

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Кафедра «Антенны и устройства СВЧ»

Волна H_{10} в прямоугольном волноводе

Методические указания к лабораторной работе № 1

1. Цель работы

1.1. Изучить свойства и конструкцию прямоугольного волновода и измерительной линии на прямоугольном волноводе, методику измерения длины волны в волноводе и параметров, характеризующих режим работы линии передачи.

1.2. Исследовать свойства основной волны в прямоугольном волноводе.

2. Сведения из теории

2.1. Общие свойства электромагнитных волн в линиях передачи

В диапазоне сверхвысоких и крайневысоких частот (частота $f > 1$ ГГц) в качестве линий передачи широко используются полые металлические трубы и диэлектрические стержни с различной формой поперечного сечения. На рис. 1 схематически показаны их основные типы. Такие линии передачи называются волноводами. Диэлектрические волноводы используются также и в оптическом диапазоне частот и называются световодами.

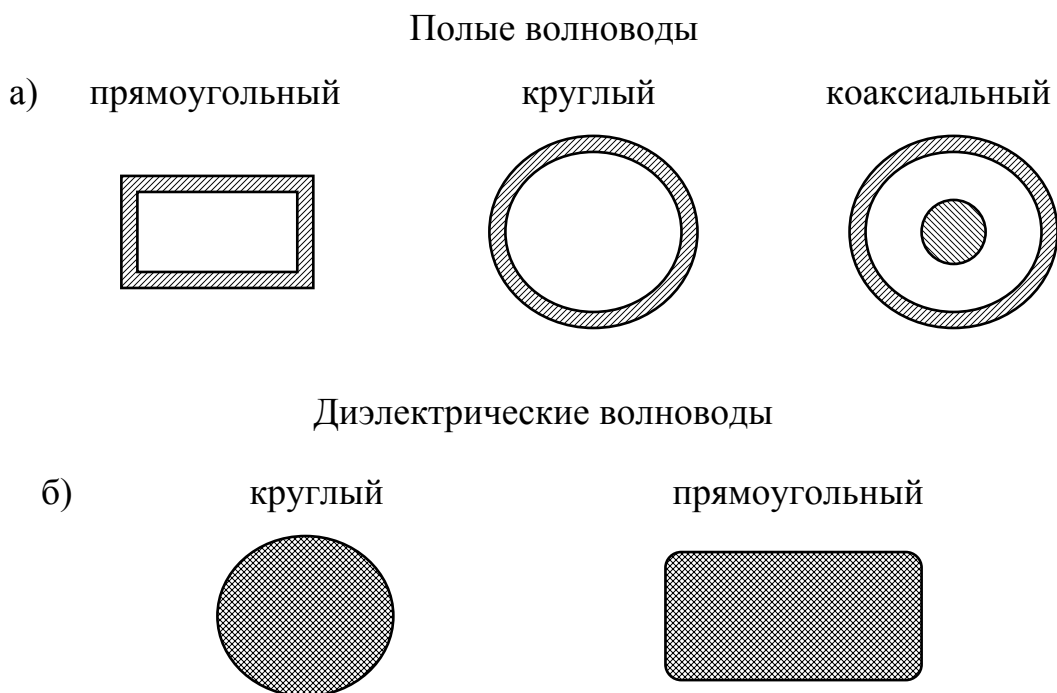


Рис. 1. Типы линий передачи

Распространение электромагнитных волн (ЭМВ) в таких волноводах сопровождается явлением полного отражения от границы раздела. Границей раздела в полых волноводах является граница между металлической стенкой волновода и диэлектриком, заполняющим его полость; в диэлектрических волноводах - граница между двумя диэлектриками: диэлектриком, из которого сделан волновод и диэлектриком окружающего пространства.

Основные свойства ЭМВ в волноводах можно выяснить, рассматривая суммарное поле двух плоских волн т.е. волн, у которых равнофазная поверхность (или фронт), плоская и которые распространяются под некоторым углом к границе раздела (или к оси волновода). Удобно это сделать на примере так называемого плоского волновода, состоящего из двух параллельных металлических поверхностей А и В - рис.2. Плоская ЭМВ, распространяющаяся под некоторым углом θ к оси волновода Z, отражается от поверхности А в соответствии с законом отражения ($\varphi_i = \varphi_R$), попадает на поверхность В, отражается от нее и т.д.

На рис. 2 пунктиром показаны два фронта плоской волны 1 и 2, фазы на которых отличаются на 2π . Расстояние между этими фронтами, как известно, равно длине волны λ (длина волны показана на рис. 2). В результате многократных отражений от поверхностей А и В в каждой точке пространства между этими поверхностями существуют две плоские ЭМВ, в которых векторы плотности потока мощности Π_i и Π_R симметрично расположены по отношению к оси волновода Z. Эти волны называются парциальными. Суммарный вектор плотности потока мощности $\Pi = \Pi_i + \Pi_R$ направлен вдоль оси Z и указывает на направление переноса мощности в волноводе. Вектор фазовой скорости суммарной волны V_ϕ (скорость движения фронта волны) параллелен вектору Π и, следовательно, направлен вдоль оси Z. Поскольку в суммарном поле вектор V_ϕ направлен вдоль оси Z, длину волны в волноводе следует определить как расстояние между двумя точками на оси Z, фазы в которых отличаются на 2π - точки "а" и "b" на рис. 2. Это расстояние на рис. 2 обозначено символом λ_B и называется длиной волны в волноводе.

