

Rozdział 1

CZY DŹWIĘKI  
PROWADZĄCE  
NIE POWINNY  
PROWADZIĆ?

*Można by spodziewać się, że skala muzyczna  
powstała w oparciu o takie proste fakty;  
jednak gdy zaczniemy stroić fortepian i zaczniemy  
od strojenia kwint, stwierdzimy ze zdziwieniem,  
że ostatni dźwięk c będzie zbyt wysoki  
względem dźwięku c, od którego zaczęliśmy.  
Tej niewytłumaczalnej trudności nikt nie zdołał  
przewyciężyć; zdaje się, że Bóstwo zostawiło muzykę  
w formie niedokończonych,  
aby zademonstrować swą nieprzeniknioną moc.*

William Gardiner,  
*The Music of Nature* (1832)<sup>1</sup>

Jeśli we współczesnej edukacji muzyków grających na instrumentach smyczkowych istnieje cokolwiek, co choćby trochę odbiega od stroju równomiernie temperowanego, jest to zasa-

da, że „dźwięki prowadzące powinny prowadzić”. To podejście przypisuje się zazwyczaj wybitnemu wiolonczeliście Pablowi Casalsowi (1876–1973), orędownikowi – jak sam ją nazywał – „intonacji ekspresyjnej”. W praktyce wymaga ona, by w zwykłej progresji wznoszącej z obecnością dźwięku prowadzącego, na przykład od *gis* do *a*, dźwięk *gis* był nieco wyższy niż w systemie równomiernie temperowanym, by dobitniej prowadzić do rozwiązania na *a*. Natomiast w przypadku, gdy *b* prowadzi w dół do *a*, dźwięk *b* powinien być niższy w celu wzmocnienia tej liniowej progresji oraz efektu nieuniknionego ciężenia w kierunku rozwiązania. Brzmi to logicznie i ma sens w kontekście pojedynczej linii melodycznej. Jednak zazwyczaj muzyka zawiera w sobie także element harmonii – dźwięki melodii stanowią część progresji akordów – i temu elementowi powyższe podejście nie służy. W rzeczywistości podejście harmoniczne sugeruje, że wznoszący dźwięk prowadzący nie powinien być podwyższony, ale wręcz obniżony względem swej pozycji w stroju równomiernie temperowanym. Analogicznie, dźwięk opadający – *b* prowadzący do *a* – będzie brzmiał lepiej w harmonii, gdy zostanie zagrany nieco wyżej. Jak to możliwe? I dlaczego wierzyć mnie – badaczowi muzyki, będącym nikim w świecie wykonawców – a nie legendarnemu wirtuozowi, jakim był Pablo Casals?

Odpowiedzi dostarcza akustyka, czyli gałąź fizyki zajmująca się dźwiękami muzycznymi i ich wzajemną relacją. Opisuje fakty, których nie da się zafałszować ani zmienić.

Dźwięk wywołują drgania. Wysokość dźwięku muzycznego zależy od częstotliwości tych drgań (liczba cykli na sekundę). Na przykład, dźwięk  $A=440$ , aktualnie stosowany wzorzec strojenia, wibruje 440 razy na sekundę (liczba cykli na sekundę określa się w hercach – Hz). Jak wiemy, najprostsze interwały mają stosunki częstotliwości wyrażone prostymi liczbami. Najmniej złożonym jest pryma: stosunek częstotliwości dwóch dźwięków o identycznej wysokości wynosi 1:1. Oznacza to, że interwał ten składa się z dwóch dźwięków wi-

brujących z taką samą częstotliwością. Następną pod względem prostoty jest oktawa: częstotliwość dźwięku podstawowe- go ma stosunek 2:1 do dźwięku o oktawę wyższego. Istotnie, gdy jedna struna będzie miała dwukrotnie większą długość (przy takim samym napięciu i masie), wibrować będzie z czę- stotliwością o połowę mniejszą i da dźwięk o oktawę niższy od drugiej struny. Ta sama zasada dotyczy także instrumentów dętych. Rura o połowę krótsza od drugiej zagra oktawę wyżej.

