

Przykład liczbowy. Wyznamy natężenie pola wytwarzanego w odległości $R = 4000$ km przez nadajnik o mocy 500 kW pracujący przy częstotliwości 16,67 kHz. Sprawność anteny przyjmijmy równą 8%.

Moc promieniowana, przy uwzględnieniu sprawności anteny

$$P = 0,08 \cdot 500 = 40 \text{ kW}$$

Kąt Θ obliczymy jako stosunek odległości R mierzonej wzdłuż powierzchni Ziemi do promienia kuli ziemskiej

$$\Theta = \frac{R}{a} = \frac{4000}{6370} = 0,629 \text{ rad} = 36^\circ$$

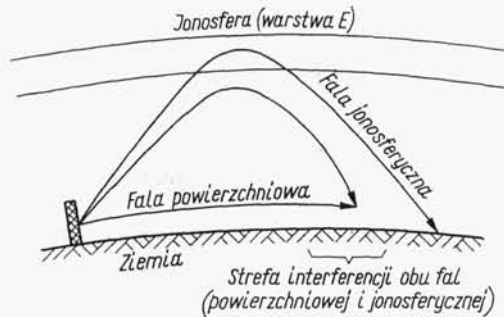
Częstotliwości 16,67 kHz odpowiada fala $\lambda = 18$ km. Wstawiając powyższe wartości do wzoru (15-1) znajdujemy

$$E_{sk} = \frac{300 \sqrt{40}}{4000} \sqrt{\frac{0,628}{\sin 36^\circ}} e^{-\frac{0,0014}{180,6} 4000} = 183 \text{ } \mu\text{V/m}$$

Postępując analogicznie dla innych wartości R wyznaczmy zależność natężenia pola od odległości (rys. 16-5).

16.2. ROZCHODZENIE SIĘ FAL ŚREDNICH

Fale średnie obejmują zakres częstotliwości od 100 kHz do 1,5 MHz (3000... 200 m). Fale te — ze względu na szerokie zastosowanie w radiofonii — noszą również nazwę fal radiofonicznych. Jeśli nadajnik i odbiornik znajdują się na powierzchni ziemi, to w przypadku ogólnym, w zakresie fal średnich, do anteny odbiorczej dociera fala powierzchniowa, jak również fala jonosferyczna (rys. 16-6).



Rys. 16-6. Fala powierzchniowa i fala jonosferyczna przy rozchodzeniu się fal średnich

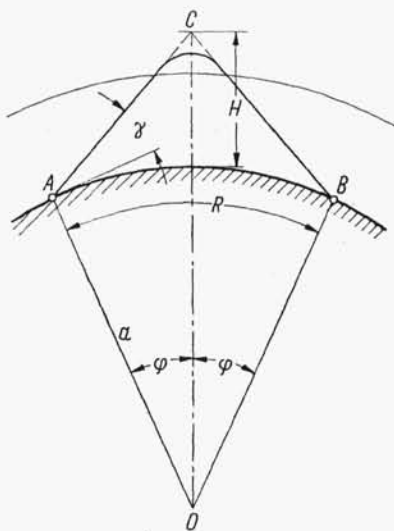
Gęstość elektronowa obszaru D jonosfery nie jest wystarczająca do odbicia fal średnich, które wnikają do jonosfery i są odbijane przez warstwę E . Jednakże w ciągu dnia współczynnik absorpcji dolnego obszaru jonosfery jest dla fal średnich tak duży, że — praktycznie biorąc — fala jonosferyczna nie występuje. W tych warunkach o zasięgu dziennym na falach średnich decyduje natężenie pola fali powierzchniowej. Metody obliczania natężenia pola fali powierzchniowej poznaliśmy w p. 12.5 i 12.6.

Przy stałej mocy wypromieniowanej przez antenę nadawczą zasięg na fali powierzchniowej maleje wraz z długością fali oraz zależy od konduktywności gruntu. Największy zasięg uzyskuje się nad morzem, a najmniejszy — nad gruntem o małej konduktywności (piaski, tereny miejskie).

Z zapadnięciem zmroku — wskutek szybko postępującej rekombinacji w obszarze D — tłumienie fali jonosferycznej maleje tak, że w ciągu nocy o zasięgu fal średnich decyduje fala jonosferyczna.

16.2.1. NATĘŻENIE POŁA FALI JONOSFERYCZNEJ

Absorpcja fali wchodzącej ukośnie do jonosfery jest w porze nocnej na tyle mała, że można ją w ogóle pominąć w przybliżonych obliczeniach natężenia pola [37, 46]. Rozpatrzmy rys. 16-7 przedstawiający drogę fali wypromieniowanej pod kątem



Rys. 16-7. Droga fali jonosferycznej odbijającej się od warstwy E

elewacji γ przez antenę o charakterystyce promieniowania $F(\theta)$ umieszczoną na powierzchni ziemi w punkcie A . Dla uproszczenia zamienimy krzywoliniowy odcinek trajektorii fali wewnątrz warstwy E linią łamaną. Punkt załamania C jest więc wysokością pozorną warstwy E .

