

**Technika Radia Programowalnego  
laboratorium –  
wprowadzenie teoretyczne**

# MODULACJE ANALOGOWE

## 1. Wstęp

Celem każdego systemu telekomunikacyjnego jest dostarczenie informacji ze źródła informacji do odbiorcy, przy czym źródło i odbiorca są fizycznie od siebie odseparowani. W tym celu w nadajniku dokonuje się przekształcenia sygnału informacyjnego do postaci dogodnej do transmisji przez kanał telekomunikacyjny (przewód miedziany, włókno światłowodowe, powietrze). Przekształcenia tego dokonuje się za pomocą procesu **modulacji**. Proces ten jest stosowany we wszelkich urządzeniach wymagających przesłania pewnej informacji na określoną odległość, a więc w nadajnikach radiowych i telewizyjnych, w łączności telefonicznej i satelitarnej, w urządzeniach telegraficznych, teledyktacji czy technice komputerowej.

**Sygnał** jest to czynnik będący nośnikiem wiadomości umożliwiający przesyłanie jej na określoną odległość albo jej rejestrację.

Sygnał może mieć postać umownego znaku (np. rysunku, liter) lub przebiegu wielkości fizycznej, którego co najmniej jeden parametr (amplituda, kształt) zależy od przesyłanej w nim wiadomości. Zakłada się przy tym, że przebieg wielkości fizycznej to zbiór następujących po sobie kolejno wartości tej samej wielkości fizycznej (np. napięcia elektrycznego, temperatury), a także funkcja określająca zależność tej wielkości od czasu.

W **sygnałach analogowych** wielkość niosąca informację zmienia swoją wartość w sposób ciągły i w dozwolonym przedziale zmian (np.  $U_{\min} - U_{\max}$ ) liczba jej wartości jest nieograniczona – sygnał jest reprezentowany z nieskończoną dokładnością, to jak go zmierzyć, jest już innym problemem.

**Sygnałem cyfrowym** nazywamy sygnał, którego wielkość (lub wielkości) niosąca informację może (mogą) przyjmować ściśle określoną i skończoną liczbę wartości. Liczba wartości wielkości niosącej informację w najprostszym przypadku może być ograniczona do dwóch i wówczas mamy do czynienia z sygnałem binarnym.

Z punktu widzenia systemów telekomunikacyjnych, w zależności od określonej cechy, dokonuje się następującej klasyfikacji sygnałów:

**Sygnały okresowe i nieokresowe**, w których da się wyodrębnić pewien stały przedział czasowy, w którym przebieg danego sygnału przyjmuje takie same wartości, oraz sygnały, dla których tej prawidłowości nie ma.

## **Sygnały deterministyczne i stochastyczne**

Sygnały **deterministyczne** to takie, dla których nie istnieje niepewność odnośnie ich wartości w określonej chwili czasu - w przeszłości, obecnie, ani w przyszłości. Natomiast w przypadku sygnałów **stochastycznych** istnieje pewien stopień niepewności co do ich wartości, zanim się pojawią.

**Sygnały o skończonej energii i skończonej mocy** czyli takie, w których całkowita energia lub średnia moc sygnału są większe od zera i mniejsze od nieskończoności. Z powyższego wynika, że sygnał o skończonej energii ma moc czynną równą zeru, a sygnał o skończonej mocy ma nieskończoną energię.

**Modulacja** to proces polegający na zmienianiu jednego z parametrów fali nośnej zgodnie ze zmianami sygnału informacyjnego. Sygnał informacyjny jest rozumiany jako różnowartościowa funkcja czasu wytwarzana przez źródło informacji, którym może być mowa ludzka, lub dane cyfrowe pochodzące np. z komputera. Określając bardziej obrazowo, modulacja stanowi przeniesienie sygnału informacyjnego do zakresu częstotliwości o kilka rzędów wielkości wyższego od tego sygnału i w związku z tym bardziej dogodnego do transmisji.

W wyniku modulacji powstaje **sygnał zmodulowany**, który zawiera w sobie pierwotny sygnał informacyjny, lecz ma inne parametry fizyczne (w szczególnym przypadku – elektryczne).

## Przyczyny stosowania modulacji:

1. Wzrost skuteczności przesyłania sygnałów oryginalnych, umożliwienie wydajnego wypromieniowania sygnału do ośrodka rozchodzenia się fal.
2. Zmniejszenie względnej szerokości pasma, którą definiujemy wzorem:

$$\frac{\Delta f}{f_{sr}} = 2 \frac{f_2 - f_1}{f_2 + f_1}$$

gdzie:  $\Delta f = f_2 - f_1$  - bezwzględna szerokość pasma,  $f_{sr} = (f_2 + f_1)/2$  – częstotliwość środkowa.

3. Wzrost sprawności transmisji
4. Uodpornienie sygnału na wpływ szumów i zakłóceń.
5. Umożliwienie wielokrotnego wykorzystania kanału częstotliwościowego.
6. Umożliwienie filtracji częstotliwościowej.
7. Dopasowanie widmowe sygnału do charakterystyki przenoszenia kanału,
8. Prostsze urządzenia nadawcze dla sygnałów wysokiej częstotliwości (w.cz.).

Wyróżniamy następujące rodzaje modulacji:

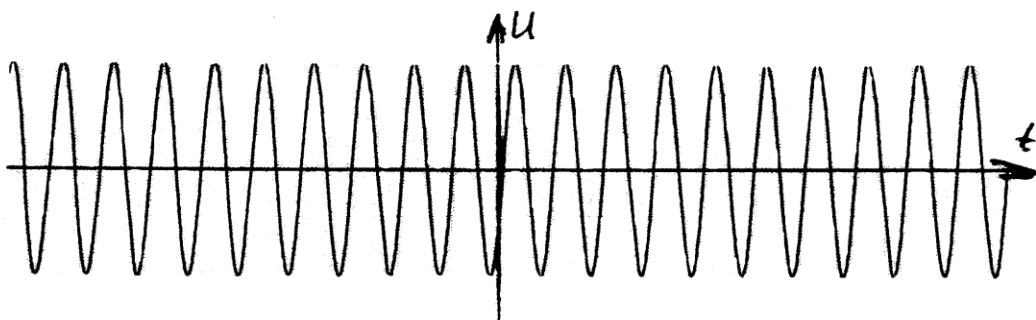
- wąskopasmowe - gdy szerokość widma sygnału zmodulowanego jest równa lub niewiele większa od szerokości widma sygnału oryginalnego,
- szerokopasmowe - gdy szerokość widma sygnału zmodulowanego jest wielokrotnie większa od szerokości widma sygnału oryginalnego.



## **2. Modulacja amplitudy**

Modulacja amplitudy (*ang. Amplitude Modulation*) jest najstarszym i najprostszym sposobem modulacji. Stosowana jest ona w systemach radiokomunikacji ruchomej i radiofonii pracujących w zakresie fal długich (30 – 300 kHz), średnich (300 – 3000 kHz) i krótkich (3 – 30 MHz).

Modulacja amplitudy polega na nakładaniu sygnału modulującego  $f_m$  na częstotliwość nośną  $f_0$  (rys 2) w ten sposób, że w takt zmian napięcia sygnału modulującego zmianie ulega wartość amplitudy sygnału modulowanego, przy czym  $f_0 \gg f_m$ .



