

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

Instytut Radioelektroniki
Zakład Radiokomunikacji

LABORATORIUM

SYSTEMY RADIOKOMUNIKACYJNE

Ćwiczenie R4

Badanie nadajnika radiotelefonu CB

Opracował: dr inż. Juliusz Modzelewski

Warszawa 2007

1. CEL I ZAKRES ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest zapoznanie studentów z właściwościami nadajnika radiotelefonu CB (Citizens' Band) wyższej klasy pracującego w paśmie obywatelskim 27MHz z modulacją AM, FM i SSB. W ramach ćwiczenia mierzone są charakterystyki modulacyjne nadajnika dla różnych rodzajów modulacji przy sinusoidalnym sygnale informacyjnym. Mierzona jest także moc wyjściowa i częstotliwość nośna w poszczególnych kanałach pasma C oraz moc w kanałach sąsiednich dla wybranego kanału z tego pasma.

2. WPROWADZENIE TEORETYCZNE

Nazwa *CB Radio*, będąca skrótem angielskiego terminu *Citizens' Band Radio*, oznacza system łączności radiowej dostępny dla każdego obywatela, który nie musi posiadać żadnych specjalnych kwalifikacji. W Polsce wymagana jest jedynie rejestracja posiadanego radiotelefonu w terenowych oddziałach Urzędu Komunikacji Elektronicznej. Dopuszczalne jest przy tym przemieszczanie się nadajnika bez żadnych dodatkowych zezwoleń. Korzystanie z kanałów łączności przeznaczonych dla *CB Radio* (pasmo obywatelskie 27MHz) jest bezpłatne ale kanały te są ogólnodostępne (czyli mogą być w danej chwili zajęte przez innych użytkowników, których rozmowa jest dostępna dla osób trzecich!).

System *CB Radio* jest analogowym systemem simpleksowym. Oznacza to, że radiotelefon systemu CB w danej chwili może pracować tylko albo jako nadajnik radiowy, albo - jako odbiornik. Nie jest więc przystosowany do wysyłania i odbierania informacji w tym samym czasie.

Zaletą systemu simpleksowego jest uproszczenie układu i obniżenie ceny radiotelefonów (liczne bloki są używane zarówno podczas nadawania jak i podczas odbioru) a także ograniczenie pasma wymaganego do dwukierunkowej łączności. Para (lub większa liczba) rozmawiających użytkowników zajmuje bowiem tylko jeden kanał łączności ale w danej chwili **tylko jeden** z nich może nadawać informacje (w odróżnieniu od systemu duplexowego, stosowanego np. w telefonii).

W systemie CB mogą być używane następujące rodzaje radiotelefonów:

- a) Radiotelefony bazowe, stacjonarne. Mają duże rozmiary i najlepsze parametry, są zasilane z sieci energetycznej. Współpracują z zewnętrzną anteną, zwykle o dużych rozmiarach (anteną bazową).
- b) Samochodowe (przewoźne) [najczęściej wykorzystywane w Polsce (również jako bazowe)]. Zasilane z zewnętrznego źródła o napięciu około 12V (zwykle z akumulatora samochodowego). Antena zewnętrzna – samochodowa.

- c) Ręczne (przenośne), wykorzystywane w terenie. Zawierają wewnętrzne źródło zasilania (bateria, akumulator) i własną antenę.

Radiotelefony każdego rodzaju mogą także współpracować z innymi rodzajami anten, zapewniając różny zasięg przy takiej samej mocy wyjściowej (w Polsce - 4W). Stosowane są następujące rodzaje anten:

- a) anteny bazowe o długości 5-6m, zasięg ok. 50km,
- b) anteny balkonowe o długości 1.5 – 2.5m, zasięg ok. 25km,
- c) anteny samochodowe o długości 1 – 3m, zasięg 10 – 20km,
- d) anteny do radiotelefonów ręcznych:
 - metalowe (teleskopowe) o długości do 1.5m, zasięg 15 – 20km,
 - helikalne („gumowe”) o długości kilkunastu cm, zasięg do 10km.

Zasięg łączności zależy także od rodzaju wykorzystywanej modulacji (p. 2.2).

2.1. ZAKRESY CZĘSTOTLIWOŚCI W SYSTEMIE CB

System *CB Radio* pracuje w zakresie fal krótkich w tzw. paśmie obywatelskim od ok. 26 MHz do ok. 29MHz podzielonym na kanały o szerokości

$$B_{max} = 10kHz \quad (2.1)$$

Zgodnie z normami międzynarodowymi kanały są pogrupowane w zakresy A, B, C, D, E. Zakresy te liczą nominalnie po 45 kanałów, przy czym w każdym zakresie 5 kanałów stanowi tzw. „dziury kanałowe” używane do celów innych niż łączność *CB Radio*, np. do sterowania modeli, w urządzeniach alarmowych, medycznych, itp. Wskutek tego liczba kanałów łączności CB w każdym zakresie wynosi 40.

W Europie zachodniej graniczne częstotliwości każdego kanału są nieparzystą wielokrotnością 5kHz, np. dla kanału nr 1 w zakresie C przydzielone jest pasmo 26.965MHz – 26.975MHz (tzw. „standard piątek”). Natomiast w Polsce częstotliwości graniczne kanałów są parzystą wielokrotnością 5kHz (wielokrotnością 10kHz) – tzw. „standard zero”. Zatem w Polsce kanał nr 1 w zakresie C zajmuje pasmo 26.960MHz – 26.970MHz. Obowiązujące w Polsce dolne częstotliwości graniczne kanałów w poszczególnych pasmach przedstawiono w DODATKU 1. Częstotliwości graniczne kanałów zachodniego „standardu piątek” otrzymujemy dodając 5kHz do częstotliwości standardu polskiego.

W Polsce do łączności CB można legalnie używać 40 kanałów zawierających się w zakresie C (26.960MHz do 27.410MHz). Niektóre z tych kanałów mają specjalne zastosowania i nie powinny służyć do prowadzenia normalnych rozmów. Są to:

- a) kanał 9 – ratunkowy, tu prowadzi nasłuch policja, pogotowie ratunkowe, straż pożarna oraz sztaby ratunkowe PL – CB Radio,
- b) kanał 19 – drogowy, przeznaczony do kontaktów między samochodami,
- c) kanał 28 – wywoławczy, na którym wywołuje się żadaną stację a następnie przechodzi się na inny kanał.

2.2. MODULACJE STOSOWANE W *CB RADIO*

W systemie *CB Radio* mogą być używane trzy rodzaje modulacji:

- a) dwuwstęgowa modulacja amplitudy z falą nośną [umownie oznaczana jako AM (Amplitude Modulation)],
- b) modulacja częstotliwości (FM – Frequency Modulation),
- c) modulacja jednowstęgowa (SSB – Single Sideband).

Radiotelefony wyższej klasy przystosowane są do pracy przy każdej z wymienionych powyżej trzech modulacji.

Maksymalne moce nadajnika przy poszczególnych rodzajach modulacji są określone przez przepisy i wynoszą w Polsce:

- a) dla AM: moc fali nośnej sygnału wyjściowego nie większa niż 4W,
- b) dla FM: moc sygnału wyjściowego nie większa niż 4W,
- c) dla SSB: moc w szczycie modulacji (PEP – Peak Envelope Power) nie większa niż 12W.

Największy zasięg łączności uzyskuje się stosując modulację SSB, przy modulacji AM zasięg spada o ok. 50%, natomiast przy FM – o ok. 80% (w stosunku do zasięgu uzyskiwanego przy SSB).

Modulacja FM wymaga bowiem dostatecznie dużego stosunku sygnał/szum na wejściu odbiornika (na ogół powyżej 10dB – tzw. efekt progowy) ale przy spełnieniu tego warunku jest mało wrażliwa na szumy i zakłócenia.

2.2.1. Modulacja AM

Obecnie najbardziej popularnym rodzajem modulacji wykorzystywanym w *CB Radio* jest dwuwstęgowa modulacja amplitudy z falą nośną, oznaczana symbolem AM (Amplitude Modulation). Ten rodzaj modulacji stosowany jest we wszystkich typach radiotelefonów CB, gdyż nie wymaga stosowania skomplikowanych układów w części nadawczej i odbiorczej. Sygnał z modulacją amplitudy z falą nośną ma postać:

$$y_{AM}(t) = x(t)\cos \Omega_C t + A_C \cos \Omega_C t \quad (2.2a)$$

$$y_{AM}(t) = [A_C + x(t)]\cos \Omega_C t \quad (2.2b)$$

gdzie $x(t)$ jest przesyłanym sygnałem informacyjnym a $c(t)=A_C \cos \Omega_C \cdot t$ jest falą nośną. Jeśli spełniony jest warunek

$$A_C + x(t) \geq 0 \quad (2.3)$$

to sygnał $y_{AM}(t)$ jest sinusoidą o pulsacji Ω_C , której amplituda zmienia się w czasie. Ta chwilowa amplituda (obwiednia) jest wówczas liniową funkcją sygnału informacyjnego $x(t)$ – rys. 2.1a, b.

Natomiast stan, w którym warunek (2.3) nie jest spełniony, nazywamy przemodulowaniem.

Obwiednia jest wówczas zniekształcona nieliniowo w stosunku do sygnału $x(t)$ – rys. 2.1c.

Przy jednoprzędkowym sygnale modulującym (rys. 1)

$$x(t) = A_M \cos \omega_M t \quad (2.4)$$

wzór 2.2 można przekształcić do postaci

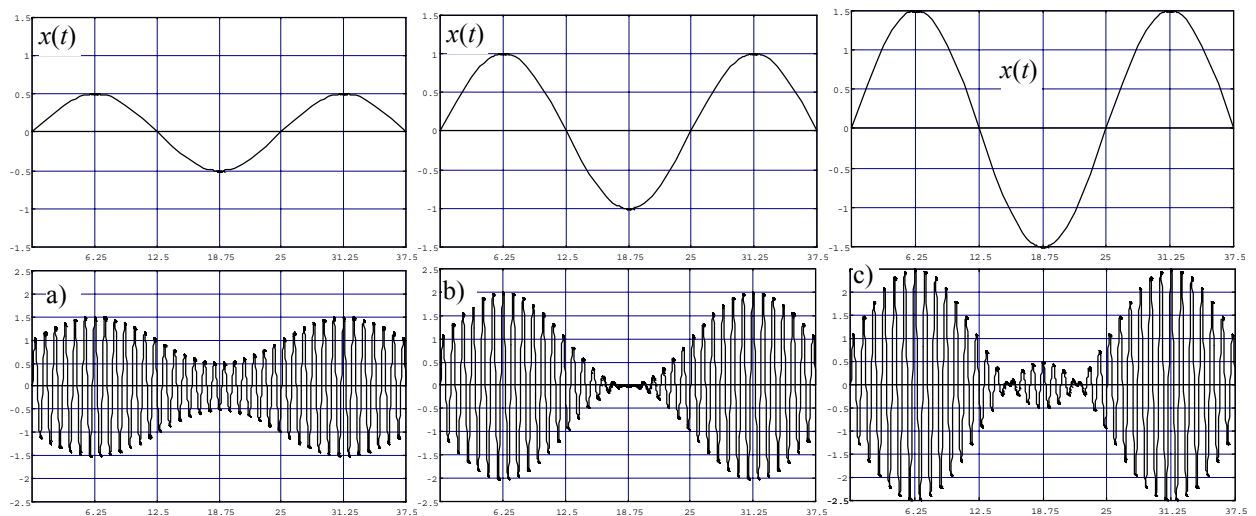
$$y_{AM}(t) = A_C [1 + m \cdot \cos \omega_M t] \cos \Omega_C t \quad (2.5)$$

gdzie $m=A_M/A_C$ jest współczynnikiem głębokości modulacji. Warunek braku przemodulowania (2.3) ma wówczas postać:

$$m \leq 1 \quad (2.6)$$

Przy danej wartości m maksymalna amplituda przebiegu $y_{AM}(t)$ jest równa (szczyt obwiedni)

$$A_{\max} = A_C (1 + m) \leq 2 A_C \quad (2.7)$$

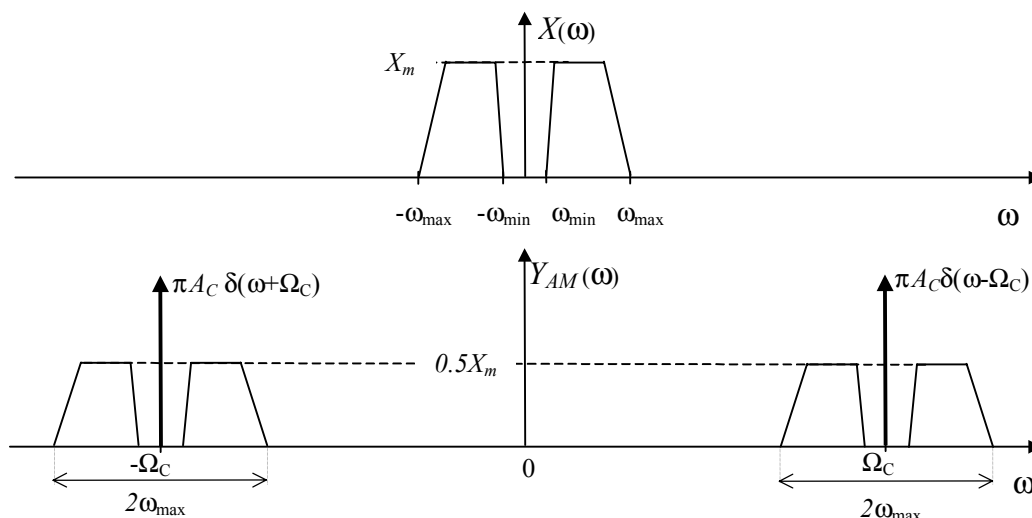


Rys. 2.1. Przebieg czasowy sygnału z modulacją amplitudy (AM) w przypadku modulacji 1-przędkowej; a) $m=0.5$ ($A_C=1, A_m=0.5$), b) $m=1$ ($A_C=1, A_m=1$), c) $m=1.5$ ($A_C=1, A_m=1.5$) - przemodulowanie

Widmo sygnału AM przy modulacji jednoprzędkowej składa się z pręжка fali nośnej o pulsacji Ω_C i dwóch pręzków bocznych o pulsacjach $\Omega_C - \omega_M$, $\Omega_C + \omega_M$:

$$y_{AM}(t) = A_C \cdot \cos(\Omega_C \cdot t) + \frac{1}{2} A_M \cos[(\Omega_C - \omega_M)t] + \frac{1}{2} A_M \cos[(\Omega_C + \omega_M)t] \quad (2.8)$$

Amplituda każdego prążka bocznego jest równa połowie amplitudy A_M sygnału $x(t)$. Przykładowe widmo sygnału AM dla przypadku nieokresowego sygnału informacyjnego o skończonym widmie zawartym w paśmie ω_{\min} , ω_{\max} przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2.2. Widmo przykładowego sygnału informacyjnego $X(\omega)$ i odpowiadające mu widmo sygnału z dwuwstęgową modulacją amplitudy z falą nośną (AM) $Y_{AM}(\omega)$

Zalety i wady modulacji AM oraz jej zastosowania

Zaletą modulacji AM jest bardzo prosty układ demodulacji (tzw. detektor obwiedni, np. detektor szczytowy) pracujący bez konieczności odtwarzania przebiegu nośnej w odbiorniku. Dzięki temu cena odbiornika jest niska. Z tego względu system modulacji amplitudy z falą nośną stosowany był przez wiele lat w radiodifuzji (układ jeden nadajnik - wiele odbiorników) w radiofonii w zakresie fal długich, średnich i krótkich. Aby detektor obwiedni nie wprowadzał zniekształceń, kształt obwiedni sygnału zmodulowanego $y_{AM}(t)$ musi być taki sam, jak kształt sygnału $x(t)$. Musi zatem być spełniony warunek (2.3), tzn. poziom nośnej musi być dostatecznie duży ($m \leq 1$). Obecnie liczba czynnych nadajników radiofonicznych AM jest ograniczona ze względu na niską jakość odbioru (ograniczenie przenoszonego pasma i wrażliwość na zakłócenia).

