

W poprzednich rozdziałach sprawę wykorzystania omawianych anten traktowaliśmy marginesowo. Obecnie, znając już zasady pracy i parametry podstawowych rodzajów anten, zajmiemy się tą sprawą szerzej. Poszczególne służby, ze względu na specyfikę swojej pracy i wykorzystywany zakres częstotliwości, stosują różne rodzaje anten. Ograniczona objętość podręcznika nie pozwala omówić wszystkich zastosowań anten, tym bardziej że wymagałoby to wgłębiania się w zagadnienia specjalistyczne związane z pracą poszczególnych służb. Ograniczymy się więc do omówienia anten stosowanych w radiofonii, radiokomunikacji krótkofalowej, telewizji, radiolokacji i radiokomunikacji satelitarnej.

### 10.1. DŁUGO- I ŚREDNIOFALOWE ANTENY RADIOFONICZNE

Większość radiofonicznych stacji nadawczych w zakresie fal długich i średnich jest położona w granicach obszarów obsługiwanych przez te stacje. W związku z tym antena powinna promieniować maksymalnie wzdłuż powierzchni ziemi, przy czym falą użyteczną jest fala powierzchniowa (p. 12.5). Kształt charakterystyki promieniowania w płaszczyźnie poziomej zależy od położenia stacji w stosunku do obsługiwanego obszaru oraz od położenia innych stacji pracujących w tym samym kanale częstotliwościowym. Na ogół stację nadawczą umieszcza się w środku obsługiwanego obszaru i wówczas, jeśli nie zachodzi potrzeba wytłumienia promieniowania w kierunku stacji pracującej na tej samej fali, stosuje się dookólną poziomą charakterystykę promieniowania. Kształt charakterystyki promieniowania w płaszczyźnie pionowej decyduje o warunkach odbioru w porze nocnej (p. 16.2). W celu zmniejszenia zakłóceń interferencyjnych spowodowanych własną falą jonosferyczną antena powinna możliwie słabo promieniować pod dużymi kątami elewacji. Z powyższych względów typowymi antenami dla zakresu fal długich i średnich są pionowe wibratory lub układy z nich złożone.

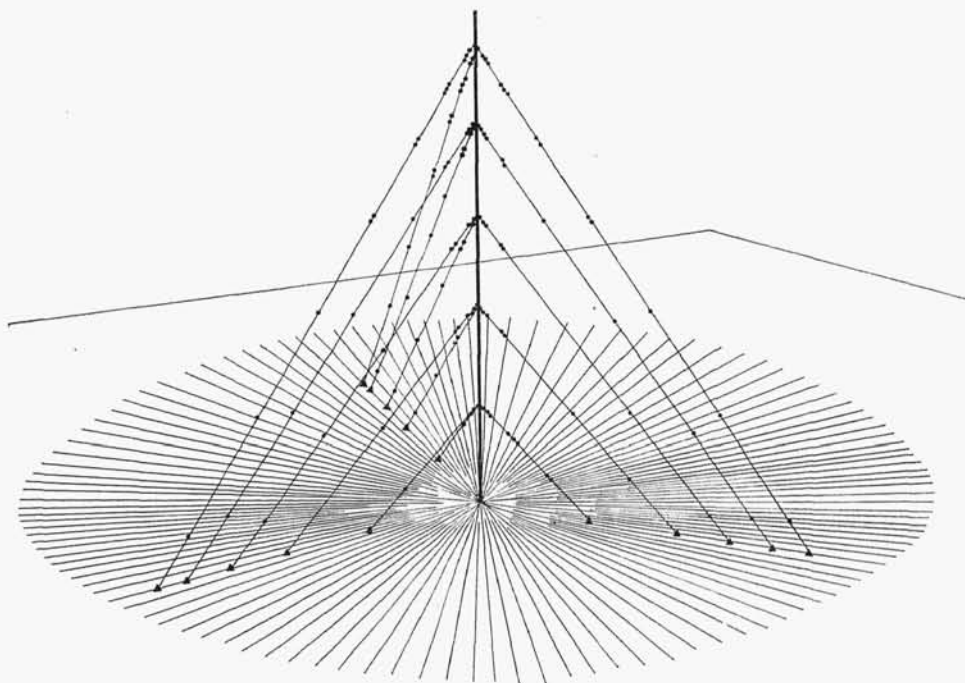
#### 10.1.1. ANTENA PIONOWA

Typową konstrukcją *anteny pionowej* dla zakresu radiofonicznego jest maszt stalowy umieszczony na izolatorze i utrzymywany w pozycji pionowej za pomocą odpowiedniej liczby odciągów (rys. 10-1). Właściwości takiej anteny są określone przez jej wysokość mierzoną w długościach fali, smukłość zdefiniowaną jako stosu-

nek wysokości anteny do zastępczego promienia przekroju poprzecznego oraz parametry elektryczne gruntu w otoczeniu anteny. W pierwszym przybliżeniu zbadamy charakterystykę promieniowania anteny pionowej przy następujących założeniach upraszczających:

- rozkład prądu wzdłuż anteny jest sinusoidalny,
- teren wokół anteny jest płaski i doskonale przewodzący.