Rys. 2 Przebieg czasowy sinusoidalnej fali nośnej  
Sygnał modulujący można określić zależnością :

$$m(t) = A_m \cos(2\pi f_m t)$$

gdzie:  $A_m$  – amplituda sygnału modulującego  $f_m$  – częstotliwość sygnału modulującego

*Podobnie może zostać zapisany sygnał nośny:*

$$c(t) = A_0 \cos(2\pi f_0 t)$$

gdzie:  $A_0$  – amplituda sygnału nośnego,  $f_0$  – częstotliwość sygnału nośnego ( $f_0 \gg f_m$ )

W wyniku nakładania sygnału modulującego na sygnał nośny powstaje sygnał zmodulowany w postaci:

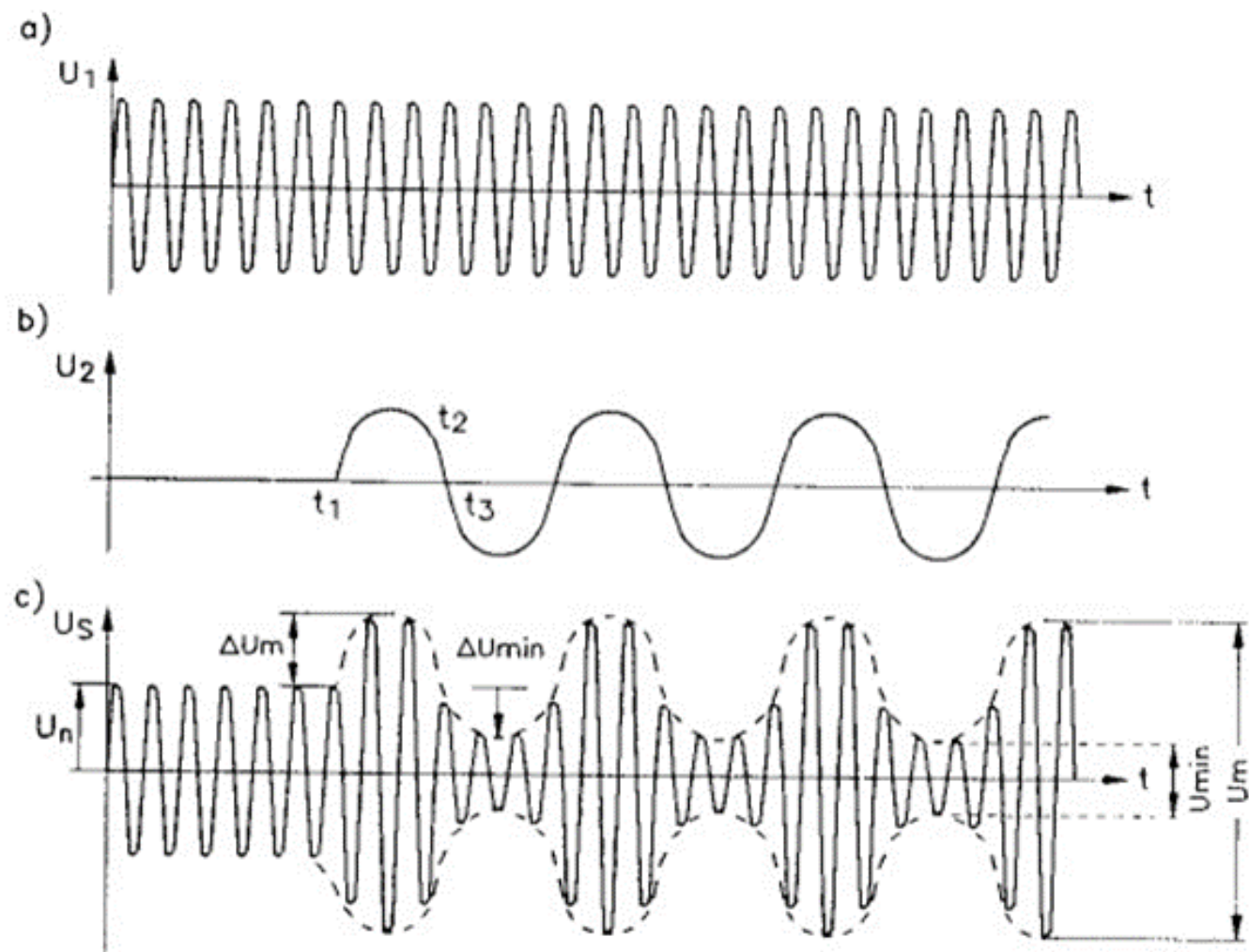
$$s(t) = A_0[1 + k_a m(t)] \cos(2\pi f_0 t),$$

który można też zapisać w postaci:

$$s(t) = A_0 \cos \omega_0 t + A_1 f(t) \cos \omega_0 t$$

Pierwszy składnik reprezentuje falę nośną, natomiast drugi – wstęgi boczne.

Na rys. 3 został przedstawiony przebieg czasowy fali nośnej, sygnału informacyjnego i zmodulowanej fali nośnej.



Rys. 3. Modulacja amplitudy

Podstawowym parametrem charakteryzującym modulację amplitudy jest współczynnik głębokości modulacji.

**Współczynnik głębokości modulacji  $\mu$**  wyraża stosunek zmian amplitudy przebiegu modulującego do amplitudy fali nośnej. Wartość tego współczynnika określa wzór:

$$\mu = \frac{A_m}{A_0} = k_a A_m$$

gdzie  $A_0$  – amplituda fali nośnej [V],  $A_m$  – amplituda sygnału modulującego [V],

$k_a$  – współczynnik proporcjonalności przyjmujący wartości z zakresu (0;1)

Współczynnik głębokości modulacji często wyrażany jest w procentach i wyliczany ze wzoru:

$$\mu = \frac{A_m - A_0}{A_0} \cdot 100\%$$

a uzyskana w ten sposób wielkość określana jest mianem ***sprawności modulacji***.

W zastosowaniach praktycznych, wykorzystuje się zazwyczaj wzór:

$$\mu = \frac{U_{max} - U_{min}}{U_{max} + U_{min}}$$

gdzie:  $U_{max}$  – maksymalna amplituda zmierzonego przebiegu [V]

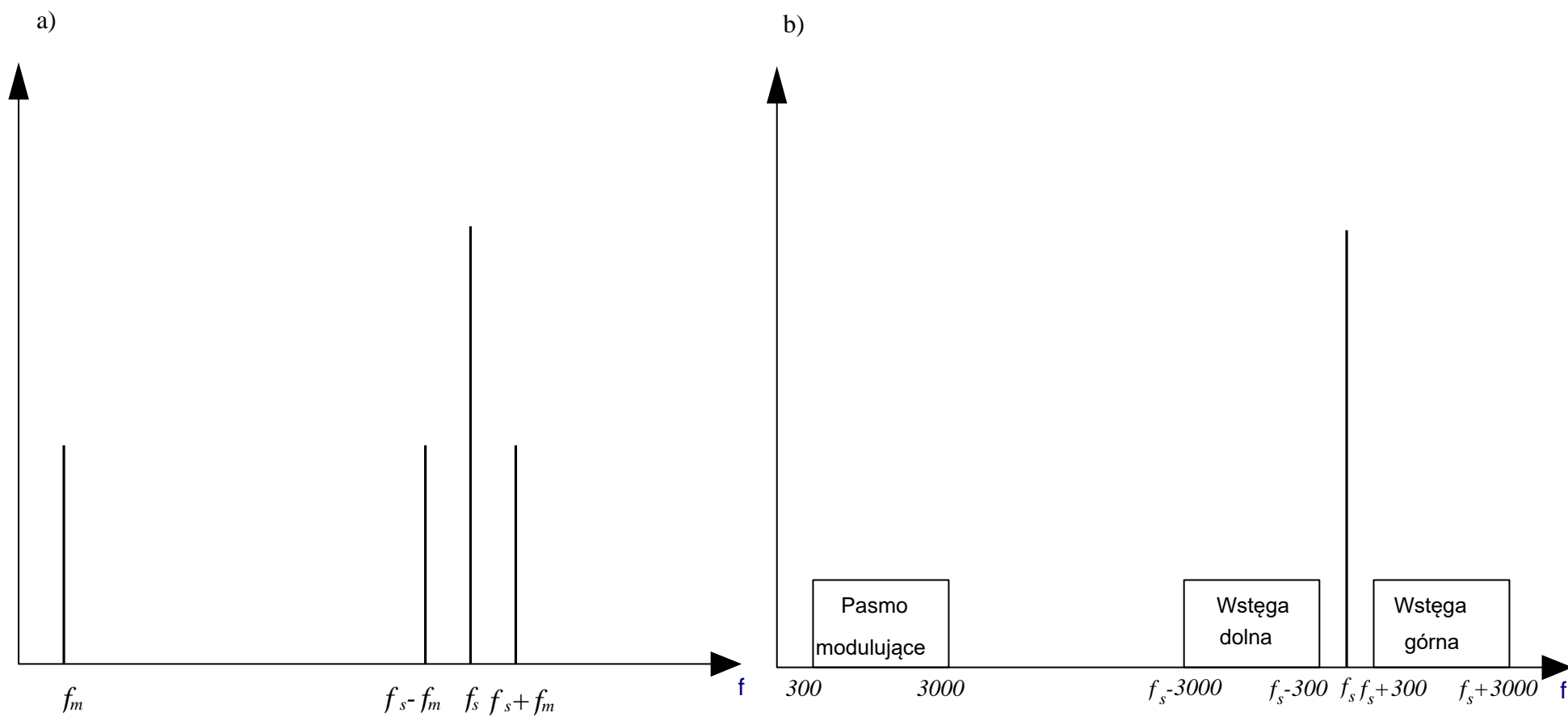
$U_{min}$  – minimalna amplituda zmierzonego przebiegu [V]

