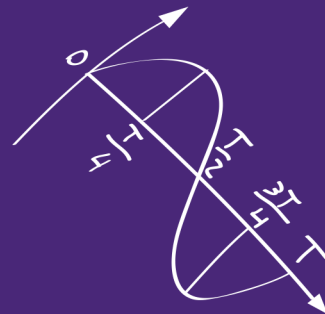


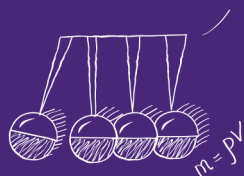
Maciej Marek



Pole i fale...



11 lekcji fizyki, dzięki którym zrozumiesz
jak działa współczesna sieć komórkowa



**P.S. To książka nie tylko
dla rolników i surferów**



Fundusze
Europejskie
Polska Cyfrowa



Rzeczpospolita
Polska



Sprawna
telekomunikacja mobilna
jako klucz do rozwoju
i bezpieczeństwa

Unia Europejska
Europejski Fundusz
Rozwoju Regionalnego



Pole i fale...

11 lekcji fizyki, dzięki którym zrozumiesz
jak działa współczesna sieć komórkowa

**P.S. To książka nie tylko
dla rolników i surferów**

Koordynator projektu: Kinga Graczyk

Redaktor główny: dr hab. inż. Maciej Marek

Redaktor pomocniczy: mgr Robert Bicki

Korekta: Rafał Pawlak, Anna Maraszek

Projekt graficzny, ilustracje, infografiki oraz skład: Vlada Huzieva

Skład: Anna Maraszek

Wydawca: Instytut Łączności – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Szachowa 1,
04-894 Warszawa, tel. +48 22 5128 100, e-mail: info@il-pib.pl, gov.pl/instytut-laczności

ISBN 978-83-916146-6-2

Wydanie elektroniczne: ISBN 978-83-916146-7-9

© Copyright by Instytut Łączności – Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa 2023

Materiał powstał w ramach projektu „Sprawna telekomunikacja mobilna jako klucz do rozwoju i bezpieczeństwa” prowadzonego przez Ministerstwo Cyfryzacji we współpracy z Instytutem Łączności – Państwowym Instytutem Badawczym. Projekt realizowany jest w ramach Programu Operacyjnego Polska Cyfrowa Działanie 3.4. Kampania ma na celu zwiększenie świadomości Polaków w zakresie działania, wykorzystania, bezpieczeństwa i znaczenia mobilnych sieci telekomunikacyjnych, a tym samym usług opartych o te sieci.

Opracowanie i przygotowanie: Instytut Łączności – Państwowy Instytut Badawczy

Maciej Marek

Pole i fale...

11 lekcji fizyki, dzięki którym zrozumiesz
jak działa współczesna sieć komórkowa

**P.S. To książka nie tylko
dla rolników i surferów**

Warszawa 2023

Spis treści

Słowo wstępne	9
Lekcja 1. Przesyłanie informacji	13
Lekcja 2. Pole elektromagnetyczne jako nośnik informacji	23
Lekcja 3. Ruch falowy	37
Lekcja 4. Widmo sygnału	47
Lekcja 5. Filtracja sygnału	60
Lekcja 6. Fale elektromagnetyczne i przeszkody	73
Lekcja 7. Modulacja amplitudowa – AM	83
Lekcja 8. Modulacja fazowa i częstotliwościowa	94
Lekcja 9. Zastosowania modulacji sygnału	105
Lekcja 10. Sieć komórkowa	116
Lekcja 11. Pole elektromagnetyczne a zdrowie	127
Rozwiązania zadań domowych	138



Słowo wstępne



dr hab. inż. Maciej Marek, autor podręcznika

Czy zastanawialiście się kiedyś jak działa telefonia mobilna? W jaki sposób głos, tekst, zdjęcie czy film przesyłane są z jednego telefonu na drugi?

Telefonia mobilna jest cudem inżynierii i szczegółowe wyjaśnienie zasad jej funkcjonowania wymagałoby grubych tomów oraz wielu lat studiów do zrozumienia ich zawartości.

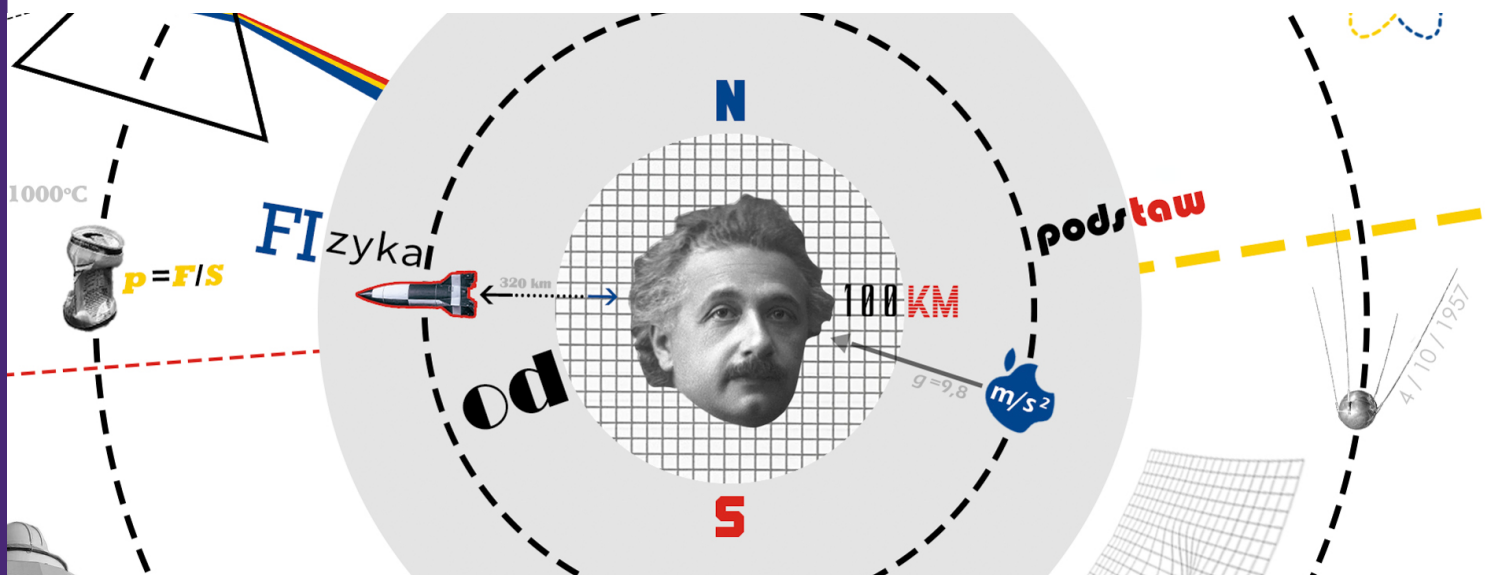
Nie znaczy to jednak, że podstawy działania tego złożonego systemu może opanować tylko specjalista. Zebrane w niniejszej książce jedenaście lekcji fizyki bazuje na programie szkoły podstawowej, w kilku tylko miejscach wykraczając śmiało poza jego ramy (np. wprowadzając pojęcie analizy widmowej czy modulacji sygnałów) na tyle, na ile było to niezbędne do omówienia przesyłania informacji za pomocą pola elektromagnetycznego.

Lekcje nie są od siebie niezależne. Stanowią jeden ciąg logiczny, a pojęcia wprowadzane w danej lekcji są w późniejszych lekcjach traktowane jako znane i dobrze zrozumiane. Dlatego najlepiej jest przerabiać lekcje po kolei, wykonując doświadczenia oraz rozwiązując zadania, których celem jest utrwalenie oraz przetestowanie poziomu zrozumienia materiału. Rozwiązania zadań można znaleźć na końcu książki. Warto jednak do nich zwrócić dopiero po samodzielnym zmierzeniu się z problemem i po ewentualnych wskazówkach od nauczyciela.

Kiedy już przebrniecie przez wszystkie lekcje – a będzie to długa i momentami niełatwa droga – będziecie m.in. w stanie odpowiedzieć na pytania:

- Dlaczego do przesyłania informacji w telefonii mobilnej i innych systemach telekomunikacji wybrano pole elektromagnetyczne?
- Skąd pochodzi nazwa telefonii komórkowej? Czym jest „komórka”?
- Dlaczego w telefonii mobilnej wykorzystuje się wysokie częstotliwości sygnału? Dlaczego w kolejnych generacjach systemów telefonii mobilnej częstotliwości są coraz to większe?
- Czy pole elektromagnetyczne jest niebezpieczne dla zdrowia?

I wiele, wiele innych. Zapraszamy za kuliszy sceny telefonii mobilnej.



mgr Robert Bicki – autor kanału „Fizyka od podstaw”



"Cześć! Jestem Robert..." - takimi słowami rozpocząłem wykonany w Pajncie i nagrywany mikrofonem z telefonu pierwszy odcinek, który trafił na kanał „Fizyka od podstaw” w 2017 roku. Od tego czasu wiele się zmieniło, a dzięki tysiącom godzin pracy, nauce programów i zdobytej wiedzy jestem w stanie tworzyć wspaniałe materiały! Ten samorozwój umożliwił mi udział w naprawdę trudnym i angażującym projekcie. We współpracy z Instytutem Łączności – PIB oraz Ministerstwem Cyfryzacji, na podstawie trzymanego w Waszych rękach podręcznika stworzyłem serię filmów. Poruszam w nich zagadnienia związane z przesyłaniem informacji, falami elektromagnetycznymi, oddziaływaniem tych fal z otoczeniem, działaniem sieci mobilnej, jej ograniczeniom i oddziaływaniu na człowieka. Mam nadzieję, że udało mi się wyjaśnić te trudne zagadnienia w przystępny sposób, za pomocą doświadczeń i wykonanych animacji – tych dwu, ale też trójwymiarowych. W mojej ocenie stanowią one piękną, a często i jedyną w Internecie wizualizację tego, co zwykle zapisuje się za pomocą wzorów, nieruchomych grafik lub przedstawia machaniem rękami w powietrzu. Niech te filmy staną się inspiracją do dalszych odkryć i pchną Was w kierunku zgłębiania nauk ścisłych i opowiadania o nich innym w jeszcze bardziej atrakcyjny sposób, niż robię to ja ;)

Fizyka od podstaw

QR kod do wspomnianych filmów na YouTube :)





Rafał Pawlak, ekspert, Instytut Łączności – Państwowy Instytut Badawczy

O polu elektromagnetycznym i falach w zasadzie powiedziano i zapisano wszystko, co współczesna nauka wie na ten temat. Opisano je wzorami opierającymi się na skomplikowanym aparacie matematycznym, wykorzystującymi chociażby operatorki. Mamy świadomość, że przecież nie dla każdego pojęcia dywergencji, rotacji czy gradientu są z jednej strony oczywiste, a z drugiej trywialne. Nie zawsze przecież pamiętamy, że rotacja z rotacji pola wektorowego to gradient dywergencji minus laplasjan.

Dlatego też w naszej publikacji pokazujemy, że pole elektromagnetyczne to zjawisko fizyczne, które niekoniecznie trzeba tłumaczyć zaczynając od praw Maxwella budzących postrach wśród studentów początkowych semestrów studiów politechnicznych. Można to zrobić zdecydowanie prościej, łatwiej i najważniejsze – w bardziej przystępny sposób. Jednym słowem równie skutecznie, a nawet skuteczniej.

Jesteśmy przekonani, że po dobrej lekturze scenariuszy lekcji i przeprowadzeniu kilku ciekawie zaaranżowanych eksperymentów, przyjdzie odpowiedni czas i na prawa Maxwella, które wówczas z pewnością uda się lepiej zrozumieć. A może dzięki temu niektórzy nawet nauczą się z nimi żyć w przyjaźni? Może inaczej spojrzymy na naszego smartfona? Może dostrzeżemy w nim nie tylko źródło rozrywki, ale także źródło fal elektromagnetycznych? Odpowiedzi na te pytania należą do Was, drodzy Czytelnicy. Ciekawej lektury!



Łukasz Kiwicz, radca, Ministerstwo Cyfryzacji

Telefon komórkowy to nieodłączny towarzysz naszego życia. Korzystanie z możliwości jakie nam oferuje jest powszechne i oczywiste. Dzwonimy, piszemy, czytamy, gramy, sprawdzamy, szukamy. Już nawet najmłodsze dzieci świetnie poruszają się po dostępnych dla nich aplikacjach. Wszystko to wykonujemy praktycznie intuicyjnie. Ale czy poza umiejętnościami obsługi wiemy co sprawia, że możemy korzystać z naszych sprzętów? Jak to się dzieje, że do siebie dzwonimy? W jaki sposób łączymy się z internetem? Dlaczego czasem mamy problem z zasięgiem sieci? Odpowiedzi należy szukać w fizyce. To właśnie na jej zasadach opiera się telekomunikacja.

Przygotowaliśmy kompleksowe scenariusze lekcji. Każdy, poza częścią merytoryczną, zawiera ćwiczenia, eksperymenty, słowniczek pojęć oraz proponowaną pracę domową.

Liczymy, że przygotowana przez nas publikacja pomoże w zrozumieniu i odkrywaniu świata telekomunikacji. Odpowiednio ukierunkowana wiedza sprawi, że młode osoby staną się świadomymi użytkownikami sieci w dorosłym świecie.

Materiał powstał w ramach projektu „Sprawna telekomunikacja mobilna jako klucz do rozwoju i bezpieczeństwa” prowadzonego przez Ministerstwo Cyfryzacji we współpracy z Instytutem Łączności – Państwowym Instytutem Badawczym. Projekt realizowany jest w ramach Programu Operacyjnego Polska Cyfrowa Działanie 3.4. Kampania ma na celu zwiększenie świadomości Polaków w zakresie działania, wykorzystania, bezpieczeństwa i znaczenia mobilnych sieci telekomunikacyjnych, a tym samym usług opartych o te sieci.

Lekcja 1

Przesyłanie informacji

Cel

Przedstawienie podstawowych pojęć związanych z różnymi postaciami informacji oraz jej przesyłaniem.

Efekty kształcenia

- Uczeń potrafi wymienić przykłady różnych postaci informacji.
- Uczeń potrafi zdefiniować pojęcie sygnału oraz podać przykładowe formy sygnału.
- Uczeń potrafi zdefiniować oraz podać podstawowe cechy sygnałów analogowych i cyfrowych.



1. Czym jest informacja?

Pojęciem informacji posługujemy się na co dzień tak często, że nie widzimy potrzeby dokładniejszego zdefiniowania, czym właściwie ona jest. W telewizji spotykamy się z programami informacyjnymi, w gazetach - z rubryką „Informacje codzienne”, w Internecie - z portalami informacyjnymi. Każde duże miasto lub ośrodek turystyczny nie może obejść się bez „Informacji turystycznej”. Dawno niewidzianego znajomego chętnie wypytujemy o ciekawe informacje z ostatniego okresu.

Czym zatem jest informacja? Nie będziemy się tutaj starać podać pełnej, naukowej definicji tego pojęcia. Zamiast tego spróbujemy scharakteryzować je w sposób najbardziej dla nas użyteczny tak, byśmy byli w stanie zrozumieć na czym polega przesyłanie informacji we współczesnych sieciach telekomunikacyjnych.

Podstawową cechą **informacji** jest to, że **zmniejsza niewiedzę odbiorcy**.

Popatrzmy na prosty przykład. Przypuśćmy, że nasz kolega rzucił monetą tak, że wynik jest mu znany, ale nie nam. Mamy tu do czynienia z najbardziej elementarną postacią niewiedzy, gdyż możliwe są tylko dwa wyniki rzutu monetą: orzeł (O) albo reszka (R). Zatem odpowiedź „tak” lub „nie” na jedno nasze pytanie: „czy jest to orzeł?”, dostarczy nam pełnej informacji o wyniku rzutu. Jeżeli odpowiedzią będzie „tak”, otrzymamy potwierdzenie, że wypadł orzeł, jeżeli „nie” – musiała to być reszka. Taką elementarną **ilość informacji** nazywamy **1 bitem**.



Ciekawostka. *Nauka znacznie lepiej sobie radzi z dokładnym zdefiniowaniem i mierzeniem ilości informacji, niż tego, czym faktycznie jest informacja. Podobnie jest z wieloma innymi pojęciami jak np. czasem czy energią.*

Jak to jest w przypadku rzutu dwiema monetami? Możliwe są cztery wyniki: OO, OR, RO, RR. Czy zatem ilość informacji wyniku, to aż 4 bity tzn. czy potrzebne są aż cztery pytania o możliwej odpowiedzi „tak” lub „nie”? Na szczęście – nie. Zauważmy, że wystarczą tak naprawdę dwa pytania: „czy na pierwszej monecie wypadł orzeł?” oraz „czy na drugiej monecie wypadł orzeł”. Informacja o wyniku rzutu dwiema monetami zawiera zatem tylko 2 bity.



Ćwiczenie. Poprośmy kolegę by pomyślał liczbę naturalną w zakresie od 1 do 8 i zapisał ją na kartce tak, byśmy tego nie widzieli. Ile w najgorszym razie potrzebujemy zadać pytań, na które kolega może odpowiedzieć „tak” lub „nie”, by ustalić, jaka to jest liczba?



Dyskusja. Oczywiście, jeśli będziemy pytać po kolei: „czy to jest 1?”, „czy to jest 2?”, itd. w najgorszym razie potrzebować będziemy ośmiu pytań (jeśli pechowo się zdarzy, że kolega wybrał liczbę 8). Ale możliwa jest sprytniejsza strategia. Zapytajmy: „czy jest to liczba w zakresie od 1 do 4?”. Po tym jednym pytaniu będziemy w stanie odrzucić połowę możliwych wyników. Jeżeli otrzymamy przykładowo odpowiedź „tak”, możemy w drugiej kolejności zapytać: „czy jest to liczba w zakresie od 1 do 2?”. Znowu w ten sposób odrzucimy połowę wyników. Przykładowo, odpowiedź „nie” będzie znaczyła, że szukaną liczbą musi być 3 lub 4. Niejasność tę możemy już wyjaśnić w ostatnim, trzecim pytaniu. Ponadto, dwa pytania na pewno nie wystarczą w ogólnym przypadku. Informacja nt. wybranej liczby naturalnej w zakresie od 1 do 8 zawiera zatem 3 bity.

Nasza niewiedza często dotyczy skończonego zbioru wartości, jak w przykładach powyżej. Nietrudno wymyślić inne przykłady:

- wynik rzutu kostką (zakres od 1 do 6),
- liczba osób obecnych w klasie (na pewno nie większa niż liczba wszystkich uczniów w klasie),
- liczba wolnych miejsc na parkingu (ograniczona liczbą wszystkich miejsc parkinowych),
- nazwa ulicy w nieznanym nam mieście, przy której znajduje się muzeum archeologiczne (liczba ulic w mieście jest skończona),
- numer na liście wyborczej kandydata, który wygrał wybory prezydenckie (lista kandydatów ustalona jest przez Państwową Komisję Wyborczą przed rozpoczęciem głosowania), itp..

W każdym z tych przypadków uzyskanie informacji polega na ustaleniu, który element ze skończonego zbioru możliwych wartości faktycznie się zrealizował.

Często jednak chcemy uzyskać informację o wartościach ze zbioru nieskończonego, którego elementy mogą zmieniać się w sposób ciągły i nie są bezpośrednio policzalne, np.:

- temperatura powietrza w stopniach Celsjusza,
- aktualna szybkość poruszania się samochodu, którym jedziemy, podana w km/h,
- wysokość najwyższego budynku w naszym mieście podana w metrach, itp..

Wiele wielkości ciągłych możemy potraktować jako elementy zbioru skończonego, jeżeli ograniczymy dokładność ich podawania oraz przedział ich zmienności. Np. w przypadku temperatury powietrza w Polsce możemy się ograniczyć do zakresu od -50 do 50 stopni Celsjusza z dokładnością do 1 stopnia. Liczba możliwych wyników ograniczy się wtedy do 101 możliwych wartości.

Obrazy, zdjęcia, filmy, utwory muzyczne również niosą pewną informację i to niezależnie od tego, czy świadomie je tak odbieramy (np. odczytujemy ze zdjęcia, kto był obecny podczas pewnego historycznego zdarzenia), czy są dla nas wyłącznie źródłem wrażeń estetycznych. Zwróćmy uwagę, że każde zdjęcie możemy rozbić na zbiór pikseli, z których każdy ma pewien kolor i jasność. Przyporządkowanie kolorów i jasności do pikseli zdjęcia czy obrazu nie jest nam z góry znane i może odbyć się na olbrzymią liczbę sposobów. Dopiero patrząc na zdjęcie obserwujemy, który z tych sposobów faktycznie się zrealizował. Odbieramy w ten sposób informację dokładnie tak samo, gdy patrzymy na wynik rzutu kostką, czy odczytujemy temperaturę powietrza na termometrze za oknem.

2. Postacie informacji. Kodowanie

Powróćmy do przykładu z jedną monetą – kolega wykonał rzut, sprawdził wynik, ale dla nas ten wynik jest jeszcze nieznan. Pytamy: „Czy jest to orzeł?”. Co uznamy, za odpowiedź na nasze pytanie, a tym samym – przekazanie informacji?

Oczywiście, spodziewamy się usłyszeć określoną wypowiedź – słowo „tak” lub „nie”. Z fizycznego punktu widzenia, organy mowy naszego kolegi staną się źródłem fali

akustycznej (dźwiękowej), której cechy rozpoznamy w momencie, gdy dotrze do naszych uszu jako jedno z tych słów.

Ale możliwości jest znacznie więcej. Kolega może:

- skinąć lub pokręcić głową,
- może zapisać na kartce „tak” lub „nie” i pokazać nam odpowiedź,
- może wyjść do pomieszczenia obok, gdzie znajduje się mikrofon połączony z głośnikiem w naszym pokoju i przekazać informację z wykorzystaniem tego systemu,
- może zastukać w stół raz lub dwa razy, itp..

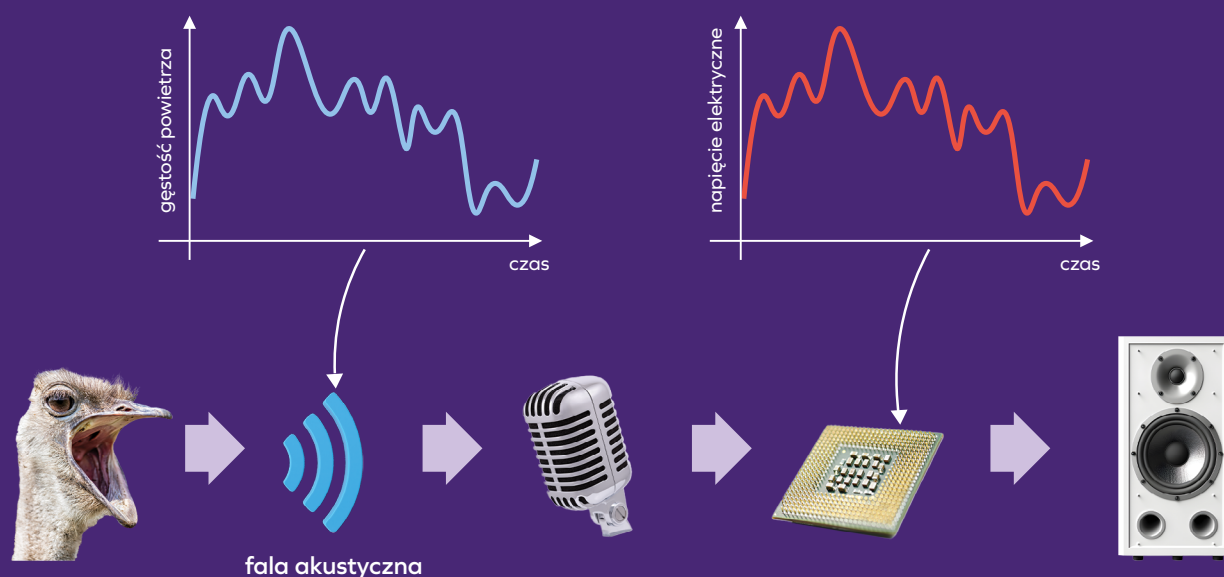
Pierwszy sposób uznamy za równie dobry, jak bezpośrednia odpowiedź „tak/nie”.

W naszym kręgu kulturowym jednoznacznie wiążemy te gesty odpowiednio z potwierdzeniem lub zaprzeczeniem. Drugi sposób wymaga od nas umiejętności czytania, ale zasadniczo przekazuje tę samą informację. Zauważmy, że w obu tych sposobach odbieramy informację jako wrażenia wzrokowe na poziomie fizycznym przekazywane przez światło.

W sposobie trzecim fala akustyczna nie dociera do nas bezpośrednio. Najpierw w mikrofonie przekształcana jest na drgania napięcia elektrycznego, które przekazywane jest przewodem do głośnika, w którym ponownie zmienia się w falę akustyczną i dociera do naszych uszu (Rys. 1).

Sposób czwarty, aby niósł dla nas użyteczną informację, wymaga wcześniejszego umówienia się, co oznacza jedno, a co dwa stuknięcia w stół, gdyż przyporządkowanie to może być zupełnie dowolne. Jeżeli ustalimy, że jedno stuknięcie oznacza „tak”, zaś dwa – „nie”, uzyskujemy informację analogicznie jak przy skinięciu/kręceniu głową.

Widzimy zatem, że po pierwsze informacja może mieć różne podłoże fizyczne (fala akustyczna, bodziec wizualny, zmienne napięcie elektryczne), po drugie może być w różny sposób „zakodowana”, zaś kod musi być znany zarówno nadawcy, jak i odbiorcy, by przekaz informacji był skuteczny. Kodowanie jest przypisaniem znakom z jednego zbioru znaków z innego zbioru (np. „tak” – skinięcie, „nie” – kręcenie głową; alfabet Morse’a, itp.).



Rys. 1. Różne postacie sygnału niosące tę samą informację.

Wielkość fizyczną zmieniającą się odpowiednio do niesionej informacji będziemy nazywać **sygnałem**. Pomiedzy nadawcą i odbiorcą sygnał może wielokrotnie zmieniać swoją postać, nie zmieniając przy tym faktycznie niesionej informacji.

3. Przykłady sygnałów

Przesyłanie informacji głosowej jest dla nas jednym z podstawowych sposobów porozumiewania się. Przypatrzmy się jak przesyłanie informacji odbywa się na przykładzie komunikatu głosowego.

Wszystko zaczyna się od myśli, czyli impulsów elektrycznych w mózgu. Wola nadawcy zostaje ukierunkowana na wypowiedzenie określonego słowa, np. „kot” (Rys. 2).

- Mózg nadawcy, za pośrednictwem układu nerwowego, przesyła impulsy do organów mowy (sygnał elektryczny).
- Impulsy te doprowadzają do odpowiedniego ustawienia języka, ust, szczęki oraz napięcia strun głosowych przy wypuszczaniu powietrza. Zauważmy, że charakterystyczne ustawienie organów mowy również jest pewnego rodzaju sygnałem – wiemy, że niektórzy posiadli umiejętność czytania z „ruchu warg” (sygnał wizualny).
- Strumień powietrza wypychany przez opadającą klatkę piersiową pobudza struny głosowe do drgań (sygnał wibracyjny). Ustawienie jamy ustnej i nosowej oraz warg tworzy komorę rezonansową i wzmacnia odpowiednie częstotliwości (emisja samogłoski). Ruchy języka oraz warg blokują w odpowiednich momentach strumień powietrza (spółgłoski). Z ust emitowana jest specjalnie ukształtowana fala akustyczna (sygnał dźwiękowy).
- Dźwięk rozchodzi się w powietrzu wokół nadawcy, jako zagęszczenia i rozrzedzenia powietrza. Rolę sygnału dogrywa zatem zmienna gęstość powietrza.
- Dźwięk dociera do ucha odbiorcy. Pobudza do drgań błonę bębenkową w jego uchu (sygnał wibracyjny).



Rys. 2. Komunikat głosowy jako przesyłanie informacji sygnałami o różnej postaci.

- Drgania błony zostają przekształcone na sygnały elektryczne w nerwie słuchowym i poprzez układ nerwowy docierają do mózgu odbiorcy, który interpretuje je jako słowo „kot” (sygnał elektryczny). Przekaz informacji odbył się pomyślnie.

Rozmowa jest pewną formą wymiany informacji, która odbywa się naprzemiennie. Telefonnia umożliwia realizację rozmowy praktycznie przy dowolnych odległościach pomiędzy rozmówcami. W przypadku klasycznej telefonii drgania powietrza są przetwarzane na drgania prądu elektrycznego w przewodach. W telefonii mobilnej dochodzi do przekształcenia dźwięku na drgania pola elektromagnetycznego (patrz Lekcja 2).



Ćwiczenie. Rozpoznaj co jest sygnałem w różnych sposobach przesyłania informacji, tzn. jaka wielkość lub wielkości fizyczne ulegają zmianie na trasie przekazu informacji pomiędzy nadawcą i odbiorcą:

- Mruganie latarką.
- Stukanie w ścianę do sąsiedniego pomieszczenia.
- Komunikaty dworcowe dotyczące opóźnienia pociągu (możesz rozpatrzyć dwa rodzaje komunikatów: wyświetlanych na ekranach oraz emitowanych przez głośniki).

4. Sygnały analogowe i cyfrowe

Jak zobaczyliśmy wcześniej, możemy mieć do czynienia z sygnałami, które mogą przyjąć tylko kilka możliwych wartości lub takimi, które zasadniczo mogą przyjąć dowolną wartość z określonego przedziału.

Sygnałem analogowym będziemy nazywali sygnał, którego wartość może zmieniać się w sposób ciągły. Przykładowo, wynik pomiaru temperatury powietrza przez elektroniczny termometr znajdujący się za oknem możemy przetworzyć na napięcie elektryczne w przewodzie łączącym termometr z aparaturą wewnątrz pomieszczenia. Jeżeli wartość napięcia jest proporcjonalna do wartości temperatury, sygnał w przewodzie jest przykładem sygnału analogowego.

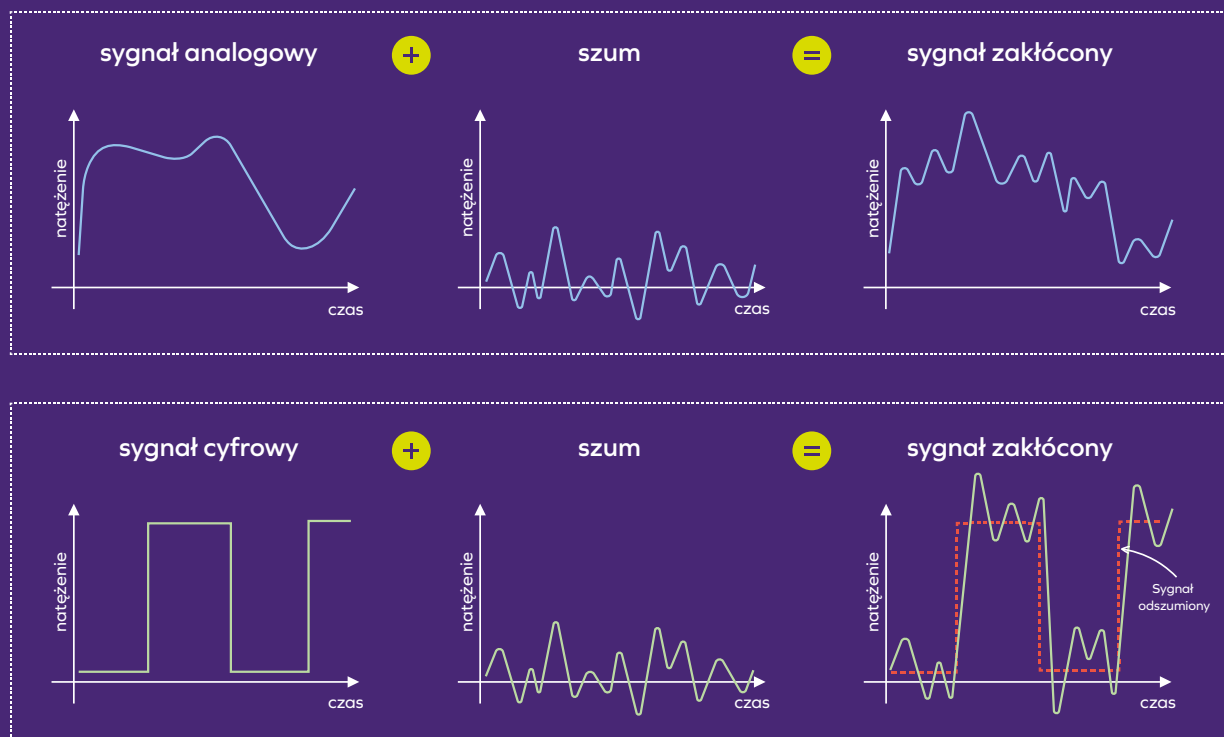
Z drugiej strony, sygnał, którego wartość ograniczona jest tylko do skończonego zbioru wartości, nazywamy **sygnałem cyfrowym**. Bardzo często sygnały cyfrowe przyjmują tylko dwie wartości – mówimy wtedy o sygnale dwuwartościowym lub **binarnym**. Przykładowo, sygnał nadający wyniki wielokrotnego rzutu monetą byłby sygnałem binarnym. Mógłby to być sygnał elektryczny o dwóch wartościach napięcia: „orzeł” – 1 V, „reszka” – 5 V.

W przyszłych lekcjach zobaczymy, że w pewnych przypadkach możemy sygnał analogowy przekształcić na sygnał cyfrowy bez utraty informacji (Lekcja 9).

Oba rodzaje sygnałów mają swoje wady i zalety. Zaletą sygnału analogowego jest to, że oddają bezpośrednio zmienność informacji mającej charakter ciągły (temperatura, szybkość samochodu, itp.). Informacja ciągła może być łatwo przetworzona na sygnał analogowy u nadawcy, a potem łatwo odtworzona u odbiorcy. Wadą sygnału analogowego jest duża wrażliwość na zakłócenia. Jeżeli na sygnał użyteczny nałożysz szum (przypadkowe zakłócenia o trudnym do przewidzenia charakterze), odbiorca nie jest

w stanie łatwo odróżnić informacji użytecznej od szumu, czyli dokonać, tzw. odszumienia. Zmienność wartości sygnału może wynikać zarówno z zawartości informacyjnej (np. zmian wartości temperatury), jak i przypadkowych zmian szumu wprowadzonych gdzieś pomiędzy nadawcą i odbiorcą (Rys. 3). O pewnych możliwościach eliminacji szumu w sygnałach analogowych powiemy w Lekcji 4.

Wady tej nie ma sygnał cyfrowy, jeżeli tylko zakłócenia nie przekraczają połowy wartości odstępu pomiędzy zdefiniowanymi poziomami sygnału. Nawet jeśli sygnał ulegnie zakłóceniu, nadal jesteśmy w stanie rozpoznać, jaki poziom sygnału był w rzeczywistości wyemitowany przez nadawcę (Rys. 3). Inną zaletą sygnału cyfrowego jest to, że może być łatwo przetwarzany przez komputery i cyfrowe układy elektroniczne (np. filtry cyfrowe). Wadą jest konieczność wprowadzenia odpowiednich przetworników do przetwarzania informacji ciągłej do postaci cyfrowej (u nadawcy) oraz w przeciwnym kierunku (u odbiorcy). Zazwyczaj taki przetworzony sygnał w niczym nie przypomina przebiegu wielkości fizycznej reprezentującej oryginalną informację.



Rys. 3. Porównanie wrażliwości na zakłócenia sygnałów analogowego i cyfrowego.



Doświadczenie

Do przeprowadzenia eksperymentu potrzeba pięciu osób. Dwie będą pełnić funkcję nadawcy i odbiorcy informacji, trzy pozostałe – zakłócczy, czyli osób, które wprowadzają pewne zakłócenia w łańcuchu komunikacyjnym między nadawcą i odbiorcą. Nadawca i zakłócczy otrzymują kilkanaście czystych karteczek oraz pisak. Nadawca i odbiorca siadają naprzeciw siebie, a zakłócczy pomiędzy nimi (Rys. 4).



Rys. 4. Eksperyment z przesyłaniem informacji.

Eksperyment 1

Nadawca zapisuje na kartce dowolną liczbę (nie musi być całkowita) z przedziału 10 – 50 tak, żeby nikt poza nim jej nie widział, po czym przekazuje kartkę do pierwszego zakłócczy. Ten odczytuje ukradkiem liczbę, po czym na swojej kartce zapisuje taką samą liczbę lub powiększa ją o 1, ewentualnie pomniejsza o 1. Następnie przekazuje swoją kartkę do zakłócczy drugiego, który może zrobić dokładnie to samo, po czym przekazuje kartkę do zakłócczy trzeciego, a ten po ewentualnej zmianie liczby otrzymanej od zakłócczy drugiego przekazuje swoją kartkę odbiorcy. Eksperyment można powtórzyć kilka razy.

Spróbuj odpowiedzieć na pytania:

- Jakiego rodzaju sygnał został tu przekazany – analogowy czy cyfrowy?
- Czy odbiorca po odczytaniu liczb, które do niego dotarły jest w stanie określić, jakie liczby zapisał na swoich kartkach nadawca?
- Jeżeli nie, czy jest w stanie to zrobić w przybliżeniu? Jak bardzo się może pomylić w najgorszym przypadku?

Eksperyment 2

Przebieg eksperymentu jest dokładnie taki sam jak w Eksperyment 1 z jedną, małą różnicą – nadawca może napisać na kartce tylko jedną z dwóch liczb: 10 albo 50. Informacja przechodzi przez zakłócaaczy, którzy mogą zmieniać otrzymaną liczbę jak wcześniej, po czym dochodzi do odbiorcy. Eksperyment można powtórzyć kilka razy.

Spróbuj teraz odpowiedzieć na pytania:

- Jakiego rodzaju sygnał został tu przekazany – analogowy czy cyfrowy?
- Czy odbiorca po odczytaniu liczb, które do niego dotarły jest w stanie określić, jakie liczby zapisał na swoich kartkach nadawca?
- Czy może to zrobić bezbłędnie? A gdyby zakłócaaczy było znacznie więcej? Ilu musiałoby ich być, by odbiorca stracił pewność odtworzenia nadanej informacji?



Słowniczek

Bit – ilość informacji, zawarta w odpowiedzi „tak” lub „nie” na zadane pytanie.

Informacja – zbiór danych, który zmniejsza niewiedzę odbiorcy.

Kodowanie – przyporządkowanie znakom z jednego zbioru znaków z innego zbioru.

Sygnał – wielkość fizyczna zmieniająca się zgodnie z przekazywaną informacją.

Sygnał analogowy – sygnał, którego wartość może zmieniać się w sposób ciągły.

Sygnał binarny – sygnał, który w momencie nadawania może przyjąć tylko dwie możliwe wartości; jest rodzajem sygnału cyfrowego.

Sygnał cyfrowy – sygnał, który w momencie nadawania może przyjmować tylko wartości ze skończonego zbioru.



Materiały zewnętrzne

1. Elżbieta Kuligowska „Wszystko we Wszechświecie jest informacją? Najważniejsze fakty dotyczące pozornej oczywistości”.

Zeskanuj QR kod



2. Aplikacja Akinator. Gracz wymyśla postać (realną lub fikcyjną), a zadaniem aplikacji jest odgadnięcie tej postaci w serii pytań, na które gracz odpowiada tak/nie. Wymyśl dowolną postać i określ ile bitów informacji musiałeś przekazać, by aplikacja odgadła poprawną odpowiedź (możesz przyjąć, że odpowiedź „nie wiem” nie przekazuje żadnej informacji, zaś „chyba tak” lub „chyba nie” są równoważne „tak” lub „nie”).

Zeskanuj QR kod



Praca domowa

Treść zadania

W zamkniętym pomieszczeniu znajduje się osoba, która wystukuje palcem na ścianie komunikat zakodowany alfabetem Morse'a. W pomieszczeniu po drugiej stronie ściany druga osoba z latarką odsłuchuje komunikat i na bieżąco przekazuje tę samą treść na zewnątrz przez okno odpowiednio mrugając latarką. Uporządkuj w kolejności następujące po sobie postacie sygnału niosącego informację (podobnie jak na Rys. 2) od nadawcy w zamkniętym pomieszczeniu do emisji na zewnątrz oraz skomentuj szczegółowo poszczególne etapy.

Pojęcia do wykorzystania:

- Sygnał elektryczny (układ nerwowy).
- Sygnał elektryczny (układ elektryczny latarki).
- Sygnał elektryczny (mózg).
- Sygnał akustyczny (fala dźwiękowa w powietrzu).
- Sygnał świetlny (żarówka).
- Sygnał wibracyjny (błona bębenkowa w uchu).
- Sygnał wibracyjny (ściana).

Lekcja 2

Pole elektromagnetyczne jako nośnik informacji

Cel

- Zaznajomienie ucznia z możliwymi zastosowaniami pola elektromagnetycznego (EM) w zakresie przesyłania informacji.

Efekty kształcenia

- Uczeń potrafi wytłumaczyć, dlaczego fale EM są obecnie szeroko stosowanym nośnikiem informacji.
- Uczeń potrafi wyjaśnić podstawowy mechanizm generowania fal EM.
- Uczeń potrafi korzystać z prawa opisującego ilościowo spadek wartości natężenia pola elektrycznego oraz natężenia fali EM wraz z odległością od źródła.



1. Pola fizyczne o dużym zasięgu

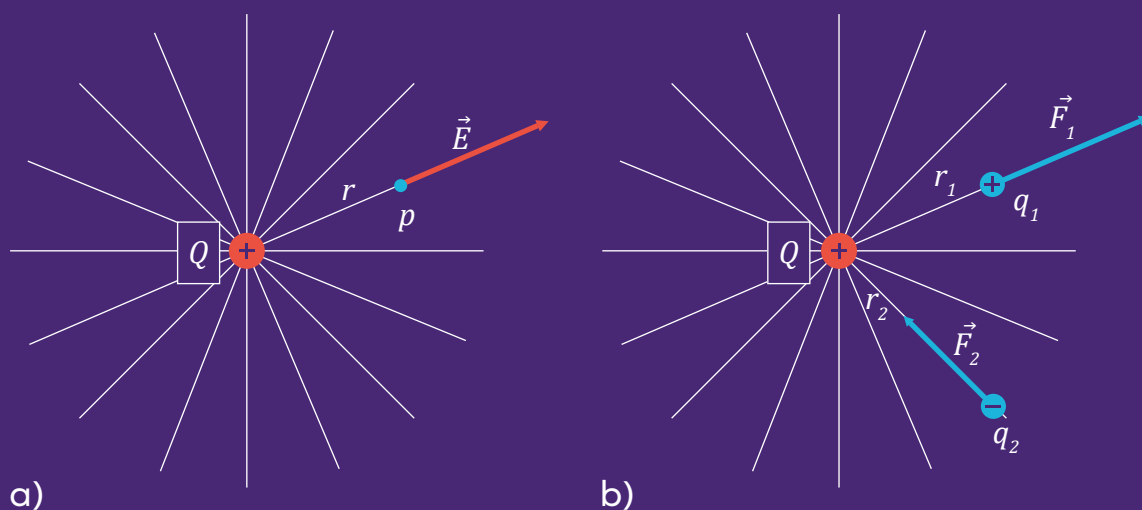
W Lekcji 1 zapoznaliśmy się z zagadnieniem przesyłania informacji i analizowaliśmy komunikat głosowy jako jeden z podstawowych sposobów wymiany informacji w życiu codziennym. Bezpośrednia komunikacja głosowa ma jednak dużą wadę – bardzo ograniczony zasięg. Telefonnia klasyczna w dużej mierze jest tej wady pozbawiona, wymaga jednak połączenia przewodowego pomiędzy nadawcą i odbiorcą. Do komunikacji mobilnej, bezprzewodowej, konieczne jest wykorzystanie pól fizycznych o dużym zasięgu. W fizyce znamy dwa takie pola: grawitacyjne oraz elektromagnetyczne.

Pole grawitacyjne jako nośnik informacji byłoby idealne – o ile wiemy, nie ma możliwości jego ekranowania, przenika zatem przez wszystkie przeszkody i może dotrzeć do dowolnego miejsca we Wszechświecie. Niestety, oddziaływania grawitacyjne pomiędzy masami, które możemy łatwo kontrolować, są niezwykle słabe. Zgodnie z prawem grawitacji Newtona siła przyciągania dwóch ciężarków o masie $m = 10 \text{ kg}$ znajdujących się w odległości $r = 1 \text{ m}$ wynosi (G – stała grawitacji):

$$F = G \frac{m \cdot m}{r^2} = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{10 \cdot 10}{1} \text{ N} = 6,67 \cdot 10^{-9} \text{ N}$$

Jest zatem niezwykle mała nawet przy niewielkich odległościach i trudno by siłą tego rzędu wywołała możliwą do wykrycia reakcję w odbiorniku informacji. Znaczące efekty grawitacyjne obserwujemy dopiero przy masach porównywalnych z małymi księżycami. Takie masywne obiekty trudno jednak zmusić do określonego ruchu w nadajniku informacji. Nie widzimy zatem możliwości wykorzystania pola grawitacyjnego jako praktycznego nośnika informacji, przynajmniej przy obecnym stanie wiedzy.

Inaczej jest w przypadku **pola elektromagnetycznego** (w skrócie – **EM**), którego źródłem są ładunki elektryczne.



Rys. 1. Pole elektryczne wokół dodatniego ładunku elektrycznego: a) wektor natężenia pola w punkcie p ; b) siły działające na ładunki próbne q_1 i q_2 .

2. Pole elektryczne i prawo Coulomba

Każdy ładunek elektryczny jest źródłem pola elektrycznego rozciągającego się od ładunku do nieskończoności. W dowolnym punkcie p przestrzeni wokół ładunku Q możemy wprowadzić **wektor natężenia pola elektrycznego** $\vec{E}$, którego kierunek dla nieruchomego ładunku określony jest przez prostą łączącą punkt p z ładunkiem Q , natomiast zwrot dla ładunku dodatniego dobieramy tak, by wektor był skierowany od ładunku do nieskończoności (Rys. 1a). Wielkość wektora $\vec{E}$ (czyli jego moduł E) obliczamy z **prawa Coulomba**:

$$E = k \frac{Q}{r^2}$$

gdzie $k = 9 \cdot 10^9 \text{ [N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}]$ jest pewną stałą fizyczną dla próżni. Ładunek elektryczny mierzymy w jednostkach układu SI zwanych **kulombami** (C). Natężenie pola elektrycznego maleje odwrotnie proporcjonalnie do kwadratu odległości r punktu p od ładunku Q . Oznacza to, że zwiększając dwukrotnie odległość od ładunku, zmniejszamy natężenie pola czterokrotnie. Z drugiej strony, natężenie pola jest proporcjonalne do wartości ładunku będącego jego źródłem (dwukrotnie zwiększając ładunek, dwukrotnie zwiększamy natężenie pola). Jeżeli ładunek umieścimy w ośrodku innym niż próżnia, wartość stałej k może być inna (dla powietrza różnice są nieznaczne).

Wstawiając do prawa Coulomba wartość ładunku Q w kulombach, zaś odległość r w metrach, otrzymamy wartość natężenia pola w N/C (niutonach na kulomb), ale często używamy też innej, równoważnej jednostki – wolt na metr:

$$[E] = \frac{\text{N}}{\text{C}} = \frac{\text{V}}{\text{m}}$$

Pole elektryczne obrazujemy rysując tzw. **linie pola**, czyli linie rozpoczynające się w ładunku i skierowane zgodnie z kierunkiem wektora natężenia pola w danym punkcie przestrzeni. Dla nieruchomego ładunku oznacza to, że linie pola są półprostymi rozchodzącymi się promieniście od źródła do nieskończoności (Rys. 1). Jeżeli ładunek porusza się ruchem niejednostajnym obraz linii pola może się znacznie skomplikować, co zobaczymy w dalszej części lekcji.

Znajomość wektorów natężenia pola pozwala nam znaleźć siłę działającą na inne ładunki umieszczone w polu elektrycznym (Rys. 1b). Jeżeli umieścimy w polu ładunek q , to wartość siły działającej na niego obliczymy ze wzoru:

$$\vec{F} = \vec{E}q$$

$$F = Eq = k \frac{Qq}{r^2}$$

bardzo podobnego do prawa grawitacji, przy czym zamiast mas oddziałujących obiektów pojawiają się tu ładunki elektryczne.

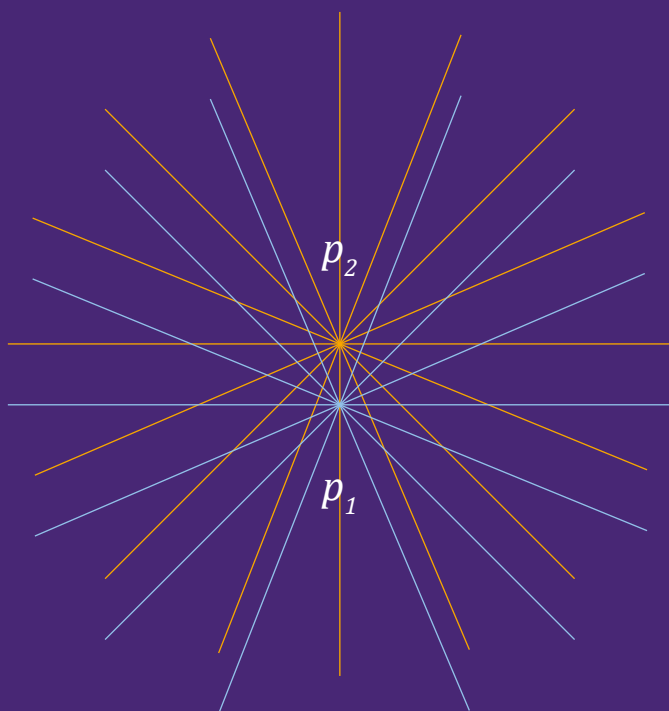
3. Wytwarzanie fali EM

Tak jak w przypadku dźwięku informacja zawarta jest w drganiach ośrodka (np. powietrza), tak samo może być reprezentowana przez drgania pola EM. Oczywiście, w tym przypadku żaden ośrodek nie jest potrzebny.

Spróbujmy na poziomie poglądowym wytłumaczyć powstawanie rozchodzącego się zaburzenia pola EM, które będziemy także nazywać falą EM, analogicznego do fali akustycznej w powietrzu. Trzeba tutaj zaznaczyć, że dokładna analiza tego zjawiska nie jest prosta i wymaga dość zaawansowanej matematyki do rozwiązania, tzw. równań Maxwella. Postaramy się pominąć te zawiłości, nie tracąc fizycznej istoty samego zjawiska.

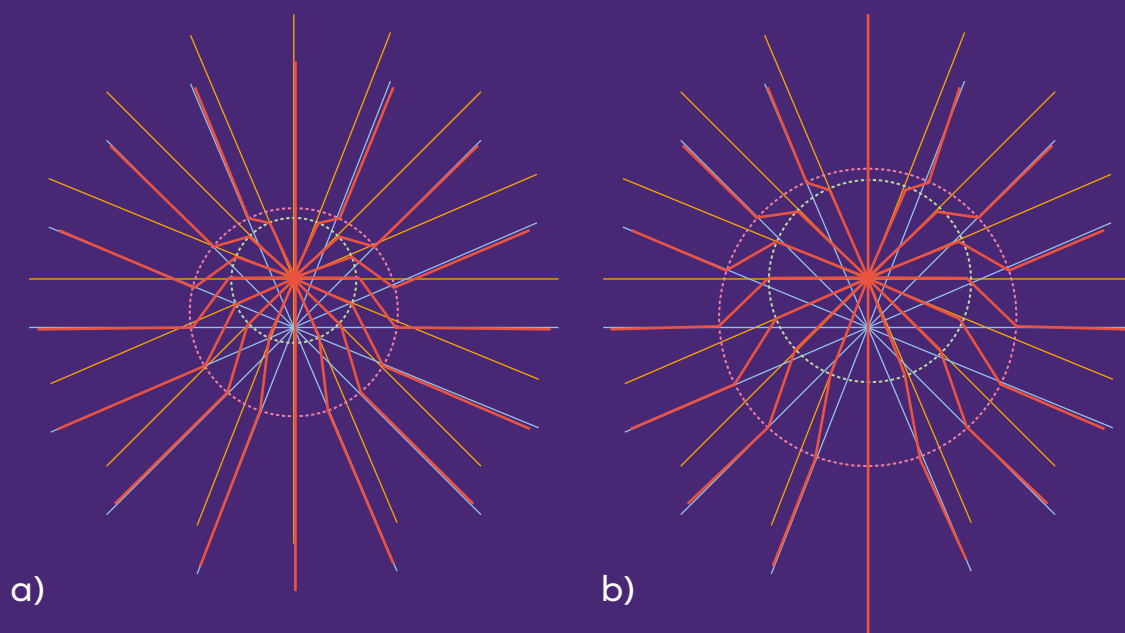
Wyobraźmy sobie pewien nieruchomy ładunek elektryczny umieszczony w punkcie p_1 (Rys. 2). Linie pola elektrycznego wytwarzanego przez ten ładunek oznaczmy kolorem niebieskim. W pewnym momencie ładunek przemieszcza się do góry w kierunku punktu p_2 i ponownie nieruchomieje. Gdyby tkwił tam bardzo długo, linie pola powinny przebiegać tak jak te, oznaczone kolorem pomarańczowym.

Dlaczego musimy zaznaczyć, że tak będzie dopiero po długim czasie? Wynika to z tego, że żaden sygnał nie może przenosić się szybciej niż maksymalna prędkość, którą utożsamiamy z prędkością światła próżni, oznaczaną zwyczajowo przez c i równą $3 \cdot 10^8$ m/s. Zauważmy, że linie pola, jako półproste rozchodzące się promieniście od ładunku do nieskończoności, zawierają w sobie informację o położeniu ładunku. Nawet w odległym zakątku Wszechświata, gdzie przecież linie pola także docierają, możemy wziąć dwie różne linie pola, wyznaczyć ich punkt przecięcia i dokładnie w tym miejscu spodziewać się ładunku elektrycznego. Gdyby przemieszczenie ładunku z punktu p_1 do punktu p_2 spowodowało równoczesne przemieszczenie wszystkich linii pola na miejsce oznaczone kolorem pomarańczowym, natychmiastowo dowiedzielibyśmy się w odległym zakątku Wszechświata o tym, że ładunek się przesunął.



Rys. 2. Linie pola ładunku umieszczonego w punkcie p_1 oraz linie pola tego samego ładunku przemieszczonego do punktu p_2 (po odpowiednio długim czasie).

Byłoby to zatem sprzeczne z istnieniem ograniczonej prędkości przenoszenia informacji. W rzeczywistości informacja o ruchu ładunku powinna dotrzeć do odległych punktów z opóźnieniem, tym większym, im większa jest odległość punktu obserwacji od poruszającego się ładunku.



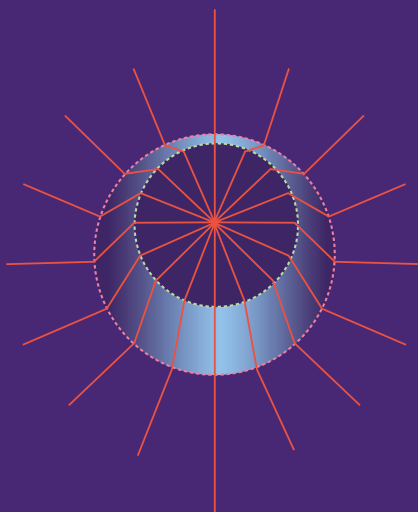
Rys. 3. Przebieg linii pola elektrycznego po przesunięciu ładunku elektrycznego po pewnej chwili (a) oraz po nieco dłuższym czasie (b).

Jak to zatem będzie wyglądać naprawdę? Załóżmy, że ładunek przemieścił się do punktu p_2 i spójrzmy na linie pola po bardzo krótkim czasie. Informacja o nowym położeniu ładunku zacznie rozchodzić się z prędkością c tak, że obejmie ona wszystkie punkty wewnątrz okręgu zaznaczonego na Rys. 3a na zielono. Linie pola wewnątrz tego okręgu możemy zatem skierować zgodnie z liniami pomarańczowymi odpowiadającymi nowemu położeniu ładunku (linie czerwone). Jednak informacja o ruchu ładunku nie mogła jeszcze dotrzeć do punktów na zewnątrz okręgu oznaczonego kolorem różowym. Promień tego okręgu uzależniony jest od czasu, jaki upłynął od chwili, w której ładunek zaczął się poruszać. Na zewnątrz okręgu czerwone linie pola muszą zatem przebiegać wzdłuż linii niebieskich (początkowych).

Co dzieje się pomiędzy okręgami zielonym i różowym? Niestety, jest to dość skomplikowane. W tym obszarze dochodzi do szybkiej zmiany pola elektrycznego, a tym samym do generowania pola magnetycznego (do tej pory pomijaliśmy je w naszej dyskusji). Jest to obszar, który możemy utożsamiać z **zaburzeniem pola EM – falą elektromagnetyczną** rozchodzącą się od poruszającego się ładunku ku nieskończoności. Ponieważ promienie obu okręgów powiększają się z prędkością c , taka też jest prędkość przemieszczania się fali EM. Dla uproszczenia zaznaczymy linie pola elektrycznego w obszarze zaburzenia łącząc odpowiadające sobie linie pola koloru niebieskiego i pomarańczowego w jedną linię łamaną (pamiętajmy jednak o umowności tego obrazu).

Po nieco dłuższej chwili oba okręgi powiększą się i obszar zaburzenia pola przemieści się dalej od ładunku wytwarzającego pole (Rys. 3b). Po odpowiednio długim czasie okrąg zielony wyjdzie poza obszar rysunku, zatem linie pola będą przebiegać dokładnie wg linii pomarańczowych jak na Rys. 2.