Między tymi prostymi interwałami zachodzą tak proste stosunki częstotliwości dlatego, że są one częścią zjawiska aku- stycznego, które nazywamy szeregiem harmonicznym lub szere- giem alikwotów. Każdy dźwięk pochodzący z naturalnego źródła (w przeciwieństwie na przykład do dźwięków wydobywanych za pomocą instrumentów elektronicznych) składa się z alikwotów – częstotliwości stojących w określonym stosunku akustycznym do zagranego dźwięku, który nazywamy tonem podstawowym. Stanowią one nieodłączną i ważną część muzyki, bowiem barwa dźwięku, czyli to, co pozwala słuchaczowi odróżnić brzmienie – dajmy na to – oboju od skrzypiec, zależna jest właśnie od na- tężenia poszczególnych tonów składowych. Szereg harmoniczny ciągnie się w nieskończoność, wybiegając daleko poza granice słyszalności ludzkiego ucha. Rycina 1 przedstawia pierwsze cztery oktawy szeregu dla dźwięku *c*. Należy zauważyć, że ali- kwoty oznaczone strzałką odpowiadają w przybliżeniu skali rów- nomiernie temperowanej, lecz są pochylone w kierunku, który wskazuje strzałka. W konsekwencji, co potwierdziłby każdy barokowy trębacz zdany na łaskę szeregu harmonicznego, oba dźwięki *b* oraz dźwięk *a* są niskie, podczas gdy *f* jest wysokie.

### Co to jest szereg harmoniczny?

Szereg harmoniczny jest zjawiskiem akustycznym, złożonym z sekwencji dźwięków o wysokościach pozostających w okre- ślonym stosunku do dźwięku podstawowego. Dźwięk o czę-

stotliwości 100 cykli na sekundę (Hz) pobudzi do drgania także dźwięki pozostające z nim w prostych stosunkach częstotliwości, mianowicie 200 Hz, 300 Hz, 400 Hz itd. Te stosunki częstotliwości – 2:1, 3:1, 4:1 – pozostają w nieziennej relacji do pierwszego dźwięku, zwanego tonem podstawowym (zob. ryc. 1). Sekwencja następujących po sobie interwałów składa się zawsze z oktawy (2:1), kwinty czystej (3:2), kwarty czystej (4:3), tercji wielkiej (5:4), tercji małej (6:5), dwóch interwałów pomiędzy tercją małą i całym tonem (7:6 i 8:7), większego całego tonu (9:8), mniejszego całego tonu (10:9) i coraz mniejszych interwałów *ad infinitum*. Półton pojawia się po czterech oktawach od tonu podstawowego, przy stosunku częstotliwości 16:15, ale interwał ten można wyliczyć wcześniej z różnicy pomiędzy akustycznie czystą tercją wielką 5:4 a – również czystą akustycznie – kwartą czystą 4:3 (w tym celu należy podzielić wielkość odpowiadającą kwarcie przez tę odpowiadającą tercji:  $\frac{4}{3} : \frac{5}{4} = \frac{16}{15}$ ).

Każdy dźwięk szeregu harmonicznego ma częstotliwość odpowiadającą wielokrotności częstotliwości tonu podstawowego. Każdy dźwięk zawiera w różnym stopniu wszystkie dźwięki swego szeregu harmonicznego i to właśnie liczba poszczególnych tonów składowych odpowiada za różnice w barwie instrumentów przy jednakowej wysokości granego dźwięku: różnią się natężeniem poszczególnych składowych harmonicznym. Uważa się także, że przewaga interwałów oktawy, kwinty i kwarty czystej oraz wielkiej i małej tercji w początkowej części szeregu harmonicznego przyczyniła się do rozwoju naszego poczucia harmonii, w której interwały te stanowią najbardziej podstawowe składniki akordów. Akordy w zachodniej (tj. europejskiej) tradycji muzycznej nie są więc arbitralnym wytworem kultury ani stworzonego przez nią systemu, lecz raczej zjawiskiem naturalnym, opisanym przez gąłą fizyki zwaną akustyką.