Modulacja AM stosowana jest także w pewnych systemach radiokomunikacyjnych, m. in. w lotnictwie i w *CB Radio*. W systemach z modulacją AM niewielkie różnice w częstotliwości nośnej w radiotelefonie pracującym jako nadajnik i w radiotelefonie pracującym jako odbiornik (nawet do ok. 1kHz) nie mają bowiem wpływu na jakość transmisji. Fakt ten ma duże znaczenie w przypadku urządzeń CB, które są sprzętem powszechnego użytku i powinny być tanie.

Istotną wadą modulacji AM jest duża ilość energii konieczna do przesłania sygnału $x(t)$. Sygnał zmodulowany $y_{AM}(t)$ zawiera bowiem nośną $A_C \cos \Omega_C t$ o stałym poziomie niezależnym od $x(t)$.

Sprawność energetyczna transmisji informacji¹, definiowana jako stosunek mocy składowych sygnału zmodulowanego przenoszących informację P_{inf} do mocy całego tego sygnału $P_{\text{całk}}$:

$$\eta_T = \frac{P_{\text{inf}}}{P_{\text{całk}}} \quad (2.9)$$

jest więc mała dla modulacji AM. Informacją przenoszona jest bowiem jedynie przez wstęgi boczne. Zatem przesłanie danej informacji na daną odległość w danych warunkach wymaga wyemitowania fali elektromagnetycznej o większej mocy niż w przypadku innych modulacji, np. dwuwstęgowej modulacji amplitudy bez fali nośnej (AM-SC) albo modulacji jednowstęgowej (SSB). Można wyprowadzić, że przy jednoprzędkowym sygnale modulującym $x(t)=A_M \cos \omega_M t$ sprawność energetyczna transmisji przy użyciu modulacji AM wyraża się wzorem:

$$\eta_T = \frac{m^2}{2 + m^2} \quad (2.10)$$

Zatem maksymalna sprawność energetyczna transmisji η_T wynosi zaledwie 33,33% (dla maksymalnej głębokości modulacji $m=1$).

W przypadku radiotelefonów CB niższej klasy modulatory amplitudy są zwykle tak budowane, aby maksymalna głębokość modulacji m nie przekraczała 80%. Pozwala to uniknąć przemodulowania ($m>1$) (i powstawania znacznych zniekształceń nieliniowych) nawet przy najsilniejszych sygnałach dochodzących do mikrofonu.

Szerokość pasma i wymagana charakterystyka przejściowa wzmacniacza

Szerokość pasma B sygnału zmodulowanego $y_{\text{AM}}(t)$ jest równa podwojonej częstotliwości maksymalnej f_{Mmax} sygnału informacyjnego $x(t)$ – rys. 2.2:

$$B_{\text{AM}} = 2f_{\text{Mmax}} \quad (2.11)$$

Zależność ta oznacza, że z punktu widzenia szerokości pasma zajmowanego przez sygnał zmodulowany AM ma sens jedynie ograniczanie pasma sygnału informacyjnego od góry, natomiast nie jest celowe ograniczanie jego pasma od dołu (zwiększanie f_{Mmin}).

W praktycznych radiotelefonach CB sygnał informacyjny przy modulacji AM przenoszony jest zwykle w paśmie

$$f_{\text{Mmin}} = 300\text{Hz}, \quad f_{\text{Mmax}} = 3000\text{Hz} \quad (2.12)$$

Maksymalna szerokość pasma sygnału zmodulowanego wynosi zatem

$$B_{\text{AMmax}} = 6\text{kHz} \quad (2.13)$$

¹ Pojęcia *sprawność energetyczna transmisji* nie należy mylić ze sprawnością energetyczną układu nadajnika czy modulatora ($P_{\text{wy}}/P_{\text{zasil}}$) !

co pozwala na bezpieczną transmisję w kanałach o szerokości 10kHz. Częstotliwość nośna f_C sygnału AM powinna przy tym być częstotliwością środkową wykorzystywanego kanału łączności (np. w kanale C1: $f_C=26.965\text{MHz}$).

Informacja o sygnale modulującym zawarta jest w obwiedni sygnału AM, zatem wzmacniacz takiego sygnału musi mieć liniową amplitudową charakterystykę przejściową $U_{wy}(U_{we})$ w postaci zależności wprost proporcjonalnej

$$U_{wy} = k \cdot U_{we} \quad (2.14)$$

w całym zakresie możliwych amplitud $0 \leq U_{we} \leq 2A_{Cwe}$ i w zakresie częstotliwości danego kanału łączności (lub wszystkich używanych kanałów).

Moc wyjściowa nadajnika AM

Moc wyjściowa nadajnika z modulacją AM zmienia się w czasie zależnie od przebiegu sygnału informacyjnego. Przy budowie i eksploatacji nadajnika radiowego istotne znaczenie ma jego **średnia moc wyjściowa** oraz **moc w szczycie obwiedni**. Średnia moc wyjściowa nadajnika decyduje bowiem o wymaganej mocy jego zasilacza i o wydajności chłodzenia elementów mocy (czynnych i biernych). Natomiast moc w szczycie obwiedni (PEP – peak envelope power) określa wymagane dopuszczalne wartości prądów i napięć tranzystorów mocy w. cz. w stopniu końcowym nadajnika i wytrzymałość napięciową elementów biernych L , C obwodu rezonansowego tego stopnia a także wymaganą wytrzymałość napięciową kabla łączącego nadajnik z anteną.

W przypadku nadajników AM moc średnią i moc szczytowa PEP można w prosty sposób opisać dla jednoprzędkowego sygnału informacyjnego:

- moc średnia za okres sygnału modulującego:

$$P_{sr} = \frac{A_C^2}{2R_O} \left(1 + \frac{m^2}{2} \right) = P_C \left(1 + \frac{m^2}{2} \right) \quad (2.15)$$

- moc szczytowa PEP

$$P_{PEP} = \frac{(A_{Cmax})^2}{2R_O} = \frac{A_C^2(1+m)^2}{2R_O} = P_C(1+m)^2 \quad (2.16)$$

gdzie R_O jest rezystancją obciążenia nadajnika (rezystancją anteny), P_C jest mocą nośnej. Przy pełnym wymodulowaniu ($m=1$) w dodatnim szczycie modulacji nadajnik oddaje więc moc 4-krotnie wyższą od mocy nośnej ($4P_C$). Dla nadajnika AM maksymalna wartość mocy PEP wynosi zatem

$$P_{PEPmax} = 4P_C \quad (2.17)$$

a maksymalna wartość mocy średniej:

$$P_{srmax} = 1.5P_C \quad (2.18)$$

Dla nadajników radiotelefonów CB ($P_C=4W$) wartości tych mocy wynoszą $P_{PEPmax}=16W$ i $P_{sr max}=6W$. Jednak ze względu na ograniczenie maksymalnej głębokości modulacji m do 80% można dopuścić stopień końcowy nadajnika umożliwiając dostarczanie mocy szczytowej $P_{PEPmax} \geq 13W$ i średniej $P_{sr max} \geq 5.3W$.

Przy pracy z rzeczywistym sygnałem modulującym $x(t)$ o charakterze przypadkowym (mowa, muzyka) moc szczytowa sygnału zmodulowanego wynosi również $4P_C$, jakkolwiek chwile z maksymalnym wy modulowaniem pojawiają się raczej rzadko. Natomiast średnia głębokość modulacji jest znacznie mniejsza od jedności ($m_{sr}=0.2 - 0.3$), wskutek czego średnia moc wyjściowa, średnia moc pobierana z zasilacza i średnia moc odprowadzana przez układ chłodzenia są jedynie nieznacznie większe od wartości odpowiadających emisji fali nośnej

$$P_{sr} = (1.02 \div 1.045)P_C \quad (2.19)$$

(wzór 2.11)]. **Z tego względu jako nominalną moc wyjściową nadajników z modulacją AM podaje się wartość mocy ich fali nośnej:**

$$P_{NOM} = P_C \quad (2.20)$$

2.2.2. Modulacja jednowstęgowa SSB

Do transmisji informacji zawartej w sygnale $x(t)$ wystarcza przesyłanie tylko jednej wstęgi bocznej sygnału AM (rys. 2.2). Taki system transmisji nazywa się transmisją jednowstęgową a odpowiadający jej rodzaj modulacji amplitudowej – **modulacją jednowstęgową SSB**. Sprawność energetyczna transmisji informacji (wzór 2.9) dla modulacji SSB wynosi 100%. Ceną za taką oszczędność mocy promieniowanej przez nadajnik i zajmowanego pasma jest komplikacja układu modulatora i demodulatora (demodulacja synchroniczna) a także konieczność odtworzenia w odbiorniku przebiegu fali nośnej nadajnika.

Przy jednoprzędkowym sygnale informacyjnym $x(t)$ (wzór 2.4) przebieg czasowy sygnału z modulacją jednowstęgową można otrzymać z przebiegu sygnału z modulacją AM (wzór 2.8) odrzucając nośną i jeden prążek boczny (np. dolny):

$$y_{SSB}(t) = \frac{1}{2} A_M \cdot \cos[(\Omega_C + \omega_M) \cdot t] = A_{SSB} \cdot \cos[(\Omega_C + \omega_M) \cdot t] \quad (2.21)$$

gdzie A_{SSB} jest amplitudą sygnału zmodulowanego. Przy 1-przędkowym $x(t)$ sygnał SSB jest zatem czystą sinusoidą w. cz. (bez obwiedni m. cz.!) o pulsacji nieznacznie zmienionej w stosunku do pulsacji fali nośnej.

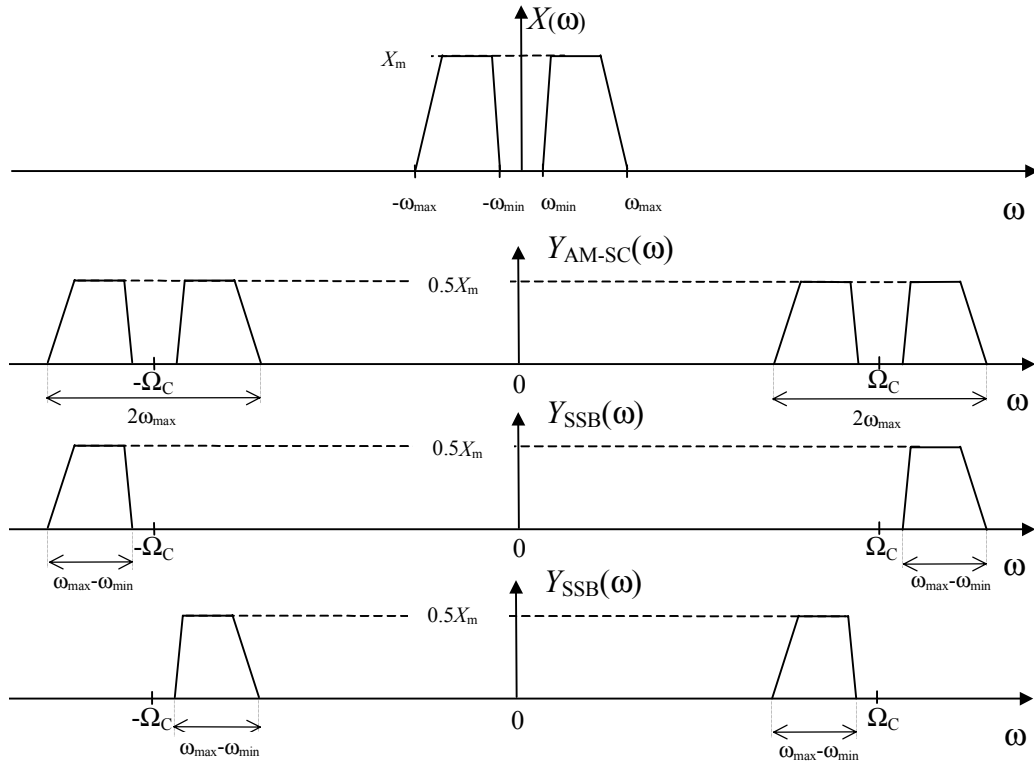
W ogólniejszym przypadku, gdy sygnał informacyjny jest okresowy i można go przedstawić jako skończony szereg Fouriera

$$x(t) = \sum_{i=1}^n A_{Mi} \cdot \cos(\omega_{Mi} \cdot t + \varphi_i) \quad (2.22)$$

sygnał zmodulowany jednowstęgowo ma postać

$$y_{SSB}(t) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n A_{Mi} \cdot \cos[(\Omega_C + \omega_{Mi})t + \varphi_i] \quad (2.23)$$

Należy zauważyć, że chociaż wzory (2.22) i (2.23) są bardzo podobne, to jednak przebiegi $x(t)$ i $y_{SSB}(t)$ znacznie się różnią. Sygnał $x(t)$ jest bowiem sumą składowych sinusoidalnych o częstotliwości-



Rys. 2.3. Etapy tworzenia sygnału jednowstęgowego; a) widmo sygnału informacyjnego, b) widmo sygnału dwuwstęgowego bez fali nośnej (AM-SC), c) widmo sygnału SSB - wstęga górna (USB), d) widmo sygnału SSB - wstęga dolna (LSB)

ściach harmonicznymi (np. 1kHz, 2kHz, 3kHz, ...), jest więc przebiegiem m. cz. okresowym odkształconym. Natomiast $y_{SSB}(t)$ jest sumą składowych o amplitudach proporcjonalnych do amplitud kolejnych harmonicznymi $x(t)$ lecz o częstotliwościach znacznie większych i niewiele różniących się od siebie (np. 27.001MHz, 27.002MHz, 27.003MHz, ...). $y_{SSB}(t)$ jest więc przebiegiem w. cz. o wolnozmiennym amplitudzie, jednak obwiednia tego sygnału różni się od sygnału modulującego $x(t)$.