Energia fali EM jest największa tam, gdzie zmienność pola jest największa. Możemy te miejsca zidentyfikować w przybliżeniu nawet na podstawie uproszczonego obrazu z Rys. 3, jako obszar zawierający najbardziej „załamane” linie pola. Jak widzimy, linie pola skierowane wzdłuż prostej, po której poruszał się ładunek (linii pionowej), nie są załamane w ogóle. W tym kierunku nie dochodzi do emisji energii. W kierunku prostym do kierunku poruszania się ładunku obserwujemy za to największe załamanie linii pola – tutaj emisja energii jest największa. Na Rys. 4 przedstawiono różnice w rozkładzie energii fali EM w obszarze zaburzenia pola poprzez różne zacieniowanie obszaru.



Rys. 4. Zacieniowanie obszaru zaburzenia pola EM odpowiada energii fali (im obszar ciemniejszy, tym większa energia).

Widzimy zatem, że poruszający się po linii prostej ładunek nie emituje energii równomiernie we wszystkich kierunkach. Choć często będziemy się odwoływać przy analizie fal EM do analogii fal na powierzchni wody czy fal akustycznych, pamiętajmy, że pod tym względem fala EM różni się od rozchodzącej się na powierzchni wody fali kolistej. Jest to bardzo ważny wniosek z punktu widzenia konstrukcji anten, do których przejdziemy w dalszej części lekcji.

4. Natężenie fali EM oraz jej zmienność z odległością od źródła

Musimy zaznaczyć, że powyższą analizę przeprowadziliśmy dla uproszczenia w jednej płaszczyźnie (płaszczyźnie rysunku). W rzeczywistości linie pola rozchodzą się od ładunku promieniście we wszystkich kierunkach przestrzeni trójwymiarowej, zaś koła oznaczone na Rys. 3 i Rys. 4 są tak naprawdę sferami o rosnących w czasie promieniach. Przypatrzmy się jaki to ma wpływ na zmienność energii fali EM w czasie i przestrzeni, gdy oddala się ona od źródła.

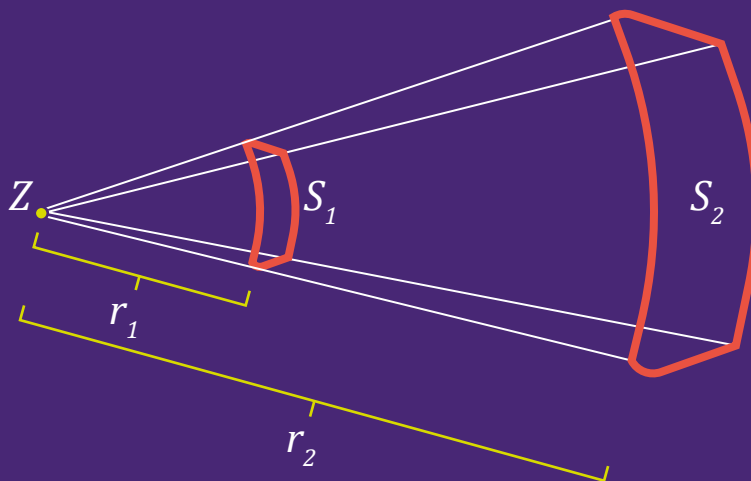
Jak już wspomnieliśmy wcześniej, energia fali EM skupiona jest pomiędzy sferami zieloną i czerwoną (tak już je teraz nazywajmy). To zaburzenie pola EM wywołane przez ruch ładunku elektrycznego oderwało się niejako od tego ładunku i rozpoczyna swoją wędrówkę ku nieskończoności. Energia fali, jeżeli nie jest pochłaniana przez ośrodek, w którym się rozchodzi (np. w próżni do pochłaniania nie dochodzi, ale w materii już może), musi być niezmienna zgodnie z zasadą zachowania energii. Sfery, na których ta energia jest rozłożona (nierównomiernie!) z każdą chwilą powiększają się jednak w czasie. Jeżeli wybierzemy jakiś punkt sfery (np. zielonej), to w trakcie jej powiększania energia fali w tym punkcie musi maleć. Jako pewną analogię możemy tu przywołać smarowanie chleba masłem. Biorąc określoną ilość masła, jeżeli będziemy rozsmarowywać ją na coraz to większych kromkach chleba, to ilość masła w wybranym miejscu (np. środku kromki) będzie coraz mniejsza.

Wielkość energii niesiona przez falę EM związana jest z tzw. **natężeniem fali** oznaczanym literą I .

Uwaga: nie pomyłmy natężenia fali z natężeniem pola elektrycznego! Dokładna analiza w teorii pola EM wskazuje, że natężenie fali I oraz natężenie pola E związane są zależnościami:

$$I \propto E^2$$

tzn. natężenie fali jest wprost proporcjonalne do kwadratu natężenia pola.



Rys. 5. Analiza rozkładu energii na powiększających się wycinkach sfery.

Natężenia pola na wybranych wycinkach powiększającej się sfery są odwrotnie proporcjonalne do powierzchni tych wycinków (Rys. 5):

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{S_1}{S_2}$$

Z drugiej strony, powierzchnie wycinków mają się do siebie tak, jak kwadraty promieni:

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{r_1^2}{r_2^2}$$

Dlaczego? Łatwo to zrozumiemy, gdy przybliżymy wycinki sfer kwadratami. Rozmiary liniowe kwadratu rosną proporcjonalnie do promienia (geometryczne podobieństwo odpowiednich figur). Wiemy, natomiast, że pole kwadratu jest równe kwadratowi jego boku – stąd proporcjonalność pola figury do kwadratu promienia sfery.

Ostatecznie:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{S_1}{S_2} = \frac{r_1^2}{r_2^2} \Rightarrow I_2 = I_1 r_1^2 \frac{1}{r_2^2} \propto \frac{1}{r^2} \Rightarrow I \propto \frac{1}{r^2}$$

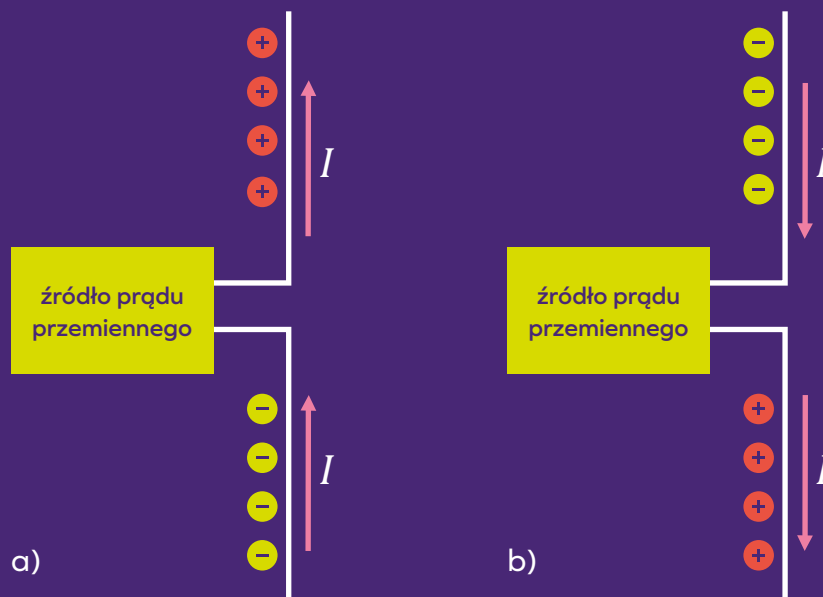
czyli natężenie fali EM spada odwrotnie proporcjonalnie do kwadratu odległości od źródła. Ponieważ, jak wcześniej wspomnieliśmy, natężenie fali jest proporcjonalne do kwadratu natężenia pola, wartość natężenia pola w obszarze zaburzenia pola EM maleje odwrotnie proporcjonalnie do odległości od źródła:

$$E_{fali\ EM} \propto \frac{1}{r}$$

Podkreślmy – przez $E_{fali\ EM}$ rozumiemy wartość natężenia pola (zmienną w czasie) w obszarze fali EM, nie wartość natężenia pola od nieruchomego ładunku elektrycznego, która (jak pamiętamy z prawa Coulomba) maleje odwrotnie proporcjonalnie do **kwadratu** odległości od źródła. Różnica w tej zmienności jest ogromna (patrz „Praca domowa”). Wpływ fali EM na odległe ładunki elektryczne jest dzięki temu znacznie większy, niż by się mogło wydawać na podstawie prawa Coulomba.

5. Nadawanie i odbieranie sygnału EM

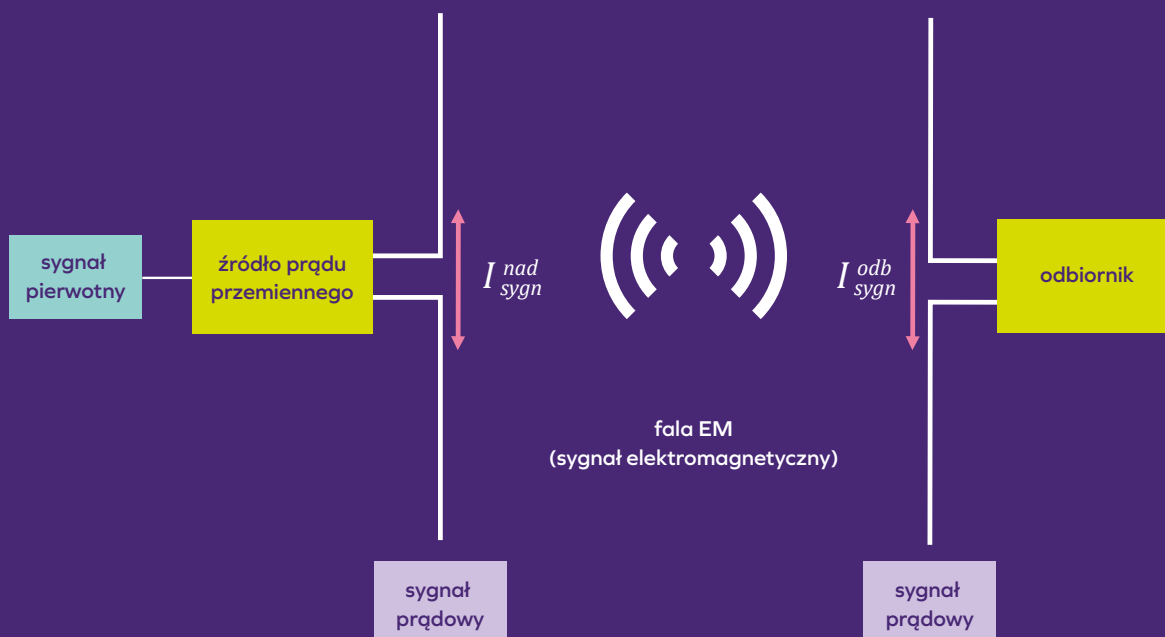
Jak w praktyce konstruujemy nadajniki fal EM? Na Rys. 6 przedstawiono przykład tzw. **anteny dipolowej**, czyli dwóch odcinków przewodu połączonych ze źródłem prądu przemiennego. Odcinki te nie tworzą obwodu zamkniętego, nie jest możliwy zatem przepływ prądu stałego, ale naszym celem jest w tym przypadku tylko wywołanie ruchu ładunków raz w jedną, to w drugą stronę. Rys. 6a przedstawia sytuację, w której prąd płynie w kierunku górnego odcinka ładując go dodatnio. W tym samym czasie ujemnie ładuje się drugi przewód anteny. W kolejnym cyklu prąd płynie w przeciwną stronę i dodatnio ładuje się odcinek dolny anteny (ujemnie zaś górny). Potem cykl się powtarza. Ruch ładunków w antenie staje się dzięki temu ciągłym źródłem fali EM, w przeciwieństwie do pojedynczego, chwilowego ruchu ładunku jak na Rys. 4, gdzie przedstawiono emisję pojedynczego, krótkiego zaburzenia pola.



Rys. 6. Antena dipolowa jako nadajnik fali EM. Przepływ prądu w kierunku górnego odcinka anteny (a) oraz w przeciwną stronę (b).

O tym, jak wykorzystać wzbudzoną falę do przesyłania użytecznej informacji, powiemy w Lekcji 7. Teraz przyjrzymy się tylko konstrukcji odbiornika sygnału elektromagnetycznego. Na Rys. 7 widzimy po lewej stronie nadajnik, w którym źródło prądu przemiennego połączone z anteną dipolową sterowane jest przez określony sygnał pierwotny zgodny z informacją, którą chcemy przesłać. W antenie wzbudzony zostanie naprzemienny prąd, który generuje falę EM rozchodzącą się wokół anteny. Jak już wcześniej zauważyliśmy, głównym kierunkiem emisji energii jest kierunek prostopadły do kierunku ruchu ładunków, czyli w tym przypadku jest to kierunek prostopadły do anteny.

Odbiornik jest skonstruowany bardzo podobnie do nadajnika, poza tym, że w miejsce źródła prądu umieszczony jest odpowiedni układ do pomiaru i ewentualnego wzmocnienia odbieranego sygnału. Fala EM docierająca do anteny dipolowej w odbiorniku powoduje pobudzenie ruchu ładunków (elektronów pod wpływem $E_{fali\ EM}$) w przewodach anteny – zostaje w nich zatem wzbudzony prąd przemienny. Jeżeli odbiornik jest daleko od źródła, natężenie pola EM docierającego do anteny może być bardzo małe, po wzmocnieniu jest jednak jak najbardziej mierzalne. W ten sposób sygnał zostaje przekazany bezprzewodowo do odbiorcy i może być dalej obrabiany i interpretowany.



Rys. 7. Nadajnik i odbiornik sygnału elektromagnetycznego.

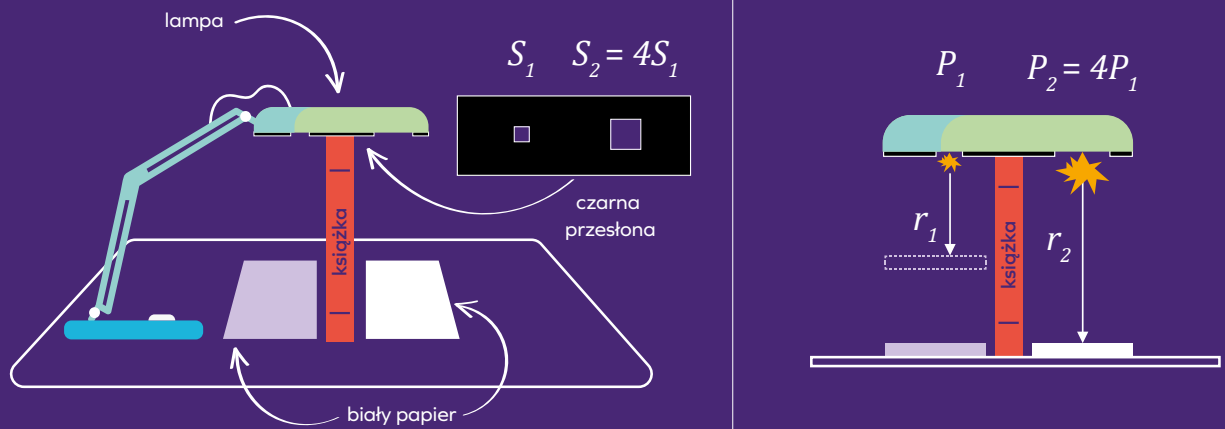
Szerokie zastosowanie pola elektromagnetycznego w przesyłaniu informacji możemy zatem uzasadnić następującymi powodami:

- łatwością generowania fal EM i kształtowania ich zgodnie z zawartością informacyjną,
- dalekim zasięgiem fal EM oraz brakiem ośrodka do ich transportu (rozchodzą się nawet w próżni),
- możliwością łatwego odbioru fal EM nawet o bardzo małych natężeniach.



Doświadczenie

Celem doświadczenia jest potwierdzenie ilościowej zależności natężenia fali od odległości od źródła. Doświadczenie możemy wykonać na biurku z lampą na wysięgniku i długą świetlówką. Lampa będzie pełniła rolę źródła fali EM (o tym, że światło faktycznie jest falą EM powiemy w Lekcji 6). Lampę owijamy czarnym kartonem, w którym wycinamy dwa kwadratowe otwory, jeden o boku 1 cm, drugi o boku 2 cm (Rys. 8). Dzięki temu pole powierzchni drugiego otworu jest czterokrotnie większe niż pierwszego.



Rys. 8. Schemat doświadczenia.

Na biurku stawiamy pionowo grubą, dużą książkę, po czym przysuwamy lampę do książki tak, by światło wychodzące z obu otworów przesłony z kartonu oświetlało tylko obszar leżący po odpowiedniej stronie książki. Na biurku po obu stronach książki kładziemy dwie białe kartki papieru, po czym zaciemniamy pomieszczenie tak, by lampa była jedynym źródłem światła.

Powinniśmy zauważyć, że kartka po stronie mniejszego otworu jest oświetlona wyraźnie słabiej. Otwory w przesłonie grają rolę wtórnych źródeł światła, przy czym ich moc jest proporcjonalna do powierzchni otworu. Ponieważ powierzchnia prawego otworu jest czterokrotnie większa niż pierwszego, moc źródła światła po prawej stronie również jest czterokrotnie większa, a skoro kartki znajdują się w tej samej odległości od źródeł, natężenie fali padającej na kartkę po stronie lewej jest tyle samo razy mniejsze.

Ustawmy się teraz przed biurkiem tak, by łatwo nam było ocenić stopień oświetlenia obu kartek. Zaczniemy powoli unosić kartkę po lewej stronie cały czas porównując stopień oświetlenia obu kartek. Kiedy uznamy, że obie kartki oświetlone są w tym samym stopniu, zmierzmy odległość r_1 pomiędzy uniesioną kartką i przesłoną i porównajmy ją z wysokością książki (równą r_2 , czyli odległości prawej kartki od przesłony).

Czy stosunek tych odległości jest bliski $\frac{1}{2}$, innymi słowy, czy kartka została uniesiona w przybliżeniu do połowy wysokości książki?

Zauważmy, że zgodnie z prawem zmniejszania się natężenia fali z odległością, powinno ono maleć odwrotnie proporcjonalnie do kwadratu odległości. Z drugiej strony spodziewamy się wprost proporcjonalnej zależności natężenia fali od mocy źródła P . Powinno zatem być:

$$I = a \frac{P}{r^2}$$

gdzie a jest pewnym stałym mnożnikiem. Natężenie fali (oświetlenia) obu kartek wyliczymy zatem jako:

$$I_1 = a \frac{P_1}{r_1^2}, \quad I_2 = a \frac{4P_1}{r_2^2}$$

askoro oba natężenia są sobie równe (przy uniesionej lewej kartce), otrzymujemy:

$$I_1 = I_2 \Rightarrow a \frac{P_1}{r_1^2} = a \frac{4P_1}{r_2^2} \Rightarrow \frac{r_1^2}{r_2^2} = \frac{1}{4} \Rightarrow \frac{r_1}{r_2} = \frac{1}{2}$$



Słowniczek

Antena dipolowa (dipol) – układ dwóch symetrycznie ułożonych przewodów; przy zasilaniu prądem przemiennym generuje falę EM, przy czym kierunkiem o największym natężeniu emitowanej fali jest kierunek prostopadły do osi, wzdłuż której umieszczone są przewody; może też służyć jako odbiornik fal EM.

Fala elektromagnetyczna (EM) – zaburzenie pola elektromagnetycznego wywołane przez poruszające się z przyspieszeniem ładunki elektryczne.

Linie pola – linie w przestrzeni skierowane zgodnie z kierunkiem wektora natężenia pola; w przypadku nieruchomego ładunku elektrycznego są to półproste zaczepione na ładunku i rozchodzące się promieniście do nieskończoności.

Natężenie pola elektrycznego – wektor, którego wartość zależy od siły, z którą pole działa na jednostkowy dodatni ładunek próbny; obliczane z prawa Coulomba; jego jednostką w układzie SI jest [V/m].

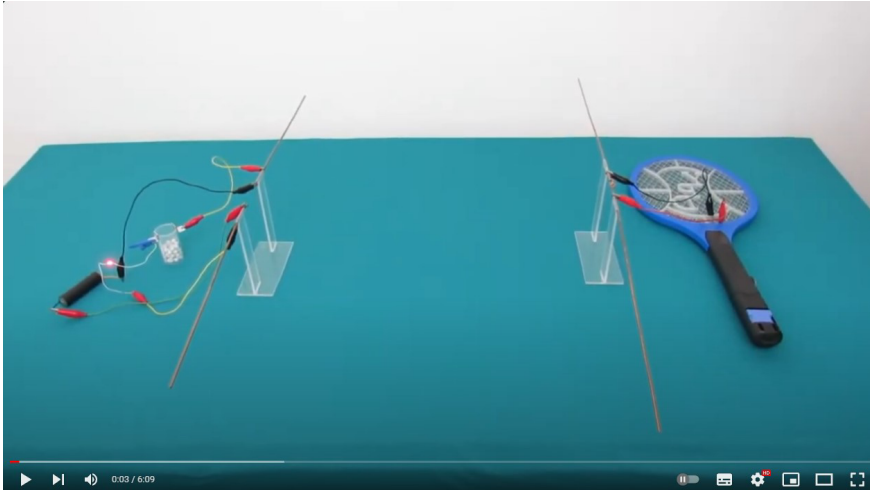
Natężenie fali elektromagnetycznej – wielkość opisująca energię niesioną przez zaburzenie pola EM. Jednostka – W/m² (wat na metr kwadratowy).

Pole elektromagnetyczne (EM) – pole fizyczne o zasięgu nieskończonym wytwarzane przez ładunki elektryczne.



Materiały zewnętrzne

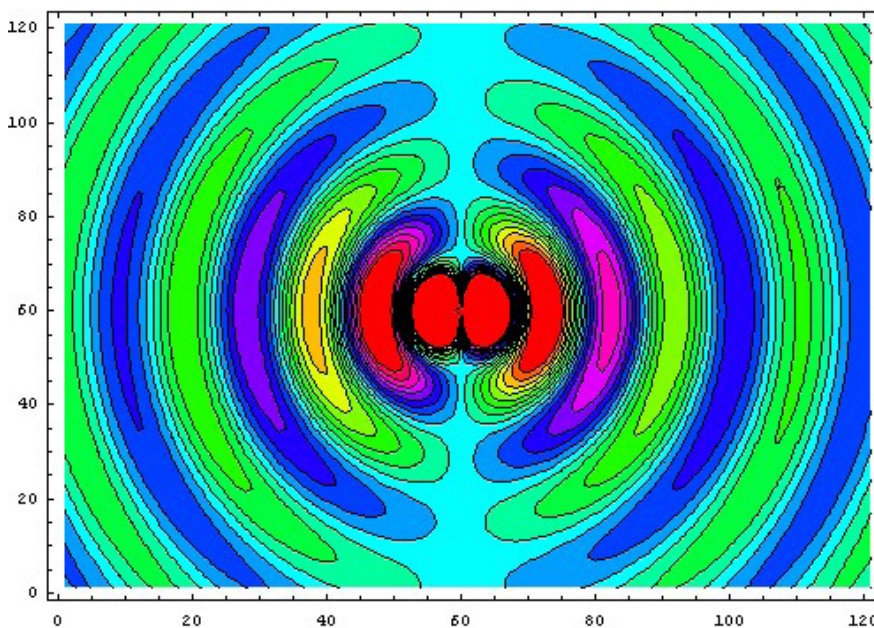
1. Prosty eksperyment demonstrujący przesyłanie fal EM (tytuł w języku angielskim: *Science Project – Easy experience to detect electromagnetic waves*).



Zeskanuj QR kod



2. Animacja obrazująca emisję fali EM przez antenę dipolową. Źródło: Wikipedia. Nazwa pliku: Dipole.gif



Zeskanuj QR kod





Praca domowa

1. Porównaj zmienność typu $1/r$ ze zmiennością typu $1/r^2$. Oblicz wartości tych wyrażeń dla różnych r i wypełnij poniższą tabelkę. Czy uzyskane wyniki pozwalają ci porównać w dużej odległości od ładunku wartość natężenia pola nieruchomego ładunku (obliczoną z prawa Coulomba) do wartości w obszarze fali EM wywołanej chwilowym ruchem tego ładunku?

r	1	2	5	10	100	1000
$1/r$						
$1/r^2$						

2. Narysuj przebieg linii pola dla ładunku, który w pewnym momencie zaczyna się przemieszczać z miejsca przecięcia linii niebieskich do miejsca przecięcia linii żółtych. Promień okręgu czerwonego powiększa się z prędkością c od momentu rozpoczęcia ruchu ładunku, zaś promień okręgu powiększa się z tą samą prędkością od momentu dotarcia ładunku do punktu docelowego (rysunek analogiczny do Rys. 3):

Lekcja 3

Ruch falowy

Cel

- Przedstawienie podstawowych pojęć dotyczących ruchu falowego.

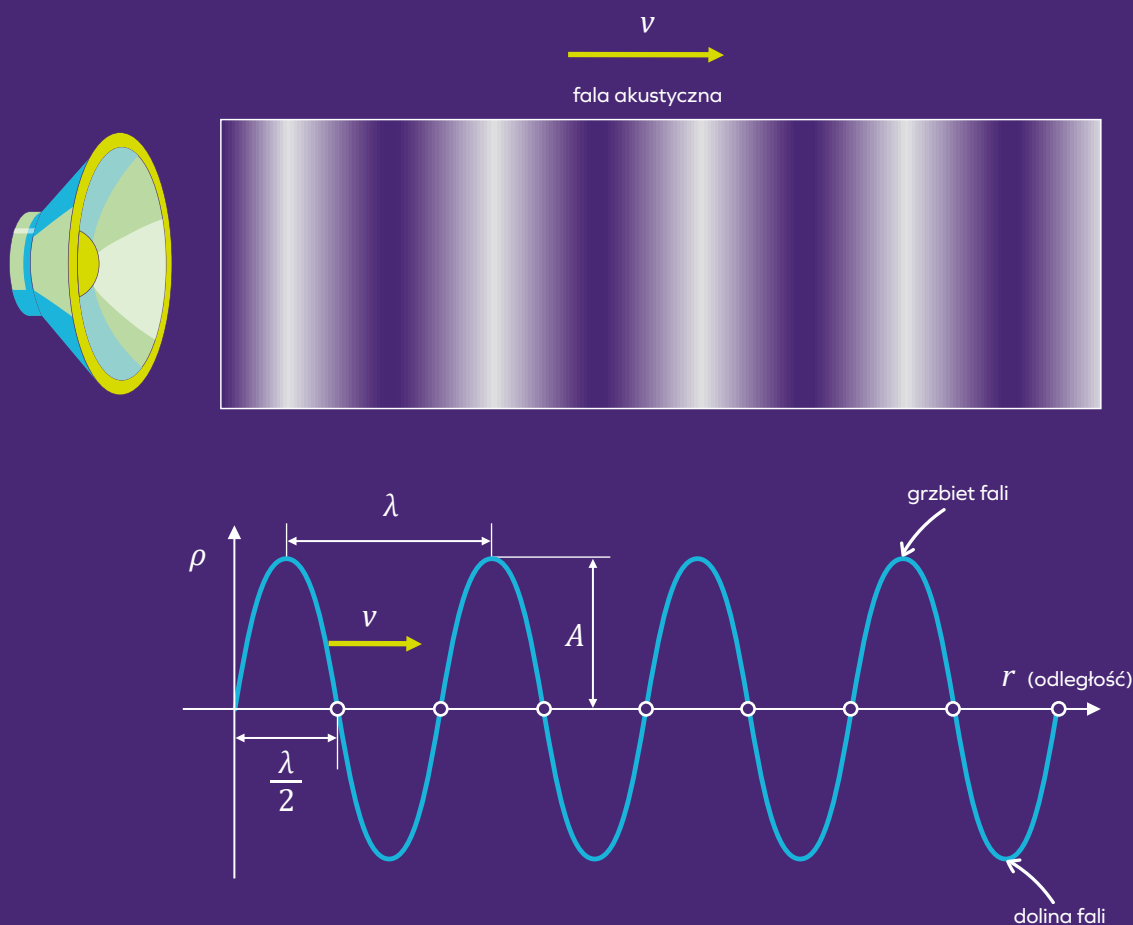
Efekty kształcenia

- Uczeń potrafi wymienić główne wielkości opisujące falę harmoniczną.
- Uczeń zna zależności wiążące wielkości opisujące falę harmoniczną i potrafi je wykorzystać w praktyce.
- Uczeń potrafi wskazać związek między falą harmoniczną a ruchem punktu po okręgu.
- Uczeń potrafi obliczyć minimalny rozmiar anteny, przy którym można osiągnąć efektywną energetycznie transmisję sygnału elektromagnetycznego.



1. Fala harmoniczna i jej cechy charakterystyczne

Przez **ruch falowy** rozumiemy rozchodzące się zaburzenie pewnego ośrodka sprężystego lub pola fizycznego. Jako przykłady ruchu falowego często przywołuje się fale na wodzie lub dźwięk, tzn. falę akustyczną. Fala elektromagnetyczna, którą wprowadziliśmy w Lekcji 2, nie wymaga materialnego ośrodka – to zaburzenie pola elektromagnetycznego obecnego nawet w próżni.



Rys. 1. Ruch falowy na przykładzie fali akustycznej. Główne parametry fali harmonicznej.

Fala akustyczna jest ciągiem zagęszczeń i rozrzedzeń powietrza. Może być generowana przez poruszającą się ruchem drgającym membranę głośnika. Membrana porusza się tak szybko, że powietrze w jej najbliższym sąsiedztwie nie zostaje od razu odepchnięte (jak np. w przypadku machnięcia ręką) lecz ulega sprężeniu – jego gęstość rośnie powyżej średniej gęstości powietrza. Dopiero po chwili sprężone powietrze popycha dalej położone warstwy powietrza także prowadząc do ich sprężenia. W tym czasie membrana

głośnika cofa się prowadząc do powstania strefy rozrzedzonego powietrza. Zaburzenie zaczyna propagować zachowując podobny wzorec zagęszczenia/rozrzedzenia nawet daleko od źródła. Jeżeli głośnik emituje tzw. ton czysty (o jednej częstotliwości), powstająca fala ma charakter tzw. fali harmonicznej (zobacz Rys. 1, gdzie różne stopnie zacinienia odpowiadają różnej gęstości powietrza).

Przyjmijmy dla uproszczenia, że jest to fala płaska (tzn. miejsca o danej gęstości są równoległymi płaszczyznami) oraz energia fali nie jest rozpraszana. Dzięki temu wielkość zaburzeń będzie taka sama nawet w oddaleniu od źródła. Przyjrzyjmy się cechom charakterystycznym fali harmonicznej.

Jeżeli wykonamy wykres gęstości powietrza ρ w zależności od odległości r od źródła otrzymamy regularny ciąg **grzbietów** oraz **dolin** fali – tzn. miejsc o odpowiednio największej i najmniejszej gęstości powietrza (Rys. 1). W przypadku ogólnego ruchu falowego grzbiety i doliny związane są ze skrajnymi odchyleniami ośrodka (lub pola) od stanu równowagi. Np. dla fali na wodzie grzbiet to najwyższe położenie powierzchni wody, zaś dolina – najniższe.

Odległość między kolejnymi grzbietami (lub dolinami) fali nazywamy **długością fali** i oznaczamy przez λ . Wielkość zaburzenia mierzoną od położenia równowagi do maksymalnego odchylenia od równowagi nazywamy **amplitudą** i oznaczamy przez A (zauważ, że nie chodzi o odstęp między grzbietem a doliną – ten odstęp jest równy podwojonej amplitudzie). **Prędkość** przemieszczania się fali oznaczamy przez v . Dla dźwięku w powietrzu wynosi ona ok. 340 m/s.

Jak powiedzieliśmy, fala jest zaburzeniem rozchodzącym się w przestrzeni. Jeżeli jednak wybierzemy jeden, konkretny punkt w przestrzeni i będziemy obserwować zachowanie się ośrodka (lub pola) w czasie, kiedy przechodzi przez niego fala, dostrzeżemy po prostu ruch drgający. Tzn. zamiast wykonywać wykres jak na Rys. 1 w przestrzeni (w zależności od r), możemy wykonać analogiczny wykres w czasie (w zależności od t). Możemy wtedy zapytać jak długo trwa pełen cykl drgania ośrodka (lub pola), czyli czas pomiędzy przejściem dwóch kolejnych grzbietów fali. Czas ten nazywamy **okresem** i oznaczamy przez T . Liczbę cykli drgania w ciągu 1 s nazywamy **częstotliwością** i oznaczamy przez f . Częstotliwość podajemy zazwyczaj w hercach – Hz (1 Hz jest odwrotnością 1 sekundy).

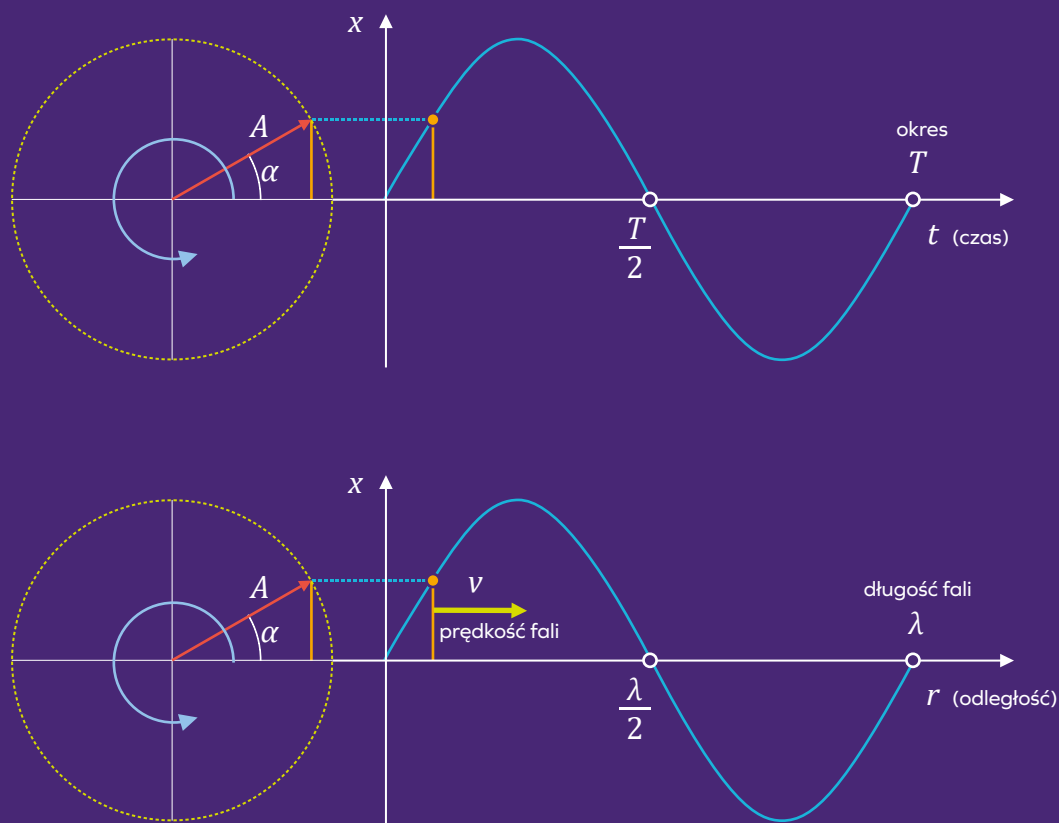
Istnieje bardzo prosta zależność pomiędzy okresem i częstotliwością:

$$f = \frac{1}{T} \text{ [Hz]}$$

$$1 \text{ Hz} = \frac{1}{1 \text{ s}}$$

2. Fala harmoniczna jako obraz ruchu po okręgu

Zauważmy, że tak naprawdę nie powiedzieliśmy jeszcze, czym dokładnie jest fala harmoniczna. Istnieje bardzo ścisły związek pomiędzy falą tego typu i ruchem jednostajnym po okręgu.



Rys. 2. Fala harmoniczna jako obraz ruchu punktu po okręgu.

Wyobraźmy sobie okrąg o promieniu równym amplitudzie A fali oraz punkt poruszający się po tym okręgu ruchem jednostajnym tak, że pokonuje on całą długość okręgu w ciągu okresu T (Rys. 2). Wysokość punktu nad wybraną średnicą okręgu (tutaj — poziomą) będziemy nanosić na wykres w zależności od czasu. W efekcie odtworzymy przebieg, który dokładnie odpowiada jednemu okresowi drgania harmonicznego. Kilka etapów ruchu po okręgu pokazano bardziej szczegółowo na Rys. 3.

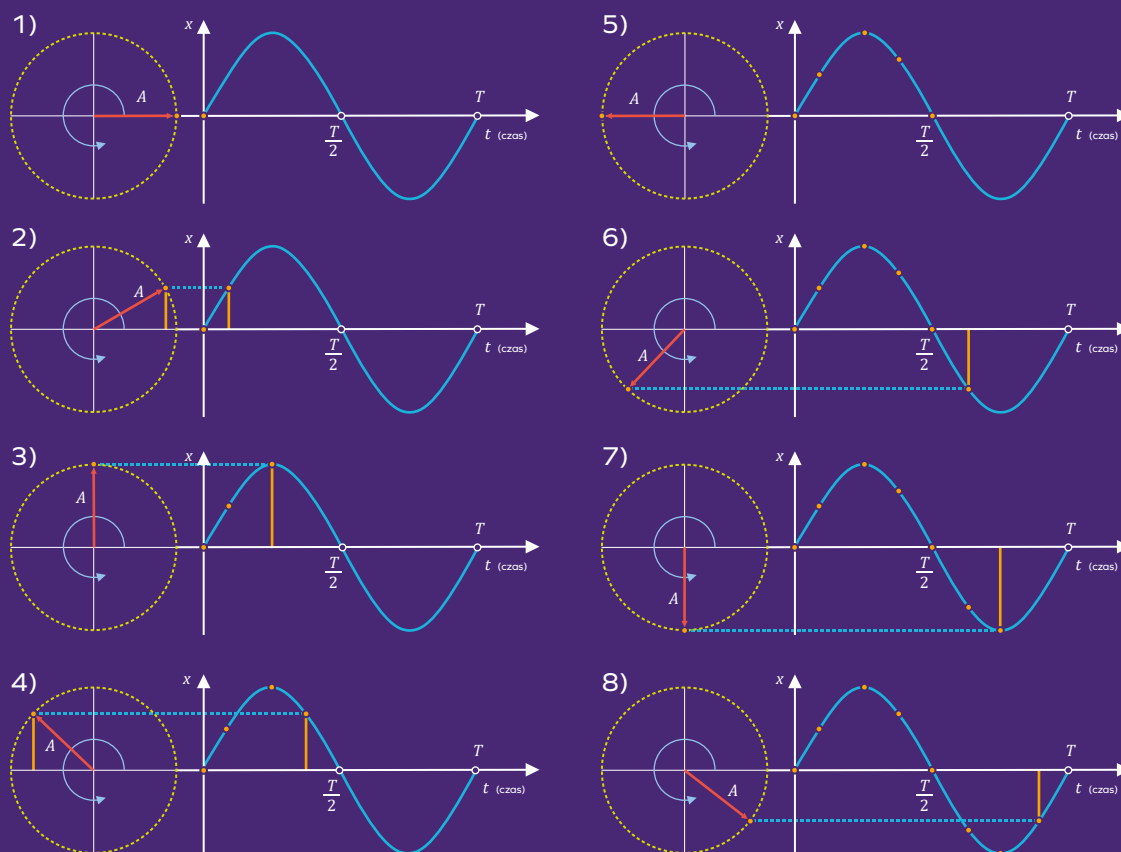
Analogicznie możemy wykonać wykres w przestrzeni. Tym razem na osi odciętych nie będziemy odkładać czasu t , lecz drogę r pokonywaną przez falę w czasie t czyli, zakładając jednostajną prędkość fali, $r = vt$. Odtworzymy w ten sposób jeden, pełny wycinek fali harmonicznego tzn. jedną długość fali. Poprzez kontynuowanie ruchu po okręgu możemy odtworzyć całą falę harmoniczną.

Jak widzimy, w ciągu jednego okresu fala przebywa odległość równą długości fali. Otrzymujemy zatem bardzo użyteczną zależność:

$$vT = \lambda$$

którą możemy zapisać inaczej jako:

$$v = \lambda f$$

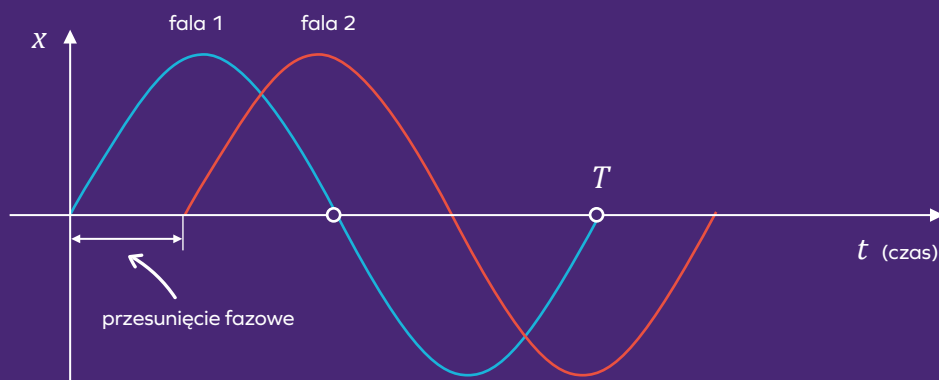


Rys. 3. Wybrane etapy ruchu po okręgu i odpowiadające im momenty cyklu drgania ośrodka (lub pola).

3. Faza i przesunięcie fazowe

Zarówno na Rys. 2, jak i na Rys. 3 odchylenie od stanu równowagi w chwili $t=0$ jest zerowe. Kiedy rozpatrujemy tylko jedną falę lub jeden ruch drgający, zawsze możemy ustalić chwilę $t=0$ na moment, kiedy właśnie osiągnięty jest (przynajmniej chwilowo) stan równowagi. Kiedy drgań jest więcej lub mamy do czynienia z większą liczbą nakładających się na siebie fal, to w ogólnym przypadku nie da się wszystkich zsynchronizować tak, by równocześnie występował stan równowagi wszędzie. Dlatego warto wprowadzić pojęcie fazy drgań.

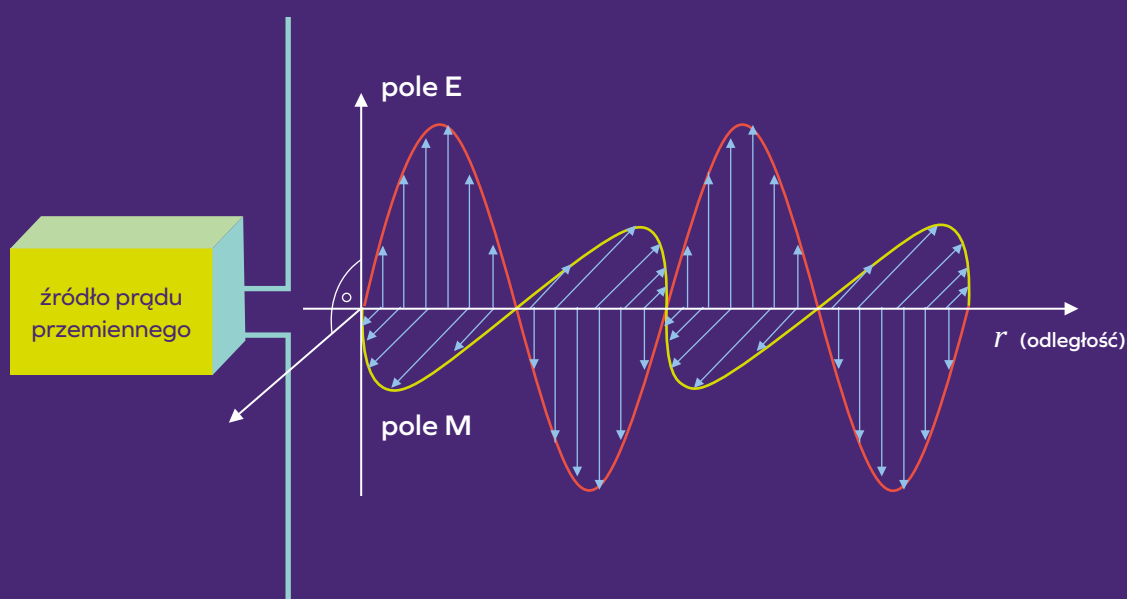
Przez **fazę** będziemy rozumieć wielkość fizyczną, która określa, w którym momencie okresu znajduje się dany obiekt podlegający drganiom. Możemy np. powiedzieć, że ruch drgający w dwóch różnych punktach przestrzeni ma tę samą fazę, jeżeli w obu miejscach fala osiągnęła stan równowagi lub w obu – grzbiet fali. Jeżeli taka synchronizacja nie zachodzi, mówimy, że pomiędzy drganiami występuje **przesunięcie fazowe** rozumiane jako różnica faz (Rys. 4).



Rys. 4. Przesunięcie fazowe pomiędzy drganiami w różnych punktach.

4. Fala EM i dobór długości anteny

Wszystkie pojęcia, które wprowadziliśmy wcześniej dla harmonicznej fali akustycznej, mają również zastosowanie do harmonicznych fal elektromagnetycznych (EM), które możemy wzbudzić np. w antenie dipolowej korzystając ze źródła prądu przemiennego (Rys. 5). Zatem także w przypadku fal EM możemy mówić o długości fali, częstotliwości, amplitudzie, prędkości oraz fazie.



Rys. 5. Fala elektromagnetyczna jako drgania pola EM.

Ponieważ zmienne w czasie pole elektryczne prowadzi do wzbudzenia zmiennego pola magnetycznego, oba te pola występują razem w propagującej fali. Co więcej, wektory natężenia tych pól są w próżni do siebie prostopadłe oraz są prostopadłe do kierunku rozchodzenia się fali. Mówimy, że fala EM jest falą **poprzeczną**. Fala akustyczna natomiast jest falą **podłużną** – w jej przypadku kierunek, w którym dochodzi do zagęszczeń/rozrzedzeń powietrza, jest zgodny z kierunkiem rozchodzenia się fali.

Okazuje się, że aby emisja fali EM przez antenę dipolową była efektywna energetycznie, długość l anteny nie powinna być mniejsza niż połowa długości emitowanej fali:

$$l \geq \frac{\lambda}{2}$$

Nie oznacza to, że krótsza antena nie będzie emitowała fali. Może jednak wymagać więcej energii dostarczanej ze źródła prądu, by uzyskać wymaganą energię fali EM (co przekłada się m.in. na zasięg transmisji). Często dobiera się długość anteny tak, by była dokładnie równa połowie długości fali. Uzyskuje się dzięki temu specyficzne warunki, przy których napięcie elektryczne na krańcach anteny okresowo się zmienia na grzbiet i dolinę wzbudzonej w przewodach anteny fali, zaś prąd elektryczny przyjmuje maksymalną wartość przy środku anteny (tzw. fala stojąca). Animację obrazującą to zjawisko można obejrzeć w „Materiałach zewnętrznych” (1).

Uwaga: dla anten innego typu wprowadzony warunek może mieć inną postać. Np. dla tzw. anteny monopolowej zasilanej na jednym z końców jej długość powinna być większa niż jedna czwarta długości fali. Zależności te staną się istotne w Lekcji 7, gdzie wprowadzimy koncepcję modulacji sygnału.



Doświadczenie

Przygotuj duży pojemnik z wodą, może być płytki, ważne tylko by jego ściany były znacznie od siebie oddalone. W warunkach domowych może to być wanna z niewielką ilością wody. Zbiornik powinien być od góry oświetlony tak, by wyraźnie było widać na dnie zbiornika cień fal na powierzchni wody.



Rys. 6. Doświadczenie z falami na powierzchni wody.

1. Dotknij palcem powierzchni wody. Na dnie powinien być widoczny cień kółka rozchodzącej się fali powierzchniowej. Zwróć uwagę, że fala rozchodzi się z określoną prędkością niezależną od tego, jak głęboko zanurzysz palec.
2. Zaczynaj rytmicznie poruszać palcem w wodzie (ok. 2 razy na sekundę). Jaka wielkość fizyczna związana jest z tempem, w którym poruszasz palcem? Zaobserwuj następujące po sobie grzbiety i doliny rozchodzącej się fali. Potrafisz oszacować jak duży jest odstęp pomiędzy kolejnymi grzbietami? Jaka wielkość fizyczna odpowiada temu odstępowi?
3. Zwiększ teraz tempo poruszania palcem (ok. kilku razy na sekundę). Jaka wielkość fizyczna uległa zwiększeniu? Zwróć uwagę na odstęp pomiędzy grzbietami fali. Czy zmienił się w porównaniu z punktem 2? Wzrósł czy zmalał?
4. Biorąc pod uwagę wzór i przyjmując, że prędkość fali jest stała – czy kierunek zmian występujących w nim wielkości fizycznych zgadza się z obserwacjami?



Dyskusja. Zgodnie ze wzorem $v = \lambda f$ wzrost częstotliwości przy stałej prędkości fali musi prowadzić do zmniejszenia długości fali. Ponieważ częstotliwość i długość fali są wzajemnie odwrotnie proporcjonalne, dwukrotne zwiększenie częstotliwości oznacza dwukrotne zmniejszenie długości fali.



Słowniczek

Ruch falowy – rozchodzące się zaburzenie pewnego ośrodka sprężystego lub pola fizycznego.

Fala akustyczna – rozchodzący się w powietrzu ciąg zagęszczeń i rozrzedzeń ośrodka.

Długość fali – odstęp w przestrzeni pomiędzy kolejnymi grzbietami lub dolinami fali. Jednostka – metr [m].

Amplituda fali – maksymalna wielkość zaburzenia wywołanego przez falę mierzona od stanu równowagi. Jednostka uzależniona od charakteru fizycznego fali.

Prędkość fali – prędkość z jaką przemieszczają się w przestrzeni grzbiety fali. Jednostka – metr na sekundę [m/s].

Okres drgań – czas trwania pełnego cyklu drgania ośrodka (lub pola), czyli czas pomiędzy przejściem dwóch kolejnych grzbietów fali. Jednostka – sekunda [s].

Częstotliwość drgań – liczba pełnych cykli drgania w ciągu 1 s. Jednostka – herc [Hz].

Fala harmoniczna – fala będąca obrazem jednostajnego ruchu punktu po okręgu.

Faza – wielkość fizyczna określająca, w którym momencie okresu znajduje się dany obiekt podlegający drganiom. Zwykle przyjmuje się, że jest to wielkość bezwymiarowa (jako część okresu).

Przesunięcie fazowe – różnica faz pomiędzy dwoma ruchami drgającymi.

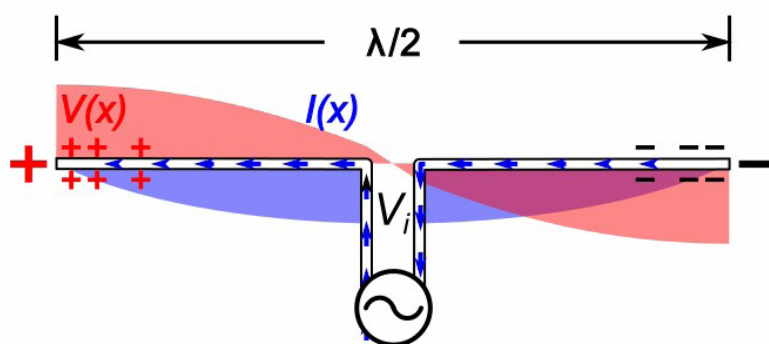
Fala poprzeczna – fala, w której kierunek zaburzenia ośrodka (lub pola) jest prostopadły do kierunku rozchodzenia się fali.

Fala podłużna – fala, w której kierunek zaburzenia ośrodka (lub pola) jest zgodny z kierunkiem rozchodzenia się fali.



Materiały zewnętrzne

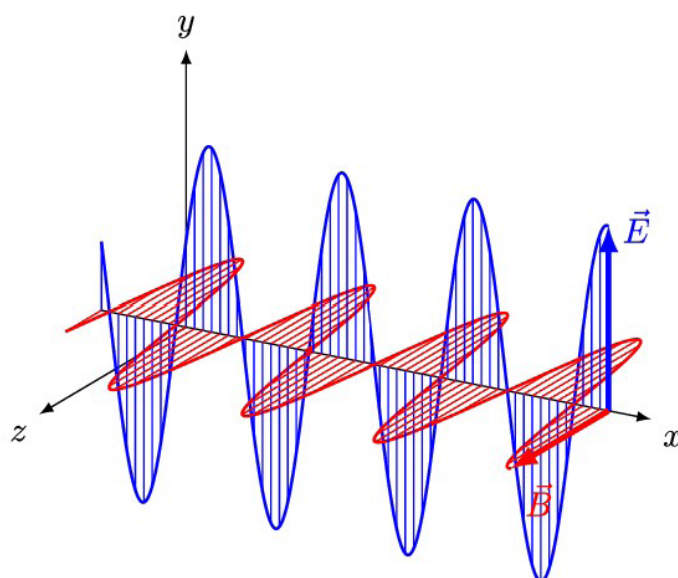
1. Animacja przedstawiająca falę stojącą w antenie dipolowej.



Zeskanuj QR kod



2. Animacja fali elektromagnetycznej i jej obu składowych – zmian pola elektrycznego oraz magnetycznego.



Zeskanuj QR kod





Praca domowa

1. W powietrzu rozchodzi się fala akustyczna o częstotliwości odpowiadającej dźwiękowi C_1 (do) na klawiaturze fortepianu czyli $f=261,6\text{ Hz}$. Przyjmując, że prędkość dźwięku to $v=340\text{ m/s}$, wyznacz długość fali.

Dane:

$$f=261,6\text{ Hz}$$

$$v=340\text{ m/s}$$

Szukane:

$$\lambda=?$$

2. Załóżmy, że chcielibyśmy nadać przez antenę dipolową falę EM o dokładnie takiej samej częstotliwości jak dźwięk C_1 czyli $f=261,6\text{ Hz}$. Jaka może być najmniejsza długość anteny, która pozwoli na efektywną energetycznie emisję tej fali? Przyjmij prędkość fali EM jako $c=3\cdot 10^8\text{ m/s}$.

Dane:

$$f=261,6\text{ Hz}$$

$$c=3\cdot 10^8\text{ m/s}$$

Szukane:

$$l=?$$

Lekcja 4

Widmo sygnału

Cel

- Przedstawienie podstawowych pojęć związanych z widmową analizą sygnałów.

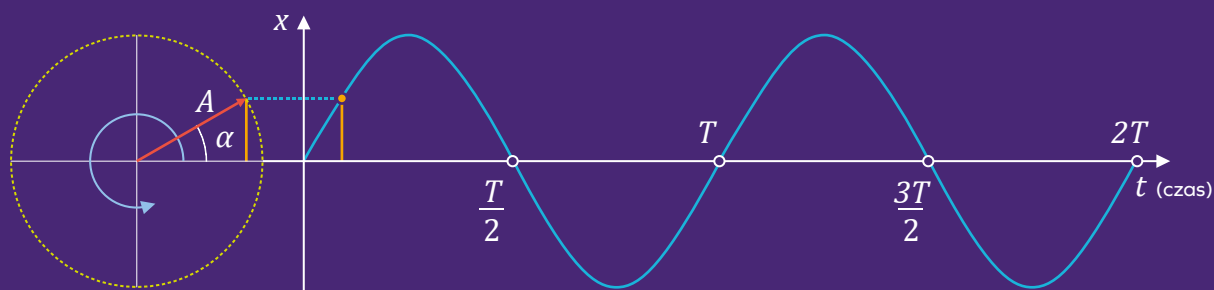
Efekty kształcenia

- Uczeń zna metodę sumowania sygnałów harmoniczných na diagramach wektorowych.
- Uczeń zna podstawowe cele analizy widmowej.
- Uczeń zna podstawowe sposoby reprezentacji sygnału: w dziedzinie czasu i w dziedzinie częstotliwości.



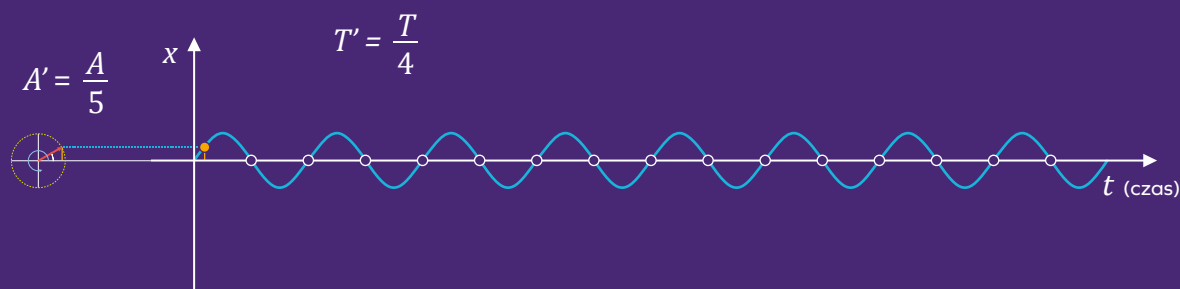
1. Sumowanie sygnałów harmoniczných

W Lekcji 3 wprowadziliśmy pojęcie fali harmonicznej, jako określonego zaburzenia, które można w pełni scharakteryzować przez podanie amplitudy, częstotliwości (lub okresu) i fazy. Ponieważ omawiane dotychczas fale harmoniczne związane były z zaburzeniem ośrodka lub pola fizycznego (fala akustyczna lub elektromagnetyczna), możemy je utożsamić z **sygnałem harmonicznym** (patrz Lekcja 1). Sygnał taki jest obrazem jednostajnego ruchu punktu po okręgu. Stanowi on przykład **sygnału okresowego**, tzn. takiego, dla którego można wskazać odcinek czasu, po którym zmiany wartości sygnału są dokładnie takie same jak w odcinku poprzednim. Sygnał harmoniczny będziemy traktować jako elementarny sygnał okresowy (Rys. 1).