The image displays a musical score for a harmonic series on a grand staff. The treble clef staff contains notes from G4 to G5. Notes G4, A4, B4, and C5 have arrows above them pointing down, while D5, E5, F5, and G5 have arrows pointing up. The bass clef staff contains notes from G2 to G3. A scale number 1-16 is written below the bass staff.

| Scale Degree | Treble Clef Note | Bass Clef Note |
|--------------|------------------|----------------|
| 1            | G4               | G2             |
| 2            | A4               | A2             |
| 3            | B4               | B2             |
| 4            | C5               | C3             |
| 5            | D5               | D3             |
| 6            | E5               | E3             |
| 7            | F5               | F3             |
| 8            | G5               | G3             |
| 9            | A5               | A3             |
| 10           | B5               | B3             |
| 11           | C6               | C4             |
| 12           | D6               | D4             |
| 13           | E6               | E4             |
| 14           | F6               | F4             |
| 15           | G6               | G4             |
| 16           | A6               | A4             |

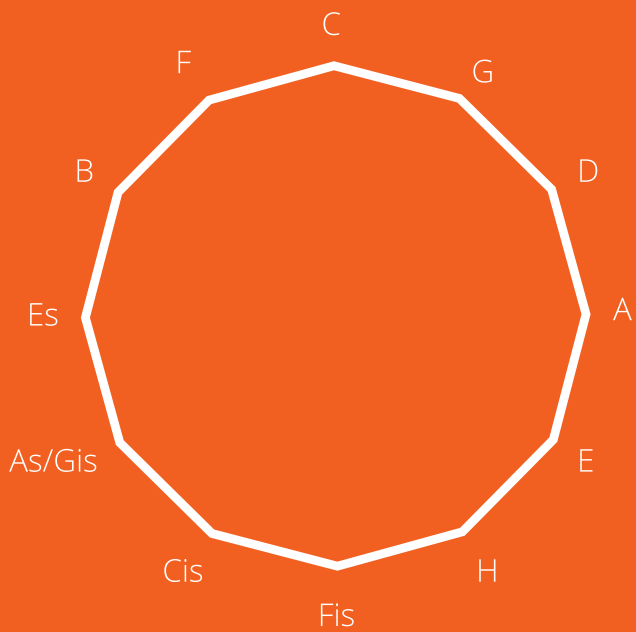
Ryc. 1. Szereg harmoniczny



Wszystkie te tony składowe (oraz kolejne, z dalszej części szeregu harmonicznego) obecne są, w większym lub mniejszym stopniu, przy każdym wydobyciu dźwięku. Gra w zespole wymaga, by dźwięki grane w tym samym czasie współdziałały te podstawowe zależności akustyczne, zwłaszcza u dołu szeregu harmonicznego: gdy pryma nie odpowiada dokładnie stosunkowi 1:1, a oktawa 2:1, wówczas interwały te odbieramy jako rozstrojone i niezgodne. Nie sposób kłócić się o to, jak dokładnie powinny wyglądać stosunki częstotliwości odpowiadające oktawie i prymie: mogą „stroić” tylko wtedy, gdy ich stosunki częstotliwości wynoszą dokładnie odpowiednio 2:1 oraz 1:1. Ta kategoryczność znika jednak już z następnym pod względem prostoty stosunkiem częstotliwości.

Kwintcie czystej odpowiada stosunek 3:2. Oznacza to, że struna (lub rura) o  $\frac{2}{3}$  długości innej struny zagra od niej wyżej o kwintę. Można spodziewać się, że – jako że jest kolejnym pod względem prostoty interwałem po prymie 1:1 i oktawie 2:1 – brzmienie tej akustycznie czystej kwinty jest pożądane; w muzyce średniowiecznej, w której była dominującym interwałem, bez wątplenia miała postać 3:2. System strojenia, w którym występuje, nazywamy strojem pitagorejskim przez wzgląd na przypisywane Pitagorasowi odkrycie tego stosunku częstotliwości. W miarę jednak, jak nasza kultura muzyczna zaczęła coraz bardziej oscylować wokół instrumentów klawiszowych, dzielących oktawę na dwanaście części, konsekwentne stosowanie idealnie czystej kwinty przestało być możliwe. Zobaczmy dlaczego.