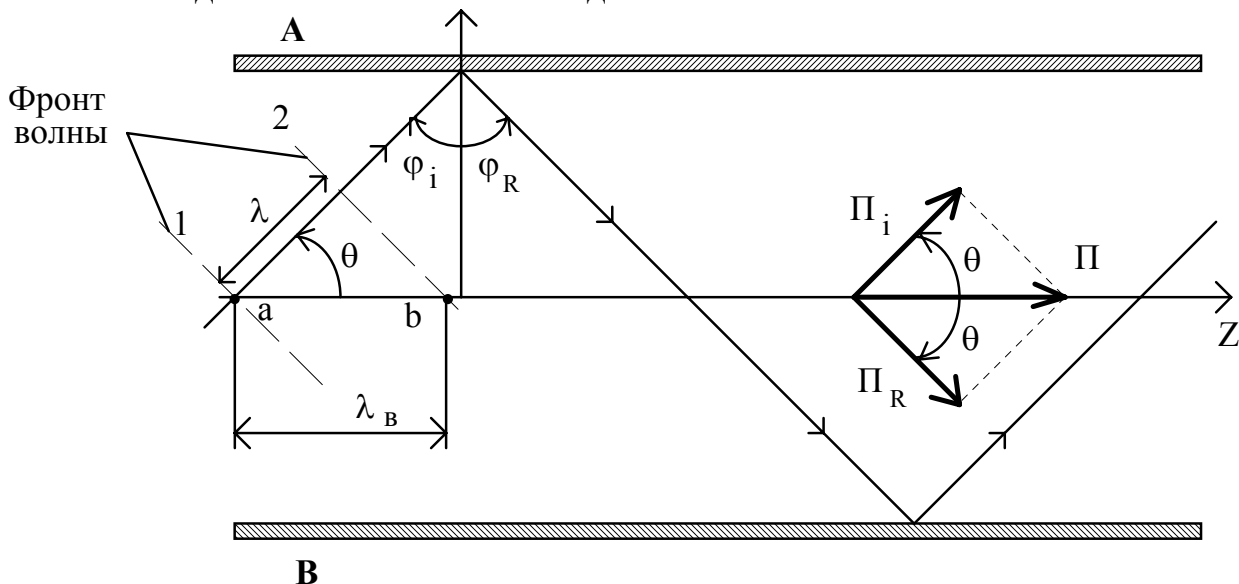


Рис. 2. Образование волноводной волны

Из рис. 2 следует, что

$$\lambda_B = \frac{\lambda}{\cos \theta} > \lambda. \quad (1)$$

Поскольку длина волны - это расстояние, которое проходит фронт волны за период колебаний T , можно записать, что $\lambda_g = V_\phi \cdot T$ и $\lambda = c \cdot T$, где $c = 3 \cdot 10^8$ м/сек - скорость света в пространстве между пластинами А и В. Из приведенных соотношений следует, что $\frac{V_\phi}{c} = \frac{\lambda_g}{\lambda}$ или

$$V_\phi = \frac{c}{\cos \theta} > c. \quad (2)$$

Как видно, в волноводе длина волны λ_g и фазовая скорость V_ϕ больше, чем в свободном пространстве λ и c . При $\theta=90^\circ$, как следует из рис.2, волна не распространяется вдоль оси волновода, а колеблется между пластинами А и В (между стенками волновода). Формально при этом $V_\phi = \infty$, $\lambda_g = \infty$. Фронт плоской волны оказывается параллельным оси Z , во всех точках оси волновода фазы поля одинаковы. Случай $\theta=90^\circ$ соответствует переходу от поля, распространяющегося по волноводу, к так называемому местному (нераспространяющемуся) полю, колеблющемуся между боковыми стенками. В местном поле энергия не передается вдоль оси волновода и скорость переноса энергии $V_g = 0$. В плоской волне, распространяющейся в волноводе путем многократных отражений от стенок (в парциальной волне) скорость переноса энергии в направлении ее распространения равна скорости света " c ", если внутри волновода находится диэлектрик с малыми потерями (когда дисперсии нет). Вектор фазовой скорости направлен к оси волновода под углом θ (рис.2). Проекция этой скорости на ось волновода равна

$$V_g = c \cdot \cos \theta < c. \quad (3)$$

Из выражений (2) и (3) следует, что

$$V_g V_\phi = c^2. \quad (4)$$

Угол θ зависит от соотношения длины волны в свободном пространстве λ и так называемой критической длины волны $\lambda_{кр}$, которая зависит от формы и размеров поперечного сечения волновода. Значений критических длин волн в заданном волноводе бесконечное множество. Если $\lambda < \lambda_{кр}$, волна по волноводу распространяется ($\theta < 90^\circ$), если $\lambda > \lambda_{кр}$ волна по волноводу не распространяется ($\theta = 90^\circ$).

Рассмотренная общая картина распространения ЭМВ в волноводе с полностью отражающимися стенками справедлива при любой форме поперечного сечения волновода.

В идеальных волноводах (при отсутствии потерь мощности) общие выражения, определяющие векторы поля \vec{E} и волны распространяющейся вдоль оси волновода можно записать в виде

$$\vec{E} = e_o \vec{E}_m \cos(\omega t - \beta z), \quad (5)$$

$$\vec{H} = \vec{h}_o H_m \cos(\omega t - \beta z), \quad (6)$$

где \vec{e}_o, \vec{h}_o – единичные векторы, указывающие на направление векторов \vec{E} и \vec{H} в пространстве;

E_m – амплитуды векторов;

ω – круговая частота волны;

t – время;

$\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$ – коэффициент фазы (единица измерения - рад/м или град/м).

Величины $\vec{e}_o, \vec{h}_o, E_m, H_m$ зависят от координат x, y, z точки в волноводе, где рассматривается поле (точки наблюдения).

В волноводе с потерями мощности волна по мере распространения вдоль оси Z затухает, и в выражениях (5), (6) появляется множитель затухания $e^{-\alpha z}$, где α – коэффициент затухания (единица измерения - Нп/м или дБ/м).

2.2. Классификация волн в волноводах

В основу классификации волн в волноводах положены различия в структурах силовых линий векторов \vec{E} и \vec{H} . Эти различия обусловлены характером поляризации плоских волн, отраженных от стенок волновода (парциальных волн) и образующих суммарное поле. Различают три типа волн (полей) в волноводах:

поперечно-магнитные волны, обозначаемые символом ТМ (Transversion Magnetic - поперечно-магнитное);

поперечно-электрические волны, обозначаемые символом ТЕ, (Transversion Electric - поперечно-электрическое);

поперечно-электромагнитные волны, обозначаемые символом ТЕМ (Transversion Electro-Magnetic) или волны типа Т;

смешанные (гибридные) волны.

Рассмотрим подробнее волны типа ТМ, ТЕ и Т.

Волны типа ТМ. Эти волны образуются при сложении плоских волн, отраженных от стенок, имеющих вертикальную линейную поляризацию. Образование волн типа ТМ иллюстрируется рис.3, где для упрощения рассмотрения показана только одна плоская стенка волновода.