Z prostych zależności geometrycznych wynika, że całkowita długość drogi od anteny nadawczej A do anteny odbiorczej B

$$l = 2 \sqrt{(a+H)^2 + a^2 - 2a(a+H)\cos\varphi}$$

lub po przekształceniu

$$l = 2 \sqrt{4a(a+H)\sin^2 \frac{\varphi}{2} + H^2} \quad (16-3)$$

przy czym:

a — promień kuli ziemskiej;

φ — połowa kąta środkowego, odpowiadającego trasie o długości R .

Natężenie pola w punkcie odbioru B określamy jako natężenie pola fali nietłumionej rozchodzącej się wzdłuż drogi l . Ponieważ istotna dla odbioru jest składowa pionowa fali odbitej padającej ukośnie, więc określimy od razu tę składową. Biorąc pod uwagę, że składowa pionowa natężenia pola w punkcie odbioru podwaja się wskutek odbicia od ziemi, otrzymujemy

$$E = \frac{2\sqrt{60PG_1}}{l} \cos\gamma F(\Theta) \quad (16-4)$$

przy czym:

G_1 — zysk energetyczny anteny nadawczej względem źródła izotropowego;

P — moc doprowadzona do anteny.

Dogodniej jest określić natężenie pola w zależności od długości trasy wzdłuż ziemi R oraz od wysokości warstwy odbijającej H . Ponieważ przy jednym skoku fali wchodzi w grę odległości nie przekraczające 15 000 km, więc możemy pominąć krzywiznę ziemi i w miejsce zależności (16-3) zapisać:

$$l \approx \sqrt{R^2 + 4H^2} \quad (16-5)$$

$$\cos\gamma \approx \frac{R}{\sqrt{R^2 + 4H^2}} \quad (16-6)$$

Podstawiając zależności (16-5) i (16-6) do wzoru (16-4) otrzymujemy

$$E = \frac{\sqrt{240PG_1}}{R^2 + 4H^2} RF(\Theta) \quad (16-7)$$

Wyrażając moc doprowadzoną do anteny w kilowatach, odległość R i wysokość H — w kilometrach oraz natężenie pola w miliwoltach na metr, wzór (16-7) przyjmie następującą postać:

$$E_{sk} = \frac{347\sqrt{PG_1}}{R^2 + 4H^2} RF(\Theta) \quad (16-8)$$

W przypadku krótkiej bezstratnej anteny, której charakterystyka promieniowania $F(\Theta) = \sin\Theta = \cos\gamma$ i której zysk energetyczny jest równy 3, ostatnia zależność przyjmuje postać

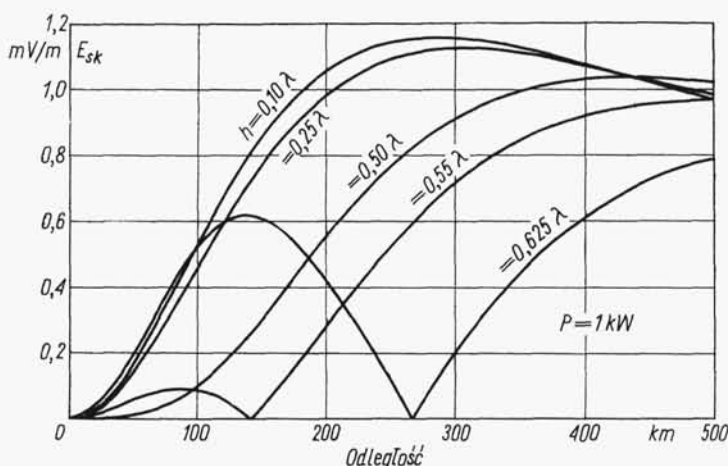
$$E_{sk} = \frac{600\sqrt{P} R^2}{\sqrt{(R^2 + 4H^2)^3}} \quad (16-9)$$

Na rysunku 16-8 przedstawiono teoretyczne krzywe natężenia pola fali jonosferycznej dla anten pionowych o różnej wysokości. Jak widać, w małych odleg-

łościach od anteny natężenie pola jest małe, ponieważ mała jest wartość funkcji $F(\theta)$, dla dużych kątów elewacji. W miarę wzrostu odległości natężenie pola początkowo wzrasta, a następnie maleje, ponieważ wzrost $F(\theta)$ nie jest już w stanie przeważać zmniejszania się pola pod wpływem wzrastającej odległości. W przypadku anteny krótkiej maksimum natężenia pola przypada w odległości

$$R = 2\sqrt{2}H$$

Przy wysokości warstwy E rzędu 100...120 km maksimum natężenia pola wypada w odległości ok. 300 km.



Rys. 16-8. Teoretyczne krzywe natężenia pola fali jonosferycznej dla anten pionowych o różnych wysokościach

16.2.2. KRZYWE PROPAGACJI JONOSFERYCZNEJ FAL ŚREDNICH

Fluktuacje jonosfery oraz interferencja fal rozchodzących się różnymi sposobami (propagacja jednoskokowa, dwuskokowa itp.) wywołują ciągłe wahania natężenia pola fali jonosferycznej których nie uwzględnia wzór (16-8). W rzeczywistych warunkach natężenie pola fal jonosferycznych w rozpatrywanym zakresie częstotliwości należy traktować statystycznie. Charakterystycznymi wielkościami umożliwiającymi ocenę wartości natężenia pola fal średnich w porze nocnej są:

- *mediana*, czyli poziom przekraczany w ciągu 50% czasu;
- *wartość quasi-maksymalna*, czyli poziom przekraczany w ciągu 5% czasu.