Przy tych założeniach charakterystyka promieniowania anteny pionowej jest opisana wzorem (3-3) (dla  $0 \leq \theta \leq \pi/2$ ). Kilka charakterystyk promieniowania dla anten o różnej wysokości pokazano na rys. 10-2. Antena o długości krótszej od

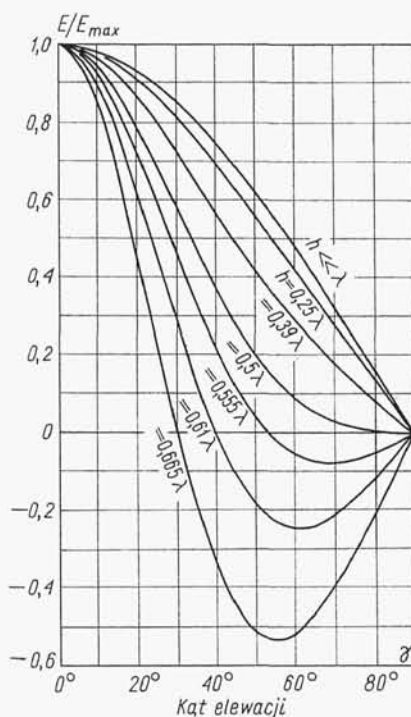


Rys. 10-1. Antena pionowa w postaci masztu na odciągach

$0,25\lambda$  promieniuje stosunkowo silnie pod dużymi kątami elewacji. W miarę zwiększania wysokości anteny następuje zawężenie charakterystyki promieniowania oraz zmniejszenie promieniowania pod dużymi kątami elewacji. Jeśli wysokość anteny przekroczy  $0,5\lambda$  w charakterystyce promieniowania pojawia się miejsce zerowe i listek boczny, którego poziom wzrasta ze wzrostem wysokości. Najmniejsze promieniowanie w możliwie szerokim zakresie dużych kątów elewacji ( $0 \leq \theta \leq 40^\circ$ ) uzyskuje się, gdy wysokość anteny jest zawarta w przedziale  $0,52\lambda$  do  $0,57\lambda$ . Anteny o tej wysokości noszą nazwę *anten przeciwwanikowych*. Najczęściej spotykaną anteną przeciwwanikową jest antena o wysokości  $0,55\lambda$ .

*Wpływ skończonych wymiarów poprzecznych.* Przedstawiona na rys. 10-2 charakterystyka promieniowania anteny  $0,55\lambda$  różni się znacznie od charakterystyk mierzo-

nych. W rzeczywistej antenie nie ma węzła prądu, a jedynie głębsze lub płytsze minimum. Wskutek tego w charakterystyce promieniowania zamiast zera pojawia się minimum promieniowania i jednocześnie rośnie poziom listka bocznego.



Rys. 10-2. Charakterystyki promieniowania anteny pionowej obliczone przy założeniu sinusoidalnego rozkładu prądu w antenie oraz płaskiego, doskonale przewodzącego terenu w otoczeniu anteny

Analizując właściwości jądra równania całkowego (3-46) dla prądu w antenie cylindrycznej King [113] podał następujące przybliżone wyrażenie na rozkład prądu w antenie cylindrycznej, której długość nie przekracza  $1,25\lambda$ :

$$I(z) = \frac{jE_s}{60\Psi_{dR}\cos kh} \left\{ \sin[k(h-z)] + T_U(\cos kz - \cos kh) + T_D \left( \cos \frac{kz}{2} - \cos \frac{kh}{2} \right) \right\}, \quad z \geq 0 \quad (10-1)$$

przy czym:

$\Psi_{dR}$  — współczynnik rzeczywisty zależny od długości i promienia anteny;

$T_U = T_{UR} + jT_{UI}$  — współczynniki zespolone zależne od długości i promienia anteny.

$T_D = T_{DR} + jT_{DI}$  — anteny.

Wartości współczynników  $\Psi_{dR}$ ,  $T_U$  i  $T_D$  dla anteny  $0,55\lambda$  podano w tabl. 10-1.

Podstawiając rozkład prądu według zależności (10-1) do wzoru (2-40) na pole dalekie liniowego rozkładu prądu znajdujemy następującą zależność na charaktery-

Tablica 10-1

Współczynniki występujące we wzorze na rozkład prądu wzdłuż anteny cylindrycznej ( $h = 0,55\lambda$ )

$\frac{a}{\lambda}$	$\Psi_{dR}$	$T_{UR}$	$T_{UI}$	$T_{DR}$	$T_{DI}$
$10^{-5}$	18,739	-0,0489	0,0574	-0,0141	0,0270
$3 \cdot 10^{-5}$	16,542	-0,0552	0,0577	-0,0174	0,0284
$10^{-4}$	14,134	-0,0642	0,0667	-0,0227	0,0295
$3 \cdot 10^{-4}$	11,938	-0,0753	0,0777	-0,0299	0,0295
$10^{-3}$	9,535	-0,0926	0,0948	-0,0421	0,0265
$2 \cdot 10^{-3}$	8,155	-0,1062	0,1048	-0,0528	0,0216
$3 \cdot 10^{-3}$	7,350	-0,1159	0,1183	-0,0608	0,0166
$4 \cdot 10^{-3}$	6,781	-0,1238	0,1265	-0,0676	0,0116
$5 \cdot 10^{-3}$	6,341	-0,1305	0,1337	-0,0736	0,0066

stykę promieniowania anteny pionowej z uwzględnieniem skończonych wymiarów poprzecznych:

$$f(\Theta) = 1 \sqrt{[f_1(\Theta) + T_{UR}f_3(\Theta) + T_{DR}f_5(\Theta)]^2 + [T_{UI}f_3(\Theta) + T_{DI}f_5(\Theta)]^2} \quad (10-2)$$

przy czym:

$$f_1(\Theta) = \frac{\cos(kh\cos\Theta) - \cos kh}{\sin\Theta} \quad (10-3a)$$

$$f_3(\Theta) = \frac{\sin kh \cos(kh\cos\Theta)}{\sin\Theta} - 2 \frac{\cos kh \sin(kh\cos\Theta)}{\sin 2\Theta} \quad (10-3b)$$

$$f_5(\Theta) = \frac{2 \sin \frac{kh}{2} \cos\Theta \cos(kh\cos\Theta) - \cos \frac{kh}{2} \sin(kh\cos\Theta)}{1 - 4 \cos^2\Theta} \operatorname{tg}\Theta \quad (10-3c)$$

