

# Lekcja 7

## Modulacja amplitudowa – AM

### Cel

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

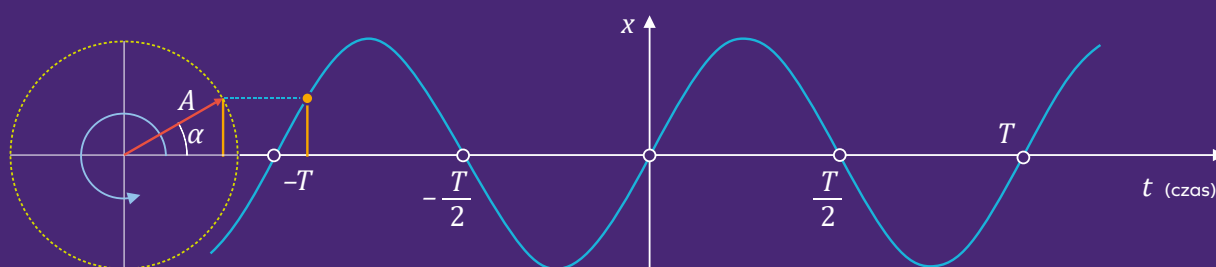
### Efekty kształcenia

- 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.



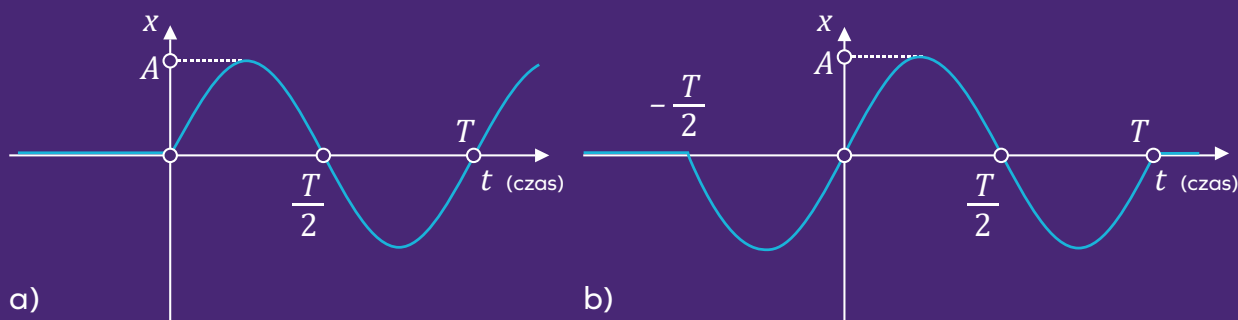
## 1. Fala harmoniczna nie przenosi informacji

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.

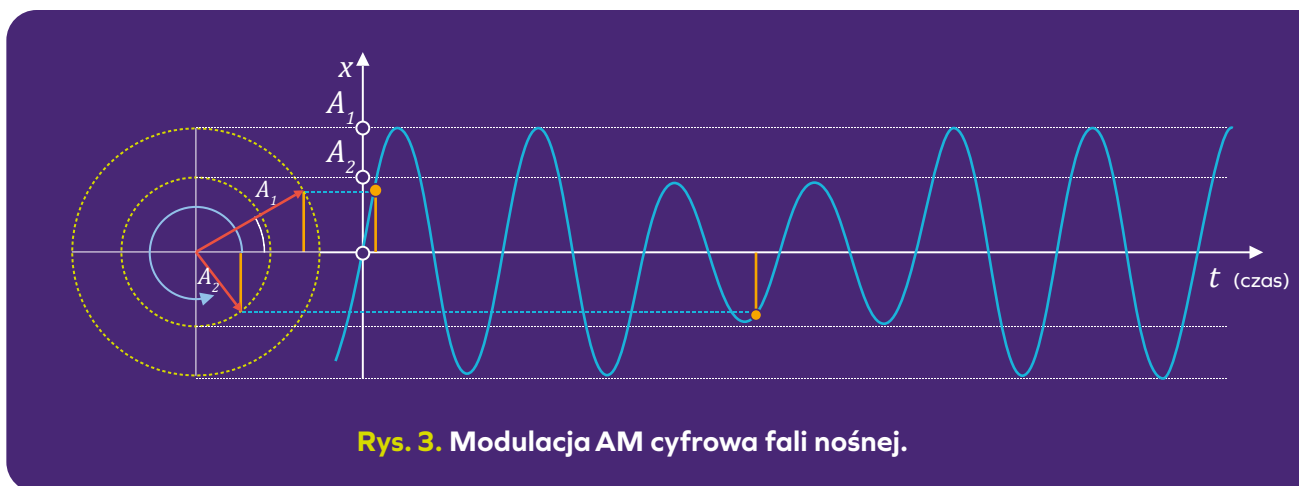
Mamy wtedy do czynienia z sytuacją, w której sygnał do pewnego momentu nie jest odbierany, a następnie dochodzi do drgań z określoną amplitudą, której wartość można dobrać dowolnie adekwatnie do zawartości informacyjnej sygnału.