Szerokość pasma i wymagana charakterystyka przejściowa wzmacniacza

Szerokość pasma zajmowanego przez sygnał SSB jest równa szerokości pasma sygnału informacyjnego $x(t)$ (rys. 2.3):

$$B_{SSB} = f_{Mmax} - f_{Mmin} \quad (2.24)$$

Zatem z punktu widzenia szerokości pasma zajmowanego przez kanał SSB celowe jest zawężanie pasma sygnału informacyjnego zarówno od góry (obniżanie f_{Mmax}), jak i od dołu (podwyższanie f_{Mmin}) - kosztem jakości transmisji.

W przypadku sygnału SSB informacja o sygnale modulującym zawarta jest w jego obwiedni (i w częstotliwości), zatem wzmacniacz takiego sygnału musi mieć liniową (ściślej – wprost proporcjonalną) amplitudową charakterystykę przejściową $U_{wy}(U_{we})$

$$U_{wy} = k \cdot U_{we} \quad (2.25)$$

w całym zakresie możliwych amplitud $0 \leq U_{we} \leq U_{wemax}$ dla częstotliwości danego kanału łączności (albo dla wszystkich używanych kanałów).

W przypadku *CB Radio* zwięźenie pasma wymaganego przy łączności SSB ma drugorzędne znaczenie, gdyż szerokość kanału łączności jest ustalona (10kHz) i nie zależy od przyjętej metody modulacji. Z tego względu w radiotelefonach CB pracujących z modulacją SSB możliwa jest transmisja sygnału informacyjnego w szerszym paśmie niż przy modulacji AM i FM²

$$f_{Mmin} = 400Hz, \quad f_{Mmax} = 4000Hz \quad (2.26)$$

Maksymalna szerokość pasma sygnału zmodulowanego SSB wynosi zatem (wzór 2.24)

$$B_{SSBmax} = 3.6kHz \quad (2.27)$$

co pozwala na bezpieczną transmisję w kanałach o szerokości 10kHz.

Zysk energetyczny w stosunku do modulacji AM

Oprócz szerokości pasma kanału transmisyjnego system łączności SSB pozwala także zmniejszyć moc nadajnika w porównaniu do systemu AM. Zysk energetyczny systemu SSB w stosunku do systemu AM definiuje się jako stosunek mocy nadajnika SSB do mocy nadajnika AM, zapewniającego taką samą jakość odbioru (taki sam stosunek sygnału do szumu), jak nadajnik SSB. Zysk ten definiuje się przy jednoprzędkowym sygnale informacyjnym $x(t)$.

Moc nadajnika AM opisuje się podając jej wartość średnią P_{sr} za okres m. cz. (wzór 2.15) lub wartość w szczycie modulacji P_{PEP} (wzór 2.16). Zysk systemu SSB można zatem zdefiniować jako stosunek mocy P_{SSB} do mocy średniej nadajnika AM (tzw. zysk średni):

$$Z_{sr} = \frac{P_{SSB}}{P_{sr(AM)}} \quad (2.28)$$

albo do jego mocy szczytowej (tzw. zysk szczytowy):

² Dolna częstotliwość graniczna jest jednak wyższa niż w przypadku modulacji AM. Wynika to z zastosowanej metody uzyskiwania sygnałów jednowstęgowych drogą filtracji wybranej wstęgi za pomocą filtru pasmowo-przepustowego (tzw. metoda filtracji – rys. 2.3).

$$Z_{\text{Max}} = \frac{P_{\text{SSB}}}{P_{\text{PEP(AM)}}} \quad (2.29)$$

Zysk Z_{sr} pozwala oszacować na ile moc zasilania nadajnika SSB i wydajność jego układu chłodzenia może być mniejsza w porównaniu z równoważnym nadajnikiem AM zapewniającym taką samą jakość odbioru. Natomiast zysk Z_{Max} określa ile razy szczytowa nadajnika SSB (za okres w. cz. - PEP) może być mniejsza od mocy szczytowej (PEP) równoważnego nadajnika AM. Wskazuje zatem ile razy mogą być niższe dopuszczalne wartości napięcia i prądu elementów aktywnych (ściślej - iloczyn tych wartości) użytych we wzmacniaczu mocy sygnału SSB w porównaniu z wartościami wymaganymi we wzmacniaczu równoważnego sygnału AM.

Przy wyznaczaniu wartości zysków Z_{sr} i Z_{Max} należy uwzględnić, że taki sam stosunek sygnału do szumu na wyjściu obu tych odbiorników uzyskujemy jeśli moc sygnału SSB jest równa mocy obu wstępnych sygnału AM. Uwzględniając wzory (2.15) i (2.16) otrzymujemy następujące wartości zysku średniego i szczytowego

$$Z_{\text{sr}} = \frac{m^2}{2+m^2} \leq \frac{1}{3} \quad (2.30)$$

$$Z_{\text{Max}} = \frac{m^2}{2(1+m)^2} \leq \frac{1}{8} \quad (2.31)$$

Powyższe porównanie mocy równoważnych nadajników SSB i AM obowiązuje jednak tylko przy założeniu idealnych warunków propagacji fal elektromagnetycznych. System łączności jednowstęgowej zapewnia niezawodną transmisję informacji nawet w bardzo złych warunkach propagacji. Zatem przy średnich i złych warunkach propagacji (gdy przy łączności AM pojawiają się zniekształcenia wywołane zanikami selektywnymi³) efektywny zysk łączności SSB w stosunku do łączności AM jest większy niż to wynika ze wzorów (2.30) i (2.31).

Problemy z demodulacją sygnałów SSB

Demodulacja sygnału SSB polega na wymnożeniu tego sygnału przez przebieg fali nośnej $c(t) = A_C \cos \Omega_C t$. Następnie z powstałego w ten sposób sygnału $Y_{\text{SSB}}(\omega - \Omega_C) + Y_{\text{SSB}}(\omega + \Omega_C)$ filtrem dolnoprzepustowym wybierany jest sygnał informacyjny (por. rys. 2.3). W systemie łączności SSB fala

³ Przy transmisji na duże odległości poszczególne części widma sygnału AM (dolna wstęga boczna, nośna i górna wstęga boczna) mogą być tłumione w różnym stopniu (tzw. zanik selektywny). Wskutek tego sygnał odbierany przez odbiornik może w granicy stać się sygnałem jednowstęgowym z falą nośną, sygnałem jednowstęgowym bez fali nośnej albo sygnałem AM-SC (dwuwstęgowym bez fali nośnej). Może także nastąpić przesunięcie fazy nośnej w stosunku do wypadkowej fazy wstępnych. Najbardziej szkodliwy dla transmisji AM jest przypadek tłumienia fali nośnej w stosunku do wstępnych, gdyż w tym przypadku obwiednia odbieranego sygnału zmodulowanego znacząco różni się od sygnału informacyjnego (efekt podobny do przemodulowania). Podobnie znaczne zniekształcenia obwiedni powoduje przesunięcie fazy fali nośnej, szczególnie o 90° (powodująca powstanie dodatkowej modulacji fazy). W obu tych przypadkach transmitowany sygnał informacyjny może być zupełnie niezrozumiały.

nośna nie jest jednak transmitowana przez nadajnik a zatem fala ta musi być odtwarzana w odbiorniku. Fakt ten powoduje znaczne trudności techniczne, gdyż fale nośne w nadajniku i w odbiorniku SSB powinny mieć równe częstotliwości i fazy. Różnica częstotliwości tych fal Δf_C powoduje bowiem dokuczliwe zniekształcenia sygnału na wyjściu odbiornika w postaci przesunięcia widma sygnału informacyjnego o Δf_C . W przypadku transmisji muzyki zniekształcenia takie są niedopuszczalne, natomiast w przypadku mowy można dopuścić różnice częstotliwości nośnych $\Delta f_{Cmax}=20\text{Hz}$ zachowując zrozumiałość i rozpoznawanie głosu rozmówcy. Natomiast różnica faz fal nośnych powoduje zniekształcenia fazowe na wyjściu odbiornika, zmieniające jakość mowy (głos „Kaczora Donalda”), które jednak nie obniżają znacząco zrozumiałości⁴.

W systemach radiokomunikacyjnych (łączość dwukierunkowa między dwiema stacjami) konieczność odtwarzania nośnej w odbiorniku ma drugorzędne znaczenie, gdyż obie stacje muszą być wyposażone w generator fali nośnej o wysokiej stabilności częstotliwości. W przypadku urządzeń radiokomunikacyjnych powszechnego użytku (m. in. *CB Radio*) stosowanie generatorów o stabilności częstotliwości dostatecznie wysokiej dla SSB jest zwykle nieopłacalne. Dlatego radiotelefony CB z modulacją SSB wyposażone są w dodatkową precyzyjną regulację częstotliwości nośnej ($\pm 1\text{kHz}$ - CLARIFIER), która umożliwia zrównanie częstotliwości nośnych nadajnika i odbiornika przez operatora na minimum zniekształceń transmitowanego sygnału.

Moc wyjściowa nadajnika SSB

Jako moc nominalna nadajnika SSB podawana jest jego maksymalna moc w szczycie modulacji (PEP). Moc średnia oddawana przez wzmacniacz końcowy (liniowy) nadajnika SSB (a więc i moc pobierana z zasilacza) zależy od sygnału informacyjnego $x(t)$. Moc ta jest największa przy pomiarach kontrolnych nadajnika, gdyż przy testowaniu sygnałem jednoprzędkowym wzmacniacz (i zasilacz) musi dostarczać mocy maksymalnej (PEP) w sposób ciągły. Przy testowaniu sygnałem 2-tonowym⁵ średnia moc wyjściowa (i moc zasilania) zmniejsza się o połowę. Natomiast przy rzeczywistych sygnałach informacyjnych o charakterze przypadkowym moc średnia znacznie spada. Przykładowo, przy transmisji sygnału mowy w postaci jednostajnie czytanego tekstu moc średnia spada do 0.1 mocy PEP. **Wynika to m. in. z faktu, że sygnał mowy zawiera chwile cisy, w których nadawany sygnał y_{SSB} jest równy zeru.** Dlatego praktyczne nadajniki SSB ze względów oszczędnościowych nie są najczęściej przystosowane do ciągłego oddawania mocy nominalnej, co należy uwzględnić przy ich testowaniu (rozdz. 4).

⁴ W przypadku transmisji muzyki lub sygnałów wizyjnych takie zniekształcenia fazowe są niedopuszczalne.

⁵ Testowanie sygnałem 2-tonowym stosuje się w celu oceny zniekształceń nieliniowych (intermodulacyjnych) liniowego wzmacniacza mocy w. cz.

2.2.3. Modulacja częstotliwości (FM)

Większość zakłóceń pojawiających się w kanale transmisyjnym między nadajnikiem a odbiornikiem powoduje zmianę amplitudy przesyłanego sygnału. Wskutek tego naturalnym sposobem zmniejszenia wpływu tych zakłóceń jest zastosowanie modulacji kąta przebiegu nośnego, najczęściej w postaci modulacji jego częstotliwości. Przy modulacji kąta zmiany amplitudy odbieranego sygnału są bowiem ignorowane w odbiorniku przy demodulacji.

Przy modulacji częstotliwości (FM - Frequency Modulation) w funkcji sygnału informacyjnego x bezpośredniej zmianie ulega częstotliwość chwilowa przebiegu nośnego $c(t)$:

$$F(x) = F_C + \Delta F_{\max} \frac{x}{|x|_{\max}} \quad (2.32)$$

gdzie F_C jest częstotliwością nośną, ΔF_{\max} jest maksymalną dewiacją. Częstotliwość chwilowa F jest więc liniową funkcją sygnału informacyjnego x , zatem sygnał z modulacją FM można opisać wzorem

$$y_{\text{FM}}(t) = A_C \cos \left\{ \int F[x(t)] dt + \varphi_0 \right\} \quad (2.33)$$

Przy sinusoidalnym sygnale informacyjnym $x(t)$ (wzór 4) częstotliwość zmian częstotliwości nośnej F jest równa częstotliwości sygnału modulującego f_M a amplituda zmian częstotliwości F (dewiacja ΔF) jest wprost proporcjonalna do amplitudy A_M tego sygnału:

$$F = F_C + \Delta F_{\max} \frac{A_M}{A_{M\max}} \cos(\omega_M t) = F_C + \Delta F \cos(2\pi f_M t) \quad (2.34)$$

Parametry widma sygnału zmodulowanego $y_{\text{FM}}(t)$ zależą od wartości stosunku $\Delta F / f_M$ stanowiącego tzw. wskaźnik modulacji częstotliwości β

$$\beta = \frac{\Delta F}{f_M} = \frac{\Delta \Omega}{\omega_M} \quad (2.35)$$

Uwzględniając wskaźnik β oraz wzory 2.31 i 2.32, sygnał z modulacją FM sygnałem jednoprzętkowym można wyrazić w postaci:

$$y_{\text{FM}}(t) = A_C \sin(\Omega_C t + \beta \cdot \sin \omega_M t + \varphi_0) \quad (2.36)$$

Szerokość pasma i wymagana charakterystyka przejściowa wzmacniacza

Gdy wskaźnik modulacji β jest znacznie mniejszy od jedności ($\beta \ll 1$) mamy tzw. wąskopasmową modulację FM, której widmo przypomina widmo sygnału z modulacją AM (nośna i dwa prążki boczne). Gdy $\beta \geq 1$ mamy tzw. szerokopasmową modulację FM, dla której widmo sygnału zmodulowanego $y_{\text{FM}}(t)$ zawiera wiele prążków nawet dla jednoprzętkowego sygnału $x(t)$ (teoretycznie jest nieskończone).

