

Biorąc pod uwagę, że $R_d = 73,1 \Omega$, otrzymujemy następujące wyrażenie na zysk energetyczny anteny rombowej względem dipola półfalowego:

$$G_{\lambda/2} = \frac{4680}{R_{we}} \frac{e^{-2\alpha l} \sin^2 \Phi_0}{(1 - \sin \Theta_{max} \cos \Phi_0)^2} \sin^4 \left[\frac{k_0 l}{2} (1 - \sin \Theta_{max} \cos \Phi_0) \right] \times \\ \times \sin^2 (k_0 H \cos \Theta_{max}) \quad (5-31)$$

Zysk anteny rombowej odniesiony do źródła izotropowego jest równy $1,64 G_{\lambda/2}$. Stosunek tego zysku do kierunkowości wyznacza sprawność anteny rombowej

$$\eta = 1,64 \frac{G_{\lambda/2}}{D} \quad (5-32)$$

5.3. ANTENY Z FAŁĄ POWIERZCHNIOWĄ

5.3.1. FALE NIEJEDNORODNE

Przenoszenie energii elektromagnetycznej odbywa się za pomocą bieżących fal elektromagnetycznych. Ze względu na strukturę fizyczną i praktyczne zastosowanie bieżące fale elektromagnetyczne można podzielić na trzy grupy:

- 1) fale rozchodzące się w jednorodnym ośrodku (fale płaskie, kuliste itp.),
- 2) jednorodne fale w torach (fale TEM, TE, TM),
- 3) fale niejednorodne.

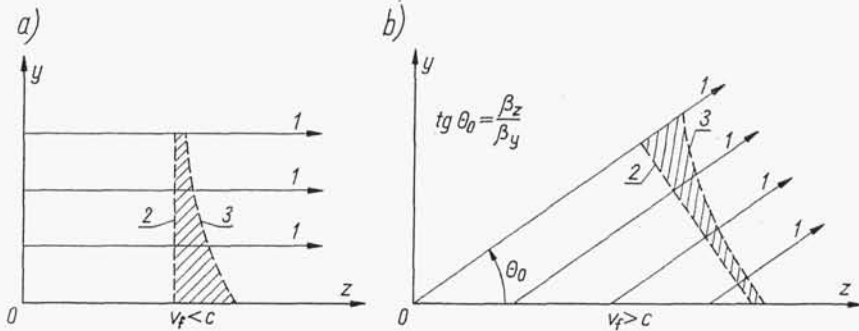
Dla dwóch grup *fal jednorodnych* (rozchodzących się w przestrzeni i w torach) powierzchnie równych amplitud są jednocześnie powierzchniami równych faz. Natomiast w przypadku *fal niejednorodnych* powierzchnie ekwiamplitudowe i ekwifazowe nie pokrywają się. Można wykazać, że dla fali niejednorodnej rozchodzącej się w jednorodnym ośrodku (lub na granicy rozdziału dwóch jednorodnych ośrodków) powierzchnie ekwifazowe i ekwiamplitudowe są wzajemnie prostopadłe, a rozkład amplitudy wzdłuż powierzchni ekwifazowych jest eksponencjalny [28, 36].

Fale niejednorodne powstają przy odpowiednim pobudzeniu na granicy rozdziału dwóch ośrodków. Prędkość fazowa fal rozchodzących się wzdłuż powierzchni granicznej jest mniejsza od prędkości światła w próżni. Na rys. 5-8a pokazano rozkład amplitudy i fazy dla tego typu fali. Jeśli prędkość fazowa wzdłuż powierzchni granicznej jest większa od prędkości światła, to fala elektromagnetyczna nie rozchodzi się wzdłuż powierzchni rozdziału, lecz zostaje wypromieniowana pod pewnym kątem do tej powierzchni (rys. 5-8b).

Pierwszy rodzaj fal niejednorodnych ($v_f < c$) nazywamy *falami kierowanymi* (trapped waves), drugi rodzaj ($v_f > c$) *falami promieniowanymi* (leaky waves). Fale kierowane nazywamy również *falami powierzchniowymi*.