Współczynnik ten nie powinien przekraczać wartości 1 (100 %), w przeciwnym bowiem wypadku nastąpi przemodulowanie sygnału, co spowoduje zniekształcenie jego obwiedni i problemy z odtworzeniem z niego sygnału informacyjnego w procesie demodulacji. Z praktycznego punktu widzenia przyjmuje się, że wartość współczynnika głębokości modulacji powinna oscylować w granicach 80%, co zapewnia odpowiednią rezerwę na sygnały o większych chwilowych wartościach amplitudy.

Modulacja amplitudy, podobnie jak każda z modulacji analogowych, powoduje przeniesienie widma sygnału modulującego w pobliże sygnału nośnego, gdzie dla modulacji AM powstają dwie wstęgi boczne (górna powyżej  $f_0$  i dolna poniżej  $f_0$ ) będące swoimi zwierciadlanymi odbiciami względem osi symetrii tworzonej przez częstotliwość nośną. Każda ze wstęg bocznych zawiera pełną informację o sygnale modulującym, może więc on zostać odtworzony na podstawie tylko jednej z nich.

W procesie modulacji amplitudy pojedynczym sygnałem  $f_m$  wokół częstotliwości nośnej  $f_0$  powstają dwa dodatkowe prążki o tych samych amplitudach i częstotliwościach  $f_0 - f_m$  oraz  $f_0 + f_m$ . W systemach radiokomunikacji ruchomej sygnałem modulującym jest zazwyczaj ludzka mowa czyli sygnał akustyczny o określonym paśmie. W przypadku systemów radiowych przyjmuje się, że to pasmo tworzy przedział  $<300, 3000 \text{ Hz}>$ . W związku z powyższym, w rzeczywistych systemach, wokół częstotliwości nośnej powstają dwie odpowiednie wstęgi boczne. Ilustrację powyższego stanowi rys.4





Rys. 4. Widmo sygnału z modulacją amplitudy

Jak można zaobserwować na rysunku 4.b zmodulowany przebieg AM, w związku z występowaniem wstęg górnej i dolnej, zajmuje dwukrotnie większe pasmo niż sam sygnał modulujący. Dokładniej rzecz ujmując, pasmo sygnału AM jest dwukrotnie większe od maksymalnej wartości częstotliwości sygnału informacyjnego. A zatem, uwzględniając szerokość pasma rozmównego określoną wcześniej, oznacza to, że na transmisję pełnego sygnału AM potrzeba pasma o szerokości co najmniej 6 kHz. W praktyce, w rzeczywistych systemach radiokomunikacyjnych, odstęp międzykanałowy wynosi nie mniej niż 10 kHz, co pozwala uniknąć wzajemnych zakłóceń między sąsiednimi kanałami.

Całkowita moc nadajnika AM wypromieniowana przez antenę składa się z mocy fali nośnej oraz mocy dwóch wstęg bocznych.

Stosunek mocy wstęg bocznych ( $P_{2b}$ ) do mocy fali nośnej ( $P_o$ ) wyrażany jest wzorem:

$$\frac{P_{2b}}{P_o} = \frac{\mu^2}{2}$$

Z powyższego wzoru wynika, że moc użyteczna obu wstęg bocznych wynosi co najwyżej 1/2 mocy wypromieniowanej (osiągnię maksimum, gdy  $m = 1$ ). Wówczas nośna stanowi 1/2 mocy wypromieniowanej.

Z punktu widzenia wydatku energetycznego transmisja takiego sygnału jest nieefektywna. Każda wstęga boczna zawiera pełną informację o sygnale modulującym, stąd może zostać on odtworzony na podstawie tylko jednej z nich. Wykorzystując tę obserwację powstały modulacje amplitudy eliminujące nadmierne zapotrzebowanie na energię, takie jak modulacja amplitudy z wytłumioną falą nośną DSB czy modulacja jednowstęgowa SSB.

Jako zalety modulacji AM można wymienić prostotę układową i wąskie pasmo zajmowanych częstotliwości. Podstawowymi wadami tej modulacji będą: niska sprawność i podatność na zakłócenia.

Oprócz pełnej modulacji AM, wyróżnia się następujące jej odmiany:

- **AM-SC (DSB, DSB-SC)** (ang. *Amplitude Modulation Suppressed Carrier, Double Side Band*) – dwuwstęgowa modulacja amplitudy z wytłumioną falą nośną,
- **VSB** (ang. *Vestigial Sideband*) – modulacja amplitudy z częściowo tłumioną wstęgą boczną (C3F),
- **SSB-FC** (ang. *Single Side Band Full Carrier*) – jednowstęgowa modulacja amplitudy z falą nośną (H3E),
- **SSB-RC** (ang. *Single Side Band Reduced Carrier*) – jednowstęgowa modulacja amplitudy z częściowo wytłumioną falą nośną (R3E),

- **SSB-SC** (ang. *Single Side Band Suppressed Carrier*) – jednowstęgowa modulacja amplitudy z wytłumioną falą nośną (min. 45 dB) – oznaczana często jako SSB (J3E).

Ostatnia z wymienionych modulacji jest najefektywniejsza pod względem energetycznym, gdyż do przesłania informacji zmodulowanej SSB-SC wystarczy tylko 25% mocy potrzebnej do przesłania tego samego sygnału zmodulowanego "pełną" modulacją amplitudy i zajmuje węższe pasmo, jest jednak najtrudniejsza do realizacji praktycznej. Modulacja SSB stosowana jest w krótkofalarstwie.

### 3. Modulacja częstotliwości.

Modulacja FM (*Frequency Modulation*) czyli modulacja częstotliwości jest postacią modulacji kąta, przy której częstotliwość chwilowa  $f_i(t)$  sygnału nośnego zmienia się liniowo wraz z sygnałem informacyjnym zgodnie z zależnością (3), natomiast amplituda pozostaje bez zmian:

$$f_i(t) = f_s + k_f m(t)$$

gdzie:  $f_s$  – częstotliwość modulowanej fali nośnej [Hz],  $k_f$  – czułość częstotliwościowa modulatora (indeks modulacji) [Hz/V],  $m(t)$  – sygnał informacyjny [V],  $t$  – czas [s]  
przy czym zaznaczyć należy, że sygnał informacyjny (modulujący) jest postaci:

