

ГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ДИАПАЗОНА
ОДНОВОЛНОВОГО РЕЖИМА ТРЕХСЛОЙНОГО
СИММЕТРИЧНОГО ВОЛНОВОДА
ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ

Прямоугольные волноводы со слоистым заполнением диэлектриками широко используются в различных СВЧ-устройствах: фазовращателях, согласующих трансформаторах, ферритовых устройствах. Один из важных вопросов, возникающих при разработке таких устройств — определение рабочего диапазона частот, т. е. диапазона частот, в котором возможно распространение одного единственного основного типа волны. Формулы для расчета спектра критических частот слоистых прямоугольных волноводов получены в работе*. Однако эти формулы представляют собой трансцендентные уравнения, решение которых без применения ЭВМ нерационально.

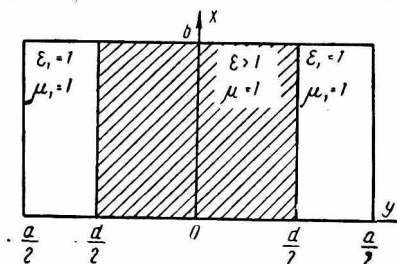


Рис. 1.

В настоящей работе описан прием преобразования трансцендентного уравнения к алгебраическим выражениям, допускающим графическое представление для различных геометрических размеров поперечного сечения симметричных слоистых волноводов. С помощью этих графиков можно быстро произвести инженерный расчет диапазона одноволнового режима.

Преобразование характеристических трансцендентных уравнений. Рассмотрим прямоугольный волновод с трехслойным симметричным заполнением (рис. 1). Слои образованы идеальными и изотропными диэлектриками. Средний слой представляет собой более плотную среду по сравнению с боковыми слоями ($\epsilon > \epsilon_1$). Относительные магнитные проницаемости всех слоев одинаковы: стенки волновода идеально проводящие.

В таком волноводе могут распространяться четные и нечетные LE - и LM -типы волн. Основной тип — LE_{01} -волна, ближайшие высшие типы — волны LE_{02} и LM_{10} . Дисперсионные уравнения для данных типов волн представлены формулами (П. 60), (П. 59) и (П. 47)**.

* Егоров Ю. В. Частично заполненные прямоугольные волноводы. М., «Советское радио», 1967. 215 с.

** Там же.

Преобразуем эти трансцендентные уравнения для критического случая $k_z = 0$, для чего введем безразмерные параметры

$$\alpha_c = d/\lambda_c; \beta_c = a/\lambda_c; \vartheta = \lambda_c/2b, \quad (1)$$

где λ_c — критическая длина волны.

Учитывая введенные параметры, представим уравнения (II. 60), (II. 59) и (II. 47) при $k_z = 0$ следующим образом.

1. Волна LE_{01} -типа (уравнение (II. 60)):

$$\beta_c = \alpha_c + \frac{1}{\pi} \operatorname{arccctg} \sqrt{\varepsilon} \operatorname{tg} \pi \alpha_c \sqrt{\varepsilon}; \quad (2)$$

$$0 \leq \alpha_c \leq 1/2\sqrt{\varepsilon}.$$

2. Волна LE_{02} -типа (уравнение (II. 59)):

$$a) 0 \leq \alpha_c \leq 1/2\sqrt{\varepsilon};$$

$$\beta_c = \alpha_c + 0,5 + \frac{1}{\pi} \operatorname{arccctg} \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} \operatorname{tg} \pi \alpha_c \sqrt{\varepsilon}; \quad (3)$$

$$б) 1/2\sqrt{\varepsilon} \leq \alpha_c \leq 1/\sqrt{\varepsilon};$$

$$\beta_c = \alpha_c + \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} \operatorname{ctg} (\alpha_c \sqrt{\varepsilon} - 0,5) \pi. \quad (3a)$$

3. Волна LM_{10} -типа (уравнение (II. 47)):

$$\beta_c = \alpha_c = \frac{1}{\pi \sqrt{\vartheta^2 - 1}} \operatorname{arcth} \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} \sqrt{\frac{\varepsilon - \vartheta^2}{\vartheta^2 - 1}} \operatorname{tg} \pi \alpha_c \sqrt{\varepsilon - \vartheta^2} \quad (4)$$