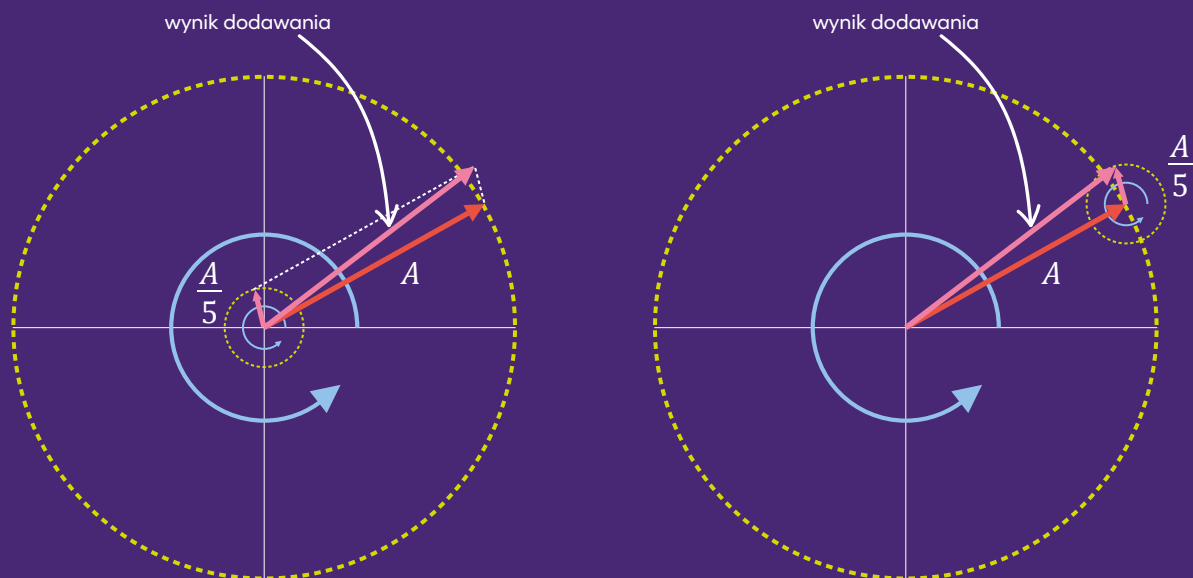
Rys. 1. Sygnał harmoniczny o amplitudzie A , okresie T oraz zerowej fazie początkowej.

Możemy oczywiście dobierać parametry sygnału harmonicznego zupełnie dowolnie. Na Rys. 2 przedstawiono przykład sygnału o pięciokrotnie mniejszej amplitudzie i czterokrotnie krótszym okresie w porównaniu do tego z Rys. 1. Sygnały te są zasadniczo podobne, różnią się jedynie skalą. Jednak wszystko się zmieni, jeśli dopuścimy pewne operacje matematyczne na tych sygnałach, w szczególności – sumowanie.



Rys. 2. Sygnał harmoniczny o pięciokrotnie mniejszej amplitudzie i czterokrotnie krótszym okresie.

Możemy takie sumowanie zrealizować bardzo prosto biorąc przebiegi sygnałów w czasie i dodając wartości sygnału w odpowiednich chwilach czasowych. Z punktu widzenia późniejszych lekcji, szczególności analizy modulacji, przypatrzmy się jednak, jak dodawanie sygnałów harmoniczných wiąże się z dodawaniem wektorów.



Rys. 3. Dodawanie dwóch sygnałów harmoniczných jako dodawanie obrotających się wektorów. Po lewej zastosowanie reguły równoległoboku, po prawej – reguły łańcuchowej.

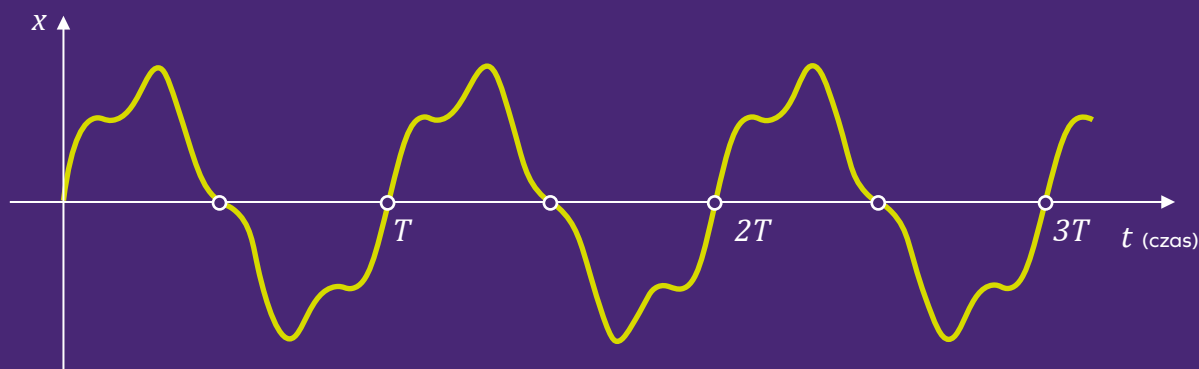
Sygnał harmoniczny reprezentowany jest nie tylko przez ruch punktu po okręgu, ale również przez obracający się wektor zaczepiony w środku okręgu i zakończony w poruszającym się punkcie (mówimy, że jest tzw. **wektor wodzący** punktu). Długość wektora równa jest amplitudzie sygnału, zaś czas pełnego obrotu równy jest okresowi sygnału.

Jeżeli chcemy dodać do siebie dwa sygnały harmoniczne, możemy nanieść na jeden diagram oba okręgi oraz wektory. Położenie wektorów będzie zależało od wybranej chwili czasu – założmy, że wygląda tak, jak na Rys. 3 po lewej stronie, z obydwojema wektorami zaczepionymi w jednym punkcie. Wektory dodajemy wg reguły równoległoboku tzn. konstruujemy równoległobok, którego sąsiednimi bokami są oba wektory, zaś wynikiem działania jest wektor pokrywający się z przekątną równoległoboku. Otrzymujemy w ten sposób wektor wynikowy, którego długość zależy od wzajemnego położenia wektorów, które dodajemy (w tym przypadku jest nieco większa niż A). Podobnie jak na Rys. 1 i Rys. 2, wartość sygnału zależy od odległości końca tego wektora od prostej przebiegającej przez poziomą średnicę obu okręgów.

Wynik można otrzymać nieco prościej stosując tzw. regułę łańcuchową dodawania wektorów. W tym przypadku umieszczamy drugi okrąg tak, by jego środek pokrył się z końcem pierwszego wektora (Rys. 3 po prawej). Wektor wynikowy znajdujemy łącząc

początek pierwszego wektora z końcem drugiego i oczywiście jest on taki sam, jak przy skorzystaniu z reguły równoległoboku.

Przeprowadzając powyższą procedurę dla wszystkich chwil czasowych w interesującym nas przedziale czasu, otrzymamy przebieg sygnału wynikowego (Rys. 4).



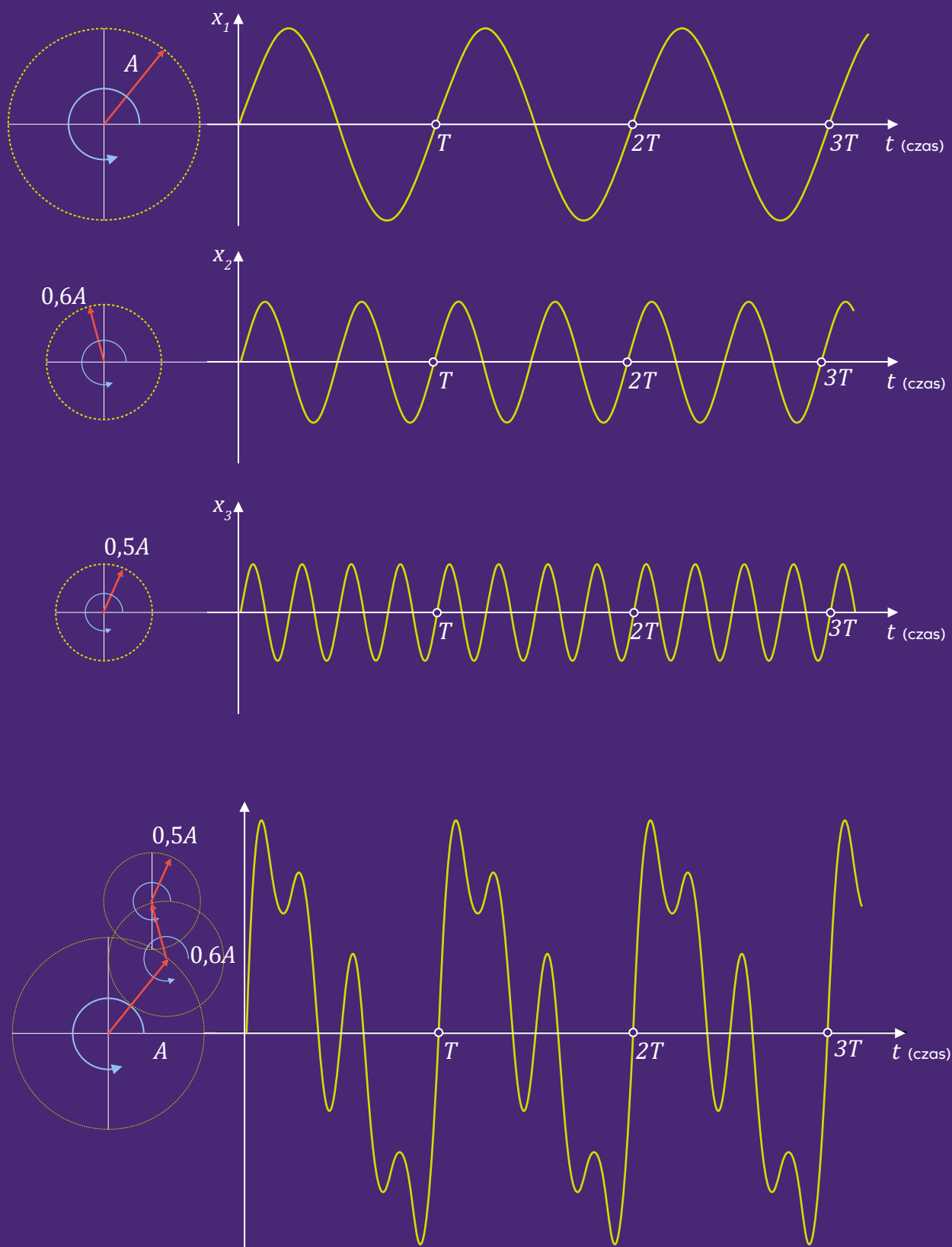
Rys. 4. Suma dwóch sygnałów harmoniczných.

Co możemy powiedzieć o tym sygnale? Jest to nadal sygnał okresowy. Jak widzimy jego okres równy jest okresowi sygnału o dłuższym okresie (T). To nie jest przypadek – tak będzie zawsze, gdy dodajemy sygnały o okresach, których jeden jest wielokrotnością drugiego (w naszym przypadku sygnał o okresie T jest czterokrotnością okresu krótszego). Poza tym, przebieg sygnału w czasie jest bardzo podobny do sygnału o większej amplitudzie. Sygnał o mniejszej amplitudzie wprowadza do niego niewielkie, aczkolwiek wyraźne zakłócenia.

Nic nie stoi na przeszkodzie, by dodać do siebie większą liczbę sygnałów. Na Rys. 5 widzimy przykład sumy trzech sygnałów o parametrach odpowiednio (amplituda, okres): a) A, T ; b) $0,6A, 0,5T$; c) $0,5A, 0,25T$. Obok każdego z wykresów załączono także przykładowy diagram kołowy w wybranej chwili czasowej. Suma poszczególnych sygnałów harmoniczných przedstawiona na ostatnim wykresie jest dość złożonym sygnałem okresowym o okresie T .

Ponieważ częstotliwość sygnału jest odwrotnością okresu, możemy zauważyć, że częstotliwość sygnału drugiego jest dwukrotnie większa niż częstotliwość sygnału pierwszego, zaś częstotliwość sygnału trzeciego jest czterokrotnie większa niż częstotliwość sygnału pierwszego. Możemy zatem sformułować następujące twierdzenie: *jeżeli sumujemy kolejno sygnały harmoniczne poczynając od sygnału o okresie T , otrzymujemy w wyniku sygnał również o okresie T , pod warunkiem, że częstotliwości kolejnych sygnałów są wielokrotnością częstości pierwszego sygnału.*

W podobny sposób możemy dodawać do siebie dowolną liczbę sygnałów harmoniczných, nawet nieskończoną, jeżeli tylko amplitudy kolejnych sygnałów zmniejszają się wystarczająco szybko przy przejściu z sygnału na sygnał.



Rys. 5. Suma trzech sygnałów harmoniczných.

2. Analiza widmowa

Złożoność sygnału widocznego na Rys. 5 może zainspirować nas do pytania: a może każdy sygnał okresowy da się przedstawić jako sumę sygnałów harmoniczných? Okazuje się, że tak!

Uwaga: *istnieją pewne wyjątki, ale w praktyce nie musimy się nimi przejmować.*

Procedura, którą się teraz zajmujemy jest więc niejako odwrotna do tego, co robiliśmy powyżej. Zamiast dodawać do siebie sygnały harmoniczne i generować coraz to bardziej skomplikowane przebiegi w czasie, możemy wziąć określony sygnał okresowy i spróbować znaleźć takie sygnały harmoniczne, które po złożeniu (zsumowaniu) utworzą żądany sygnał.

Procedura taka nazywa się **analizą widmową** (inne nazwy: analiza spektralna, analiza Fouriera). Dla sygnału o okresie T analiza widmowa polega na ustaleniu amplitudy sygnałów harmoniczných (tzw. składowych) o częstotliwościach $f_1 = 1/T$, $f_2 = 2f_1$, $f_3 = 3f_1$, itd. będących składnikami tego sygnału. Pierwsza z tych składowych o częstotliwości $f_1 = 1/T$ nazywana jest **pierwszą harmoniczną**, druga – o częstotliwości dwa razy większej – drugą **harmoniczną**, itd. Niektóre sygnały zawierają nawet nieskończenie wiele niezerowych harmoniczných (zobaczmy przykład za chwilę).

Jak w praktyce przeprowadzić analizę widmową, czyli jak wyznaczyć amplitudy harmoniczných dla danego sygnału? Istnieją pewne formuły matematyczne, które pozwalają to zrobić, ale są zbyt skomplikowane, by je tutaj przytoczyć. Możemy za to łatwo pokazać efekt działania analizy widmowej dla sygnałów z Rys. 4 i Rys. 5, bo sami wcześniej wybraliśmy składowe tych sygnałów.

Zatem, dla sygnału z Rys. 4, pierwsza harmoniczna f_1 ma amplitudę, którą oznaczyliśmy przez A , zaś druga harmoniczna f_2 ma amplitudę pięć razy mniejszą ($A/5$). Wszystkie następne harmoniczne nie są nam potrzebne, dlatego możemy im przypisać amplitudę równą 0.

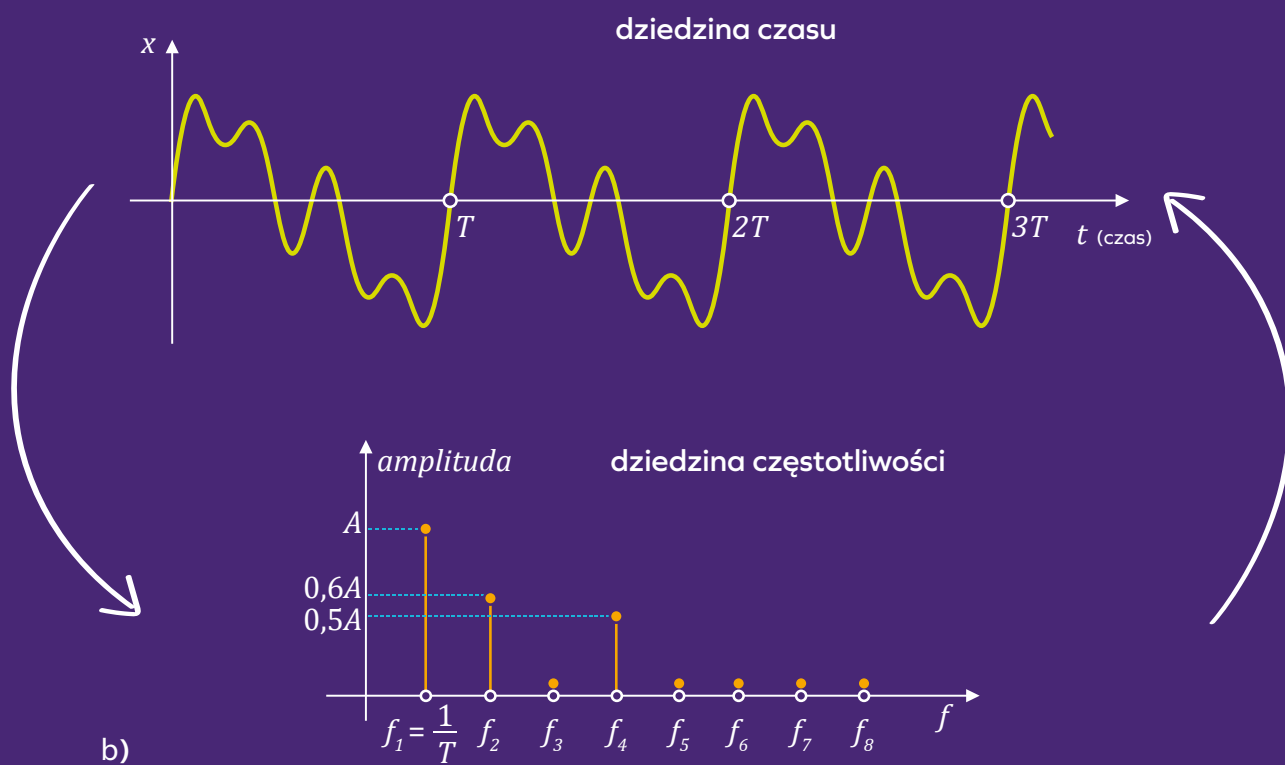
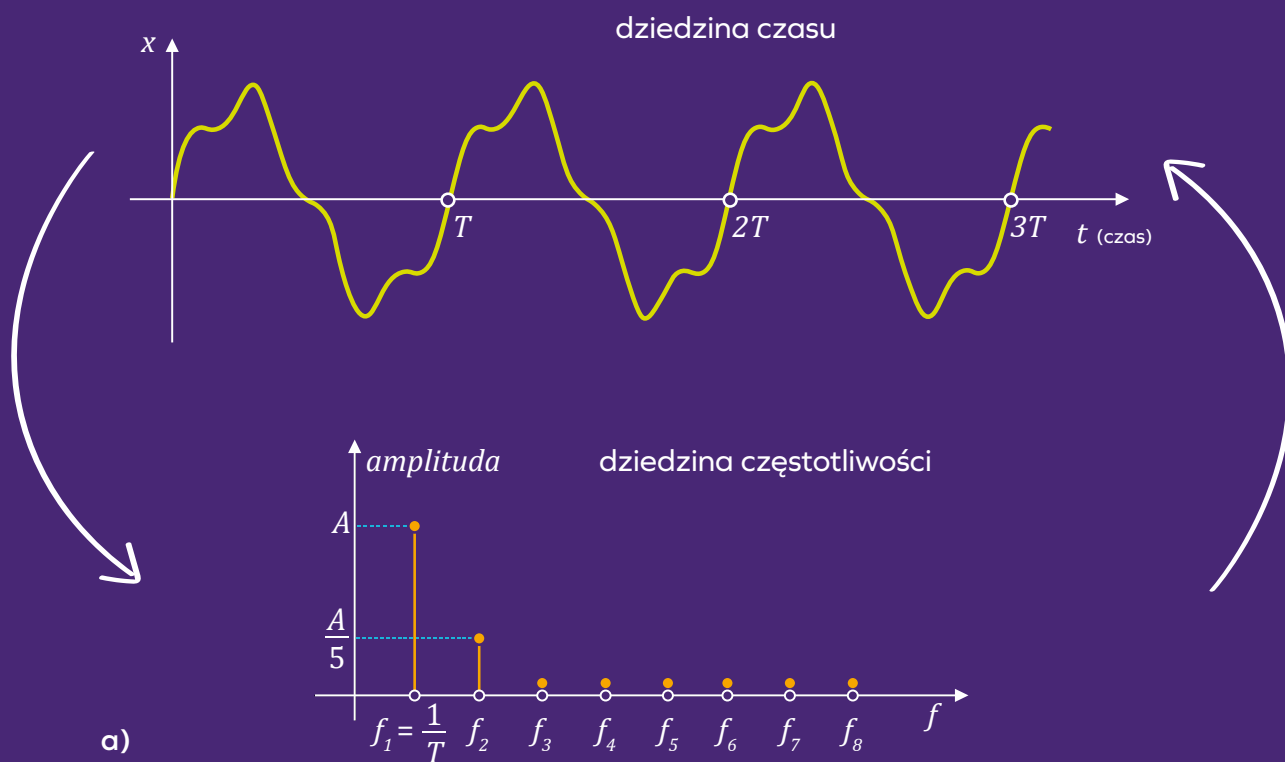
Dla sygnału z Rys. 5, pierwsza harmoniczna f_1 ma amplitudę A , druga – f_2 – ma amplitudę $0,6A$, trzecia – f_3 – ma amplitudę zerową (nie występuje w sygnale), zaś czwarta – f_4 – ma amplitudę $0,5A$. Wszystkie następne harmoniczne mają amplitudę równą 0.

Informacja o amplitudach harmoniczných mówi nam o sygnale okresowym dokładnie to samo, co jego przebieg w czasie. Mamy zatem dwie możliwości opisu sygnału:

1. Podanie wartości sygnału w czasie dla każdej chwili czasowej t . Jest to tzw. opis w dziedzinie **czasu**.
2. Podanie amplitudy harmoniczných tego sygnału. Jest to tzw. opis w **dziedzinie częstotliwości**.

Przywykliśmy do opisu w dziedzinie czasu polegającym na wykonaniu wykresu z osią poziomą odpowiadającą chwili czasowej i z osią pionową dotyczącą wartości sygnału. Podobnie dla opisu w dziedzinie częstotliwości możemy wykonać podobny wykres, w którym na osi poziomej wyszczególnimy, o którą harmoniczną chodzi (lub podamy wartość jej częstotliwości), zaś na osi pionowej zaznaczymy jej amplitudę. Zwyczajowo amplitudę harmonicznej nanosi się na tym wykresie w formie słupka (tzw. prążka), zamiast punktu. Rys. 6 pokazuje przykładowe porównanie obu opisów dla znanych nam już sygnałów.

Przedstawienie sygnału w dziedzinie częstotliwości nazywamy także **widmem** (lub **spektrum**) sygnału.

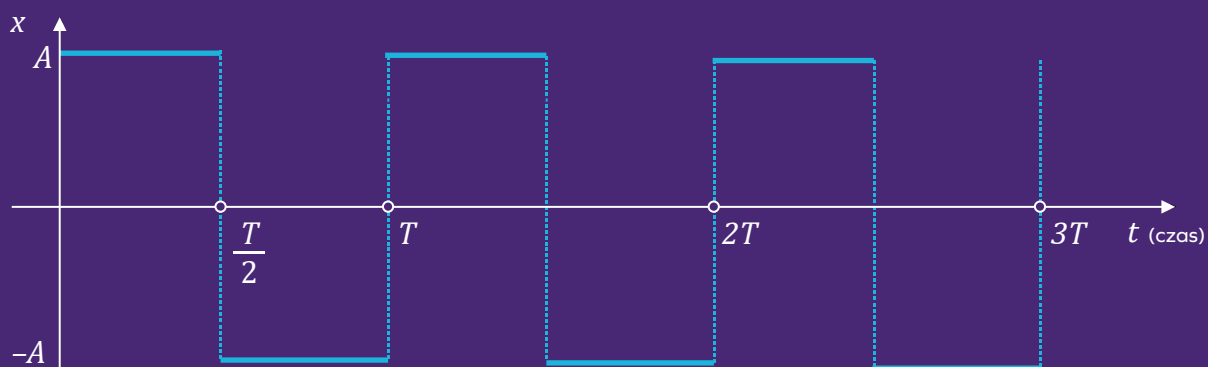


Rys. 6. Opis sygnału w dziedzinie czasu i częstotliwości: a) sygnał o dwóch harmonicznym, b) sygnał o trzech harmonicznym.

3. Przykład — analiza widmowa sygnału prostokątnego

Jako ciekawy przykład rozpatrzmy teraz sygnał, który tradycyjnie nazywany jest **sygnałem prostokątnym**. W ciągu okresu T sygnał ten przyjmuje tylko dwie wartości: A – w pierwszej połowie okresu oraz $-A$ – w drugiej połowie okresu (Rys. 7).

Sygnał ten różni się znacznie od tych, które analizowaliśmy do tej pory. Przede wszystkim nie jest to sygnał ciągły – co połowę okresu obserwujemy nagłą zmianę wartości. W niczym nie przypomina regularnego i gładkiego sygnału harmonicznego. Możemy go traktować jako przykład sygnału cyfrowego o dwóch poziomach (binarnego; patrz Lekcja 1). A jednak okazuje się, że nawet sygnał tego rodzaju może być poddany analizie widmowej i możemy dokładnie wyznaczyć jego harmoniczne. Niestety, w tym przypadku jest ich nieskończenie wiele, musimy zatem zadowolić się przybliżeniami.



Rys. 7. Sygnał prostokątny o okresie T i amplitudzie A .

Na Rys. 8 możemy zobaczyć pierwszych kilka harmonicznym sygnału prostokątnego. Pierwsza harmoniczna (linia czerwona) jest sygnałem o okresie T dość dobrze oddającym ogólną zmienność w czasie i poziomy osiągnięte przez interesujący nas sygnał. Druga harmoniczna oraz pozostałe składowe o parzystej krotności (czwarta, szósta, itd.) posiadają amplitudę równą zero. Trzecia, piąta, siódma i dziewiąta harmoniczna zaznaczone są jako sygnały o coraz to mniejszych amplitudach.



Dla zainteresowanych. Amplitudę a_n n -tej nieparzystej harmonicznej można obliczyć ze wzoru:

$$a_n = \frac{4A}{n\pi}$$

Sumę pięciu pierwszych niezerowych harmonicznym zaznaczono kolorem żółtym. Jak widać jest to całkiem dobre przybliżenie sygnału prostokątnego mimo widocznych zafalowań wokół przyjmowanych przez niego wartości. W zaawansowanej analizie sygnałów wykazuje się, że po dodaniu nieskończonej liczby harmonicznym zafalowania znikają i uzyskujemy dokładnie przebieg z Rys. 7.

Przedstawienie sygnału prostokątnego w dziedzinie częstotliwości, czyli jego widmo, zawiera Rys. 9. Jak widzimy, wszystkie parzyste prążki są równe 0, zaś nieparzyste stopniowo maleją do zera wraz ze wzrostem numeru harmonicznej.

Zastosowań praktycznych analizy widmowej jest mnóstwo i nie będziemy wszystkich tu wymieniać. Jednym z nich jest np. komputerowe rozpoznawanie mowy. Na podstawie amplitudy poszczególnych harmonicznych w sygnale głosowym komputer może zidentyfikować wymawiane głoski (każda ma charakterystyczne widmo) i w dalszej kolejności wyrazi oraz zdania.

Z naszego punktu widzenia analiza widmowa pozwoli nam dogłębnie zrozumieć działanie technik modulacji (Lekcje 7, 8, 9) oraz podział zakresów częstotliwości pomiędzy różnych użytkowników w telekomunikacji mobilnej (Lekcje 5, 10).



Rys. 8. Harmoniczne sygnału prostokątnego w dziedzinie czasu.



Rys. 9. Amplitudy pierwszych ośmiu harmonicznych sygnału prostokątnego (część widma).



Doświadczenie

Na stronie internetowej **compadre.org** możesz uruchomić program Soundanalyzer do analizy dźwięku rejestrowanego przez mikrofon komputera (konieczne jest zezwolenie aplikacji na instalację oraz na dostęp do mikrofonu). Okno aplikacji (Rys. 10) zawiera w górnej części widmo sygnału, zaś w dolnej – obraz w dziedzinie czasu. Maksymalna wartość częstotliwości to 10 kHz.



Zeskanuj QR kod



Rys. 10. Okno aplikacji Soundanalyzer.

Zanim przejdziemy do doświadczenia zwróćmy uwagę, że normalny komunikat głosowy nie jest sygnałem okresowym. Możemy go jednak podzielić na bardzo krótkie fragmenty, które będziemy traktować jako wycinki sygnału okresowego (próbki), które poddajemy już normalnej analizie widmowej. Ponieważ sygnał może znacznie się zmieniać pomiędzy kolejnymi próbkami, obraz sygnału w dziedzinie częstotliwości (widmo) także może podlegać zmianom w czasie.

Wykorzystaj aplikację do następujących obserwacji:

1. Zaobserwuj przebiegi w dziedzinie czasu i częstotliwości, kiedy mówisz swobodnie do mikrofonu. Które z częstotliwości pojawiają się najczęściej?
2. Porównaj przebiegi sygnałów przy wymawianiu samogłosek i spółgłosek szczelinowych (w szczególności „s”). Spróbuj utrzymać emisję tych głosek tak długo, jak potrafisz. Jakie widzisz różnice w rozkładzie częstotliwości?
3. Spróbuj emisji jednej samogłoski (np. „u”) zmieniając wysokość dźwięku – od najniższego do najwyższego. Czy obserwowany rozkład częstotliwości oddaje te zmiany?

4. Jeżeli posiadasz klawiszowy instrument muzyczny, wykorzystaj go do emisji różnych dźwięków o różnych wysokościach. Niektóre z instrumentów pozwalają na wybór czystego tonu (ang. *sine wave*). Sprawdź, czy rozkład częstotliwości zgadza się z Twoimi oczekiwaniami.



Słowniczek

Analiza widmowa – rozkład sygnału na harmoniczne sygnały składowe.

Dziedzina czasu – metoda opisu sygnału poprzez podanie wartości sygnału w każdej chwili czasowej.

Dziedzina częstotliwości – metoda opisu sygnału poprzez podanie amplitud jego kolejnych harmonicznych.

Harmoniczna – sygnał harmoniczny będący częścią składową danego sygnału. Częstotliwości kolejnych harmonicznych sygnału okresowego są wielokrotnością częstotliwości podstawowej równej odwrotności okresu sygnału.

Sygnał harmoniczny – sygnał, którego wartość w dziedzinie czasu można przedstawić jako obraz jednostajnego ruchu punktu po okręgu lub jednostajnego obrotu wektora wodzącego.

Sygnał okresowy – sygnał posiadający okres, czyli czas, po którym wartość sygnału się powtarza.

Sygnał prostokątny – sygnał okresowy, który naprzemiennie przyjmuje tylko dwie wartości, przy czym zmiana następuje w połowie okresu. Przykład sygnału cyfrowego, binarnego.

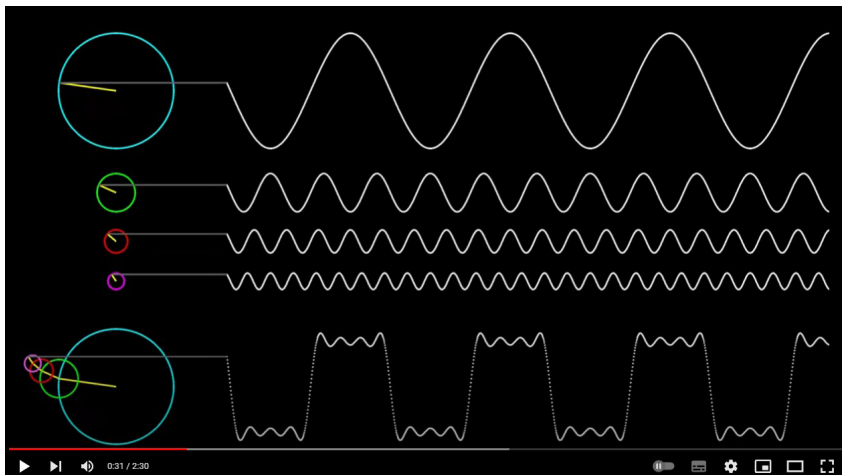
Wektor wodzący – wektor zaczepiony w punkcie odniesienia i zakończony w punkcie, którego ruch śledzimy.

Widmo (lub spektrum) sygnału – rozkład amplitud kolejnych harmonicznych sygnału.



Materiały zewnętrzne

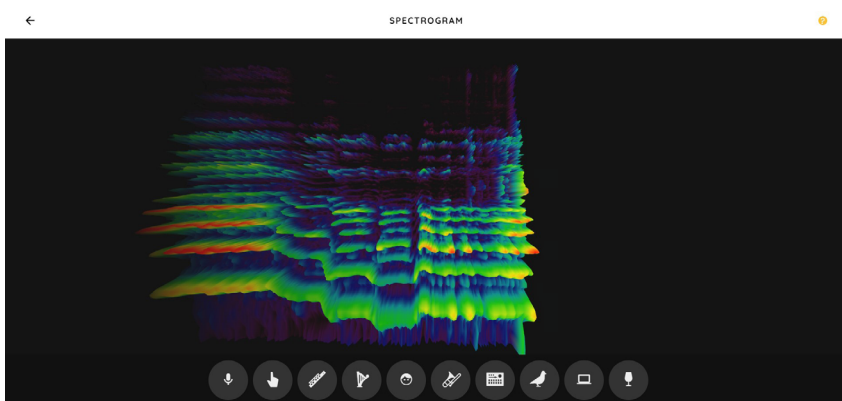
1. Animacja obrazująca sumowanie czterech pierwszych niezerowych harmonicznych sygnału prostokątnego (tytuł filmu: *Fourier Series Square Wave*).



Zeskanuj QR kod



2. **Program do analizy widmowej dźwięku z mikrofonu.** Generuje tzw. **spektrogram**, czyli pokazuje w czasie rzeczywistym rozkład częstotliwości w rejestrowanym przez mikrofon dźwięku. Oś pozioma reprezentuje czas pobrania próbki dźwiękowej (obraz dynamicznie przesuwają się w kierunku poziomym), zaś oś pionowa – częstotliwość. Kolor odpowiada amplitudzie danej harmonicznej (czerwony – duża amplituda, niebieski – mała). Ponieważ nie podano skali na osiach oraz ilościowego przypisania koloru do amplitud, spektrogram ma charakter wyłącznie poglądowy. Podkreślimy także, że obraz sygnału jest tu przedstawiany w dziedzinie częstotliwości, ale dla ciągle zmieniających się próbek czasowych.

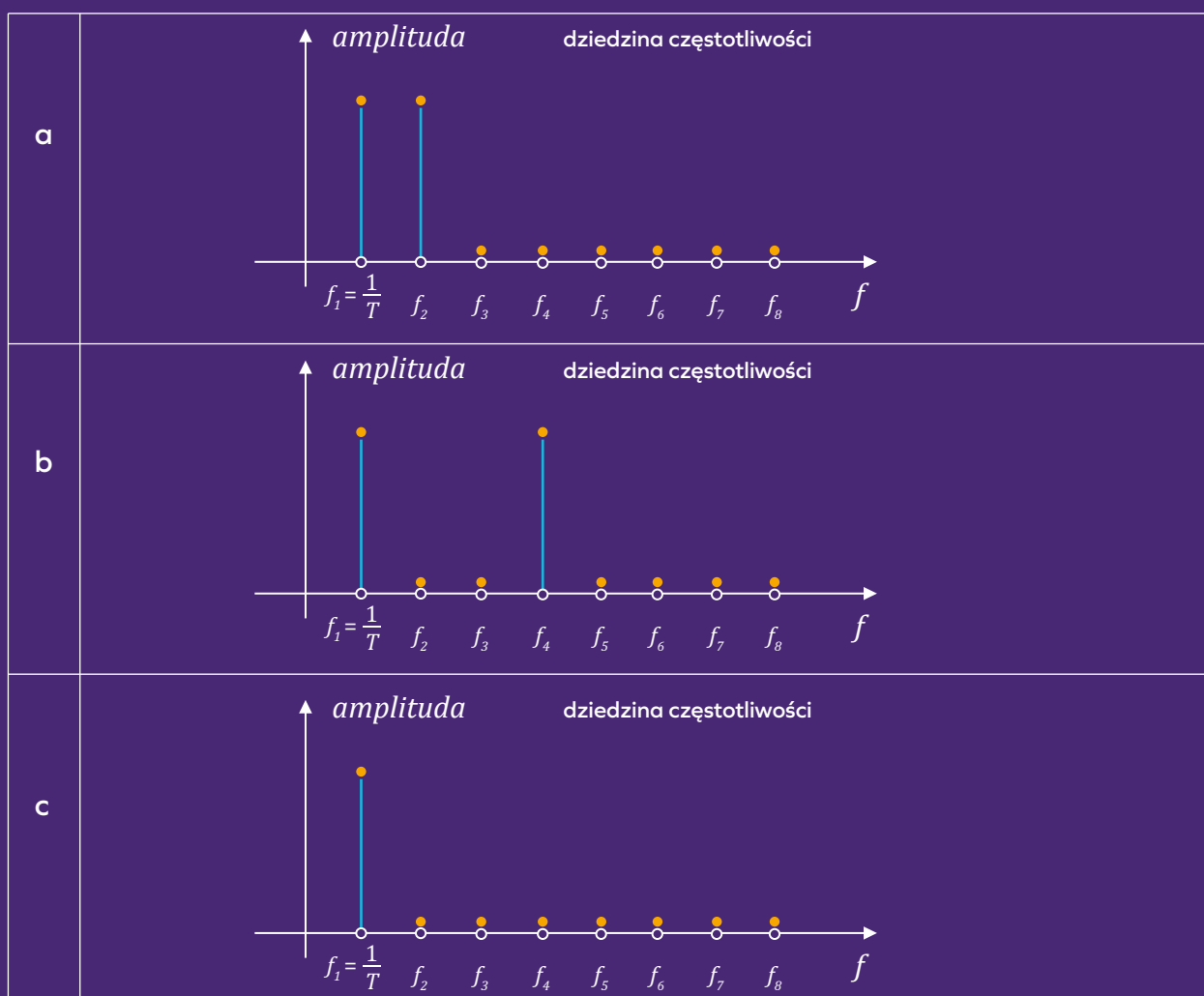
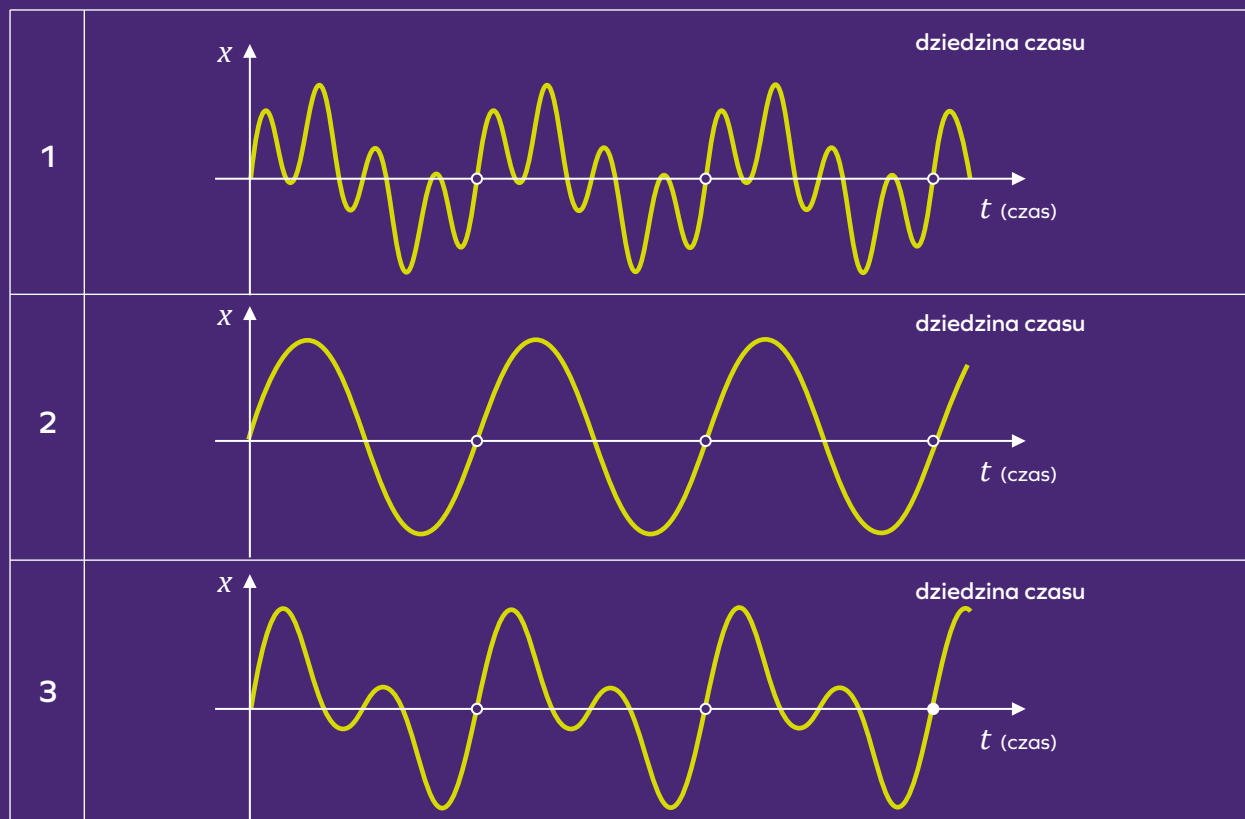


Zeskanuj QR kod



Praca domowa

Spróbuj przypisać przedstawienie sygnałów w dziedzinie czasu do odpowiedniego przedstawienia w dziedzinie częstotliwości (widma).



Lekcja 5

Filtracja sygnału

Cel

- Przedstawienie podstawowych pojęć związanych z filtracją sygnałów.

Efekty kształcenia

- Uczeń zna podstawowe rodzaje filtracji: dolnoprzepustową, górnoprzepustową oraz pasmową.
- Uczeń potrafi opisać efekty filtracji w dziedzinie częstotliwości.
- Uczeń potrafi wskazać najważniejsze korzyści z filtracji sygnałów w telekomunikacji.

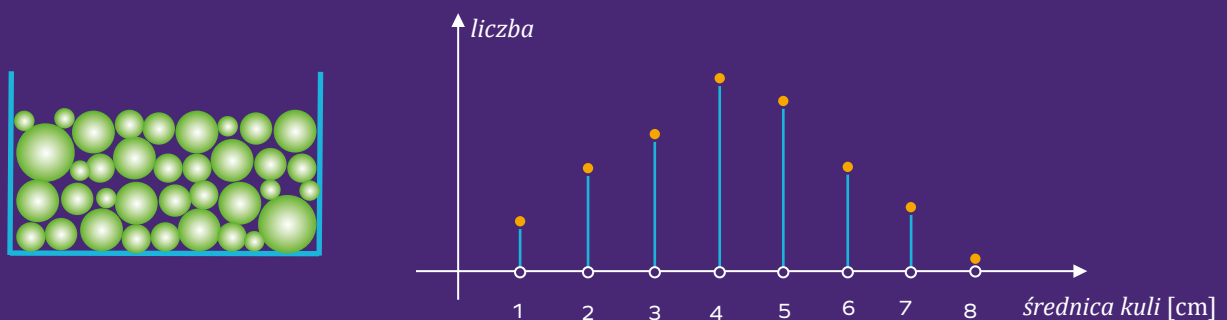


1. Filtracja – model poglądowy

Z pojęciem **filtracji** (lub filtrowania) większość z nas miała okazję spotkać się w życiu codziennym. W wielu domach można spotkać się z filtrem do wody, którego celem jest oczyszczenie wody wodociągowej z ewentualnych zanieczyszczeń. Filtracja zawsze polega na tym, że pewne składniki zostają zatrzymane w urządzeniu filtrującym, czyli **filtrze**, zaś pozostałe zostają przepuszczone. Najbardziej poglądowym przykładem filtru jest sito – powierzchnia z otworami (oczkami) o określonej średnicy, która pozwala na przejście obiektom o średnicy mniejszej niż średnica otworu, zaś pozostałe zatrzymuje. Z pojęciem filtracji spotykamy się także w analizie sygnałów, ale zanim do tego przejdziemy przypomnijmy się najpierw filtracji i temu, do czego się przydaje, na poglądowym przykładzie sita.

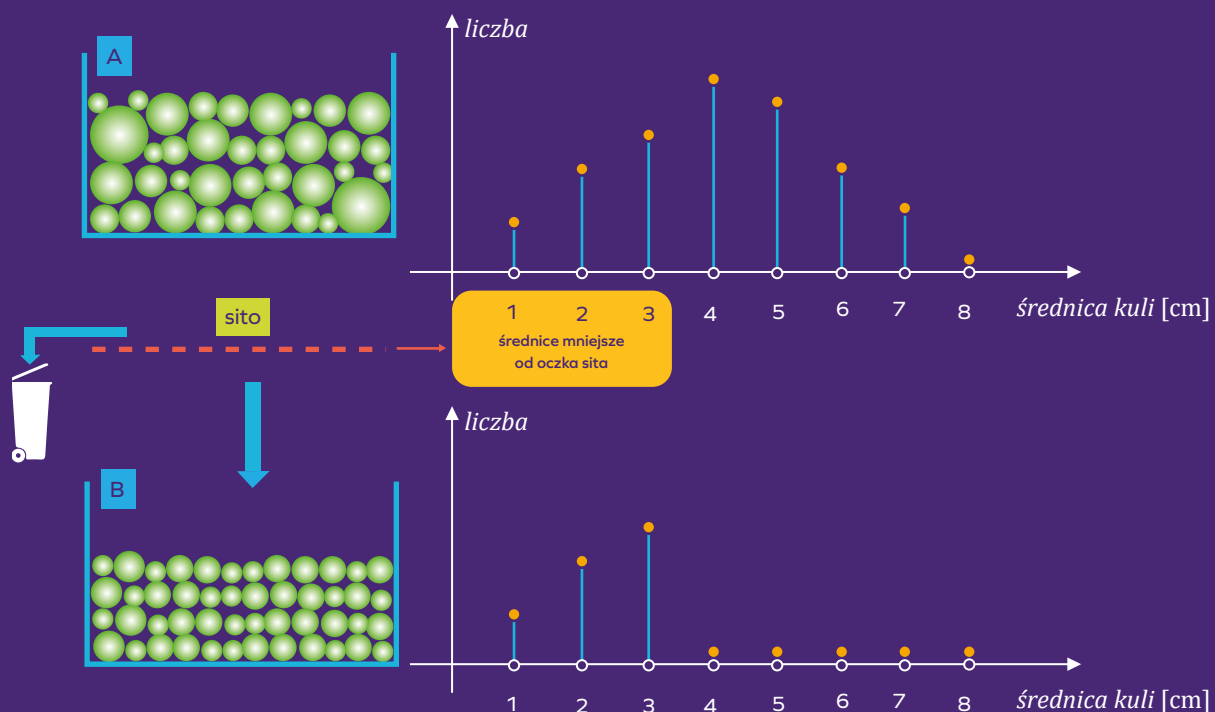
Załóżmy, że posiadamy pojemnik z bardzo dużą liczbą kul o różnych średnicach. Kule w pojemniku są losowo wymieszane, trudno byłoby nam zatem łatwo odnaleźć określone rozmiary kul przez grzebanie w pojemniku i wybieranie kul na chybił trafił. Wiemy natomiast, ile jest kul o poszczególnych średnicach i możemy informację tę przedstawić na wykresie jak na Rys. 1 (wykres ten nieprzypadkowo przypomina widmo sygnału). Widzimy, że najwięcej jest kul o średnicy 4 cm (najwyższy słupek), pozostałych jest mniej i to tym bardziej, im większa jest różnica pomiędzy daną średnicą a wartością 4 cm.

Gdybyśmy teraz chcieli wybrać z pojemnika tylko kule o średnicach mniejszych lub równych 3 cm, nie musielibyśmy na szczęście wybierać kul pojedynczo i dokonywać żmudnych pomiarów. Użyjemy sita o oczkach, których średnica równa jest 3 cm (Rys. 2). Po wysypaniu zawartości pojemnika A na sito, interesujące nas kule przejdą do pojemnika B umieszczonego pod sitem. Te, które pozostały na sicie, możemy odrzucić.

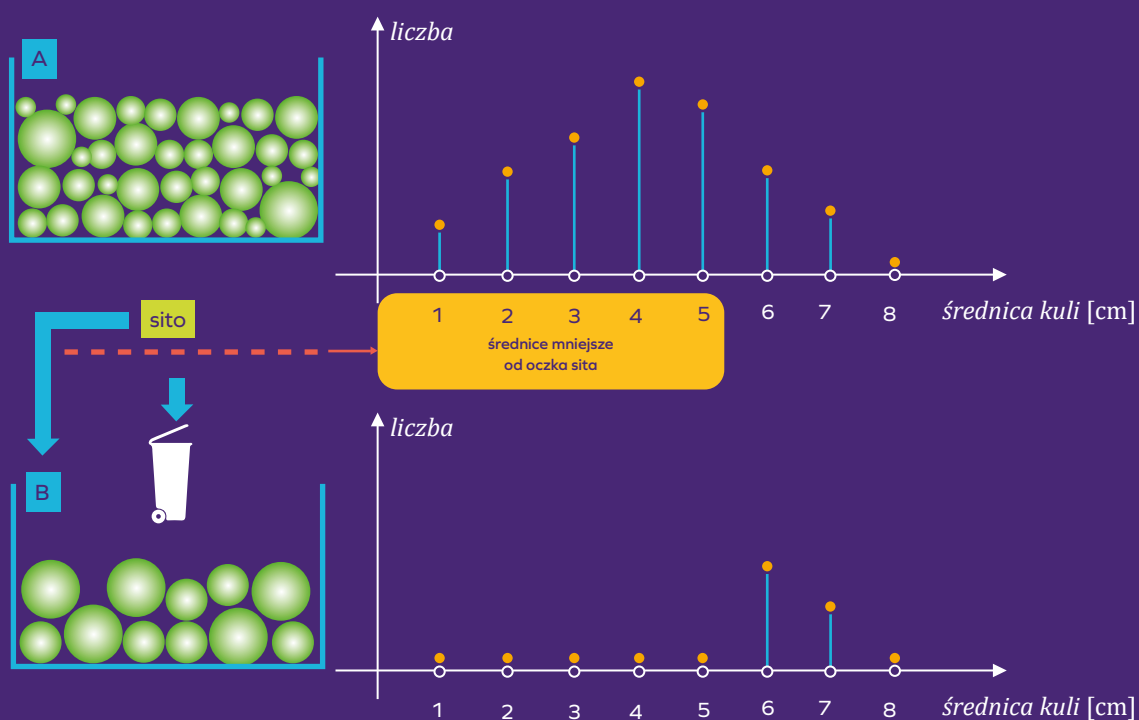


Rys. 1. Zbiór kul o różnych średnicach. Rozkład po prawej stronie pokazuje liczbę kul o danej średnicy.

Jaki będzie rozkład średnic kul w zbiorniku *B* po wykonaniu tej operacji? Oczywiście, będą w nim występować tylko kule o średnicach 1, 2 i 3 cm.



Rys. 2. Wykorzystanie sita do wyboru kul o średnicach 1–3 cm.



Rys. 3. Wykorzystanie sita o większych oczkach do wyboru kul o średnicach 6–8 cm.

A gdybyśmy chcieli wybrać z pojemnika tylko kule o średnicach większych lub równych 6 cm? Wtedy powinniśmy wykorzystać sito o oczkach o średnicy 5 cm. Tym razem sito przepuści kule o średnicach równych i mniejszych niż 5 cm, które odrzucamy, natomiast to, co pozostało nasie, zbieramy do pojemnika B . Rozkład średnic kul w pojemniku B po filtracji przedstawiono na Rys. 3.

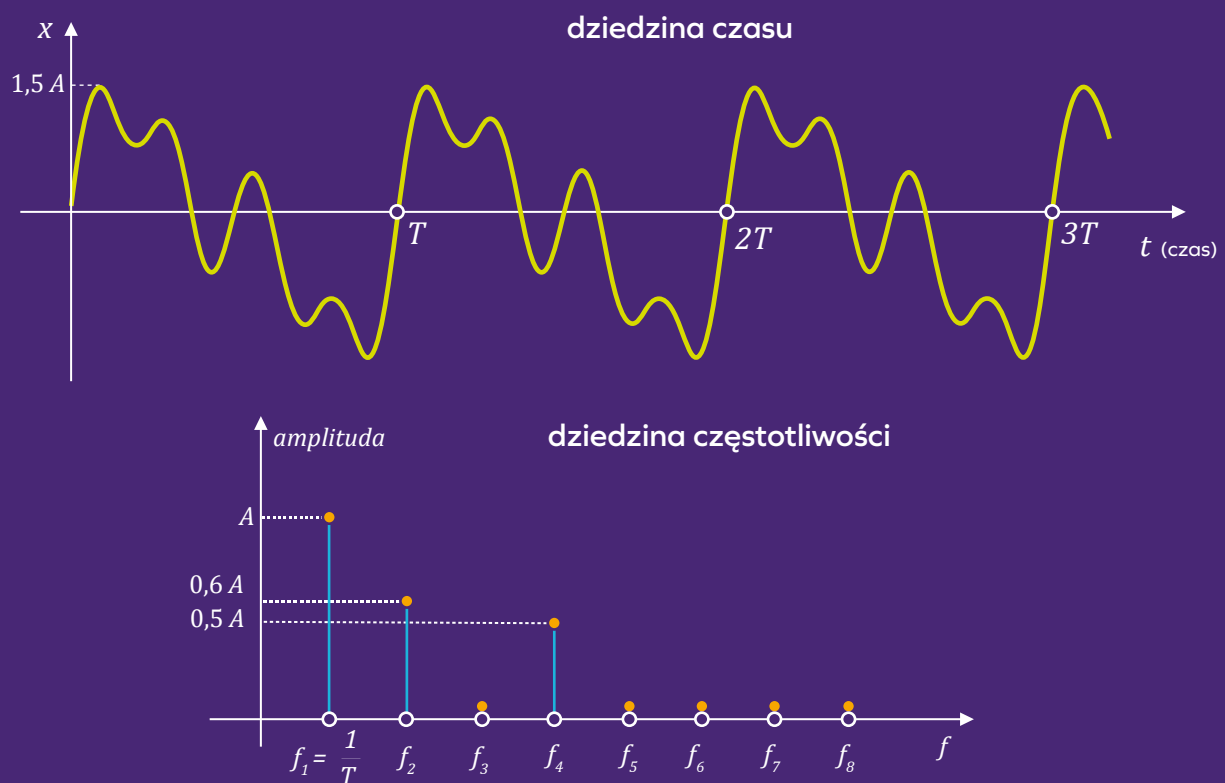


Ćwiczenie. Zaproponuj sposób wykorzystania sit – możesz dowolnie dobrać ich liczbę oraz rozmiar oczek – do wyselekcjonowania kul o średnicach 4–5 cm.

2. Koncepcja filtracji sygnału

Operacja filtracji jest na tyle ogólna, że może być użyta również w kontekście przetwarzania sygnałów.

Przypomnijmy sobie jeden z sygnałów analizowanych w Lekcji 4 – jego obraz w dziedzinie czasu i częstotliwości (widmo) przedstawiono na Rys. 4. Podstawową funkcją filtracji sygnału jest wybór określonych składowych z widma tego sygnału oraz wytłumienie pozostałych.

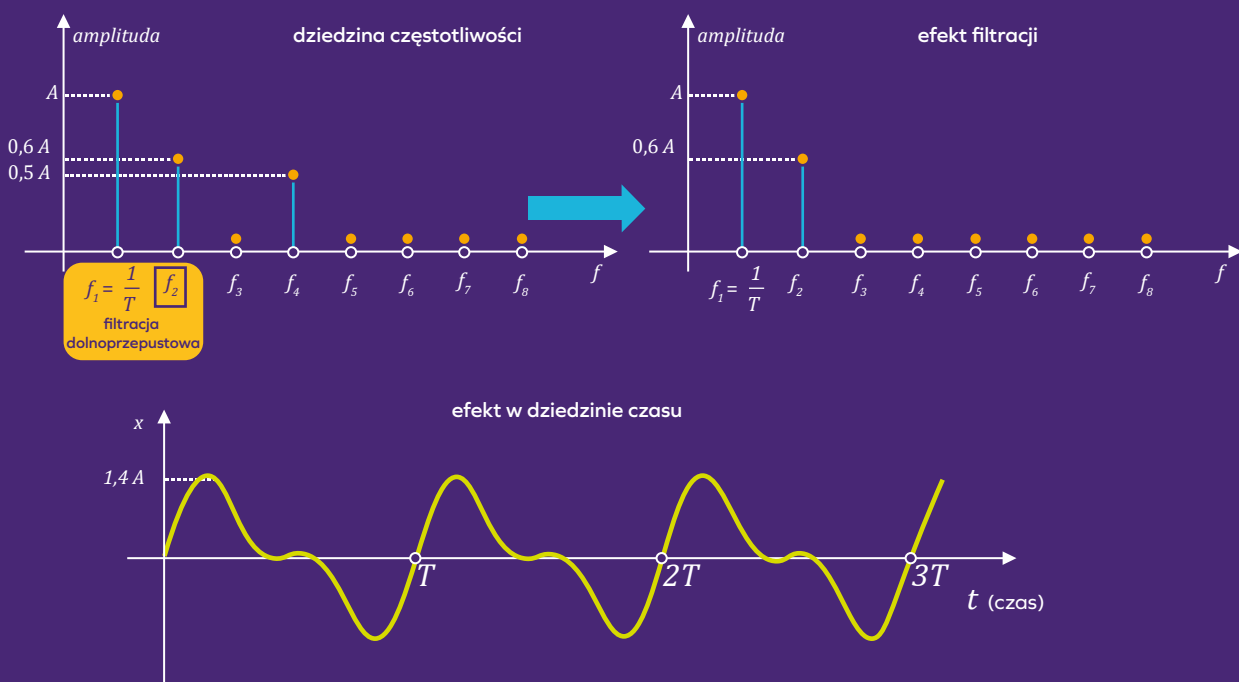


Rys. 4. Przykładowy sygnał przedstawiony w dziedzinie czasu oraz częstotliwości.