В вертикально поляризованной волне вектор падающей на стенку волны E_i , вектор отраженной от стенки волны E_R лежат в плоскости падения (плоскости ХZ) и имеют проекции на оси Х и Z: в падающей волне – E_{ix}, E_{iz} , в отраженной волне - E_{Rx}, E_{Rz} .

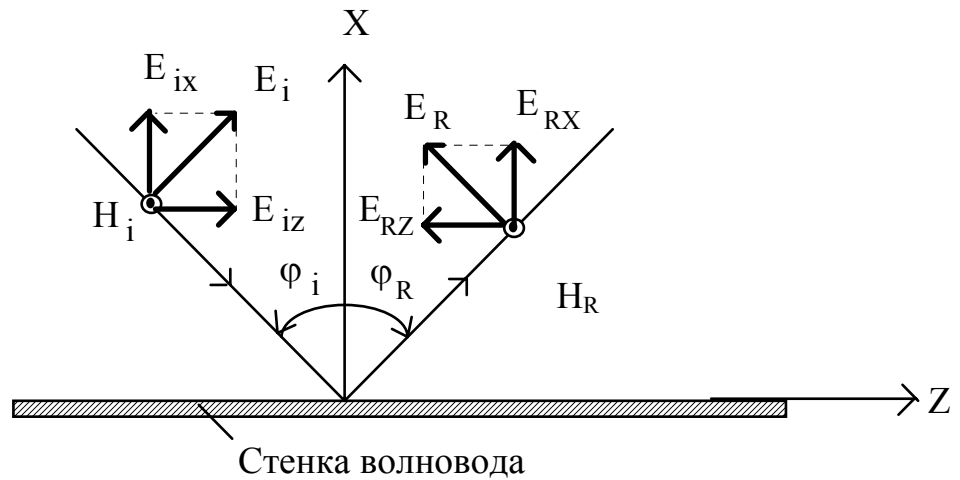


Рис.3. Образование волны типа E

Векторы магнитного поля параллельны границе раздела: в падающей волне - H_i , в отраженной волне - H_R . Эти векторы перпендикулярны оси волновода Z (параллельны оси Y) т.е. имеют составляющие H_{iy} и H_{Ry} . В волне, равной сумме волн, отраженных от противоположных стенок, векторы поля будут иметь следующие составляющие:

$$\vec{E} = E_x \vec{x}_o + E_z \vec{z}_o, \quad (7)$$

$$\vec{H} = H_y \vec{y}_o, \quad (8)$$

где $E_x = E_{ix} + E_{Rx}$; $E_z = E_{iz} + E_{Rz}$; $H_y = H_{iy} + H_{Ry}$; $\vec{x}_o, \vec{y}_o, \vec{z}_o$ - единичные векторы, направленные вдоль осей X, Y, Z .

Волна, описываемая выражениями (7), (8), имеющая поперечные по отношению к оси волновода Z составляющие векторов \vec{E} и \vec{H} и продольную составляющую вектора \vec{E} , называется поперечно-магнитной волной (полем типа ТМ). Эта волна называется также волной (полем) типа E. Таким названием подчеркивается наличие у вектора \vec{E} продольной и поперечной составляющих. В общем случае при произвольной форме поперечного сечения волновода вектор \vec{E} в волне типа E имеет проекцию на ось волновода Z - E_z и поперечную к оси Z составляющую - E_{\perp} , а вектор \vec{H} имеет только поперечную по отношению к оси волновода Z составляющую - H_{\perp} . Для такой волны векторы \vec{E} и \vec{H} удобно записать в виде:

$$\vec{E} = \vec{E}_{\perp} + \vec{E}_z, \quad (9)$$

$$\vec{H} = \vec{H}_\perp. \quad (10)$$

Волны типа ТЕ. Эти волны образуются при сложении плоских волн, отраженных от стенок, имеющих горизонтальную линейную поляризацию. Образование волн типа ТЕ иллюстрируется рис. 4, где для упрощения рассмотрения показана только одна плоская стенка волновода.

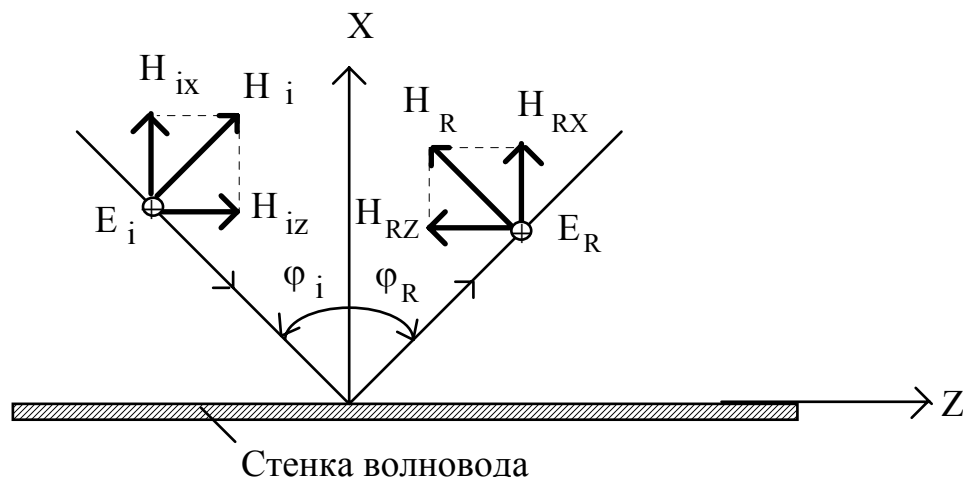


Рис. 4. Образование волны типа Н

В горизонтально поляризованной волне вектор падающей на стенку волны H_i , вектор отраженной от стенки волны H_R лежат в плоскости падения (плоскости XZ) и имеют проекции на оси X и Z : в падающей волне - H_{ix} , H_{iz} , в отраженной волне - H_{RX} , H_{RZ} . Векторы электрического поля параллельны границе раздела: в падающей волне - E_i , в отраженной волне - E_R . Эти векторы перпендикулярны оси волновода Z (параллельны оси Y) т.е. имеют составляющие E_{iy} и E_{Ry} . В волне, равной сумме волн, отраженных от противоположных стенок, векторы поля будут иметь следующие составляющие:

$$\vec{H} = H_x \vec{x}_o + H_z \vec{z}_o, \quad (11)$$

$$\vec{E} = E_y \vec{y}_o, \quad (12)$$

где $H_x = H_{ix} + H_{RX}$, $H_y = H_{iy} + H_{Ry}$.

