

# Prąd elektryczny, fotony i fale ciśnienia

Szymon CHARZYŃSKI\*

\*Katedra Metod Matematycznych Fizyki,  
Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski

Otoczeni technologicznymi gadżetami, które dostarczają nam wielu wygod, łatwo się do nich przyzwyczajamy. Wiele z nich to urządzenia gromadzące i przetwarzające najróżniejsze rodzaje informacji. Za tym gromadzeniem i przetwarzaniem stoją z kolei różne zjawiska i procesy fizyczne, dzięki zrozumieniu których możliwa jest budowa tych wszystkich umilających nam życie urządzeń. Jako przykład niech posłuży nam dostęp do muzyki. Jeżeli dziś ktoś ma kaprys, żeby umilić sobie sprzątanie pokoju słuchaniem jednej z symfonii Ludwiga van Beethovena w wykonaniu orkiestry symfonicznej, to ma do wyboru dziesiątki różnych wykonań, które może z serwisów *streamingowych* odtworzyć za pomocą urządzenia wyposażonego w głośnik (może to być duża lub mała skrzynka albo nawet miniaturowe urządzenie mieszczące się w uchu).

Gdy nasz żyjący 200 lat temu przodek chciał posłuchać tej samej symfonii, to jedynym sposobem, aby ten cel osiągnąć, było zgromadzenie około setki muzyków obsługujących najróżniejsze instrumenty, którzy pod wodzą dyrygenta wykonywali utwór na żywo. Jediną dostępną formą utrwalania informacji o utworze muzycznym był wówczas zapis nutowy. Aby utwór usłyszeć, należało go za każdym razem odegrać na nowo, wydobywając dźwięki z instrumentów. Dźwięk był wówczas bardzo ulotną formą informacji, a droga, jaką pokonywała informacja, była bardzo krótka: muzyk patrzył na zapis nutowy i przy użyciu instrumentu przetwarzał go na falę dźwiękową.

Teraz mamy powszechnie dostępne urządzenia do rejestrowania i odtwarzania dźwięku. Dla nas jest to oczywiste, ale dla naszego przodka sprzed dwustu lat byłoby z pewnością zaskakujące, że skrzynka z membranami śpiewa głosem naszej ulubionej wokalistki albo gra jak cała orkiestra symfoniczna, generując dźwięk wszystkich instrumentów jednocześnie. Każdy typ instrumentu muzycznego ma swoje charakterystyczne brzmienie związane z jego budową i zasadą działania, a barwy głosów wokalistów są niepowtarzalne. Jak się chwilę nad tym zastanowić, to nawet dla współczesnego odbiorcy może być to zaskakujące, jak taki niepozorny głośniczek jest w stanie wydobyć z siebie dźwięk nie tylko każdego instrumentu czy wokalisty, ale nawet dowolnej ich kombinacji.

Kluczem do zrozumienia, jak to wszystko jest możliwe, jest fakt, że wynalazcy urządzeń do utrwalania i odtwarzania dźwięku uświadomili sobie, że jest on po prostu formą informacji. Po pierwsze, kiedy na żywo słuchamy dźwięku pochodzącego z wielu źródeł, to on i tak dociera do nas w postaci pojedynczej fali dźwiękowej, która jest sumą fal pochodzących od wszystkich źródeł. Po drugie głośnik nie musi wiernie odtwarzać takiej samej fali dźwiękowej, jaką generowało pierwotne źródło dźwięku. Wystarczy, że fala ta będzie kopią wyjściowej fali w takim zakresie, w jakim wrażliwe są nasze uszy. Podobnie jak nasze oczy są wrażliwe tylko na fale elektromagnetyczne w ograniczonym zakresie częstości (nie widzimy podczerwieni ani ultrafioletu), nasze uszy są wrażliwe na fale dźwiękowe tylko z pewnego skończonego przedziału częstości. Tymi składowymi dźwięku, które są spoza tego przedziału, nie musimy zawracać sobie głowy ani w czasie rejestracji, ani odtwarzania, ani utrwalania informacji o dźwięku, co ma kluczowe znaczenie przy konstruowaniu urządzeń wykonujących te zadania.

Wyróżnia się dwa zasadniczo różne sposoby utrwalania dźwięku: analogowy i cyfrowy. Najpierw ludzkość opanowała ten pierwszy, zajmiemy się nim więc w pierwszej kolejności. Kluczowym elementem jest tutaj mikrofon. W dużym uproszczeniu jest to urządzenie, w którym fala dźwiękowa pobudza do drgań jakiś ruchomy element, a ten jest jednocześnie składową obwodu elektrycznego. Ruch tego elementu zmienia jego właściwości elektryczne, co wpływa na to, jak przez ten element przepływa prąd. Takim elementem może być np. kawałek metalowej folii, który do pary z drugą nieruchomą elektrodą stanowi kondensator. Drganie jednej z okładek kondensatora oznacza zmianę odległości między okładkami, a zatem zmianę pojemności kondensatora.