Pierwsza z tych wielkości ma znaczenie z punktu widzenia wykorzystania fal jonosferycznych do nadawań dalekosiężnych, druga zaś — z punktu widzenia zakłóceń interferencyjnych.

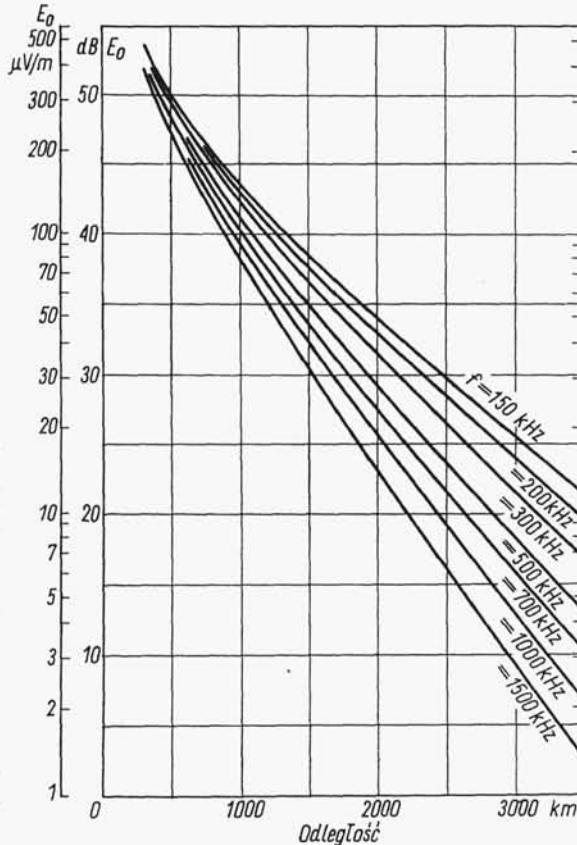
Do obliczeń natężenia pola fali jonosferycznej w sensie statystycznym służą krzywe propagacji opracowane przez CCIR [9].

Medianę natężenia pola fali jonosferycznej określa następująca zależność wyrażona w dB względem poziomu $1 \mu\text{V/m}$

$$E_H(50) = E_0 + \Delta_A + P + \Delta_I + \Delta_H(50) - 0,02S \quad (16-10)$$

przy czym:

$$E_0 = 80,2 + \lg R - 0,0018 f^{0,26} R \quad (16-11)$$



Rys. 16-9. Krzywe podstawowe propagacji jonosferycznej fal średnich (według Raportu nr 264-2 CCIR, New Delhi, 1970)

— jest równaniem krzywych podstawowych (rys. 16-9);

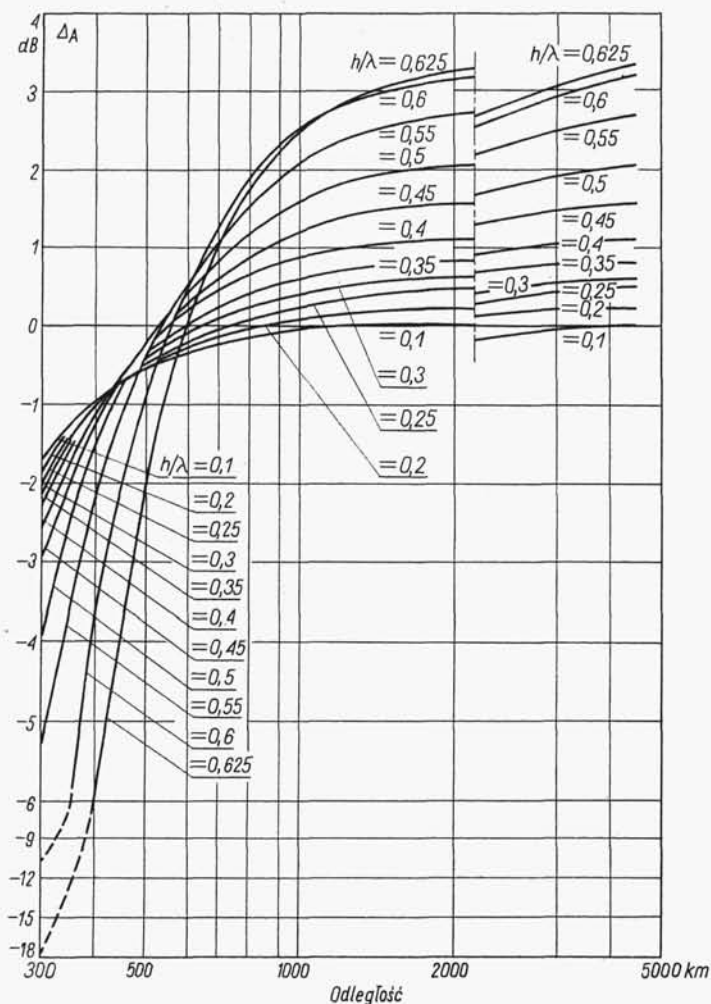
R — odległość [km];

f — częstotliwość [kHz];