Волна, описываемая выражениями (11), (12), имеющая поперечные по отношению к оси волновода Z составляющие векторов \vec{E} и \vec{H} и продольную составляющую вектора \vec{H} , называется поперечно электрической волной (полем типа ТЕ). Эта волна называется также волной (полем) типа Н. Таким названием подчеркивается наличие у вектора \vec{H} продольной и поперечной составляющих. В общем случае при произвольной форме поперечного сечения волновода век-

тор \vec{H} в волне типа Н имеет проекцию на ось волновода Z - H_z и поперечную к оси Z составляющую - H_{\perp} , а вектор \vec{E} имеет только поперечную по отношению к оси волновода Z составляющую - E_{\perp} . Для такой волны векторы \vec{E} и \vec{H} удобно записать в виде:

$$\vec{E} = \vec{E}_{\perp}, \quad (13)$$

$$\vec{H} = \vec{H}_{\perp} + \vec{H}_z, \quad (14)$$

Волны типа Т. Волны этого типа имеют векторы \vec{E} и \vec{H} , перпендикулярные оси волновода Z . Эти волны не распространяются путем многократных отражений от стенок волновода, а представляют собой плоскую волну, распространяющуюся вдоль оси волновода. Для волн типа Т справедливы соотношения: $\vec{E} = \vec{E}_{\perp}$, $\vec{H} = \vec{H}_{\perp}$, $\theta=0$, $V_{\phi} = V_g = c$, $\lambda_g = \lambda$.

2.3. Основные свойства полей в волноводах

Во всех волноводах может существовать бесконечное множество полей типа Е и Н, отличающихся друг от друга структурой силовых линий векторов \vec{E} и \vec{H} , фазовыми скоростями и скоростями переноса энергии, критической длиной волны $\lambda_{кр}$, длиной волны в волноводе λ_g и другими параметрами.

При заданной частоте (частоте генератора, возбуждающего волновод) ω в конечном числе полей угол $\theta < 90^\circ$, и эти поля в виде волн распространяются вдоль оси волновода. В бесконечном числе полей угол $\theta=0$, и эти поля являются местными (нераспространяющимися). Чем больше частота генератора ω , тем больше количество распространяющихся полей. В каждом поле угол θ становится равным 90° при определенной частоте, которая называется критической и обозначается символом $\omega_{кр}$. Соответствующая ей длина волны в свободном пространстве называется критической длиной волны и обозначается символом $\lambda_{кр}$. Данное поле в волноводе является распространяющейся волной ($\theta < 90^\circ$), если

$$\lambda < \lambda_{кр}, \quad (15)$$

где λ - длина волны в свободном пространстве с такими же диэлектрической и магнитной проницаемостями ϵ_a, μ_a , что и в среде, заполняющей волновод;

$$\lambda = \frac{1}{f \sqrt{\epsilon_a \mu_a}}, f - \text{частота волны.}$$

Поле по волноводу не распространяется (является местным, $\theta=90^\circ$), если

$$\lambda > \lambda_{кр}. \quad (16)$$

Показано, что длина волны в волноводе, фазовая скорость, скорость переноса энергии связаны с критической длиной волны соотношениями:

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2}}, \quad (17)$$

$$V_\phi = \frac{c}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2}}, \quad (18)$$

$$V_g = c \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2}, \quad (19)$$

где $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_a \mu_a}}$ - скорость света в среде с параметрами ϵ_a, μ_a . Для распространяющейся волны $\lambda < \lambda_{кр}$, поэтому в соответствии с выражениями (17)-(19) $\lambda_g > \lambda, V_\phi > c, V_g < c$. Для местного поля $\lambda > \lambda_{кр}$, и как следует из выражений (17)-(19), величины λ_g, V_ϕ, V_g становятся мнимыми.

Основной волной в данном волноводе называется волна, имеющая максимальную критическую длину волны. На рис. 5 показан ряд критических длин волн в произвольном волноводе. Ряд начинается с максимальной длины волны $\lambda_{кр1}$ и убывает до нуля. Значение $\lambda_{кр1}$ соответствует основной волне.

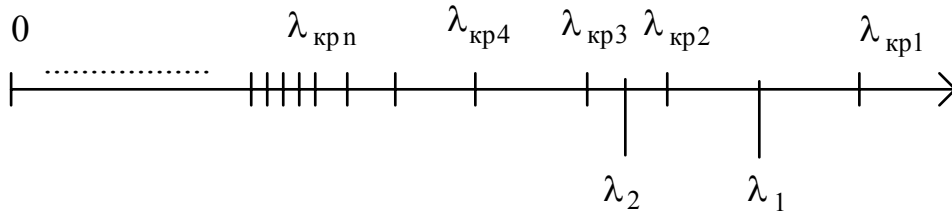


Рис. 5. Ряд критических длин волн

Каждый тип поля в волноводе имеет свои значения λ_g, V_ϕ, V_g . При этом частота колебаний во всех полях одинакова и равна частоте генератора, возбуждающего волновод.

При любой заданной частоте генератора f и соответствующей ей длине волны в свободном пространстве λ в волноводе для конечного числа полей выполняется условие $\lambda < \lambda_{кр}$, и эти поля будут распространяющимися волнами. Для бесконечного числа полей выполняется условие $\lambda > \lambda_{кр}$, и эти поля будут местными (нераспространяющимися). Если, например, длина волны генератора $\lambda = \lambda_1$, в соответствии с рис. 5 выполняется условие $\lambda_{кр2} < \lambda < \lambda_{кр1}$. Поэтому в волноводе будет распространяться только одна волна, у которой критическая

длина волны равна $\lambda_{кр1}$, т.е. основная волна. При $\lambda = \lambda_2$ в волноводе будут распространяться две волны с критическими длинами волн $\lambda_{кр2}$ и $\lambda_{кр1}$. И в первом и во втором случаях местных полей в волноводе будет бесконечное множество. Только при выполнении условия

$$\lambda_{кр2} < \lambda < \lambda_{кр1} \quad (20)$$

в волноводе будет распространяться одна (основная) волна. Такой режим работы волновода называется **одноволновым** (или **одномодовым**) и, как правило, используется для передачи сигнала по волноводу.