Dla jednoprzędkowego sygnału $x(t)$ widmo $y_{FM}(t)$ zawiera prążki o pulsacjach:

$$\omega_k = \Omega_C \pm k \cdot \omega_m \quad (2.37)$$

których amplitudy wyrażają się funkcjami Bessela $U_k \sim J_k(\beta)$. Amplitudy tych prążków szybko maleją ze wzrostem k , dlatego sygnał zmodulowany częstotliwościowo $y_{FM}(t)$ można przesyłać kanałem o skończonej szerokości pasma bez wprowadzania zauważalnych zniekształceń do sygnału informacyjnego $x(t)$ transmitowanego za pomocą $y_{FM}(t)$. W praktyce wymaganą szerokość pasma kanału oblicza się na podstawie tzw. reguły Carsona:

$$B_{FM(C)} = 2(\Delta F + f_m) = 2f_m(\beta + 1) \quad (2.38)$$

Można wykazać, że w paśmie określanym przez regułę Carsona mieści się prawie cała moc (98 - 99%) sygnału $y_{FM}(t)$. Z punktu widzenia szerokości pasma zajmowanego przez sygnał zmodulowany FM ma sens jedynie ograniczanie pasma sygnału informacyjnego od góry, natomiast nie jest celowe ograniczanie jego pasma od dołu (zwiększanie f_{Mmin}).

W praktycznych radiotelefonach CB sygnał informacyjny przy modulacji FM przesyłany jest w takim samym paśmie, jak przy modulacji AM (300÷3000Hz - wzór 2.12). Zgodnie z przepisami maksymalna dewiacja częstotliwości w systemie CB Radio wynosi:

$$\Delta F_{max} = 2\text{kHz} \quad (2.39)$$

Szacunkowa maksymalna szerokość pasma sygnału zmodulowanego (wzór 2.38)

$$B_{FMmax} = 10\text{kHz} \quad (2.40)$$

nie przekracza zatem szerokości kanału łączności 10kHz (wzór 2.1). Częstotliwość nośna f_C sygnału FM powinna być częstotliwością środkową wykorzystywanego kanału łączności (np. w kanale C1: $f_C=26.965\text{MHz}$).

Sygnał z modulacją FM ma z założenia stałą amplitudę, dzięki temu wzmacnianie takich sygnałów może odbywać się za pomocą wzmacniaczy o dowolnej amplitudowej charakterystyce przejściowej $U_{wy}(U_{we})$, nawet silnie nieliniowej. Charakterystyka ta powinna jednak być stała dla częstotliwości danego kanału łączności (lub wszystkich używanych kanałów).

Moc wyjściowa i zasięg nadajnika FM

W przypadku nadajników FM sygnał wyjściowy ma stałą amplitudę, zatem moc średnia i moc szczytowa PEP są równe, niezależnie od przebiegu sygnału modulującego $x(t)$ i stanowi moc nominalną tego nadajnika

$$P_{sr} = P_{PEP} = \frac{A_C^2}{2R_O} \quad (2.41)$$

gdzie A_C jest amplitudą nośnej, R_O jest rezystancją obciążenia nadajnika (rezystancją anteny).

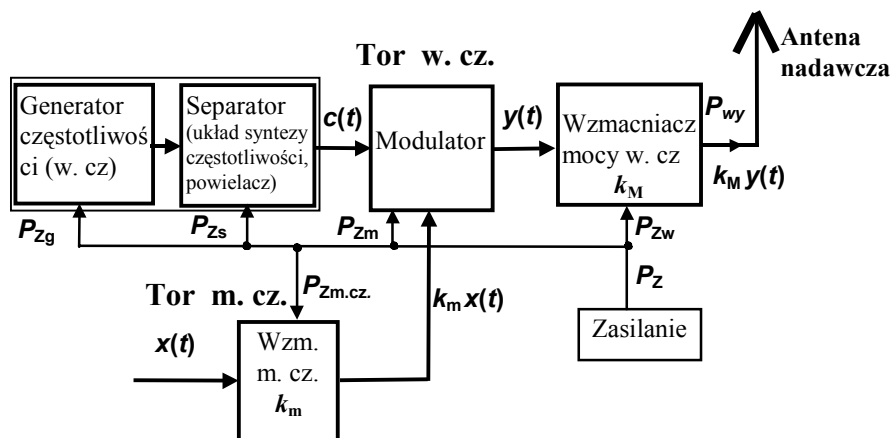
Dla nadajników radiotelefonów CB przepisy dopuszczają taki sam poziom mocy wyjściowej przy modulacji FM jak poziom mocy nominalnej przy modulacji AM ($P_{FM}=P_{CAM}=4W$). Przy rzeczywistym przypadkowym sygnale informacyjnym średnie moce wyjściowe przy modulacji FM i AM są więc prawie równe (wzory 2.19 i 2.41). Z faktu tego nie wynika jednak taki sam zasięg łączności przy obu tych rodzajach modulacji. Wrażliwość modulacji FM na szумы ma bowiem charakter progowy, gdyż dla sygnałów o mocy powyżej wartości progowej następuje wyciszanie szumów przez sygnał. Dzięki temu na wyjściu detektora w odbiorniku stosunek sygnału do szumu jest większy niż na jego wejściu. Natomiast poniżej wartości progowej stosunek sygnał / szum na wyjściu detektora jest niższy niż na jego wejściu, co w przypadku radiotelefonu może uniemożliwić rozumienie transmitowanego sygnału mowy. Progowy charakter wrażliwości modulacji FM na szумы powoduje zatem istotne ograniczenie zasięgu łączności (por. p. 2.2) ale poprawia jej jakość przy łączności na krótkich odległościach.

3. UKŁADY NADAJNIKÓW RADIOTELEFONÓW CB

3.1. Schemat blokowy nadajnika

Każdy nadajnik służący do przesyłania informacji drogą radiową musi zawierać następujące podstawowe bloki (rys. 3.1):

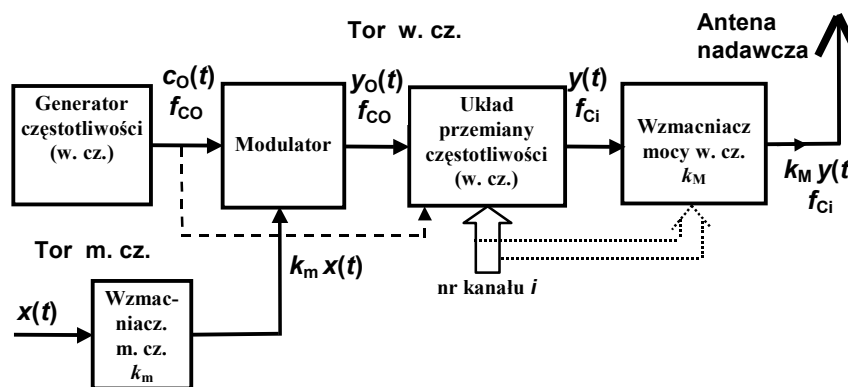
- źródło przebiegu o częstotliwości nośnej $c(t)$,
- modulator wytwarzający sygnał zmodulowany $y(t)$, realizujący przyjęty rodzaj modulacji sygnałem informacyjnym $x(t)$ na przebiegu nośnej $c(t)$,
- wzmacniacz mocy wzmacniający zmodulowany sygnał wielkiej częstotliwości $y(t)$ do poziomu mocy wymaganej do uzyskania założonego zasięgu i jakości odbioru,
- układ zasilania dostarczający energii prądu stałego do zasilania poszczególnych bloków nadajnika.



Rys. 3.1. Podstawowy schemat blokowy nadajnika radiowego

Źródło (generator) przebiegu o częstotliwości nośnej musi wytworzyć przebieg o częstotliwości równej wartości wymaganej z dostateczną dokładnością (zwykle bardzo dużą, np. 10^{-6}). Blok ten składa się z wysokostabilnego generatora częstotliwości wzorcowej f_{ref} i układu separatora, który przekształca częstotliwość f_{ref} w wymaganą częstotliwość nośną f_C bez pogorszenia jej stabilności. Konieczność stosowania separatora wynika z faktu, iż stopnie mocy nadajnika są źródłem silnych zakłóceń, które mogłyby wpływać na pracę generatora częstotliwości wzorcowej. W nadajnikach radiokomunikacyjnych, które przystosowane są do pracy w wielu kanałach z podziałem częstotliwościowym, rolę separatora spełnia zwykle układ syntezy częstotliwości⁶, który z częstotliwości wzorcowej f_{ref} pozwala uzyskać każdą z wymaganych częstotliwości nośnych $f_{C1}, f_{C2}, \dots, f_{Cn}$.

Blok modulatora musi zrealizować przyjętą modulację przebiegu nośnej o założonej częstotliwości f_C za pomocą sygnału informacyjnego $x(t)$ o założonym widmie $X(f)$ przy dostatecznie małych zniekształceniach liniowych i nieliniowych sygnału zmodulowanego. Modulator jest często układem selektywnym przystosowanym do pracy tylko przy jednej częstotliwości nośnej. Dlatego w przypadku nadajników mogących pracować w różnych kanałach częstotliwościowych (i przy różnych częstotliwościach nośnych $f_{C1}, f_{C2}, \dots, f_{Cn}$) schemat blokowy musi zawierać układ przemiany częstotliwości⁷ (rys. 3.2). Układ ten zmienia częstotliwość nośną sygnału zmodulowanego z f_{CO} w wymaganą wartość f_{Ci} bez pogorszenia jej stabilności (rys. 3.2).



Rys. 3.2. Schemat blokowy nadajnika radiowego pracującego w różnych kanałach łączności (pominięto obwody zasilania)

Wzmacniacz mocy w. cz. ma na celu wzmocnienie zmodulowanego sygnału w. cz. do wymaganego poziomu mocy przy dostatecznie małych zniekształceniach nieliniowych (intermodulacjach). Część tych produktów tych zniekształceń znajdująca się w paśmie wzmacnianego sygnału zmodulowanego (zniekształcenia intermodulacyjne) powoduje bowiem zniekształcenie przesyłanego sygnału informacyjnego. Natomiast produkty zniekształceń znajdujące się poza pasmem wzmac-

⁶ W nadajnikach o stałej częstotliwości nośnej (radiodufuzyjnych) rolę separatora może pełnić podwajacz ($f_C=2f_{ref}$) albo potrajacz częstotliwości ($f_C=3f_{ref}$), który jest układem selektywnym.

⁷ Układ przemiany częstotliwości może być zbudowany jako mieszacz z dodatkowym generatorem lub jako układ syntezy częstotliwości.

nianego sygnału stanowią tzw. emisje niepożądane, których skutkiem są przesłuchy międzykanałowe i zakłócenia w pracy innych systemów łączności.

Drugim podstawowym wymaganiem stawianym wzmacniaczom mocy w. cz. jest możliwie duża sprawność energetyczna:

$$\eta_w = \frac{P_{wy}}{P_{Zw}} \quad (3.1)$$

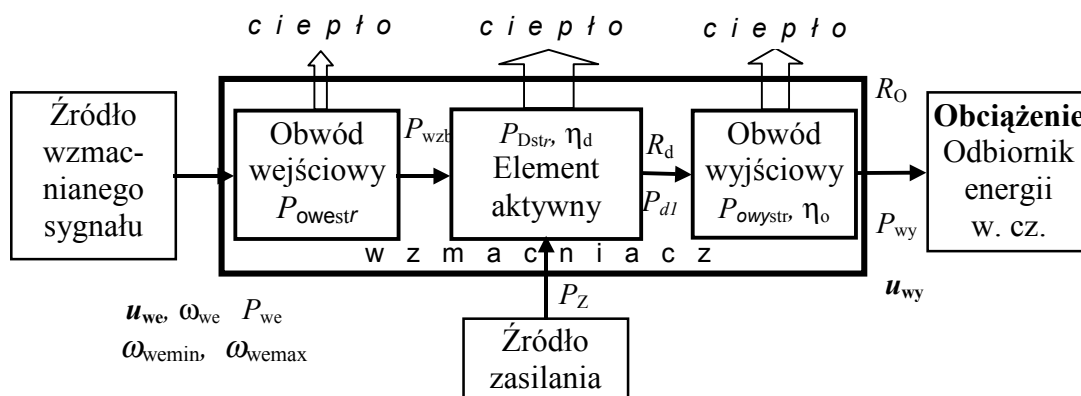
gdzie P_{Zw} jest mocą doprowadzoną z bloku zasilania (rys. 3.1). Różnica między mocą zasilania i mocą wyjściową jest tracona we wzmacniaczu w postaci ciepła i musi być odprowadzona przez układ chłodzenia (np. radiator). Wzmacniacz mocy w. cz. pobiera zwykle znacznie więcej mocy ze źródła zasilania niż pozostałe bloki nadajnika

$$P_{Zw} > P_{Zm} + P_{Zs} + P_{Zg} + P_{Zm.cz.} \quad (3.2)$$

Dlatego jego sprawność energetyczna ma duży wpływ na koszty budowy i rozmiary nadajnika (chłodzenie) i na koszty jego eksploatacji (moc zasilania). Wzmacniacz mocy w. cz. jest zwykle wzmacniaczem selektywnym, dlatego zmiana kanału i częstotliwości nośnej może wymagać przestrojenia obwodów tego wzmacniacza (rys. 3.2).