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

Zmianie 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 przenoszącym informację jest jej amplituda. W skrócie ten rodzaj modulacji nazywany jest często **AM** (od nazwy angielskiej *amplitude modulation*).

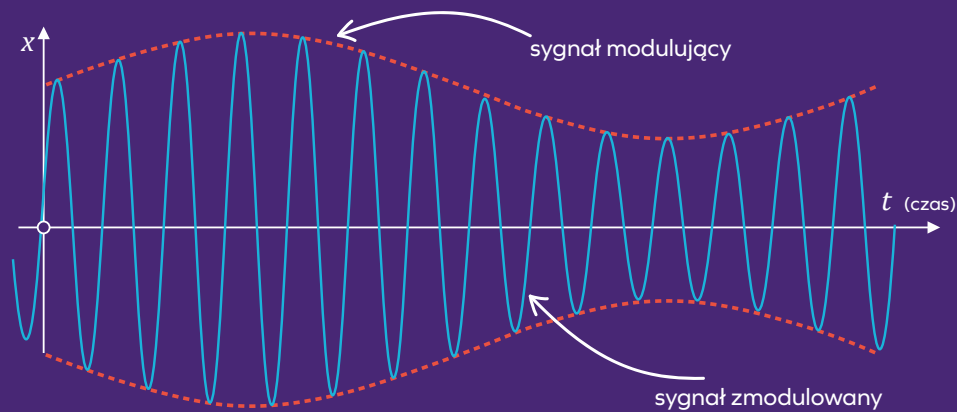


**Rys. 3.** Modulacja AM cyfrowa fali nośnej.

Przypatrzmy 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 przeskoczenie 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.

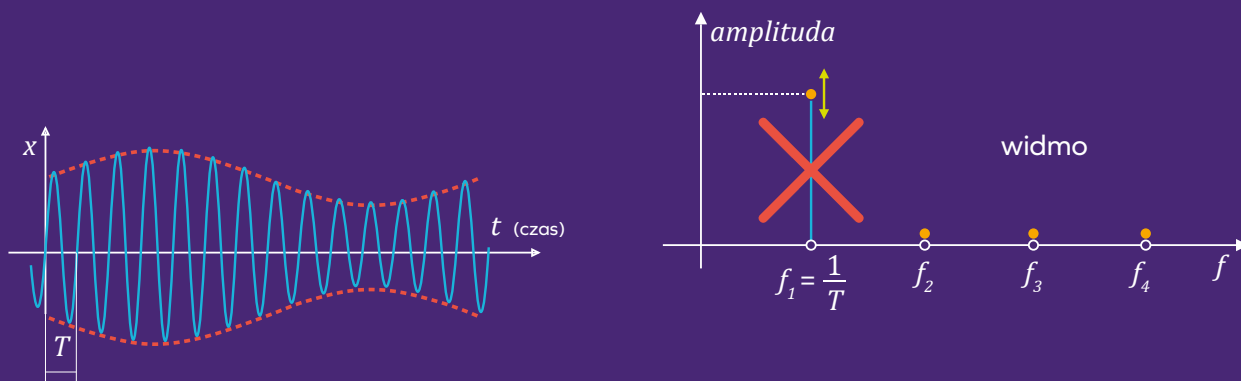


**Pytanie.** Jeżeli nadajesz komunikat alfabetem Morse'a przez włączanie i wyłączanie latarki, czy korzystasz z jakiegoś rodzaju modulacji?