Fale powierzchniowe powstają np. w torze Goubau (przewodnik w dielektrycznej otoczce), wzdłuż prętów i płaszczyzn dielektrycznych, a także wzdłuż tzw. struktur opóźniających.

W celu wyjaśnienia sposobu powstawania obu rodzajów fal niejednorodnych rozważmy płaski przypadek, w którym płaszczyzna rozdziału pokrywa się z płaszczyzną xz (rys. 5-8). Niech w półprzestrzeni $y > 0$, mającej parametry swobodnej przestrzeni, rozchodzi się wzdłuż powierzchni granicznej w kierunku osi z fala niejednorodna, niezależna od współrzędnej x . Jeśli pominie się polaryzację i rozważy



Rys. 5-8. Fale niejednorodne: a) powierzchniowe; b) promieniowane
1 — linie equiamplitudowe; 2 — linie equifazowe; 3 — rozkład amplitudy wzdłuż linii equifazowych

tylko zadanie skalarne, to zespolona amplituda fali, którą można rozłożyć na składowe wzdłuż osi y i z , wyraża się następującą zależnością:

$$E = E_0 e^{-j(k_y y + k_z z)} \quad (5-33)$$

przy czym

$$k_y^2 + k_z^2 = k_0^2 \quad (5-34)$$

Stałe k_y i k_z są w ogólności liczbami zespolonymi:

$$k_y = \beta_y - j\alpha_y \quad (5-35a)$$

$$k_z = \beta_z - j\alpha_z \quad (5-35b)$$

Ponieważ jednak liczba falowa k_0 jest wielkością rzeczywistą, więc stosownie do zależności (5-34) muszą być spełnione następujące równania:

$$\beta_y^2 + \beta_z^2 - \alpha_y^2 - \alpha_z^2 = k_0^2 \quad (5-36a)$$

$$\alpha_y \beta_y + \alpha_z \beta_z = 0 \quad (5-36b)$$

Możemy wyróżnić trzy charakterystyczne przypadki:

1. $\alpha_y = 0$ (stała amplituda wzdłuż osi y). Ponieważ $\beta_z > 0$, więc zgodnie z zależnością (5-36b) α_z także musi być równe zero. Mamy więc do czynienia z jednorodną falą płaską rozchodzącą się wzdłuż osi z .

2. $\alpha_z = 0$, $\alpha_y \neq 0$. Aby spełnić równanie (5-36b), musi być $\beta_y = 0$. Z równania (5-36a) wynika więc, że $\beta_z^2 = \alpha_y^2 + k_0^2 > k_0^2$, czyli że $v_f = v_z < c$. Mamy teraz do czynienia z falą powierzchniową (rys. 5-8a) rozchodzącą się wzdłuż powierzchni rozdziału z prędkością mniejszą od prędkości światła.

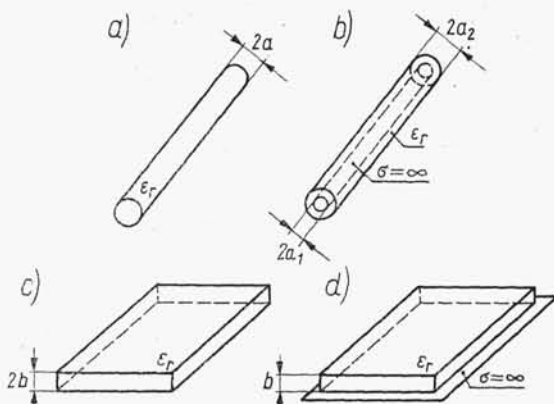
3. $\alpha_z > 0$. Biorąc pod uwagę, iż $\beta_z > 0$ z równania (5-36b) wynika, że α_y i β_y są różne od zera; β_y powinno być ponadto większe od zera, ponieważ fala nie powinna wnikać w półprzestrzeń $y < 0$, więc

$$\alpha_y = -\frac{\alpha_z \beta_z}{\beta_y} < 0$$

tj. amplituda wzrasta eksponencjalnie w kierunku dodatnich y . Płaszczyzny równych amplitud są określone przez $\arctg(\beta_z/\beta_y)$, a płaszczyzny równych faz są do nich prostopadłe (rys. 5-8b).