Na rysunku 10-3 przedstawiono charakterystyki promieniowania anteny  $0,55\lambda$  obliczone wg wzoru (10-2) dla dwóch wartości stosunku  $a/\lambda$ . Dla porównania podano także charakterystykę obliczoną przy założeniu sinusoidalnego rozkładu prądu w antenie. Przy częstotliwości 1 MHz stosunek  $a/\lambda = 1,33 \cdot 10^{-4}$  odpowiada antenie wykonanej z liny o średnicy 8 cm, natomiast stosunek  $a/\lambda = 2 \cdot 10^{-3}$  odpowiada masztowi rurowemu o średnicy 1,2 m. W obu przypadkach obserwuje się wzrost poziomu listka bocznego i brak miejsca zerowego w charakterystyce promieniowania. Charakterystyki promieniowania obliczone według wzoru (10-2) wykazują dobrą zgodność z charakterystykami zmierzonymi w warunkach rzeczywistych.

*Wpływ skończonej konduktywności ziemi.* Pole elektryczne w obszarze quasi-bliskim wytwarzane przez elementarny dipol elektryczny umieszczony pionowo na wysokości  $H$  nad ziemią o skończonej konduktywności (rys. 10-4) wyraża się następującym wzorem [22]:

$$E_z(z, \varrho) = \frac{k_0^2 p}{4\pi\epsilon_0} \left[ \frac{e^{-jk_0 R_d}}{R_d} \sin^2\Theta_d + R_V \frac{e^{-jk_0 R_r}}{R_r} \sin^2\Theta_r + (1 - R_V) \frac{e^{-jk_0 R_r}}{R_r} W_e \sin^2\Theta_r \right] \quad (10-4)$$

przy czym:

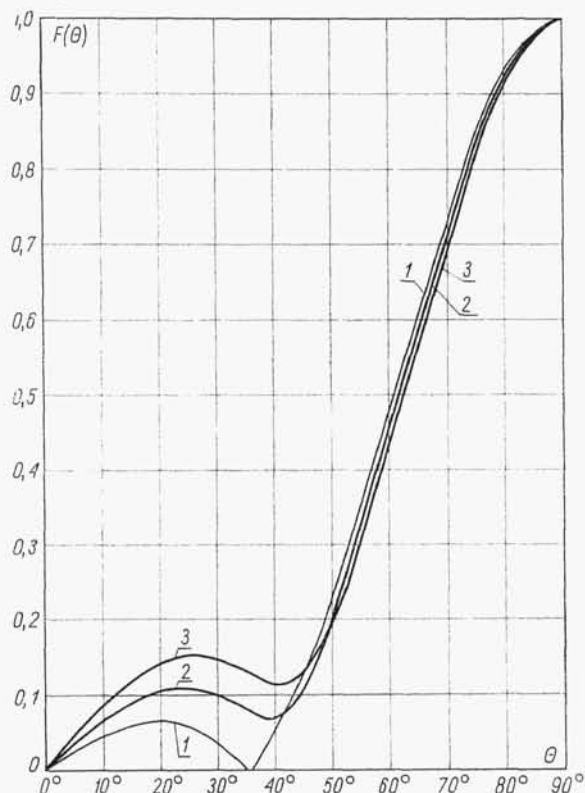
$R_V$  — współczynnik odbicia dla polaryzacji pionowej (p. 12.3);

$$W_e = \frac{\sin^2 \Theta_r}{jk_0 R_r} \frac{n^4}{n^2 - 1};$$

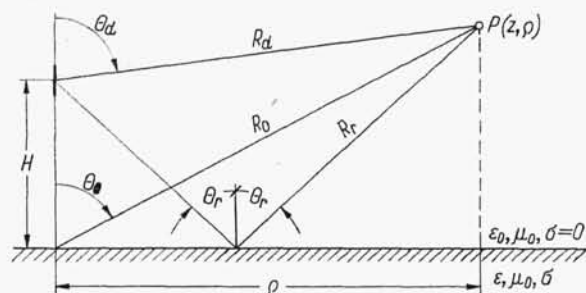
$n = \sqrt{\epsilon_r - j60\lambda_0\sigma}$  — zespolony współczynnik załamania;

$\epsilon_r, \sigma$  — względna przenikalność elektryczna i konduktywność ziemi;

$p$  — moment dipola.



Rys. 10-3. Pionowa charakterystyka promieniowania anteny  $0,55\lambda$   
 1 — rozkład sinusoidalny; 2 —  $a/\lambda = 1,33 \cdot 10^{-4}$ ; 3 —  $a/\lambda = 2 \cdot 10^{-3}$



Rys. 10-4. Elementarny dipol elektryczny nad ziemią o skończonej konduktywności

Pierwsze dwa człony w nawiasie kwadratowym po prawej stronie zależności (10-4) opisują falę bezpośrednią i falę odbitą od powierzchni ziemi; trzeci człon reprezentuje falę powierzchniową. Na powierzchni ziemi doskonale przewodzącej ( $z = 0$ ) współczynnik odbicia jest równy 1, wobec czego znika fala powierzchniowa, a amplituda pola ulega podwojeniu w stosunku do wartości w swobodnej przestrzeni. Na powierzchni ziemi rzeczywistej o skończonej konduktywności w dostatecznie dużej odległości od anteny takiej, aby  $\theta_d \approx \theta_r \approx \pi/2$ , współczynnik odbicia jest równy  $-1$ , wobec czego fala bezpośrednia i fala odbita wzajemnie kompensują się, a całe pole jest określone przez falę powierzchniową

$$E_z(\rho) = \frac{k_0^2 p}{2\pi\epsilon_0} \frac{e^{-jk_0\rho}}{\rho} W_e \quad (10-5)$$