Strojąc kolejne czyste akustycznie kwinty w górę, spodziewalibyśmy się dojść w końcu do dźwięku, od którego zaczęliśmy. Na przykład, zaczynając od *c*, stroilibyśmy kolejno *c-g-d-a-e-h-fis-cis-gis* (tzn. *as-es-b-f-c*). Dwanaście kwint powinno obejmować zakres siedmiu oktaw i koło powinno zamknąć się na dźwięku *c*, jak na rycinie 2.



Ryc. 2. Koło  
kwintowe

## Pitagoras

28

Starożytny grecki filozof i mistrz, żył w drugiej połowie VI w. p.n.e. Urodził się na wyspie Samos, położonej w pobliżu dzisiejszych wybrzeży Turcji, zaś w późniejszym czasie osiedlił się w Krotonie, greckiej kolonii na południu Półwyspu Apenińskiego, gdzie założył bractwo religijne. Po wygnaniu z tego miasta zamieszkał w pobliskim Metaponcie. Był wielkim matematykiem, który sławę swą zawdzięcza głównie twierdzeniu nazwanemu jego imieniem, dotyczącemu pól kwadratów zbudowanych na bokach trójkąta prostokątnego.

Muzyka zawdzięcza Pitagorasowi przypisywane mu stworzenie liczbowych podstaw akustyki. Żadne z jego pism nie przetrwało, ale obieguje historia głosi, że przechodząc obok zakładu kowalskiego, usłyszał, iż młoty o różnym ciężarze uderzające w kowadło wydają dźwięki oddalone od siebie o określone odległości. Odkrył później, że muzyczne konsonanse odpowiadają stosunkom liczbowym zawartym w tetraktys (1, 2, 3, 4), sekwencji liczb, którą utożsamiał z mistycznym źródłem wszystkich rzeczy we wszechświecie. Stosunek liczbowy 2:1 (oraz 4:2) odpowiada oktawie, 3:1 sumie oktawy i kwinty czystej, 4:1 dwóm oktawom, 3:2 kwincie czystej, a 4:3 kwarcie czystej (zob. także „Co to jest szereg harmoniczny?”).



Tak też się dzieje w systemie równomiernie temperowanym. Jednak dwanaście *akustycznie* czystych kwint nie daje się zamknąć w tak uporządkowanym kole. Porównajmy stosunki częstotliwości. Co stanie się, gdy zestawimy dwanaście kwint (3:2) z siedmioma oktawami (2:1)?

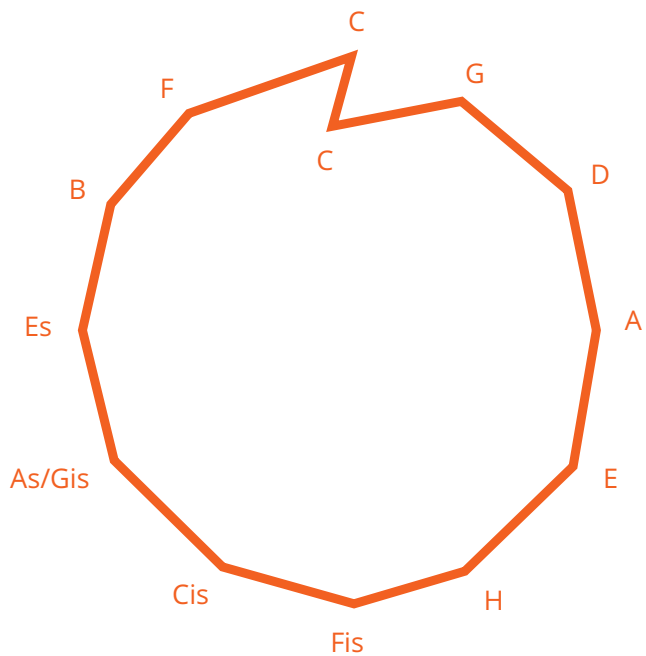
Niech ci, którzy wzdrągają się na myśl o matematyce, nie boją się – to tylko arytmetyka.

$$\frac{3}{2} \times \frac{3}{2} \times \frac{3}{2} \times \frac{3}{2} \times \frac{3}{2} \times \frac{3}{2} \times \frac{3}{2} \times \frac{3}{2} \times \frac{3}{2} \times \frac{3}{2} \times \frac{3}{2} \times \frac{3}{2} = 129,746$$

$$\frac{2}{1} \times \frac{2}{1} \times \frac{2}{1} \times \frac{2}{1} \times \frac{2}{1} \times \frac{2}{1} \times \frac{2}{1} = 128,0$$