Zapis nutowy niesie oczywiście tylko część informacji o tym, jak utwór powinien brzmieć. Pozwala zakodować wysokość dźwięków, czas ich trwania i w jakimś stopniu zmiany tempa odtwarzania. To, jak utwór ostatecznie zabrzmie, zależy od instrumentu, na którym zostanie odegrany (albo głosu, którym zostanie odśpiewany), i umiejętności muzyka, który dany instrument obsługuje, nie mówiąc już o czymś, co nazywa się „interpretacją”. Nie bez powodu organizuje się konkursy, w których uczestnicy ścigają się o nagrodę za najlepsze wykonanie tego samego utworu muzycznego.

Dźwięk rozchodzi się jako fala ciśnienia, tzn. w danym punkcie, w którym ją rejestrujemy, obserwujemy na zmianę wzrosty i spadki ciśnienia, a tym odpowiadają wzrosty i spadki gęstości powietrza. Fala dźwiękowa jest falą podłużną (o rozróżnieniu między falami podłużnymi i poprzecznymi można przeczytać w  $\Delta_{18}^2$ ).

Ludzkie ucho jest wrażliwe na częstotliwości z zakresu 16–20000 Hz, przy czym czułość jest największa w okolicach środka tego przedziału (od 1 do 3 kHz). Ponadto czułość zmienia się z wiekiem i zwłaszcza ten górny próg słyszalności się obniża.

Podany tu przykład to tzw. mikrofon pojemnościowy. Istnieje wiele różnych typów mikrofonów, których działanie opiera się na innych zasadach niż opisana tutaj. Ostateczny wynik ich działania jest jednak zawsze taki sam: zamiana sygnału dźwiękowego na elektryczny.

To z kolei powoduje pojawienie się zmian napięcia na kondensatorze, które to zmiany odwzorowują zmienność padającej fali dźwiękowej. Zmienne w czasie ciśnienie powietrza zamieniliśmy tym samym na zmienne w czasie napięcie prądu. Nośnik informacji jest zupełnie inny, ale sama informacja o zależności sygnału od czasu jest taka sama. Sygnał w postaci elektrycznej możemy wzmocnić i za pomocą wbudowanych w nie elektromagnesów możemy pobudzić do drgania membrany głośników, które zamieniają sygnał elektryczny z powrotem na sygnał akustyczny. Jeżeli chcemy dźwięk odtworzyć później, to musimy ten sygnał elektryczny jakoś zapisać. Dawniej robiono to, np. wykorzystując taśmy magnetyczne nawijane na duże szpule lub schowane w małych kasetach magnetofonowych. Sygnał analogowy można też było zapisać w postaci rowka o zmiennej głębokości na płycie winylowej. Odczyt następuje wtedy za pomocą igły, która jest wprawiana w drgania mechaniczne w miarę przesuwania się wzdłuż rowka, i dopiero ten sygnał jest przetwarzany na elektryczny, który jest wzmocniany i przesyłany na głośniki. W przypadku płyty winylowej zależność amplitudy dźwięku od czasu tłumaczona jest na zależność głębokości rowka od kąta, co przy stałej prędkości kątowej obrotu płyty odpowiada zależności głębokości rowka od czasu.

Opisany powyżej sposób zapisu nazywa się analogowym, ponieważ próbujemy przebieg jakiejś funkcji (w tym wypadku zależność ciśnienia od czasu) odwzorować również jako funkcję ciągłą, tak wiernie jak się da. Przepływ informacji wygląda w tym przypadku następująco: dźwięk zamieniamy na zależność napięcia prądu od czasu, następnie tłumaczymy na zależność głębokości rowka od kąta na płycie winylowej (albo na funkcję namagnesowania taśmy magnetofonowej). Podstawową wadą takiego sposobu utrwalania informacji jest niestety brak wierności w tłumaczeniu sygnału i jego kopiowaniu. Każdy, kto pamięta kopiowanie kaset magnetofonowych, wie, że kopia brzmi gorzej od oryginału, a kopia kopii jeszcze gorzej itd. Wielokrotne odtwarzanie tej samej płyty czy kasety również prowadziło do ich zużycia i pogorszenia jakości nośnika.