2.4. Электромагнитные волны в прямоугольном, круглом и коаксиальном волноводах

Поперечные сечения прямоугольного, круглого и коаксиального волноводов показаны на рис. 1а. Стенки волноводов делаются из хорошо проводящих металлов (медь, алюминий) и с внутренней стороны с целью защиты от коррозии и уменьшения тепловых потерь мощности покрываются тонким слоем (40-60 мкм) слабо окисляющегося металла (золото, серебро, палладий) или лака. Как правило, полость волновода, через которую ЭМВ переносит мощность, заполняется сухим воздухом или специальным газом с повышенной электрической прочностью.

В прямоугольных и круглых волноводах существует бесконечное множество полей типа Е и Н. В коаксиальных волноводах, помимо бесконечного числа полей Е и Н, существует одно поле типа Т. Это поле имеет $\lambda_{кр} = \infty$, поэтому является основным.

Для математического описания полей в прямоугольных волноводах используется прямоугольная система координат x, y, z , в круглых и коаксиальных волноводах - цилиндрическая система r, φ, z . Каждый из рассматриваемых волноводов имеет свои особенности и области применения. Рассмотрим более подробно прямоугольный волновод.

Прямоугольный волновод (рис.6) является наиболее распространенным типом линии передачи в миллиметровом, сантиметровом и в коротковолновой части дециметрового диапазона. Он позволяет передавать весьма значительные уровни мощности с малым затуханием, является широкополосным и механически прочным. Через "а" и "b" на рис.6 обозначены внутренние размеры широкой и узкой стенок. Толщина стенок, если она больше нескольких десятков микрометров, не влияет на свойства поля в волноводе и выбирается для обеспечения механической прочности. За счет многократных отражений плоской волны от стенок волновода в волноводе образуются волны типа Е и Н. При этом вдоль координат X, Y устанавливается стоячая волна поля. Векторы поля \vec{E} и \vec{H} представляются в виде суммы трех проекций (составляющих) на оси координат $X,$

Y, Z - $E_x, E_y, E_z, H_x, H_y, H_z$. Выражения для векторов поля и критической длины волны находятся путем решения уравнений Максвелла.

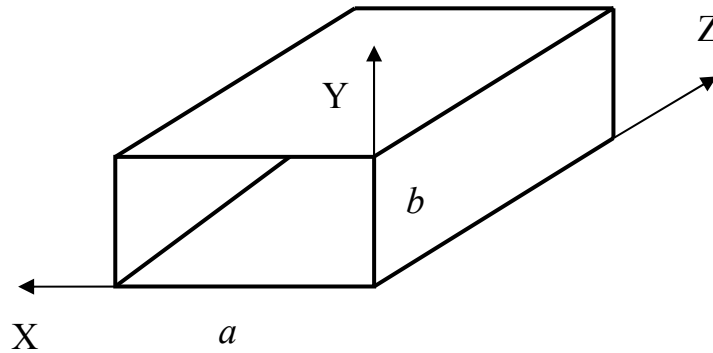


Рис.6. Прямоугольный волновод

В частности, для полей типа Н получены следующие выражения для этих составляющих.

$$\begin{aligned}
 E_x &= -E_{max} \frac{a}{b} n \cos\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b} y\right) \cos(\omega t - \beta z); \\
 E_y &= E_{max} m \sin\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b} y\right) \cos(\omega t - \beta z); \\
 E_z &= 0; \\
 H_x &= -\frac{E_{max}}{Z_c} m \sin\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b} y\right) \cos(\omega t - \beta z); \\
 H_y &= -\frac{E_{max}}{Z_c} \frac{a}{b} n \cos\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b} y\right) \cos(\omega t - \beta z); \\
 H_z &= -\frac{2a\lambda_g}{\lambda_{кр}^2} \cdot \frac{E_{max}}{Z_c} \cos\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b} y\right) \cos(\omega t - \beta z - 90^\circ),
 \end{aligned} \tag{21}$$

где E_{max} - максимальное значение амплитуды составляющей поля E_y ;

$Z_c = \sqrt{\frac{\mu_a}{\epsilon_a}} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2}}$ - характеристическое сопротивление волновода - отношение

поперечных составляющих векторов \vec{E} и \vec{H} ;

$m=0,1,2,3,\dots$; $n=0,1,2,3,\dots$ - целые числа.

Критическая длина волны для полей типа Е и Н определяется одним и тем же выражением:

$$\lambda_{кр} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}}. \quad (22)$$

Из выражений (21) следует, что составляющие векторов поля \vec{E} и \vec{H} вдоль сторон волновода a и b меняются по закону синуса или косинуса, причем на стороне a укладывается m полупериодов, на стороне b – n полупериодов. В соответствии с этим поля в прямоугольном волноводе обозначаются символами E_{mn} и H_{mn} . Символы m и n не могут одновременно принимать нулевые значения, так как при этом все составляющие векторов \vec{E} и \vec{H} становятся равными нулю.

В прямоугольных волноводах обычно $a \leq b$. В этом случае, как следует из (22), максимальная критическая длина волны соответствует значениям $m=1$, $n=0$ и равна $2a$. Следовательно, основной волной в прямоугольном волноводе является волна H_{10} . Критические длины волн в прямоугольном волноводе для полей типа E и H обозначаются символами λ_{emn} и λ_{hmn} . Таким образом, для основной волны $\lambda_{h10}=2a$. Ближайшая к основной является волна H_{20} , ее критическая длина волны $\lambda_{h20}=a$. В волноводе будет распространяться только волна H_{10} , если выполняется условие ее единственности $\lambda_{h20} < \lambda < \lambda_{h10}$ или

$$a < \lambda < 2a. \quad (23)$$

Структура силовых линий векторов \vec{E} и \vec{H} волны H_{10} показана на рис. 7 в трех проекциях.

Вектор \vec{E} имеет проекцию только на ось Y – E_y , а вектор \vec{H} – проекции на оси X, Z – H_x и H_z . Силовые линии вектора \vec{E} соединяют между собой широкие стенки волновода. Силовые линии вектора \vec{H} представляют собой эллипсы, лежащие в плоскости XZ . Направление силовых линий меняется два раза за период колебания.