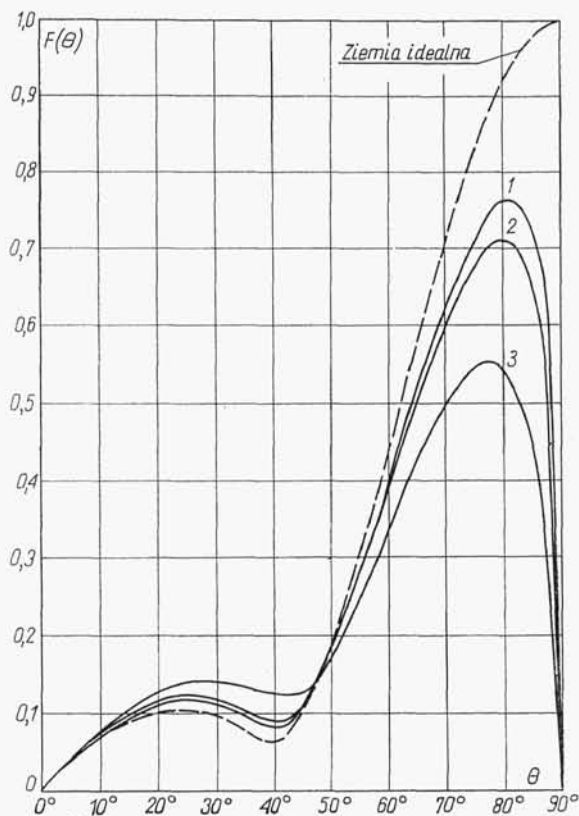
przy czym  $W_e$  reprezentuje tutaj współczynnik osłabienia fali powierzchniowej.

Pole wytwarzane przez antenę pionową nad ziemią rzeczywistą możemy obliczyć dzieląc antenę na nieskończenie wiele elementarnych dipoli elektrycznych i sumując pola wytwarzane przez te dipole.

Współczynnik osłabienia jest funkcją parametrów elektrycznych ziemi oraz odległości od anteny. W związku z tym pojęcie pionowej charakterystyki promieniowania anteny pionowej nad ziemią o skończonej konduktywności należy stosować bardzo ostrożnie; charakterystyka promieniowania jest bowiem funkcją odległości od anteny. W dostatecznie dużej odległości fala powierzchniowa zostaje całkowicie stłumiona i charakterystyka promieniowania ma kształt taki, jaki przedstawiono na rys. 10-5.

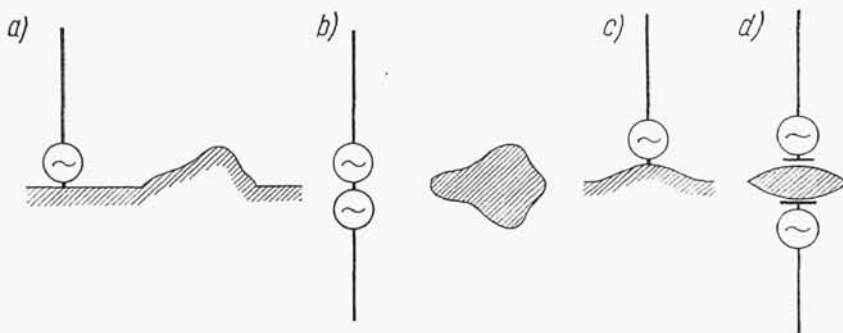
*Wpływ nieregularności terenu.* W dotychczasowych rozważaniach zakładaliśmy, że teren wokół anteny jest płaski i jednorodny. W praktyce założenie to nie zawsze jest spełnione. Zdarza się, że antena jest zbudowana na szczycie lub w pobliżu niewielkiego wzgórza. Zbadamy, jak wpływają nieregularności terenu na kształt pionowej charakterystyki promieniowania; założymy przy tym, że teren wokół anteny jest doskonałym przewodnikiem. Wpływ wzniesienia znajdującego się w pobliżu anteny (rys. 10-6a) możemy uwzględnić przez dodanie do pola anteny umieszczonej nad płaską ziemią pola wtórnego pochodzącego od prądów płynących na powierzchni wzniesienia (rys. 10-6b). Dokładne obliczenie pola wtórnego jest niemożliwe, bowiem w ogólnym przypadku nie potrafimy obliczyć rozkładu prądu na powierzchni wzniesienia. Jeśli jednak wzniesienie jest nieduże, to z dostateczną dla praktyki dokładnością możemy założyć, że rozkład prądów jest taki sam jak dla ziemi płaskiej.

Jeśli antena jest umieszczona na szczycie wzniesienia (rys. 10-6c), to możemy założyć, że pole jest sumą pola promieniowanego przez podniesioną antenę oraz pola wtórnego pochodzącego od prądów płynących na powierzchni wzniesienia (rys. 10-6d). Na rys. 10-7 pokazano wpływ nieregularności terenu na charakterystykę promieniowania anteny 0,25λ.



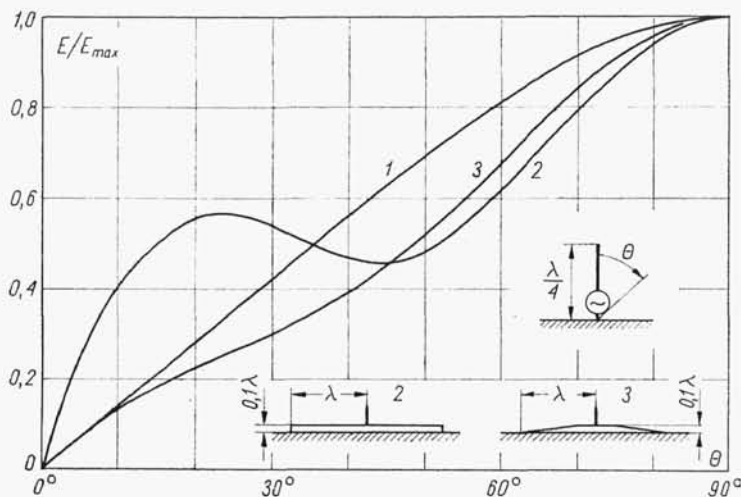
Rys. 10-5. Pionowa charakterystyka promieniowania anteny  $0,55\lambda$  z uwzględnieniem wpływu skończonej konduktywności ziemi

$$\left. \begin{array}{l} 1 - 60\lambda_0\sigma = 900 \\ 2 - 60\lambda_0\sigma = 450 \\ 3 - 60\lambda_0\sigma = 90 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \epsilon_r = 10 \\ a/\lambda_0 = 1,33 \cdot 10^{-4} \end{array}$$