Okazuje się, że dwunasta kwinta, która miała zamknąć koło na dźwięku początkowym, wypada za daleko, dając stosunek częstotliwości 129,746:128, czyli 1,014:1 zamiast 1:1 (zob. ryc. 3). Wracając do bardziej znanej w muzyce termi-





Ryc. 3. *Koło  
akustycznie  
czystych  
kwint*

nologii, powiedzielibyśmy, że znajduje się o około  $\frac{1}{8}$  tonu za wysoko. Odległość ta może wydawać się niewielka, lecz stanowi nieznośną rozbieżność zwaną *komatem*, która sprawia, że dźwięk ten jest bezużyteczny jako interwał prymy, oktawy bądź jej wielokrotności. Jak można rozwiązać ten problem? Można nastroić jedenaście czystych akustycznie kwint i zamknąć koło ostatnim interwałem, obniżonym względem stosunku 3:2. Można też zmienić stosunek częstotliwości niektórych lub wszystkich spośród dwunastu kwint (ponieważ ostatni dźwięk jest zbyt wysoki, należy w tym celu zmniejszyć odległości pomiędzy poprzedzającymi go dźwiękami). Strój równomiernie temperowany jest rozwiązaniem bardzo eleganckim właśnie z tego powodu, że minimalnie zmniejsza – lub temperuje – wszystkie kwinty (każdą o  $\frac{1}{12}$  całego komatu), dzięki czemu ostatni dźwięk stroi z pierwszym, jak widzieliśmy na ryc. 2.

Następnym po kwincie (3:2) interwałem – pod względem prostoty stosunku częstotliwości – jest kwarta (4:3). Nie ma w niej jednak niczego nowego, ponieważ odległość kwarty równa jest różnicy między oktawą a kwintą. Zatem wszelkie problemy dotyczące kwarty są odwrotnością problemów związanych z kwintą, a każde zmniejszenie kwinty względem jej akustycznie czystego stosunku częstotliwości pociąga za sobą zwiększenie kwarty o taką samą wartość, celem zmieszczenia obu interwałów w oktawie. W konsekwencji, temperując (zmniejszając) wszystkie kwinty o wielkość odpowiadającą  $\frac{1}{12}$  komatu, strój równomiernie temperowany jednocześnie powiększa kwarty o taką samą minimalną wartość, aby zachować oktawę o stosunku częstotliwości 2:1. Cała opowieść mogłaby się w tym skończyć – i dla wielu współczesnych badaczy i muzyków tak właśnie się stało – gdyby nie cena, jaką płaci muzyka za to wygodne rozmieszczenie dźwięków.

System ten jest na tyle wygodny, że wielu dzisiejszych muzyków nie zauważa, jak okropnie brzmi jego następny harmoniczny interwał. Po kwarcie czystej 4:3 następnym pod

względem prostoty interwałem jest tercja wielka o stosunku 5:4. Kwinty i kwarty nie brzmią wcale najgorzej w systemie równomiernie temperowanym, gdzie ich odchylenie od akustycznej czystości wynosi jedynie około  $\frac{1}{50}$  półtonu; jednak już przy tercji wielkiej system ten nie przechodzi pomyślnie testu czystości harmonii. Jest tu ona skrajnie poszerzona, bo jej odchylenie od akustycznie czystego stosunku 5:4 wynosi około  $\frac{1}{7}$  półtonu. Niedokładność jest więc siedmiokrotnie większa niż w przypadku kwinty. Interwał tercji wielkiej w naszym systemie muzycznym przypomina niewidzialnego słonia. Nikt nie zauważa jego okropnego brzmienia. Nikt go nie komentuje. Ba!, nikt nawet nie jest świadom, że słoń w ogóle istnieje. Dzielenie z nim przestrzeni życiowej uważa się za o wiele lepsze od jakiegokolwiek alternatywy tak powszechnie, że całą sprawę uznaje się za w ogóle nieistniejącą. Postawieni przed wyborem niektórzy ludzie skłonni są nawet wskazać słonia jako lepszą wersję – bo przyzwyczaili się do słoniowatych tercji. Mam jednak zamiar obudzić ich z wygodnej niewiedzy. W grę wchodzi tu akustyka: trzeba poczuć wibracje.