Рассматривая два предельных случая: $\alpha_c = 0$, $\beta_c \neq 0$ ($d = 0$, пустой волновод) и $\alpha_c = \beta_c$ ($d = a$, полностью заполненный волновод), из (4) находим возможные пределы изменения величины ϑ :

$$1 \leq \vartheta \leq \sqrt{\varepsilon}. \quad (5)$$

В случае пустого волновода $\alpha_c = 0$, $\vartheta = 1$, т. е. $\lambda_c = 2b$ и $\beta_c = a/2b$, в случае заполненного — $\alpha_c = \beta_c$, $\vartheta = \sqrt{\varepsilon}$, т. е. $\lambda_c = 2b\sqrt{\varepsilon}$ и $\beta_c = \alpha_c = a/2b\sqrt{\varepsilon}$. Однако анализ выражения (4) показал, что на интервале $0 \leq \alpha_c \leq a/2b\sqrt{\varepsilon}$ функция β_c для каждого значения ϑ имеет асимптоту ($\beta_c = \infty$), уравнение которой $\alpha_c = \alpha_{ac}$.

Величину α_{ac} находим по формуле

$$\alpha_{ac} = \frac{1}{\pi \sqrt{\varepsilon - \vartheta^2}} \operatorname{arctg} \varepsilon \sqrt{\frac{\vartheta^2 - 1}{\varepsilon - \vartheta^2}}. \quad (6)$$

Таким образом, для заданных величин ε и ϑ значения α_c лежат в интервале:

$$0 \leq \alpha_c \leq \alpha_{ac}. \quad (7)$$

Итак, трансцендентные уравнения (II. 60), (II. 59) и (II. 47) преобразованы в алгебраические выражения (2) — (4). Зависимости (2), (3), (3,a), (3,b) удобно представить на плоскости $\alpha_c - \beta_c$ в виде семейства кривых, используя ε как параметр (рис. 2). Выражение (4) следует изобразить на плоскости $\alpha_c - \beta_c$ в виде семейства кривых по ϑ для заданного значения ε , т. е. необходимо

построить серию семейств для ряда значений ϵ , по которым построены семейства кривых с помощью (2), (3), (3,a), (3,б). В качестве примера на рис. 3 представлено семейство кривых, построенное по формуле (4) при $\epsilon = 9$.

Для конкретных расчетов критических длин волн LE_{01} и LE_{02} -типов соотношения (2) и (3) необходимо дополнить уравнением прямой в системе координат (α_c, β_c) :

$$\beta_c = \frac{a}{d} \alpha_c, \quad (8)$$

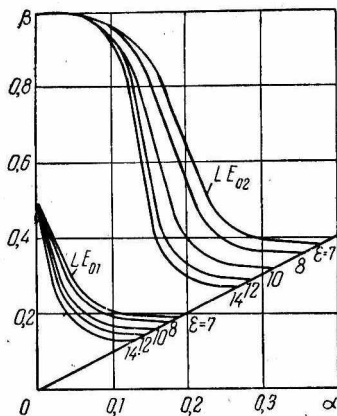


Рис. 2.

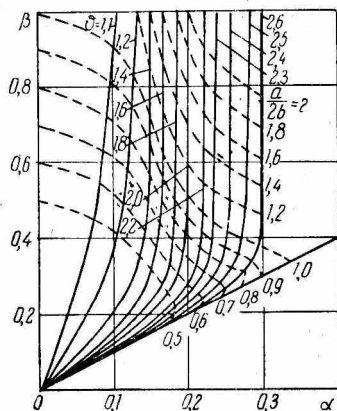


Рис. 3.

что следует из определения (1). Изменение длины волны λ_c при фиксированном отношении (a/d) приводит к движению точки наблюдения по прямой (8). Отмечая на рис. 2 точки пересечения этой прямой с кривыми для LE_{01} и LE_{02} при заданном ϵ , находим соответствующие значения β_c и рассчитываем λ_c :

$$\lambda_c = a/\beta_c. \quad (9)$$

Для расчета критической длины волны типа LM_{10} , уравнение (4) необходимо дополнить не только уравнением прямой (8), но и уравнением гиперболического типа:

$$\beta_c = \frac{a/2b}{\delta}. \quad (10)$$

Семейство кривых уравнения (9) при различных значениях отношения $a/2b$ наносится на графиках уравнения (4), как показано на рис. 3. Критическая длина волны λ_c определяется по формуле (9), где β_c — координата точки пересечения прямой (8) с кривой (10).

Зная критические длины волн LE_{01} -, LE_{02} - и LM_{10} -типов, можно установить основной тип волны (наибольшая критическая длина волны) и ближайший высший тип (самая большая после основной критическая длина волны) и, следовательно, определить диапазон одноволнового режима.