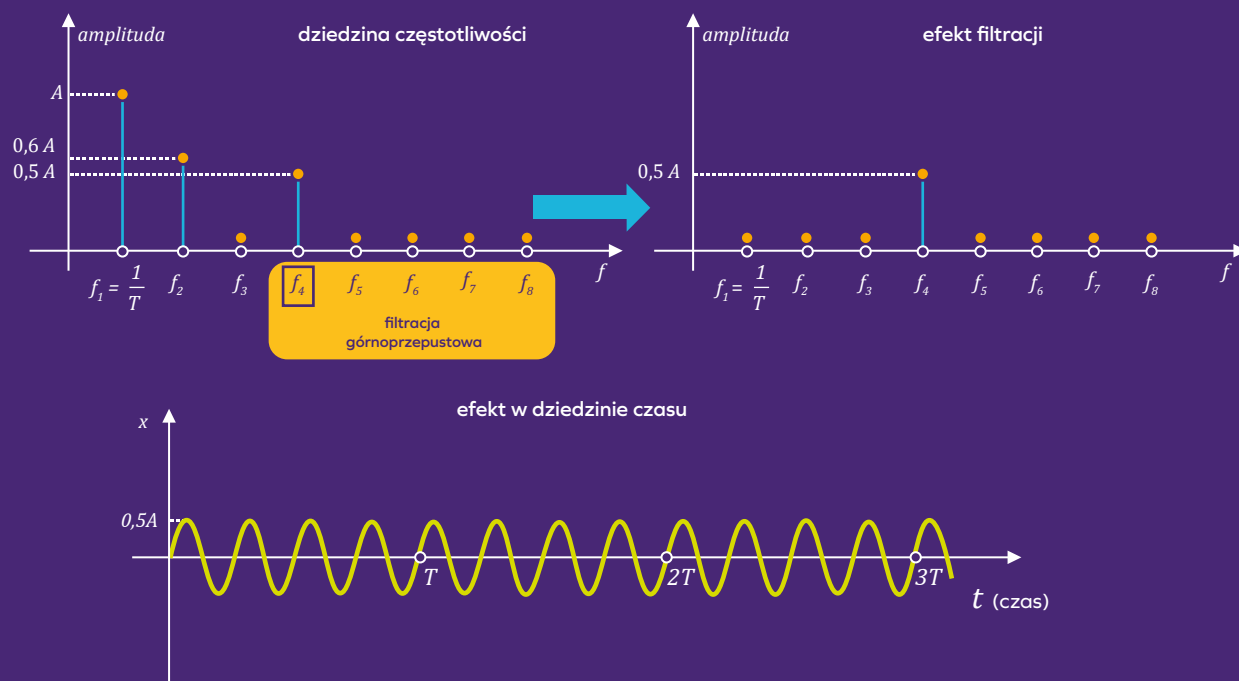
Filtry używane w przetwarzaniu sygnałów można podzielić na trzy podstawowe grupy:

- **Dolnoprzepustowe** – przepuszczają harmoniczne sygnału *poniżej* pewnej, wybranej częstotliwości granicznej.
- **Górnoprzepustowe** – przepuszczają harmoniczne sygnału *powyżej* pewnej, wybranej częstotliwości granicznej.
- **Pasmowe** (lub środkowoprzepustowe) – przepuszczają harmoniczne sygnału *pomiędzy* pewnymi, wybranymi częstotliwościami granicznymi. W szczególności filtr pasmowy może wydzielić jedną, określoną harmoniczną sygnału.

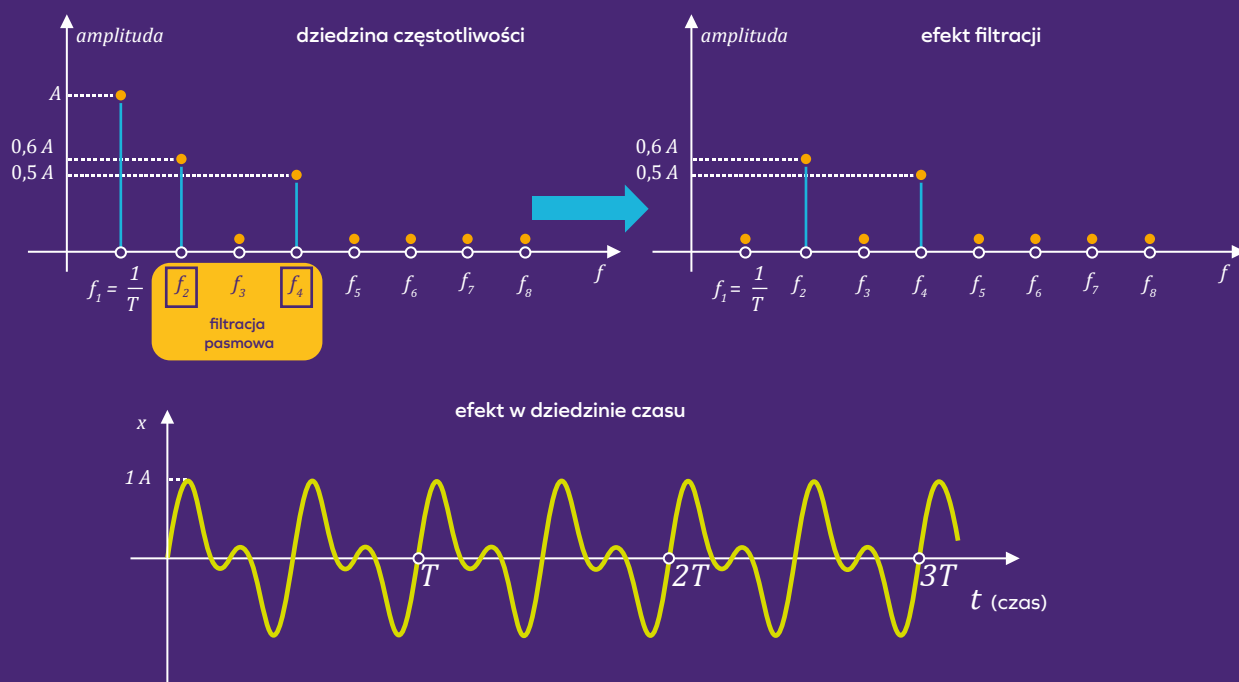
Efekt działania różnych filtrów na sygnał z Rys. 4 zademonstrowano na Rys. 5, Rys. 6 i Rys. 7 (zachowano oznaczenie T jako okresu oryginalnego sygnału).



Rys. 5. Przykład działania filtracji dolnoprzepustowej. Częstotliwość graniczna – f_2 .



Rys. 6. Przykład działania filtracji górnoprzepustowej. Częstotliwość graniczna $-f_4$.



Rys. 7. Przykład działania filtracji pasmowej. Częstotliwości graniczne $-f_2$ i f_4 .

Omówmy krótko efekty działania filtrów. Filtr dolnoprzepustowy z częstotliwością graniczną f_2 przepuszcza bez zmian harmoniczne f_1 i f_2 (przyjmujemy, że częstotliwość graniczna jest przepuszczana przez każdy typ filtru), zaś wszystkie pozostałe harmoniczne zostają wytłumione do poziomu zerowego (los ten spotyka harmoniczną f_4). Obraz sygnału w dziedzinie czasu możemy zobaczyć u dołu Rys. 5. Zauważmy, że filtr, dzięki wytłumieniu harmonicznej szybkozmiennej, spowodował „wygładzenie” sygnału. Jest to typowy wynik przetwarzania sygnału filtrem dolnoprzepustowym.

Filtr górnoprzepustowy ma działanie niejako odwrotne. Wytłumieniu ulegają wolnozmiennie składowe sygnału. W przypadku filtru na Rys. 6, zachowana zostaje jedynie harmoniczna f_4 . Filtr ten powoduje zatem wydzielenie pojedynczej harmonicznej sygnału, ale tylko dlatego, że wszystkie kolejne po prostu w tym sygnale nie występują.

Filtr pasmowy z częstotliwościami granicznymi f_2 i f_4 pokazano na Rys. 7. Powoduje on wytłumienie pierwszej harmonicznej sygnału, ponieważ jednak harmoniczne powyżej f_4 mają amplitudę zerową, w tym obszarze filtr nie daje żadnego efektu.

3. Jak działają filtry sygnału

Większość filtrów sygnałów stosowanych w praktyce jest realizowana jako odpowiednio skonstruowany układ elektroniczny. W przypadku filtrów elektronicznych niezbędne oczywiście jest wcześniejsze przetworzenie sygnału do postaci elektrycznej. Elementy takie jak cewki lub kondensatory zmieniają swoje właściwości w obwodzie elektrycznym w zależności od częstotliwości zmian napięcia i dzięki temu możemy przetworzyć sygnał elektryczny w pożądaną przez nas sposób np. wytłumić w nim harmoniczne powyżej pewnej wartości granicznej.

Wiele układów filtrujących, w szczególności filtrów pasmowych, bazuje na zjawisku rezonansu. Załóżmy, że pewien układ fizyczny może podlegać drganiom – np. wahadło. Układy takie mają zazwyczaj jedną częstotliwość, z którą drgają, jeśli je wypchnąć z równowagi i pozostawić samym sobie – jest to tzw. **częstotliwość drgań własnych**. Np. popchnięta raz huśtawka (lub dowolne wahadło) zacznie poruszać się ruchem okresowym z częstotliwością zależną od jej długości.

Jeżeli chcemy pobudzić huśtawkę do drgań o dużej amplitudzie, powinniśmy na nią działać siłą okresową, którą nazywamy **wymuszeniem** (Rys. 8). O jakiej częstotliwości? Jeżeli częstotliwość będzie za duża lub zbyt mała, przy pewnych wychyleniach huśtawki wymuszenie może być skierowane przeciwnie do jej ruchu, a tym samym może wywierać efekt hamujący, a nie przyspieszający. Optymalną częstotliwością wymuszenia jest częstotliwość **równa** częstotliwości drgań własnych, co raczej nie powinno być zaskoczeniem. Mówimy wtedy o zjawisku **rezonansu** – wymuszenie przyspiesza układ drgający dokładnie we właściwym do tego momencie, a drgania z czasem uzyskują maksymalną amplitudę.

Filtr zbudowany jako układ drgający z określoną częstotliwością drgań własnych, wykaże maksymalną reakcję wtedy, gdy częstotliwość sygnału zapewni zajście rezonansu. Pozwala to na wydzielenie dokładnie tych harmonicznych, które nas interesują.



Rys. 8. Z jaką częstotliwością najlepiej popychać huśtawkę?

Przykładem filtru fali akustycznej może być zwykła ściana. Zapewne nieraz słyszeliśmy głośną rozmowę odbywającą się w sąsiednim pokoju. Jest ona nie tylko cichsza, co wiąże się z ogólnym zmniejszeniem amplitudy sygnału, ale brzmi zupełnie inaczej, niż gdybyśmy jej słuchali bezpośrednio. Z czego to wynika? Fala akustyczna, zawierająca bardzo wiele harmoniczných, po dotarciu do ściany pobudza ją do drgań. Materiał ściany ma zwykle dość ograniczone możliwości drgania z dużymi częstotliwościami. Amplitudy wysokich harmoniczných zostają zatem w znacznej mierze wytłumione po przejściu przez ścianę. Z tego powodu zupełnie inaczej odbieramy brzmienie głosu danej osoby.



Pytanie. Jakiego rodzaju filtrem jest w tym przypadku ściana?

Warto dodać, że filtry, szczególnie filtry sygnałów, zazwyczaj nigdy nie są doskonałe. Harmoniczne, które powinny być wytłumione w pełni, wprawdzie znacznie osłabione, ale mogą przedrzeć się przez filtr. Dotyczy to filtrów każdego rodzaju – dolnoprzepustowych, pasmowych i górnoprzepustowych.

4. Zastosowania filtracji sygnału

Jak już wcześniej wspomnieliśmy, zastosowań filtrów sygnałów jest mnóstwo. Tutaj skupimy się na dwóch – wydzieleniu sygnału o określonej częstotliwości (za pomocą filtru pasmowego) oraz eliminowaniu szumu (za pomocą filtru dolnoprzepustowego).

W Lekcji 2 wskazaliśmy pole elektromagnetyczne (EM) jako nośnik informacji. Ponieważ pole EM wypełnia całą przestrzeń, możemy zapytać, jak może korzystać z niej wielu użytkowników naraz. Jeżeli jeden z nich nadaje sygnał emitowany w przestrzeń wokół anteny, czy nie dojdzie do zakłóceń, gdy inny użytkownik będzie chciał skorzystać ze swojej anteny i emisji swojego sygnału? Nie musi tak być, jeżeli użytkownicy umówią się co do tzw. **podziału częstotliwości**.

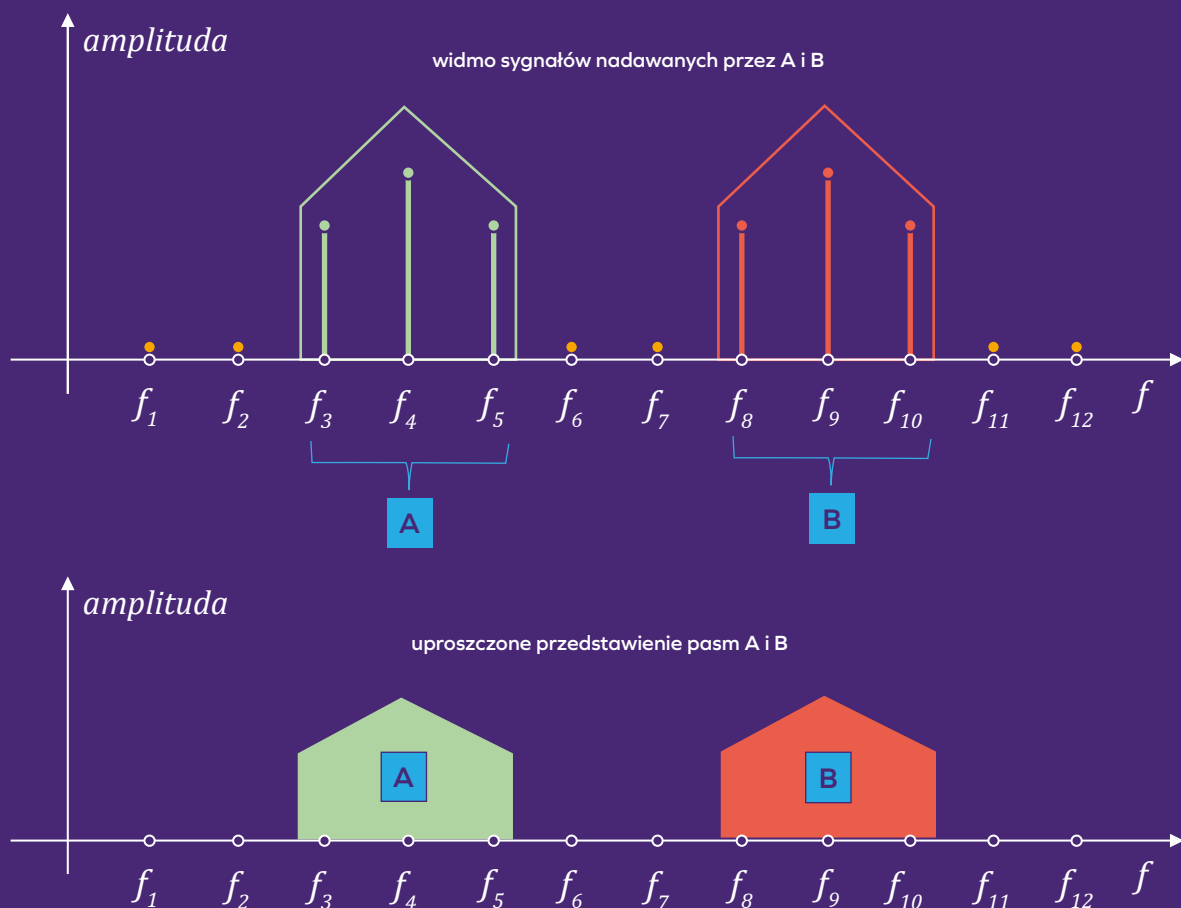
Założmy dla uproszczenia, że podział musimy zrealizować dla tylko dwóch użytkowników – A i B , których będziemy także nazywać nadawcami. Mogą się oni umówić, że sygnał nadawcy A zawiera tylko harmoniczne od f_3 do f_5 , zaś sygnał nadawcy B – tylko harmoniczne od f_8 do f_{10} (włącznie). Jeżeli będą oni nadawać równocześnie, widmo sygnału odbierane przez pewną antenę odbiorczą może wyglądać tak, jak na Rys. 9

(u góry). Dla wygody widma tego rodzaju możemy przedstawiać w sposób uproszczony jak na Rys. 9 u dołu – podkreślamy wtedy, do kogo należy konkretny zakres częstotliwości – czyli pasmo – bez szczegółowego określania wartości amplitud poszczególnych harmoniczných, które przecież mogą też zmieniać się w czasie w zależności od zawartości informacyjnej przesyłanego sygnału.

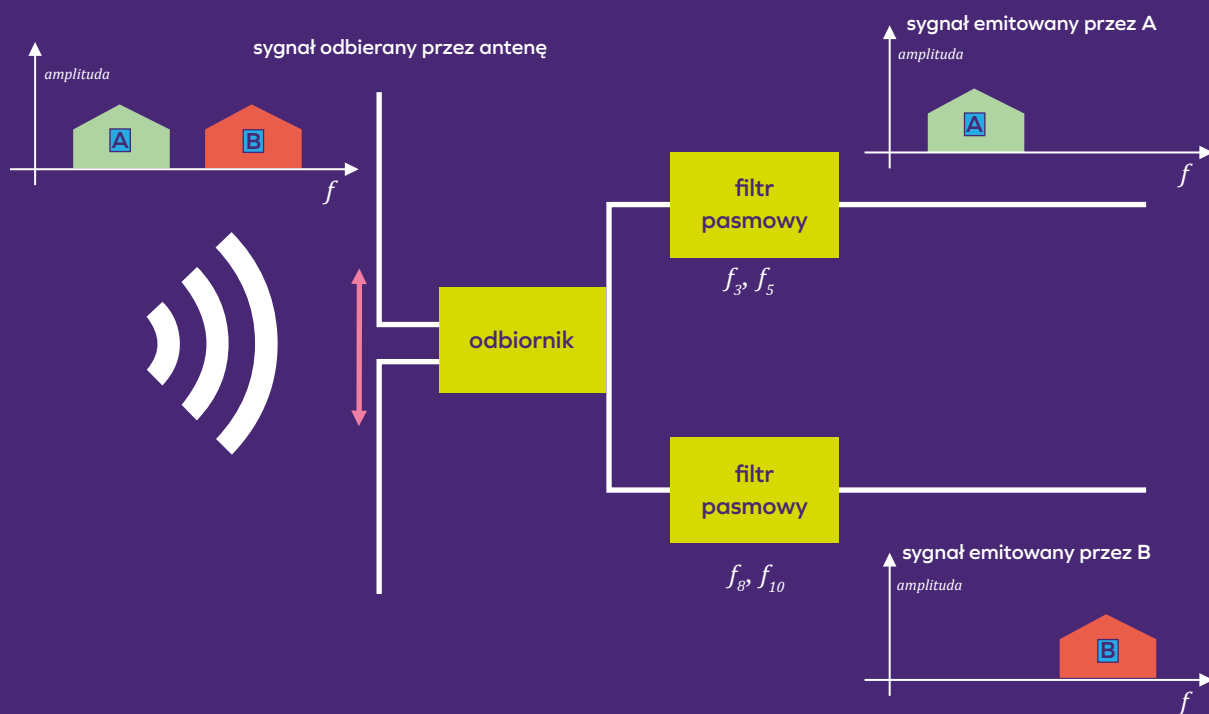
Czy odbiorca może jakoś wyselekcjonować sygnał od poszczególnych nadawców?

Tak – wystarczy, że użyje filtru pasmowego o odpowiednich częstotliwościach granicznych (patrz Rys. 10).

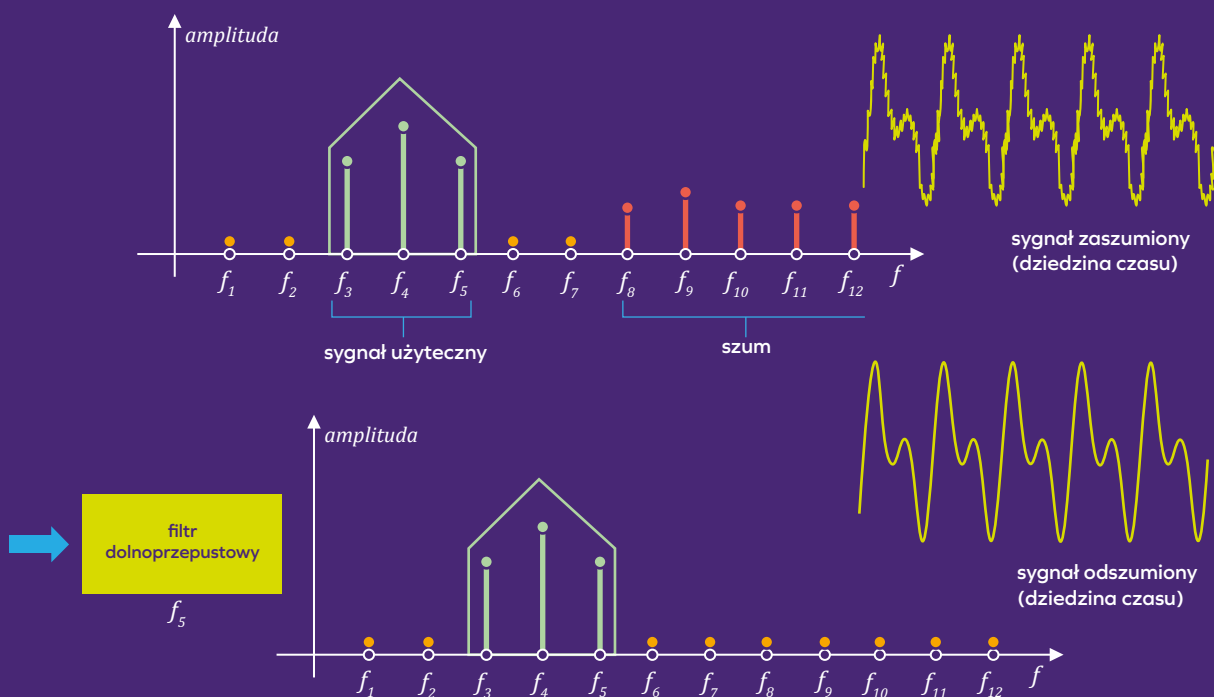
Jak wspomnieliśmy w Lekcji 1, jedną z wad sygnału analogowego jest duża wrażliwość na zakłócenia (szumy). Jednak jeżeli znamy zakres częstotliwości interesującego nas sygnału i wiemy, że zakłócenia znajdują się w górnej części widma, możemy je wyeliminować przez użycie filtru dolnoprzepustowego. Niestety, w praktyce szum obejmuje również częstotliwości sygnału użytecznego i nie da się go usunąć w pełni.



Rys. 9. Widma sygnałów obu nadawców – A i B – przy ustalonym podziale częstotliwości.



Rys. 10. Wykorzystanie filtrów pasmowych do wyboru sygnału od różnych nadawców.

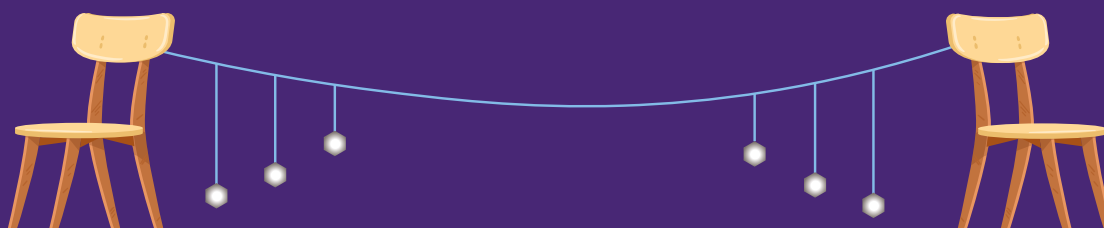


Rys. 11. Eliminowanie szumu z sygnału.



Doświadczenie

Rozwieś pomiędzy dwoma krzesłami gruby sznurek o długości ok. 1,5 m jak na Rys. 12. W pobliżu jednego z krzeseł zawieś na sznurku trzy wahadła o różnych długościach (w zakresie od 20 do 60 cm) – mogą to być nakrętki zawieszane na cienkich nitkach lub żyłkach. Odstęp pomiędzy wahadłami powinien wynosić ok. 20 cm. Taki sam zestaw wahadeł zawieś w pobliżu drugiego z krzeseł. Zwróć uwagę na to, by odpowiadające sobie wahadła w obu zestawach miały takie same długości, oraz by sznurek pomiędzy krzesłami nie był zbyt napięty.



Rys. 12. Doświadczenie z wahadłami. Rezonans mechaniczny.

1. Pobudź do ruchu najdłuższe wahadło w kierunku prostopadłym do sznurka. Zaobserwuj, co dzieje się z wahadłami w drugim zestawie.
2. Zatrzymaj wszystkie wahadła. Powtórz operację z punktu 1, ale tym razem pobudź pośrednie wahadło.
3. Zatrzymaj wszystkie wahadła. Powtórz operację z punktu 1, ale tym razem pobudź najkrótsze wahadło.
4. Zatrzymaj wszystkie wahadła. Wybierz dwa z wahadeł z jednego zestawu i pobudź je do wahań równocześnie. Czy wahadła z drugiego zestawu reagują tak, jak można się spodziewać?



Dyskusja. Ruch wahadła w jednym z zestawów pobudza do drgań sznurek, na którym zawieszony jest drugi zestaw. Wahania sznurka pełnią rolę wymuszenia, które napędza ruch wszystkich wahadeł. Wymuszenie jest najbardziej efektywne w warunkach rezonansu, czyli w przypadku, gdy jego częstotliwość równa się częstotliwości drgań własnych. Oznacza to, że najbardziej pobudzane jest wahadło o tej samej długości, co wahadło wymuszające ruch. Pozostałe wahadła również wpadają w niewielkie drgania, jednak ich amplituda jest niewielka i okresowo ulega wytłumieniu na skutek niezgodności częstotliwości wymuszenia z częstotliwością drgań własnych danego wahadła. Mamy tu do czynienia z tzw. **rezonansem mechanicznym** w przeciwieństwie do rezonansu elektrycznego zachodzącego w drgających obwodach elektrycznych.



Słowniczek

Drgania własne – ruch wykonywany przez układ drgający po jednorazowym pobudzeniu. Odbywa się zwykle z charakterystyczną dla danego układu częstotliwością (w przypadku wahadła zależy ona od jego długości).

Filtracja – operacja polegająca na wyselekcjonowaniu obiektów o pożądanych cechach. Przykładem filtracji jest przesiewanie lub wybór określonych harmonicznych sygnału.

Filtr – urządzenie przeprowadzające filtrację. Może to być układ mechaniczny lub elektryczny.

Podział częstotliwości – przypisanie określonego pasma częstotliwości różnym użytkownikom.

Pasmo – określony zakres częstotliwości. Ciągły fragment widma sygnału.

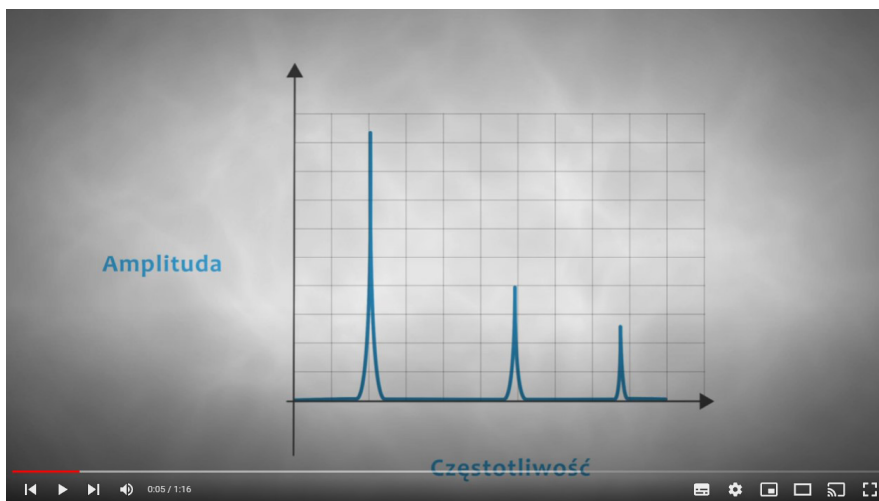
Rezonans – zjawisko zachodzące, gdy częstotliwość wymuszenia równa się częstotliwości drgań własnych układu. Dochodzi wtedy do maksymalnego pobudzenia układu drgającego.

Wymuszenie – siła pobudzająca układ drgający. Jeżeli jest to siła okresowa, jej częstość jest niezależna od częstotliwości drgań własnych układu. Wywołuje maksymalne efekt w warunkach rezonansu.



Materiały zewnętrzne

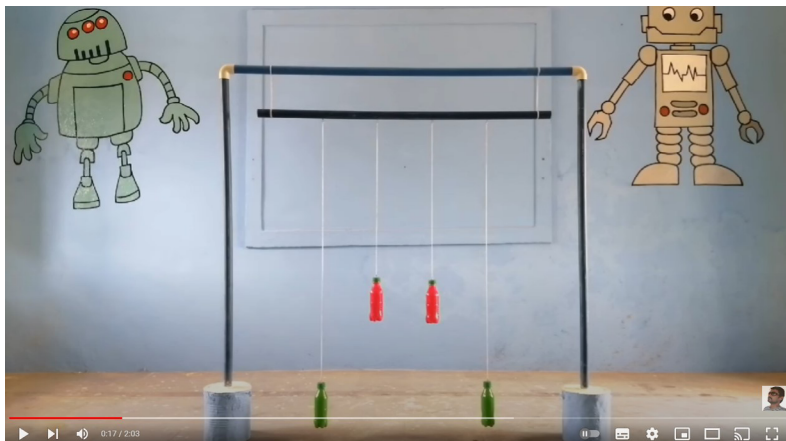
1. Filtracja sygnału.



Zeskanuj QR kod



2. Eksperyment z wahadłami obrazujący rezonans mechaniczny (tytuł filmu: *Resonant Pendulum | Science Experiments | science projects*).



Zeskanuj QR kod

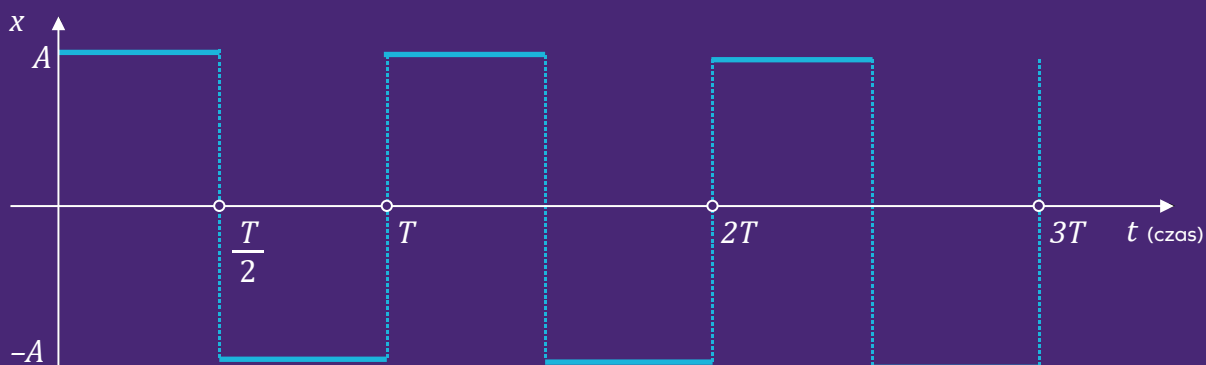


Praca domowa

1. Masz do dyspozycji dwa filtry: górnoprzepustowy o częstotliwości granicznej f_5 i dolnoprzepustowy o częstotliwości granicznej f_8 . Czy da się za ich pomocą zbudować filtr pasmowy o zakresie f_5 i f_8 ?



2. Czy z sygnału prostokątnego (patrz Lekcja 4) o okresie T można w jakiś sposób uzyskać sygnał harmoniczny o tym samym okresie?



Lekcja 6

Fale elektromagnetyczne i przeszkody

Cel

- Przedstawienie podstawowych informacji na temat zjawisk towarzyszących rozchodzeniu się fal elektromagnetycznych w środowisku z przeszkodami materialnymi.

Efekty kształcenia

- Uczeń potrafi opisać zachowanie się fali padającej na materialną przeszkodę.
- Uczeń zna szczególną rolę przeszkód o charakterze przewodzącym w transmisji fal elektromagnetycznych.
- Uczeń potrafi opisać zjawisko dyfrakcji, jego zależność od długości fali oraz rolę w przesyłaniu informacji za pomocą fal elektromagnetycznych.



1. Zachowanie się fali EM na granicy ośrodków

W Lekcjach 2 i 3 wspomnieliśmy o emisji fal elektromagnetycznych (EM), jako zaburzeń pola EM rozchodzących się w próżni. Jednak kiedy chcemy wykorzystać fale EM do przesyłania informacji, szczególnie w warunkach miejskich, pojawia się pytanie: co dzieje się, gdy fala EM napotyka na przeszkodę w postaci innego ośrodka czy obiektu materialnego?

Kiedy fala trafia na przeszkodę część energii może ulec odbiciu (Rys. 1), co oznacza, że z przeszkody w punkcie padania emitowana jest fala pod tym samym kątem co fala padająca, ale po przeciwnej stronie prostej – tzw. **normalnej** – prostopadłej do powierzchni przeszkody w punkcie padania (zaznaczonej na rysunku pionową linią kropkowaną).

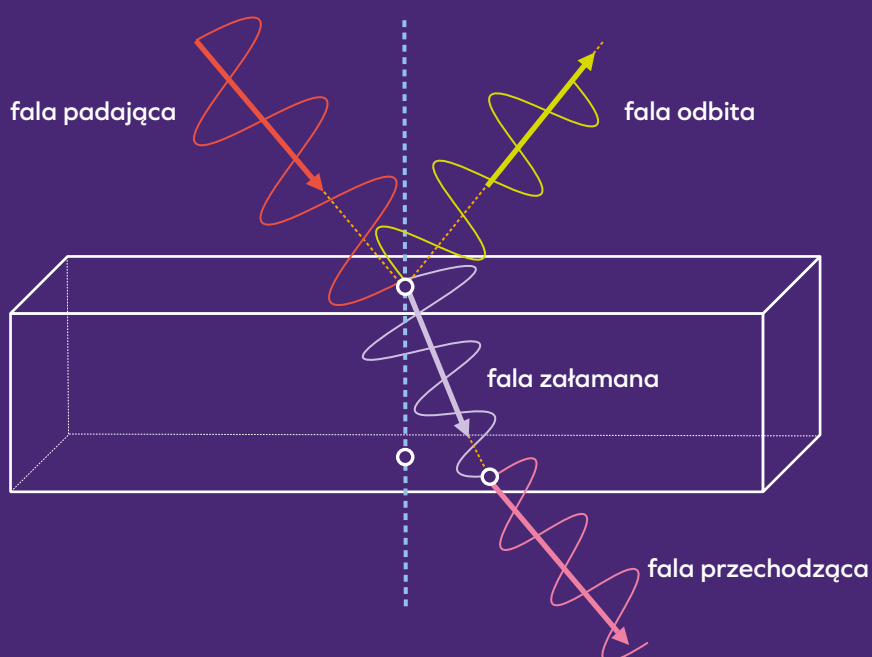
Ta część energii fali, która nie uległa odbiciu, wnika do przeszkody, ulega załamaniu zależnemu od właściwości materiału przeszkody (kierunek fali ulega zmianie w stosunku do fali padającej). Część energii fali może ulec częściowej **absorpcji** (pochłonięciu) przez ośrodek materialny, co powoduje stopniowe zmniejszanie amplitudy fali, po czym fala ulega kolejnemu załamaniu przy opuszczaniu przeszkody po drugiej stronie (tutaj także może dojść do częściowego odbicia, ale dla uproszczenia pominiemy tę możliwość).

Zgodnie z prawem zachowania energii, suma energii fali odbitej, energii pochłoniętej przez przeszkodę oraz energii fali przechodzącej, musi równać się energii fali padającej. To, jak konkretnie energia fali padającej zostanie podzielona pomiędzy te różne postacie, uzależnione jest to bardzo od materiału przeszkody i długości padającej fali.

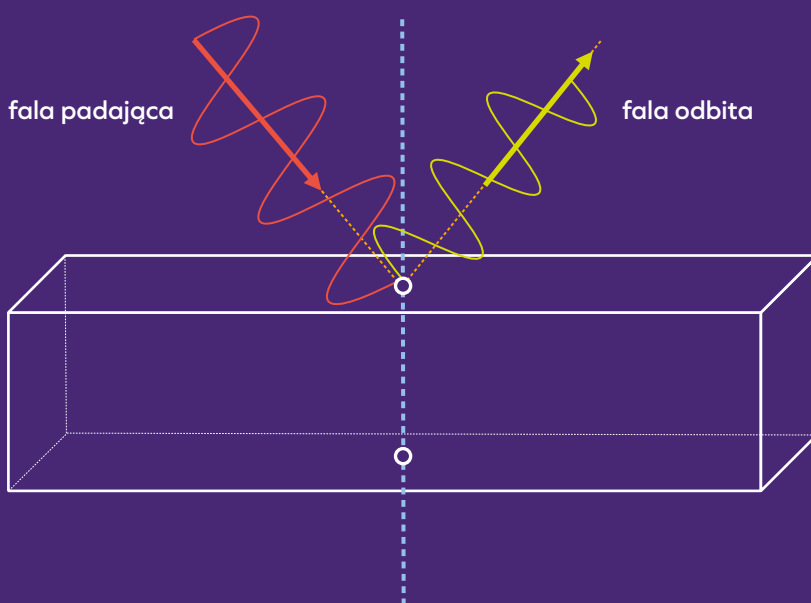
2. Przykładowe przeszkody dla fal EM

Bardzo szczególnym rodzajem przeszkody jest obiekt metalowy. Metal, jako doskonały przewodnik, może zapewnić taki rozkład ładunków elektrycznych na swojej powierzchni, by zniwelować pole elektryczne w swoim wnętrzu (jeżeli pole nie jest dokładnie zniwelowane, wywołuje dalszy ruch ładunków, aż do osiągnięcia tego efektu).

Oznacza to, że wewnątrz obiektu metalowego nie może istnieć fala EM – fala padająca na jego powierzchnię ulega niemal całkowitemu odbiciu. Co więcej, by takie zjawisko zaszło, powierzchnia nie musi być lita. Fala EM ulegnie odbiciu nawet od metalowej siatki, której oczka są mniejsze niż długość padającej fali.

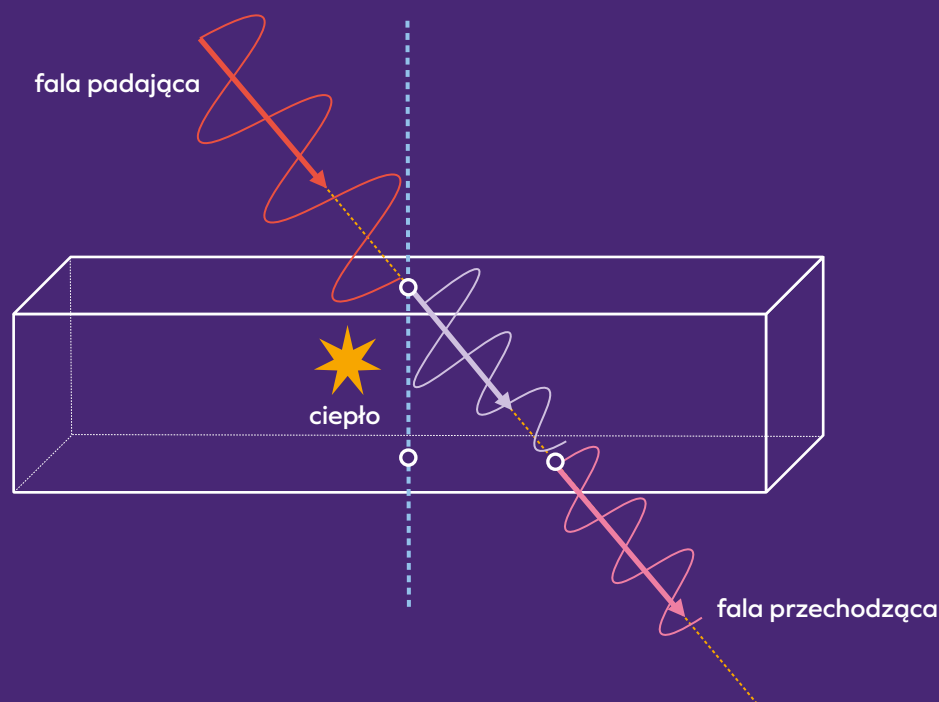


Rys. 1. Ogólny schemat przedstawiający zachowanie się fali przy przejściu przez materialną przeszkodę.



Rys. 2. Odbicie fali EM na powierzchni metalu.

Dla przeszkód niemetalowych (lub w ogólności – nieprzewodzących) sytuacja jest bardziej złożona. Bardzo długie fale EM, używane np. w klasycznych stacjach radiowych, przenikają przez dużą część ścian przy znikomym odbiciu i załamaniu (Rys. 3). Jeżeli dochodzi do pochłonięcia części energii fali w ośrodku materialnym, energia ta zostaje zużyta na pobudzenie do ruchu atomów lub cząsteczek tego ośrodka. Przejawia się tym samym jako wydzielenie ciepła i prowadzi do jego ogrzania.



Rys. 3. Przenikanie fali EM przez przeszkodę materialną nieprzewodzącą przy pomijalnym odbiciu.

Jak bardzo różne może być zachowanie się fal EM w ośrodkach materialnych możemy zaobserwować na przykładzie światła i promieni ultrafioletowych. Światło widzialne jest falą elektromagnetyczną, której długości fali mieszczą się w zakresie od 400 do 800 nanometrów ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$). Z codziennego doświadczenia wiemy, że światło doskonale przenika przez zwykłe szkło (dochodzi także do częściowego odbicia rzędu ok. 4%). To samo szkło z kolei w bardzo dużym stopniu absorbuje promieniowanie ultrafioletowe UVB, które także jest falą EM o długości fali z zakresu 280 do 315 nm (już poza zakresem widzialnym). Właśnie z tego powodu nie jest możliwe opalanie się przez szybę okienną.

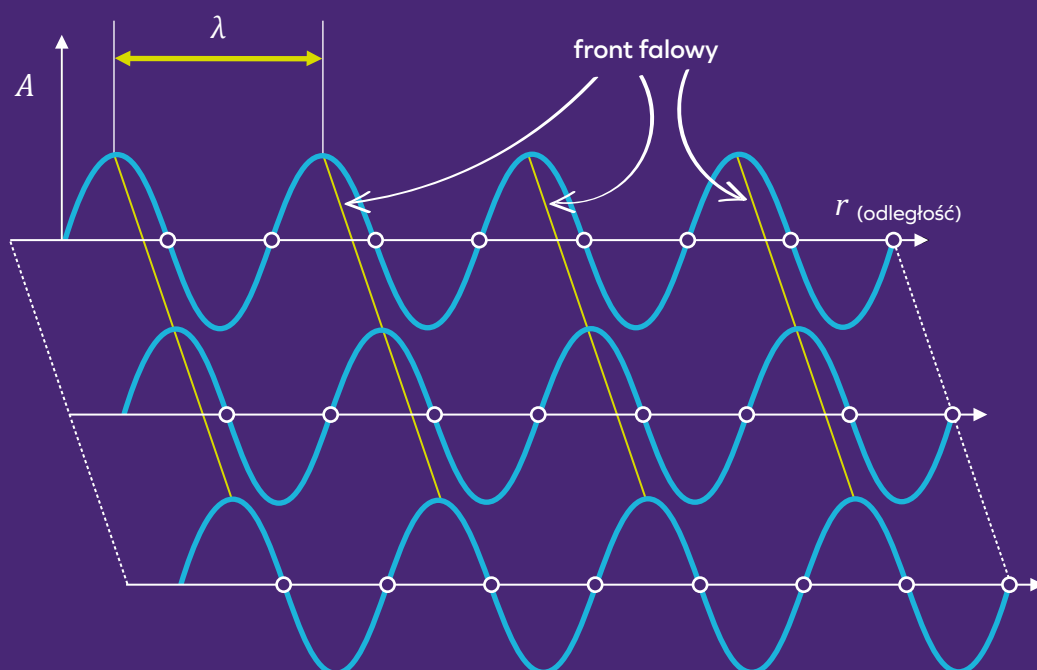
Silne pochłanianie energii fal EM w określonym zakresie związane jest z istnieniem rezonansowych częstotliwości (patrz Lekcja 5) dla ruchów vibracyjnych i rotacyjnych atomów oraz cząsteczek, z których zbudowana jest dana przeszkoda. Fala EM pełni rolę wymuszenia, a w warunkach rezonansu pochłonięta energia nie jest wypromieniowana dalej jako fala EM (tak jest np. w przypadku odbicia fali), ale zużywana jest do pobudzenia ruchu molekuł danego ciała, czyli jego ogrzania.

Wspomniane już fale radiowe o długościach od 10 m do 10 km przenikają bez znacznych strat nawet przez grube betonowe ściany, które z kolei mogą być prawie nieprzenikalne dla promieni mikrofalowych stosowanych np. w telefonii mobilnej. Oczywiście ściany z tzw. betonu zbrojonego, czyli wzmocnionego stalowymi prętami lub siatkami, są twardą

przeszkodą dla niemal wszystkich stosowanych w telekomunikacji zakresów fal EM. Jest to duże wyzwanie dla zapewnienia łączności mobilnej w środowisku miejskim, pomiędzy budynkami oraz w ich wnętrzach.

3. Dyfrakcja fal

Do opisu kolejnego ważnego zjawiska związanego z zachowaniem się fal przy przeszkodach warto sprecyzować pojęcie **fali płaskiej**. Z falą taką mamy do czynienia, gdy **fronty falowe** (inaczej – powierzchnie falowe), czyli linie łączące punkty o tej samej fazie, są do siebie równoległe (Rys. 4)

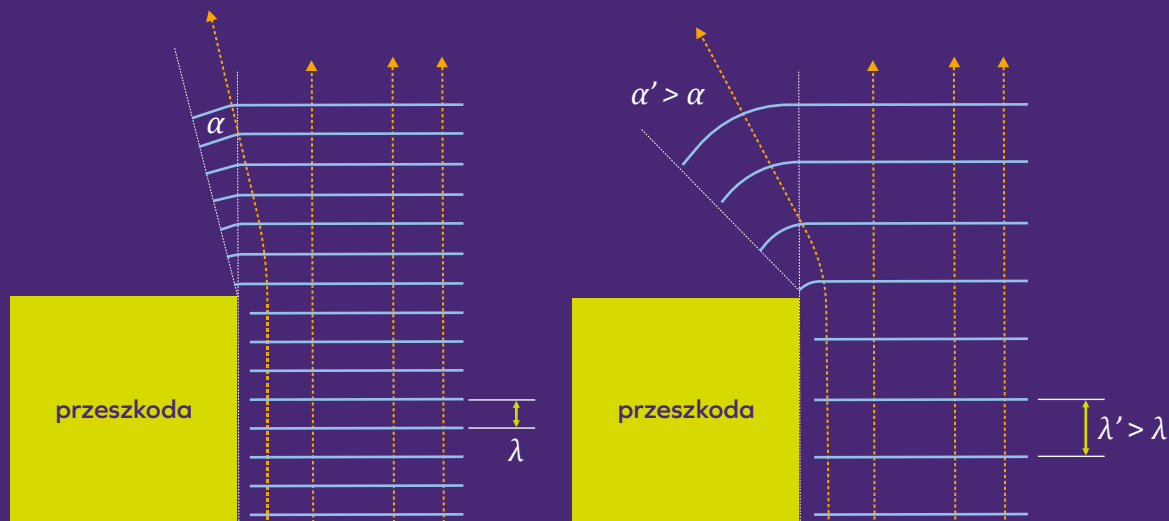


Rys. 4. Fala płaska. Front falowy jako powierzchnia obejmująca punkty o tej samej fazie.

Każda rozchodząca się fala w wystarczająco małym wycinku może być uznana za falę płaską. Fale rozchodzące się kolistnie na powierzchni wody nie są falami płaskimi, ale w niewielkim wycinku kątowym fronty falowe takiej fali można w przybliżeniu uznać za równoległe. Zaletą pojęcia fali płaskiej jest to, że jednoznacznie pozwala ono na określenie kierunku rozchodzenia się fali – prostopadle do frontów falowych.

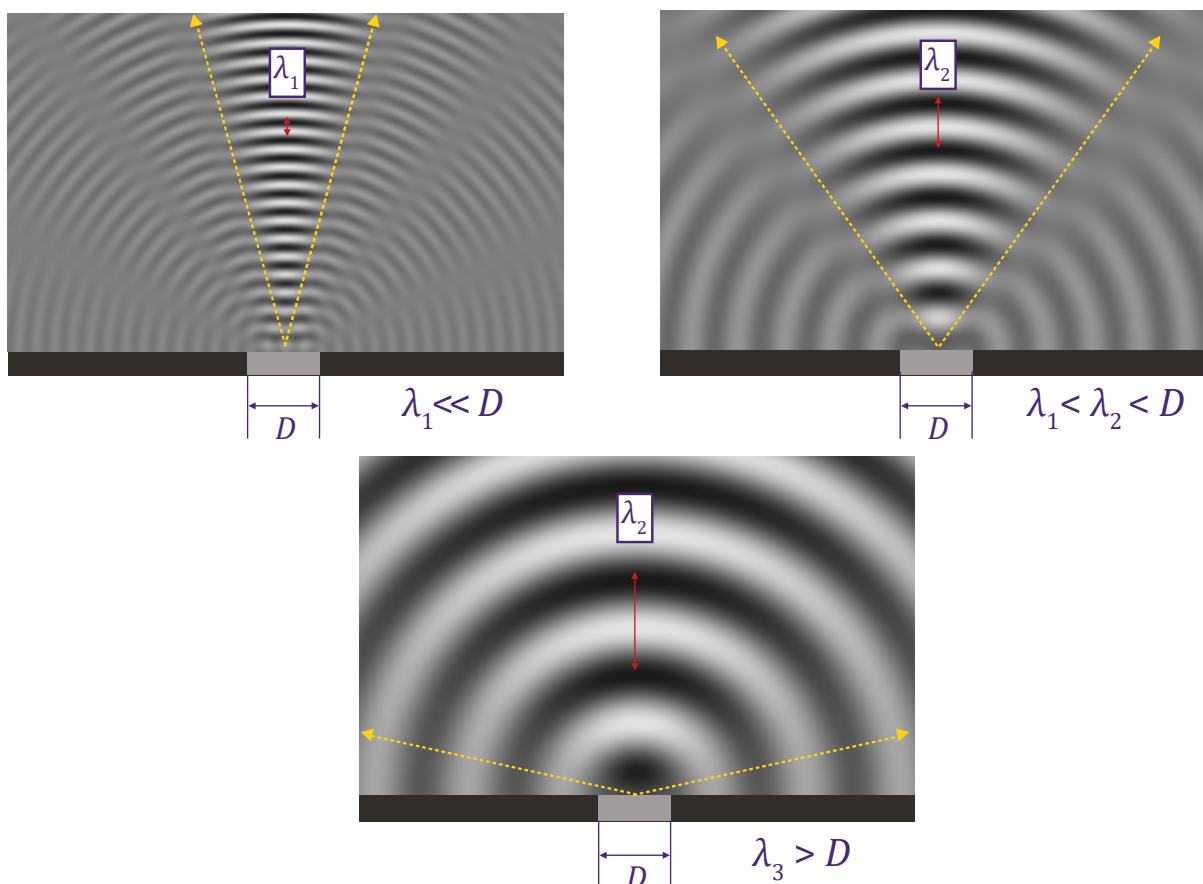
Jedną z charakterystycznych cech fal jest to, że trafiając na krawędź nieprzepuszczalnej dla nich przeszkody ulegają one ugięciu. Przypatrzmy się falom, które w dolnej części Rys. 5 są falami płaskimi i poruszają się w kierunku pionowym do góry. Fronty falowe oznaczono kolorem niebieskim. Po dotarciu do krawędzi przeszkody fronty falowe ulegają zagięciu w kierunku przeszkody, a tym samym ulega zmianie kierunek przemieszczania się fali. Efekt ten, nazywany **dyfrakcją**, jest tym bardziej widoczny, im większa jest długość fali. Kąt ugięcia α uzależniony jest od stosunku długości fali do rozmiaru przeszkody.

Zjawisko dyfrakcji fali płaskiej, która pada na szczelinę o szerokości D , pokazano na Rys. 6 (obrazy wygenerowano z wykorzystaniem aplikacji, do której link można znaleźć w Materiałach zewnętrznych [1]).



Rys. 5. Dyfrakcja fali płaskiej na nieprzenikalnej przeszkodzie.

Jak widać, gdy długość fali jest znacznie mniejsza od szerokości szczeliny, większość energii fali skupiona jest w obszarze niewielkiego kąta. Zupełnie inny obraz przedstawia przypadek długości fali większej niż szerokość szczeliny – fala wydaje się rozprzestrzeniać za przeszkodą niemal równomiernie jako fala kolista.



Rys. 6. Dyfrakcja fali płaskiej na szczelinie.

Zjawisko dyfrakcji fal akustycznych jest bardzo ważne w komunikacji głosowej, ponieważ długości fal emitowanych przez narządy mowy są porównywalne z typowymi rozmiarami przeszkód w naszym otoczeniu. Dzięki niemu możemy swobodnie rozmawiać z osobą stojącą zaraz za rogiem budynku, nawet jeśli jej nie widzimy.

Bardzo mała długość fali światła widzialnego powoduje to, że uginanie się światła na przeszkodach jest znikome (ale możliwe do wychwycenia gołym okiem – patrz Doświadczenie). To także ma dla nas duże znaczenie, gdyż możemy założyć, że promienie świetlne poruszają się prostoliniowo, co znacznie ułatwia nam dokładne odwzorowanie otoczenia z wykorzystaniem wzroku. Nietoperze oraz inne zwierzęta bazujące w swoim zachowaniu na echolokacji emitują niesłyszalne dla nas ultradźwięki, czyli fale akustyczne o bardzo małej długości fali, właśnie dlatego, by zmniejszyć efekty dyfrakcyjne. Z podobnego powodu ultradźwięki używane są w ultrasonografii (USG).

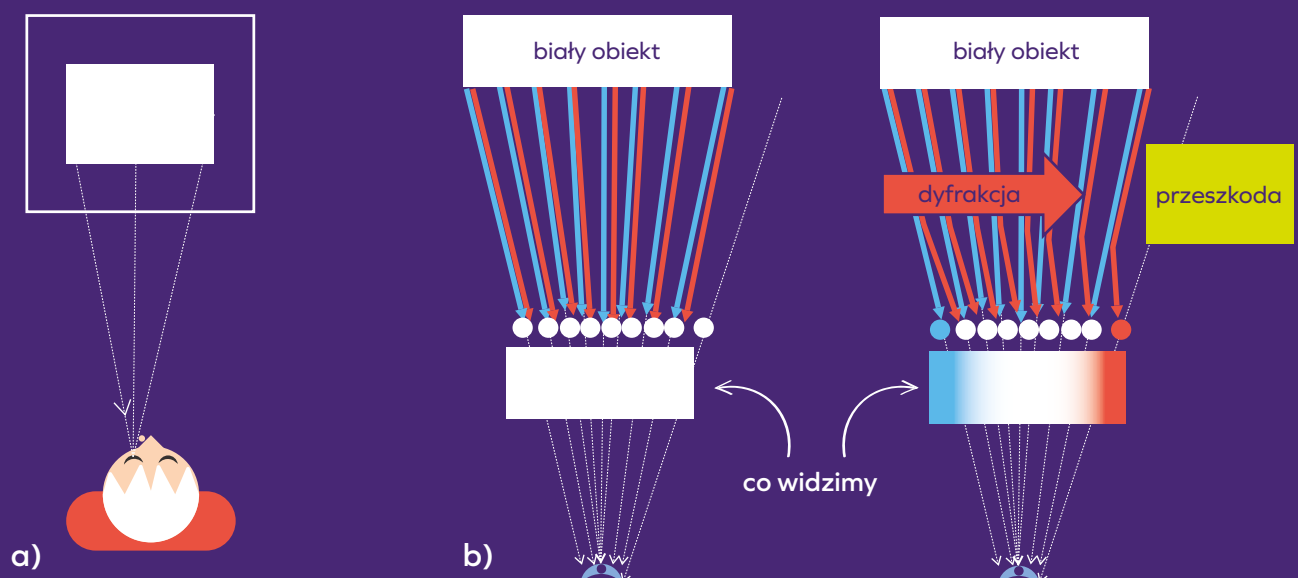
Uginanie się fal EM stosowanych w klasycznym radiu (długości fal rzędu kilometrów) pozwala im na docieranie do trudno dostępnych miejsc poza obszarem widoczności anteny nadawczej (patrz Materiały zewnętrzne [3]). Wraz ze skracaniem się długości fali nadawanego sygnału, a zatem przy zwiększaniu jego częstotliwości (co obserwujemy szczególnie w telefonii mobilnej), ugięcie jest coraz mniejsze i coraz ważniejsze staje się zmniejszenie liczby przeszkód na drodze transmisji sygnału. Zagadnieniami tego rodzaju zajmiemy się bardziej szczegółowo w Lekcji 10.



