne, 11 — ślimak, 12 — dolne piętro ślimaka, 13 — górne piętro ślimaka, 14 — otokienko okrągłe, 15 — odprowadzenia nerwowe