5.3.2. STRUKTURY I POWIERZCHNIE OPÓŹNIAJĄCE

Fale powierzchniowe mogą rozchodzić się wzdłuż cylindrycznych (rys. 5-9a, b) i płaskich (rys. 5-9c, d) powierzchni opóźniających, a także wzdłuż tzw. *struktur opóźniających* (rys. 5-10).



Rys. 5-9. Przykłady powierzchni opóźniających: a) pręt dielektryczny; b) przewód pokryty warstwą dielektryka; c) płyta dielektryczna; d) warstwa dielektryka na metalowym podłożu

Wzdłuż płaskich struktur i powierzchni opóźniających mogą rozchodzić się fale powierzchniowe płaskie i cylindryczne (promieniowe), przy czym rodzaj fali jest w głównej mierze określony przez sposób pobudzenia.

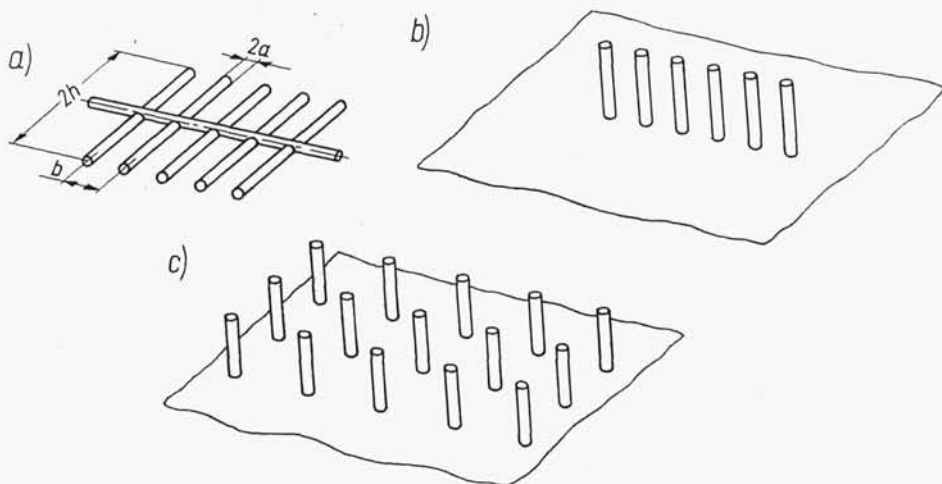
W dalszym ciągu omówimy dokładniej rozchodzenie się fal powierzchniowych wzdłuż pręta dielektrycznego i wzdłuż liniowej struktury dipolowej.

Pręt dielektryczny. Wzdłuż dielektrycznego cylindra o dostatecznie dużym promieniu mogą rozchodzić się fale różnych modów [21].

Rozkład pola wewnątrz dielektryka jest zbliżony do rozkładu pola w falowodzie kołowym z odpowiednim modem. Na zewnątrz dielektryka pole maleje wykładniczo ze wzrostem odległości od jego powierzchni. Mody o symetrii osiowej (E_{0n} , H_{0n}) mogą, podobnie jak w falowodzie, występować niezależnie. Fale nie mające symetrii osiowej tworzą tzw. *fale mieszane*, bowiem czyste fale elektryczne i magnetyczne

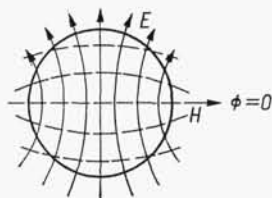
nie spełniają warunków brzegowych. Fale mieszane nazywamy falami typu HE_{mn} lub EH_{mn} w zależności od tego, który typ fali jest dominujący — magnetyczny czy elektryczny. Oba typy fal rozchodzą się z taką samą prędkością fazową.