Doświadczenie

Chociaż długość fali świetlnej jest bardzo mała (400 – 800 nm) i obserwacja silnych efektów dyfrakcyjnych wymaga zazwyczaj specjalnych narzędzi (tzw. siatek dyfrakcyjnych), istnieje bardzo prosty eksperyment, który nie tylko pozwala na bezpośrednią obserwację dyfrakcji światła, ale również potwierdzenie jej zależności od długości fali.

Do przeprowadzenia eksperymentu potrzeba będzie tylko niewielki, jasny obiekt (najlepiej w kolorze białym) na wyraźnie ciemniejszym tle (im ciemniejszym tym lepiej) – Rys. 7a.



Rys. 7. Dyfrakcja fali świetlnej.

Zamknij jedno oko (przyjmijmy, że prawe, ale to nie ma znaczenia) i skup swój wzrok na obiekcie przystawiając palec po lewej stronie nosa tak, by przesłonił pole widzenia dochodząc do krawędzi obiektu (możesz też zamiast przesłaniania widoku palcem przekręcić głowę w lewo, by krawędź nosa posłużyła za przesłonę). Pamiętaj, by wzrok był cały czas skupiony na jasnym obiekcie. Czy dzieje się coś dziwnego?

Krawędź obiektu w pobliżu przeszkody nabiera odcienia czerwonego, natomiast przeciwną krawędź – niebieskiego. Efekt jest tym bardziej widoczny, im węższy jest jasny obiekt.

Spróbuj wytłumaczyć, dlaczego się tak dzieje.



Dyskusja. Zaobserwowany efekt można łatwo wyjaśnić dyfrakcją światła oraz tym, że silniej jej podlegają fale o większej długości. Światło białe składa się zasadniczo z wszystkich kolorów tęczy, przyjmijmy jednak dla uproszczenia, że już dwa kolory – niebieski i czerwony – po zmieszaniu tworzą kolor biały. Reprezentują one odpowiednio bardzo małą i bardzo dużą długość fali. Przyjmijmy jeszcze jedno uproszczenie, mianowicie, że efekt dyfrakcji fali w kolorze czerwonym jest znaczny, zaś dla tej w kolorze niebieskim – pomijalny.

Popatrzmy teraz na Rys. 7b. Przy braku jakichkolwiek przeszkód promienie świetlne docierają do oka w postaci zmieszanej dając białą barwę obiektu. Co dzieje się, gdy pojawi się obok promieni nieprzezroczysta przeszkoda? Fale ulegają ugięciu w jej kierunku i to tym bardziej, im większa jest długość fali. Na rysunku przedstawiamy ten efekt w uproszczeniu jako przesunięcie się wszystkich promieni czerwonych w prawo, niebieskie zaś praktycznie nie ulegają zmianie. Środkowa część obiektu pozostaje w efekcie biała – promienie czerwone nadal mieszają się z niebieskimi (choć pochodzącymi już z innej części obiektu). Inaczej jest przy krawędziach. Przy prawej krawędzi ugięte promienie czerwone nie natrafiają na odpowiedniki niebieskie i widzimy w tym miejscu nadmiar koloru czerwonego. Przy lewej krawędzi promienie czerwone już nie mieszają się ze skrajnymi niebieskimi – stąd w tym miejscu pojawia się odcień niebieski.



Słowniczek

Absorpcja – zjawisko pochłaniania energii fali przez ośrodek lub obiekt materialny.

Dyfrakcja – zjawisko ugięcia się fali na krawędzi nieprzepuszczalnej przeszkody. Wielkość ugięcia zależy od stosunku długości fali do rozmiaru przeszkody (np. szerokości szczeliny, przez którą przechodzi fala).

Front falowy – linia (lub powierzchnia, jeśli fala rozchodzi się w przestrzeni) łącząca punkty o tej samej fazie.

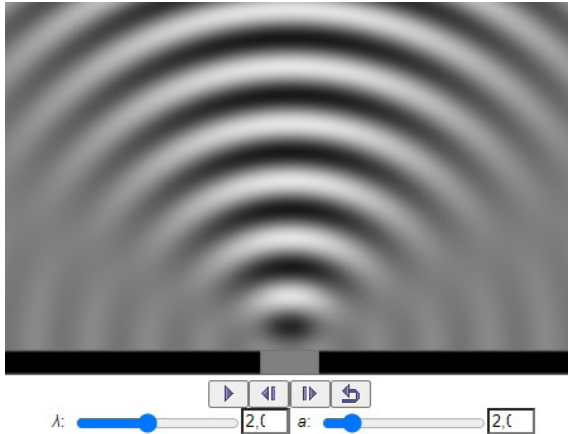
Fala płaska – fala, której fronty falowe są liniami (lub powierzchniami, jeśli fala rozchodzi się w przestrzeni) równoległymi do siebie.

Normalna – prosta prostopadła do powierzchni ciała, na które pada fala.



Materiały zewnętrzne

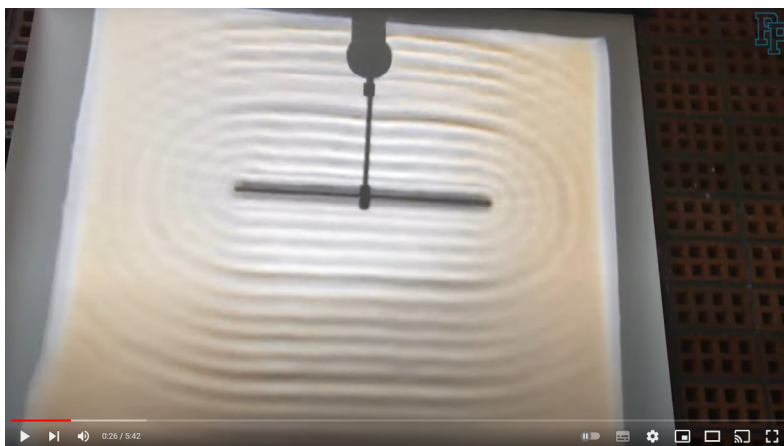
1. Aplikacja online umożliwiająca obserwację dyfrakcji fali o długości λ na szczelinie o szerokości a . Oba parametry można regulować niezależnie (*Diffraction Simulation ComPADRE*).



Zeskanuj QR kod



2. Film: Zjawisko dyfrakcji (demonstracja eksperymentalna zjawiska dyfrakcji na falach na powierzchni wody).



Zeskanuj QR kod



3. Animacja obrazująca dyfrakcję fal radiowych i wpływ długości fali na skalę ugięcia fali na przeszkodach terenowych (tytuł filmu: *Radio wave diffraction*).



Zeskanuj QR kod





Praca domowa

1. Nietoperze używają echolokacji do wykrywania i chwytania zdobyczy. Jakiej minimalnej częstotliwości dźwięku musi użyć nietoperz, by zlokalizować ćmę o rozmiarze 2 cm? Przyjmij prędkość dźwięku równą 340 m/s. Wskazówka: możesz założyć, że echolokacja zadziała poprawnie już wtedy, gdy rozmiar obiektu jest porównywalny z długością fali (lub większy).

Dane:

Prędkość dźwięku: $v = 340 \text{ m/s}$

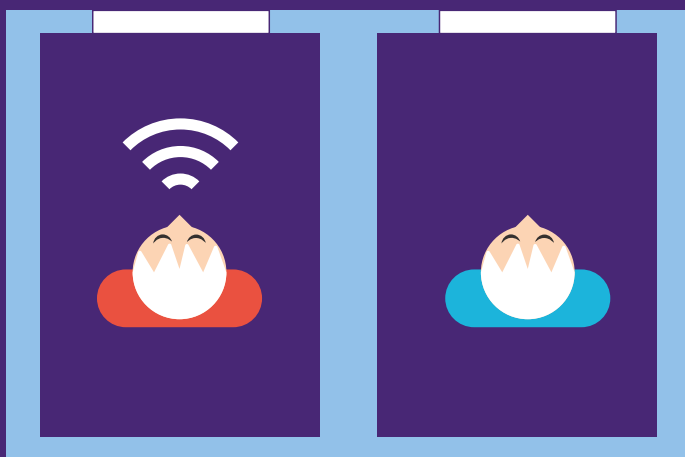
Rozmiar obiektu: $d = 2 \text{ cm} = 0,02 \text{ m}$

Długość fali: $\lambda \approx d = 0,02 \text{ m}$

Szukane:

Częstotliwość dźwięku: $f = ?$

2. Czy jest możliwa rozmowa przez otwarte okna osób znajdujących się w dwóch pomieszczeniach oddzielonych nieprzepuszczalną dla dźwięku ścianą? Narysuj schematycznie rozchodzenie się fali akustycznej od nadawcy w lewym pomieszczeniu. Weź pod uwagę, że długość fal dźwiękowych komunikatu głosowego jest duża w porównaniu z rozmiarem przeszkód.



Lekcja 7

Modulacja amplitudowa – AM

Cel

- Przedstawienie podstawowej koncepcji modulacji amplitudowej fali nośnej (AM).

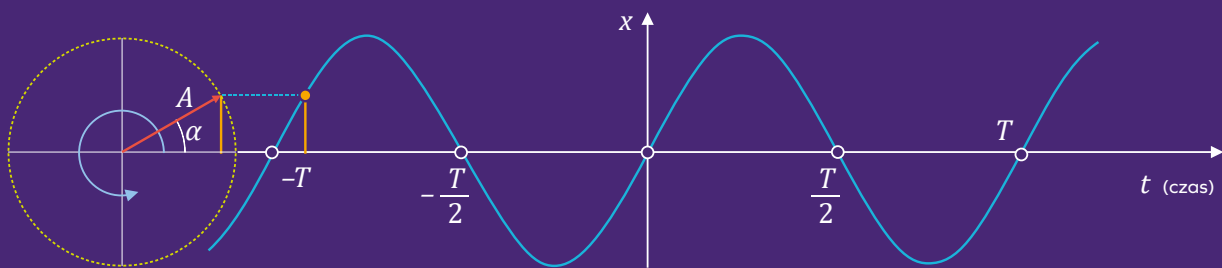
Efekty kształcenia

- Uczeń zna rolę modulacji w przesyłaniu informacji z wykorzystaniem zjawisk falowych.
- Uczeń zna podstawowe typy modulacji amplitudowej.
- Uczeń potrafi wyjaśnić budowę widma fali zmodulowanej amplitudowo sygnałem harmonicznym.
- Uczeń potrafi wyjaśnić przeniesienie widma sygnału modulującego w pobliże częstotliwości fali nośnej i obecność wstęg bocznych.



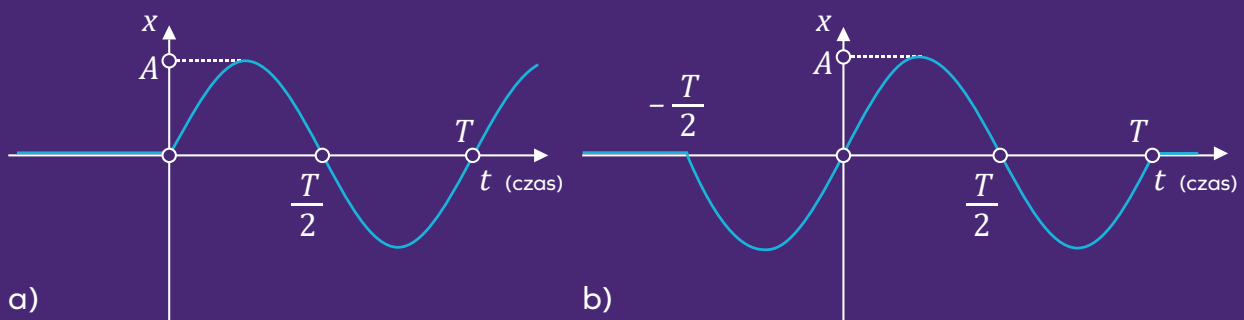
1. Fala harmoniczna nie przenosi informacji

W Lekcji 3 wprowadziliśmy falę harmoniczną jako obraz jednostajnego ruchu punktu po okręgu. Do opisu jej zmienności w czasie wystarczy podać jej amplitudę A , częstotliwość f (lub okres T) oraz fazę w chwili $t=0$. Czy parametry te mogą być nośnikami informacji? Sprecyzujmy, że w ścisłym sensie fala harmoniczna rozciąga się nieograniczenie w czasie zarówno w przyszłość, jak i w przeszłość (Rys. 1). Parametry fali są zatem niezmiennie i nie ma możliwości, by wykorzystać je do przesłania informacji.



Rys. 1. Sygnał harmoniczny – sygnał okresowy bez początku i końca w czasie.

Jeżeli wydaje się to nieintuicyjne, bo przecież w amplitudzie fali można zakodować np. odczytaną wartość temperatury, to wynika to głównie z tego, że rzadko myślimy o sygnale jako o czymś, co rozciąga się nieograniczenie w przeszłość. Przesłanie informacji w jednym z parametrów fali byłoby możliwe, gdyby została ona „uruchomiona” w chwili $t=0$ (Rys. 2a).



Rys. 2. Sygnały nieharmoniczne składające się z odcinków sygnału harmonicznego.

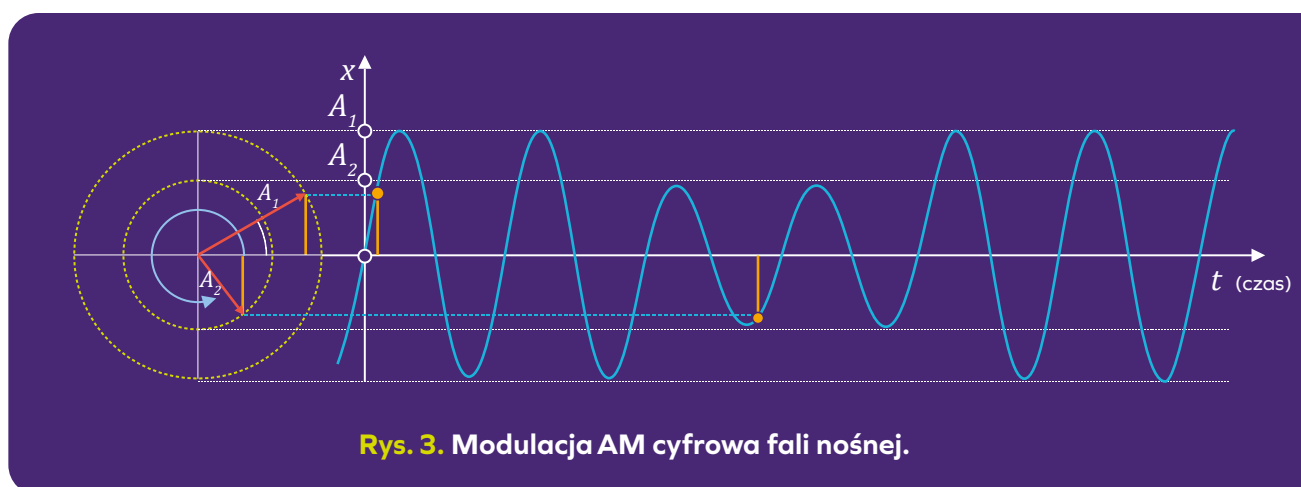
Mamy wtedy do czynienia z sytuacją, w której sygnał do pewnego momentu nie jest odbierany, a następnie dochodzi do drgań z określoną amplitudą, której wartość można dobrać dowolnie adekwatnie do zawartości informacyjnej sygnału.

Sygnały pokazane na Rys. 2 nie są jednak falami harmonicznymi (ściśle rzecz biorąc), chociaż możemy je traktować jako odcinki fali harmonicznej. Pierwszy z nich ma amplitudę zerową aż do chwili $t=0$, potem o wartości A , zaś drugi sygnał ma amplitudę równą A tylko w przedziale czasowym od $t=-T/2$ do $t=T$. Poza tym przedziałem jego amplituda jest zerowa.

2. Modulacja fali nośnej

Zmienianie parametrów fali harmonicznej w czasie nazywa się **modulacją**. Zmodulowana fala przestaje być falą harmoniczną, ale nadal możemy przedstawiać ją jako obraz ruchu punktu po okręgu, przynajmniej w pewnych odcinkach czasu. Fala, której parametry są zmieniane w czasie nazywana jest **falą nośną**, a jej częstotliwość nazywamy **częstotliwością fali nośnej** i oznaczamy przez f_n .

W niniejszej lekcji skupimy się na **modulacji amplitudowej**, w której parametrem fali przenoszącej informację jest jej amplituda. W skrócie ten rodzaj modulacji nazywany jest często **AM** (od nazwy angielskiej *amplitude modulation*).

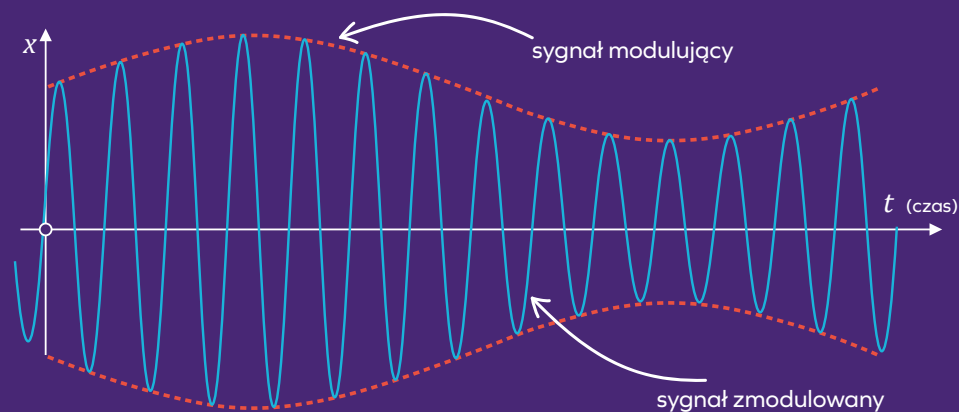


Rys. 3. Modulacja AM cyfrowa fali nośnej.

Przypatrzymy się najprostszemu przypadkowi modulacji AM, w którym amplituda sygnału może przyjąć tylko dwie możliwe wartości A_1 i A_2 (patrz Rys. 3). Sygnał taki możemy zobrazić jako wynik obrotowego ruchu dwóch wektorów o różnych długościach, ale o tym samym okresie obrotu. W momencie zmiany wartości amplitudy, dokonuje się przeskok punktu z jednego okręgu na drugi.

Kiedy liczba poziomów amplitudy sygnału jest skończona, modulację taką nazywamy **cyfrową** (mówimy także o **kluczowaniu amplitudy**).

Sygnały przedstawione na Rys. 2 są przykładami sygnałów zmodulowanych cyfrowo. Przyjmują one tylko dwie wartości – A i 0 .



Rys. 4. Modulacja AM analogowa (ciągła) fali nośnej.

Bardziej ogólnym sposobem modulacji jest zmiana amplitudy w sposób ciągły w zależności od wartości analogowego sygnału modulującego (Rys. 4). Pojęcie sygnału analogowego omawialiśmy w Lekcji 1.

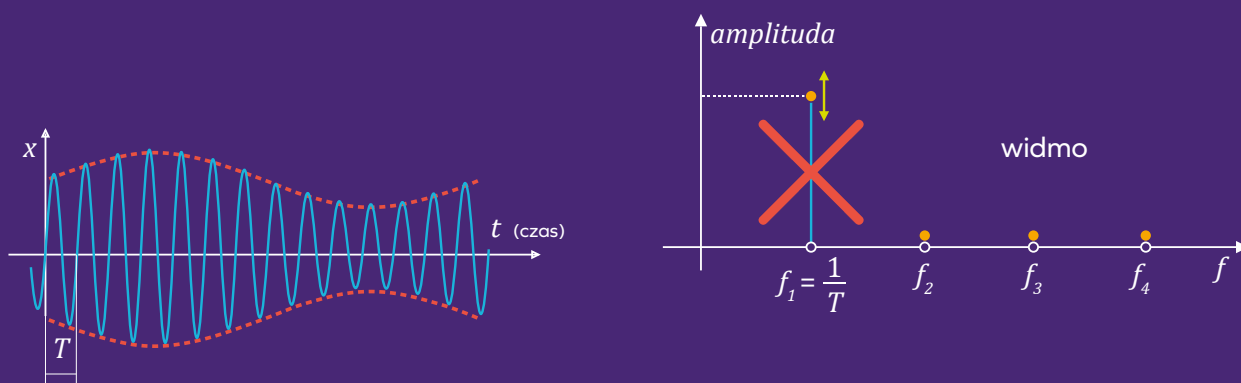


Pytanie. Jeżeli nadajesz komunikat alfabetem Morse'a przez włączanie i wyłączanie latarki, czy korzystasz z jakiegoś rodzaju modulacji?

3. Fala harmoniczna jako sygnał modulujący

Jak wygląda widmo, czyli obraz w dziedzinie częstotliwości, sygnału zmodulowanego amplitudowo (patrz Lekcja 4)? Załóżmy, że mamy do czynienia z ciągłą modulacją fali nośnej, jak przedstawiono na Rys. 4. Przyjmijmy, że okres fali nośnej to T , zatem częstotliwość nośna równa jest $f_n = 1/T$.

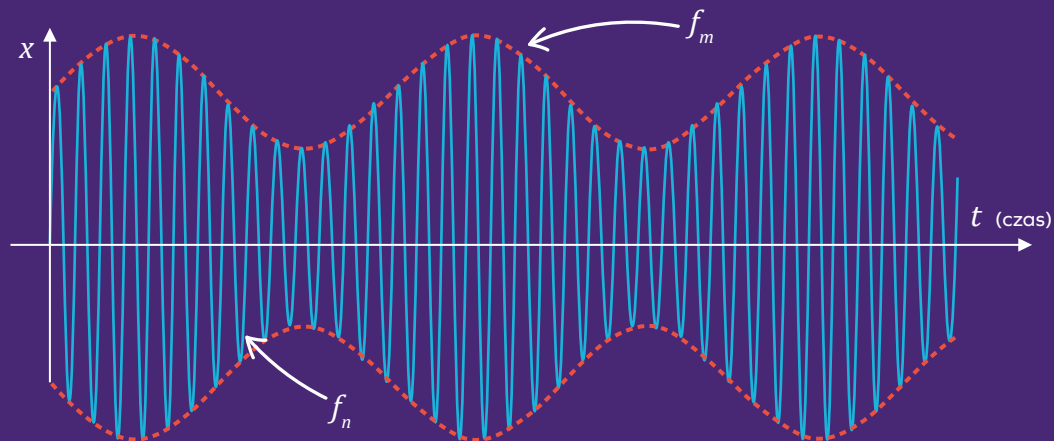
Na pierwszy rzut oka pytanie wydaje się bardzo łatwe. Skoro sygnał ma ustaloną częstotliwość, a zmienia się tylko jego amplituda, widmo powinno składać się z jednego prążka przy częstotliwości f_n , którego zmienna w czasie wysokość odzwierciedlałaby zmiany amplitudy sygnału (Rys. 5).



Rys. 5. Błędne wyobrażenie widma sygnału modulowanego amplitudowo – jeden prążek o zmiennej amplitudzie.

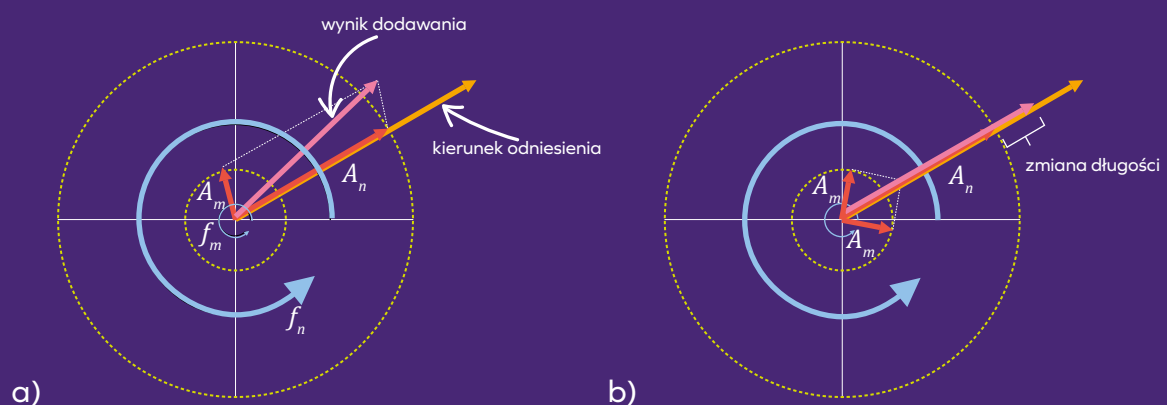
Jest to jednak wyobrażenie błędne. Poszczególne prążki widma sygnału opisują amplitudy sygnałów harmoniczných składających się na dany sygnał. Fala harmoniczna ma ustaloną, tę samą amplitudę w każdej chwili czasowej (przypomnijmy sobie Rys. 1). Jeden prążek nie jest w stanie oddać czasowej zmienności sygnału pokazanego na Rys. 5, który ma różne amplitudy w różnych chwilach czasowych.

Przeanalizujmy zatem widmo sygnału zmodulowanego amplitudowo bardziej dogłębnie. Dla uproszczenia przyjmijmy najpierw, że sygnałem modulującym jest fala harmoniczna o częstotliwości f_m (niezależnej od częstotliwości nośnej f_n) – patrz Rys. 6.



Rys. 6. Fala nośna zmodulowana falą harmoniczną o częstotliwości f_m .

Czy sygnał tego typu można uzyskać przez sumowanie fal harmoniczných (jak w Lekcji 4)? Popatrzmy na diagram kołowy na Rys. 7a. Kierunek wektora reprezentującego falę nośną o amplitudzie A_n przyjmijmy jako kierunek odniesienia i oznaczmy go pomarańczową strzałką. Kierunek ten, wraz z wektorem fali nośnej, obracają się z częstotliwością nośną f_n . Czy możemy wprowadzić jeden dodatkowy wektor, reprezentujący sygnał modulujący, który doprowadzi do zmiany długości wektora fali nośnej tak, by uzyskać modulację AM?



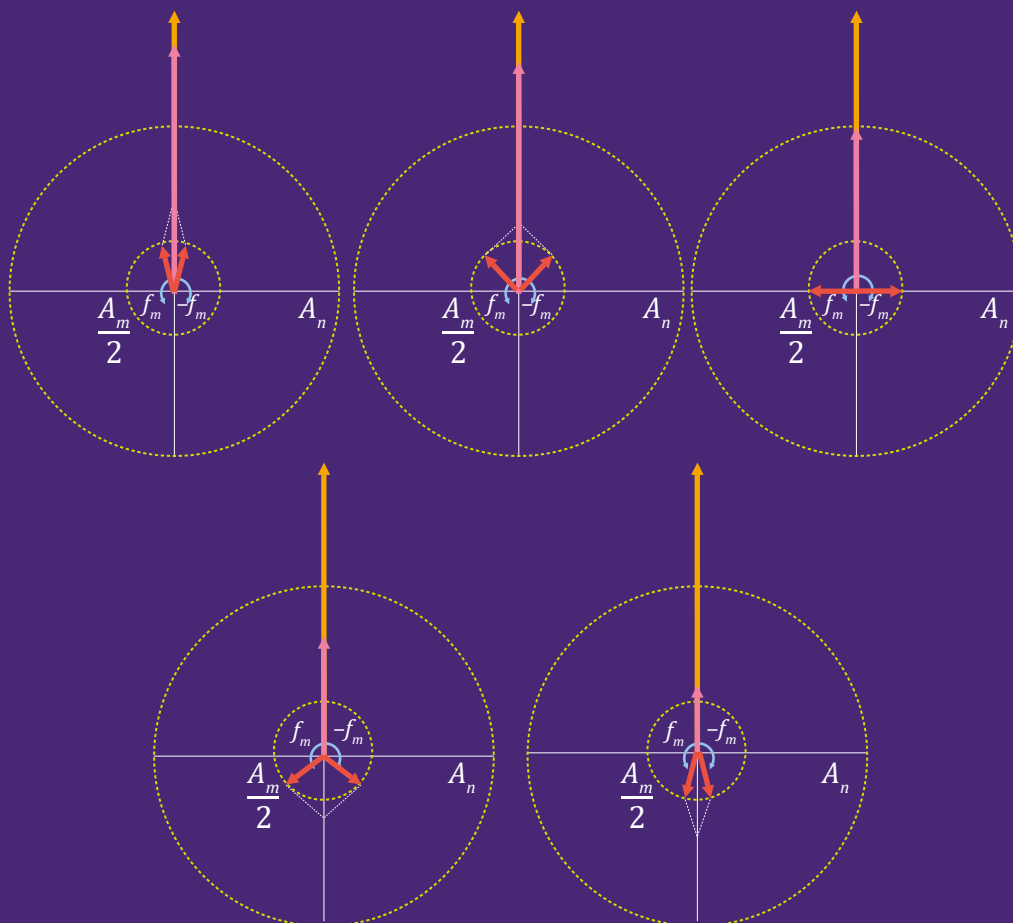
Rys. 7. Modyfikacja długości wektora sygnału nośnego: a) jeden wektor powoduje zmianę kierunku, b) dwa wektory zapewniają prawidłowy efekt.

Łatwo przekonać się, że nie. Jeżeli ten dodatkowy wektor o amplitudzie A_m będzie obracał się z inną częstotliwością niż f_n , zawsze znajdziemy moment, gdy nie pokryje się on z kierunkiem odniesienia i w efekcie suma obu wektorów zmieni kierunek, a nie tylko amplitudę (pamiętajmy o regule równoległoboku przy dodawaniu wektorów!).

Czy możemy pożądany rezultat uzyskać przy dwóch dodatkowych wektorach? Tak – popatrzmy na Rys. 7b. Jeżeli wprowadzimy drugi dodatkowy wektor, który będzie zwierciadlanym odbiciem pierwszego wektora względem kierunku odniesienia, kierunek ich sumy zawsze będzie się pokrywał z kierunkiem odniesienia i suma wszystkich wektorów z diagramu na Rys. 7b będzie wektorem o właściwym kierunku i zmieniającej się amplitudzie.

Z jaką częstotliwością powinny obracać się wektory odpowiadające sygnałowi modulującemu? Ułatwmy sobie analizę i przejdźmy do układu odniesienia, w którym wektor sygnału nośnego jest w spoczynku – jest to układ obracający się z częstotliwością f_n (korzystamy z zasady względności ruchu). Dla wygody przyjmijmy, że kierunek odniesienia pokrywa się w tym układzie z kierunkiem pionowym – patrz Rys. 8.

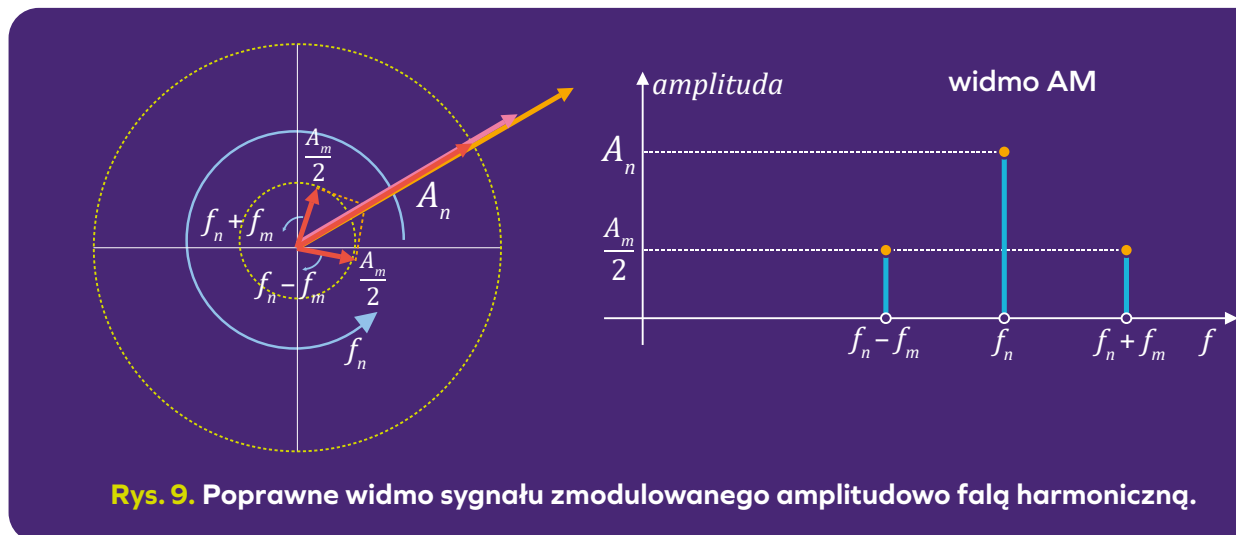
Aby zapewnić zmienność amplitudy z pożądaną częstotliwością f_m , pierwszy dodatkowy wektor powinien obracać się właśnie z tą częstotliwością, zaś drugi wektor – jako jego zwierciadlane odbicie – także z częstotliwością f_m , ale w przeciwnym kierunku (co będziemy dla wygody oznaczać jako $-f_m$). Rys. 8 przedstawia kilka możliwych konfiguracji wektorów sygnału modulującego – ich suma rzeczywiście zawsze pokrywa się z kierunkiem odniesienia i zapewnia okresową zmianę wyłącznie amplitudy sygnału nośnego z częstotliwością f_m .



Rys. 8. Obraz modulacji AM w układzie odniesienia wektora sygnału nośnego przy dwóch wektorach reprezentujących sygnał modulujący.

Zauważmy, że przyprządkowując parę wektorów sygnałowi modulującemu musimy każdemu z wektorów tej pary przypisać długość równą połowie amplitudy sygnału ($A_m/2$). W przeciwnym razie, gdy pokryją się ich kierunki i zwroty, ich suma będzie miała długość $2A_m$. Będziemy to odtąd uwzględniać na następnych diagramach.

Wracając do normalnego układu odniesienia, powinniśmy wszystkim wektorom z Rys. 8 nadać dodatkowy ruch obrotowy z częstotliwością f_n . W rezultacie kierunek odniesienia wraz z wektorem sygnału nośnego ponownie zacznie się obracać z częstotliwością f_n , natomiast wektory sygnału modulującego z częstotliwościami odpowiednio $f_n + f_m$ oraz $f_n - f_m$ (patrzy Rys. 9).



Poprawne widmo zawiera zatem trzy prążki – jeden o częstotliwości nośnej f_n oraz dwa, symetrycznie położone prążki odpowiadające sygnałowi modulującemu o częstotliwościach będących sumą i różnicą częstotliwości nośnej i częstotliwości sygnału modulującego oraz amplitudach równych połowie amplitudy sygnału modulującego.

4. Sygnał modulujący o danym widmie

Można by sądzić, że omówiony w poprzednim etapie przypadek modulacji falą harmoniczną jest zbyt uproszczony i mało praktyczny. Zauważmy jednak, że dodanie kolejnej harmonicznej do sygnału modulującego nie zmienia w całym rozumowaniu nic, poza tym, że diagram kołowy na Rys. 9 powinien być wzbogacony o kolejną parę wektorów, a widmo o dwa dodatkowe prążki rozmieszczone symetrycznie względem częstotliwości nośnej.

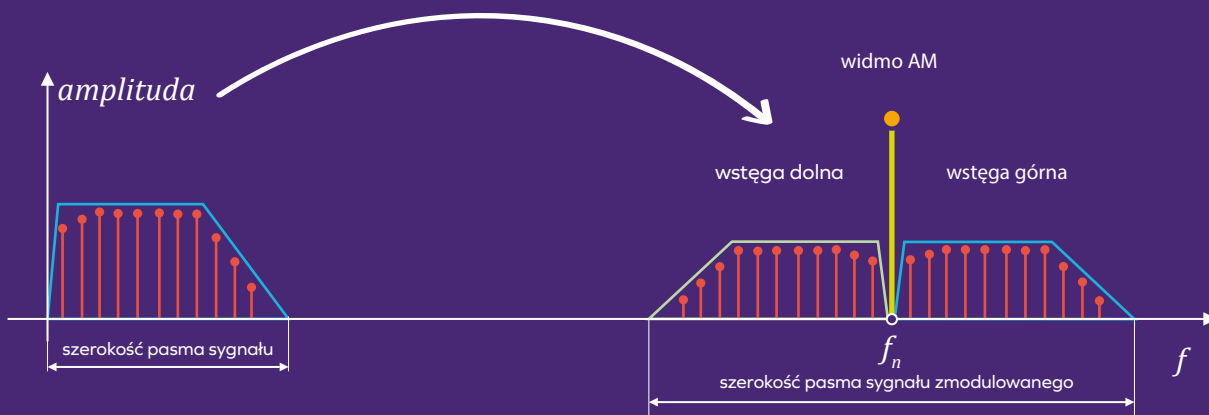
W zasadzie nie ma przeszkód, by przyjąć, że sygnał modulujący składa się z szerokiego zbioru harmonicznnych obejmujących pewien zakres częstotliwości, czyli tzw. pasmo. Sygnał ten może reprezentować np. próbkę komunikatu głosowego, która jak wiemy z Lekcji 4, przedstawia dość skomplikowany obraz w dziedzinie częstotliwości.

Przypatrzmy się Rys. 10. W lewej części widma, czyli dla niskich częstotliwości, sygnał niosący informację zobrazowany jest poglądowo jako szereg prążków obejmujących pewne pasmo. Dla uproszczenia, jeżeli nie interesują nas poszczególne prążki, tylko

przybliżona postać widma sygnału, możemy przedstawić je jako zacieniowany na jasnoniebiesko obszar. Co stanie się, gdy zmodulujemy tym sygnałem harmoniczną falę nośną o częstotliwości f_n ?

Ponieważ każda składowa harmoniczna sygnału o częstotliwości f zostanie przeniesiona do punktu na osi częstotliwości o wartości $f_n + f$, całe widmo przesunę się tuż za częstotliwość nośną (zwróćmy też uwagę na spadek o połowę amplitudy każdej składowej). Każdy tak przeniesiony prążek ma swoje zwierciadlane odbicie po drugiej stronie częstotliwości nośnej, zatem sygnał zmodulowany składa się z dwóch, symetrycznie rozmieszczonych pasm nazywanych odpowiednio **wstęgą dolną** i **wstęgą górną**. Szerokość pasma sygnału zmodulowanego jest zatem dwukrotnie większa niż sygnału modulującego.

Zauważmy jednak, że obie wstęgi jako swoje wzajemne symetryczne odbicia, niosą dokładnie taką samą informację.



Rys. 10. Sygnał o danym widmie po modulacji AM.



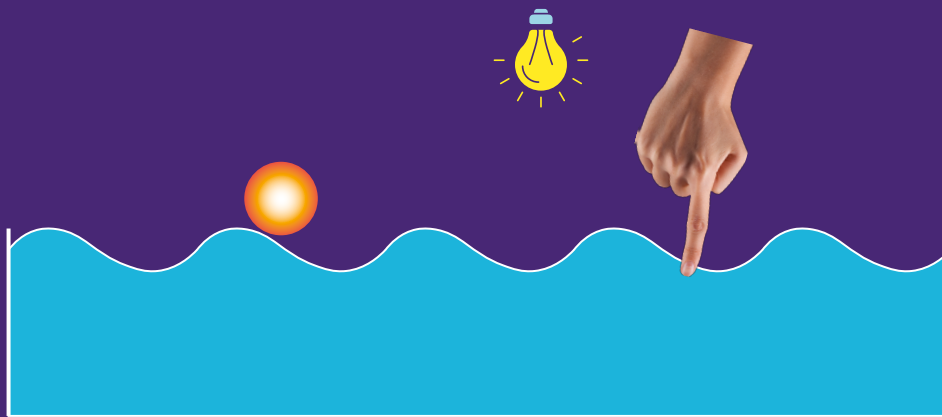
Doświadczenie

Przygotuj duży pojemnik z wodą, może być płytki, ważne tylko, by jego ściany były znacznie od siebie oddalone. W warunkach domowych może to być wanna z niewielką ilością wody. Zbiornik powinien być od góry oświetlony tak, by wyraźnie było widać na dnie zbiornika cień fal na powierzchni wody.

Na powierzchni wody, z dala od ścian, umieść kulkę styropianową lub piłeczkę pingpongową (Rys. 11). W pewnym oddaleniu od piłeczki dotknij powierzchni wody. Na dnie powinien być widoczny cień kółka rozchodzącej się fali powierzchniowej, która dociera do piłeczki i lekko ją unosi.

1. Zaczynaj rytmicznie dotykać powierzchni wody starając się, by za każdym razem zanurzać palec na podobną, niewielką głębokość. Zaobserwuj rozchodzącą się falę. Co dzieje się z piłeczką?

2. Nadal rytmicznie dotykaj powierzchni wody, ale co jakiś czas zmieniaj głębokość zanurzenia palca. Przykładowo, przez kilka sekund załedwie dotykaj powierzchni, a potem przez kolejne kilka sekund utrzymuj nieco większą głębokość zanurzenia palca cały czas utrzymując to samo tempo poruszania dłonią. Potem wróć do początkowego stanu z niewielkim zanurzeniem palca. Czy mamy do czynienia z modulacją? Jakiego rodzaju? Jak na zmieniającą się falę reaguje piłeczka?
3. Oddziel nieprzezroczystą przegrodą umieszczoną nad wodą miejsce, w którym dotykasz powierzchnię wody, od miejsca, w którym znajduje się piłeczka. Twój kolega po drugiej stronie zbiornika niech obserwuje piłeczkę, a przegroda powinna uniemożliwić mu obserwację twojej dłoni. Czy kolega jest w stanie rozpoznać głębokość, na jaką zanurzasz palec przy pobudzaniu fal, tylko i wyłącznie dzięki obserwacji ruchów piłeczki? Czy można dzięki temu przesłać jakąś informację?



Rys. 11. Doświadczenie z modulacją amplitudową fal na powierzchni wody.



Słowniczek

Modulacja – zmiana parametrów fali w czasie. Umożliwia przesyłanie informacji.

Fala nośna – fala harmoniczną, której parametry traktujemy jako parametry odniesienia. Sama nie przesyła informacji, ale może podlegać modulacji.

Modulacja amplitudowa – modulacja polegająca na zmianie amplitudy fali nośnej w czasie.

AM – skrótowa nazwa modulacji amplitudowej (ang. *amplitude modulation*).

Modulacja amplitudowa cyfrowa – modulacja amplitudowa, w której liczba możliwych wartości amplitudy jest skończona.

Kluczowanie amplitudy – inna nazwa modulacji amplitudowej cyfrowej.

Modulacja amplitudowa ciągła (analogowa) – modulacja polegająca na ciągłej zmianie amplitudy fali nośnej w czasie przez analogowy sygnał modulujący.

Wstęga dolna – część widma sygnału zmodulowanego poniżej częstotliwości nośnej.

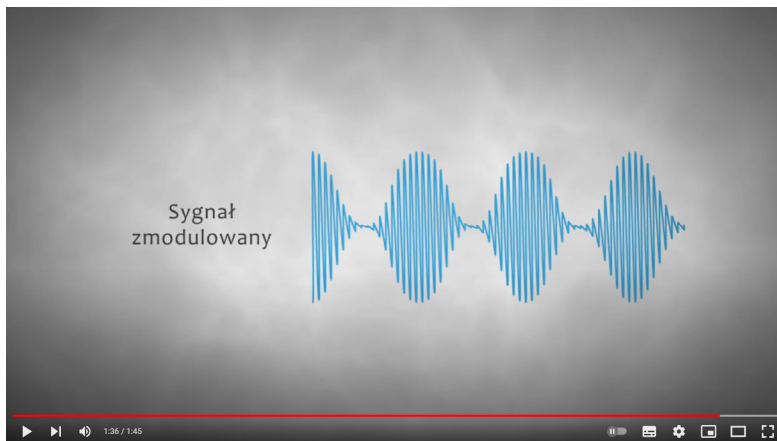
Wstęga górna – część widma sygnału zmodulowanego powyżej częstotliwości nośnej.

Szerokość pasma – różnica między najwyższą i najniższą częstotliwością występującą w danym sygnale.



Materiały zewnętrzne

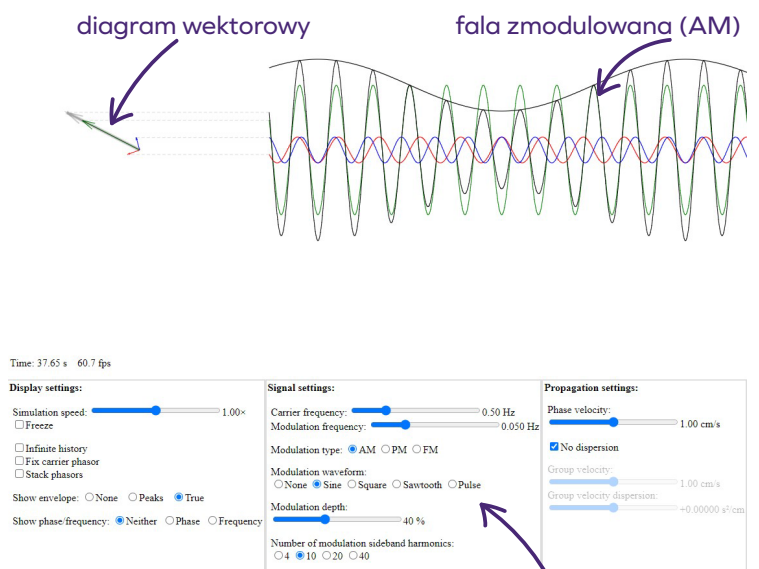
1. Modulacja fali elektromagnetycznej



Zeskanuj QR kod



2. Animacja on-line ukazująca w czasie rzeczywistym generowanie sygnału zmodulowanego w oparciu o model obracających się wektorów.



parametry fali nośnej i modulującej

Zeskanuj QR kod



Istnieje możliwość niezależnego ustawienia częstotliwości nośnej (ang. *carrier frequency*), częstotliwości sygnału modulującego (ang. *modulation frequency*), amplitudy sygnału modulującego (poprzez parametr opisujący tzw. głębokość modulacji (ang. *modulation*

depth). Symulację można zwolnić lub przyspieszyć za pomocą suwaka w lewym oknie (ang. *simulation speed*).

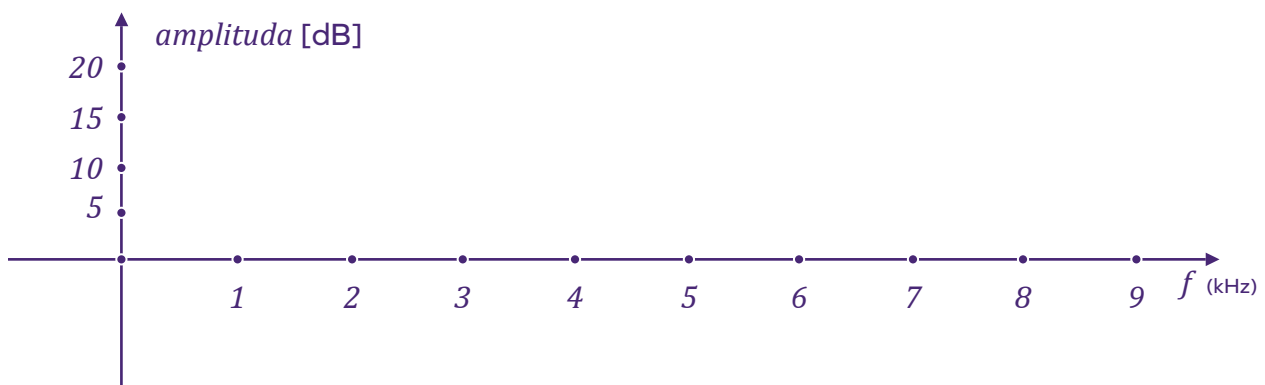
Generowane przebiegi oznaczają odpowiednio:

- linie czarne – sygnał zmodulowany oraz sygnał modulujący (obwiednia);
- linia zielona – fala nośna;
- linie czerwona i niebieska – położenia końców pary wektorów odpowiadających sygnałowi modulującemu (przypomnij sobie Rys. 9).



Praca domowa

1. Narysuj przykładową modulację umożliwiającą przesłanie wyniku trzykrotnego rzutu kostką – 3, 1, 2. Ile poziomów amplitudy należy użyć?
2. Sygnał zawierający próbkę dźwięku, składający się z dwóch składowych harmonicznym o amplitudach równych 10 dB i częstotliwościach równych $f_1 = 1$ kHz i $f_2 = 2$ kHz, wykorzystano do modulacji AM fali dźwiękowej o amplitudzie 20 dB i częstotliwości $f_n = 6$ kHz. Narysuj na jednym wykresie widmo próbki oraz widmo sygnału zmodulowanego AM. Oznacz wstęgi: górną i dolną.



Lekcja 8

Modulacja fazowa i częstotliwościowa

Cel

- Przedstawienie podstawowej koncepcji modulacji fazowej (PM) i częstotliwościowej (FM) fali nośnej.

Efekty kształcenia

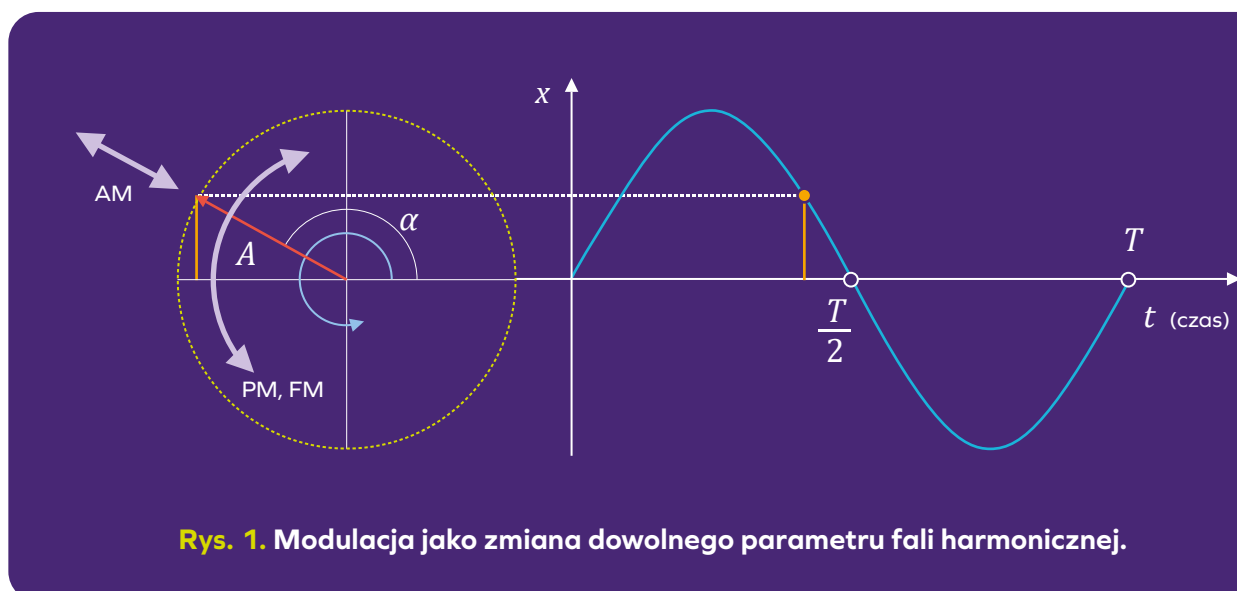
- Uczeń zna podstawowe typy modulacji fazowej i częstotliwościowej.
- Uczeń potrafi wyjaśnić budowę widma fali zmodulowanej fazowo sygnałem harmonicznym.
- Uczeń potrafi obliczyć pasmo sygnału zmodulowanego częstotliwościowo.



1. Koncepcja modulacji fazowej i częstotliwościowej

W Lekcji 7 wprowadziliśmy modulację amplitudową jako sposób na przesłanie sygnału niosącego informację przez zmianę amplitudy fali nośnej. Czy jest to jedyny sposób modyfikacji fali harmonicznej? Oczywiście – nie. Pozostałe parametry fali harmonicznej, czyli częstotliwość i faza, również mogą ulegać zmianie w zależności od zawartości informacyjnej sygnału.

Przypomnijmy sobie diagram kołowy przedstawiający ruch harmoniczny jako obraz jednostajnego ruchu punktu po okręgu lub obrotu wektora (Rys. 1). Modulację amplitudową (AM) możemy na takim diagramie wyrazić przez zmianę długości wektora. Ponieważ fazę możemy utożsamić z kątem obrotu α , zmiana fazy związana jest z modyfikacją tego kąta względem położenia wynikającego z ruchu jednostajnego. Taką zmianę będziemy nazywać **modulacją fazy**. Stosowana jest także skrótowa nazwa – **PM** (od nazwy angielskiej „*phase modulation*”).



Rys. 1. Modulacja jako zmiana dowolnego parametru fali harmonicznej.

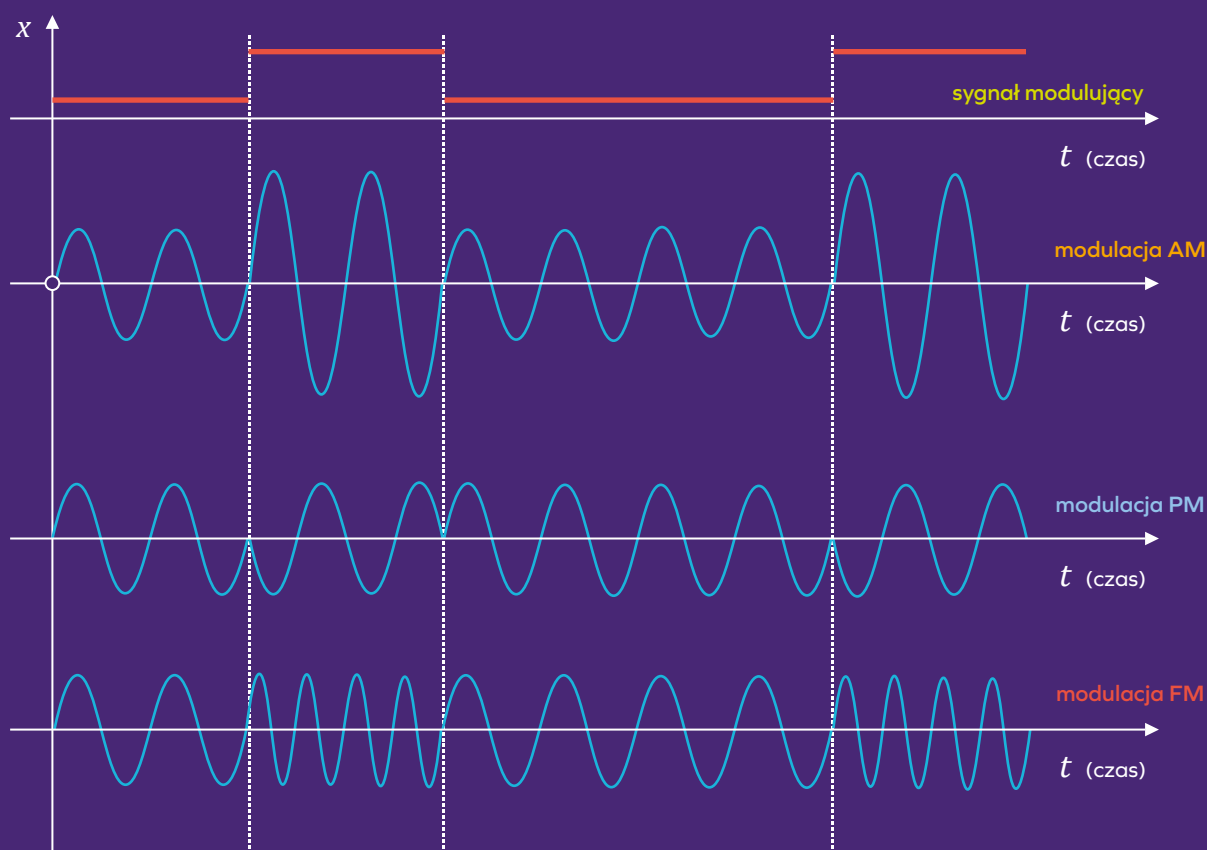
Częstotliwość, równa odwrotności okresu T obrotu, może być rozumiana jako prędkość zmiany fazy. Zmiana częstotliwości będzie zatem odpowiadać zmianie prędkości obrotu wektora na diagramie kołowym względem prędkości obrotu przypisanej fali nośnej. Modyfikację częstotliwości nazywać będziemy **modulacją częstotliwości** i oznaczać także jako – **FM** (od nazwy angielskiej „*frequency modulation*”).

W obu typach modulacji – PM i FM – amplituda zmodulowanego sygnału utrzymywana jest na tym samym poziomie.

2. Modulacja analogowa i cyfrowa

Wszystkie wprowadzone do tej pory techniki modulacji przedstawiono na Rys. 2 dla przypadku, w którym sygnał modulujący ma skończoną liczbę poziomów (w tym przykładzie konkretnie – 2). Mówimy wtedy o **modulacji cyfrowej** lub **kluczowaniu**. Szczególny

przypadek modulacji cyfrowej dla modulacji amplitudowej AM omówiliśmy już w Lekcji 7. Teraz możemy zobaczyć, jak ten sam sygnał steruje parametrami fali nośnej tak, by uzyskać poszczególne typy modulacji – AM, PM i FM.