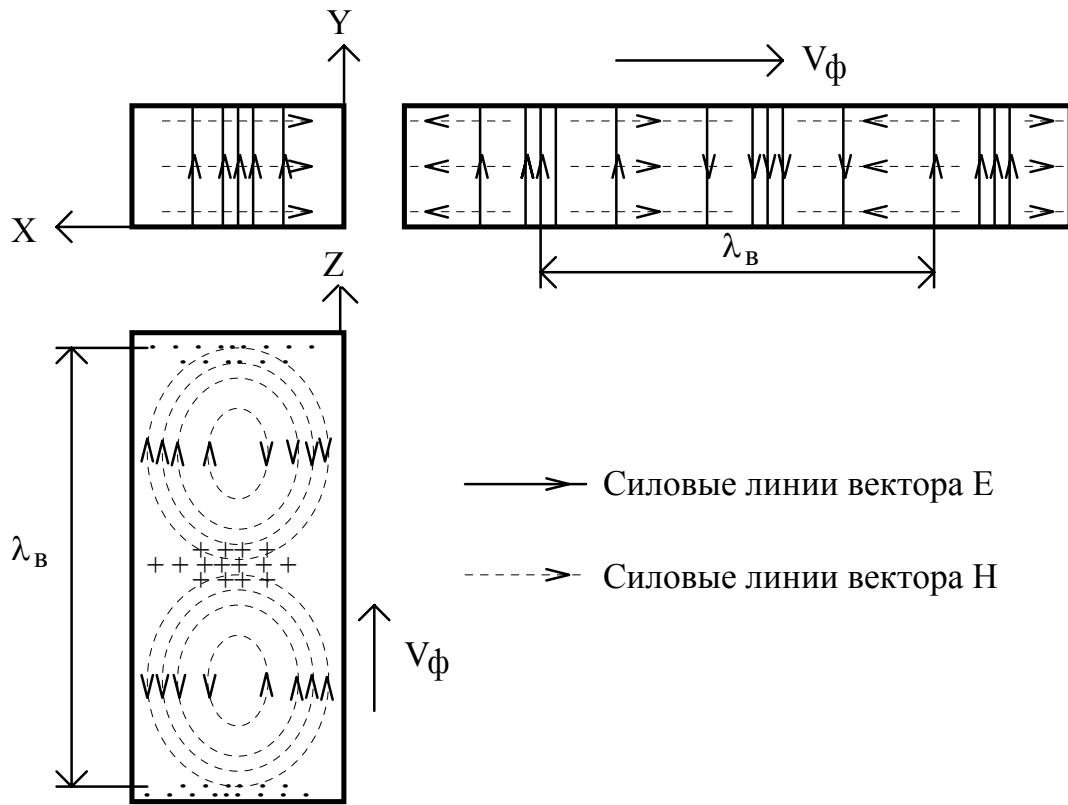


Рис. 7. Структура силовых линий векторов поля волны H_{10}

На рис.8 показаны зависимости указанных составляющих поля от координат X и Y . Показана также структура силовых линий векторов \vec{E} и \vec{H} в поперечном сечении волновода. Как видно, на стороне волновода " a " укладывается один полупериод (одна полуволна) изменения поля, а от координаты Y поле не зависит - на стороне " b " укладывается ноль полупериодов. Сказанное подтверждает физический смысл индексов m и n . Подставив значение $\lambda_{h10}=2a$ в выражения (17)-(19), получим для волны H_{10} :

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}},$$

$$V_\phi = \frac{c}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}}, \quad (24)$$

$$V_\phi = c \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}.$$

Графики зависимости λ_g, V_ϕ, V_g от λ показаны на рис. 9.

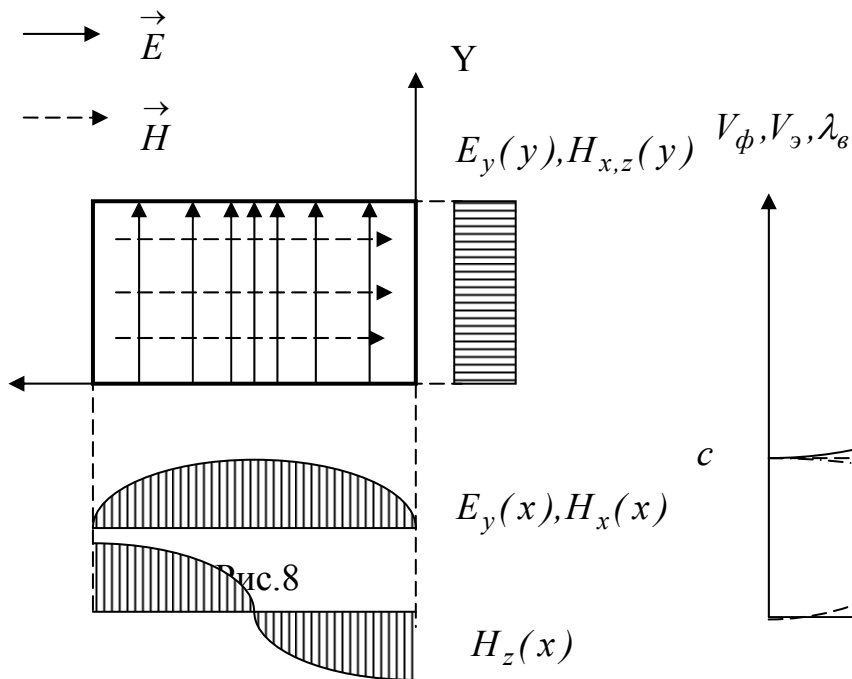


Рис.8. Распределение поля в поперечном сечении для волны H_{10}

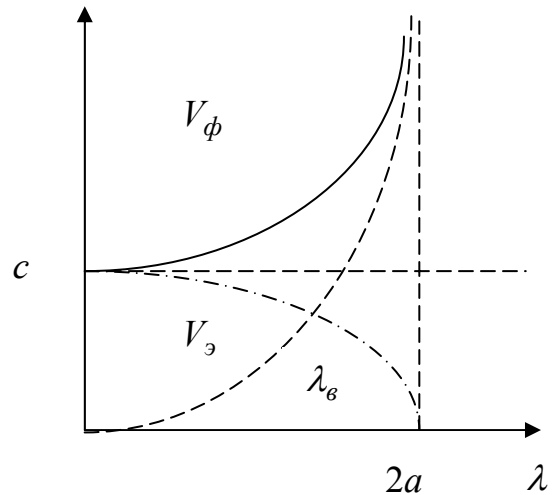


Рис.9. Зависимость V_ϕ, V_g, λ_g от длины волны

2.5. Режимы работы волновода (линии передачи)

Реальный волноводный тракт (линия передачи на волноводе) состоит из отрезков волновода и различных устройств, к числу которых относятся такие, как:

- возбуждающие устройства, связывающие источник электромагнитной энергии с линией передачи;
- нагрузка, потребляющая энергию электромагнитной волны, распространяющейся в линии передачи и несущей необходимую информацию (сигнал);
- согласующие устройства;
- различные ответвления, делители и сумматоры сигналов;
- частотные фильтры и фильтры типов волн;
- переключатели и выключатели и т.д.