Rys. 10-6. Sposób określenia wpływu nieregularności terenu na charakterystykę promieniowania anteny: a) wzniesienie w pobliżu anteny; b) przypadek a) w układzie symetrycznym; c) antena na szczycie wzniesienia; d) przypadek c) w układzie symetrycznym

*Instalacja uziemiająca.* W przypadku anteny niesymetrycznej zasilanej u podstawy obwód prądu zamyka się przez ziemię. Wskutek skończonej konduktywności ziemi część energii doprowadzonej do anteny traci się na ciepło, co powoduje zmniejszenie sprawności anteny. W celu zmniejszenia strat w ziemi, wokół anteny buduje się instalację uziemiającą. Składa się ona zwykle z 120 do 150 przewodników o długości  $0,25\lambda$  do  $0,5\lambda$  ułożonych promieniście na głębokości 40 do 60 cm. Przewody łączy się w pary, a ich końce izoluje się na długości 5 do 10 m (rys. 10-8).



Rys. 10-7. Pionowe charakterystyki promieniowania anteny  $0,25\lambda$

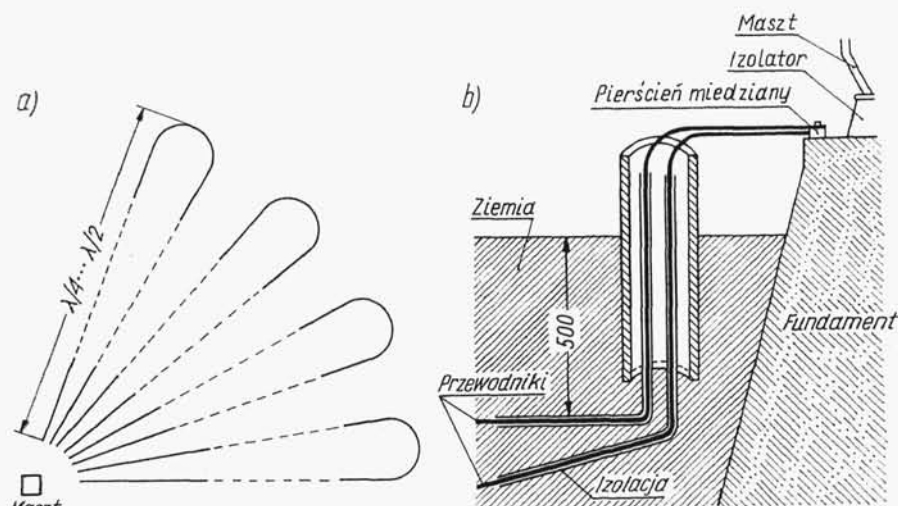
1 — teren płaski; 2 — antena na szczycie płaskowzgórza o promieniu  $\lambda$  i wysokości  $0,1\lambda$ ; 3 — antena na szczycie stożkowego wzniesienia o promieniu  $\lambda$  i wysokości  $0,1\lambda$  (według H. Page, G.B. Monteath: The vertical radiation patterns of medium-wave broadcasting aerials, Proc. IEE, 1955)

W ten sposób zapewnia się możliwość kontroli instalacji uziemiającej przez pomiar rezystancji między końcami pary (po odłączeniu od miedzianego pierścienia u podstawy masztu).

*Podział lin odciągowych.* Pod wpływem pola anteny w linach odciągowych indukują się prądy, które z kolei wytwarzają wtórne pole. To wtórne pole interferuje z polem pierwotnym anteny, zniekształcając jej charakterystykę promieniowania. Jednocześnie ulega pewnej zmianie impedancja wejściowa anteny. Aby zbytnio nie zniekształcać charakterystyki promieniowania anteny, pole rozpraszane przez liny odciągowe powinno być dostatecznie małe. Z tego względu liny odciągowe dzieli się za pomocą izolatorów na odcinki, których długość nie powinna przekraczać  $0,25\lambda$ . Jeśli antena jest zasilana dużą mocą, napięcia w.c.z. na izolatorach odciągowych osiągają znaczne wartości, co zmusza do skrócenia długości odcinków między izolatorami. Przy wysokich masztach należy jeszcze uwzględnić wpływ ładunków statycznych. Pod wpływem elektryczności atmosferycznej na izolowanych



odcinkach linii odciągowej gromadzą się ładunki elektryczne. Jeśli napięcie statyczne przekroczy wartość napięcia przeskoku dla izolatora odciągowego, to następuje wyładowanie, które w sprzyjających warunkach może być podtrzymane przez energię



Rys. 10-8. Instalacja uziemiająca: a) schemat ułożenia przewodników; b) sposób łączenia przewodników do miedzianego pierścienia u podstawy masztu

wielkiej częstotliwości. Ze względu na napięcia w.c.z. i napięcia statyczne w praktyce stosuje się nierównomierne rozmieszczenie izolatorów wzdłuż odciagu, przy czym najdłuższy odcinek zwykle nie przekracza długości równej  $0,1\lambda$ .