3.2. Wzmacniacze mocy wielkiej częstotliwości

We wzmacniaczu mocy w. cz. funkcją elementu aktywnego (tranzystora mocy albo lampy nadawczej) jest przetwarzanie energii źródła zasilającego w energię w. cz. sterowane sygnałem wejściowym u_{we} – rys. 3.3. Natomiast obwód wejściowy ma na celu dopasowanie wejścia elementu aktywnego do źródła sygnału sterującego (np. do wyjścia modulatora). Natomiast obwód wyjściowy dopasowuje obciążenie (antenę) do wyjścia elementu aktywnego. Oba te obwody powinny zapewnić przenoszenie całego pasma sygnału zmodulowanego a także tłumienie składowych wytwarzanych przez element aktywny poza tym pasmem. Ze względu na sprawność energetyczną wzmacniacza i



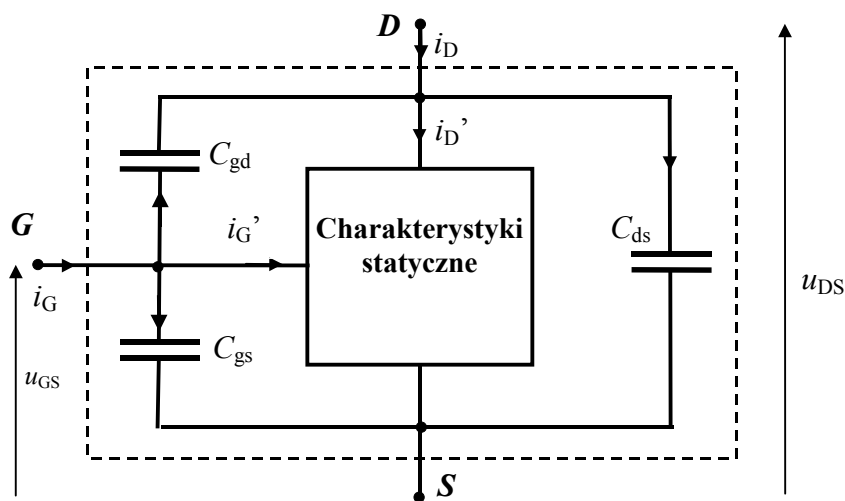
Rys. 3.3. Schemat blokowy wzmacniacza mocy w. cz.

wzmocnienie mocy obwód wyjściowy i obwód wejściowy wzmacniacza mocy powinny być możliwie niskostratne.

Wzmacniane sygnały zmodulowane są zwykle sygnałami wąskopasmowymi, które można traktować jako sygnały sinusoidalne o wolnozmienniej amplitudzie lub fazie. Wzmacniacze mocy w nadajnikach mogą zatem być wzmacniaczami rezonansowymi, w których obwód wejściowy i wyjściowy są czwórnikami selektywnymi (filtrami pasmowo-przepustowymi). Dzięki temu mimo nieuniknionych nieliniowości elementów aktywnych można uzyskać wymagany przez normy niski poziom emisji niepożądanych na wyjściu nadajnika. Należy podkreślić, że napięcie wyjściowe wzmacniacza rezonansowego ma przebieg sinusoidalny przy dowolnych okresowych przebiegach prądu i napięcia wyjściowego elementu aktywnego. Można zatem tak odkształcić te przebiegi, aby zwiększyć sprawność energetyczną wzmacniacza.

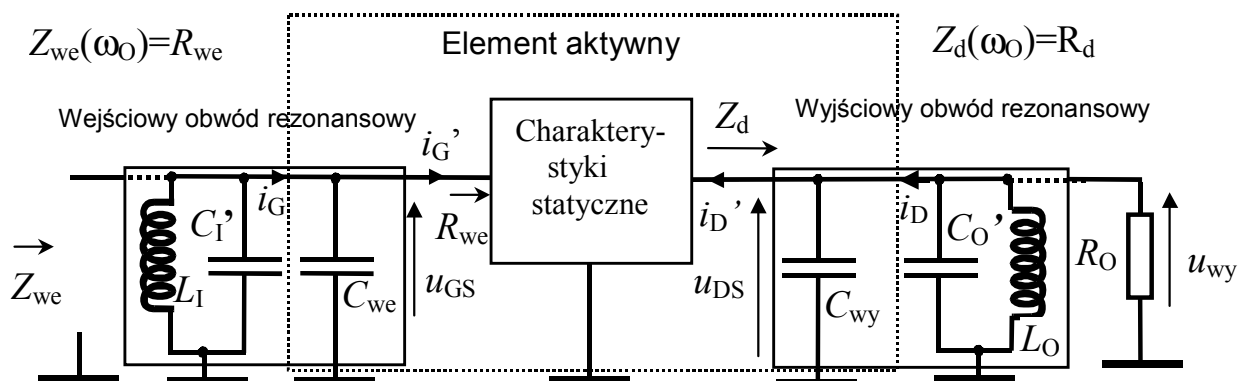
W przypadku nadajników CB (rys. 3.1, 3.2) wzmacniacz mocy w. cz. może być wzmacniaczem rezonansowym pracującym bez przestrajania obwodu wyjściowego i wejściowego. Szerokość pasma, w którym mieszczą się wzmacniane sygnały zmodulowane w pasmach A, B, C, D, E, F wynosi bowiem maksymalnie $B=2.7\text{MHz}$ i jest niewielka w stosunku do częstotliwości tych sygnałów (od 26.06 MHz do 28.76MHz) – p. 2.1.

Działanie rezonansowych wzmacniaczy mocy można wyjaśnić korzystając z uproszczonego modelu elementu aktywnego, złożonego z charakterystyk statycznych i pojemności międzyelektrodowych tego elementu (rys. 3.4). Model taki dobrze opisuje w szerokim zakresie częstotliwości własności tranzystorów mocy MOSFET i próżniowych lamp mocy (stosowanych we wzmacniaczach o dużych mocach wyjściowych, powyżej kilku kilowatów). Zaletą tego modelu jest fakt, że w przypadku wzmacniaczy rezonansowych pojemność wejściową elementu aktywnego można włą-



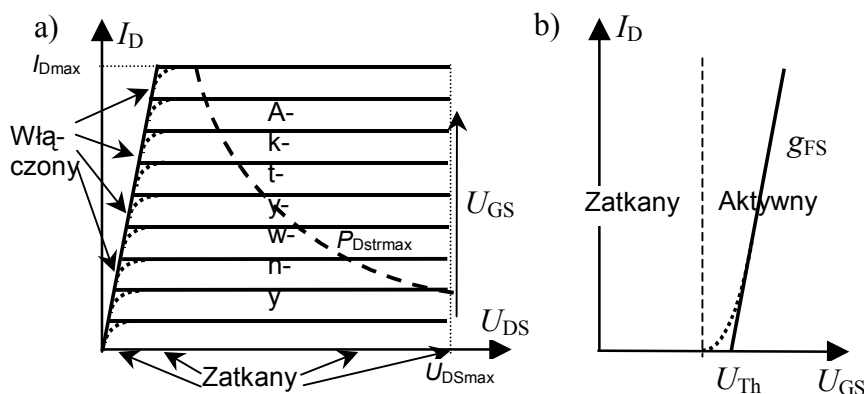
Rys. 3.4. Model elementu aktywnego złożony z charakterystyk statycznych i pojemności międzyelektrodowych na przykładzie tranzystora polowego (dren – D, bramka – G, źródło – S)

czyć w skład wejściowego obwodu rezonansowego LC , pojemność wyjściową tego elementu – w skład wyjściowego obwodu rezonansowego LC . Wówczas element aktywny można rozważać jako bezinercyjny opisywany przez charakterystyki statyczne (rys. 3.5).



Rys. 3.5. Pojemności międzyelektrodowe elementu aktywnego jako elementy obwodów rezonansowych w rezonansowym wzmacniaczu mocy

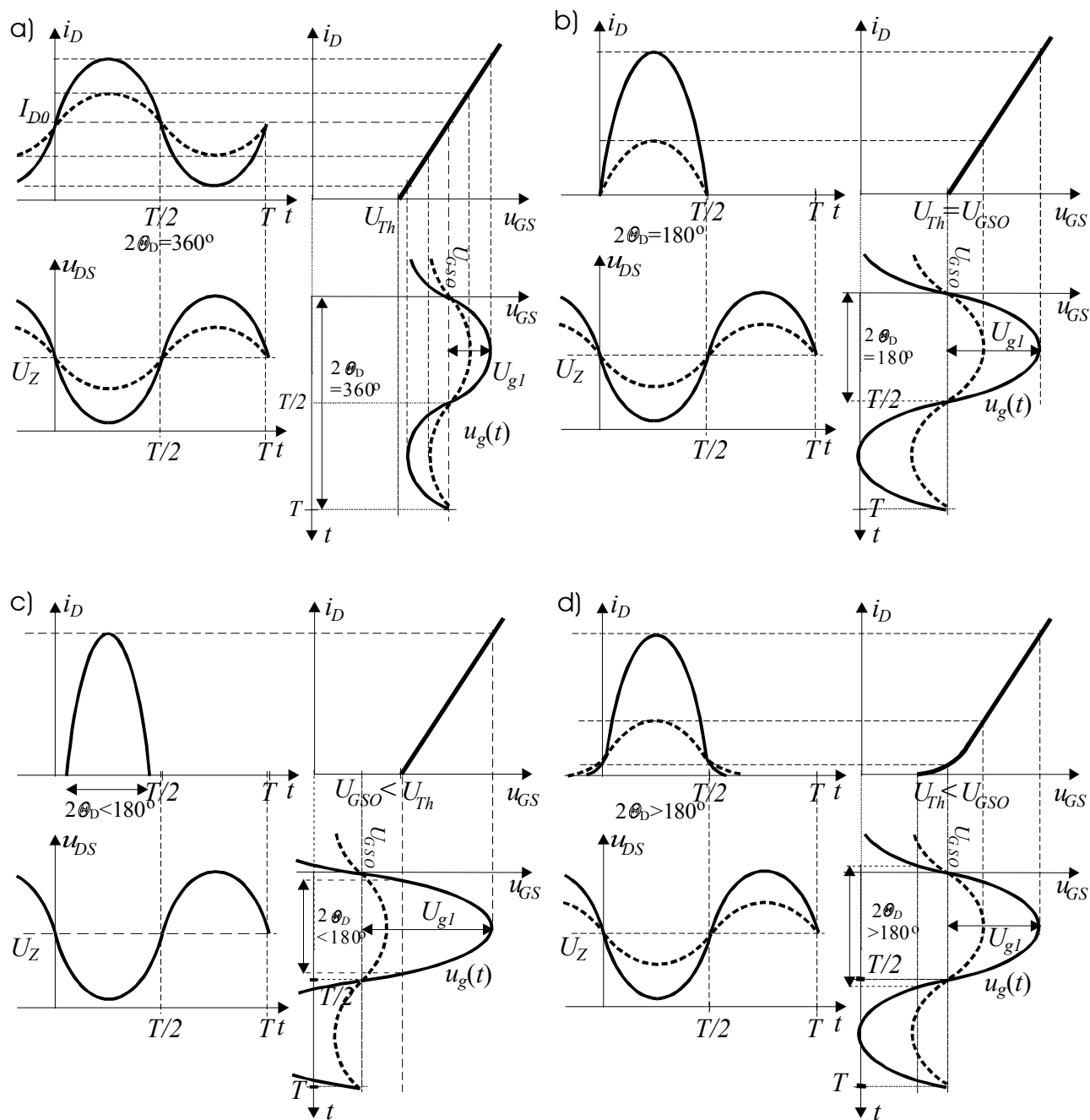
Przyjmijmy wstępnie, że charakterystyki statyczne elementu aktywnego mają przebieg odcinkowo-liniowy – rys. 3.6. Właściwości wzmacniacza zależą od położenia spoczynkowego punktu pracy w polu charakterystyk statycznych i od amplitudy sygnału wejściowego. Spoczynkowy punkt pracy elementu aktywnego (tranzystora MOSFET) stanowią wartości prądu drenu I_{D0} i napięcia dren-źródło tranzystora U_{DS0} bez wysterowania sygnałem w. cz.. Położenie tego punktu na charakterystyce przejściowej tranzystora $I_D(U_{GS})$ określa klasę pracy wzmacniacza.



Rys. 3.6. Idealizowane charakterystyki statyczne polowego tranzystora mocy MOSFET; a) rodzina charakterystyk wyjściowych (drenowych), b) charakterystyka przejściowa

Jeśli spoczynkowy punkt pracy znajduje się w połowie wykorzystywanego odcinka tej charakterystyki, to takie warunki pracy nazywamy klasą A – rys. 3.7a. Prąd wyjściowy elementu aktywnego płynie wówczas przez cały okres wzmacnianego sygnału a składowa zmienna tego prądu jest równokształtna z tym sygnałem. Wzmacniacz klasy A ma liniową amplitudową charakterystykę przejściową $U_{wy}(U_{we})$ lecz jego sprawność energetyczna jest mała – zaledwie $\eta_{max}=50\%$ przy peł-

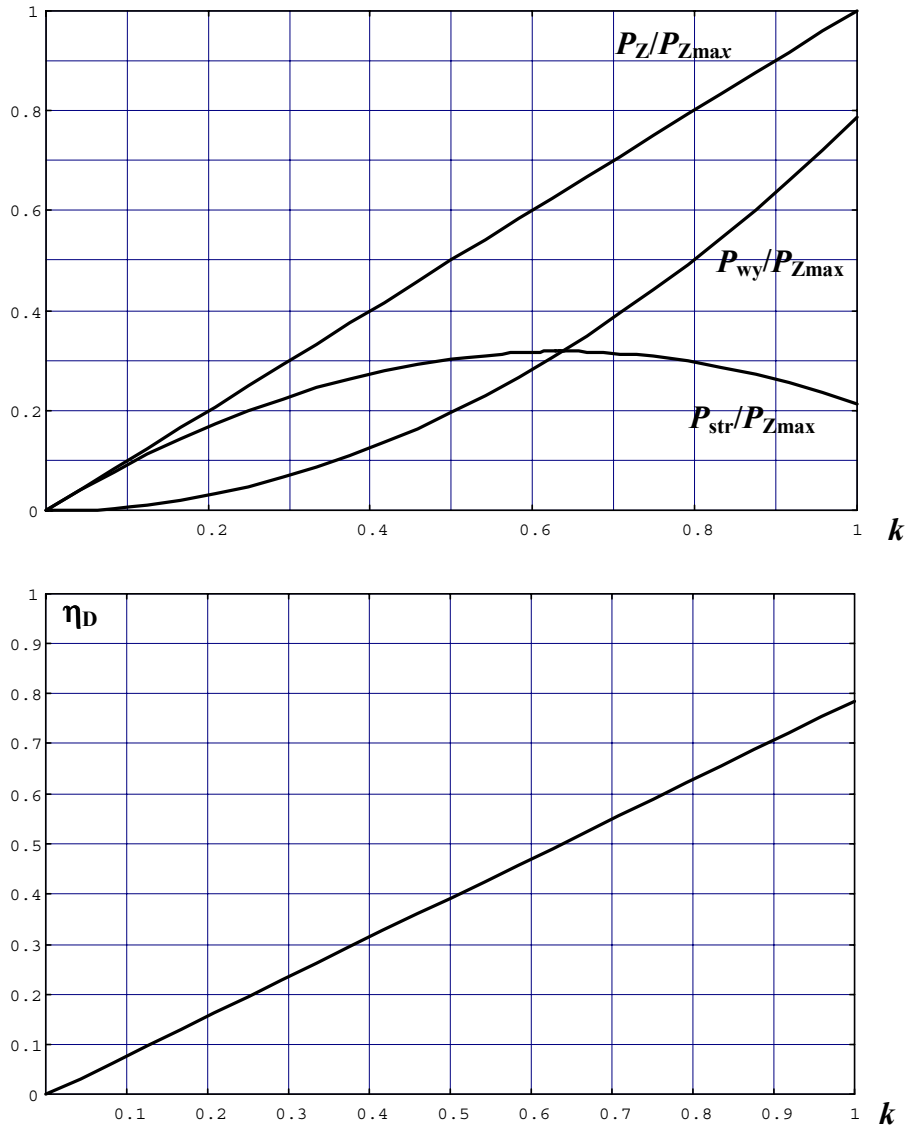
nym wysterowaniu. Dodatkowo przy zmniejszeniu wysterowania sprawność ta szybko maleje (z kwadratem wysterowania). Prąd pobierany przez wzmacniacz klasy A ze źródła zasilania ma bowiem stałą wartość niezależnie od wysterowania i mocy wyjściowej. Z tego względu wzmacniacze mocy klasy A są rzadko stosowane w nadajnikach radiowych.