$\Delta_A = 20 \lg [\sqrt{G} F(\theta)]$ — współczynnik korekcyjny uwzględniający charakterystykę promieniowania anteny (rys. 16-10);

G — zysk energetyczny anteny względem bezstratnej anteny krótkiej nad idealną ziemią;

P — moc doprowadzona do anteny, dB względem 1 kW;
 Δ_I — współczynnik korekcyjny uwzględniający szerokość geomagnetyczną
 (rys. 16-11);



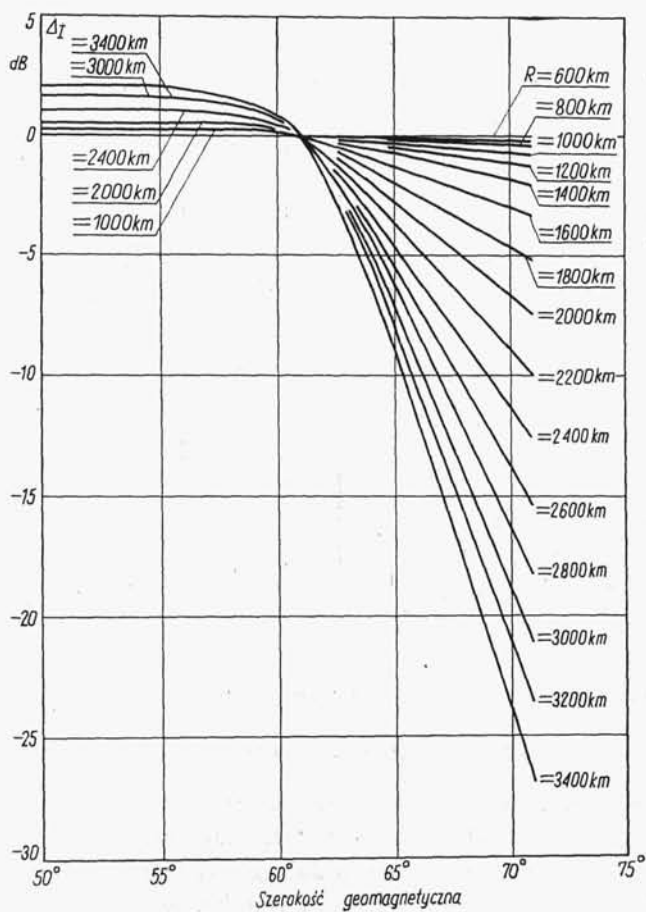
Rys. 16-10. Współczynnik korekcyjny Δ_A (według Raportu nr 264-2, CCIR, New Delhi, 1970)

$\Delta_H(50)$ — mediana współczynnika korekcyjnego uwzględniającego różnicę czasu lokalnego środka trasy w stosunku do godziny 00,00 (rys. 16-12);

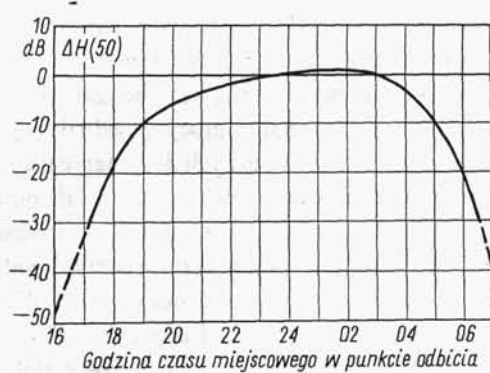
S — liczba Wolfa.

Do obliczenia wartości natężenia pola przekraczanej w przedziale czasu różnym od 50% należy zastosować poprawkę $\delta_H(T)$ (rys. 16-13)

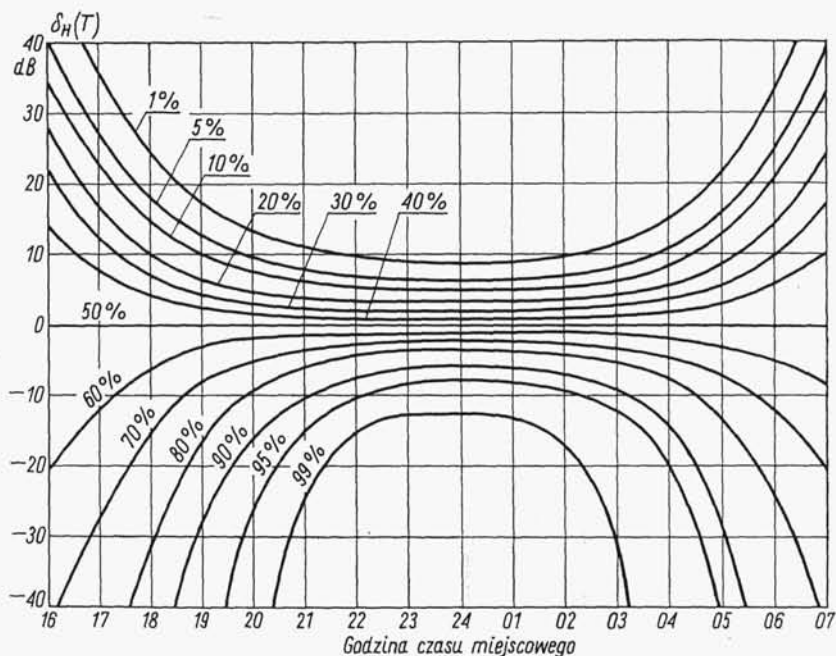
$$E_H(T) = E_H(50) + \delta_H(T) \quad (16-12)$$