### 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  $f_n = 1/T$ .

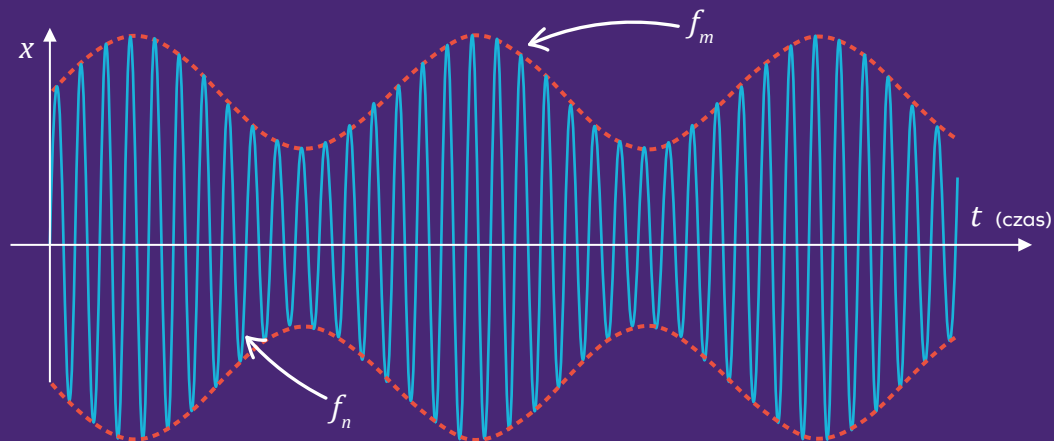
Na pierwszy rzut oka pytanie wydaje się bardzo łatwe. Skoro sygnał ma ustaloną częstotliwość, a zmienia się tylko jego amplituda, widmo powinno składać się z jednego prążka przy częstotliwości  $f_n$ , którego zmienna w czasie wysokość odzwierciedlałaby zmiany amplitudy sygnału (Rys. 5).



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

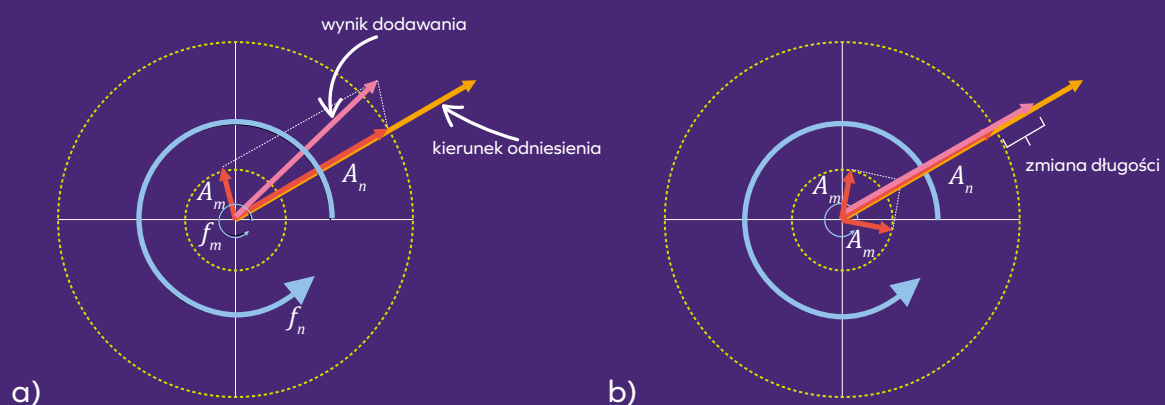
Jest to jednak wyobrażenie błędne. Poszczególne prążki widma sygnału opisują amplitudy sygnałów harmonicznycych składających się na dany sygnał. Fala harmoniczna ma ustaloną, tę samą amplitudę w każdej chwili czasowej (przypomnijmy sobie Rys. 1). Jeden prążek nie jest w stanie oddać czasowej zmienności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

Przeanalizujemy 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 harmonicznycych (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 oznaczymy 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?