$$m(t) = A_m \cos(2\pi f_m t)$$

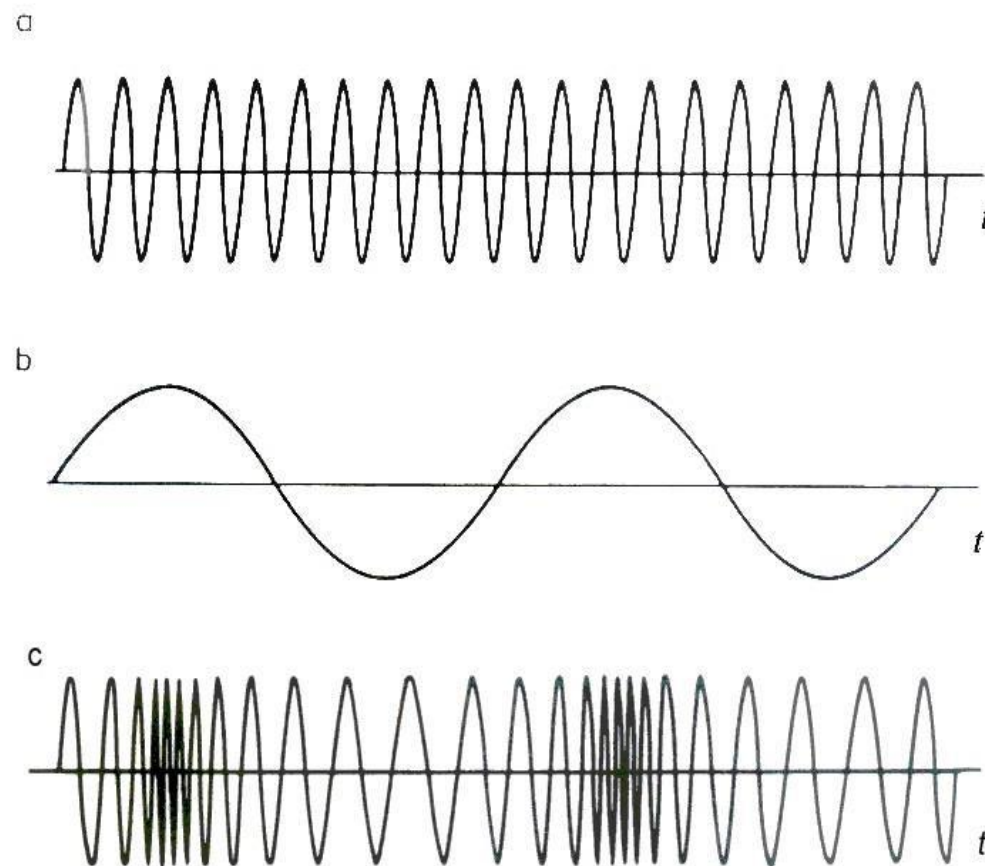
gdzie:  $A_m$  – amplituda sygnału modulującego [V]  $f_m$  – częstotliwość sygnału modulującego [Hz]

W efekcie nakładania sygnału informacyjnego na sygnał nośny powstaje zmodulowany przebieg FM wyrażany równaniem:

$$s(t) = A_0 \cos \left[ 2\pi f_s t + 2\pi k_f \int_0^t m(t) dt \right] = A_0 \cos [2\pi f_s t + \beta \sin(2\pi f_m t)]$$

gdzie:  $A_0$  – amplituda fali nośnej [V],  $\beta$  - wskaźnik modulacji [rad]

Przykładowy przebieg sygnału FM w powiązaniu z przebiegiem nośnym i sygnałem informacyjnym przedstawia rysunek 5.



*Rys. 5 Sygnał FM uzyskiwany przy modulacji pojedynczym tonem*

*a) fala nośna, b) sinusoidalny sygnał modulujący, c) sygnał zmodulowany częstotliwościowo*



Rysunek 5 przedstawia przypadek najprostszy tzn. sygnał zmodulowany jednym tonem sinusoidalnym, natomiast w rzeczywistych systemach radiokomunikacyjnych sygnałem modulującym jest zazwyczaj pasmo rozmówne, czyli zakres częstotliwości  $<300; 3000 \text{ Hz}>$ .

Modulację częstotliwości charakteryzują dwa parametry:

- **dewiacja częstotliwości** będąca maksymalnym odchyleniem częstotliwości chwilowej  $f_i(t)$  sygnału FM od częstotliwości nośnej  $f_s$  wyrażona wzorem:

$$\Delta f = k_f A_m,$$

Dewiacja jest to więc różnica między najniższą i najwyższą częstotliwością fali nośnej w trakcie modulacji, a sygnał zmodulowany częstotliwościowo zmienia się w zakresie  $<f_s - \Delta f; f_s + \Delta f>$

- **wskaźnik modulacji** stanowiący stosunek dewiacji częstotliwości  $\Delta f$  do częstotliwości modulującej  $f_m$

$$\beta = \frac{\Delta f}{f_m}$$

Ze wzoru na dewiację częstotliwości wynika, że dewiacja częstotliwości jest proporcjonalna do amplitudy sygnału modulującego i nie zależy w żaden sposób od jego częstotliwości. Przyjęcie dużej, w stosunku do maksymalnej częstotliwości modulującej, wartości tego parametru (czyli co za tym idzie także dużego wskaźnika modulacji) pozwala na ograniczenie zakłóceń częstotliwościowych pojawiających się podczas transmisji przez kanał radiowy, gdyż zarówno zakłócenia atmosferyczne, jak i radiowe wpływają głównie na amplitudę sygnału wielkiej częstotliwości, a nie na jego częstotliwość.

Okupione jest to jednak wzrostem zajętości pasma sygnału FM.

W zależności od wartości wskaźnika modulacji  $\beta$ , wyróżnia się dwa rodzaje modulacji FM:

- wąskopasmową, gdy  $\beta$  jest mniejszy lub równy 1 [rad],
- szerokopasmową, gdy  $\beta > 1$  [rad]

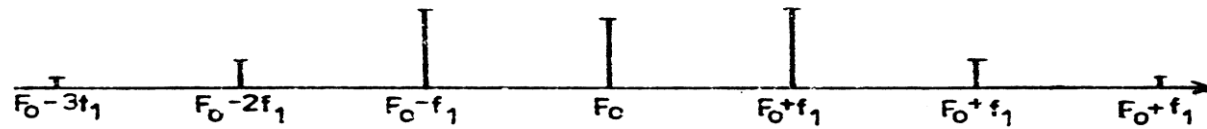
Dla dużych wartości wskaźnika modulacji  $\beta$  szerokość pasma transmisyjnego zbliża się do pełnego zakresu zmian częstotliwości  $2\Delta f$ , pozostając nieznacznie od niego większa.

Z drugiej strony dla małych wartości wskaźnika modulacji  $\beta$ , widmo sygnału FM ogranicza się efektywnie do częstotliwości nośnej  $f_s$  i jednej pary częstotliwości bocznych  $f_s \pm f_m$ , tak, że szerokość pasma jest bliska  $2f_m$ . Do oszacowania szerokości pasma  $B$  zajmowanego przez sygnał FM zmodulowany pojedynczym tonem sinusoidalnym  $f_m$  służy empiryczna Reguła Carsona, wyrażona wzorem:

$$B = 2 (\Delta f_{max} + f_{mmax})$$

Z powyższego wynika, że w przypadku modulacji wąskopasmowej o paśmie emisji decyduje wartość częstotliwości przebiegu modulującego, natomiast w przypadku modulacji szerokopasmowej  $\beta \gg 1$  pasmo emisji jest w przybliżeniu równe zakresowi zmian częstotliwości chwilowej (a więc podwojonej dewiacji)

Ze wzoru na przebieg sygnału zmodulowanego wynika, że zmodulowany częstotliwościowo sygnał  $s(t)$  jest nieliniową funkcją modulującego sygnału  $m(t)$ , mimo że częstotliwość chwilowa zmienia się liniowo wraz z sygnałem modulującym. Oznacza to, że modulacja częstotliwości jest procesem nieliniowym. Powoduje to, że widmo sygnału FM nie jest w prosty sposób związane z widmem sygnału modulującego. Przebieg zmodulowany częstotliwościowo składa się z częstotliwości nośnej i wstęg bocznych, złożonych z symetrycznych prążków przyległych do częstotliwości nośnej i powtarzających się, w odstępach równych częstotliwości modulującej.



*Rys. 6 Widmo sygnału zmodulowanego FM*

Amplituda i liczba występujących par prążków, a więc i szerokość zajmowanego pasma zależy od wartości wskaźnika modulacji, a więc zmienia się w zależności od wartości dewiacji lub częstotliwości modulującej.