Rys. 16-11. Współczynnik korekcyjny Δ_I (według Raportu nr 264-2 CCIR, New Delhi, 1970)



Rys. 16-12. Współczynnik korekcyjny $\Delta_H(50)$ (według Raportu nr 264-2 CCIR, New Delhi, 1970)



Rys. 16-13. Współczynnik korekcyjny $\delta_H(T)$ (według Raportu nr 264-2 CCIR, New Delhi, 1970)

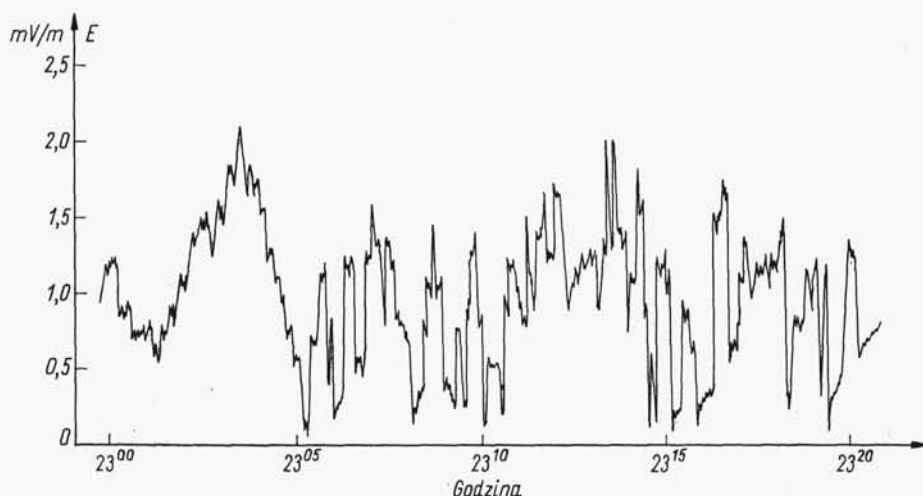
16.2.3. ZANIKI NA FALACH ŚREDNICH

Ponieważ w ciągu dnia o zasięgu fal średnich, wskutek wytłumienia fali jonosferycznej, decyduje fala powierzchniowa, dla której natężenie pola nie zależy od zmian warunków jonosferycznych, więc w ciągu dnia nie występują zaniki na falach średnich. Sytuacja zmienia się z zapadnięciem zmroku, gdy o zasięgu fal średnich zaczyna decydować fala jonosferyczna. Należy przy tym rozróżnić trzy obszary. W sąsiedztwie nadajnika natężenie pola fali powierzchniowej również w nocy jest znacznie większe od natężenia pola fali jonosferycznej i zaniki nie występują. Obszar ten nazywamy *obszarem bliskiego zasięgu* albo *pierwszą strefą odbioru*. Rozmiary obszaru bliskiego zasięgu zależą od długości fali, konduktywności ziemi oraz charakterystyki promieniowania anteny nadawczej; nie zależą natomiast od mocy nadajnika, bowiem zmiany promieniowanej mocy w jednakowym stopniu odbijają się na natężeniu pola fali powierzchniowej i fali jonosferycznej.

Obszar drugi obejmuje miejsca, gdzie natężenia pola fali powierzchniowej i fali jonosferycznej są tego samego rzędu. Ponieważ warunki propagacji fali jonosferycznej są zmienne w czasie, więc również stosunki fazowe obu fal podlegają fluktuacjom. Pola obu fal mogą się na przemian dodawać i odejmować. W rezultacie powstają silne wahania pola wypadkowego. Amplituda i częstotliwość tych wahań wzrastają przy zmniejszaniu długości fali. Przykładowo na rys. 16-14 pokazano wahania natężenia pola zarejestrowane przy odbiorze sygnałów o częstotliwości 1,08 MHz

w odległości 124 km od nadajnika. Obszar, w którym występują silne wahania natężenia pola wskutek interferencji fali powierzchniowej i fali jonosferycznej nazywamy *strefą interferencji*.

Trzeci obszar obejmuje miejsca dostatecznie odległe od nadajnika, gdzie natężenie pola fali powierzchniowej może być pominięte wobec fali jonosferycznej. Obszar ten nazywamy *obszarem dalekiego zasięgu* albo *trzecią strefą odbioru*. W obszarze dalekiego zasięgu mogą również występować zaniki powodowane zmianami warunków