Присутствие в линии передачи устройств, выполняющих различные функции при передаче сигнала и его обработке, приводит к установлению вдоль линии передачи сложного распределения поля. Это связано с наличием в линии передачи так называемой прямой волны, распространяющейся от источника сигнала к потребителю (нагрузке), и обратной волны, отраженной от различных устройств.

Режим работы линии передачи характеризуется рядом параметров, которые в процессе ее эксплуатации подлежат контролю и поддерживаются в опре-

деленных пределах путем предусмотренных регулировок. Рассмотрим эти параметры.

Суперпозиция прямых и обратных волн в линии передачи. Рассмотрим отрезок волновода, возбуждаемый в сечении «А» (рис.10), считая, что в этом сечении (на входе волновода) включен источник электромагнитного поля (генератор Г). В сечении «В» включена нагрузка Н. Длина линии - l , ось линии направлена вдоль координаты Z .



Рис.10. Линия передачи

Величину вектора напряженности электрического поля прямой волны, распространяющейся от генератора в сторону нагрузки, обозначим символом E_{nad} , волны, обратной, отраженной от нагрузки, распространяющейся в сторону генератора - символом E_{omp} . Волны, соответствующие этим векторам, можно записать в виде:

$$\begin{aligned} E_{nad} &= E_{nad.m} \cos(\omega t - \beta z) \\ E_{omp} &= E_{omp.m} \cos(\omega t + \beta z) \end{aligned} \quad (25)$$

где $E_{nad.m}$, $E_{omp.m}$ – амплитуды векторов;

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_g} \text{ – коэффициент фазы.}$$

В выражениях (23) фазы прямой и обратной волн равны:

$$\varphi_{nad} = \omega t - \beta z, \quad \varphi_{omp} = \omega t + \beta z. \quad (26)$$

Как видно, фаза прямой волны уменьшается с ростом Z (возрастает в сторону отрицательных значений), фаза обратной волны увеличивается с ростом Z . Разность фаз этих волн

$$\varphi = \varphi_{omp} - \varphi_{nad} = 2\beta z = \frac{4\pi}{\lambda_g} z. \quad (27)$$

Из выражения (27) следует, что разность фаз прямой и обратной волн вдоль оси линии (с ростом z) меняется. В тех поперечных сечениях линии передачи, где φ равна нечетному числу π , векторы поля прямой и обратной волн вычитаются друг из друга. В результате суммарный вектор будет иметь минимальную амплитуду $E_{min} = E_{nad.m} - E_{omp.m}$. Координаты этих сечений обозначим символами z_1, z_3, z_5, \dots . В тех сечениях, где разность фаз φ равна четному числу π , векторы поля прямой и обратной волн складываются друг с другом. В результате амплитуда суммарного вектора будет максимальной и равной

$E_{max} = E_{над.м} + E_{отр.м}$. Качественная зависимость амплитуды суммарного вектора E от координаты z показана на рис. 11.

Расстояние между соседними минимумами (максимумами) напряженности поля можно определить с помощью выражения (27). В соответствии с ним и рис. 11 имеем: в сечении $z_1 - \varphi_1 = 2\beta z_1 = \pi$, в сечении $z_3 - \varphi_3 = 2\beta z_3 = 3\pi$. Вычитая из второго выражения первое, получим $2\beta(z_3 - z_1) = 2\beta \cdot \delta z = 2\pi$,

откуда
$$\delta z = \frac{\pi}{\beta} = \frac{\lambda_g}{2}. \quad (28)$$

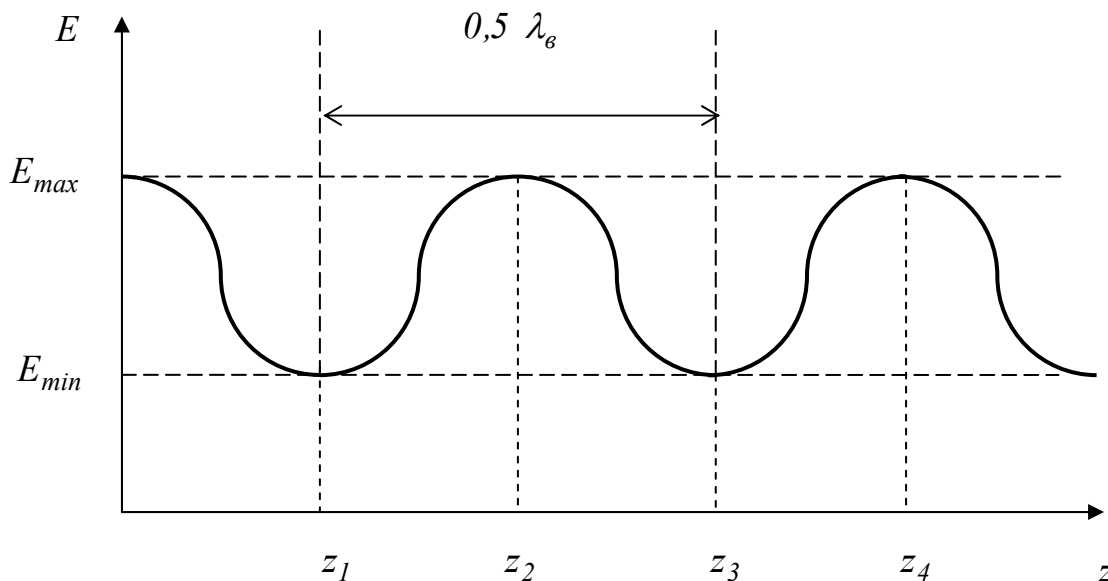


Рис.11. Распределение поля вдоль линии передачи

Таким образом, при наличии в линии передачи прямой и обратной волн амплитуда суммарной волны меняется вдоль линии передачи по периодическому закону от $E_{min} = E_{над.м} - E_{отр.м}$ до $E_{max} = E_{над.м} + E_{отр.м}$.