Ważną cechą sygnału FM jest jego stała obwiednia, równa amplitudzie fali nośnej, gdyż jedną z pożądanych cech modulacji stosowanych w radiokomunikacji ruchomej jest stałość obwiedni sygnału zmodulowanego, wynikająca z konieczności wykorzystywania całej charakterystyki wzmacniacza mocy, również w jej nieliniowym zakresie.

Zalety modulacji częstotliwości:

- stała moc przebiegu zmodulowanego, niezależna od wskaźnika modulacji.
- mniejsza podatność na zakłócenia atmosferyczne.

Wady modulacji FM:

- mniejszy zasięg niż AM,
- zajmowanie szerszego pasma,
- konieczność stosowania bardziej skomplikowanych układów elektrycznych.

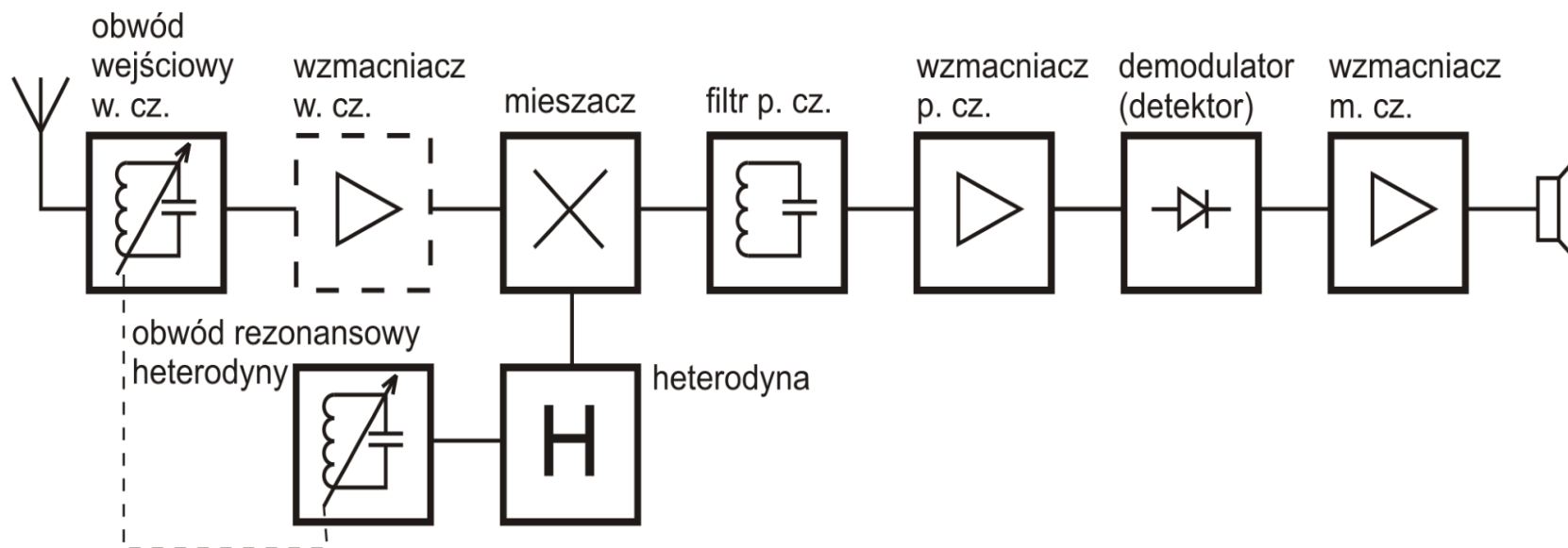
Modulacja częstotliwości stosowana jest najczęściej w systemach radiokomunikacji ruchomej i radiofonii pracujących w zakresie fal ultrakrótkich (30 – 300 MHz), które wymagają wysokiej jakości przekazywanej informacji i odporności na zakłócenia.

#### 4. Odbiorniki superheterodynowe

Odbiornik superheterodynowy (z przemianą częstotliwości) został wynaleziony w 1918r. Jego cechą charakterystyczną jest zastosowanie przemiany częstotliwości odbieranego sygnału z częstotliwości wejściowej (wysokiej) na częstotliwość pośrednią różną od częstotliwości wejściowej. Na częstotliwości pośredniej sygnał jest filtrowany i wzmacniany a następnie poddawany demodulacji. Przemiana częstotliwości odbywa się za pomocą mieszacza, do którego doprowadzony jest sygnał z generatora lokalnego (heterodyny). Jeśli do wejścia mieszacza doprowadzony jest sygnał wejściowy o częstotliwości  $f_{we}$  a sygnał heterodyny ma częstotliwość  $f_h$  to w wyniku mieszania otrzymuje się sygnały na częstotliwościach:

$$f_{wy1} = f_{we} + f_h \quad (\text{sumacyjny}) \quad f_{wy2} = |f_{we} - f_h| \quad (\text{różnicowy})$$

jeden z tych sygnałów (zwykle różnicowy) jest użytecznym sygnałem na częstotliwości pośredniej.



Rys. 7: Schemat blokowy odbiornika superheterodynowego

Częstotliwość heterodyny w odbiorniku zazwyczaj dobiera się tak, aby częstotliwość pośrednia była stała. Dzięki temu tor częstotliwości pośredniej nie wymaga przestrajanania i można zastosować w nim filtry pasmowoprzepustowe przenoszące tylko tą częstotliwość. Filtry nieprzestrane mają znacznie lepsze parametry i dzięki temu selektywność odbiorników superheterodynowych jest znacznie lepsza niż odbiorników bezpośredniego wzmocnienia.



Ponadto istnieje pewna swoboda wyboru częstotliwości pośredniej, może ona być tak dobrana, aby łatwo było zrealizować filtr o żądanej szerokości pasma. W wielu przypadkach jest to częstotliwość znacznie mniejsza od odbieranej częstotliwości wejściowej.

W odbiornikach superheterodynowych łatwiej jest też uzyskać dużą czułość bez obawy o wzbudzenie. Niezbędne do uzyskania wysokiej czułości duże wzmocnienie całkowite jest tu rozłożone na trzy częstotliwości, wejściową, pośrednią i niską. Na każdej z tych częstotliwości wzmocnienie nie jest na tyle duże aby pasożytnicze sprzężenia popsuli stabilność.

Ponieważ praktycznie cała selektywność odbiornika i znaczna część wzmocnienia zależą od parametrów toru pośredniej częstotliwości to parametry całego odbiornika znacznie mniej zależą od częstotliwości niż w odbiornikach bezpośredniego wzmocnienia.

Obecnie większość analogowych odbiorników radiowych to odbiorniki superheterodynowe.

### **Wybór częstotliwości heterodyny**

Odbiór sygnału na częstotliwości  $f_{we}$  przez odbiornik o częstotliwości pośredniej  $f_{pcz}$  wymaga zastosowania heterodyny o częstotliwości:

$$f_{h1} = f_{we} + f_{pcz}$$

lub

$$f_{h2} = f_{we} - f_{pcz}$$

W wielu przypadkach można wybrać dowolną z tych możliwości, jednak w drugim przypadku (częstotliwość heterodyny mniejsza od częstotliwości odbieranej) może zdarzyć się sytuacja, w której częstotliwość heterodyny bądź jej harmoniczna będą równe częstotliwości wejściowej lub częstotliwości pośredniej. Powstaną wtedy słyszalne zakłócenia w postaci gwizdu.

Bezpieczniejszy jest więc wybór częstotliwości heterodyny powyżej częstotliwości sygnału odbieranego (i powyżej częstotliwości pośredniej). Dodatkowo w tym przypadku względny zakres przestrajanie heterodyny jest mniejszy niż względny zakres przestrajanie odbiornika:

$$\frac{f_{h \max}}{f_{h \min}} = \frac{f_{we \max}}{f_{we \min}}$$

Zaprojektowanie generatora heterodyny może więc być łatwiejsze. W przypadku użycia częstotliwości heterodyny mniejszej niż częstotliwość sygnału (np. łatwiej jest wytworzyć niższą częstotliwość), należy sprawdzić, czy jej sygnał nie spowoduje zakłóceń w odbiorze.