Anteny dielektryczne pobudzone falami symetrycznymi nie promieniają w kierunku osiowym, a ich przestrzenna charakterystyka promieniowania ma kształt



Rys. 5-10. Przykłady struktur opóźniających: a) dipolowa; b) liniowa unipolowa; c) płaska unipolowa

niecki stożkowej. Z tego względu fal symetrycznych w technice antenowej nie wykorzystuje się. Najbardziej rozpowszechnionym typem fali wykorzystywanym w antenach dielektrycznych jest fala typu HE_{11} . Odpowiada ona fali H_{11} w falowodzie kołowym, z tym że dodatkowo występuje składowa podłużna pola elektrycznego. Fala HE_{11} charakteryzuje się prostą konfiguracją pola (rys. 5-11) i stałością fazy



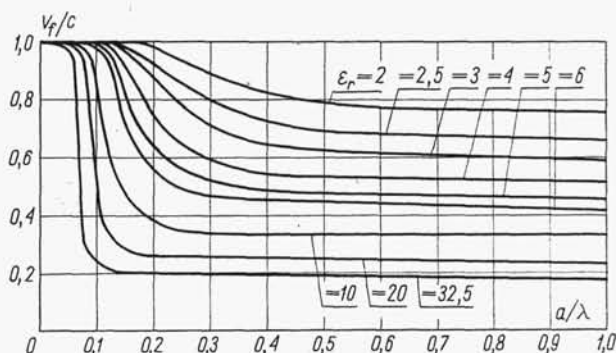
Rys. 5-11. Rozkład pola fali HE_{11} na poprzecznym przekroju pręta dielektrycznego

w przekroju poprzecznym, co zapewnia maksymalne promieniowanie w kierunku osiowym. Przy falach wyższych rzędów w charakterystyce promieniowania występuje kilka ostro zarysowanych listków i w większości przypadków promieniowanie wzdłuż osi jest równe zero. Graniczna długość fali dla pierwszej fali niesymetrycznej HE_{11} jest nieskończenie duża. Oznacza to, iż przy ustalonej częstotliwości fala typu HE_{11} może rozchodzić się wzdłuż dielektrycznego cylindra o dowolnie małym

promieniu. Można więc dobrać promień pręta dielektrycznego tak, aby robocza długość fali była większa od długości granicznej dla fal wyższych rzędów. Na ogół w antenach dielektrycznych nie zachodzi obawa powstania fali symetrycznej, wystarczy zatem uniemożliwić rozchodzenie się fal niesymetrycznych wyższych rzędów. Warunek ten będzie spełniony, gdy

$$a < \frac{3,83}{2\pi} \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_r - 1}} \approx \frac{0,61\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_r - 1}} \quad (5-37)$$

Jeśli promień pręta dielektrycznego jest równy promieniowi granicznemu dla danej częstotliwości, to prędkość fazowa fali powierzchniowej jest równa prędkości

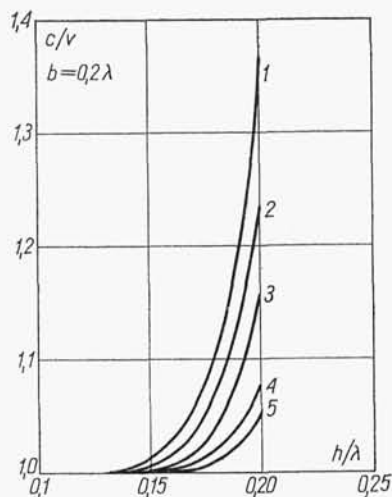


Rys. 5-12. Zależność prędkości fazowej fali HE_{11} w pręcie dielektrycznym od jego promienia

światła w próżni. W miarę zwiększania promienia pręta, prędkość fazowa fali powierzchniowej maleje dążąc asymptotycznie do prędkości światła w jednorodnym ośrodku dielektrycznym.

Zależność stosunku prędkości fazowej do prędkości światła w próżni od promienia pręta dielektrycznego dla fali HE_{11} pokazano na rys. 5-12. Przy dużych wartościach ε_r widać ostre przejście od stanu, w którym dielektryk prawie nie ma wpływu na prędkość fazową fali powierzchniowej (małe a), do stanu, w którym prędkość fazowa jest bliska wartości $c/\sqrt{\varepsilon_r}$. W pierwszym przypadku prawie cała energia pola rozchodzi się poza dielektrykiem, w drugim — w dielektryku. Przy małych wartościach ε_r przejście od jednego stanu do drugiego zachodzi płynnie.