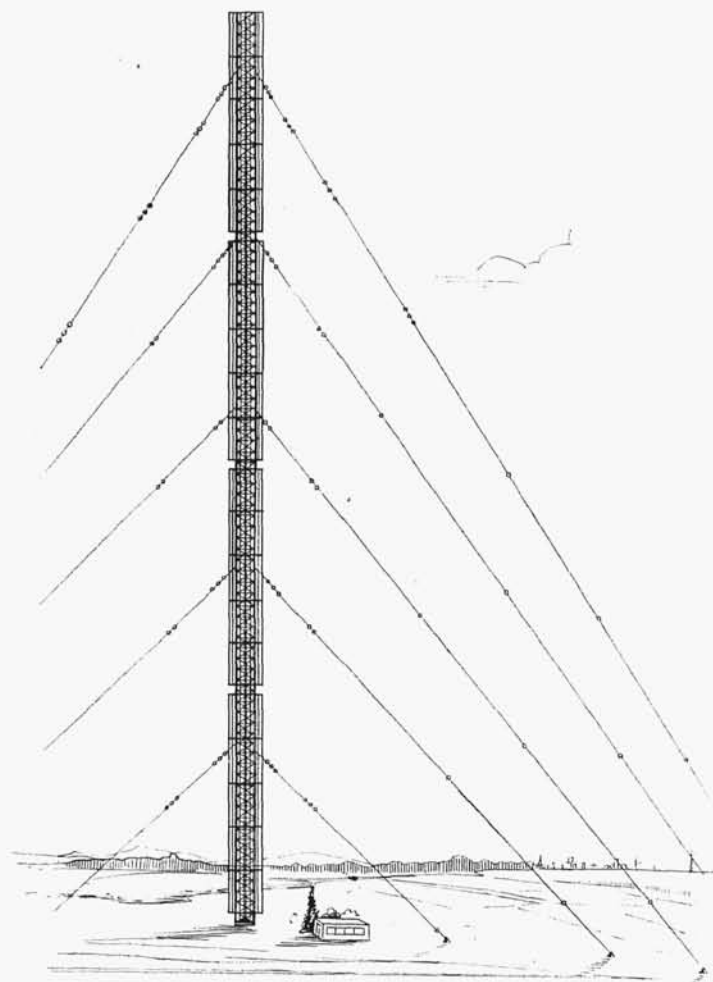
#### 10.1.2. ANTENY Z KSZTAŁTOWANĄ CHARAKTERYSTYKĄ PROMIENIOWANIA W PŁASZCZYŹNIE PIONOWEJ

Dążenie do zwiększania zasięgu stacji średnionfalowych i zmniejszenia zakłóceń wzajemnych między stacjami pracującymi na wspólnej fali wymaga stosowania anten o kształtowanej charakterystyce promieniowania w płaszczyźnie pionowej. W ostatnich latach opracowano kilka typów anten spełniających to wymaganie [71, 72, 73, 117].

Jako przykład anteny z kształtowaną charakterystyką promieniowania w płaszczyźnie pionowej omówimy *dwupółfalową antenę klatkową* (rys. 10-9)<sup>1)</sup>. Dwupółfalowa antena klatkowa, którą w skrócie będziemy nazywać anteną klatkową, składa się z uziemionego, niedzielonego masztu stalowego, na którym zawieszono cztery klatki wykonane z przewodów miedzianych (rys. 10-10). Każda klatka ma długość  $0,25\lambda$  i jest połączona galwanicznie z masztem w górnej części, a odizolowana od niego w dolnej. Klatka wraz z masztem tworzy ćwierćfalowy odcinek toru pseudowspółosiowego zwartego na końcu. Do zasilania anteny stosuje się dwa przewody współ-

<sup>1)</sup> Patent PRL nr 62420.

osiowe prowadzone wewnątrz masztu. Żyły wewnętrzne tych przewodów łączy się wprost do dolnych pierścieni drugiej i czwartej klatki licząc od dołu. Pod względem elektrycznym dwupółfalowa antena klatkowa jest równoważna układowi dwóch dipoli półfalowych umieszczonych jeden nad drugim prostopadle do po-



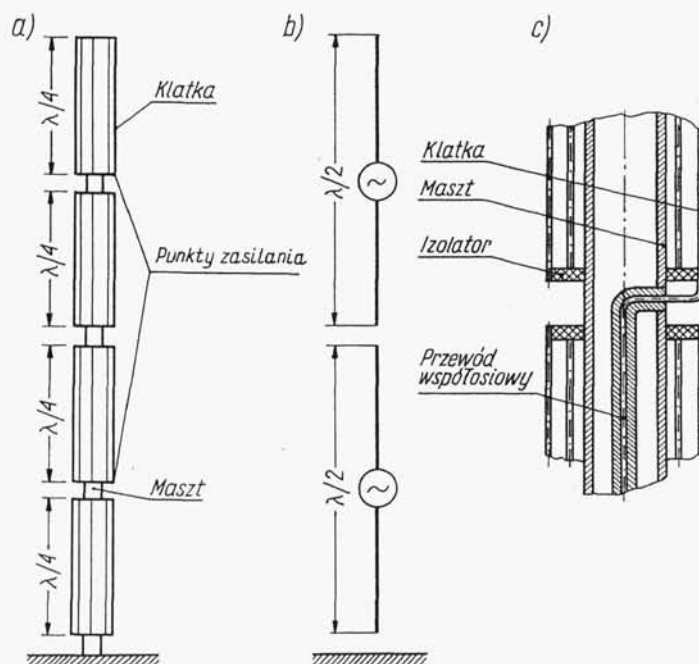
Rys. 10-9. Dwupółfalowa antena klatkowa

wierzchni ziemi. Za pomocą urządzeń dopasowujących, umieszczonych w pobliżu stopy masztu, można dowolnie ustalać stosunek prądu w górnym dipolu do prądu w dolnym dipolu ( $m = I_2/I_1$ ). Można przy tym zmieniać zarówno amplitudę jak i fazę prądów w obu dipolach, tak że współczynnik  $m$  jest w ogólnym przypadku wielkością zespoloną. Dobierając odpowiednio stosunek prądów w obu dipolach, można w szerokich granicach kształtować pionową charakterystykę promieniowania anteny. Kilka przykładowych charakterystyk promieniowania anteny

klatkowej przedstawiono na rys. 10-11 i 10-12. Na rys. 10-11 dla porównania podano także charakterystykę promieniowania anteny  $0,55\lambda$ .