Rys. 3.7. Klasy pracy wzmacniacza rezonansowego; a) klasa A, b) klasa B, c) klasa C, d) klasa AB

Spoczynkowy punkt pracy można także umieścić w początku charakterystyki $I_D(U_{GS})$ tranzystora (rys. 3.7b - klasa B). Wówczas przez pół okresu w. cz. prąd drenu jest proporcjonalny do sygnału wejściowego natomiast w drugiej połowie tego okresu jest równy zero. Dzięki temu prąd zasilania wzmacniacza klasy B (i moc zasilania) jest proporcjonalny do amplitudy sygnału wejściowego

(i do amplitudy napięcia wyjściowego) – rys. 3.8. W rezonansowym wzmacniaczu klasy B, mimo odkształcenia przebiegu prądu, napięcie na elemencie aktywnym i na wyjściu wzmacniacza ma przebieg sinusoidalnie zmienny – rys. 3.7b. Charakterystyka przejściowa $U_{wy}(U_{we})$ wzmacniacza klasy B jest liniowa a jego sprawność energetyczna jest znacznie wyższa niż w klasie A i przy pełnym wysterowaniu wynosi $\eta_{max}=78.5\%$. Sprawność ta maleje przy zmniejszaniu wysterowania ale zależność $\eta(U_{we})$ jest liniowa – rys. 3.8. Obowiązuje bowiem zależność $\eta=k \eta_{max}$.



Rys. 3.8. Charakterystyki idealnego wzmacniacza klasy B w funkcji wysterowania $k=U_{we}/U_{wemax}=U_{wy}/U_{wymax}$; P_Z – moc zasilania, P_{wy} – moc wyjściowa, P_{str} – moc strat w elementach aktywnych

Spoczynkowy punkt pracy można także umieścić w obszarze zatkania tranzystora – rys. 3.6.c. Taki wzmacniacz, nazywany wzmacniaczem klasy C, ma silnie nieliniową charakterystykę przejś-

ciową $U_{wy}(U_{we})$, gdyż, po pierwsze, nie reaguje na sygnały sterujące o małej amplitudzie. Po drugie nachylenie tej charakterystyki rośnie ze wzrostem wysterowania, ponieważ jednocześnie wzrasta szerokość impulsów prądu. Z tego względu wzmacniacz klasy C nie może być stosowany do wzmacniania sygnałów AM i SSB. Jego zaletą jest jednak wysoka sprawność energetyczna, $\eta_{max} > 78.5\%$, dlatego jest on chętnie wykorzystywany w nadajnikach z modulacją FM, w których amplituda sygnału wyjściowego jest stała.

Charakterystyka przejściowa rzeczywistego elementu aktywnego $I_D(U_{GS})$ nie jest odcinkowo-liniowa a jej nachylenie w początkowym odcinku zmienia się stopniowo – rys. 3.7d. Z tego względu charakterystyka przejściowa wzmacniacza klasy B z rzeczywistym elementem aktywnym jest nieliniowa. Jej nachylenie dla małych amplitud sygnału wejściowego jest znacznie mniejsze niż przy dużym wysterowaniu. Rzeczywisty wzmacniacz klasy B nie nadaje się więc do wzmacniania sygnałów z modulacją AM i SSB, gdyż powoduje zniekształcenia ich obwiedni i emisje niepożądane poza pasmem używanego kanału łączności. Z tego względu wzmacniacze liniowe muszą być budowane w klasie AB, w której prąd spoczynkowy elementu aktywnego jest niezerowy a punkt pracy umieszczony jest na początku liniowego odcinka charakterystyki przejściowej tego elementu (rys. 3.7b). Dzięki temu przy małym wysterowaniu wzmacniacz klasy AB pracuje w klasie A (prąd płynie przez cały okres. w. cz.) a przy dużym – w warunkach bliskich klasie B (kąąt przepływu prądu $180^\circ < 2\Theta_D < 360^\circ$). Spoczynkowy punkt pracy dobiera się tak, aby charakterystyka przejściowa była maksymalnie liniowa w całym zakresie możliwych wartości napięcia wejściowego i wyjściowego. Sprawność energetyczna wzmacniacza klasy AB rośnie ze wzrostem wysterowania, przy czym dla każdej wartości k jest mniejsza niż dla wzmacniacza klasy B.

3.3. Modulatory amplitudy o dużej mocy wyjściowej

Ze względu na zależność sprawności energetycznej η od wysterowania przy wzmacnianiu sygnałów z modulowaną amplitudą (AM) średnia sprawność wzmacniacza liniowego (klasy AB albo klasy A) za okres sygnału modulującego jest znacznie niższa od wartości maksymalnej. Dla idealnego wzmacniacza klasy B można wyprowadzić zależność:

$$\eta_{Bsr}(m) = \frac{\pi}{8} \left(1 + \frac{m^2}{2} \right) = \begin{cases} 0.75\eta_{Bmax} \approx 0.5890 & \text{dla } m = 1 \\ 0.5\eta_{Bmax} \approx 0.3927 & \text{dla } m = 0 \end{cases} \quad (3.3)$$

Przy wzmacnianiu sygnału zmodulowanego sygnałem mowy (równoważne $m_{sr} = 0.2 - 0.3$) sprawność idealnego wzmacniacza klasy B wynosi więc $\eta_{Bsr} = (0.40 - 0.41)$. Dla rzeczywistego wzmacniacza liniowego klasy AB maksymalna sprawność średnia za okres m. cz. ($m=1$) jest zwykle niższa niż 50% a sprawność przy wzmacnianiu sygnału zmodulowanego mową jest rzędu 30%.

Sygnal z modulacją amplitudy o wymaganej mocy można jednak wytworzyć bezpośrednio w specjalnym układzie modulatora dużej mocy, którego sprawność energetyczna jest znacznie większa od sprawności wzmacniacza liniowego klasy AB. W takim modulatorze wykorzystuje się fakt, że w niektórych rezonansowych wzmacniaczach mocy napięcie wyjściowe w. cz. (sinusoidalnie zmienne) jest funkcją napięcia zasilania. Modulację AM można więc zrealizować zasilając taki wzmacniacz mocy w. cz. sumą napięcia stałego E_{Z0} i napięcia modulującego $x(t)$ – rys. 3.9. Metoda ta jest w istocie uzmiennieniem napięcia zasilającego końcowy wzmacniacz mocy w. cz. nadajnika a taki modulator nazywany jest modulatorem drenowym (kolektorowym w przypadku wzmacniacza z tranzystorem bipolarnym albo anodowym w przypadku wzmacniacza lampowego).

Rezonansowy wzmacniacz mocy w. cz. w takim układzie modulacji amplitudy powinien charakteryzować się następującymi własnościami:

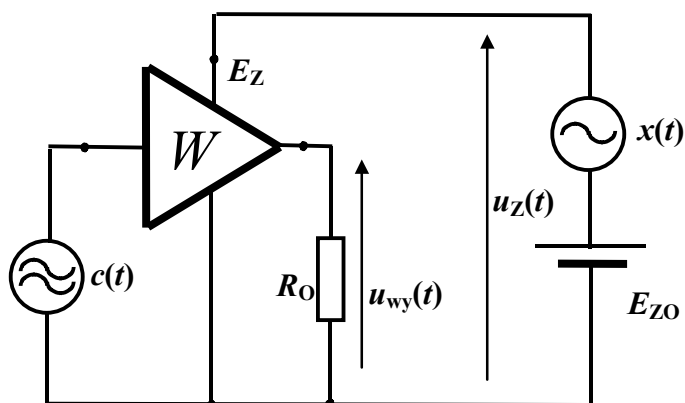
1. proporcjonalna zależność amplitudy napięcia wyjściowego w. cz. od napięciem zasilania

$$U_{wy} = k \cdot E_Z \quad (3.4)$$

2. wysoka sprawność energetyczna dla wszystkich wartości napięcia zasilania $0 - E_{Zmax}$.

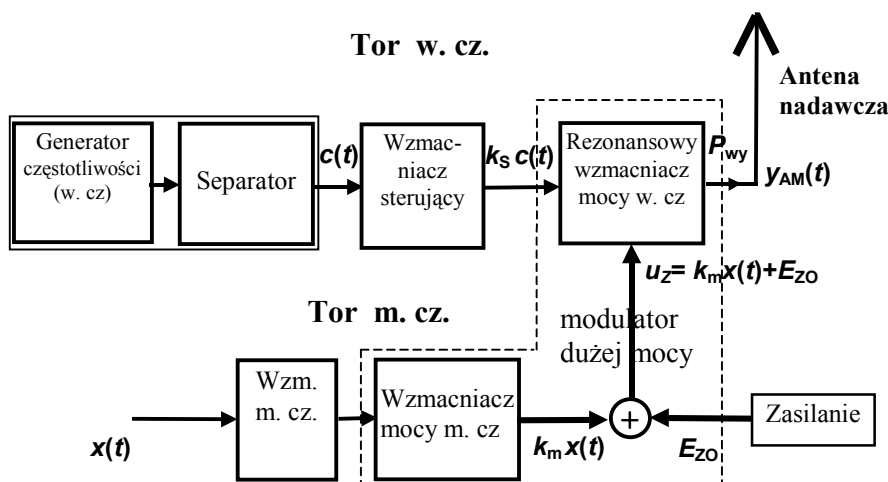
Wymagani (1) spełnione jest we wzmacniaczach rezonansowych klasy A, AB, B i C pracujących w stanie przesterowania (zwanym stanem przewzbudzonym), gdy element aktywny pracuje w warunkach silnie nieliniowych. Natomiast sprawność energetyczna jest najwyższa w przypadku wzmacniacza klasy C, dla którego w stanie przewzbudzonym sprawność ta mało zależy od napięcia zasilania i wynosi $\eta_{Cprz} \approx 80\%$.

Warunki (1) i (2) są również spełnione w przypadku tzw. przełącznikowych wzmacniaczy mocy (rezonansowe wzmacniacze klasy D, klasy DE i klasy E). Sprawność energetyczna tych wzmacniaczy jest jednak znacznie wyższa, bliska 100%, gdyż ich element aktywny pracuje jako klucz.



Rys. 3.9. Zasada modulacji amplitudy metodą uzmiennienia napięcia zasilania wzmacniacza mocy w. cz. (tzw. metoda modulacji drenowej (kolektorowej, anodowej)). W – rezonansowy wzmacniacz mocy w. cz. z elementem aktywnym pracujący nieliniowo, R_O – rezystancja obciążenia, E_{Z0} – składowa stała napięcia zasilania odpowiadająca poziomowi nośnej na wyjściu, $x(t)$ – źródło sygnału modulującego, $u_Z(t)$ – chwilowe napięcie zasilania

Istotną cechą układu modulacji AM z rys. 3.9 jest konieczność dysponowania źródłem sygnału informacyjnego $x(t)$ o dużej mocy wyjściowej, gdyż modulowany wzmacniacz mocy w. cz. W jest w części zasilany mocą dostarczaną przez zasilacz napięcia stałego E_{Z0} a w części – przez źródło sygnału $x(t)$. W przypadku radiotelefonów simpleksowych jako wzmacniacz mocy sygnału $x(t)$ może być wykorzystywany wzmacniacz końcowy m. cz. części odbiorczej (zasilający przy odbiorze głośnik radiotelefonu). Przy zastosowaniu drenowego modulatora AM dużej mocy schemat radiotelefonu różni się od układu podstawowego (rys. 3.10). Sprawność energetyczna takiego nadajnika AM jest znacznie wyższa niż nadajnika w wersji podstawowej (rys. 3.1, 3.2).