Mój nieżyjący już kolega Arthur H. Benade, jeden z wiodących ekspertów od akustyki muzycznej, opisał eksperyment, jaki lubił przeprowadzać z muzykami w swej pracowni:

Łatwo można sprawdzić, że gdy ustawimy dwa generatory drgań tak, by uzyskać stosunek częstotliwości 1,25992 (odpowiadający interwałowi w stroju równomiernie temperowanym) zamiast 1.25000 (=5:4), (...) wszyscy usłyszą dudnienie powstające przy jednoczesnym zagranii dźwięków, a muzycy zawyrokują, że usłyszeli rozstrojony, zbyt duży interwał wielkiej tercji. Gdy informuję uczestników doświadczenia, że (...) interwałem tym była równomiernie temperowana tercja wielka, zazwyczaj spotykam się z niedowierzaniem i konsternacją (...). Jeszcze gwałtowniejsza jest ich reakcja na szczególnie ostro brzmiący interwał o stosunku 1,26563 (=81:64). (...) Taki stosunek częstotliwości, będący produktem dwóch tysięcy lat arytmetycznej biegłości, odpowiada tercji wielkiej w stroju pitagorejskim.

Po zagranium tercji wielkiej w wersji równomiernie temperowanej oraz pitagorejskiej za pomocą generatorów drgań zazwyczaj pada pytanie „Jak można godzić się na takie strojenie?”<sup>2</sup>.

32

Nic nie może zmienić faktu, że tercji wielkiej w systemie równomiernie temperowanym daleko jest do akustycznej czystości<sup>\*</sup>. Gdy dźwięki są doskonale zestrojone, ich współbrzmienie jest stabilne i spokojne. Gdy są rozstrojone choćby minimalnie, powstaje słyszalna interferencja między wibracjami alikwotów obu dźwięków, którą – jak zauważa w swym doświadczeniu Benade – odbieramy jako dudnienie: słyszalne „uderzenia” dźwięku. Zawodowi stroiciele mają świadomość tego zjawiska i korzystają z niego. Wiedzą, jaką częstotliwość dudnień powinien mieć dany interwał, aby „stroić” w systemie równomiernie temperowanym – czy to kwinta od *g* do *d*, czy też o ton wyższa kwinta od *a* do *e*, której dudnienie z powodu szybszych wibracji wyższych tonów będzie musiało być częstsze (o ok. 1,12 razy) celem uzyskania takiej samej odległości między dźwiękami. Jest to bardzo subtelna różnica. Ale tercja wielka w tym systemie jest tak bardzo rozstrojona, że trudno nawet policzyć „uderzenia”. Przy dudnieniu o częstotliwości niemal dwunastokrotnie większej niż w przypadku kwinty efekt przypomina raczej brzęczenie.



Niezależnie od swych zdolności muzycznych współcześni muzycy często nie słyszą, jak źle brzmi tercja wielka w stroju równomiernie temperowanym, ponieważ są do jej brzmienia przyzwyczajeni i nigdy nie mieli okazji usłyszeć tego interwału w wersji akustycznie czystej. Są przekonani, że tercja wielka w takiej postaci daje właściwe brzmienie, gdyż jest częścią

---

<sup>\*</sup> Przez zawyżenie tercji wielkiej w tym systemie tercja mała musi być odpowiednio zaniżona, ponieważ obie muszą zmieścić się w przedziale odpowiadającym interwałowi kwinty czystej. Jednak ucho zdaje się tolerować większe wahania jakości tercji małej

- ROZDZIAŁ 1 -

systemu określanego przez współczesnych – a więc z pewnością mądrzejszych – teoretyków jako właściwy; zresztą, i tak nie chcieliby jej zmieniać, bo zmiana wymagałaby zbyt wiele zachodu. Z reguły nie chcą poświęcić tej sprawie uwagi.

Choć z pewnością nie jest to wygodne, nadszedł czas, by współcześni muzycy zastanowili się nad tym i – tam, gdzie trzeba – dokonali pewnych zmian.