Rys. 16-14. Wahania natężenia pola w obszarze bliskiego zaniku

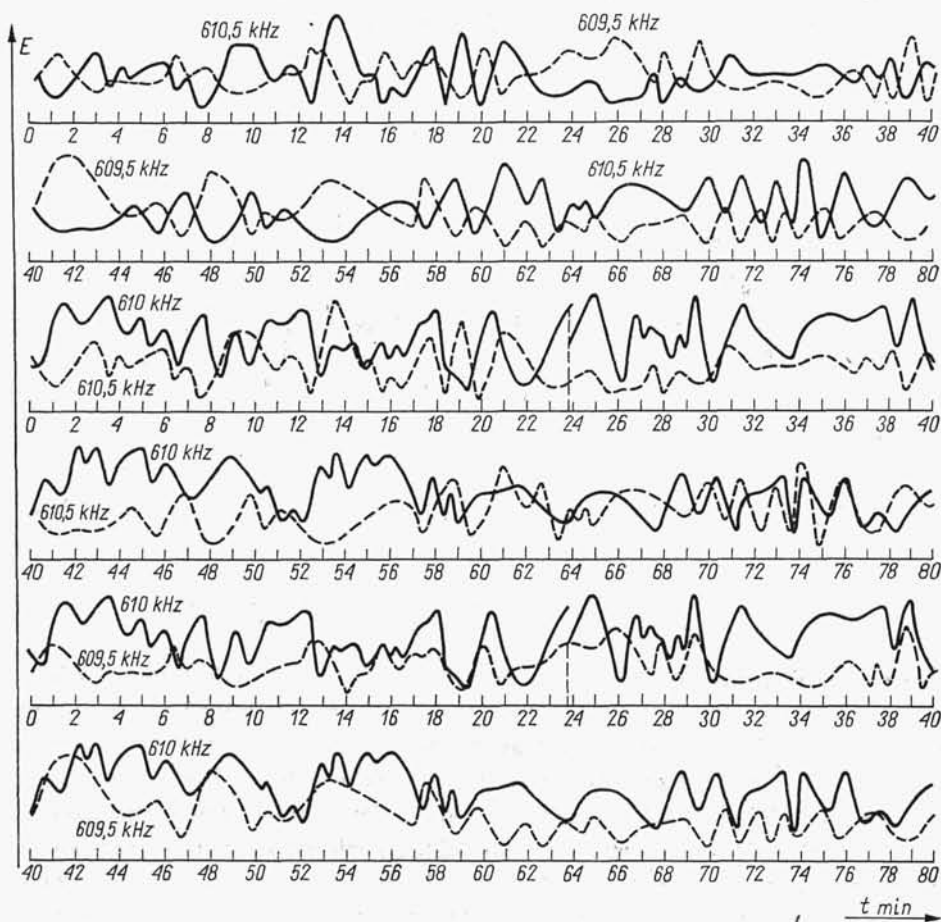
propagacji fali w jonosferze oraz interferencją fal jonosferycznych docierających do punktu odbioru różnymi drogami. Częstotliwość i amplituda wahań natężenia pola w obszarze dalekiego zasięgu są jednak znacznie mniejsze niż w strefie interferencji.

Faza fali jonosferycznej docierającej do punktu odbioru jest także funkcją częstotliwości. W przypadku sygnałów zmodulowanych możemy więc mieć do czynienia z *zanikami selektywnymi*. Zjawisko fluktuacji selektywnych ilustruje rys. 16-15, na którym przedstawiono zapis natężenia pola fali o częstotliwości 610 kHz zmodulowanej przebiegiem o częstotliwości 500 Hz [18]. Z przedstawionych wykresów widać wyraźnie, że zaniki natężenia pola fali nośnej i fal bocznych nie występują synchronicznie. Wskutek zaników selektywnych powstają zniekształcenia modulacji.

Przykład liczbowy. Dla ilustracji sposobu obliczania natężenia pola w zakresie fal średnich wyznaczmy granice zasięgu radiostacji o mocy $P = 300$ kW pracującej na częstotliwości 818 kHz. Konduktywność gruntu w obszarze działania radiostacji przyjmijmy stałą i równą 10 mS/m. Obliczenia wykonamy dla dwóch anten: $0,25\lambda$ i $0,555\lambda$.

Określmy najpierw zasięg dzienny. Posłużymy się w tym celu krzywymi CCIR propagacji fali powierzchniowej (rys. 12-19b). Interpolując między krzywymi dla częstotliwości 700 kHz i 1 MHz znajdujemy natężenia pola wytwarzane przez krótką antenę promieniującą moc 1 kW. Do okreś-

lonych w ten sposób wartości należy dodać poprawkę 24,8 dB ze względu na moc nadajnika (przy założeniu, że sprawność toru przesyłowego i anteny jest równa jedności) oraz poprawkę ze względu na zysk energetyczny anteny (względem anteny krótkiej): 0,4 dB dla anteny $0,25\lambda$ i 2,7 dB dla anteny $0,555\lambda$. Wykresy natężenia pola fali powierzchniowej przedstawiono na rys. 16-16. W celu wyznaczenia zasięgu dziennego radiostacji musimy jeszcze znać graniczną wartość natężenia pola. Jest ona uwarunkowana przewidywanym poziomem zakłóceń. Przyjmując graniczną wartość