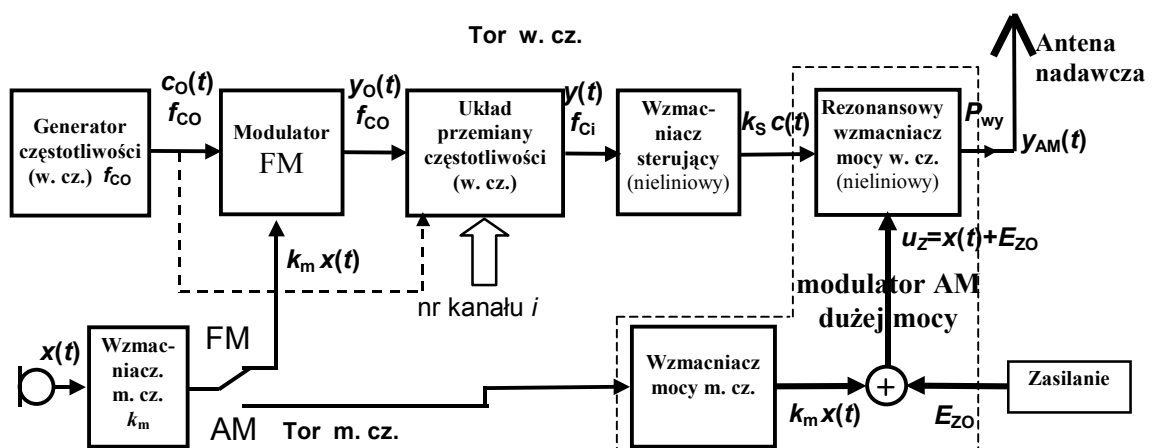


Rys. 3.10. Nadajnik AM z modulatorem dużej mocy

3.3. Układy nadajników radiotelefonów CB

3.3.1. Radiotelefony popularne

Typowe radiotelefony CB mają możliwość pracy z dwoma rodzajami modulacji: AM albo FM. Modulacja FM realizowana jest na poziomie małej mocy (rys. 3.1, 3.2). Przy tej modulacji wzmacnia-



Rys. 3.11. Schemat blokowy nadajnika popularnego radiotelefonu CB z modulacją AM i FM

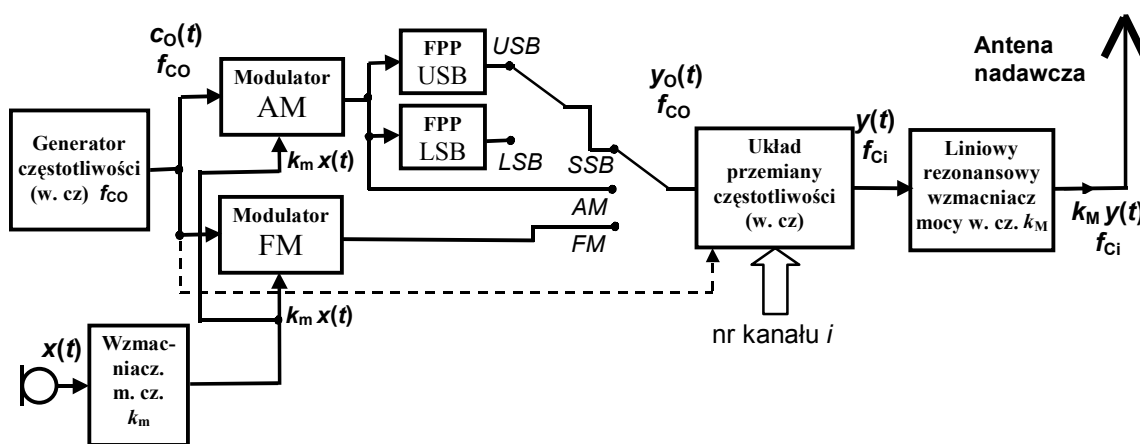
ny sygnał ma stałą amplitudę a zatem stopnie wzmacniacza mocy mogą być nieliniowe (klasa C albo klasa B). Dzięki temu są proste w konstrukcji i tanie a ich sprawność energetyczna jest wysoka. Muszą jedynie zapewnić wymaganą szerokość przenoszonego pasma (2.7MHz w radiotelefonach na wszystkie pasma – p. 3.2).

Modulację AM w radiotelefonach popularnych realizuje się w stopniu końcowym nadajnika w układzie z rys. 3.10, wskutek czego sprawność energetyczna jest również wysoka (ale niższa niż przy FM). Schemat blokowy takiego typowego nadajnika radiotelefonu CB przedstawiono na rys. 3.11. Przyjęty układ zapewnia wymaganą przez normy równość mocy nominalnej przy nadawaniu AM i FM (w Polsce - 4W).

3.3.2. Radiotelefony wyższej klasy

Radiotelefony CB wyższej klasy przystosowane są do pracy z modulacją AM, FM i SSB - rys. 3.12. Modulacja SSB realizowana jest na poziomie małej mocy, wskutek czego tor wzmacniaczy w. cz. musi składać się ze wzmacniaczy liniowych (klasy AB), które są trudne w konstrukcji, dość kosztowne i mają niską sprawność energetyczną. Ponieważ modulacja SSB wykonywana jest metodą filtracji (rys. 3), to elementem modulatora SSB, oprócz dwóch filtrów pasmowo-przepustowych (FPP-USB, FPP-LSB), jest modulator AM (małej mocy), który wykorzystywany jest także do realizacji właściwej modulacji AM.

Liniowy wzmacniacz mocy musi zapewnić dopuszczany przez normy poziom mocy w szczycie modulacji SSB, przy czym w Polsce $P_{PEPmax}=12W$. Ten sam wzmacniacz wykorzystywany jest także przy AM i FM. Przy AM dla nominalnej mocy $P_{AMnom}=4W$ (nośna) oznacza to konieczność ograniczenia maksymalnej głębokości modulacji (teoretycznie do $m_{max} \approx 73\%$ ⁸ - p. 2.2.1, wzór 16). Przy FM wzmacniacz liniowy oddaje w sposób ciągły dozwoloną przez normy moc $P_{FMnom}=4W$.



Rys. 3.12. Schemat blokowy nadajnika radiotelefonu CB wyższej klasy pracującego z modulacją AM, FM i SSB; $f_{co}=10.7MHz$

⁸ W praktyce maksymalna głębokość modulacji wynosi $m_{max}=80\%$.

Skutkiem takiego rozwiązania jest obniżenie sprawności energetycznej nadajnika przy pracy z modulacją AM i FM w stosunku do rozwiązania z rys. 3.11. Dla idealnego wzmacniacza klasy B sprawność ta dla modulacji AM i transmisji mowy wynosi ok. $\eta_{Bsr}=(0.40 - 0.41)$, a dla modulacji FM - $\eta_{Bmax}/2$ (ok. 39%) – wzór 3.3. W czasie nadawania średni pobór mocy przy obu tych modulacjach jest stały (odpowiada nominalnej mocy wyjściowej 4W).

Natomiast przy wzmacnianiu sygnału SSB przenoszącego sygnał mowy średni pobór mocy przez wzmacniacz końcowy jest niższy niż przy wzmacnianiu AM albo FM. Sygnał wyjściowy SSB jest bowiem zależny od chwilowej wartości przesyłanego sygnału informacyjnego, w szczególności w chwilach ciszy sygnał SSB jest zerowy ($y_{SSB}=0$). Dzięki temu w chwilach ciszy wzmacniacz ten nie jest wysterowany i nie pobiera mocy z zasilacza (w przypadku idealnego wzmacniacza klasy B) lub jego pobór mocy znacznie spada (wzmacniacz klasy AB).

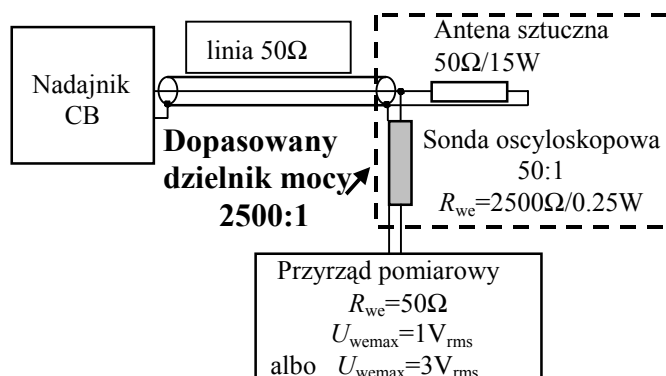
4. CZĘŚĆ POMIAROWA

4.1. Warunki wykonywania pomiarów

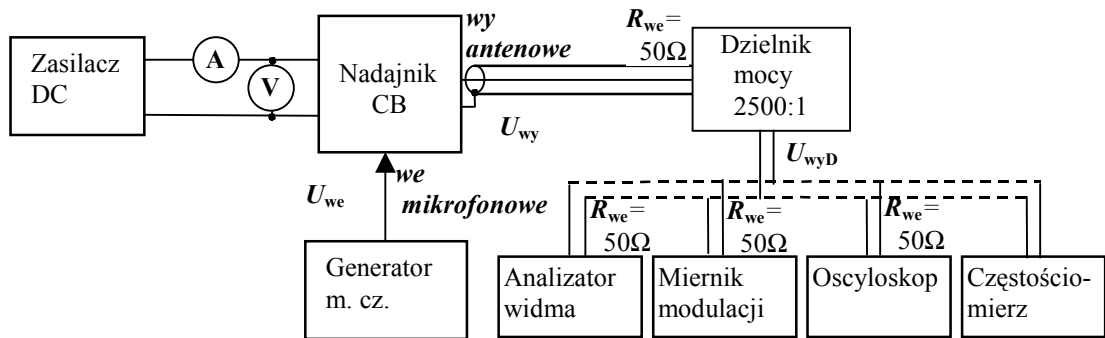
W ćwiczeniu badane są właściwości radiotelefonów CB wyższej klasy typu GEORGE produkowanych przez firmę President (Francja) pracujących w trybie nadawania. Radiotelefony te przystosowane są do pracy z modulacją AM, FM i SSB (górną albo dolną wstęgą) współpracując z anteną o impedancji 50Ω . Są to radiotelefony samochodowe, przystosowane do zasilania z instalacji elektrycznej samochodu o napięciu ok. 12V. W czasie ćwiczenia radiotelefony te zasilane są z sieciowego zasilacza stabilizowanego, którego napięcie wyjściowe powinno być równe nominalnemu napięciu zasilania radiotelefonu badanego w danym stanowisku pomiarowym. Przed połączeniem radiotelefonu z zasilaczem należy sprawdzić zgodność napięcia wyjściowego tego zasilacza z wartością podaną w instrukcji radiotelefonu!

Nadajniki badanych radiotelefonów w czasie ćwiczenia obciążone są anteną sztuczną w postaci rezystora 50Ω o mocy maksymalnej 15W (praca ciągła), którego własności dynamiczne można pominąć dla sygnałów o częstotliwościach od 0 do 500MHz ($WFS < 1.15$). **Uwaga! Zabronione jest odłączanie obciążenia od radiotelefonu podczas trwania ćwiczenia!!! Włączenie nadawania przy odłączonym obciążeniu spowoduje bowiem zniszczenie wzmacniacza mocy w. cz.**

Antena sztuczna wraz z sondą oscyloskopową tworzą dzielnik mocy (rys. 4.1) konieczny do bezpiecznego wykonania pomiarów nadajnika za pomocą miernika parametrów modulacji, oscyloskopu w. cz. i analizatora widma. Rezystancja wejściowa tych przyrządów wynosi bowiem 50Ω a dopuszczalne napięcie wejściowe – odpowiednio $1V_{rms}$ (analizator widma) i $3V_{rms}$ (oscyloskop i miernik parametrów modulacji). Maksymalna moc tracona w wejściu tych przyrządów wynosi więc odpowiednio 20mW i 180 mW a zatem żaden z tych przyrządów nie może być dołączony bezpośrednio do wyjścia nadajnika badanego radiotelefonu (pomimo dopasowania obciążenia!).



Rys. 4.1. Zastosowany w ćwiczeniu układ dzielnika mocy wyjściowej nadajnika radiotelefonu CB o impedancji wejściowej 50Ω ograniczający **maksymalną mierzoną moc ciągłą do 12.5W**



Rys. 4.2. Schemat układu pomiarowego

Sonda wykorzystywana w dzielniku mocy ma stosunek podziału napięcia 50:1 (po obciążeniu rezystancją 50Ω), rezystancję wejściową 2500Ω i dopuszczalną moc strat $0.25W$. Zapewnia to bezpieczne pomiary przy średniej mocy wyjściowej nadajnika do $12.5W$.

4.2. Wykonywane pomiary

Przed rozpoczęciem pomiarów należy zapoznać się z instrukcją obsługi radiotelefonu badanego w danym stanowisku pomiarowym, w tym z przeznaczeniem poszczególnych pokręteł i klawiszy regulacyjnych i sterujących.

Uwaga 1: Radiotelefon należy przełączać w stan NADAWANIE tylko na czas trwania danego pomiaru!!!

Uwaga 2: W radiotelefonie bez homologacji regulator mocy wyjściowej ustawić w pozycji zapewniającej dla FM i AM (bez modulacji) moc na poziomie $P_{wy\ nom}=4W$.

4.2.1. Oscyloskopowa obserwacja przebiegów czasowych sygnału wyjściowego nadajnika sterowanego z mikrofonu sygnałem mowy przy różnych rodzajach modulacji.

Obejrzyć na oscyloskopie przebiegi czasowe sygnału wyjściowego nadajnika przy różnych rodzajach modulacji (AM, FM, SSB) w warunkach, gdy do mikrofonu mówimy w sposób ciągły wybraną samogłoskę.

- Zaobserwować działanie układu kompresji głębokości modulacji AM.
- Zaobserwować różnice w kształcie obwiedni dla danej samogłoski przy modulacji AM i SSB przy emisji dolnej (LSB) i górnej (USB) wstęgi bocznej.
- Zmierzyć prąd zasilania i moc pobieraną przez radiotelefon z zasilacza DC podczas nadawania dla trzech różnych poziomów natężenia dźwięku mówionego do mikrofonu (cicho, średnio i głośno) przy różnych rodzajach modulacji (AM, FM, SSB przy emisji górnej wstęgi bocznej (USB) i dolnej wstęgi bocznej (LSB)). Określić zależność prądu pobieranego z zasilacza DC od

głośności mowy, w tym na pobór prądu w chwilach ciszy przy różnych rodzajach modulacji (AM, FM, SSB przy emisji górnej wstęgi bocznej (USB) i dolnej wstęgi bocznej (LSB)).

4.2.2. Pomiar mocy wyjściowej fali nośnej w poszczególnych kanałach pasma C

Za pomocą oscyloskopu w. cz. zmierzyć napięcie nośnej w poszczególnych kanałach pasma C przy modulacji FM albo przy modulacji AM i skreconym do zera regulatorze wzmocnienia w kanale mikrofonowym radiotelefonu. Obliczyć wartość mocy wyjściowej w poszczególnych kanałach i porównać ją z wartością nominalną.

4.2.3. Pomiar częstotliwości nośnej w poszczególnych kanałach pasma C

Zmierzyć częstotliwość nośną w poszczególnych kanałach pasma C przy włączonej modulacji AM przy skreconym do zera regulatorze wzmocnienia w kanale mikrofonowym radiotelefonu. Pomiar wykonać za pomocą częstotlicznika cyfrowego na wyjściu dzielnika mocy. Zmierzone częstotliwości porównać z wartościami nominalnymi.

4.2.4. Pomiar charakterystyk przy modulacji AM:

Do wejścia mikrofonowego radiotelefonu dołączyć wyjście generatora sygnału akustycznego a do wyjścia dzielnika mocy – miernik parametrów modulacji. Pomiar napięcia wejściowego wykonać jako pomiar siły elektromotorycznej E_g generatora za pomocą wewnętrznego woltomierza AC.