Nietrudno się zatem dziwić, że zapis analogowy został prawie całkowicie wyparty przez zapis cyfrowy. Współcześnie utrwalanie dźwięku najczęściej wygląda następująco. Mikrofon odwzorowujący zależność ciśnienia od czasu na napięcie prądu podłączony jest do przetwornika analogowo-cyfrowego. Ten ostatni zamienia ciągłą funkcję czasu na dyskretną, próbując wartości tej ciągłej funkcji w pewnym skończonym zbiorze punktów. Wartości przypisywane punktom pochodzą również ze skończonego zbioru, powstającego z podziału zbioru wartości funkcji na skończenie wiele małych przedziałów. W przypadku dźwięku takie próbkowanie wykonuje się zwykle 44 100 razy na sekundę (44,1 kHz to między innymi standard płyty CD). Częstotliwość ta jest ponad dwa razy większa niż górna granica częstotliwości, na jakie wrażliwe jest ludzkie ucho, czyli około 20 kHz. Wybór częstotliwości próbkowania wynika z twierdzenia Nyquista-Shannona o próbkowaniu – mówiącego, że sygnał, który jest sumą

sygnałów o częstotliwościach ograniczonych z góry przez pewną największą częstotliwość, można wiernie zakodować i odtworzyć, próbując go z częstotliwością co najmniej dwa razy większą od tej największej częstotliwości. W praktyce oznacza to, że najpierw należy wyjściowy sygnał przepuścić przez filtr tłumiący wszystkie częstotliwości powyżej tych, na które wrażliwe jest ludzkie ucho. Taki sygnał można potem wiernie zakodować, próbując go, a następnie odtworzyć. Nie będzie on oczywiście identyczny z tym wyjściowym, a jedynie z tym odfiltrowanym (pozbawionym wyższych częstotliwości), ale dla ludzkiego ucha oba są nierozróżnialne.

Sygnał zakodowany cyfrowo można przechowywać na dowolnym nośniku (płyty CD, twarde dyski, *pendrive'y* itp.), odtwarzać i kopiować w sposób całkowicie bezstratny, jak każdy inny plik w komputerze (możemy oczywiście stosować stratną kompresję, ale jest to kwestia naszej decyzji).

Prześledźmy więc na zakończenie przykładową drogę, jaką pokonuje informacja, kiedy wykorzystujemy serwis *streamingowy* i słuchamy w bezprzewodowych słuchawkach nagrań z udziałem np. niezującego od kilkudziesięciu lat wokalisty. Najpierw mikrofon przetłumaczył falę dźwiękową na sygnał elektryczny, który został utrwalony na taśmie magnetycznej. Z taśmy wyprodukowano płytę winylową, co samo w sobie jest skomplikowanym procesem, w którym zapis jest wielokrotnie kopiowany – najpierw powstaje tzw. „płyta-matka”, z której odciska się matrycę, a następnie wykorzystuje się je do tłoczenia właściwych kopii trafiających do sprzedaży. Informacja przechowywana przez wiele lat w postaci analogowej (rowek na płycie) musiała być w którymś momencie odtworzona i zdigitalizowana (tak jak to opisywaliśmy wcześniej). Aktualnie informacja w postaci bitowej jest przechowywana na dysku jakiegoś serwera, w nieznanym użytkownikowi miejscu na świecie. Kiedy chcemy danego utworu posłuchać, to zawierający go plik jest przesyłany w postaci impulsów elektrycznych w sieci wewnętrznej serwerowni. Następnie jest tłumaczony na impulsy optyczne i przesyłany światłowodami. W drodze do nas prawdopodobnie kilka razy zmienia się fizyczny nośnik informacji z elektrycznego na optyczny i z powrotem. Na końcu *router Wi-Fi* w naszym domu zamienia sygnał na radiowy i informacja dociera do naszego smartfona w postaci modulacji częstotliwości fali radiowej. Nasz smartfon tłumaczy sygnał na jeszcze inny standard komunikacji radiowej (*bluetooth*) i przesyła do słuchawek, w których znajduje się przetwornik cyfrowo-analogowy przetwarzający sygnał cyfrowy znowu na analogowy w postaci zależności napięcia prądu od czasu. Prąd pobudza do drgań membranę, która generuje z powrotem falę ciśnienia dającą nam złudzenie, że słuchamy śpiewu zarejestrowanego kilkadziesiąt lat temu. Dźwięk nie jest oczywiście identyczny z wyjściowym, ale biorąc pod uwagę, jak długa i skomplikowana jest droga, jaką do nas przebyła informacja o tym, jak ten śpiew wtedy brzmiał, zdecydowanie nie powinniśmy narzekać, tylko docenić wysiłek pokoleń naukowców i inżynierów, dzięki którym to wszystko jest możliwe.