Zysk energetyczny anteny klatkowej zależy od stosunku prądów w dipolach. W tabl. 10-2 dokonano porównania zysku energetycznego anteny klatkowej i anteny  $0,55\lambda$ .

Ze względu na wzajemne sprzężenie dipoli, ich impedancja zależy w pewnym stopniu od stosunku prądów. Średnio można przyjąć, że jest ona równa  $100\Omega$ .



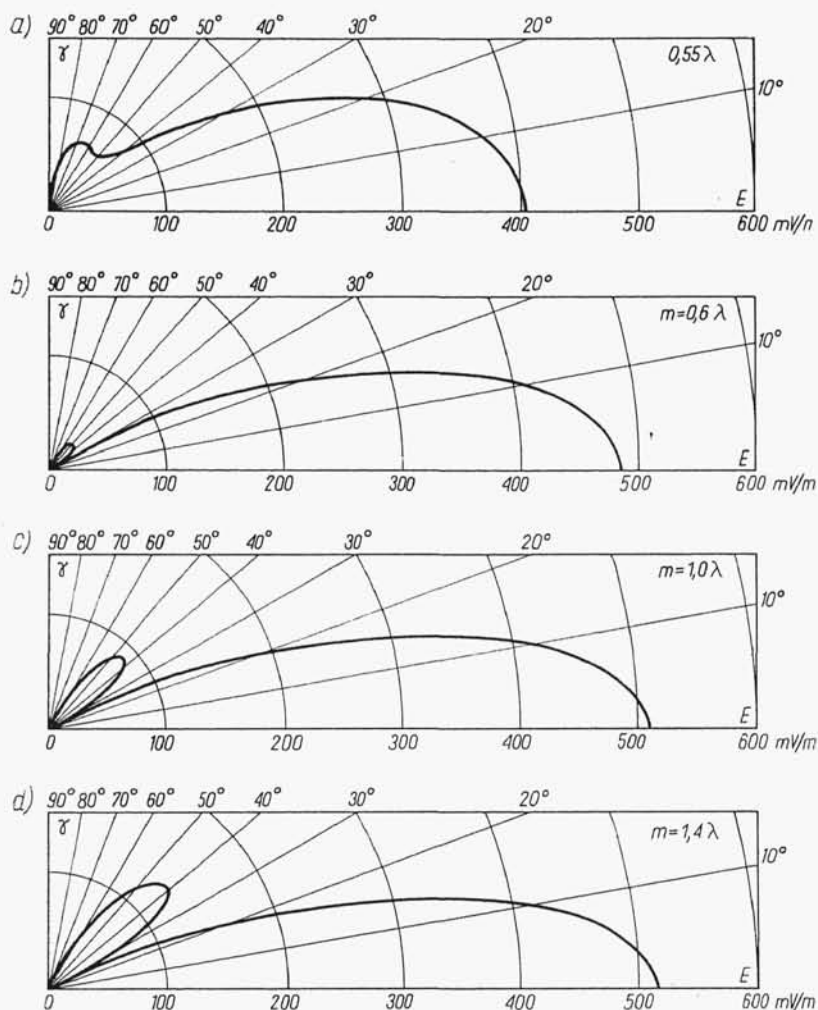
Rys. 10-10. Zasada działania dwupółfalowej anteny klatkowej: a) rozmieszczenie klatek na maszcie; b) układ zastępczy; c) schemat pobudzenia klatki (klatka jest połączona z masztem w górnej części i podparta na izolatorze w dolnej, tworząc ćwierćfalowy odcinek toru zwartego na końcu)

Antena klatkowa jest w zasadzie układem rezonansowym przystosowanym do pracy przy ustalonej częstotliwości, którą nazywamy częstotliwością własną anteny. Przy częstotliwości własnej klatka wraz z masztem tworzy ćwierćfalowy odcinek zwartego na końcu toru współosiowego. Istnieje możliwość przystosowania anteny do pracy przy częstotliwościach większych od częstotliwości własnej. Większej częstotliwości odpowiada wzrost długości elektrycznej klatki. Jeśli jednak wewnątrz klatki w odległości około  $0,25\lambda$  od izolowanych końców umieści się zwierce, to rezonansowe warunki pracy anteny zostaną zachowane.

Szeroki zakres regulacji pionowej charakterystyki promieniowania oraz korzystne właściwości impedancyjne przy jednoczesnych zaletach konstrukcyjnych (brak izolatora bazowego i izolatorów pośrednich) predysponują dwupółfalową antenę