Wzmocnienie w kanale mikrofonu radiotelefonu ustawić na takim poziomie, aby układ kompresji dynamiki sygnału wejściowego zaczął działać przy $E_{we}=8\text{mV}$ (ograniczając wartość m do około 80%).

1. Zmierzyć zależność współczynnika głębokości modulacji m i sprawności energetycznej radiotelefonu η od napięcia wejściowego m. cz. U_{we} przy częstotliwości sygnału wejściowego $f_{we}=1\text{kHz}$.
 - Dla każdej wybranej wartości U_{we} zmierzyć współczynnik głębokości modulacji m i prąd I_Z pobierany przez radiotelefon.
 - Pomiar m i I_Z wykonać dla $E_{we} \leq 10\text{mV}$ (korzystając z zakresów 3mV i 10mV).
 - Na podstawie zależności $I_Z(U_{we})$ oraz $m(U_{we})$ wyznaczyć zależność sprawności energetycznej nadajnika $\eta = P_{wy}/P_{zas}$ od współczynnika głębokości modulacji m . Moc wyjściową obliczyć na podstawie zmierzonej amplitudy nośnej i wartości współczynnika m .
 - Wykreślić charakterystyki $m(U_{we})$ i $\eta(m)$

2. Zmierzyć zależność współczynnika głębokości modulacji m i sprawności energetycznej radiotelefonu η od częstotliwości sygnału wejściowego f_{we} w zakresie **200Hz – 4kHz** przy $U_{we} = \text{const}$ odpowiadającym $m = 50\%$ dla $f_{we} = 1\text{kHz}$.
 - Dla każdej wybranej wartości f_{we} zmierzyć współczynnik głębokości modulacji m i prąd I_Z pobierany przez radiotelefon.
 - Na podstawie zależności $I_Z(f_{we})$ i $m(f_{we})$ wyznaczyć zależność sprawności energetycznej nadajnika $\eta = P_{wy}/P_{zas}$ od częstotliwości sygnału wejściowego przy $E_{we} = \text{const}$. Moc wyjściową obliczyć na podstawie zmierzonej amplitudy nośnej i wartości współczynnika m
 - Wykreślić charakterystyki $m(f_{we})$ i $\eta(f_{we})$ w skali logarytmicznej na osi f_{we} .
3. Porównać zmierzone charakterystyki $m(U_{we})$ i $m(f_{we})$ z zależnościami w przypadku idealnym. Wyjaśnić przyczyny rozbieżności.

4.2.5. Pomiar charakterystyk przy modulacji jednowstęgowej

Do wejścia mikrofonowego radiotelefonu dołączyć wyjście generatora sygnału akustycznego a do wyjścia dzielnika mocy – oscyloskop w. cz. Pomiar napięcia wejściowego wykonać jako pomiar siły elektromotorycznej E_g generatora za pomocą wewnętrznego woltomierza AC. Wzmocnienie w kanale mikrofonu radiotelefonu ustawić na takim poziomie, aby układ kompresji dynamiki sygnału wejściowego zaczynał działać przy $E_{we} = 8\text{mV}$ (ograniczając wzrost napięcia wyjściowego w. cz. nadajnika).

1. Zmierzyć zależność napięcia wyjściowego w. cz. U_{wy} i sprawności energetycznej radiotelefonu η od napięcia wejściowego m. cz. U_{we} przy częstotliwości sygnału wejściowego $f_{we} = 1\text{kHz}$
 - Dla każdej wybranej wartości U_{we} zmierzyć napięcie wyjściowe U_{wy} i prąd I_Z pobierany przez radiotelefon.
 - Na podstawie zależności $I_Z(U_{we})$ oraz $U_{wy}(U_{we})$ obliczyć zależność sprawności energetycznej nadajnika $\eta = P_{wy}/P_{zas}$ od napięcia wejściowego U_{we} przy $f_{we} = 1\text{kHz}$
 - Wykreślić charakterystyki $U_{wy}(U_{we})$ i $\eta(U_{we})$
2. Zmierzyć zależność napięcia wyjściowego w. cz. U_{wy} i sprawności energetycznej radiotelefonu η od częstotliwości sygnału wejściowego f_{we} w zakresie **200Hz – 4kHz** przy $U_{we} = \text{const}$ odpowiadającym napięciu wyjściowemu $0.5U_{wy\text{max}}$ przy $f_{we} = 1\text{kHz}$.
 - Dla każdej wybranej częstotliwości zmierzyć napięcie U_{wy} i prąd I_Z pobierany przez radiotelefon,

- Obliczyć zależność sprawności energetycznej nadajnika $\eta = P_{wy}/P_{zas}$ od częstotliwości sygnału wejściowego przy $U_{we} = \text{const}$
 - Wykreślić charakterystyki $U_{wy}(f_{we})$, $\eta(f_{we})$ w skali logarytmicznej na osi f_{we} .
 - Zaobserwować kształt pasożytniczej obwiedni sygnału wyjściowego nadajnika przy różnych częstotliwościach sygnału wejściowego.
3. Porównać zmierzone zależności $U_{wy}(U_{we})$ i $U_{wy}(f_{we})$ z zależnościami w przypadku idealnym. Wyjaśnić przyczyny różnic.
 4. Na podstawie zmierzonej zależności $U_{wy}(U_{we})$ i $\eta(U_{we})$ zidentyfikować klasę, w której pracuje końcowy wzmacniacz mocy nadajnika.
 5. Porównać przebieg charakterystyk zmierzonych dla modulacji SSB i modulacji AM.
 6. Porównać moc szczytową (PEP) nadajnika przy modulacji SSB i modulacji AM.

4.2.6. Pomiar charakterystyk przy modulacji częstotliwości

Do wejścia mikrofonowego radiotelefonu dołączyć wyjście generatora sygnału akustycznego a do wyjścia dzielnika mocy – miernik parametrów modulacji. Pomiar napięcia wejściowego wykonać jako pomiar siły elektromotorycznej E_g generatora za pomocą wewnętrznego woltomierza AC. Wzmocnienie w kanale mikrofonu radiotelefonu ustawić na takim poziomie, aby układ kompresji dynamiki sygnału wejściowego zaczynał działać przy $E_{we} = 8\text{mV}$ (ograniczając wartość dewiacji ΔF).

1. Zmierzyć zależność dewiacji ΔF w napięciu wyjściowym w. cz. od napięcia wejściowego m. cz. U_{we} przy częstotliwości sygnału wejściowego $f_{we} = 1\text{kHz}$
 - Dla każdej wybranej wartości U_{we} zmierzyć dewiację ΔF i prąd I_Z pobierany przez radiotelefon.
 - Wykreślić charakterystyki $\Delta F(U_{we})$ i $I_Z(U_{we})$
2. Zmierzyć zależność dewiacji ΔF od częstotliwości sygnału wejściowego f_{we} w zakresie **200Hz – 4kHz** przy $U_{we} = \text{const}$ odpowiadającym dewiacji $0.5\Delta F_{\text{max}}$ przy $f_{we} = 1\text{kHz}$.
 - Dla każdej wybranej częstotliwości zmierzyć napięcie U_{wy} i prąd I_Z pobierany przez radiotelefon,
 - Wykreślić charakterystyki $\Delta F(f_{we})$, $I_Z(f_{we})$ w skali logarytmicznej na osi f_{we} .
3. Porównać zmierzone zależności $\Delta F(U_{we})$ i $\Delta F(f_{we})$ z zależnościami w przypadku idealnym. Wyjaśnić przyczyny różnic.

4.2.7. Pomiar mocy w kanałach sąsiednich dla wybranego kanału w paśmie C

Do wyjścia dzielnika mocy wyjściowej dołączyć analizator widma. Regulator wzmacnienia w kanale mikrofonowym radiotelefonu skrócić do zera ($U_{we}=0$). Dla wybranego kanału z pasma C zmierzyć moc sygnału pasożytniczego w dwóch kanałach sąsiednich. Pomiar wykonać dla wszystkich możliwych modulacji. Sprawdzić, czy nie są przekroczone wartości dopuszczalne ($20\mu W$).

4.2.7. Pomiar składowych niepożądanych w sygnale wyjściowym

Do wyjścia dzielnika mocy wyjściowej dołączyć analizator widma. Regulator wzmacnienia w kanale mikrofonowym radiotelefonu skrócić do zera ($U_{we}=0$). Dla wybranego kanału z pasma C zmierzyć widmo sygnału wyjściowego dla wszystkich możliwych modulacji. Sprawdzić, czy nie jest przekroczona wartość dopuszczalna ($0.25\mu W$ w paśmie do 1GHz).

4.3. Literatura pomocnicza:

1. S. Haykin: „Systemy telekomunikacyjne”, t. 1, 2, WKiŁ, Warszawa 1998.
2. B. P. Lathii: „Systemy telekomunikacyjne”, WNT, Warszawa 1972.
3. S. Hahn: „Teoria modulacji i detekcji”, WPW, Warszawa 1981.
4. E. W. Pappenfus, W. B. Bruene, E. O. Schoenke: „Technika jednowstęgowa”, WNT, Warszawa 1968.
5. A. Janeczek: „CB radio”, WKiŁ, Warszawa 1993.

4.4. Tematy kolokwium wstępnego

1. Zalety i wady łączności simpleksowej.
2. Zalety i wady modulacji AM w łączności CB.
3. Zalety i wady modulacji FM w łączności CB.
4. Zalety i wady modulacji SSB w łączności CB.
5. Uzasadnić, dlaczego w radiotelefonach CB z modulacją AM i SSB szerokość przenoszonego pasma sygnału informacyjnego przy modulacji SSB jest szersza (od góry) niż przy modulacji AM.
6. Układy nadajników z modulacją AM oraz ich zalety i wady.
7. Budowany jest radiotelefon CB z modulacją AM, FM, SSB.
 - a) W którym stopniu nadajnika należy zrealizować modulację AM?
 - b) Czy stopień końcowy tego nadajnika musi być wzmacniaczem liniowym?
8. Schemat blokowy nadajnika z modulacją SSB.

9. Ile wynosi moc w szczycie modulacji (PEP) dla nadajnika radiotelefonu CB z modulacją AM dla $m_{max}=80\%$ (a) i dla $m_{max}=100\%$?
10. Dlaczego zasięg nadajnika z modulacją SSB jest większy niż zasięg nadajnika z modulacją AM przy takiej samej mocy szczytowej PEP?
11. Budowany jest radiotelefon CB z modulacją AM, FM.
 - a) W którym stopniu nadajnika należy zrealizować modulację AM?
 - b) Czy stopień końcowy tego nadajnika musi być wzmacniaczem liniowym?
12. Definicje nominalnej mocy wyjściowej nadajników AM, FM i SSB.
13. Charakterystyki idealnego wzmacniacza klasy B.
14. Dlaczego rzeczywiste wzmacniacze liniowe muszą pracować w klasie AB albo w klasie A?
15. Dlaczego charakterystyka rezonansowego wzmacniacza klasy C jest nieliniowa?
16. Pożądany przebieg charakterystyk $m(U_{we})$, $m(f_{we})$ dla modulatora amplitudy.
17. Pożądany przebieg charakterystyk $U_{wy}(U_{we})$, $U_{wy}(f_{we})$ dla modulatora SSB.
18. Pożądany przebieg charakterystyk $\Delta F(U_{we})$, $\Delta F(f_{we})$ dla modulatora częstotliwości.

DODATEK 1. ZAKRESY CZĘSTOTLIWOŚCI KANAŁÓW ŁĄCZNOŚCI W SYSTEMIE CB W POLSCE

Dolne częstotliwości graniczne kanałów w poszczególnych pasmach systemu CB w Polsce.

	A	B	C	D	E	F
1	26 060	26 510	26 960	27 410	27 860	28 310
2	26 070	26 520	26 970	27 420	27 870	28 320
3	26 080	26 530	26 980	27 430	27 880	28 330
3A	26 090	26 540	26 990	27 440	27 890	28 340
4	26 100	26 550	27 000	27 450	27 900	28 350
5	26 110	26 560	27 010	27 460	27 910	28 360
6	26 120	26 570	27 020	27 470	27 920	28 370
7	26 130	26 580	27 030	27 480	27 930	28 380
7A	26 140	26 590	27 040	27 490	27 940	28 390
8	26 150	26 600	27 050	27 500	27 950	28 400
9	26 160	26 610	27 060	27 510	27 960	28 410
10	26 170	26 620	27 070	27 520	27 970	28 420
11	26 180	26 630	27 080	27 530	27 980	28 430
11A	26 190	26 640	27 090	27 540	27 990	28 440
12	26 200	26 650	27 100	27 550	28 000	28 450
13	26 210	26 660	27 110	27 560	28 010	28 460
14	26 220	26 670	27 120	27 570	28 020	28 470
15	26 230	26 680	27 130	27 580	28 030	28 480
15A	26 240	26 690	27 140	27 590	28 040	28 490
16	26 250	26 700	27 150	27 600	28 050	28 500
17	26 260	26 710	27 160	27 610	28 060	28 510
18	26 270	26 720	27 170	27 620	28 070	28 520
19	26 280	26 730	27 180	27 630	28 080	28 530
19A	26 290	26 740	27 190	27 640	28 090	28 540
20	26 300	26 750	27 200	27 650	28 100	28 550
21	26 310	26 760	27 210	27 660	28 110	28 560
22	26 320	26 770	27 220	27 670	28 120	28 570
23	26 350	26 800	27 250	27 700	28 150	28 600
24	26 330	26 780	27 230	27 680	28 130	28 580
25	26 340	26 790	27 240	27 690	28 140	28 590
26	26 360	26 810	27 260	27 710	28 160	28 610
27	26 370	26 820	27 270	27 720	28 170	28 620
28	26 380	26 830	27 280	27 730	28 180	28 630
29	26 390	26 840	27 290	27 740	28 190	28 640
30	26 400	26 850	27 300	27 750	28 200	28 650
31	26 410	26 860	27 310	27 760	28 210	28 660
32	26 420	26 870	27 320	27 770	28 220	28 670
33	26 430	26 880	27 330	27 780	28 230	28 680
34	26 440	26 890	27 340	27 790	28 240	28 690
35	26 450	26 900	27 350	27 800	28 250	28 700
36	26 460	26 910	27 360	27 810	28 260	28 710
37	26 470	26 920	27 370	27 820	28 270	28 720
38	26 480	26 930	27 380	27 830	28 280	28 730
39	26 490	26 940	27 390	27 840	28 290	28 740
40	26 500	26 950	27 400	27 850	28 300	28 750

Literą „A” oznaczono „dziury kanałowe”.