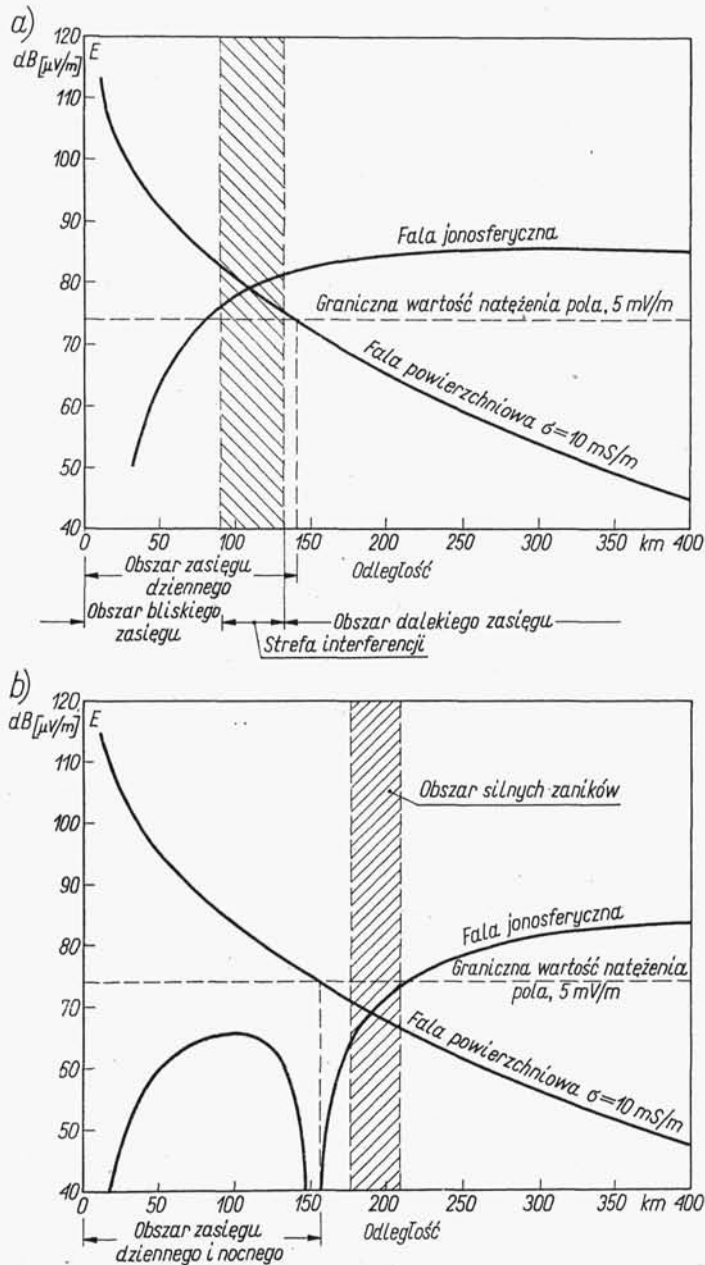
Rys. 16-15. Przebieg czasowy natężenia pola fali nośnej 610 kHz i fal bocznych $610 \text{ kHz} \pm 500 \text{ Hz}$ ilustrujący charakter zaników selektywnych (według S. Hahn: Podstawy radiokomunikacji, WKŁ, Warszawa 1964)

natężenia pola równą 5 mV/m odczytujemy z przedstawionych wykresów zasięg dzienny radiostacji:

dla anteny $0,25\lambda$ — 140 km,

dla anteny $0,555\lambda$ — 156 km.

Jak widać, wydłużenie anteny tylko nieznacznie zwiększa zasięg dzienny radiostacji.



Rys. 16-16. Natężenie pola fali powierzchniowej i fali jonosferycznej radiostacji średniofalowej ($f = 818 \text{ kHz}$) o mocy 300 kW : a) antena $0,25\lambda$; b) antena $0,555\lambda$

Przejdziemy teraz do określenia zasięgu nocnego. W celu wyznaczenia natężenia pola fali jonosferycznej posłużymy się wzorem (16-8). Przy założeniu sinusoidalnego rozkładu prądu w antenie charakterystyka promieniowania jest określona zależnością (rozdz. 3)

$$F(\Theta) = \frac{\cos(kh \cos \Theta) - \cos(kh)}{\sin \Theta}$$

przy czym h — wysokość anteny.

Wprowadzając wyrażenie na charakterystykę promieniowania do wzoru (16-8) otrzymujemy następującą zależność na natężenie pola fali jonosferycznej w mV/m, gdy R i H wyrażamy w km, a P — w kW

$$E_{sk} = \frac{347 \sqrt{PG_1}}{\sqrt{R^2 + 4H^2}} \frac{\left[\cos \left(kh \frac{2H}{\sqrt{R^2 + 4H^2}} \right) - \cos(kh) \right]}{1 - \cos(kh)}$$

Zakładając wysokość warstwy odbijającej $H = 100$ km i biorąc pod uwagę, że zysk energetyczny anteny $0,25\lambda$ jest równy 3,28, natomiast anteny $0,555\lambda$ równy 5,6 (przy założeniu bezstratnych anten) otrzymujemy następujące, dogodne do obliczeń, zależności:

dla anteny $0,25\lambda$

$$E_{sk} = \frac{54,5}{X} \cos \left(\frac{90^\circ}{X} \right)$$

dla anteny $0,555\lambda$

$$E_{sk} = \frac{36,8}{X} \left[0,94 + \cos \left(\frac{200^\circ}{X} \right) \right]$$

przy czym

$$X = \sqrt{1 + \left(\frac{R}{200} \right)^2}$$

Wyniki obliczeń przedstawiono wykreślnie na rys. 16-16.