## Częstotliwości lustrzane

Dla ustalonej częstotliwości heterodyny określoną częstotliwość pośrednią uzyskuje się nie tylko dla wyliczonej wcześniej częstotliwości wejściowej ale także dla drugiej częstotliwości nazywanej częstotliwością lustrzaną. Jest ona położona symetrycznie do użytecznej częstotliwości wejściowej względem częstotliwości heterodyny. Jeśli:

$$f_{we} = f_h - f_{pcz}$$

to:

$$f_l = f_h + f_{pcz}$$

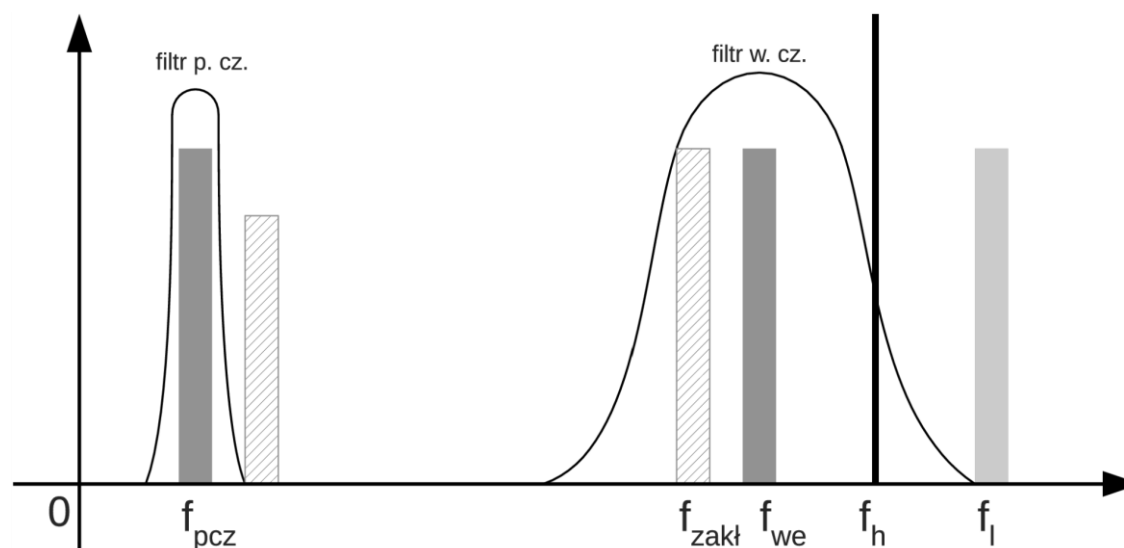
i odwrotnie – jeśli:

$$f_{we} = f_h + f_{pcz}$$

to:

$$f_l = f_h - f_{pcz}$$

Częstotliwość lustrzana jest zawsze oddalona od częstotliwości odbieranej o dwie częstotliwości pośrednie w tym samym kierunku co częstotliwość heterodyny. Równoczesny odbiór na dwóch częstotliwościach nie jest zjawiskiem pożądanym. Sygnał z częstotliwości lustrzanej może zakłócić odbiór sygnału właściwego i powinien zostać wytłumiony jeszcze przed przemianą. W torze częstotliwości pośredniej odróżnienie sygnałów właściwego i lustrzanego nie jest już możliwe.

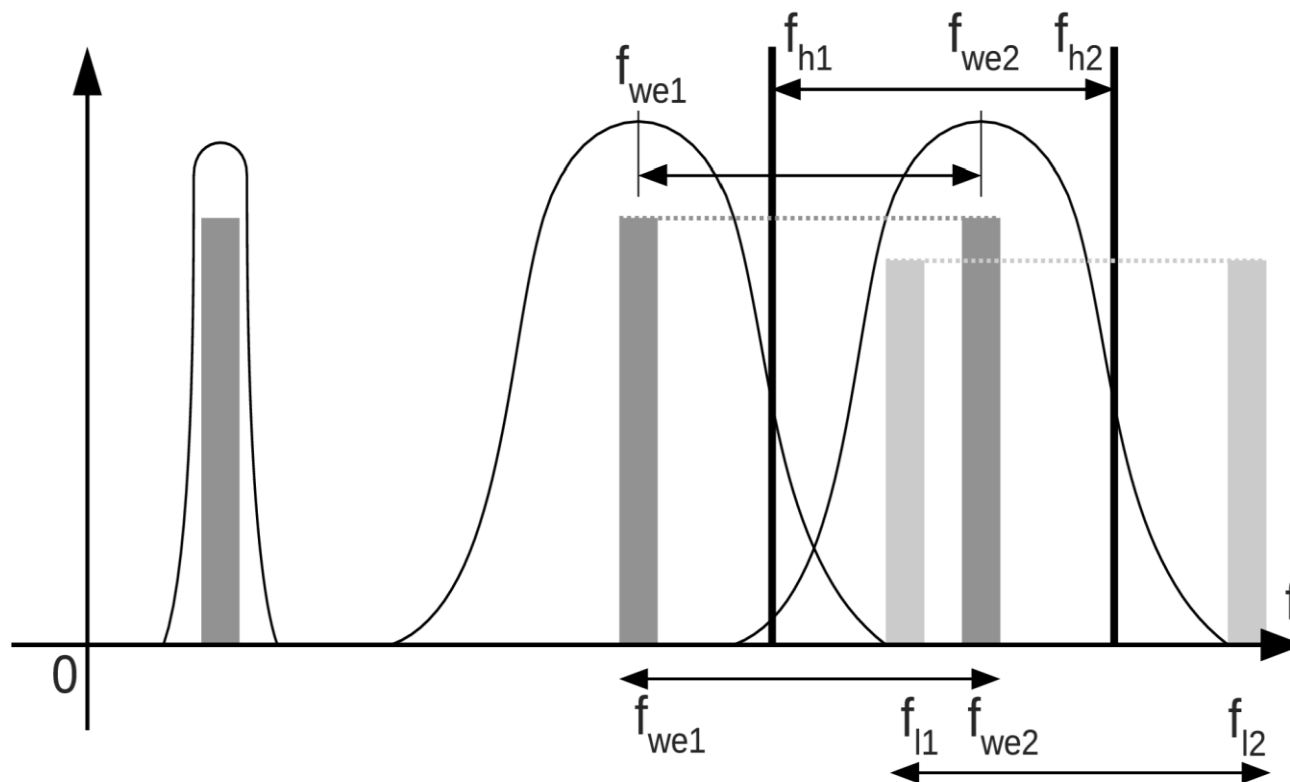


Rys. 8: Tłumienie sygnałów niepożądanych w odbiorniku superheterodynowym

Wytłumienie sygnału lustrzanego realizuje się za pomocą filtru pasmowoprzepustowego w torze wysokiej częstotliwości. Nie musi on być tak selektywny jak filtr w odbiorniku bezpośredniego wzmocnienia. Sygnały z sąsiednich kanałów ( $f_{zakł}$ ) przejdą przez taki filtr z niewielkim tłumieniem i zostaną wytłumione po przemianie w filtrze pośredniej częstotliwości.