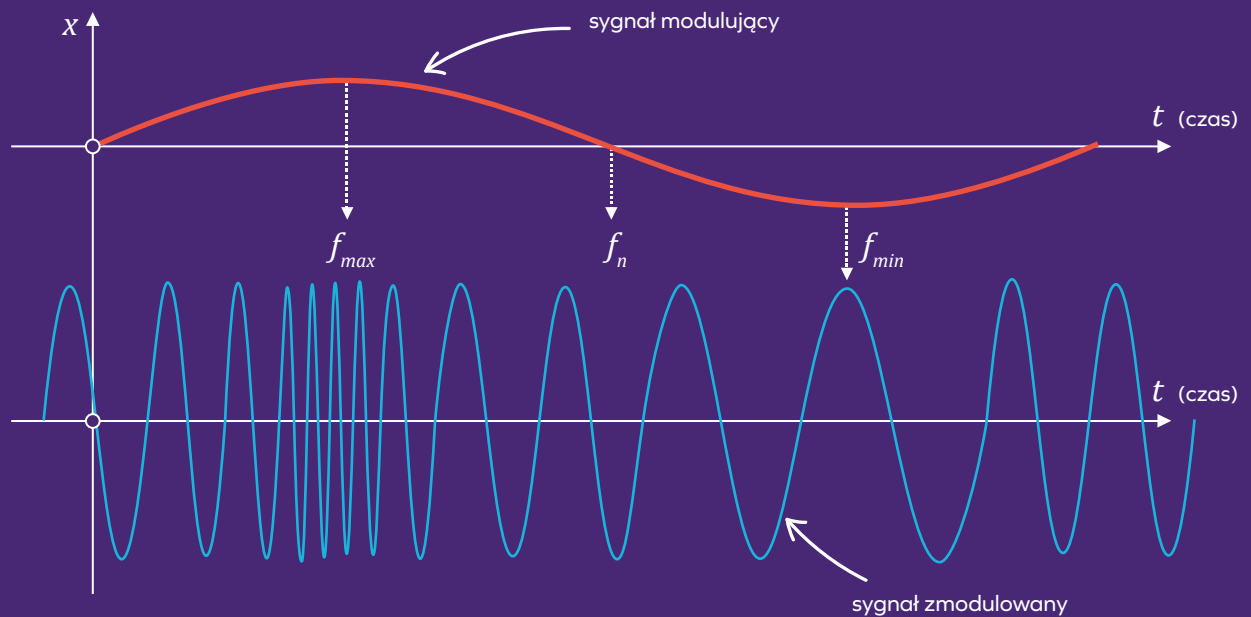
Rys. 2. Różne techniki modulacji cyfrowej (kluczowania).

Jak widzimy, sygnał modulowany amplitudowo posiada dwa różne poziomy amplitudy. Sygnał modulowany fazowo w zależności od poziomu sygnału zmienia swoją fazę o pewien ustalony kąt. Tutaj przyjęto, że dla dolnego poziomu sygnału modulującego faza cofana jest o 180° , zaś dla górnego poziomu przyspieszana o 180° – jest to równoważne zmianie fazy na przeciwną tzn. sygnał malejący zaczyna rosnąć, a rosnący – maleć (zwróć uwagę na nagłą zmianę zachowania sygnału w momentach zmiany poziomu sygnału modulującego). Inaczej mówiąc, zwrot wektora na diagramie kołowym zmienia się na przeciwny.

Dla kluczowania częstotliwości charakterystyczne jest przypisanie różnych częstotliwości sygnału różnym poziomom sygnału modulującego. Zauważmy, że modulacja fazy nie zmienia postaci sygnału nośnego (ma tę samą amplitudę i częstotliwość), powoduje jedynie przesunięcie go w czasie w momentach zmiany poziomu sygnału modulującego.

Efekt modulacji częstotliwości widać natomiast w dowolnym momencie czasu, nawet w długich odcinkach czasu, w których sygnał modulujący jest stały.

Zwróćmy uwagę, że w modulacjach PM i FM amplituda sygnału nie ulega zmianie.



Rys. 3. Przykład modulacji ciągłej (analogowej) FM.

Modulacja analogowa, czyli modyfikacja fali nośnej przez sygnał zmieniający się w sposób ciągły, przedstawiona jest na Rys. 3. Maksymalnej wartości sygnału modulującego przypisana jest pewna częstotliwość maksymalna $f_{\max}$, minimalnej – częstotliwość minimalna $f_{\min}$, zaś przy zerowej (neutralnej) wartości sygnału częstotliwość sygnału zmodulowanego równa jest częstotliwości nośnej f_n . Pomędzy tymi wartościami częstotliwość sygnału zmodulowanego zmienia się w sposób płynny.

Różnicę między maksymalną wartością częstotliwości zmodulowanego sygnału a częstotliwością nośną nazywa się dewiacją częstotliwości i oznacza przez Δf :

$$\Delta f = f_{\max} - f_n$$

Dewiacja częstotliwości mówi nam o tym, jak bardzo częstotliwości pojawiające się w sygnale zmodulowanym oddalają się od częstotliwości nośnej. Mieszczą się one w przedziale od $f_n - \Delta f$ do $f_n + \Delta f$.

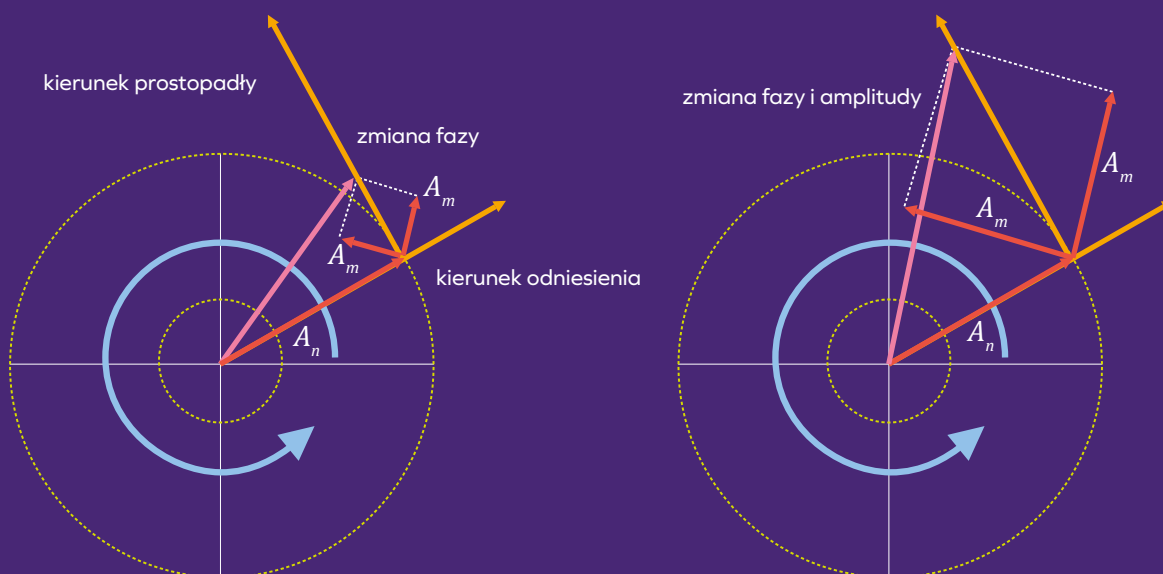
Szczególnie ważną wartością odniesienia (zobaczmy to przy analizie widma zmodulowanego sygnału), jest częstotliwość sygnału modulującego f_m . Jeżeli dewiacja częstotliwości jest mniejsza od częstotliwości sygnału modulującego, tzn. $\Delta f < f_m$, to mamy do czynienia z **modulacją FM wąskopasmową**. W przeciwnym przypadku – z **modulacją FM szerokopasmową**.

Wybór dewiacji częstotliwości jest w dużym stopniu swobodny, niezależny od częstotliwości nośnej sygnału i podyktowany głównie względami wrażliwości transmisji na zakłócenia. Będziemy o tym mówić bardziej szczegółowo w Lekcji 9.

3. Modulacja PM na diagramach wektorowych

Czy modulację PM i FM sygnałem harmonicznym można przedstawić poglądowo na diagramach wektorowych tak, jak to zrobiliśmy w Lekcji 7 dla modulacji AM? Niestety, taka analiza PM i FM jest znacznie bardziej skomplikowana. Może być przeprowadzana w ten sposób tylko dla modulacji PM i to w szczególnym przypadku, gdy modyfikacje faz są relatywnie niewielkie.

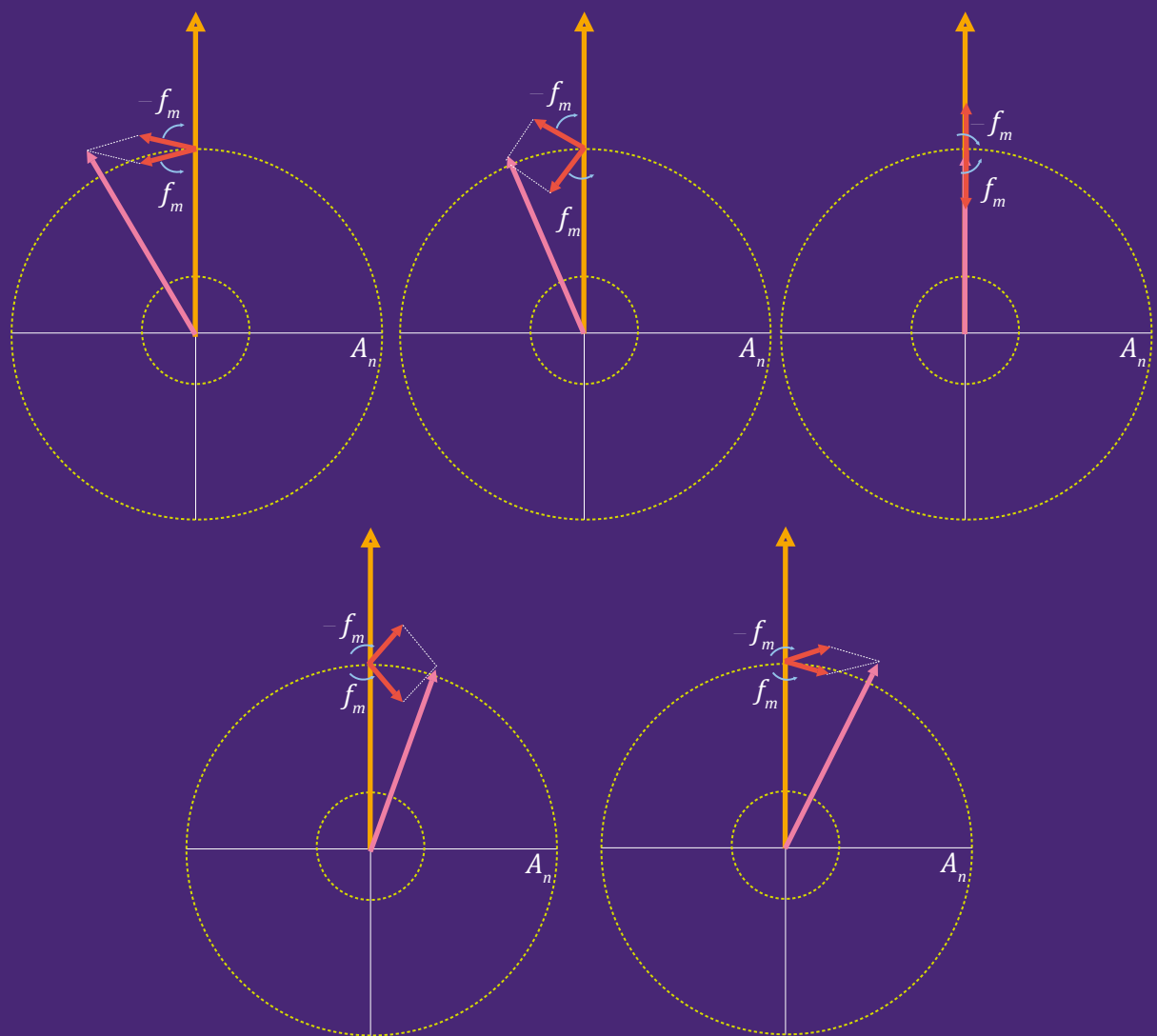
Zobaczmy, z czego to wynika. Przypomnijmy sobie Rys. 7b w Lekcji 7. Wprowadziliśmy tam parę dodatkowych wektorów reprezentujących sygnał modulujący, których zadaniem była modyfikacja tylko długości wektora odpowiadającego sygnałowi zmodulowanemu, dzięki czemu osiągnęliśmy efekt modulacji amplitudy. Gdybyśmy chcieli zrobić coś podobnego dla modulacji fazy, długość wektora wypadkowego powinna być stała, natomiast zmianę powinien podlegać jego kierunek. Oznacza to, że suma wprowadzonej pary wektorów powinna być skierowana prostopadło do kierunku odniesienia – patrz Rys. 4 (po lewej; zwróć uwagę, że dla większej poglądowości zaczęliśmy parę wektorów na końcu wektora sygnału nośnego, a nie w środku okręgu).



Rys. 4. Diagramy wektorowe obrazujące modulację fazy dla małej (po lewej) oraz dużej głębokości modulacji (po prawej).

Czy osiągamy w ten sposób zmianę kierunku wektora wypadkowego bez zmiany amplitudy? Niezupełnie. Łatwo zauważyć, że koniec wektora wypadkowego nie może leżeć na okręgu sygnału nośnego – wykracza poza niego i to tym bardziej, im większa jest amplituda sygnału modulującego tzn. im większa jest zmiana fazy (inaczej – im większa jest tzw. głębokość modulacji). Jeżeli zmiana fazy jest niewielka, możemy przyjąć, że nasz cel został w przybliżeniu spełniony i dochodzi tylko do zmiany fazy. W przeciwnym razie, jak pokazuje Rys. 4 po prawej stronie, zmiana amplitudy jest znacząca i wprowadzony przez nas model modulacji PM nie może być uznany za poprawny.

Założmy zatem, że głębokość modulacji fazy jest niewielka i przyjrzyjmy się kilku etapom modulacji fazy na wykresie analogicznym do Rys. 8 w Lekcji 7. Tak jak w tamtym przypadku uzyskaliśmy cykliczną zmianę amplitudy z pożądaną częstotliwością f_m , tak tutaj uzyskujemy zmianę fazy z pomijalną zmianą amplitudy (Rys. 5).

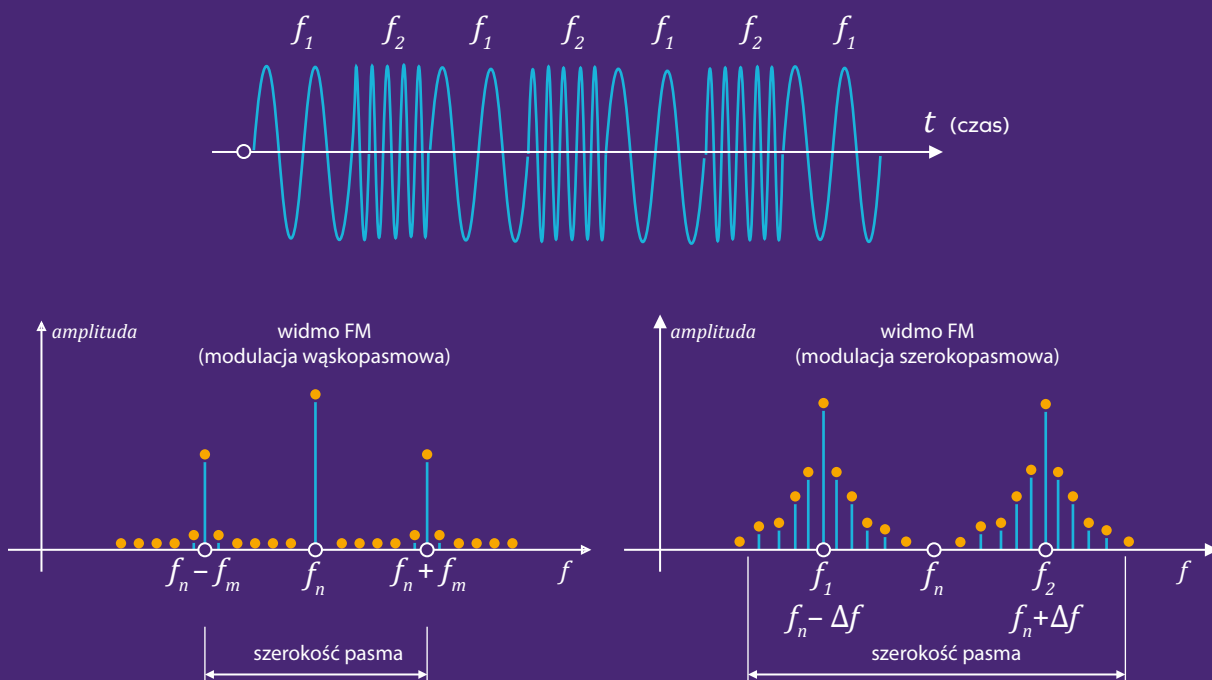


Rys. 5. Diagramy wektorowe obrazujące kilka wybranych etapów modulacji fazy.

Co tak naprawdę oznacza niewielka zmiana amplitudy na diagramach wektorowych? Że jedna para wektorów reprezentujących sygnał modulujący nie wystarczy do uzyskania wyłącznie zmiany fazy. Tak naprawdę trzeba tych par nieskończenie wiele, ale amplitudy im przypisane bardzo szybko maleją. Dlatego widmo PM nie ogranicza się tylko do dwóch dodatkowych, symetrycznie rozmieszczonych prążków, jak w przypadku modulacji AM (patrz Rys. 9 w Lekcji 7). Aczkolwiek, przy niezbyt głębokiej modulacji widma te są niemal identyczne.

4. Widmo sygnału FM

Założmy, że zmodulowany sygnał zawiera dwie częstotliwości f_1 i f_2 oddalone o Δf od częstotliwości nośnej f_n . Postać widma takiego sygnału uzależniona jest od tego, czy modulacja jest wąskopasmowa czy szerokopasmowa (Rys. 6).



Rys. 6. Sygnał zmodulowany częstotliwościowo oraz jego widmo przy modulacji wąskopasmowej i szerokopasmowej.

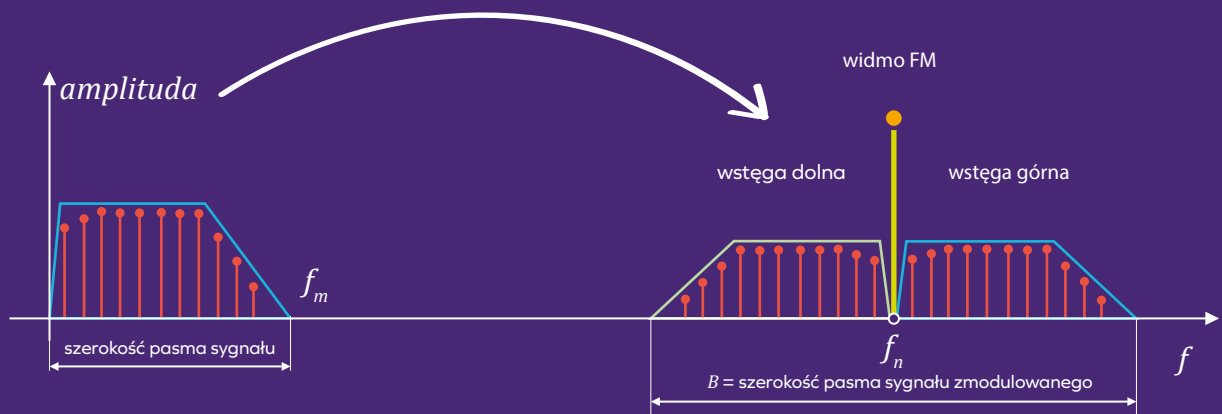
W pierwszym przypadku, dewiacja częstotliwości jest znacznie mniejsza od częstotliwości sygnału modulującego i zmienność sygnału w czasie podyktowana jest głównie tempem zmiany sygnału modulującego. Dlatego w widmie zobaczymy dwa silne, symetrycznie położone prążki o częstotliwościach $f_n - f_m$ oraz $f_n + f_m$, podobnie jak dla modulacji AM (Rys. 6, po lewej).

Kiedy dewiacja częstotliwości jest duża, czyli częstotliwości f_1 i f_2 wyraźnie odbiegają od częstotliwości sygnału modulującego f_m , to właśnie one decydują o zawartości

widmowej sygnału zmodulowanego. Pojawia się przy tym wiele innych prążków, bo trzeba wiele sygnałów harmoniczných o różnych częstotliwościach, by po ich zsumowaniu uzyskać przebieg czasowy pokazany na Rys. 6. Chociaż szerokość widma FM jest w zasadzie nieskończona, amplituda prążków poza pewnym przedziałem jest tak niewielka, że w praktyce można ich nie brać pod uwagę.

Komentarz. Jeżeli nie jest to intuicyjne, bo na pierwszy rzut oka przebieg czasowy z Rys. 6 zawiera tylko dwie częstotliwości, przypomnij sobie widmo sygnału prostokątnego z Lekcji 4. Sygnał ten przez połowę okresu jest stały, w drugiej połowie także (choć przy innej wartości), a jednak zawiera on nieskończoną liczbę harmoniczných o dowolnie dużych częstotliwościach. Sygnały harmoniczne składające się na widmo są bardzo prostymi przebiegami w czasie – mają tę samą amplitudę i częstotliwość w każdej chwili czasowej. Uzyskanie za ich pomocą sygnału prostokątnego czy przebiegu z Rys. 6, bardzo odbiegających w swym charakterze od monotonnego zachowania fali harmoniczných, wymaga użycia ogromnej liczby sygnałów składowych.

W Lekcji 7 pokazaliśmy, że modulacja AM przenosi widmo sygnału w okolice częstotliwości nośnej, a pasmo sygnału ulega podwojeniu w wyniku utworzenia dwóch wstęg – dolnej i górnej. Podobne zjawisko obserwujemy w modulacji FM (Rys. 7).



Rys. 7. Przesunięcie widma sygnału po modulacji częstotliwościowej.

Mimo znacznie bardziej skomplikowanej sytuacji z modulacją FM okazuje się, że da się całkiem łatwo obliczyć przybliżoną szerokość B pasma sygnału zmodulowanego FM korzystając z tzw. reguły Carsona (czytaj: Karsona):

$$B = 2(f_m + \Delta f)$$

gdzie za f_m podstawiamy maksymalną częstotliwość w sygnale niosącym informację, a Δf jest maksymalną dewiacją częstotliwości. Widzimy zatem, że przy małych wartościach

dewiacji Δf uzyskujemy w przybliżeniu podwojenie szerokości pasma sygnału, tak jak w modulacji AM.



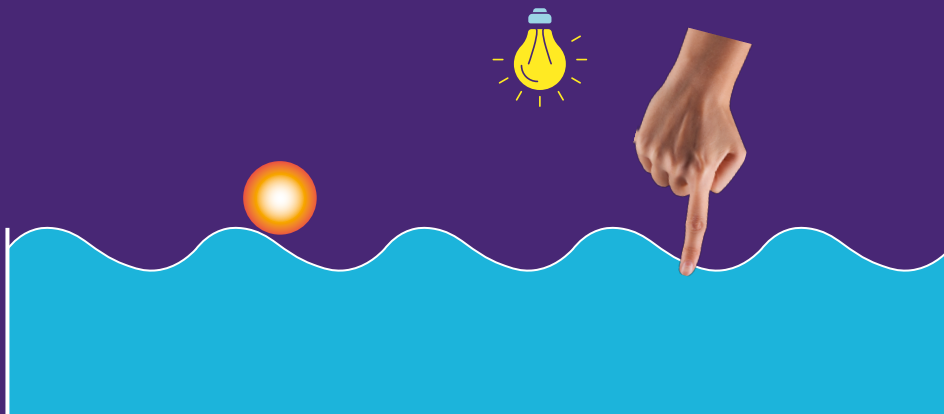
Doświadczenie

Doświadczenie demonstrujące modulację FM przeprowadzimy podobnie, jak w Lekcji 7.

Przygotuj duży pojemnik z wodą, może być płytki, ważne tylko, by jego ściany były znacznie od siebie oddalone. W warunkach domowych może to być wanna z niewielką ilością wody. Zbiornik powinien być od góry oświetlony tak, by wyraźnie było widać na dnie zbiornika cień fal na powierzchni wody.

Na powierzchni wody, z dala od ścian, umieść kulkę styropianową lub piłeczkę pingpongową (Rys. 8). W pewnym oddaleniu od piłeczki dotknij powierzchni wody. Na dnie powinien być widoczny cień kuliście rozchodzącej się fali powierzchniowej, która dociera do piłeczki i lekko ją unosi.

1. Zaczynij rytmicznie dotykać powierzchni wody starając się, by za każdym razem zanurzać palec na podobną, niewielką głębokość. Zaobserwuj rozchodzącą się falę. Co dzieje się z piłeczką?
2. Nadal rytmicznie dotykaj powierzchni wody, ale co jakiś czas zmieniaj tempo poruszania dłonią, przy zachowaniu tej samej głębokości zanurzania palca. Czy mamy do czynienia z modulacją? Jakiego rodzaju? Jak na zmieniającą się falę reaguje piłeczka?
3. Oddziel nieprzezroczystą przegrodą umieszczoną nad wodą miejsce, w którym dotykasz powierzchnię wody, od miejsca, w którym znajduje się piłeczka. Twój kolega po drugiej stronie zbiornika niech obserwuje piłeczkę, a przegroda powinna uniemożliwić mu obserwację twojej dłoni. Czy kolega jest w stanie rozpoznać tempo, w którym pobudzasz fale, tylko i wyłącznie dzięki obserwacji ruchów piłeczki? Czy można dzięki temu przesłać jakąś informację.



Rys. 8. Doświadczenie z modulacją częstotliwościową fal na powierzchni wody.



Słowniczek

Dewiacja częstotliwości – różnica między maksymalną wartością częstotliwości zmodulowanego sygnału a częstotliwością nośną.

FM – skrótowa nazwa modulacji częstotliwościowej (ang. *frequency modulation*).

Modulacja częstotliwości – modulacja polegająca na zmianie częstotliwości fali nośnej w czasie.

Modulacja fazy – modulacja polegająca na zmianie fazy fali nośnej w czasie.

Modulacja szerokopasmowa – modulacja FM, w której dewiacja częstotliwości jest większa od częstotliwości sygnału modulującego.

Modulacja wąskopasmowa – modulacja FM, w której dewiacja częstotliwości jest mniejsza od częstotliwości sygnału modulującego.

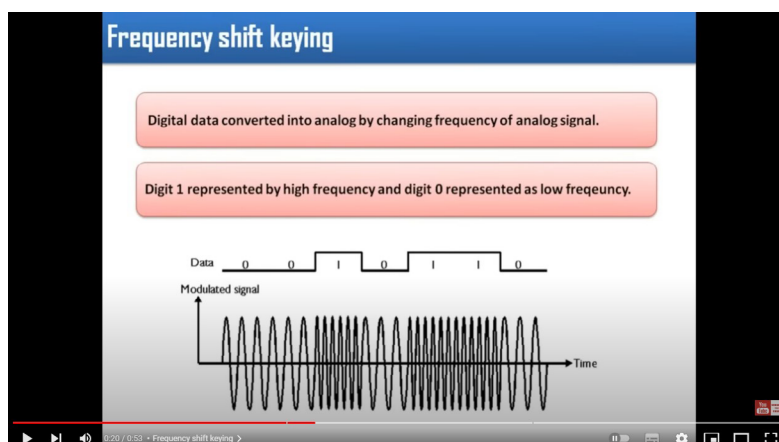
PM – skrótowa nazwa modulacji fazowej (ang. *phase modulation*).

Reguła Carsona – wzór pozwalający obliczyć szerokość pasma sygnału zmodulowanego FM na podstawie maksymalnej częstotliwości sygnału modulującego i maksymalnej dewiacji częstotliwości.



Materiały zewnętrzne

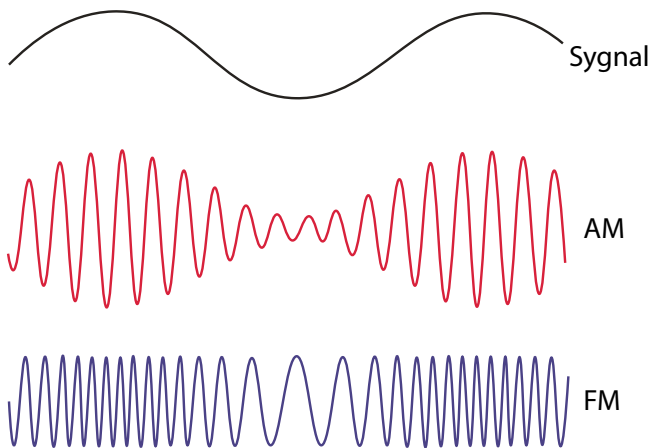
1. Animacja obrazująca cyfrową modulację AM, FM i PM (Tytuł filmu: *Animation of Digital modulation - Amplitude, Frequency and Phase shift keying*).



Zeskanuj QR kod



2. Animowany obraz modulacji AM, FM przez sygnał harmoniczny.



Zeskanuj QR kod

**Praca domowa**

1. Narysuj przykładową modulację FM umożliwiającą przesłanie wyniku trzykrotnego rzutu kostką – 3, 1, 2. Ile różnych częstotliwości należy użyć?
2. Sygnał zawierający próbkę utworu muzycznego mieści się w pasmie o maksymalnej częstotliwości $f_m = 15 \text{ kHz}$. Sygnałem tym zmodulowano FM falę nośną o częstotliwości 100 MHz tak, że maksymalna dewiacja częstotliwości równa jest 75 kHz. Jakiego typu jest to modulacja – wąsko czy szerokopasmowa? Jaka jest w przybliżeniu szerokość pasma sygnału zmodulowanego?

Dane:

$$f_m = 15 \text{ kHz}$$

$$\Delta f = 75 \text{ kHz}$$

$$f_n = 100 \text{ MHz}$$

Szukane:

$$B = ?$$

Lekcja 9

Zastosowania modulacji sygnału

Cel

- Przedstawienie zastosowań modulacji sygnału oraz metod formowania sygnału modulującego.

Efekty kształcenia

- Uczeń zna rolę technik modulacji w podziale częstotliwości pomiędzy nadawców.
- Uczeń potrafi wyjaśnić różnicę we wrażliwości na zakłócenia sygnałów zmodulowanych technikami AM i FM.
- Uczeń zna związek jakości sygnału i prędkości przesyłu informacji z szerokością pasma sygnału.
- Uczeń zna metodę przetwarzania sygnału analogowego na cyfrowy i potrafi jej użyć w praktyce.



1. Rola modulacji sygnału w podziale częstotliwości

Kiedy znajdziemy się w pokoju, w którym mówi wiele osób naraz, trudno się porozumieć. Przy dużym wysiłku możemy usłyszeć najbliższą stojącą osobę, ale wyobraźmy sobie setki osób w jednym pomieszczeniu i że każdą z nich słysząc jednakowo głośno. Problemem jest to, że wszystkie osoby używają tego samego pasma sygnału (o szerokości około kilku kHz) i jednego medium – powietrza. Podobnie byłoby, gdybyśmy chcieli bezpośrednio przetransformować sygnał głosowy nadawców na pewnym obszarze na falę elektromagnetyczną i przysyłać ją w przestrzeń w nadziei, że odbiorca odnajdzie w tym chaosie przeznaczony dla niego sygnał.

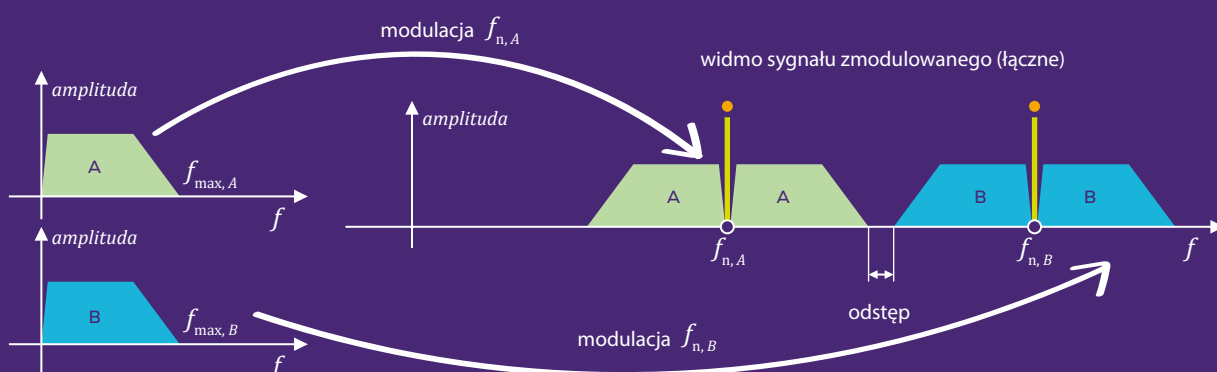
W Lekcji 5 pokazaliśmy, że rozwiązaniem problemu może być tzw. podział częstotliwości, czyli nadawcy mogą się umówić, że nadają swoje sygnały w różnych pasmach, a odbiorcy korzystając z filtracji wyodrębniają ten sygnał, który ich interesuje. Teraz, korzystając z wiedzy zdobytej w Lekcjach 7 i 8, możemy omówić praktyczną metodę realizacji tego pomysłu.

Założmy, że dwóch nadawców – A i B – chciałoby nadać w przestrzeń pewne sygnały, których pasma są ograniczone przez pewną częstotliwość maksymalną, oznaczoną odpowiednio jako $f_{\max, A}$ i $f_{\max, B}$. Przykładowo, jeżeli są to komunikaty głosowe, można przyjąć, że ograniczenie ich pasma z góry przez częstotliwość 5 kHz nie powinno znacząco zakłócić ich jakości. Na Rys. 1 po lewej stronie pokazano schematycznie widma tych sygnałów. Gdybyśmy je nanieśli na jeden wykres, znacząco by się nakładały.

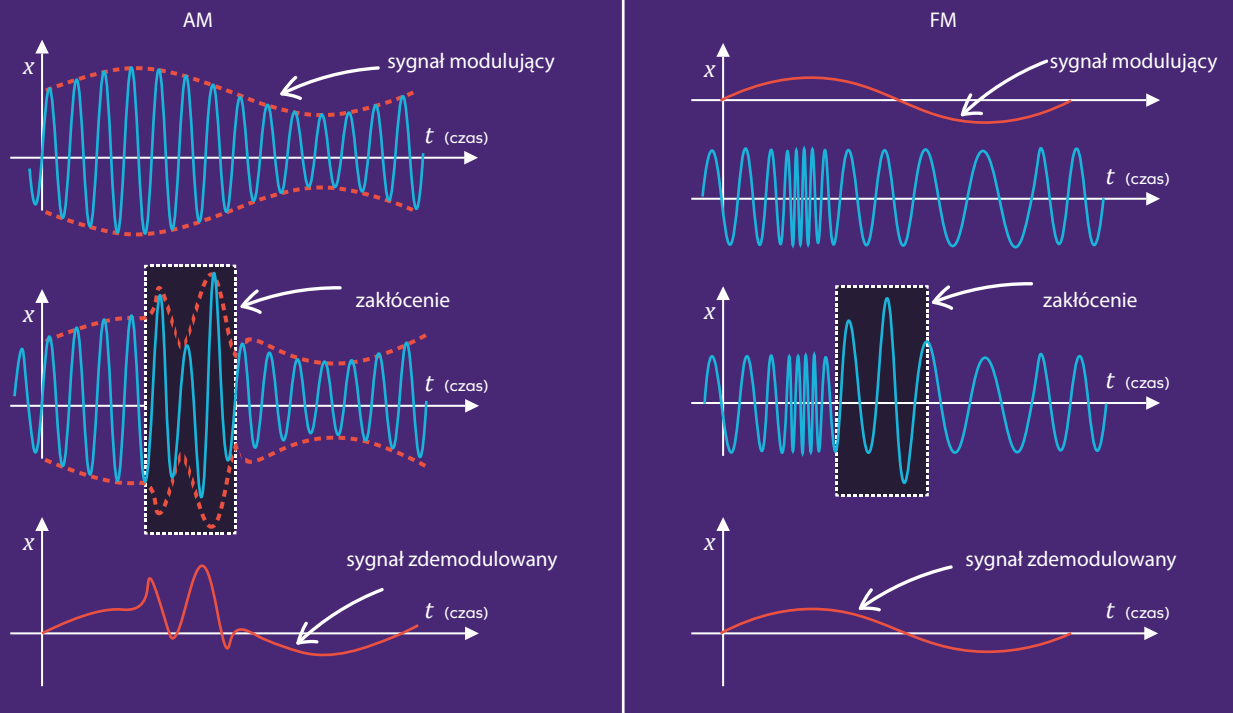
Nadawcy umawiają się, że zmodulują swoje sygnały (np. techniką AM), przy czym użyją różnych częstotliwości nośnych – odpowiednio $f_{n,A}$ oraz $f_{n,B}$. Zgodnie z tym, czego nauczyliśmy się w poprzednich lekcjach, po modulacji szerokość pasma każdego z sygnałów się zwiększy przez utworzenie wstęg bocznych. Należy zatem szczególnie zadbać o to, by odstęp pomiędzy częstotliwościami nośnymi był wystarczający do zapewnienia odstępu pomiędzy wstęgami zmodulowanych sygnałów obu nadawców.

Kiedy teraz oba zmodulowane sygnały zostaną nadane równocześnie, ich widma nie nałożą się na siebie. Odbiorca przy użyciu odpowiedniego filtra pasmowego może w tej sytuacji wydzielić konkretny sygnał, a następnie, po przeprowadzeniu tzw. **demodulacji**, przenieść zarejestrowany sygnał do oryginalnego pasma w zakresie słyszalnym.

Istnieje jeszcze inna ważna korzyść z technik modulacji. Przypomnijmy sobie, że w Lekcji 3 mówiliśmy o minimalnym rozmiarze anteny dipolowej do nadawania sygnału o określonej długości fali. Sygnał po zmodulowaniu fali nośnej o dużej częstotliwości przenosi się na wykresie widmowym w obszar znacznie większych częstotliwości. Skraca się dzięki temu jego długość fali, a tym samym zmniejsza się wymagany rozmiar anteny. Przyjrzymy się dokładnie faktycznemu zyskowi z modulacji w „Pracy domowej”.



Rys. 1. Podział częstotliwości dla dwóch nadawców: A i B .



Rys. 2. Zakłócenia amplitudowe sygnału zmodulowanego: AM (po lewej) i FM (po prawej).

2. Sygnał zmodulowany a zakłócenia

W Lekcji 7 wprowadziliśmy technikę modulacji AM, którą omówiliśmy dość szczegółowo dzięki temu, że łatwo było wytłumaczyć zasadę jej działania na diagramach wektorowych. Technika FM opisana w Lekcji 8 była już znacznie bardziej skomplikowana. Okazało się również, że pasmo sygnału zmodulowanego FM jest faktycznie nieskończone i pełne prążków bocznych nawet przy modulacji sygnałem harmonicznym (przynajmniej przy modulacji szerokopasmowej). Możemy zatem zapytać – dlaczego w ogóle korzysta się z modulacji FM i jakie przynosi ona korzyści w porównaniu z modulacją AM?

Jedną z największych zalet modulacji FM jest jej mała czułość na zakłócenia (szum). Większość zakłóceń, z którymi musimy się liczyć przy przesyłaniu sygnałów na falach elektromagnetycznych (EM) są tzw. zakłócenia amplitudowe, czyli takie, które wpływają głównie na amplitudę sygnału. Takimi zakłóceniami są np. wyładowania atmosferyczne.

Popatrzmy jak na zakłócenia reagują sygnały zmodulowane technikami AM i FM (Rys. 2). Po lewej stronie widzimy falę nośną zmodulowaną wolnozmiennym sygnałem harmonicznym, która pod wpływem zakłócenia amplitudowego w pewnym przedziale czasu ulega wyraźnej modyfikacji. Tak zniekształcona fala dociera do odbiornika, który nie jest w stanie odróżnić zmienności amplitudy związanej z zawartością informacyjną od przypadkowego zaburzenia, które przytrafiło się gdzieś pomiędzy nadawcą i odbiorcą. Sygnał zdemodulowany, czyli odzyskany z fali nośnej i przywrócony do normalnej postaci, zawiera nadal to zniekształcenie i może się przejawiać nieprzyjemnym trzaskiem w głośniku.

A jak to jest w przypadku modulacji FM? Popatrzmy na prawą stronę Rys. 2. Sygnał zmodulowany częstotliwościowo również ulega zakłóceniu amplitudowemu. Różnica jest taka,

że tym razem amplituda sygnału nie niesie istotnej informacji. Mimo wyraźnych zakłóceń, jeżeli tylko nie ulega zmianie **częstotliwość** zmodulowanego sygnału (czyli np. punkty przecięcia z osią czasu pozostają w tych samych miejscach), sygnał użyteczny może być zdemodulowany w odbiorniku w pełnej zgodności z sygnałem oryginalnym.

Oczywiście, jest to przypadek wyidealizowany. W praktyce może dojść do pewnych nieusuwalnych zakłóceń, jednak czułość na nie sygnału zmodulowanego FM jest znacznie mniejsza niż w technice AM. Co więcej, wrażliwość na zakłócenia jest tym mniejsza, im większa jest dewiacja częstotliwości, co przemawia za tym, by stosować modulację szerokopasmową, gdy zależy nam na jakości przesyłanego sygnału (np. jest to audycja muzyczna).



Ciekawostka. Być może skróty AM i FM, które wprowadziliśmy w ostatnich lekcjach obili Cię wcześniej o uszy. W szczególności skrót FM można spotkać w nazwach wielu komercyjnych stacji radiowych. Typowo stosują go stacje nadające na falach radiowych z wykorzystaniem modulacji FM – cechują się one małymi zakłóceniami i doskonałą jakością audycji muzycznych (uwaga: człon FM jest popularny także w radiach internetowych – w tym przypadku nie ma nic wspólnego z modulacją FM; mamy tu do czynienia z nawiązaniem do tradycji radia klasycznego). W audycjach na długich falach radiowych nadawanych z wykorzystaniem modulacji AM częściej można spotkać się z szumami i trzaskami, w związku z czym koncentrują się one na wiadomościach, reportażach i rozmowach z gośćmi, ogólniej – na elementach programu, w których jakość transmisji nie jest szczególnie istotna.

3. Od czego zależy szerokość pasma sygnału?

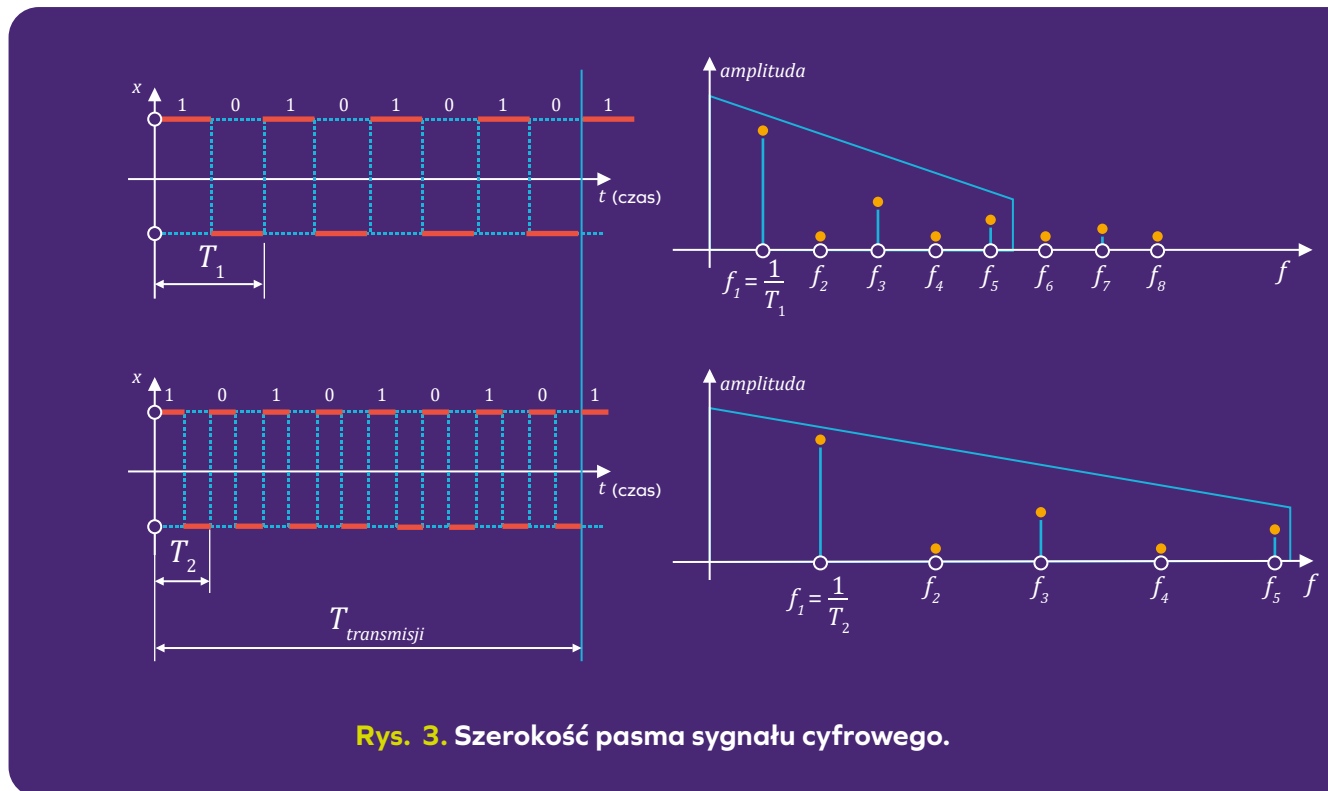
Powiedzmy teraz nieco więcej o szerokości pasma oryginalnego sygnału, który chcemy przesłać do odbiorcy. Może to być sygnał analogowy, np. zarejestrowany przez mikrofon komunikat głosowy lub utwór muzyczny. Zakres słyszalności człowieka obejmuje od ok. 20 Hz do ok. 20 kHz, co nie znaczy, że przesyłanie całego tego pasma jest zawsze celowe. Jeżeli przesyłamy wyłącznie ludzką mowę i zależy nam przede wszystkim na tym, by komunikat był zrozumiały, a niekoniecznie w pełni oddawał barwę głosu lektora, zakres pasma od ok. 300 Hz do ok. 4 kHz powinien być wystarczający. Dalsze zawężanie pasma prowadzi do coraz to większego pogorszenia jakości dźwięku, aż do momentu, gdy komunikat przestanie być zupełnie czytelny.

Przesyłanie utworów muzycznych, szczególnie tych wyrafinowanych z szeroką gamą instrumentów, jest znacznie bardziej wymagające. Muzyka odbierana przede wszystkim jako wrażenie estetyczne wymaga wysokiej jakości, a tym samym znacznie szerszego pasma sięgającego nawet 15 kHz.

Podobnie dla wielu innych sygnałów analogowych, szerokość pasma możemy zawsze ograniczyć stosując filtrację dolnoprzepustową (Lekcja 5), a sygnał będzie tym lepiej reprezentowany (tym większej jakości), im większej częstotliwości granicznej filtra użyjemy.

We współczesnej telekomunikacji szczególnie ważne jest przesyłanie sygnałów cyfrowych, w tym binarnych (o dwóch poziomach – umownie 0 i 1). Jak wyznaczyć pasmo sygnału cyfrowego? Przypatrzmy się najbardziej krytycznemu przypadkowi, gdy poziomy zmieniają się naprzemiennie z pewnym okresem T_1 . Przypadek ten jest najważniejszy,

gdyż prowadzi do pojawienia się w sygnale największej możliwej częstotliwości. Sygnał cyfrowy ma wtedy postać 101010101... itd. możemy go zatem zinterpretować jako sygnał prostokątny (patrz Lekcja 4). Przypomnijmy sobie, że widmo takiego sygnału cechuje się obecnością tylko nieparzystych harmonicznych, przy czym pierwsza z nich ma częstotliwość $f_1 = 1/T_1$.



Rys. 3. Szerokość pasma sygnału cyfrowego.

Do odtworzenia postaci sygnału cyfrowego w praktyce nie potrzebujemy wszystkich harmonicznych. Przyjmijmy, że ograniczymy się do pierwszych pięciu. Pasma sygnału cyfrowego można wtedy przedstawić jak na Rys. 3 (górna część).

O czym nam mówi okres T_1 ? Możemy go rozumieć jako czas przesłania 2 bitów informacji (patrz Lekcja 1), gdyż każdy z poziomów sygnału binarnego możemy rozumieć jako 1 bit. Przy danym czasie transmisji $T_{transmisji}$, im mniejsza wartość T_1 , tym więcej bitów możemy przesłać.

Co się dzieje, kiedy rosną wymagania na zwiększenie prędkości przesyłu informacji? Na przykład użytkownicy mogą oczekiwać, by czas przesyłania zdjęć skrócił się co najmniej dwukrotnie lub by możliwe było oglądanie filmu w usługach strumieniowej o lepszej jakości (np. 4K). Konieczne jest wtedy zmniejszenie czasu T_1 .

Na dolnej części Rys. 3 możemy zobaczyć sygnał cyfrowy o mniejszym okresie T_2 , który pozwala na przesłanie w tym samym czasie dwukrotnie większej liczby bitów. Jak widzimy, na skutek zwiększenia się częstotliwości harmonicznych, także widmo sygnału ulega znacznemu poszerzeniu.

Zapamiętajmy – wymagania większej jakości sygnału analogowego lub większej szybkości przesyłu informacji w sygnale cyfrowym zawsze prowadzą do poszerzenia pasma sygnału. Konsekwencje tego zjawiska omówimy dokładniej w Lekcji 10.

4. Konwersja analogowo-cyfrowa

Na koniec przyjrzyjmy się przetwarzaniu sygnału analogowego na cyfrowy – tzw. **konwersji analogowo-cyfrowej** (w skrócie A/C).

W Lekcji 1 poznaliśmy zalety sygnału cyfrowego m.in. odporność na niewielkie zakłócenia. We współczesnej telekomunikacji, zdominowanej przez techniki cyfrowe, ważne jest sprowadzenie dowolnego sygnału do postaci cyfrowej – najczęściej binarnej (o dwóch poziomach). Czy jest to w ogóle możliwe?

Konwersja A/C przebiega w dwóch etapach:

- **próbkiwanie** – zamiana ciągłego w czasie sygnału na ciąg próbek pobieranych równomiernie co pewien, ustalony okres czasu (inaczej – z pewną ustaloną częstotliwością nazywaną **częstotliwością próbkowania**);
- **kwantyzacja** – wartości sygnału w danej próbce zostaje przydzielona określona liczba bitów; na tym etapie sygnał przekształca się na sygnał cyfrowy o skończonej liczbie poziomów zależnej bezpośrednio od liczby bitów.

Popatrzmy na Rys. 4, na którym ciągła krzywa odpowiada przebiegowi sygnału analogowego w czasie. W pierwszym kroku wybieramy na krzywej pewną liczbę punktów. Dokonujemy w ten sposób próbkowania. Im punktów będzie więcej, tym lepiej będziemy w stanie oddać kształt krzywej, ale także tym więcej sekwencji bitów zostanie przypisanych do wybranego odcinka sygnału (czyli więcej informacji trzeba będzie przetwarzać, a potem przesyłać).

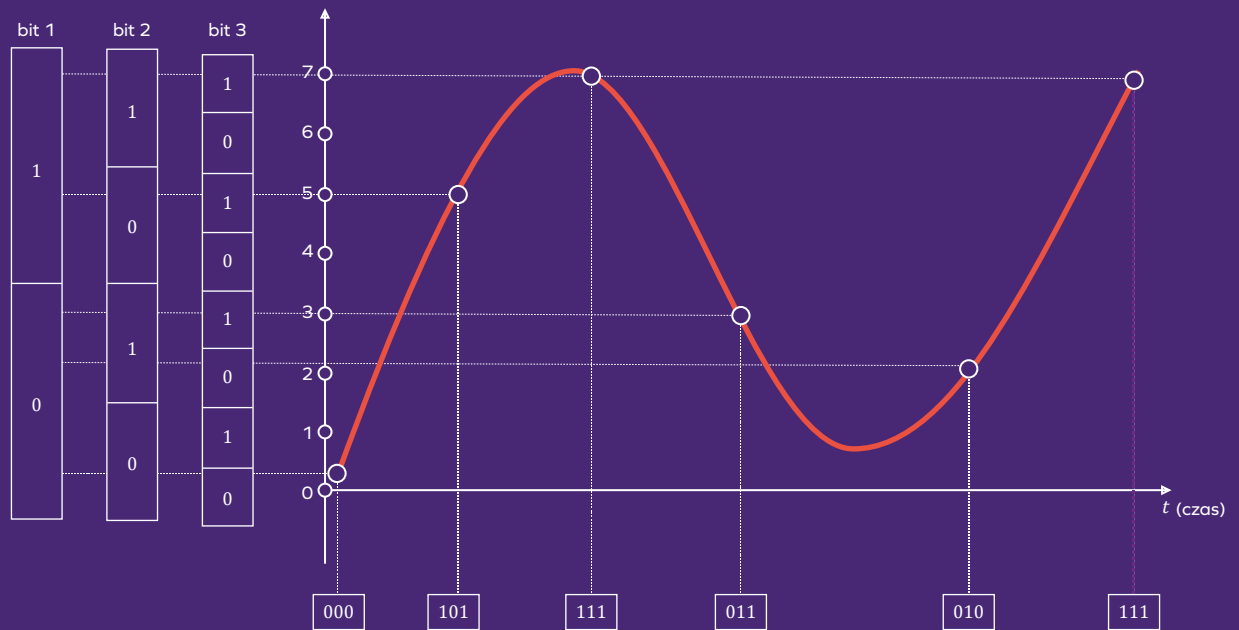
Aby przeprowadzić kwantyzację musimy ustalić ile bitów przyznamy do opisu wartości sygnału w próbce. Znowu – im będzie ich więcej, z tym większą dokładnością opiszemy wartość sygnału. Niestety ma to także negatywne konsekwencje, podobnie jak w przypadku zwiększania liczby próbek.

W przykładzie na Rys. 4 przyjęliśmy, że do kwantyzacji wykorzystamy 3 bity. Znając zakres zmienności sygnału analogowego (w naszym przypadku od 0 do 7), możemy teraz przyporządkować wartości tych bitów dla poszczególnych próbek.

W Lekcji 1 pokazaliśmy sprytną metodę odgadywania liczby z pewnego przedziału przez kolejne połowienie przedziałów zmienności na podstawie uzyskiwanych informacji.

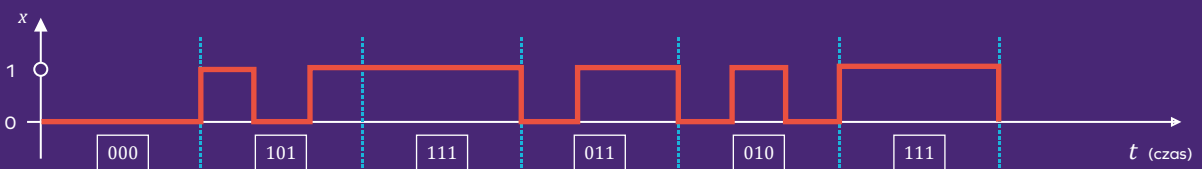
Wykorzystajmy tę metodę, dla ustalenia bitów w pierwszej próbce. Dzielimy cały przedział zmienności na połowę. Czy wartość sygnału znajduje się w górnej połowie (tzn. powyżej 3,5)? Jak widzimy, wartość sygnału w pierwszej próbce to ok. 0,2, zatem odpowiedź jest negatywna i bitowi 1 przydzielamy wartość 0. Skoro wartość próbki znajduje się w dolnej połowie zmienności, dzielimy na połowę tym razem właśnie ten zakres. Czy wartość próbki znajduje się w górnej połowie tego nowego podziału (tzn. powyżej 1,75)? Nie, zatem przydzielamy bitowi 2 wartość 0 i znowu zajmujemy się dolną połową, którą dzielimy na dwie części i analogicznie dla bitu 3 uzyskujemy wartość 0. Trzy bity pierwszej próbki mają zatem wartości 000.

Korzystając ze schematu na Rys. 4 możemy wartości bitów odczytać niemal natychmiastowo, rysując od danej próbki w lewo linię poziomą i odczytując na podstawie punktu przecięcia linii z kolumnami poszczególnych bitów właściwą wartość. W ten sposób ustalamy trzybitowe sekwencje dla wszystkich próbek na Rys. 4.



Rys. 4. Próbkowanie i kwantyzacja sygnału analogowego.

Sygnał cyfrowy będący połączeniem wszystkich trzybitowych sekwencji pokazano na Rys. 5. Zwróćmy uwagę, że w niczym nie przypomina on krzywej z Rys. 4.



Rys. 5. Sygnał cyfrowy otrzymany po konwersji sygnału z Rys. 4.

Czy można dokonać konwersji w przeciwną stronę (cyfrowo-analogową, C/A)? Tak, wystarczy mieć informację o odstępie czasowym pomiędzy próbkami i, dla właściwych chwil czasu, przyporządkować wartość sygnału analogowego na podstawie określonej dla danej chwili sekwencji bitowej (korzystając ze schematu na Rys. 4, ale w przeciwnym kierunku niż poprzednio). Po odtworzeniu ciągu próbek przeprowadzamy przez nie **możliwie** gładką krzywą. Dokładność całego procesu zależy od częstotliwości próbkowania oraz liczby bitów przypadających na jedną próbkę w procesie kwantyzacji.



Dla zainteresowanych. Okazuje się, że jeżeli sygnał analogowy ma ograniczone od góry pasmo przez częstotliwość f_g , to wystarczy go próbkować z częstotliwością dwukrotnie większą niż f_g , by go potem idealnie odtworzyć z ciągu jego próbek. Mówi o tym tzw. twierdzenie o próbkowaniu. Niestety, kwantyzacja zawsze wprowadza pewną niedokładność, dlatego przy dużych wymaganiach na jakość konwersji A/C stosuje się dużą liczbę bitów przypadających na próbkę (nawet 24 bity w systemach audio wysokiej jakości).



Doświadczenie

Zobaczmy działanie konwersji A/C i C/A w praktyce. Do przeprowadzenia doświadczenia będziemy potrzebować trzech osób. Pierwsza osoba – „nadawca” – po wydrukowaniu diagramu z Rys. 6 rysuje na nim dowolną krzywą, która mogłaby reprezentować sygnał analogowy (trzeba przypilnować by dla danej chwili czasowej sygnał miał tylko jedną wartość). Krzywa nie powinna być też za bardzo „powichrowana” – najlepiej jeśli gładkością przypomina krzywą z Rys. 4.



Rys. 6. Diagram do doświadczenia z konwersją A/C i C/A.