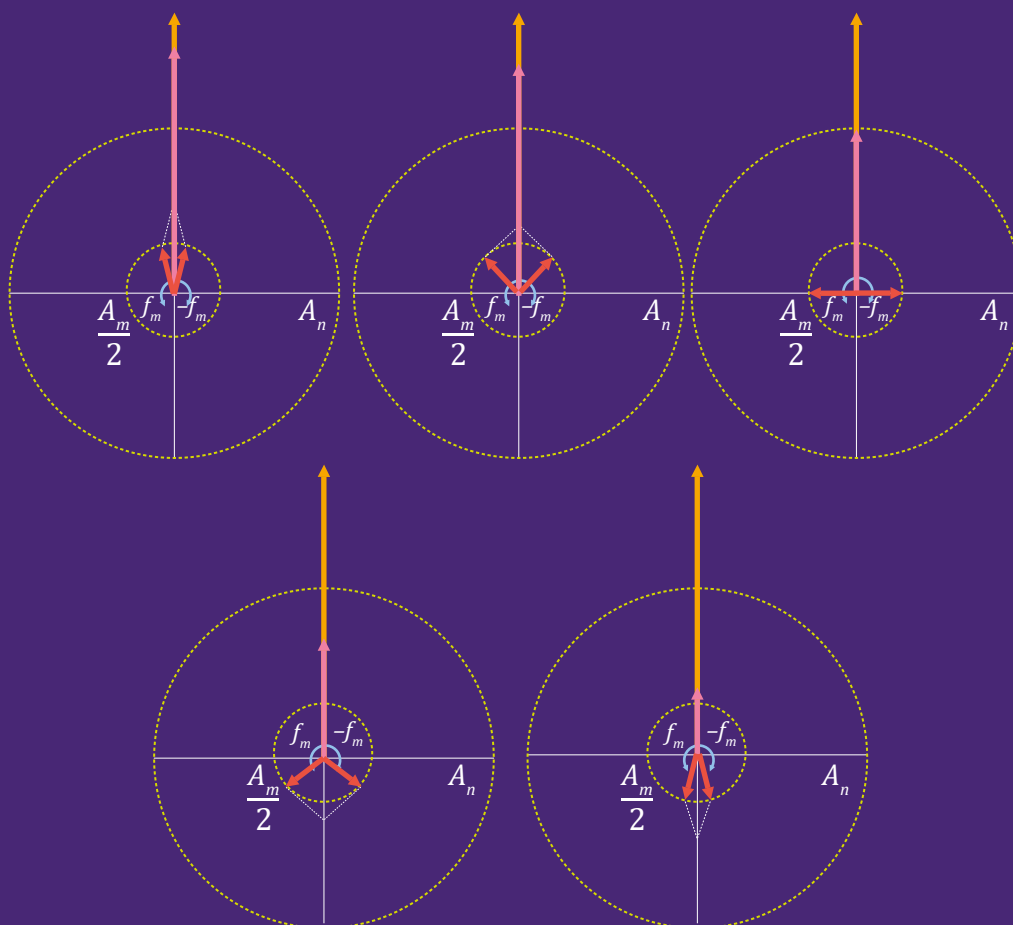
**Rys. 7.** Modyfikacja długości wektora sygnału nośnego: a) jeden wektor powoduje zmianę kierunku, b) dwa wektory zapewniają prawidłowy efekt.

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  $f_m$ .