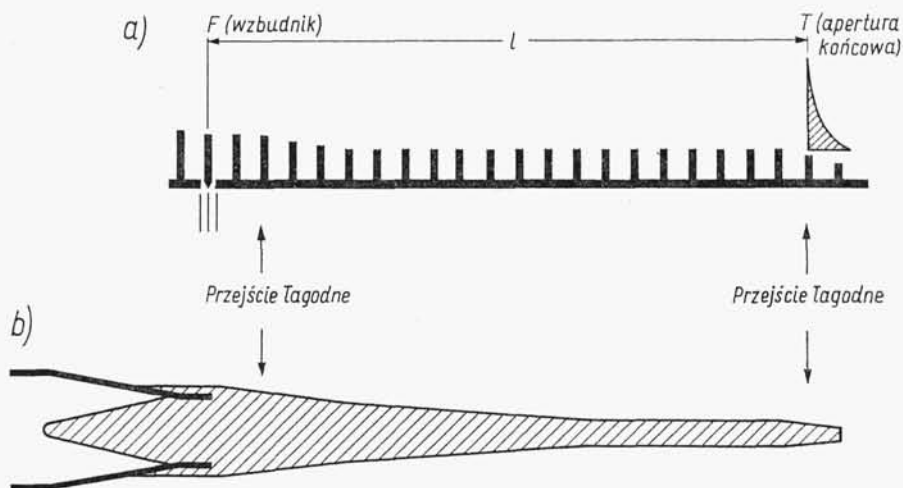
Liniowa struktura dipolowa. Fala powierzchniowa może rozchodzić się wzdłuż liniowej struktury dipolowej tylko wówczas, gdy jej płaszczyzna polaryzacji jest równoległa do dipoli. Ze względu na symetrię, wzdłuż osi struktury można umieścić pręt metalowy, który ułatwia realizację anteny. Jeśli wzdłuż osi struktury umieścimy prostopadle do dipoli płaski ekran metalowy i usuniemy połówki dipoli znajdujące się za ekranem, to otrzymamy liniową strukturę unipolową. Opóźnienie fali wzdłuż struktury dipolowej i wzdłuż odpowiadającej jej struktury unipolowej jest jednakowe. Opóźnienie to zależy od długości dipoli $2h$, ich średnicy $2a$ i odstępu między dipolami b (rys. 5-13).



Rys. 5-13. Zależność opóźnienia w liniowej strukturze dipolowej od długości dipoli
 1 — $a = 0,1h$; 2 — $a = 0,08h$; 3 — $a = 0,06h$; 4 — $a = 0,025h$; 5 — $a = 0,0125h$

5.3.3. ZASADY PROJEKTOWANIA ANTEN Z FALĄ POWIERZCHNIOWĄ

Antena z falą powierzchniową składa się z dwóch zasadniczych części: *struktury opóźniającej* i *wzbudnika*. Dwa typowe przykłady takich anten pokazano na rys. 5-14. Wzbudnik F (dipol i reflektor na rys. 5-14a; falowód na rys. 5-14b) przekształca część energii doprowadzonej do anteny w falę powierzchniową, która rozchodzi się wzdłuż struktury opóźniającej ku końcowi anteny, gdzie zostaje wypromieniowana



Rys. 5-14. Anteny z falą powierzchniową: a) niesymetryczna antena Uda-Yagi (rząd unipoli); b) antena dielektryczna (pręt dielektryczny pobudzany przez falowód kołowy)

w przestrzeni. Stosunek mocy fali powierzchniowej do całkowitej mocy doprowadzonej do anteny (sprawność pobudzenia) zawiera się zwykle między 65 a 75%. Część energii doprowadzonej do anteny, która nie została przekształcona w falę powierzchniową, jest wypromieniowana wprost przez wzbudnik. Charakterystyka promieniowania anteny z falą powierzchniową powstaje więc w wyniku interferencji fali promieniowanej przez strukturę opóźniającą i fali promieniowanej wprost przez wzbudnik, przy czym można założyć, że obecność struktury opóźniającej nie zmienia charakterystyki promieniowania wzbudnika.