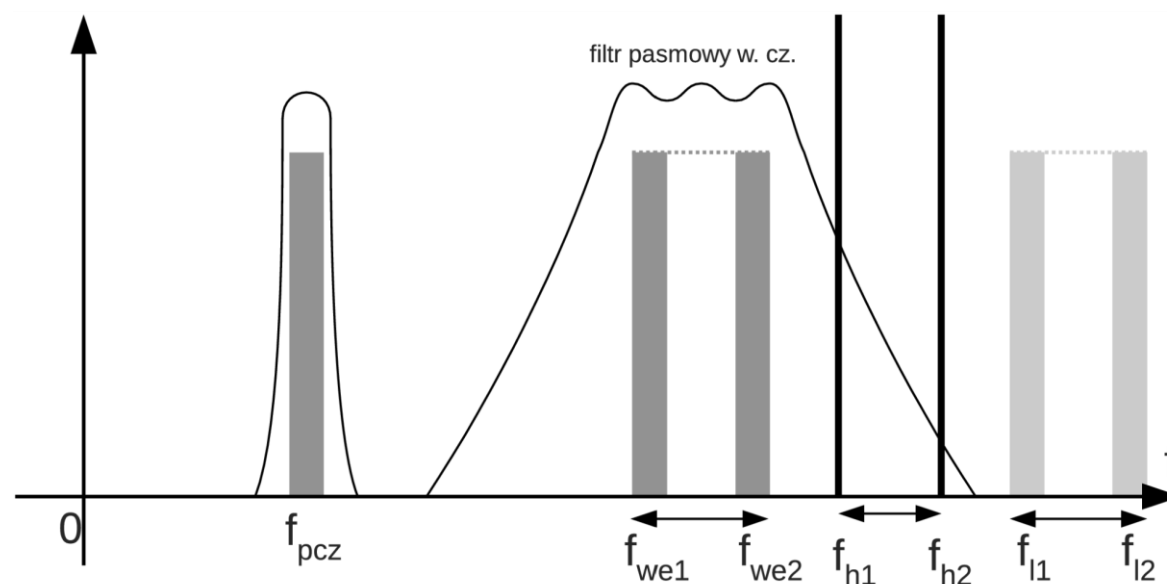
Jeśli częstotliwość pośrednia jest dostatecznie duża to taki filtr, zapewniający żądane tłumienie częstotliwości lustrzanej, będzie możliwy do realizacji przy stosunkowo niedużych kosztach.

W wielu przypadkach filtr wysokiej częstotliwości musi być przestrajany. Dzieje się tak wtedy gdy pasma częstotliwości wejściowych i częstotliwości lustrzanych częściowo się pokrywają (rys. 9) lub odstęp pomiędzy nimi jest niewielki.



Rys. 9: Tłumienie częstotliwości lustrzanych w odbiorniku z przestrajanymi filtrami wejściowymi

Jeśli zakres przestrajania jest znacznie mniejszy od częstotliwości pośredniej możliwe jest zastosowanie filtru wysokiej częstotliwości zestrojonego na stałe. Musi on mieć na tyle szerokie pasmo przenoszenia, aby objęło cały zakres częstotliwości wejściowych i zbocza dostatecznie strome aby wytłumić wszystkie częstotliwości z pasma częstotliwości lustrzanych.



Rys. 10: Tłumienie częstotliwości lustrzanych w odbiorniku z nieprzestrzajanymi filtrami wejściowymi



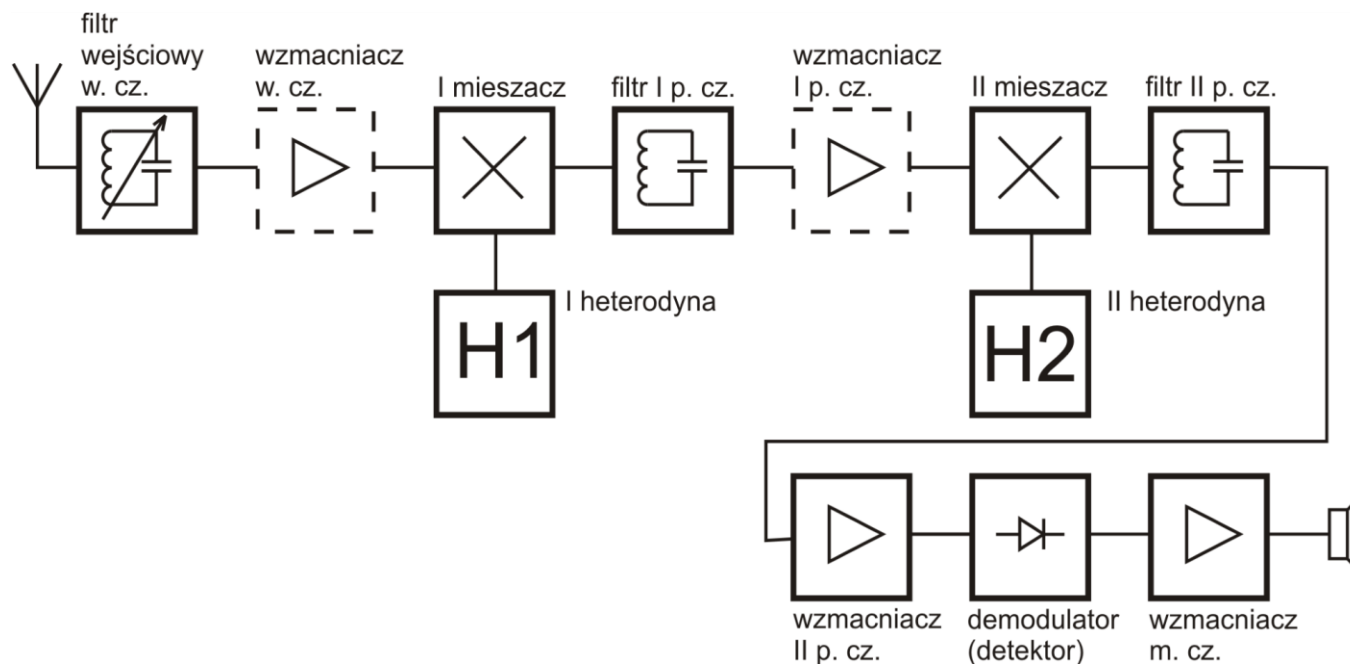
Podsumowując, przy doborze częstotliwości pośredniej należy dążyć do spełnienia następujących warunków:

- częstotliwość pośrednia musi znajdować się poza zakresem częstotliwości odbieranych;
- częstotliwość pośrednia powinna być taka, aby sygnał było łatwo filtrować, wzmacniać i demodulować, a więc nie powinna być zbyt wysoka;
- częstotliwość pośrednia powinna być dostatecznie wysoka, aby dało się uzyskać wymagane tłumienie częstotliwości lustrzanych.

Ponadto przy wyborze częstotliwości pośredniej decydująca może być dostępność odpowiednich filtrów. Są one często produkowane na pewne standardowe częstotliwości i szerokości pasma przenoszenia. Przykładowo w większości odbiorników radiofonicznych UKF FM stosuje się częstotliwość pośrednią 10,7MHz.

## **Odbiorniki z wielokrotną przemianą częstotliwości**

Przy wysokich wymaganiach spełnienie wszystkich powyższych warunków może okazać się niemożliwe. Przykładowo w typowym radiotelefonie FM demodulacja częstotliwości powinna odbywać się na częstotliwości pośredniej mniejszej od 1MHz podczas gdy zapewnienie właściwego tłumienia sygnałów o częstotliwości lustrzanej wymaga częstotliwości pośredniej większej niż 10MHz. Rozwiązaniem jest zastosowanie dwóch przemian częstotliwości. Można wtedy użyć wysokiej pierwszej częstotliwości pośredniej, zapewniającej dobre tłumienie sygnałów lustrzanych, a następnie przenieść sygnał na drugą, niższą, częstotliwość pośrednią, na której następuje ostateczna filtracja i demodulacja sygnału.



Rys. 11: Odbiornik z podwójną przemianą częstotliwości

W odbiorniku z podwójną przemianą odbierana częstotliwość zależy od częstotliwości obydwu heterodyn. W większości przypadków przestrajana jest tylko pierwsza heterodyna a druga ma stałą częstotliwość ale bywają też układy odbiorników, w których przestrajane są obie heterodyny (pierwsza zapewnia wtedy strojenie zgrubne a druga dokładne).