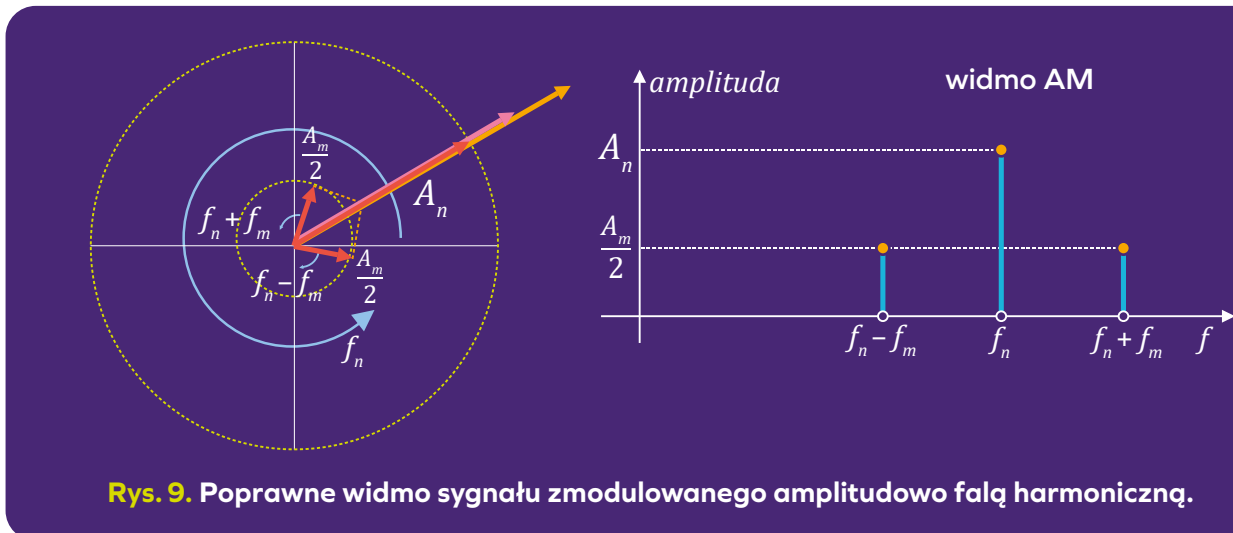


**Rys. 8.** Obraz modulacji AM w układzie odniesienia wektora sygnału nośnego przy dwóch wektorach reprezentujących sygnał modulujący.



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.

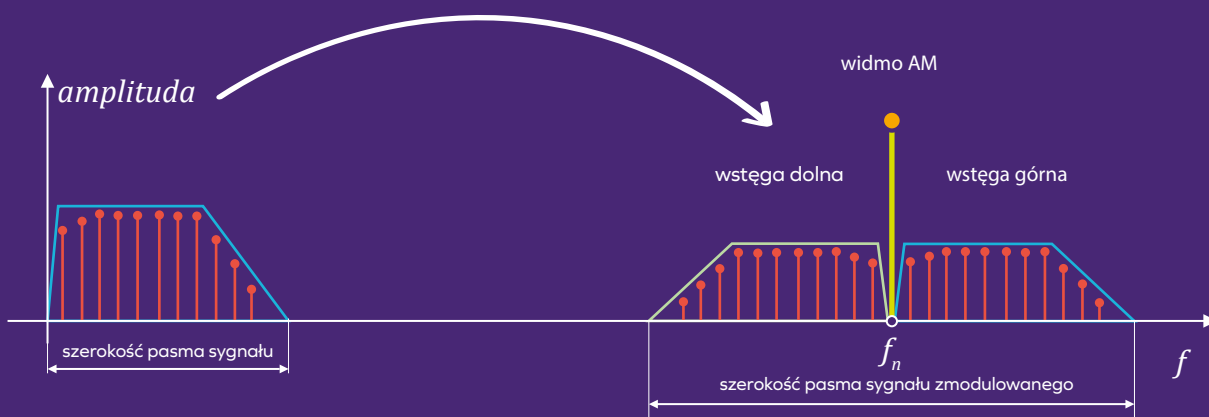
W zasadzie nie ma przeszkód, by przyjąć, że sygnał modulujący składa się z szerokiego zbioru harmonicznym obejmujących pewien zakres częstotliwości, czyli tzw. pasmo. Sygnał ten może reprezentować np. próbkę komunikatu głosowego, która jak wiemy z Lekcji 4, przedstawia dość skomplikowany obraz w dziedzinie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