Odległość, w której natężenie pola fali powierzchniowej jest o 6 dB większe od natężenia pola fali jonosferycznej będziemy uważali za granicę pierwszej strefy odbioru. Z rys. 16-16a wynika, że dla anteny $0,25 \lambda$ zasięg bliski wynosi 90 km, jest więc znacznie mniejszy od zasięgu dziennego. Zastosowanie anteny przeciwnazikowej (rys. 16-16b) powoduje przesunięcie strefy interferencji aż do odległości 173 km. Ponieważ jednak dla odległości większych od 156 km natężenie pola fali powierzchniowej jest mniejsze od wartości granicznej, więc zasięg radiostacji z anteną przeciwnazikową jest taki sam w porze nocnej jak i w ciągu dnia.

16.2.4. ZJAWISKA NIELINIOWE W JONOSFERZE

Przy odbiorze niektórych stacji radiofonicznych w porze nocnej występuje zjawisko przesłuchu modulacji innej stacji radiofonicznej, pracującej na znacznie — na ogół — różniącej się częstotliwości. Zjawisko to nosi nazwę *zjawiska luksemburskiego* lub *luksembursko-gorkowskiego* od nazw radiostacji, przy pracy których zaobserwowano swego czasu występowanie przesłuchów. Zjawisko luksemburskie występuje wówczas, gdy fale od dwóch nadajników rozchodzą się w jonosferze po częściowo wspólnej drodze.

Przyczyną powstawania przesłuchu są nieliniowe zjawiska w jonosferze. Mianowicie pod wpływem silnego pola radiostacji, pracującej na częstotliwości f_1 średnia

prędkość elektronów podlega wahaniom w takt chwilowej wartości natężenia pola zmieniającej się pod wpływem modulacji. Konsekwencją zmiany prędkości ruchu elektronów jest zmiana liczby zderzeń elektronów z cząsteczkami gazu, a co za tym idzie zmiana absorpcji. Absorpcja w jonosferze zmienia się zatem w takt modulacji radiostacji pracującej na częstotliwości f_1 . Jeżeli w obszarze, w którym zachodzi refrakcja fali o częstotliwości f_1 zachodzi jednocześnie refrakcja fali o częstotliwości f_2 , promieniowanej przez inną radiostację, to zmieniająca się absorpcja spowoduje modulację fali o częstotliwości f_2 . W efekcie na modulację własną fali f_2 nałoży się modulacja obca, pochodząca od fali f_1 , co objawi się w odbiorniku w postaci przesłuchu radiostacji pracującej na znacznie nieraz różniącej się częstotliwości.

16.3. ROZCHODZENIE SIĘ FAL POŚREDNICH

Zgodnie z podziałem podanym w tabl. 11-1 i 11-2, falami pośrednimi nazywamy podzakres fal hektametrowych obejmujący częstotliwości od 1,5 do 3 MHz. Właściwości propagacyjne fal pośrednich mają charakter przejściowy pomiędzy typowymi właściwościami propagacji średniofalowej a typowymi właściwościami propagacji krótkofalowej.

Udział charakterystycznych cech propagacji średniofalowej maleje ze wzrostem częstotliwości, ustępując stopniowo miejsca cechom typowym dla rozchodzenia się fal krótkich. O przewadze jednych lub drugich właściwości decyduje, obok częstotliwości, również aktualny stan jonosfery oraz rodzaj terenu.

Fala powierzchniowa w zakresie częstotliwości powyżej 1,5 MHz jest już silnie tłumiona i możliwość jej wykorzystania na terenach o złej i średniej konduktywności staje się bardzo ograniczona. Poważniejsze zastosowanie znajduje fala powierzchniowa na morzu.

Jak wiadomo z uprzednio przeprowadzonych rozważań, absorpcja jonosferyczna po przekroczeniu częstotliwości rezonansu żyromagnetycznego maleje w miarę wzrostu częstotliwości. W wyniku tego fale jonosferyczne w porze dziennej nie są wytłumione całkowicie przez jonosferę. Pod tym względem warunki propagacji w jonosferze są korzystniejsze dla fal pośrednich niż dla fal średnich.

Gęstość elektronowa w obszarze E jest wystarczająca dla odbicia fal pośrednich w ciągu dnia. W porze nocnej natomiast krótsze fale pośrednie odbijają się od warstwy E tylko w przypadku wypromieniowania pod bardzo małymi kątami elewacji. Możliwe są takie warunki, w których fale pośrednie przechodzą przez warstwę E i ulegają odbiciu od warstwy F_2 . Zasadniczo może mieć to miejsce tylko w porze nocnej i na większych częstotliwościach podzakresu. Ponieważ główną rolę w propagacji jonosferycznej fal pośrednich odgrywa warstwa E , zasięgi fali odbitej są ograniczone na ogół do kilku tysięcy kilometrów.

Ze względu na silne tłumienie fali powierzchniowej na terenach lądowych, fale pośrednie znajdują zastosowanie głównie w tych przypadkach, w których można