Druga osoba – „konwerter A/C” – otrzymuje od „nadawcy” diagram z krzywą, ale nie pokazuje go trzeciej osobie. Następnie próbuje ocenić, ile próbek jest koniecznych do właściwej reprezentacji sygnału. Czy wystarczy pobrać próbki co trzecią kratkę, czy może co dwie? A może niezbędne będzie spróbkowanie sygnału co jedną kratkę? Po podjęciu decyzji, dla każdej próbki „konwerter A/C” zamienia jej wartość na sekwencję trzech bitów postępując tak, jak pokazywaliśmy w Etapie 4 niniejszej lekcji. Następnie zapisuje na oddzielnej kartce sekwencje bitów dla kolejnych próbek oddzielone przecinkami (np. 110, 010, 000, itd.). Po skończeniu pracy przekazuje kartkę z sekwencjami (ale nie diagram!) osobie trzeciej. Musi też udzielić informacji o tym, co ile kratek zostały pobrane próbki.

Osoba trzecia – „odbiorca” – spróbuje teraz odtworzyć oryginalny sygnał pełniąc przy okazji rolę konwertera C/A. Mając wydrukowaną własną kopię diagramu z Rys. 6 oraz informację o odstępach pomiędzy próbkami stara się odtworzyć wartość sygnału analogowego w każdej próbce na podstawie sekwencji bitów oraz chwili pobrania próbki. Wynikiem powinien być ciąg punktów na wykresie, które następnie trzeba połączyć gładką krzywą. Dopiero po zakończeniu tego zadania „nadawca” i „odbiorca” mogą porównać sygnał oryginalny z sygnałem odtworzonym.



Pytania do dyskusji:

- Czy krzywe są podobne? Jak bardzo się różnią?
- Czy różnice mogą być wynikiem zbyt rzadkiego próbkowania? Czy warto powtórzyć doświadczenie z bardziej zagęszczonymi próbkami? Oczywiście w razie powtórzenia doświadczenia „odbiorcą” powinna być inna osoba, która nie widziała oryginalnego sygnału.
- Czy różnice mogą być wynikiem zbyt małej liczby bitów? Jaka może być maksymalna różnica w chwilach próbkowania pomiędzy sygnałem oryginalnym i odtworzonym przez „odbiorcę”?
- Czy domyślasz się, jak należy zmodyfikować schemat na Rys. 4, by dołożyć „bit 4” dla etapu kwantyzacji? Jak bardzo wzrośnie ilość pracy przy konwersji A/C i C/A?



Słowniczek

A/C – skrótowe oznaczenie konwersji analogowo-cyfrowej.

C/A – skrótowe oznaczenie konwersji cyfrowo-analogowej.

Częstotliwość próbkowania – częstotliwość z jaką pobierane są próbki sygnału analogowego; odwrotność odstępu czasu pomiędzy próbkami.

Demodulacja – odtworzenie oryginalnego sygnału niosącego informację (modulującego) ze zmodulowanej fali nośnej.

Konwersja analogowo-cyfrowa (A/C) – przetworzenie sygnału analogowego na sygnał cyfrowy (ciąg bitów).

Konwersja cyfrowo-analogowa (C/A) – przetworzenie sygnału cyfrowego (ciągu bitów) na sygnał analogowy.

Kwantyzacja – zamiana wartości sygnału w próbce na sekwencję bitów; po kwantyzacji liczba poziomów sygnału staje się skończona.

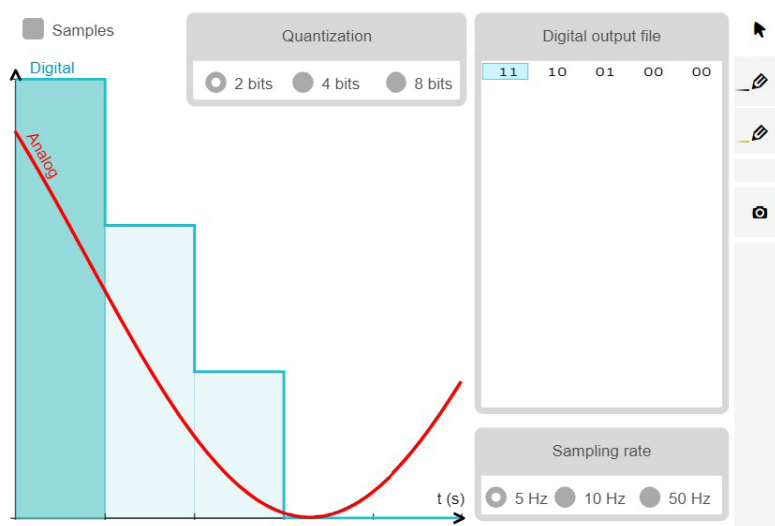
Próbkowanie – pobranie ciągu próbek sygnału analogowego, najczęściej w równomiernych odstępach czasowych.

Twierdzenie o próbkowaniu – sygnał analogowy można w pełni odtworzyć na podstawie ciągu jego próbek, jeżeli częstotliwość próbkowania przekracza dwukrotnie maksymalną częstotliwość z pasma tego sygnału.



Materiały zewnętrzne

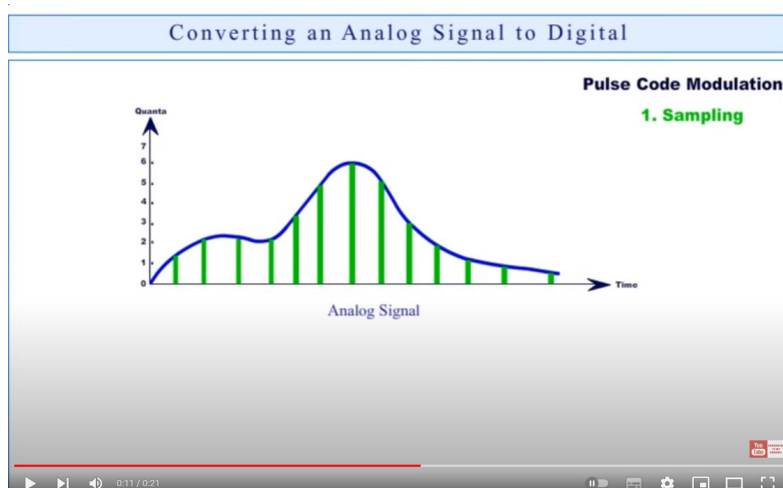
1. Aplikacja online demonstrująca konwersję A/C. Dla danego sygnału analogowego (krzywa czerwona) można swobodnie zmieniać liczbę bitów kwantyzacji (*Quantization*: 2, 4, 8 bitów) oraz częstotliwość próbkowania (*Sampling rate*: 5, 10, 50 Hz). Sekwencja bitów po konwersji pokazywana jest w oknie „*Digital output file*”.



Zeskanuj QR kod



2. Animacja obrazująca konwersję A/C (tytuł filmu: *Animation of Analog to Digital Conversion*)



Zeskanuj QR kod



3. Czym różni się radio AM od FM?

Zeskanuj QR kod



4. Modulacja FM w klasycznej radiofonii oraz porównanie z modulacją AM.

Zeskanuj QR kod

**Praca domowa**

1. Załóżmy, że chcielibyśmy nadać przez antenę dipolową falę EM o dokładnie takiej samej częstotliwości jak dźwięk C_1 (do) na klawiaturze fortepianu czyli $f = 261,6 \text{ Hz}$. Jaka może być najmniejsza długość anteny, która pozwoli na efektywną energetycznie emisję tej fali? A jeżeli tym samym dźwiękowym sygnałem zmodulujemy AM falę o częstotliwości nośnej $f_n = 2 \text{ GHz} = 2 \cdot 10^9 \text{ Hz}$? Przyjmij prędkość fali EM jako $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$. Wskazówka: patrz Lekcja 3.

Dane:

$$f = 261,6 \text{ Hz}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$$f_n = 2 \text{ GHz} = 2 \cdot 10^9 \text{ Hz}$$

Szukane:

$$l = ? \text{ (bez modulacji i z modulacją)}$$

2. Jak widać na Rys. 4 przy trzech bitach przypadających na próbkę sygnału otrzymujemy osiem poziomów sygnału cyfrowego. A jak to będzie przy czterech bitach? Czy potrafisz odgadnąć ogólny wzór na liczbę poziomów po kwantyzacji, gdy bitów jest N .

Lekcja 10

Sieć komórkowa

Cel

- Przedstawienie podstawowej koncepcji sieci komórkowej i jej funkcjonowania.

Efekty kształcenia

- Uczeń zna zasady doboru częstotliwości nośnej dla sygnału o danej szerokości pasma i docelowego rozmiaru anteny.
- Uczeń rozumie konieczność podnoszenia częstotliwości nośnej przy zwiększaniu szerokości pasma sygnału w warunkach ograniczeń podziału częstotliwości.
- Uczeń potrafi wyjaśnić korzyści z komórkowego podziału obszaru w sieciach mobilnych.
- Uczeń zna zasady nawiązywania połączenia w sieciach komórkowych.



1. Dobór częstotliwości nośnej

W poprzednich lekcjach pokazaliśmy, jak techniki modulacji mogą być wykorzystane do podziału częstotliwości pomiędzy różnych nadawców, dzięki czemu mogą oni korzystać jednocześnie z pola elektromagnetycznego (EM) do transmisji swoich sygnałów. Zastanówmy się teraz od czego zależy dobór wartości częstotliwości nośnej.

W Lekcji 3 podaliśmy wzór na oszacowanie minimalnego rozmiaru l anteny do transmisji sygnału w postaci fali EM. Rozmiar ten zależy w bardzo prosty sposób od długości emitowanej fali – uzyskujemy go przez pomnożenie długości fali λ przez mnożnik zależny od typu anteny ($1/2$ dla anteny dipolowej, $1/4$ dla anteny monopolowej, itp.). Przyjmijmy, że mamy do czynienia z anteną dipolową:

$$l \geq \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2f}$$

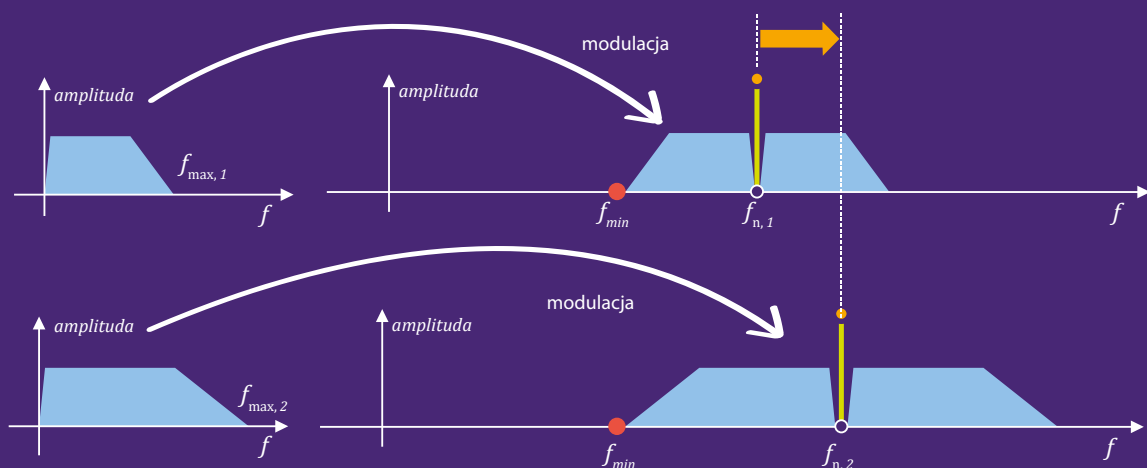
Wykorzystaliśmy tutaj wzór wiążący długość fali, częstotliwość oraz prędkość światła c . Jeżeli przyjmijemy określony, akceptowalny dla nas rozmiar anteny, możemy zapytać o warunki, które muszą spełniać częstotliwości emitowanego, zmodulowanego sygnału. Po prostym przekształceniu powyższego wzoru:

$$f \geq \frac{c}{2l}$$

Zatem przy ustalonym rozmiarze anteny częstotliwości w pasmie sygnału zmodulowanego powinny być większe od minimalnej wartości $f_{\min}$:

$$f_{\min} = \frac{c}{2l}$$

Przypomnijmy sobie postać sygnału zmodulowanego (patrz Lekcje 7, 8, 9). Jego pasmo składa się z dwóch wstęg bocznych położonych wokół częstotliwości nośnej, a szerokość wstęg zależy od pasma sygnału modulującego. W przypadku modulacji AM szerokość wstęgi jest dokładnie równa jego szerokości, zaś w modulacji FM może być większa, szczególnie w modulacji szerokopasmowej. Jeżeli całe pasmo sygnału zmodulowanego ma znaleźć się powyżej częstotliwości minimalnej, to w skrajnym przypadku lewy kraniec wstęgi dolnej może się z nią pokrywać (Rys. 1, u góry). Zatem częstotliwość nośna musi być przynajmniej równa częstości minimalnej powiększonej o szerokość wstęgi bocznej.

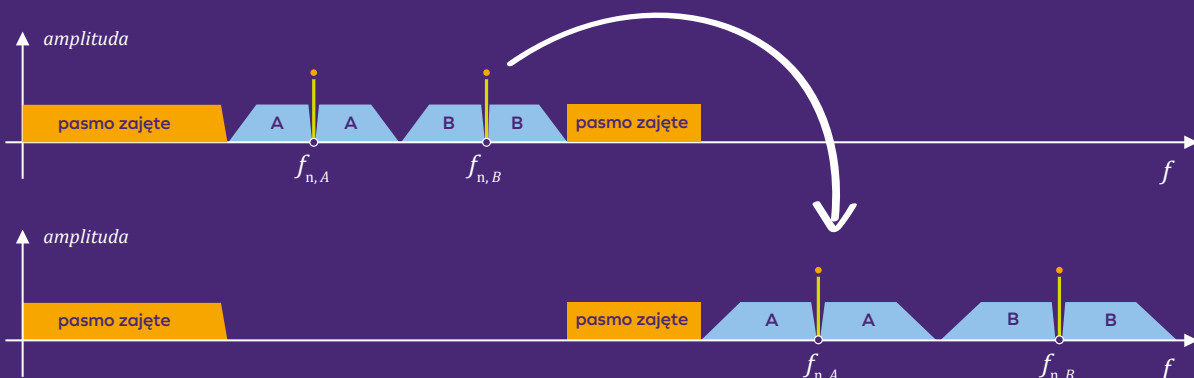


Rys. 1. Zależność częstotliwości nośnej od pasma sygnału i minimalnej częstotliwości w pasmie sygnału zmodulowanego.

Co stanie się, gdy szerokość pasma sygnału informacyjnego poszerzy się, na przykład w wyniku zwiększenia jakości transmitowanego sygnału audio lub szybkości przesyłanych danych cyfrowych (patrz Lekcja 9)? Doprowadzi to oczywiście do poszerzenia wstęg bocznych, zatem częstotliwość nośna także będzie musiała ulec zwiększeniu (Rys. 1, na dole).

Ograniczenie narzucone na pasmo sygnału zmodulowanego wynikające z częstotliwości minimalnej jest tylko jednym z możliwych ograniczeń, z jakimi w praktyce się spotykamy rozwijając systemy telekomunikacji mobilnej. Załóżmy, że pewien nadawca otrzymał do dyspozycji zakres częstotliwości pozwalający na transmisję dwóch różnych sygnałów. Na Rys. 2 oznaczyliśmy je przez A i B. Częstotliwości poniżej tego zakresu oraz pewne pasmo powyżej zostało przydzielone innym nadawcom, możemy zatem uznać je za pasma zajęte (z punktu widzenia nadawcy, o którym mówimy). Szerokość pasma obu zmodulowanych sygnałów jest taka, że wstęgi boczne niemal stykają się z pasmami zajętymi, co oznacza, że nadawca wykorzystał w pełni dostępną mu przestrzeń.

Kiedy pojawi się konieczność poszerzenia pasma sygnału informacyjnego, a tym samym – wstęg bocznych, lub zwiększenia liczby nadawanych sygnałów, jedyne, co może zrobić nadawca, to przenieść się do zupełnie innego obszaru na osi częstotliwości, zwykle do znacznie większych częstotliwości nośnych nieużywanych dotąd przez pozostałych nadawców. Dokładnie takie zjawisko obserwujemy w kolejnych generacjach telefonii mobilnej.

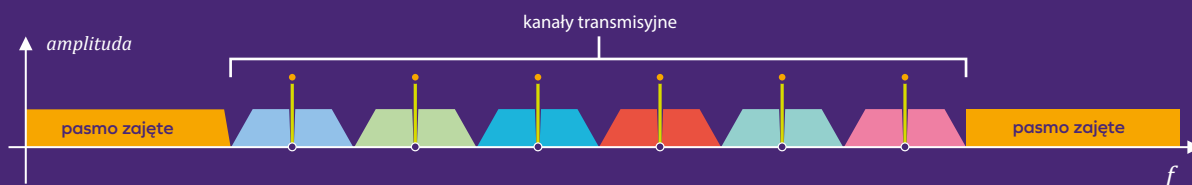


Rys. 2. Konieczność przeniesienia częstotliwości nośnych danego nadawcy przy poszerzeniu pasma sygnału w warunkach ograniczonego pasma.

2. Przydział kanałów transmisyjnych

Pole EM jako medium do przesyłania informacji dostępne jest w takim samym stopniu dla każdego nadawcy, który jest w stanie wytworzyć falę EM. Ponieważ fale EM o wysokiej częstotliwości tracą od pewnego momentu walory praktycznego nośnika informacji (np. z powodów silnego pochłaniania lub bezpieczeństwa, o czym szerzej powiemy w Lekcji 11), miejsce na osi częstotliwości jest ograniczone. Ze względu na ogromną liczbę nadawców konieczne jest zatem prawne uregulowanie dostępu do poszczególnych

zakresów. Mamy tu sytuację podobną do ruchu drogowego w warunkach dużego obciążenia sieci drogowej. Bez regulacji wprowadzonej przez Kodeks Drogowy trudno byłoby sobie wyobrazić poruszanie się samochodem po mieście. W Polsce zarządzaniem pasmami częstotliwości fal EM i przydzielaniem ich dla poszczególnych nadawców zajmuje się Urząd Komunikacji Elektronicznej (UKE).



Rys. 3. Kanały transmisyjne przydzielone danemu nadawcy.

Mamy zatem pewne pasma przydzielone m.in. określonym służbom państwowym (np. policji), stacjom radiowym, telewizji, radionawigacji lotniczej lub morskiej, radioamatorom oraz poszczególnym generacjom telefonii mobilnej różnych operatorów.

Chociaż można znaleźć pasma dostępne swobodnie, to podział osi częstotliwości fal EM jest w wysokim stopniu zorganizowany. Dany nadawca np. operator sieci telefonii komórkowej, otrzymuje do dyspozycji pewne pasmo, w którym ma prawo nadawać. Uwzględniając szerokość pasma sygnału zmodulowanego możemy powiedzieć, że na danego nadawcę przypada określona liczba tzw. **kanałów transmisyjnych** (Rys. 3). Im większa jest to liczba, tym większą liczbę równoczesnych rozmów telefonicznych może dany operator obsłużyć. Zawsze jest to jednak liczba ograniczona, co ma wyjątkowe znaczenie dla sposobu budowy sieci mobilnej, jak zobaczymy w następnym etapie niniejszej lekcji. W szczególności wymusza wprowadzenie tzw. komórek.



Dla zainteresowanych. Dla porządku warto wspomnieć, że we współczesnej telefonii mobilnej wykorzystuje się znacznie bardziej zaawansowane techniki modulacji niż wspomniane przez nas w poprzednich lekcjach modulacje AM i FM. Dzięki nim możliwe jest efektywniejsze wykorzystanie pasma sygnału zmodulowanego tzn. uzyskać większą szybkość przesyłu informacji cyfrowej niż w prostej modulacji amplitudowej. Niektóre z tych technik łączą w sobie modulację amplitudową z modulacją fazową, dzięki czemu można „upchać” więcej bitów informacji w różnych parametrach modulowanej fali harmonicznnej.

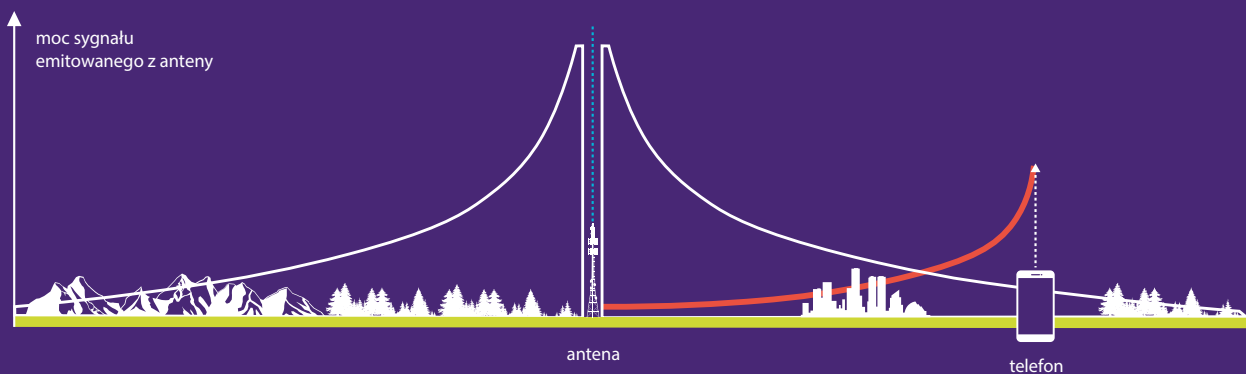
3. Komórkowy podział obszaru

W sieciach telefonii mobilnej poszczególne telefony nie komunikują się pomiędzy sobą bezpośrednio, lecz zawsze za pośrednictwem tzw. **stacji bazowej**, czyli zespołu anten umieszczonych na jednym maszcie. Stacje bazowe systemu **GSM**, ale też późniejszych generacji telefonii komórkowej, nazywane są często w skrócie **BTS**-ami (skrót BTS

pochodzi od angielskiej nazwy „*base transceiver station*”, czyli „stacja bazowa nadawczo-odbiorcza”).

Czy system telefonii mobilnej obejmujący bardzo duży obszar (np. całego kraju) mógłby składać się z pojedynczej stacji bazowej i łączących się z nią za pośrednictwem fal EM telefonów? Taki system byłby niepraktyczny przynajmniej z trzech powodów.

Pierwszym powodem jest to, że odległość pomiędzy stacją a telefonem mogłaby być potencjalnie bardzo duża. Jak pamiętamy z Lekcji 2, natężenie fali EM zmniejsza się odwrotnie proporcjonalnie do kwadratu odległości od źródła. Nawet jeśli umieścimy stację bazową w środku obszaru, objęcie jego brzegów sygnałem o energii wystarczającej do niezakłóconego odbioru wymagałoby nadajnika o potężnej mocy (Rys. 4). Mogłoby to spowodować przekroczenie norm bezpieczeństwa w pobliżu masztu (patrz Lekcja 11) oraz trudno byłoby zapewnić małą liczbę przeszkód terenowych dla fali pomiędzy masztem i odbiorcą (patrz Lekcja 6). Co więcej, nadajnik dużej mocy wymagany byłby także w samym telefonie, co mogłoby naruszyć normy bezpieczeństwa, tym bardziej, że jest to urządzenie używane w bardzo bliskim sąsiedztwie ciała. Wiązałoby się to także z szybszym zużyciem baterii.



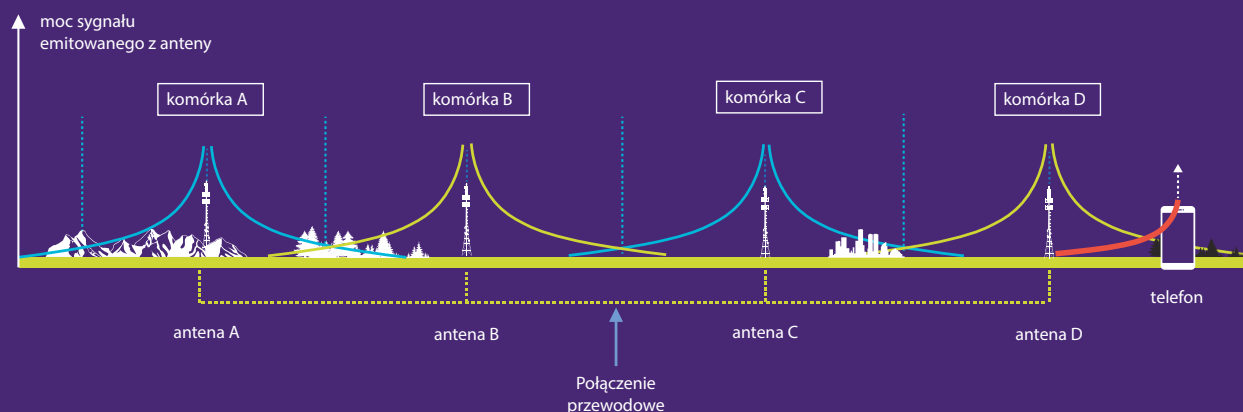
Rys. 4. Sieć mobilna z pojedynczą stacją bazową.

Drugi powód związany jest z ograniczoną liczbą kanałów transmisyjnych. Kiedy użytkownicy z całego kraju musieliby współdzielić relatywnie niewielką liczbę kanałów dostępnych danemu operatorowi, dochodziłoby często do sytuacji, że podejmowana byłaby próba połączenia przy zajętych wszystkich kanałach przez pozostałych użytkowników, co skończyłoby się odrzuceniem połączenia i komunikatem „sieć zajęta”.

Trzeci powód dotyczy problemu z powiększaniem obszaru dostępności sieci. Jeżeli nadawca chciałby dołączyć użytkowników z sąsiedztwa pokrywanego obszaru, wiązałoby się to z jeszcze większym wymaganiem na moc nadajnika stacji bazowej i zwiększeniem konkurencji o ograniczone zasoby kanałów transmisyjnych.

Na szczęście wszystkie te problemy da się rozwiązać wprowadzając podział obszaru na tzw. **komórki**, czyli mniejsze obszary, którym przypisuje się dedykowane im oddzielne stacje bazowe (Rys. 5). Zmniejszony obszar obsługiwany przez daną stację bazową pozwala na zmniejszenie mocy nadajników sygnału i w stacjach bazowych, i w telefonach. Ponadto, pasma częstotliwości użyte w jednej komórce mogą być wykorzystane w innych wystarczająco oddalonych komórkach. Jest to możliwe właśnie dzięki mniejszej

mocy nadajników – sygnał docierający do odległych komórek jest na tyle słaby, że nie wprowadza zakłóceń do sygnałów emitowanych wewnątrz nich w tym samym paśmie. Zmniejsza to znacząco konkurencję o kanały transmisyjne i pozwala także na łatwe rozbudowywanie sieci o kolejne komórki.



Rys. 5. Koncepcja sieci komórkowej.

Ponieważ częstotliwości nośne wykorzystywane w telefonii mobilnej są bardzo wysokie (w sieciach 5G mogą sięgać nawet $26\text{ GHz} = 2,6 \cdot 10^{10}\text{ Hz}$), efekty dyfrakcyjne fal EM są niewielkie (patrz Lekcja 6) i wskazane jest maksymalne ograniczenie liczby przeszkód pomiędzy nadajnikiem i odbiornikiem sygnału. Dzięki podziałowi na komórki można znacznie łatwiej dobrać położenie stacji bazowej oraz wysokość zawieszenia jej anten tak, by zapewnić jej jak najlepszą widoczność (a tym samym – bezpośrednie połączenie z telefonami) w możliwie największej części obejmowanego przez nią obszaru. Ma to szczególne znaczenie w warunkach zabudowy miejskiej.

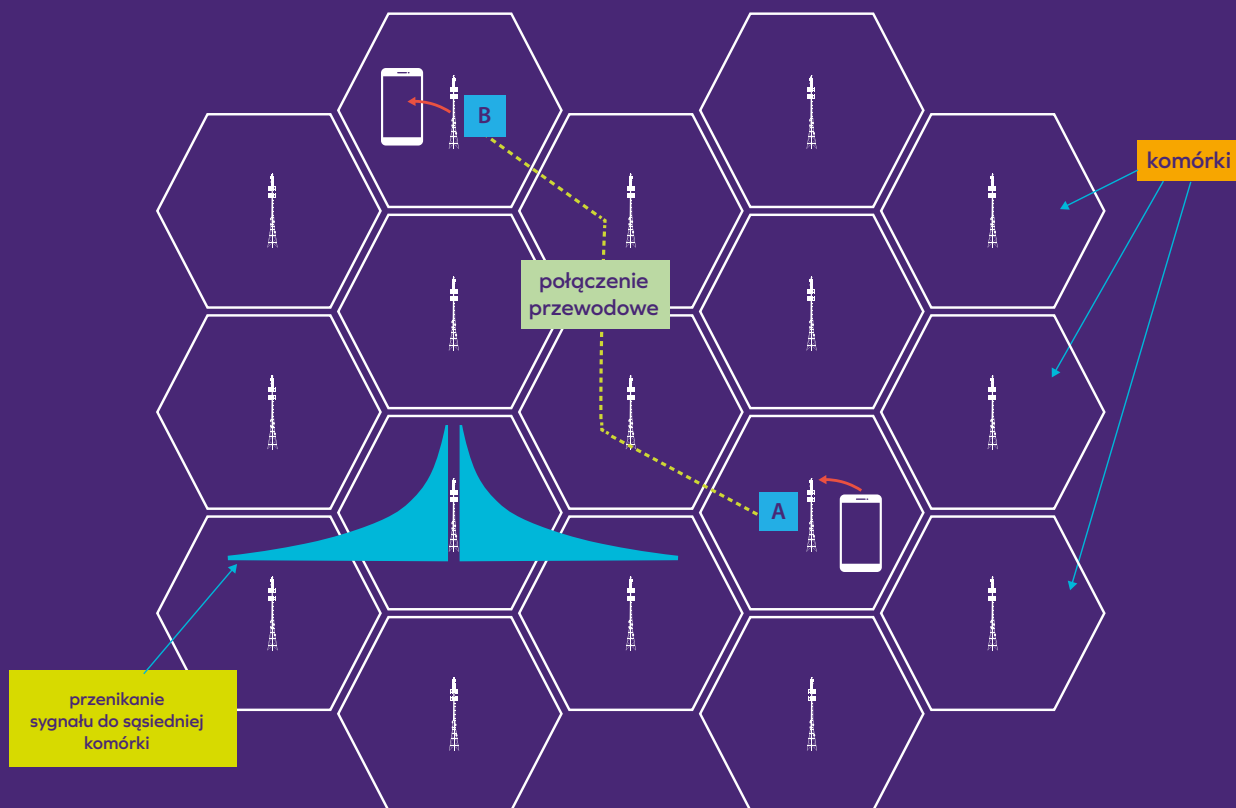
W jaki sposób stacje bazowe łączą się pomiędzy sobą? Szczęśliwie nie są to już obiekty ruchome, zatem wystarczy je połączyć siecią przewodową (uwaga: czasami stosuje się dedykowane, silnie ukierunkowane łącze radiowe, ale dla uproszczenia skupimy się na połączeniach przewodowych).

Faktyczny podział obszaru często odbywa się z wykorzystaniem komórek sześciokątnych, jak pokazano na Rys. 6. Sześciokąty mają tę korzystną właściwość, że można nimi swobodnie pokrywać płaszczyznę bez luk, a przy tym, w przeciwieństwie do trójkątów równobocznych lub kwadratów, niewiele odbiegają kształtem od koła.

4. Połączenia telefoniczne w sieci komórkowej

Przypatrzmy się jeszcze Rys. 6. Sygnał emitowany przez stację bazową w danej komórce zawsze do pewnego stopnia przenika do komórek sąsiednich. Po części jest to efekt niekorzystny – w końcu wprowadziliśmy podział na komórki m.in. po to, by mieć możliwość użycia tych samych kanałów transmisyjnych w różnych częściach obszaru. Przenikanie sygnału do sąsiednich komórek oznacza, że nie mogą one korzystać z kanałów transmisyjnych występujących w ich bezpośrednim sąsiedztwie.

Z drugiej strony, utrzymywanie się sygnału na granicach komórek pozwala na płynne „przekazywanie” połączenia telefonicznego, gdy użytkownik sieci przekracza te granice, a może się to jak najbardziej zdarzyć, gdyż sieć telefonii komórkowej została zaprojektowana właśnie pod kątem mobilnych użytkowników. Kiedy zatem w trakcie rozmowy telefonicznej przechodzimy z jednej komórki do drugiej, przez jakiś czas utrzymujemy połączenie z poprzednią stacją bazową i dopiero, gdy sygnał ze stacji obsługującej drugą komórkę będzie wystarczająco silny, połączenie zostanie do niej przekazane.



Rys. 6. Podział komórkowy na powierzchni danego obszaru.

A jak wygląda sam proces nawiązywania połączenia? Telefon znajdujący się w komórce A wysyła odpowiedni sygnał z żądaniem połączenia do stacji bazowej jego komórki. Stacja bazowa odczytuje potrzebne informacje (m.in. kto dzwoni i do kogo) i przekazuje je drogą przewodową do centrum zarządzania siecią. Centrum odnajduje komórkę, w której znajduje się cel połączenia i zestawia połączenie przewodowe pomiędzy stacjami bazowymi komórek A i B. Następnie stacja bazowa B nawiązuje połączenie bezprzewodowe z telefonem docelowym.

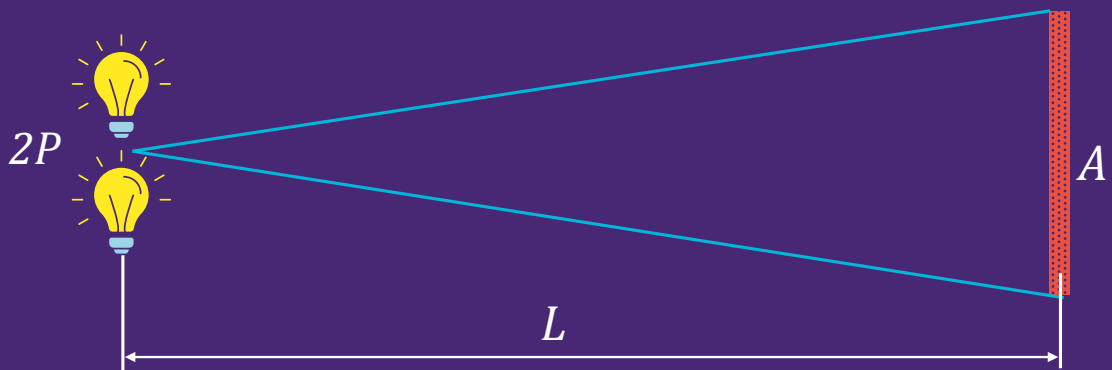
A w jaki sposób centrum zarządzania odnajduje poszczególne telefony? Otóż każdy telefon okresowo nawiązuje krótkie połączenie ze stacjami bazowymi w okolicy informując o swoim położeniu, dzięki czemu w razie potrzeby komórka, w której znajduje się telefon, może być natychmiast zlokalizowana.



Doświadczenie

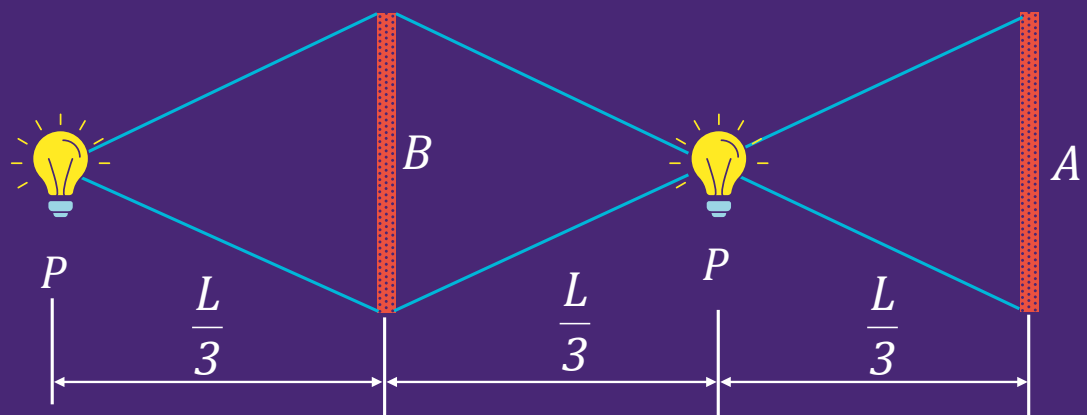
Przeprowadzimy doświadczenie, które pozwoli nam na ocenę efektywności rozprawa-
dzenia energii fali EM w danym obszarze dwoma sposobami: w jednym użyjemy moc-
nego źródła umieszczonego w jednym miejscu, zaś w drugim – dwóch słabszych źródeł
rozmieszczonych równomiernie. Falą EM będzie w tym przypadku światło, a jego źródłem
– żarówki.

Zaciemnijmy maksymalnie pomieszczenie i umieśćmy dwie identyczne żarówki możliwie
blisko siebie i w pewnej odległości L od nieprzezroczystego ekranu A (Rys. 7). Zwróć
uwagę na stopień oświetlenia ekranu przy obecnym ustawieniu źródeł.



Rys. 7. Oświetlenie za pomocą żarówek umieszczonych w jednym miejscu.

Następnie wprowadźmy drugi ekran – B – i umieśćmy go wraz z jedną z żarówek tak, jak
pokazano na Rys. 8. Dzięki takiemu ustawieniu oba ekrany powinny być oświetlone w jed-
nakowym stopniu. Czy jesteś w stanie ocenić, w którym z ustawień ekrany są bardziej
oświetlone?



Rys. 8. Oświetlenie za pomocą żarówek rozmieszczonych równomiernie.



Dyskusja. Przypomnijmy sobie doświadczenie z Lekcji 2. Skorzystaliśmy tam ze wzoru na natężenie fali świetlnej w pewnej odległości r , gdy źródło ma moc P . Użyjmy tego samego wzoru do oszacowania natężenia oświetlenia ekranu A w pierwszym ustawieniu:

$$I_1 = a \frac{2P}{L^2}$$

Wstawiliśmy tutaj jako moc źródła $2P$, gdyż mamy do czynienia z dwoma identycznymi żarówkami znajdującymi się w odległości L od ekranu (a jest tutaj pewnym mnożnikiem, którego wartość okaże się nieistotna).

A czemu jest równe natężenie oświetlenia ekranu A w drugim ustawieniu (dla ekranu B będzie takie samo i to po obu stronach):

$$I_2 = a \frac{P}{(L/3)^2} = a \frac{9P}{L^2}$$

Zatem stosunek obu natężeń jest równy:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{a \frac{9P}{L^2}}{a \frac{2P}{L^2}} = 4,5$$

Widzimy zatem, że natężenie oświetlenia w drugim przypadku jest ponad czterokrotnie większe! Kiedy zależy nam więc na dobrym oświetleniu większego obszaru, bardziej korzystne jest równomierne rozłożenie źródeł światła, niż skupianie ich w jednym miejscu.

Podobnie jest w przypadku stacji bazowych telefonii mobilnej. Z punktu widzenia pokrycia określonego obszaru, lepiej jest wprowadzić wiele równomiernie rozmieszczonych anten z nadajnikiem mniejszej mocy niż jedną antenę z nadajnikiem o mocy równej sumie mocy nadajników poszczególnych anten.



Słowniczek

Kanał transmisyjny – pasmo przydzielone danemu nadawcy wokół określonej częstotliwości nośnej.

Komórka – obszar wydzielony z całego regionu obsługiwanego przez operatora sieci mobilnej z przypisaną mu stacją bazową i zbiorem kanałów transmisyjnych.

Stacja bazowa (inaczej BTS) – zespół anten połączony z urządzeniami nadawczo-odbiorczymi pozwalający na bezprzewodowe połączenie telefonów z siecią telefonii mobilnej. Stacje bazowe połączone są ze sobą przewodowo lub z wykorzystaniem dedykowanych łączy radiowych.

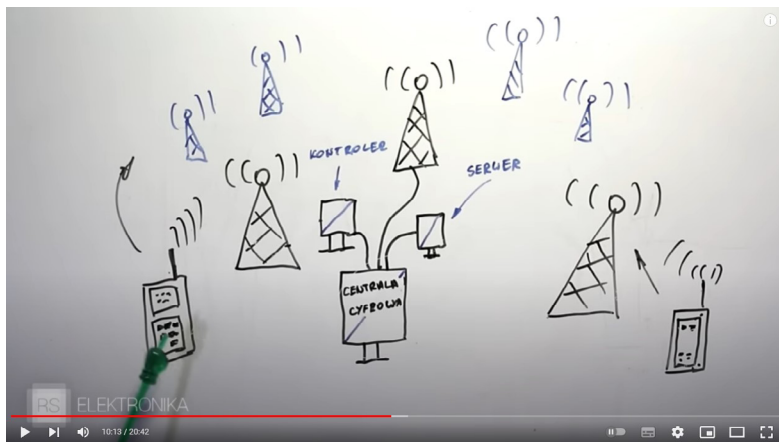
BTS (ang. *base transceiver station*) – skrótowa nazwa stacji bazowej sieci telefonii mobilnej.

GSM (ang. *Global System for Mobile Communications*) – skrótowa nazwa jednego z najpopularniejszych standardów telefonii komórkowej.



Materiały zewnętrzne

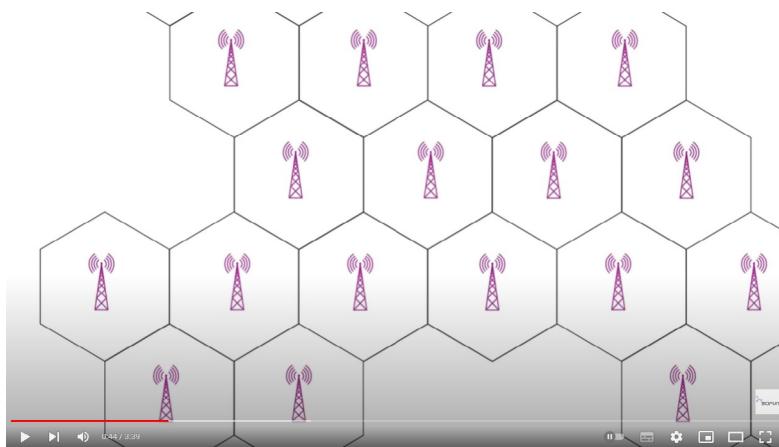
1. Jak działają sieci komórkowe.



Zeskanuj QR kod



2. Czym jest roaming i jak działa? – film edukacyjny nie tylko o samym roamingu, ale i o podstawach działania sieci komórkowej.

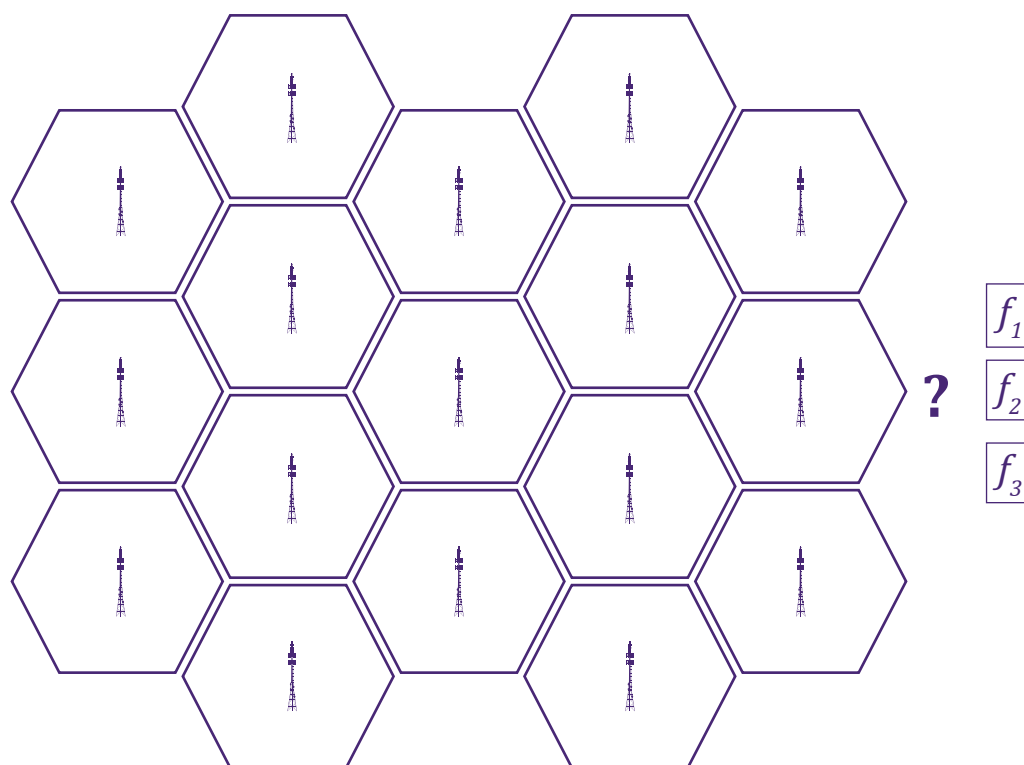


Zeskanuj QR kod



Praca domowa

1. Dla sieci komórkowej z rysunku poniżej należy przydzielić kanały transmisyjne. Sąsiadujące ze sobą komórki nie mogą mieć przydzielonego tego samego kanału ze względu na przenikanie sygnału przez granice komórek. Każdy kanał będziemy umownie nazywać przypisaną mu częstotliwością nośną (ze zbioru: f_1, f_2, f_3 , itd.). Czy zadanie może być zrealizowane przy wykorzystaniu tylko dwóch kanałów (f_1 i f_2)? Uzasadnij odpowiedź. A w przypadku trzech kanałów (f_1, f_2 i f_3)? Jeżeli tak, wpisz odpowiedni symbol do każdej z komórek.



2. Oblicz minimalną częstotliwość nośną dla sygnału o szerokości pasma 50 MHz i anteny dipolowej o długości 1 m. Do emisji sygnału zostanie wykorzystana modulacja AM. Przyjmij prędkość fali EM jako $c = 3 \cdot 10^8$ m/s.

Dane:

$B = 50 \text{ MHz} = 50 \cdot 10^6 \text{ Hz} = 5 \cdot 10^7 \text{ Hz}$ – szerokość pasma sygnału modulującego.

$l = 1 \text{ m}$ – długość anteny.

Szukane:

$$f_n = ?$$

Lekcja 11

Pole elektromagnetyczne a zdrowie

Cel

- Przedstawienie zagadnień dotyczących wpływu pola elektromagnetycznego na organizmy żywe, w tym człowieka.

Efekty kształcenia

- Uczeń zna zakresy częstotliwości różnych rodzajów promieniowania elektromagnetycznego.
- Uczeń zna wpływ promieniowania jonizującego i niejonizującego na organizmy żywe.
- Uczeń zna typowe częstotliwości oraz moce sygnałów używane we współczesnej telefonii mobilnej.

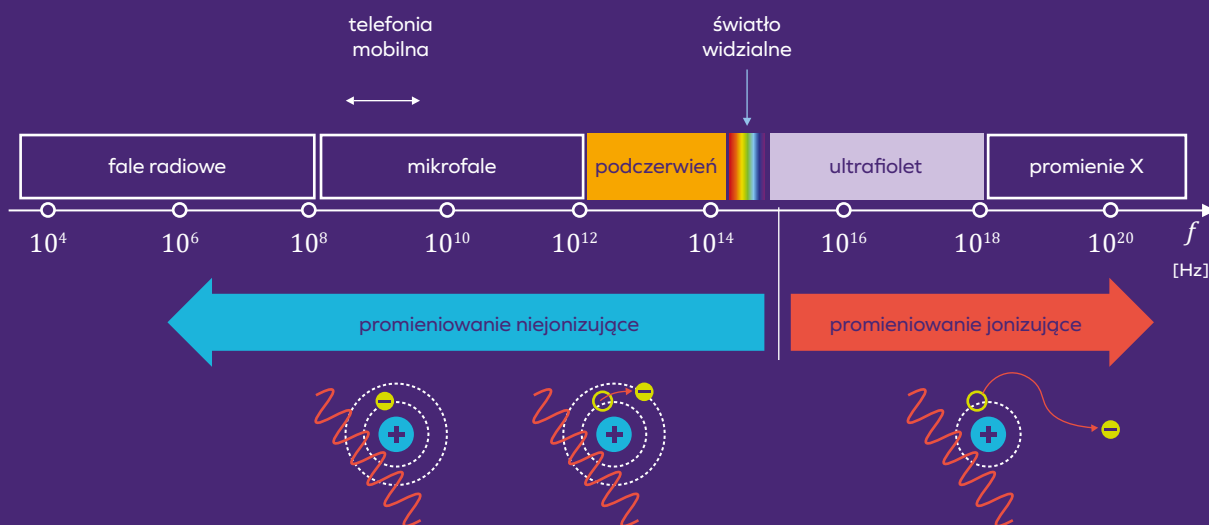


1. Fale EM – zakresy częstotliwości

W ostatniej lekcji zajmiemy się zagadnieniem wpływu fal elektromagnetycznych (EM) na organizmy żywe, w tym człowieka. Wzmózione wykorzystanie fal EM we współczesnej telekomunikacji mobilnej czasem budzi niepokój, szczególnie, gdy używa się pojęcia **promieniowania**, kojarzącego się z czymś bardzo niebezpiecznym dla zdrowia.

Uporządkujmy fakty. Pole EM wypełnia cały wszechświat, a rozchodzące się w nim zaburzenia mają ogromną liczbę źródeł naturalnych, jak i sztucznych, czyli powstałych na skutek działalności człowieka. Zaburzenia te nazywamy falami EM lub promieniowaniem EM. Jak pamiętamy z poprzednich lekcji, rozchodzącej się fali możemy przypisać częstotliwość (lub długość fali) i amplitudę, którą można bezpośrednio powiązać z energią (lub mocą) przenoszoną przez falę. Jeżeli pytamy o wpływ fali EM na organizmy żywe, musimy zdać sobie sprawę, że w wysokim stopniu zależy on właśnie od tych dwóch parametrów – częstotliwości f oraz energii.

Przypatrzmy się najpierw pierwszemu z nich. Na Rys. 1 przedstawiono zakresy częstotliwości dla podstawowych typów promieniowania EM (warto zaznaczyć, że granice pomiędzy nimi są umowne i że skala na osi jest wykładnicza – przejście z punktu na punkt oznacza dziesięciokrotny wzrost częstotliwości). Fale o najniższych częstotliwościach, poniżej 10^8 Hz, utożsamiamy z falami radiowymi. Następny zakres – tzw. mikrofae – zawiera typowe częstotliwości spotykane w telefonii mobilnej (ok. 10^9 – 10^{10} Hz) lub w kuchenkach mikrofalowych. Zakres podczerwieni w dużej mierze pokrywa się z tzw. promieniowaniem cieplnym (o tym powiemy szerzej w ostatnim etapie niniejszej lekcji). Fale EM z zakresu $4 \cdot 10^{14}$ – $8 \cdot 10^{14}$ Hz to doskonale nam znane światło widzialne – od koloru czerwonego (najmniejsza częstotliwość) do fioletowego (największa częstotliwość) poprzez wszystkie kolory tęczy. Zakres powyżej światła widzialnego nazywany jest ultrafioletem (promieniowanie ultrafioletowe ze słońca odpowiada m.in. za naszą opaleniznę), zaś powyżej częstotliwości 10^{18} Hz fale EM nazywane są promieniowaniem X lub rentgenowskim (stosowanym w medycynie do prześwietlania tkanek).



Rys. 1. Zakresy różnych typów promieniowania elektromagnetycznego.

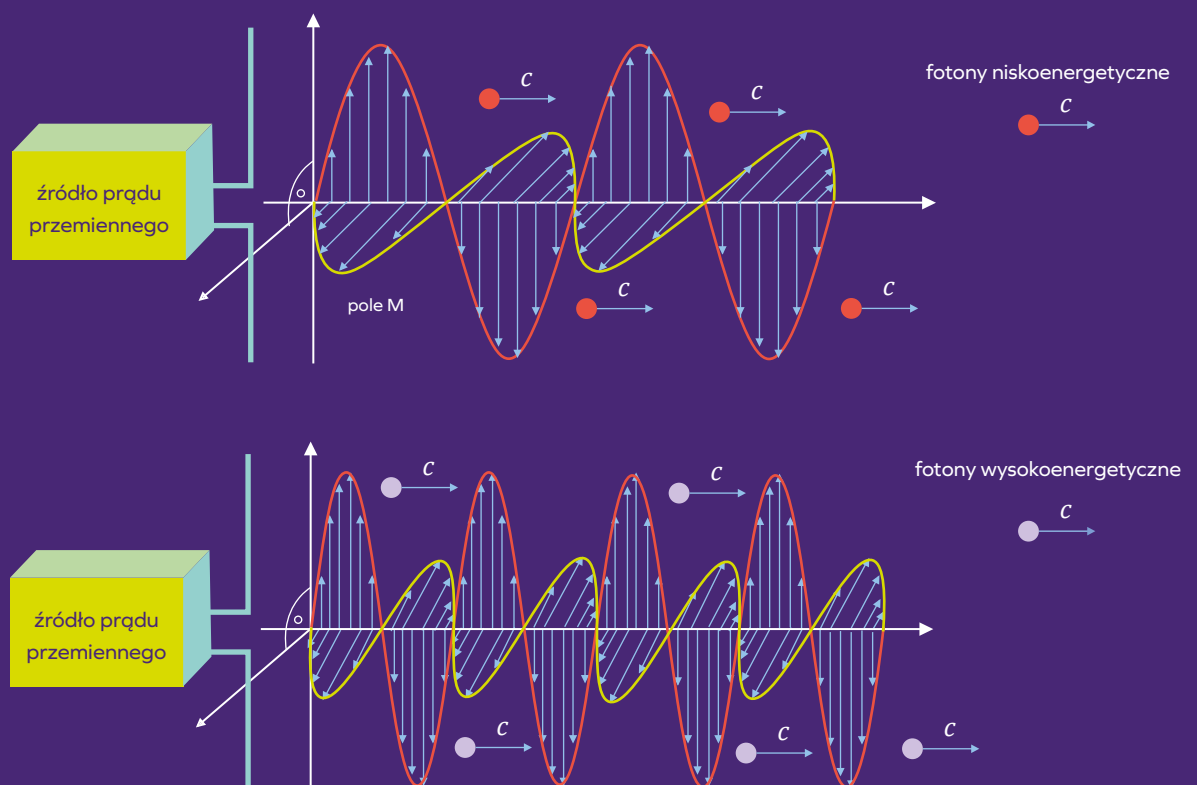
Promieniowanie poniżej 10^{15} Hz określamy jako **niejonizujące**, zaś powyżej – jako **jonizujące**. Podział ten ma ogromne znaczenie z punktu widzenia wpływu na organizmy żywe.

2. Promieniowanie jonizujące i niejonizujące

Aby lepiej zrozumieć oddziaływanie fal EM z atomami i cząsteczkami, z których zbudowana jest materia, w tym istoty żywe, warto wiedzieć, że oprócz znanego nam już opisu falowego promieniowanie EM wymaga także przyjęcia, że składa się ono z cząstek, tzw. **fotonów** (patrz Rys. 2). Fotony, podobnie jak fala EM, poruszają się z prędkością światła c , nie mają masy i cechują się jedynie energią E zależną od częstotliwości f fali EM wg bardzo prostego wzoru:

$$E = hf$$

gdzie współczynnik h to tzw. stała Plancka (czytaj: „Planka”), równa $h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$. To właśnie energia fotonu decyduje o tym, co stanie się w momencie przejścia fali EM przez atom. Zmiana amplitudy fali prowadzi do zmiany liczby fotonów emitowanych przez źródło, ale nie zmienia energii pojedynczej cząstki.



Rys. 2. Promieniowanie EM jako zjawisko falowe i strumień fotonów.

W Lekcji 6 mówiliśmy o różnych zjawiskach towarzyszących przechodzeniu fali EM przez materię. Przyjrzyjmy się teraz temu bardziej szczegółowo z punktu widzenia strumienia fotonów (patrz Rys. 3). Foton przelatujący w pobliżu atomu może w efekcie oddziaływania z elektronami spowodować wzbudzenie któregoś z nich na wyższy poziom energetyczny, ale może to zajść tylko wtedy, gdy energia fotonu jest dopasowana do odległości pomiędzy tymi poziomami. W takim przypadku zachodzi zjawisko podobne do rezonansu (patrz Lekcja 5), foton zostaje pochłonięty, a atom przechodzi w stan wzbudzony (Rys. 3b). Jeżeli rezonans nie zajdzie, foton przenika przez atom (Rys. 3a) – oznacza to przejście fali EM przez materię bez żadnych zakłóceń.