W celu zapewnienia dobrych warunków wzbudzenia fali powierzchniowej między regularną częścią anteny a wzbudnikiem stosuje się łagodne przejście. Aby zmniejszyć odbicie na końcu anteny, rozmiary struktury opóźniającej stopniowo zmniejsza się do zera lub do takich rozmiarów, przy których $v_f = c$.

Fala powierzchniowa oświetla *aperturę końcową* anteny (płaszczyzna prostopadła do osi anteny i przechodząca przez punkt T). Obszar oświetlony jest tym większy, im mniejsze jest tłumienie fali powierzchniowej w kierunku poprzecznym, czyli im prędkość fazowa fali powierzchniowej jest bliższa prędkości światła w próżni. Wzrostowi obszaru oświetlonego towarzyszy oczywiście wzrost kierunkowości anteny. Ponieważ powierzchnia ekwifazowa fali powierzchniowej pokrywa się z płaszczyzną apertury, więc maksimum promieniowania występuje wzdłuż osi anteny. Przybliżone wyrażenie na charakterystykę promieniowania apertury końcowej ma postać [19]

$$F'(\theta) \approx \frac{\frac{\lambda_0}{\lambda_z} - 1}{\frac{\lambda_0}{\lambda_z} - \cos(1,25\theta)} \quad (5-38)$$

przy czym:

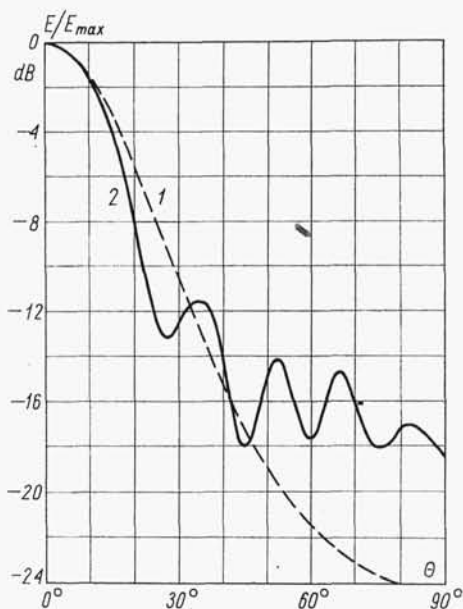
θ — kąt mierzony od osi anteny;

λ_z — długość fali powierzchniowej w aperturze.

Charakterystyka ta nie ma ani zer, ani listków bocznych i jest tym ostrzejsza, im λ_z jest bliższe λ_0 . Przykład charakterystyki promieniowania obliczonej wg wzoru (5-38) pokazano na rys. 5-15 (linia przerywana) dla $\lambda_0/\lambda_z = 1,08$, co jest optymalną wartością ze względu na maksimum kierunkowości dla anteny o długości $4\lambda_0$.

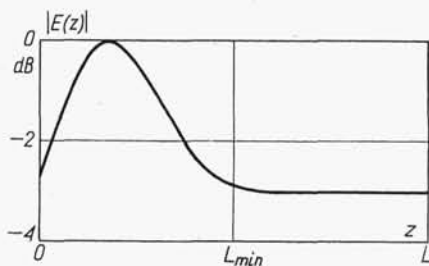
Charakterystyka promieniowania wzbudnika z rys. 5-14a jest stosunkowo szeroka (w przybliżeniu kardiodalna). W połączeniu z charakterystyką promieniowania apertury końcowej daje ona pełną charakterystykę promieniowania anteny z falą powierzchniową, pokazaną linią ciągłą na rys. 5-15 (charakterystyka zmierzona dla $L = 4\lambda_0$ i $\lambda_0/\lambda_z = 1,08$). W otoczeniu osi anteny decydujące znaczenie ma charakterystyka promieniowania apertury końcowej. W miarę zwiększania kąta θ pojawiają się listki boczne będące produktem interferencji charakterystyki apertury i wzbudnika. Dla kątów θ większych od 45° istotne znaczenie ma charakterystyka promieniowania wzbudnika.