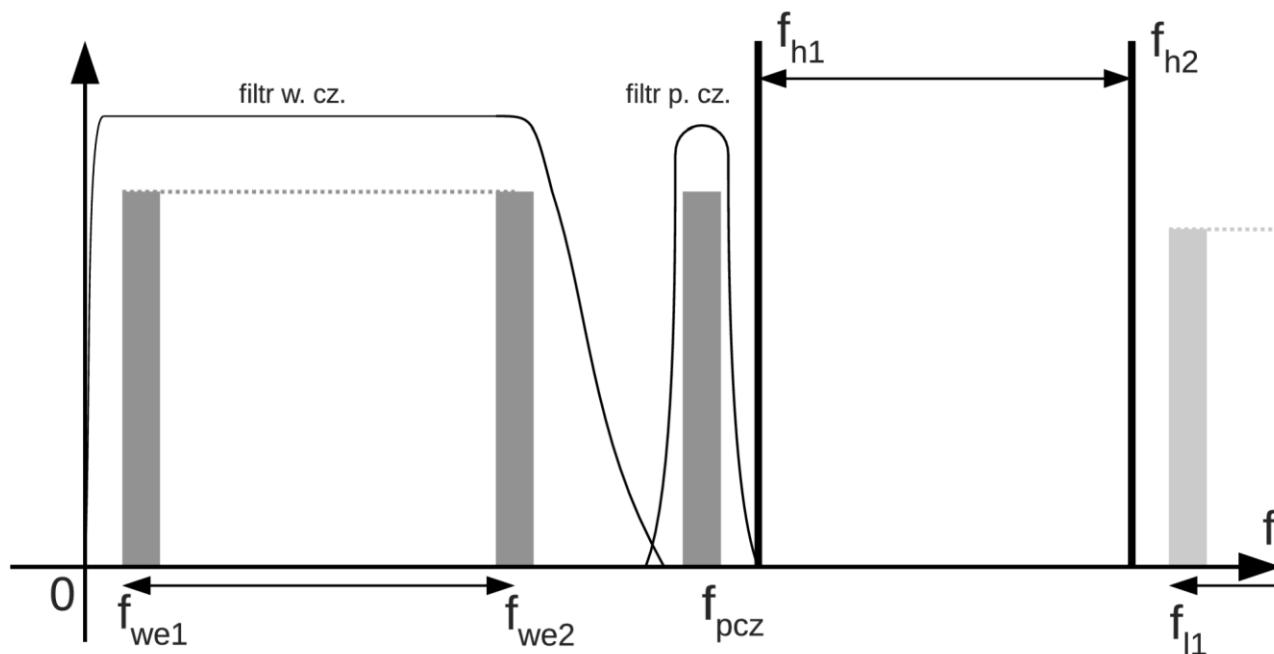
Na przykład w tunerach telewizji satelitarnej przestrajana jest tylko druga częstotliwość pośrednia. W takich przypadkach pierwsza częstotliwość pośrednia nie jest jednak stała ale zmienia się w pewnym zakresie.

Przy projektowaniu odbiornika z wielokrotną przemianą należy pamiętać o tym, że przy każdej przemianie występują częstotliwości lustrzane, które muszą być wytłumione najpóźniej w filtrze poprzedzającym dany stopień przemiany.

Konstruowane są też odbiorniki z potrójną a nawet poczwórną przemianą częstotliwości. Wzrasta jednak złożoność odbiornika i rośnie ilość sygnałów niepożądanych mogących zakłócić odbiór.

## **Odbiornik z wysoką częstotliwością pośrednią**

Pewne szczególne właściwości ma odbiornik, w którym częstotliwość pośrednia jest większa od największej częstotliwości wejściowej. W takim odbiorniku, jeśli częstotliwość heterodyny jest sumą częstotliwości wejściowej i częstotliwości pośredniej, można jako filtr wejściowy zastosować filtr dolnoprzepustowy (rys. 12). Filtr taki będzie tłumić wszystkie sygnały, które nie powinny przedostać się z anteny do dalszych stopni odbiornika (na częstotliwości pośredniej i częstotliwościach lustrzanych) bądź wydostać się z odbiornika na zewnątrz (sygnał heterodyny).

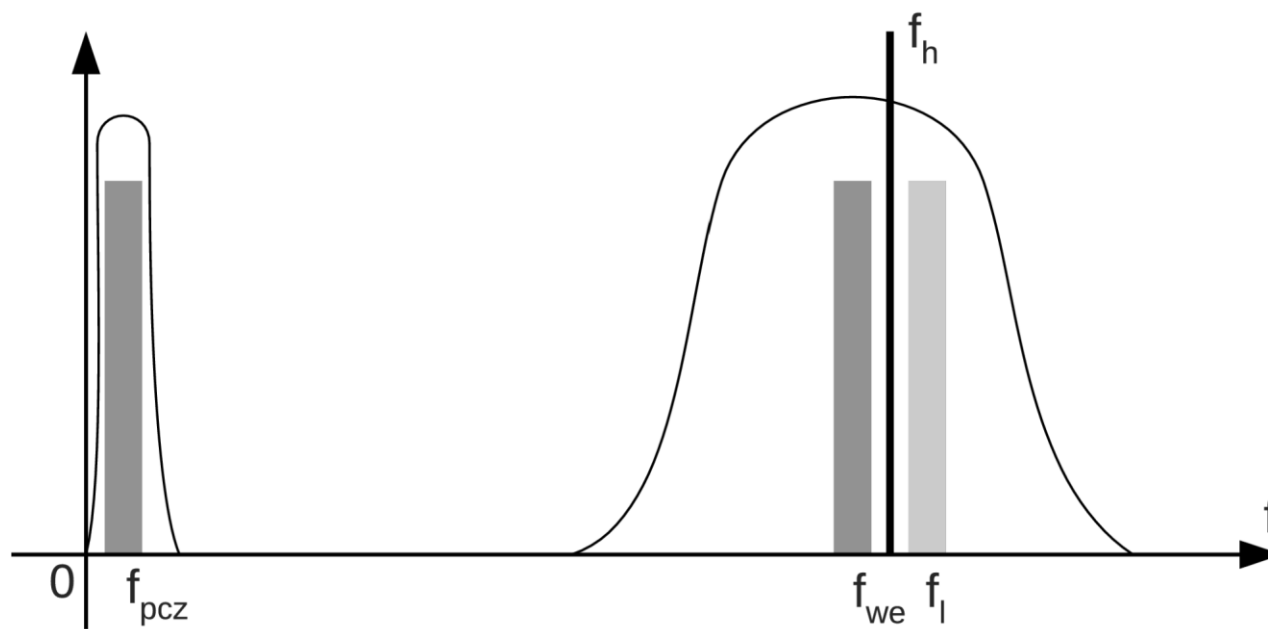


Rys. 12: Przemiana częstotliwości w odbiorniku z wysoką częstotliwością pośrednią

Taki układ konstrukcyjny jest często stosowany w odbiornikach radiokomunikacyjnych na zakres fal krótkich. Pracują one w zwykłe w zakresie 0,1 do 30MHz, obejmującym także fale długie i średnie. Pierwsza częstotliwość pośrednia w takich odbiornikach wynosi 45MHz lub więcej.

## Odbiornik z niską częstotliwością pośrednią

W pewnych rozwiązaniach odbiorników superheterodynowych świadomie rezygnuje się z tłumienia sygnałów o częstotliwości lustrzanej. Wtedy można zastosować bardzo niską częstotliwość pośrednią i obniżyć koszty filtru pośredniej częstotliwości.



Rys. 13: Odbiornik z niską częstotliwością pośrednią bez filtru p. cz.

Przykładem takiego rozwiązania może być odbiornik UKF FM zrealizowany w postaci układu scalonego, w którym zastosowana została częstotliwość pośrednia równa 70kHz a sygnał lustrzany występuje na częstotliwości większej tylko o 140 kHz. Najbliższy sygnał sąsiedniego kanału, który mógłby zakłócić odbiór może znaleźć się w odległości przynajmniej 300kHz od sygnału odbieranego i nie jest w stanie zakłócić odbioru. Dzięki niskiej częstotliwości pośredniej można było zastosować w torze p. cz. filtr aktywny, który wymaga dołączenia do układu scalonego jedynie kilku kondensatorów.