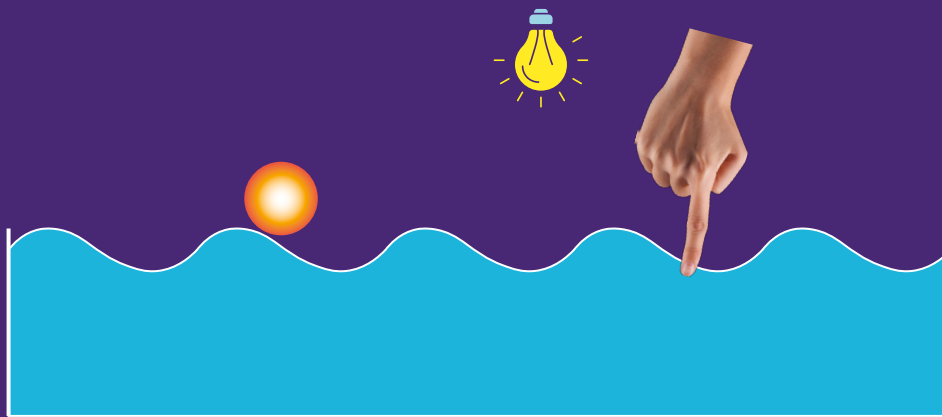
Przygotuj duży pojemnik z wodą, może być płytki, ważne tylko, by jego ściany były znacznie od siebie oddalone. W warunkach domowych może to być wanna z niewielką ilością wody. Zbiornik powinien być od góry oświetlony tak, by wyraźnie było widać na dnie zbiornika cień fal na powierzchni wody.

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 kolisto 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 przesać 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.

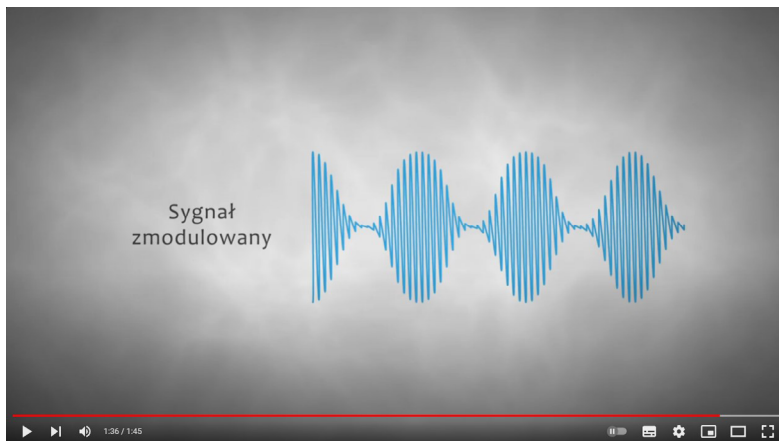
**Wstęga górna** - część widma sygnału zmodulowanego powyżej częstotliwości nośnej.

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



## Materiały zewnętrzne

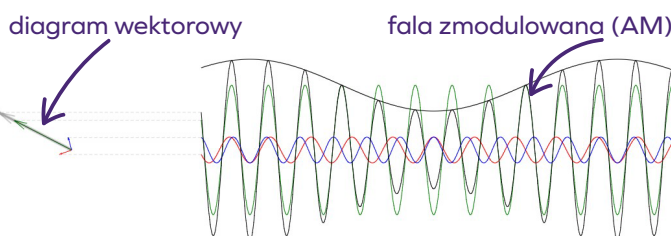
### 1. Modulacja fali elektromagnetycznej



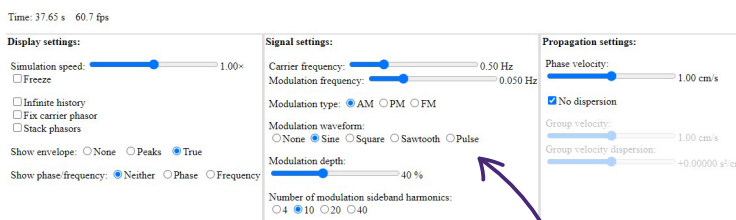
Zeskanuj QR kod



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



Zeskanuj QR kod



parametry fali nośnej i modulującej

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 harmonicznych 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.