Krzywe pokazane na rys. 5-15 odnoszą się do płaszczyzny H , w której charakterystyki promieniowania unipoli są dookólne. Charakterystyka promieniowania anteny w płaszczyźnie E jest nieco węższa, a listki boczne są mniejsze o 2...3 dB, wskutek kierunkowej charakterystyki unipoli.



Rys. 5-15. Charakterystyka promieniowania anteny z falą powierzchniową o długości $4\lambda_0$ zapewniającej maksimum kierunkowości ($\lambda_0/\lambda_z = 1,08$) (według H. Jasik: Antenna Engineering Handbook, McGraw-Hill, New York 1961; zamieszczono za zgodą McGraw-Hill Book Company)

1 — charakterystyka apertury końcowej; 2 — charakterystyka wypadkowa



Rys. 5-16. Rozkład amplitudy wzdłuż anteny z falą powierzchniową

Rozkład amplitudy pola wzdłuż anteny z falą powierzchniową pokazano na rys. 5-16. W pobliżu wzbudnika występuje maksimum amplitudy. Następnie amplituda maleje ze wzrostem odległości aż do odległości L_{min} , przy której ustalają się warunki fali bieżącej. Przyjmuje się, że warunki fali bieżącej ustalają się w odległości,

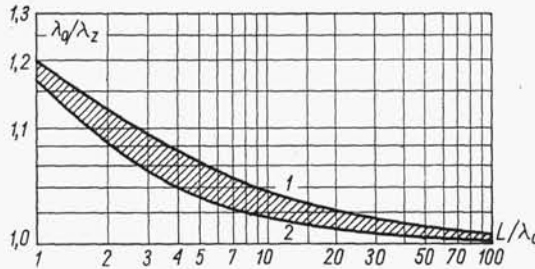
w której fala wypromieniowana przez wzbudnik (rozchodzącą się z prędkością światła w próżni) wyprzedza falę powierzchniową o ok. 60°

$$\beta_z L_{min} - k_0 L_{min} = \frac{\pi}{3} \quad (5-39)$$

Złożoność funkcji rozkładu amplitudy i fazy pola wzdłuż anteny z falą biejącą powoduje, że ogólna analiza charakterystyk promieniowania tego typu anten jest, praktycznie biorąc, niemożliwa.

Na podstawie danych eksperymentalnych dla struktury unipolowej bez płynnych przejść na rys. 5-17 (krzywa 1) przedstawiono zależność względnej prędkości fazowej $c/v = \lambda_0/\lambda_z$ zapewniającej maksymalną kierunkowość anteny z falą powierzchniową od długości anteny L/λ_0 .

Gdyby sprawność pobudzenia była bardzo duża, tak że można by pominąć wpływ promieniowania wzbudnika, to wystarczyłoby, aby długość anteny była



Rys. 5-17. Zależność względnej prędkości fazowej $c/v = \lambda_0/\lambda_z$ zapewniającej maksymalną kierunkowość anteny z falą powierzchniową od długości anteny L/λ_0 (według H. Jasik: Antenna Engineering Handbook, McGraw-Hill, New York 1961; zamieszczono za zgodą McGraw-Hill Book Company)

1 — krzywa eksperymentalna według Ehrenspecka i Poehlera; 2 — krzywa teoretyczna dla idealnego pobudzenia (sprawność pobudzenia = 100%)

równa długości L_{min} , przy której ustalają się warunki fali biejącej. Z zależności (5-39) wynika, że wówczas

$$\frac{\lambda_0}{\lambda_z} = 1 + \frac{\lambda_0}{6L} \quad (5-40)$$

Wykres zależności (5-40) przedstawiono na rys. 5-17 (krzywa 2). Doświadczenie wykazuje, że zmiany względnej prędkości fazowej w granicach wyznaczonych przez dwie wyżej zdefiniowane krzywe (obszar zakreskowany na rys. 5-17) mają nieznaczny wpływ na kierunkowość anteny.

W przybliżeniu maksymalna kierunkowość anteny z falą powierzchniową wyraża się zależnością

$$D \approx \frac{10L}{\lambda_0} \quad 3 \leq L/\lambda_0 \leq 8 \quad (5-41)$$