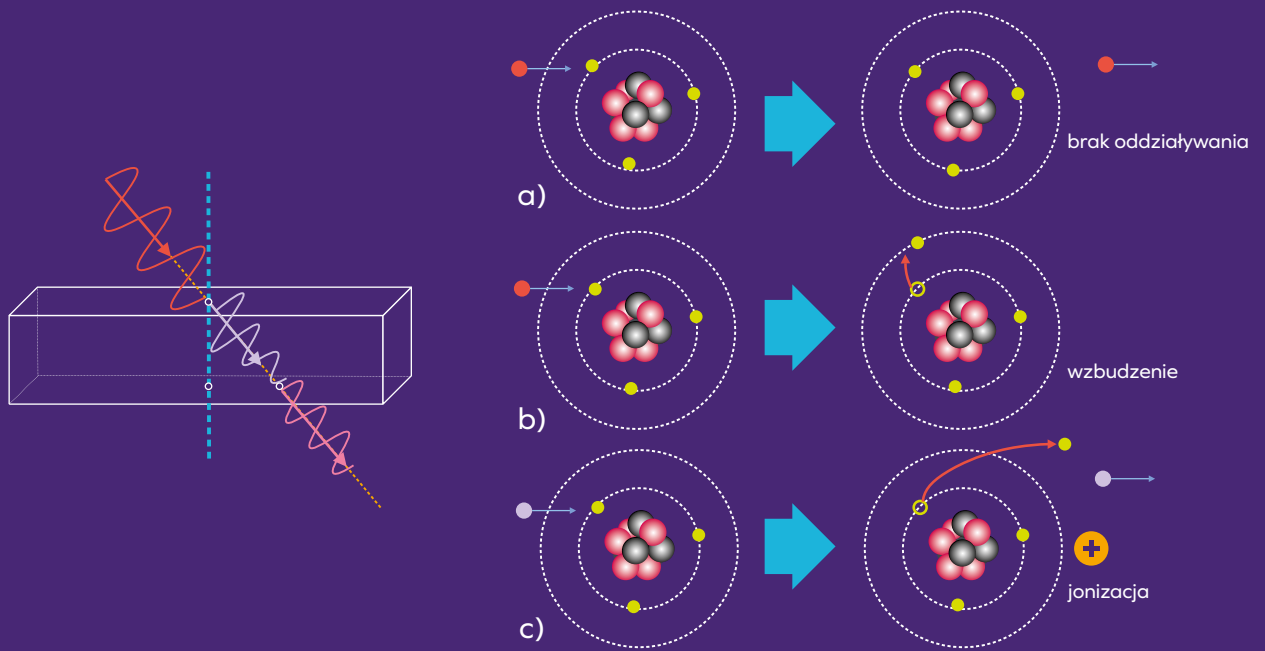
Wysokoenergetyczne fotony tzn. takie, których energia jest wystarczająca do oderwania elektronu od atomu (czyli większa od **energii jonizacji**), wybijają ujemnie naładowany elektron poza atom przemieniając go w **jon** dodatni. Zjawisko to nazywamy **jonizacją** i jest wysoce szkodliwe dla organizmów żywych – może prowadzić do uszkodzenia DNA i zaburzenia funkcjonowania komórek (w tym do rozwoju komórek nowotworowych). Ponieważ możliwość zajścia jonizacji zależy tylko od tego, czy energia fotonu jest większa od energii jonizacji atomów i cząsteczek, a energia fotonu zależy tylko od częstotliwości fali EM, podział na promieniowanie jonizujące i niejonizujące może być dokonany tylko w oparciu o wartość częstotliwości, tak jak zrobiliśmy to na Rys. 1. Czy to oznacza, że moc promieniowania nie ma znaczenia? Jak już wspomnieliśmy wzrost amplitudy fali wiąże się ze zmianą liczby fotonów emitowanych w jednostce czasu. Jeżeli zatem wyobrazimy sobie wysokoenergetyczne fotony jako niebezpieczne pociski, to zmiana mocy promieniowania prowadzi do zwiększenia szybkostrzelności działa. Oznacza to, że więcej komórek ciała może być uszkodzonych w danym przedziale czasu, przy czym nawet pojedynczy pocisk jest w stanie dokonać istotnych zniszczeń (ma to istotne znaczenie przy promieniowaniu jonizującym).

3. Efekt termiczny

Wspomnieliśmy, że jednym z możliwych efektów oddziaływania elektronów z fotonem jest wzbudzenie atomu na wyższy poziom energetyczny (Rys. 3b). Taki wzbudzony atom (lub cząsteczka) może oddać energię na dwa sposoby:

- wypromieniować energię w postaci fotonu – elektron powraca wtedy na poziom wyjściowy, a fala EM zostaje odbita (Rys. 4a);
- zderzyć się z innym atomem i przekazać mu nadmiar energii w formie energii kinetycznej – dochodzi wtedy do pochłonięcia fali EM, a atomy lub cząsteczki danego obiektu zwiększają intensywność ruchu lub drgań (Rys. 4b).

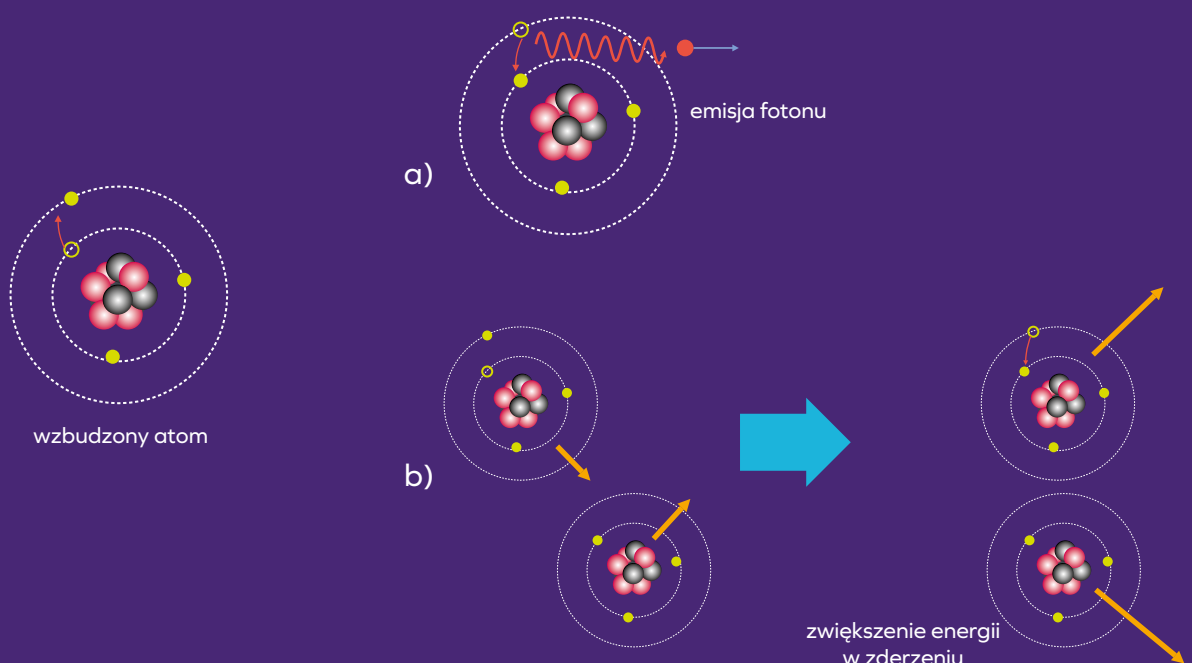
Z punktu widzenia wpływu na organizm żywy, bardziej interesująca jest ta druga ścieżka. Zwiększenie intensywności ruchu lub drgań atomów i cząsteczek danego ciała jest niczym innym, jak zwiększeniem temperatury. Dochodzi zatem w tym przypadku do podgrzania ciała, dlatego zjawisko to nazywane jest **efektem termicznym**. Aby efekt termiczny był istotny musi więc dochodzić do rezonansowego pochłaniania fotonów, przejścia wzbudzonego atomu do stanu o większej energii kinetycznej i zwielokrotnienia wzrostu temperatury przez zasypanie obiektu „morzem” fotonów. Skala efektu zależy w tym przypadku zatem istotnie od mocy promieniowania i od rodzaju materii poddanej działaniu fal EM.



Rys. 3. Różne typy oddziaływania fotonów z elektronami w atomach.

Kuchenka mikrofalowa jest doskonałym przykładem działania efektu termicznego. Częstotliwość emitowanych fal, bliska $2,45 \text{ GHz} = 2,45 \cdot 10^9 \text{ Hz}$ (czyli z zakresu używanego w telefonii mobilnej), jest wystarczająco blisko częstotliwości rezonansowego pochłaniania przez cząsteczki wody, by pobudzić je do silnego drgania, a tym samym doprowadzić do ogrzania żywności, w której te cząsteczki się znajdują. Moc promieniowania typowej kuchenki sięga przy tym 1000 W.

O ile jonizacja może zajść tylko dla promieniowania w zakresie powyżej 10^{15} Hz , czyli przy częstotliwościach 100000 razy większych od tych stosowanych w telefonii mobilnej, to z efektem termicznym na pewno trzeba się liczyć i uwzględnić w normach bezpieczeństwa, których spełnienie uzależnione jest od mocy emitowanych sygnałów.



Rys. 4. Różne sposoby uwolnienia energii przez wzbudzony atom.

4. Współczynnik SAR

Nauczeni przykładem kuchenki mikrofalowej powinniśmy z dużą ostrożnością podchodzić do stosowania mikrofal w telefonii mobilnej. Nadmierne podgrzanie żywej tkanki może być naprawdę niebezpieczne, szczególnie, że składa się ona w większej części z wody wyjątkowo podatnej na pochłanianie promieniowania EM w tym zakresie częstotliwości.

Z tego powodu wprowadzono odpowiednie normy prawne regulujące, zależnie od częstotliwości, poziomy dopuszczalne w miejscach ogólnie dostępnych. W zakresach częstotliwości telefonii mobilnej największy dopuszczalny poziom natężenia promieniowania EM – **10 W/m²** – oraz natężenia pola elektrycznego – **61 V/m**. Ponieważ same te wielkości nie wyrażają bezpośrednio stopnia pochłaniania energii przez żywą tkankę, wprowadzono dodatkowo współczynnik tzw. absorpcji swoistej nazywany w skrócie **SAR** (od angielskiego skrótu *specific absorption rate*), który mierzony jest w W/kg i pozwala oszacować jaka moc promieniowania EM pochłaniana jest w przeliczeniu na kilogram masy ciała.

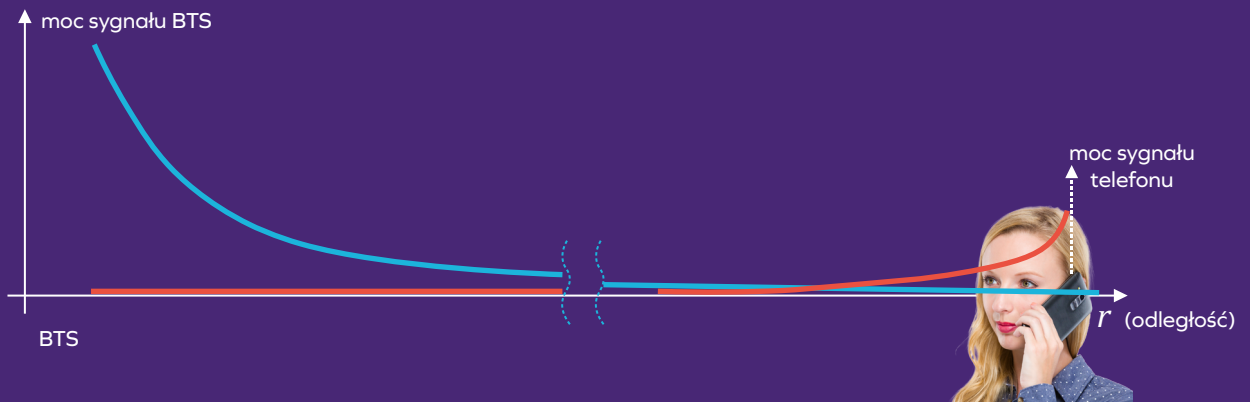
Przyjęta w Europie bezpieczna wartość SAR jest na poziomie **2 W/kg** i zapewnia, że temperatura tkanki nie zostanie podniesiona bardziej niż o 1 °C.

Chociaż to zazwyczaj stacje bazowe budzą najwięcej kontrowersji i obaw dotyczących wpływu na zdrowie mieszkańców znajdujących się w ich sąsiedztwie, zwróćmy uwagę, że ich moc nadajnika nie przekracza zazwyczaj 40 W, a natężenie fal EM przez nie generowanych dość szybko spada wraz z odległością. Jeżeli zestawimy to z mocą nadajnika w telefonie, która nie przekracza 2 W, ale również faktem, że telefon w trakcie rozmowy trzymany jest zwykle przy samej głowie, okazuje się, że to właśnie fale EM wytwarzane w naszym własnym telefonie mają decydujące znaczenie (patrz Rys. 5). Zwróćmy przy tym uwagę, że moc nadajnika telefonu jest kilkaset razy mniejsza od mocy kuchenki mikrofalowej.

Każdy telefon charakteryzuje się przypisaną mu wartością SAR zazwyczaj podawaną oddzielnie dla głowy i dla całego ciała. Telefony nie spełniające normy bezpieczeństwa (tzn. naruszające warunek $SAR < 2 \text{ W/kg}$) nie są dopuszczone do sprzedaży. Typowe wartości SAR popularnych telefonów są znacznie mniejsze niż 2 W/kg.

Warto zaznaczyć, że podane przez producenta wartości SAR są wartościami maksymalnymi tzn. zmierzonymi w warunkach, w których telefon nadaje sygnał z największą możliwą mocą. Zazwyczaj moc nadawanego sygnału jest znacznie mniejsza. Uzależniona jest ona od takich czynników jak odległość od stacji bazowej, rodzaju przeszkód dla sygnału pomiędzy telefonem a stacją, a nawet sposobu trzymania telefonu.

Od czasu do czasu można spotkać się z głosami o szkodliwym wpływie promieniowania EM o charakterze innym niż jonizacja lub efekty termiczne, ale trzeba wyraźnie podkreślić, że jak na razie żadne z tych doniesień nie zostało potwierdzone przez solidne badania naukowe.

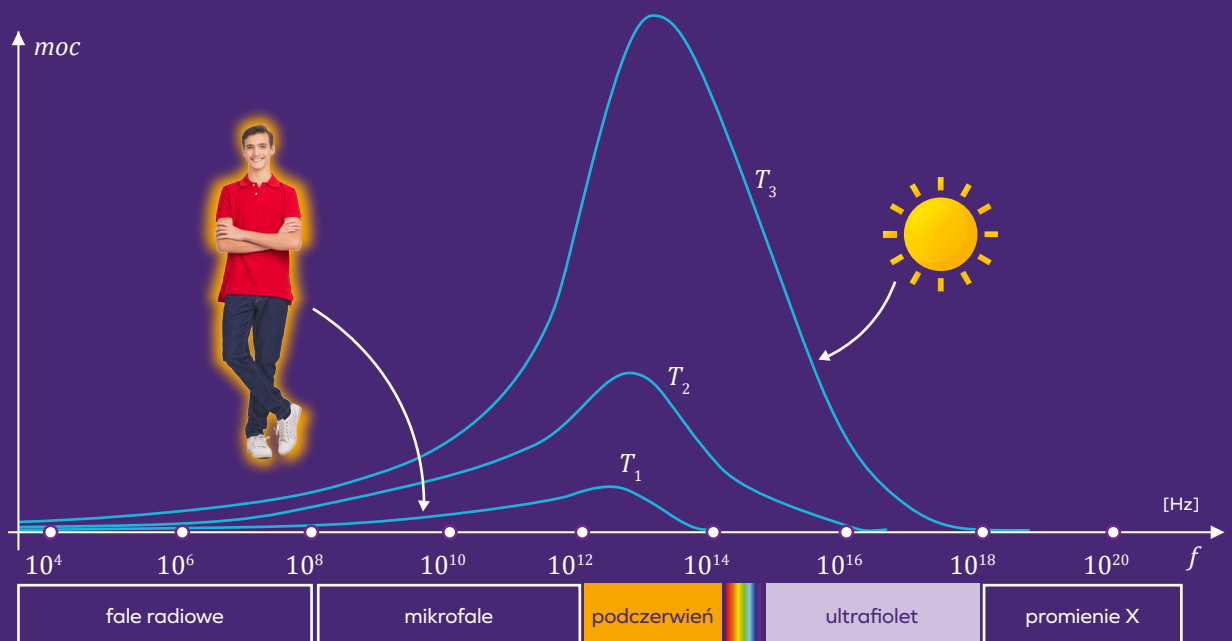


Rys. 5. Poziom mocy sygnału nadawanego przez BTS i telefon w zależności od odległości od anteny.

5. Promieniowanie termiczne

Na koniec, aby podkreślić, że generowanie promieniowania EM nie jest niczym tajemniczym, ani nie ogranicza się do ludzkich osiągnięć cywilizacyjnych (takich jak telefonia mobilna), zauważmy, że każdy z nas jest nadajnikiem fal EM!

Każde ciało o temperaturze powyżej zera bezwzględnego (0 K) jest źródłem tzw. promieniowania termicznego (lub ciepłego) zawierające teoretycznie składowe o każdej możliwej częstotliwości (patrz Rys. 6). Zgodnie z prawem promieniowania ciepłego jego moc dla częstotliwości małych i bardzo dużych jest znikoma, istnieje natomiast jedno maksimum, które jest tym wyższe i tym bardziej jest przesunięte w kierunku dużych częstotliwości im większa jest temperatura ciała.



Rys. 6. Moc promieniowania ciepłego dla różnych częstotliwości w zależności od temperatury obiektu.

Dla człowieka (temperatura ok. 37°C) to maksimum przypada w zakresie promieniowania podczerwonego, które nie jest dla nas widoczne. Można je za to doskonale obserwować przez kamery termowizyjne.

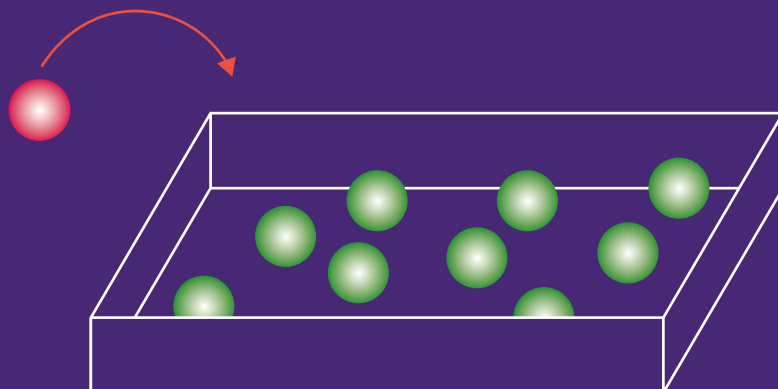
Ciała podgrzane do odpowiednio dużej temperatury zaczynają świecić (np. rozpalony – jak to mówimy – „do czerwoności” metal). Wynika to z tego, że wybrzuszenie krzywej promieniowania zaczyna wchodzić w zakres promieniowania widzialnego.

Słońce, o temperaturze powierzchni bliskiej 5500°C , emituje nie tylko promieniowanie podczerwone i widzialne – duża część fal EM przypada na zakres ultrafioletu, co jest miłym dodatkiem dla każdego amatora opalania.



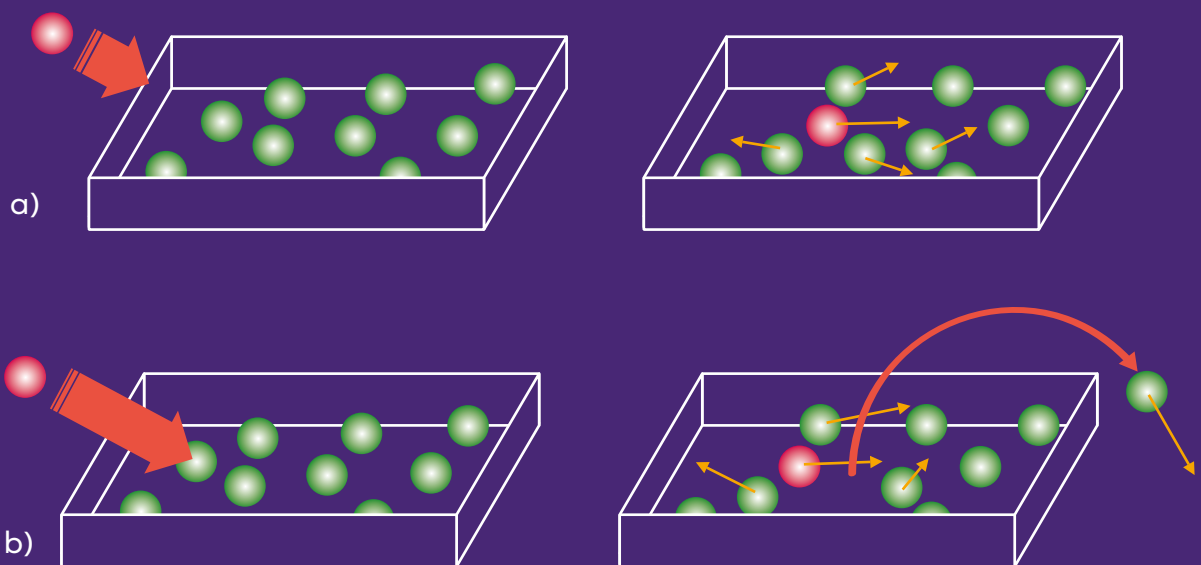
Doświadczenie

Przeprowadzimy doświadczenie, które pozwoli nam niejako zasymulować zjawisko jonizacji oraz efekt termiczny. Przygotujmy otwarte pudełko o raczej niewysokich ściankach i umieśćmy w nim kilka małych piłek (np. tenisowych) – patrz Rys. 7. Zamknięte wewnątrz ścianek piłki będą modelem elektronów, które nie mogą opuścić pudełka, dopóki nie zostanie im dostarczona odpowiednio duża energia. Weźmy do ręki jedną piłkę, która będzie odpowiednikiem fotonu.



Rys. 7. Symulacja zjawiska jonizacji i efektu termicznego.

1. Wrzucimy „foton” do pudełka nie nadając mu zbyt dużej prędkości. Zauważmy, że część piłek na skutek zderzenia z „fotonem” zacznie się poruszać i zderzać z innymi piłkami (Rys. 8a). Uzyskujemy w ten sposób pewien model efektu termicznego. Energia przekazana przez piłkę nie była wystarczająca do tego, by wybić „elektrony” z pudełka, ale zwiększyła ich energię kinetyczną.
2. Wrzucimy „foton” ponownie, ale tym razem z możliwie dużym impetem starając się trafić którąś z piłek w pudełku. Przy odrobinie szczęścia powinno się udać wybić jeden z „elektronów” poza ścianki pudełka (Rys. 8b). Oznacza to, że energia „fotonu” była wystarczająca do uzyskania efektu „jonizacji”.



Rys. 8. Różne zachowanie się piłek w zależności od różnej energii początkowej piłki „fotonu”.



Do dyskusji:

- Co w naszym modelu oznaczają ścianki pudełka?
- Czy zwiększenie wysokości ścianek ma wpływ na „jonizację”?



Słowniczek

Efekt termiczny – rozgrzewanie się materii pod wpływem oddziaływania z promieniowaniem elektromagnetycznym.

Energia jonizacji – energia, którą trzeba dostarczyć do atomu lub cząsteczki by dokonać jej jonizacji.

Foton – cząstka promieniowania elektromagnetycznego. Ma zerową masę i niesie energię proporcjonalną do częstotliwości promieniowania.

Jon – dodatnio lub ujemnie naładowany atom. Jon cechuje się nadmiarową lub niedostateczną liczbą elektronów w stosunku do obojętnego elektrycznie atomu.

Jonizacja – przekształcenie obojętnego atomu lub cząsteczki w jon poprzez oderwanie elektronu.

Promieniowanie jonizujące – rodzaj fal elektromagnetycznych o energii wystarczającej do jonizacji atomów i cząsteczek.

Promieniowanie EM – inna nazwa dla fal elektromagnetycznych.

Promieniowanie niejonizujące – rodzaj fal elektromagnetycznych o energii zbyt małej do jonizacji atomów i cząsteczek.

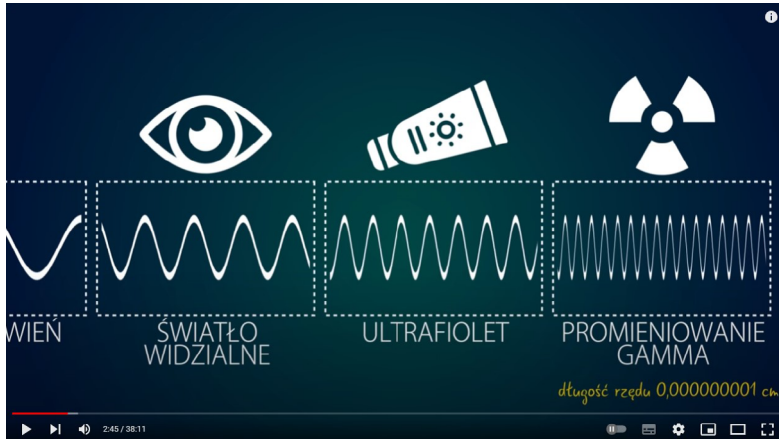
Promieniowanie termiczne (cieplne) – emisja fal elektromagnetycznych przez ciało o temperaturze większej od zera bezwzględnego (0 K).

SAR – współczynnik określający moc promieniowania elektromagnetycznego pochłanianego przez żywą tkankę w przeliczeniu na kilogram masy ciała. Jednostka – W/kg.



Materiały zewnętrzne

1. 5G i telefony komórkowe – czy są dla nas zagrożeniem?



Zeskanuj QR kod



2. 5G a zdrowie – czy szkodzi?



Zeskanuj QR kod



Praca domowa

1. Sprawdź SAR swojego telefonu. W niektórych telefonach można uzyskać tę informację za pomocą krótkiego kodu USSD: *#07#. Jeżeli kod nie zadziała, wpisz w wyszukiwarkę internetową model telefonu oraz słowo kluczowe „SAR”.

2. Oblicz jakiej częstotliwości musi być promieniowanie EM, by dokonać jonizacji cząsteczki tlenu. Aby do tego doszło, energia fotonu musi przekroczyć energię jonizacji. Jaki to rodzaj promieniowania EM? Przyjmij energię jonizacji $E_j = 2,2 \cdot 10^{-18} \text{ J}$ oraz stałą Plancka $h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$.

Dane:

$E_j = 2,2 \cdot 10^{-18} \text{ J}$ – energia jonizacji

$h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ – stała Plancka

Szukane:

$f = ?$

Rozwiązania zadań domowych

Lekcja 1. Zadanie 1.

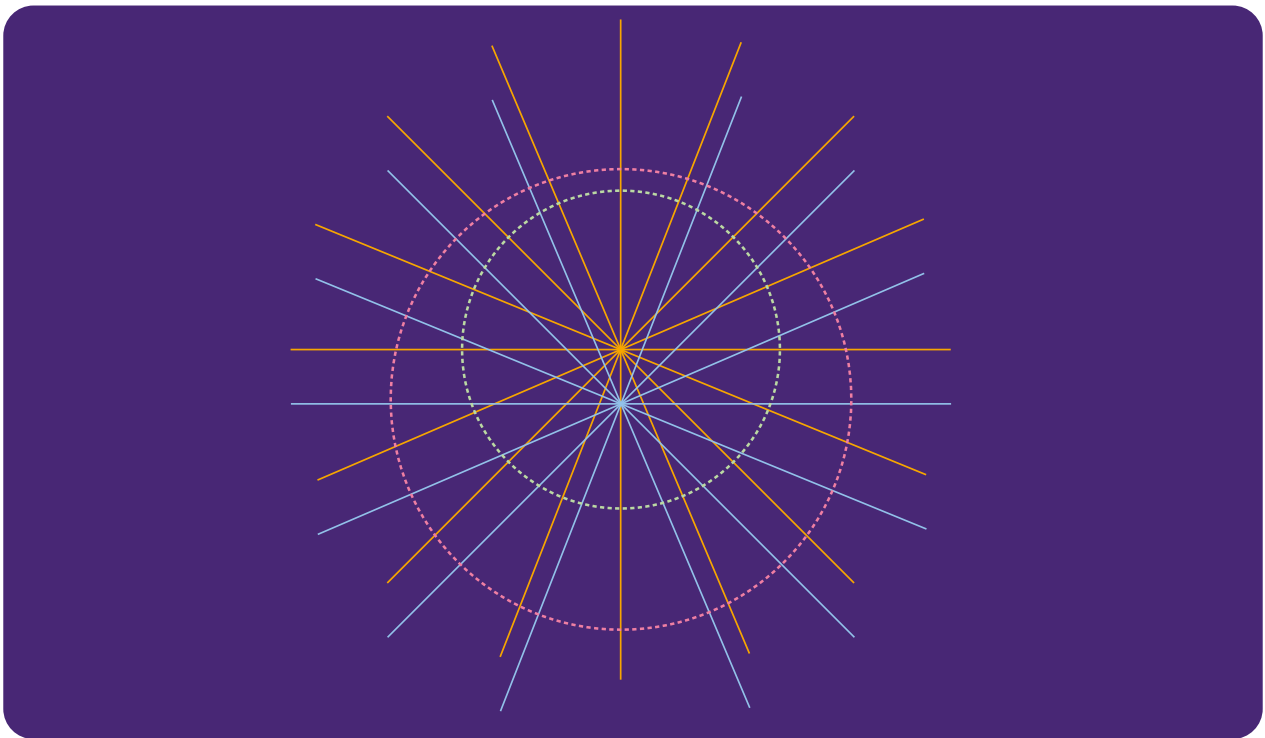
1. Sygnał elektryczny (mózg) – nadawca podejmuje decyzję o treści komunikatu.
2. Sygnał elektryczny (układ nerwowy) – mięśnie nadawcy pobudzane są przez impulsy powodując stukanie w ścianę.
3. Sygnał wibracyjny (ściana) – materiał, z którego zbudowana jest ściana drga pod wpływem uderzeń.
4. Sygnał akustyczny (fala dźwiękowa w powietrzu) – drgania ściany przenoszą się na drgania powietrza po drugiej stronie ściany.
5. Sygnał wibracyjny (błona bębenkowa w uchu) – sygnał dociera do ucha drugiej osoby.
6. Sygnał elektryczny (układ nerwowy) – komunikat wysyłany jest do mózgu drugiej osoby.
7. Sygnał elektryczny (mózg) – zmiana kodowania (stukanie trzeba przekształcić na mruganie latarką).
8. Sygnał elektryczny (układ nerwowy) – mięśnie drugiej osoby pobudzane są do naciskania przycisku latarki.
9. Sygnał elektryczny (układ elektryczny latarki) – wciskany przycisk powoduje przyłożenie napięcia elektrycznego do żarówki.
10. Sygnał świetlny (żarówka) – żarówka emituje sygnał w postaci światła.

Lekcja 2. Zadanie 1.

r	1	2	5	10	100	1000
$1/r$	1	0,5	0,2	0,1	0,01	0,001
$1/r^2$	1	0,25	0,04	0,01	0,0001	0,000001

Widzimy, że przy wzroście r czynnik $1/r^2$ maleje wyraźnie szybciej niż $1/r$ i to tym bardziej im r jest większe. W dużej odległości od ładunku wartość natężenia pola obliczona z prawa Coulomba (zmiennosć $1/r^2$) staje się nieistotna w porównaniu z wartością natężenia w obszarze fali EM (zmiennosć $1/r$).

Lekcja 2. Zadanie 2.



Lekcja 3. Zadanie 1.

Korzystając z podstawowego wzoru:

$$v = \lambda f$$

przekształcamy go do postaci:

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

Podstawiamy dane:

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{340 \text{ m/s}}{261,6 \text{ Hz}} = 1,3 \frac{\text{m/s}}{1/\text{s}} = 1,3 \text{ m}$$

Lekcja 3. Zadanie 2.

Korzystamy ze wzoru na rozmiar anteny:

$$l = \frac{\lambda}{2}$$

Przyjmujemy w nim równość, gdyż chodzi nam o najmniejszą możliwą długość anteny.

Ze wzoru na długość fali:

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{c}{f}$$

mamy

$$l = \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2f} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{2 \cdot 261,6 \text{ Hz}} \approx 5,73 \cdot 10^5 \text{ m} \approx 573 \text{ km!}$$

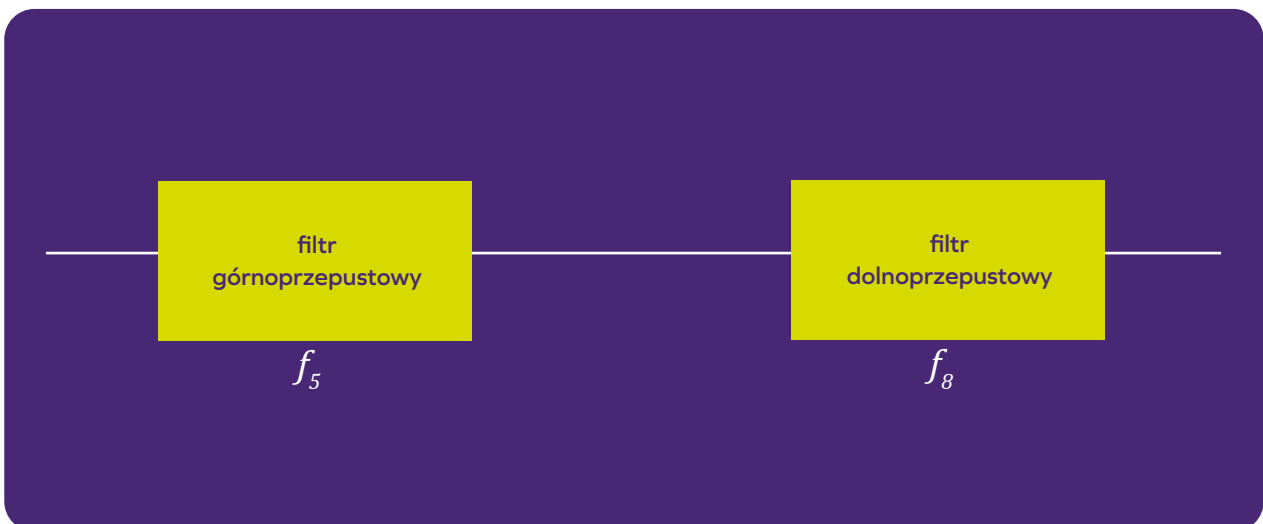
Efektywne nadawanie fal EM o tak małej częstotliwości wydaje się praktycznie nie do zrealizowania!

Lekcja 4. Zadanie 1.

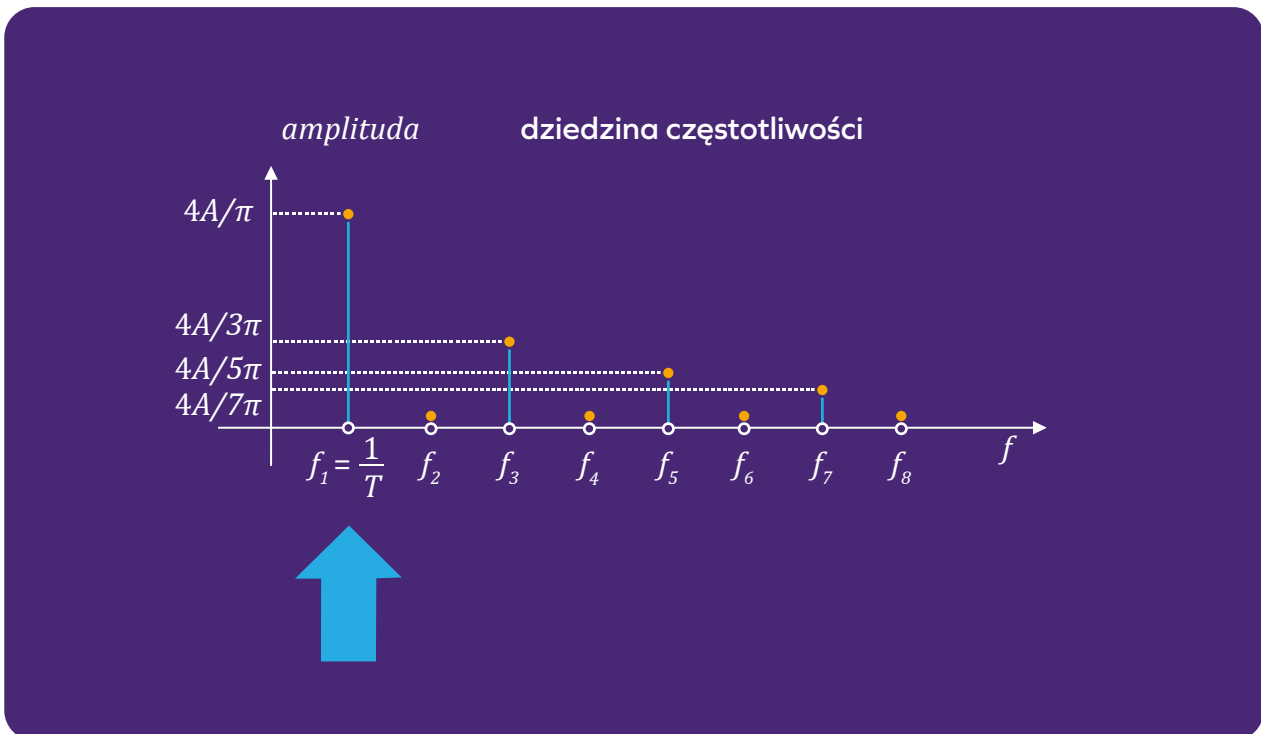
1 b, 2 c, 3 a.

Lekcja 5. Zadanie 1.

Tak, jest to możliwe. Sygnał możemy najpierw przetworzyć filtrem górnoprzepustowym o częstotliwości granicznej f_5 ; zostaną w nim wtedy tylko częstotliwości powyżej f_5 (włącznie). Przetworzony sygnał przepuszczamy następnie przez filtr dolnoprzepustowy o częstotliwości granicznej f_8 . Usunięte zostaną wtedy harmoniczne poniżej f_8 . Zostaną zatem dokładnie te harmoniczne z zakresu od f_5 do f_8 .



Lekcja 5. Zadanie 2.



Tak. Wystarczy użyć filtra dolnoprzepustowego o częstotliwości granicznej $f=1/T$, ewentualnie filtra pasmowego obejmującego zakresem właśnie tę częstotliwość, ale nie sięgającego do $f_2=2f_1$ (czyli drugiej harmonicznej).

Jak pokazaliśmy w Lekcji 4, widmo sygnału prostokątnego (patrz niżej) zawiera harmoniczną f_1 o częstotliwości $f_1=1/T$, która ma dokładnie pożądany okres.

Lekcja 6. Zadanie 1.

Korzystając ze wzoru wiążącego długość fali, częstotliwość oraz prędkość fali:

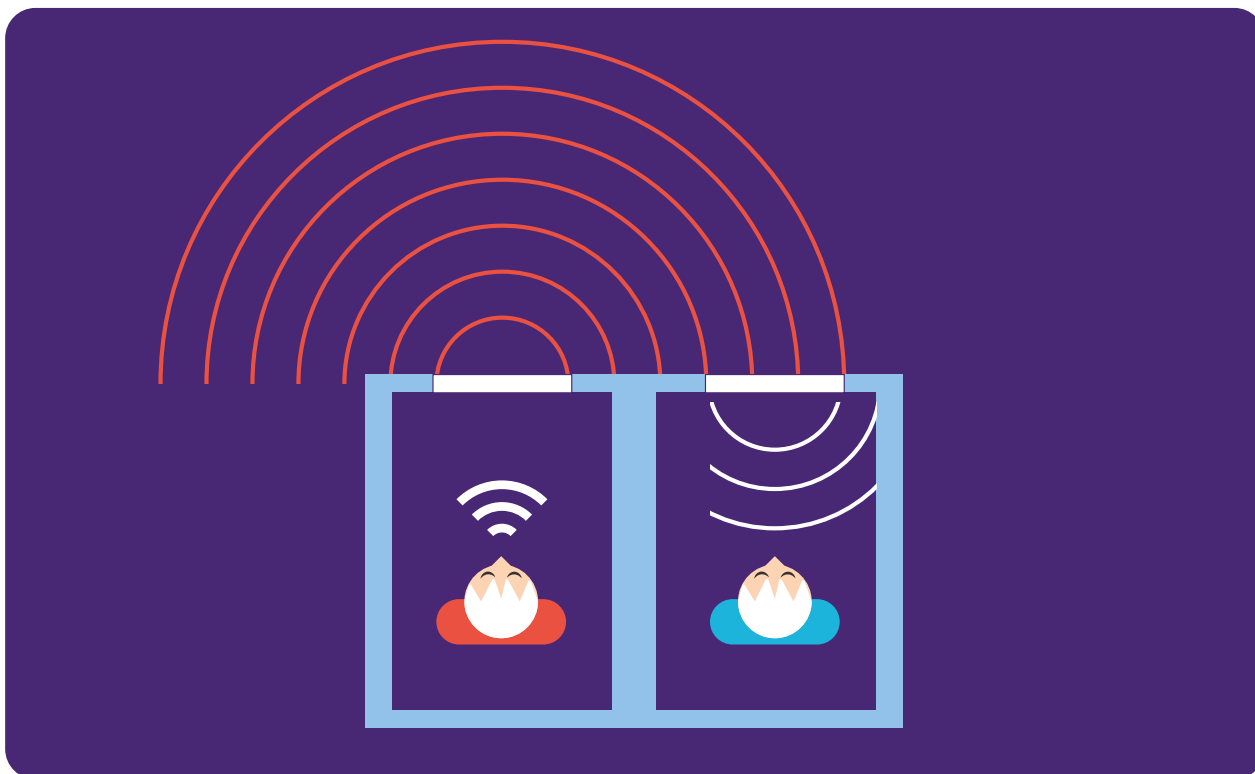
$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{340 \text{ m/s}}{0,02 \text{ m}} = 17000 \text{ Hz} = 17 \text{ kHz}$$

Jest to częstotliwość na granicy słyszalności człowieka. W praktyce, aby zmniejszyć wpływ dyfrakcji nietoperze emitują ultradźwięki o częstotliwości sięgającej nawet 200 kHz.

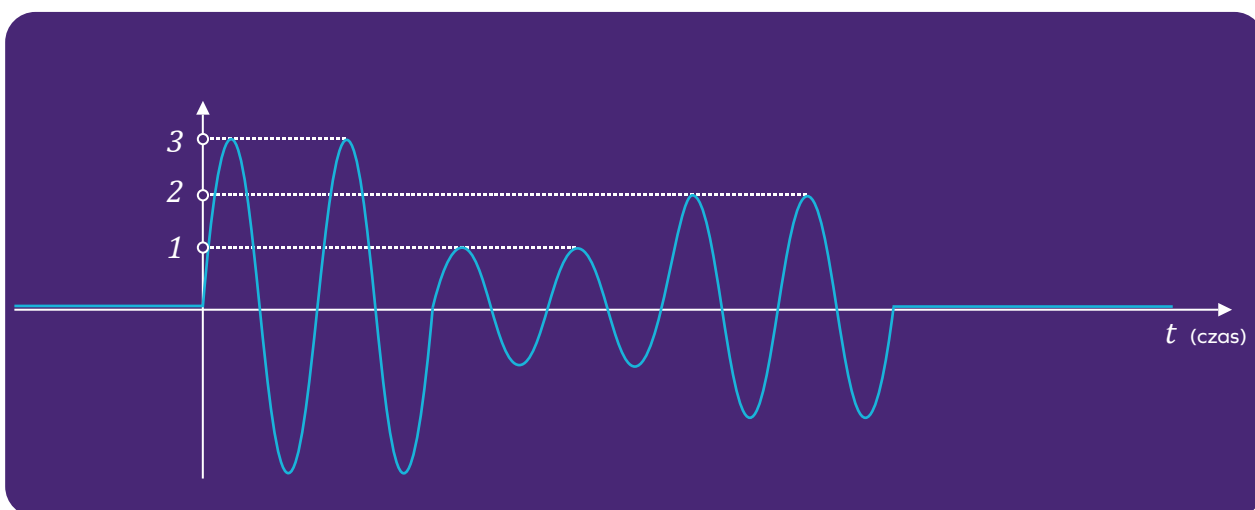
Lekcja 6. Zadanie 2.

Fala akustyczna ulega dyfrakcji na krawędziach okna i rozchodzi się wzdłuż ściany, po czym ulega kolejnej dyfrakcji na krawędzi drugiego okna, analogicznie jak na Rys. 5.

W efekcie dociera do odbiorcy w sąsiednim pomieszczeniu (oczywiście, ze znacznie mniejszą amplitudą).

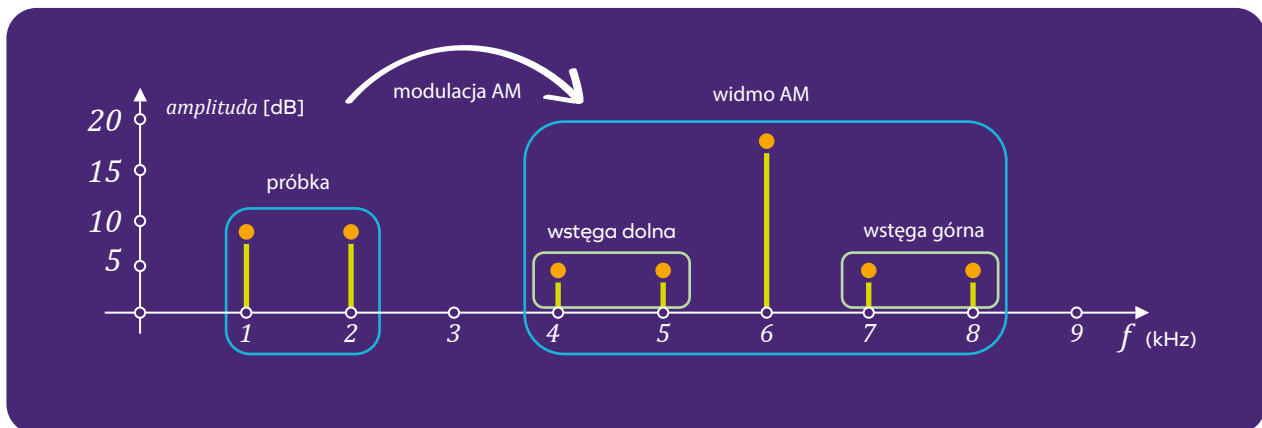


Lekcja 7. Zadanie 1.



Każdemu wynikowi rzutu kostką odpowiada jeden poziom amplitudy. Formalnie jednak powinniśmy jeszcze uwzględnić poziom 0, przy którym żadna informacja nie jest przesyłana. Rozpoznanie niezerowej wartości sygnału pozwala nam stwierdzić, że rozpoczęło się przesyłanie informacji użytecznej.

Lekcja 7. Zadanie 2.

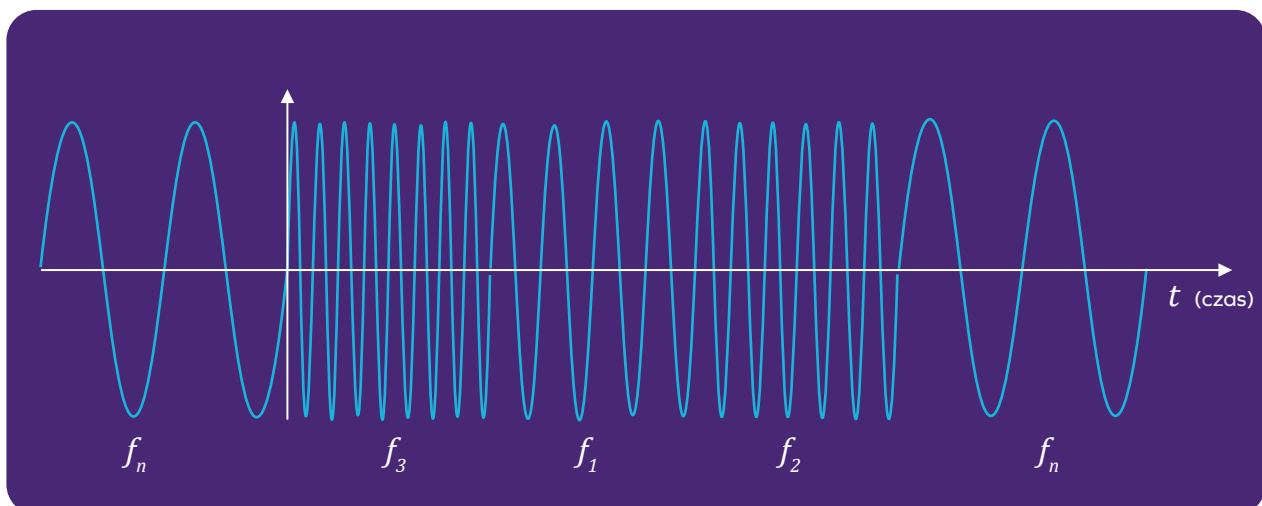


Obie składowe sygnału pojawiają się w widmie sygnału zmodulowanego jako para prążków rozmieszczonych symetrycznie względem częstości nośnej z amplitudą zmniejszoną o połowę. Ich częstości wyliczamy jako:

$$\begin{cases} 6 \text{ kHz} + 1 \text{ kHz} = 7 \text{ kHz} \\ 6 \text{ kHz} - 1 \text{ kHz} = 5 \text{ kHz} \end{cases}$$

$$\begin{cases} 6 \text{ kHz} + 2 \text{ kHz} = 8 \text{ kHz} \\ 6 \text{ kHz} - 2 \text{ kHz} = 4 \text{ kHz} \end{cases}$$

Lekcja 8. Zadanie 1.



Oprócz częstości nośnej wprowadzamy trzy różne wartości częstości f_1, f_2 i f_3 , które przypisujemy do odpowiedniego wyniku rzutu kostką.

Lekcja 8. Zadanie 2.

Typ modulacji sprawdzamy przez porównanie dewiacji częstotliwości z częstotliwością sygnału modulującego (tutaj – sygnału z próbką utworu muzycznego). Ponieważ w naszym przypadku:

$$\Delta f > f_m$$

a ponadto nierówność zdecydowanie przeważa na korzyść dewiacji częstotliwości, mamy tu z pewnością do czynienia z modulacją szerokopasmową.

Korzystając z reguły Carsona obliczamy szerokość B pasma sygnału zmodulowanego:

$$B = 2(f_m + \Delta f) = 2(15 + 75) = 180 \text{ [kHz]}$$

Wartość częstotliwości nośnej nie ma znaczenia dla zadanych pytań.

Lekcja 9. Zadanie 1.

Kiedy w Lekcji 3 rozwiązaliśmy to zadanie (bez modulacji) doszliśmy do następującego oszacowania długości anteny:

$$l = \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2f} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{2 \cdot 261,6 \text{ Hz}} \approx 5,73 \cdot 10^5 \text{ m} \approx 573 \text{ km!}$$

Co zmienia tutaj modulacja AM? Jak pamiętamy z Lekcji 7, widmo sygnału uzyskanego przez modulację fali nośnej harmonicznym sygnałem o częstotliwości f zawiera dwa symetrycznie rozmieszczone prążki o częstotliwościach $f_n - f$ oraz $f_n + f$. Ponieważ z warunków zadania wynika, że częstotliwość nośna jest przytłaczająco większa od częstotliwości f sygnału modulującego, możemy z bardzo dobrym przybliżeniem przyjąć, że całe widmo sygnału skupia się praktycznie przy częstotliwości f_n .

Zatem po modulacji:

$$l = \frac{\lambda}{2} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{2 \cdot 2 \cdot 10^9 \text{ Hz}} = 7,5 \cdot 10^{-2} \text{ m} = 7,5 \text{ cm}$$

Chyba każdy się zgodzi, że antena o tej długości jest nieco łatwiejsza w konstrukcji.

Lekcja 9. Zadanie 2.

Wprowadzenie kolejnego bitu podwoi liczbę poziomów – każdy z poziomów w kolumnie „bit 3” zostanie przepołowiony i czwarty bit będzie informował, która z połówek powinna być wybrana. Zatem będziemy mieli do czynienia z 16 poziomami.

Ponieważ dla jednego bitu mamy 2 poziomy, dla dwóch 4, dla trzech 8, a dla czterech 16 i każdy kolejny bit będzie podwajał liczbę poziomów, łatwo odgadnąć ogólny wzór:

$$l.poz. = 2^N$$

Zauważmy, że np. przy $N = 24$ bitach:

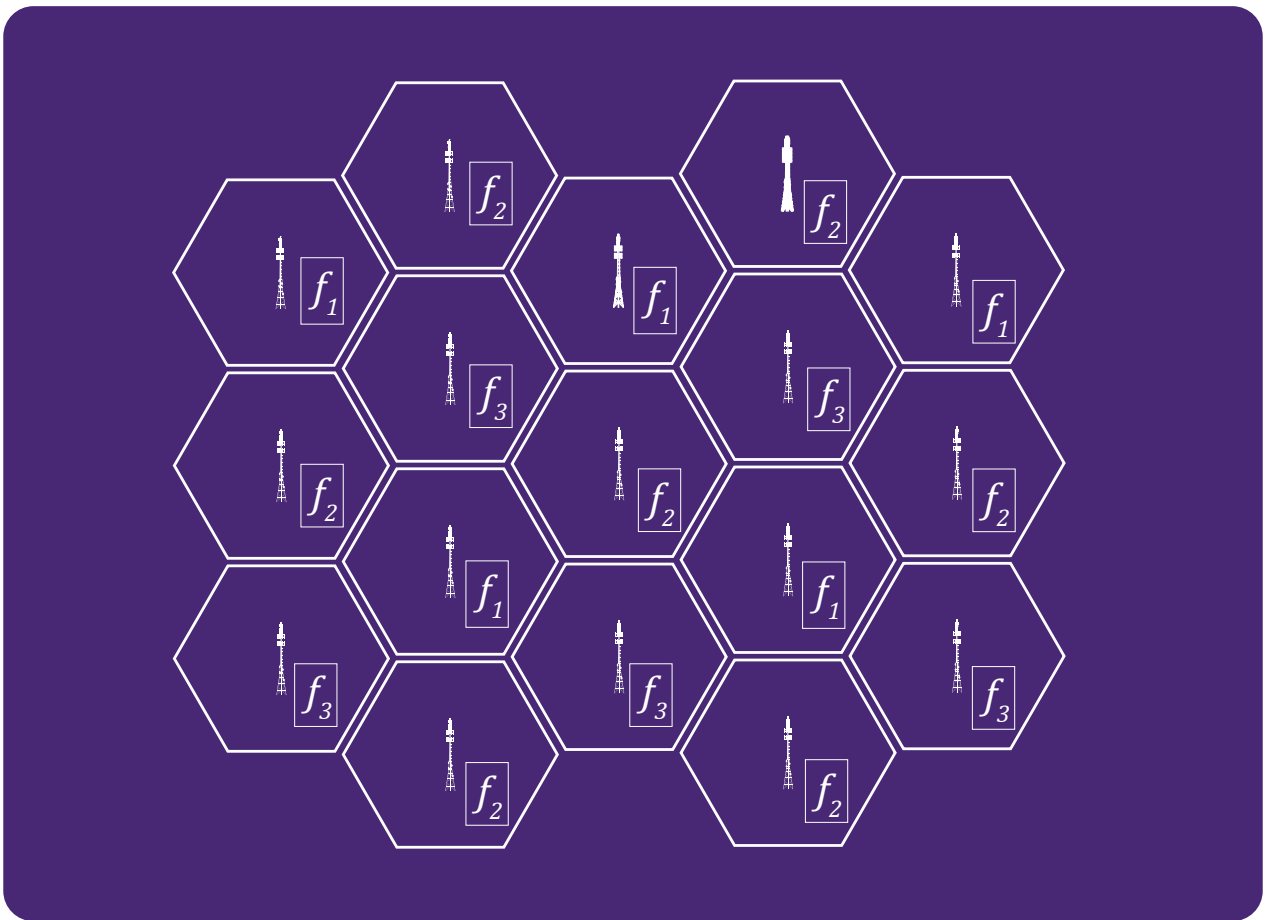
$$l.poz. = 2^{24} = 16777216$$

Próbki skwantowane tak gęsto mogą w praktyce być nieodróżnialne od oryginalnych.

Lekcja 10. Zadanie 1.

Zadanie nie może być zrealizowane z wykorzystaniem tylko dwóch kanałów. Jeżeli przypiszemy kanał f_1 do danej komórki, to każda z komórek sąsiednich musiałaby mieć przypisany kanał f_2 . Dwie stykające się komórki z sąsiedztwa miałyby wtedy przypisany ten sam kanał, a to narusza warunki zadania.

Natomiast trzy kanały wystarczą. Poniższy rysunek przedstawia jeden z możliwych podziałów.



Lekcja 10. Zadanie 2.

Korzystamy ze wzoru na częstotliwość minimalną w pasmie sygnału zmodulowanego:

$$f_{\min} = \frac{c}{2l} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{2 \cdot 1 \text{ m}} = 1,5 \cdot 10^8 \text{ Hz}$$

Częstotliwość nośna jest równa częstotliwości minimalnej powiększonej o szerokość wstęgi dolnej sygnału zmodulowanego. W przypadku modulacji AM szerokość obu wstęg równa jest dokładnie szerokości pasma sygnału modulującego. Zatem:

$$f_n = f_{\min} + B = 1,5 \cdot 10^8 \text{ Hz} + 5 \cdot 10^7 \text{ Hz} = 1,5 \cdot 10^8 \text{ Hz} + 0,5 \cdot 10^8 \text{ Hz} = 2 \cdot 10^8 \text{ Hz}$$

$$f_n = 200 \text{ MHz}$$

Należy zatem użyć częstotliwości nośnej równej przynajmniej 200 MHz.

Lekcja 11. Zadanie 1.

Do jonizacji dojdzie, gdy energia fotonu o częstotliwości f będzie co najmniej równa energii jonizacji. Przekształćmy wzór na energię fotonu:

$$E = hf \rightarrow f = \frac{E}{h}$$

Zatem:

$$f = \frac{E_j}{h} = \frac{2,2 \cdot 10^{-18} \text{ J}}{6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}} = 3,3 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$$

Jest to zakres promieniowania ultrafioletowego.

Notatki

Przedrostek	Oznaczenia	Mnożnik
eksa	E	$10^{18} = 1\,000\,000\,000\,000\,000\,000$
peta	P	$10^{15} = 1\,000\,000\,000\,000\,000$
tera	T	$10^{12} = 1\,000\,000\,000\,000$
giga	G	$10^9 = 1\,000\,000\,000$
mega	M	$10^6 = 1\,000\,000$
kilo	k	$10^3 = 1\,000$
hekto	h	$10^2 = 100$
deka	da	$10^1 = 10$
decy	d	$10^{-1} = 0,1$
centy	c	$10^{-2} = 0,01$
mili	m	$10^{-3} = 0,001$
mikro	u	$10^{-6} = 0,000\,001$
nano	n	$10^{-9} = 0,000\,000\,001$
piko	p	$10^{-12} = 0,000\,000\,000\,001$
femto	f	$10^{-15} = 0,000\,000\,000\,000\,001$
atto	a	$10^{-18} = 0,000\,000\,000\,000\,000\,001$