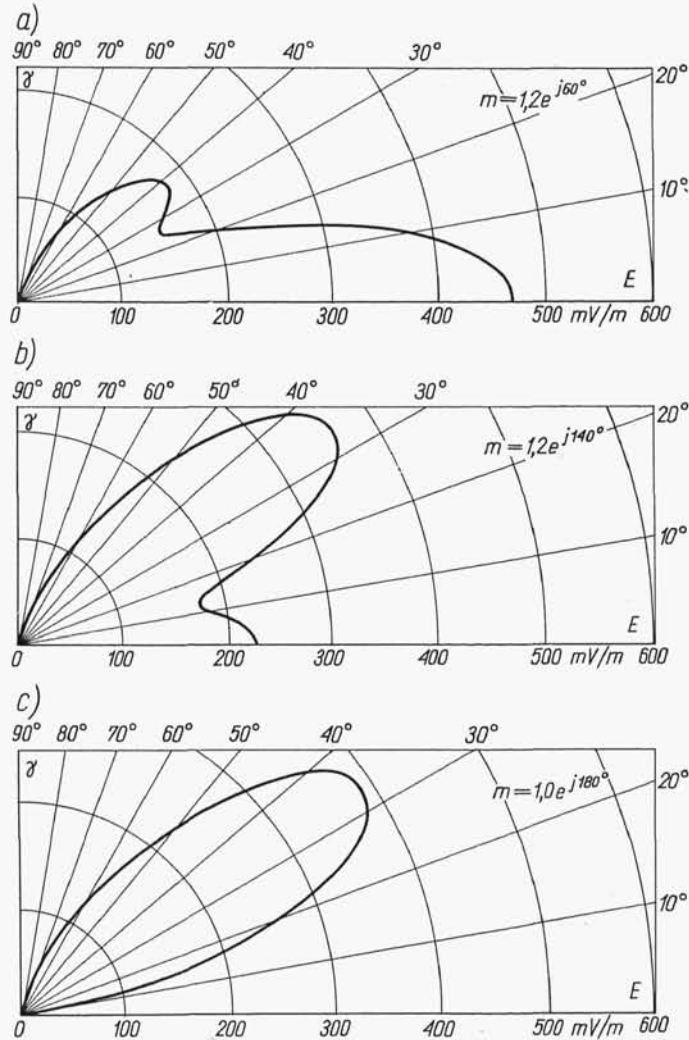
klatkową do stosowania zarówno dla stacji pracujących w sieci zsynchronizowanej, jak i dla stacji pracujących z bardzo dużą mocą na wyłącznych częstotliwościach.

W celu zobrazowania korzyści wynikających z zastosowania dwupółfalowej anteny klatkowej w tabl. 10-3 dokonano porównania zasięgu użytecznego średniofalowej stacji radiofonicznej o mocy 1000 kW pracującej na częstotliwości 1 MHz. Przyjmując graniczną wartość natężenia pola równą 60 dB (względem  $1 \mu\text{V/m}$ ) zasięg dzienny stacji przy zastosowaniu anteny  $0,55\lambda$  wynosi 155 km dla ziemi o konduktywności  $3 \cdot 10^{-3} \text{ S/m}$  oraz 245 km dla ziemi o konduktywności  $10^{-2} \text{ S/m}$ . Przy



Rys. 10-11. Pionowe charakterystyki promieniowania anteny  $0,55\lambda$  (a) oraz dwupółfalowej anteny klatkowej przy współfazowym pobudzeniu klatek i różnych wartościach stosunku prądów w górnym i dolnym dipolu (b, c, d). Charakterystyki podają natężenie pola wytwarzanego przez antenę w odległości 1 km od anteny przy mocy promieniowanej równej 1 kW

zastosowaniu anteny klatkowej ( $m = 1,4$ ) odpowiednie zasięgi dzienne wynoszą 172 i 255 km. Zasięg nocny stacji z anteną 0,55λ, przy założeniu współczynnika ochronnego równego 6 dB, wynosi 97 km dla ziemi o konduktywności  $3 \cdot 10^{-3}$  S/m



Rys. 10-12. Przykłady pionowych charakterystyk promieniowania dwupółfalowej anteny klatkowej przy niewspółfazowym pobudzeniu klatek

i 153 km dla ziemi o konduktywności  $10^{-2}$  S/m. Zastosowanie anteny klatkowej ( $m = 0,6$ ) powoduje zwiększenie zasięgu odpowiednio do 142 i 250 km. Dla ziemi o konduktywności  $10^{-2}$  S/m strefa interferencji dla założonego współczynnika protekcji, w ogóle nie występuje, a granica zasięgu nocnego jest określona tłumieniem fali powierzchniowej.

Tablica 10-2

Porównanie zysku energetycznego anteny  $0,55\lambda$  i anteny klatkowej

Rodzaj anteny		Kierunkowość	Zysk energetyczny w odniesieniu do anteny krótkiej zasilanej względem ziemi		Zysk energetyczny w odniesieniu do anteny $0,55\lambda$ zasilanej względem ziemi	
			[W/W]	[dB]	[W/W]	[dB]
Pionowa $0,55\lambda$		5,44	1,81	2,57	1,00	0
Dwupółfalowa klatkowa	$m = 0,6$	8,02	2,67	4,26	1,47	1,68
	$m = 1,0$	8,77	2,92	4,66	1,61	2,06
	$m = 1,4$	8,96	2,99	4,76	1,65	2,17
	$m = 1,2e^{j60^\circ}$	7,46	2,49	3,96	1,37	1,36
	$m = 1,2e^{j140^\circ}$	4,32	1,44	1,58	0,80	-0,97
	$m = 1,3e^{j180^\circ}$	5,06	1,69	2,26	0,93	-0,32

Tablica 10-3

Zasięgi stacji o mocy 1 MW pracującej na częstotliwości 1 MHz  
w zależności od rodzaju użytej anteny

Rodzaj anteny		Zasięg [km] (graniczna wartość natężenia pola 60 dB)			
		dzienny		nocny (współczynnik ochronny 6 dB)	
		$\sigma = 3 \cdot 10^{-3} \text{ S/m}$	$\sigma = 10^{-2} \text{ S/m}$	$\sigma = 3 \cdot 10^{-3} \text{ S/m}$	$\sigma = 10^{-2} \text{ S/m}$
Pionowa $0,55\lambda$		155	243	97	153
Dwupółfalowa klatkowa	$m = 1,4$	172	255		
	$m = 0,6$			142	250
Procentowy wzrost obsługiwanego obszaru przy zastosowaniu anteny klatkowej		23	10	115	165