Расстояние между соседними минимумами (максимумами) равно половине длины волна в волноводе.

Это обстоятельство используется для измерения длины волны в линии передачи с помощью так называемой измерительной линии. Такие линии строятся на различных типах волноводов. На рис. 12 схематически изображена измерительная линия на прямоугольном волноводе.

Линия состоит из отрезка прямоугольного волновода 1, с продольной щелью 2, в которую введена небольшая приемная антенна в виде прямолинейного проводника 3, называемого зондом. Зонд через детектор 4 соединен с микроамперметром 5. Амплитуда высокочастотного тока в зонде, наводимого полем волновода, пропорциональна

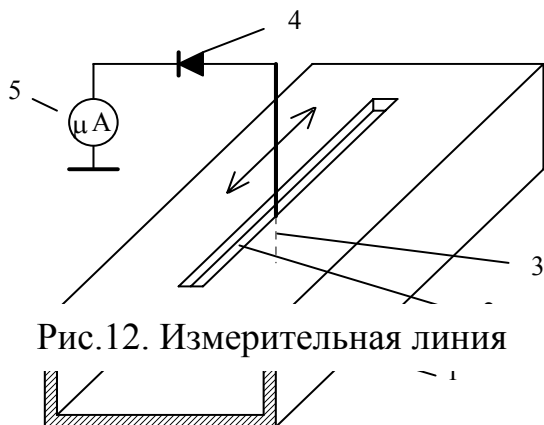


Рис.12. Измерительная линия

Рис.15

напряженности электрического поля в том сечении линии, где стоит зонд. Так как вольтамперная характеристика детектора квадратичная, показания микроамперметра пропорциональны квадрату амплитуды электрического поля в волноводе. Перемещая зонд вдоль оси линии, можно измерить зависимость амплитуды электрического поля в волноводе от координаты z и по шкале, связанной с положением зонда, можно определить положения соседних сечений E_{min} и длину волны в волноводе.

Параметры, характеризующие режим работы линии передачи. Для характеристики режима работы линии передачи используют параметры: коэффициент отражения (Γ), коэффициент стоячей волны (КСВ), коэффициент бегущей волны (КБВ).

Коэффициентом отражения называется отношение комплексных амплитуд вектора \vec{E} обратной волны и падающей волны:

$$\Gamma = \frac{\dot{E}_{отр}}{\dot{E}_{пад}} = \Gamma e^{i\varphi}. \quad (29)$$

Модуль коэффициента отражения равен отношению амплитуд указанных волн, его фаза равна ранее рассмотренному значению φ - выражение (27).

Коэффициентом стоячей волны (КСВ) называется величина

$$КСВ = \frac{E_{max}}{E_{min}}. \quad (30)$$

$КСВ$ и Γ связаны соотношением, следующим из выражений (29),(30):

$$\Gamma = \frac{КСВ - 1}{КСВ + 1}; \quad КСВ = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma}. \quad (29)$$

Измерив с помощью измерительной линии значение $КСВ$, можно определить величину Γ и выразить мощность $P_{отр}$ волны, отраженной от нагрузки, через мощность прямой волны $P_{пад}$:

$$P_{отр} = P_{пад} \cdot \Gamma^2, \quad (30)$$

а также найти мощность волны, поступающей в нагрузку $P_{наг}$:

$$P_{наг} = P_{пад} - P_{отр} = P_{пад}(1 - \Gamma^2). \quad (31)$$

Коэффициентом бегущей волны (КБВ) называется величина, обратная $КСВ$:

$$КБВ = \frac{1}{КСВ} = \frac{E_{min}}{E_{max}}. \quad (32)$$

Режим работы линии передачи, показанный на рис.11, называется **режимом смешанных волн**. Частным случаем являются **режим бегущей волны**, когда отсутствует обратная волна, и **режим стоячей волны**, когда амплитуда обратной волны равна амплитуде прямой волны.

Режим бегущей волны является оптимальным для передачи сигнала от источника в нагрузку. Этот режим реализуется путем согласования нагрузки с линией передачи. При этом $\Gamma=0$, $KCB=KBB=1$.

Режим стоячей волны используется в колебательных системах диапазона ультракоротких волн и при построении некоторых устройств диапазона сверхвысоких частот. В этом режиме $\Gamma=1$, $KBB=0$, $KCB=\infty$.

Распределение амплитуд поля вдоль оси линии передачи в режимах бегущей и стоячей волны показано на рис.13, 14.

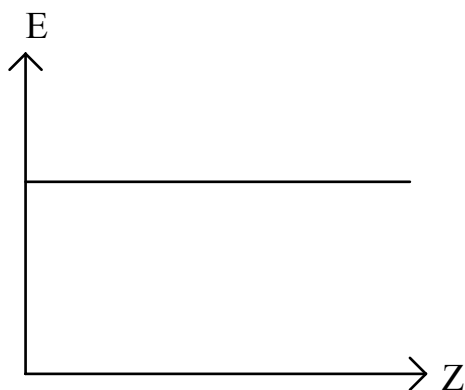


Рис.13. Режим бегущей волны

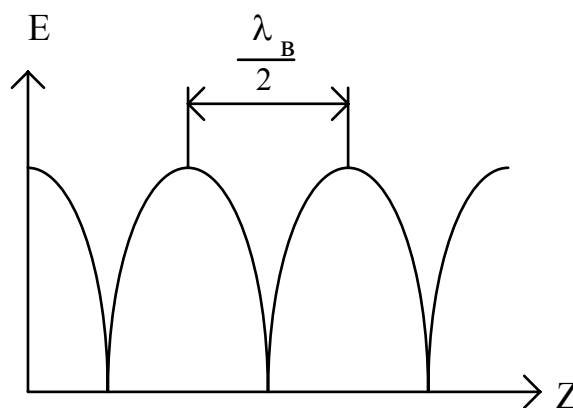


Рис.14. Режим стоячей волны

3. Задание и порядок выполнения

3.1. Изучить настоящее методическое руководство и состав аппаратуры на рабочем месте. Схема соединения приборов установки показана на рис.15.

3.2. Включить генератор. Конец измерительной линии оставить открытым. Нагрузкой измерительной линии в этом случае является открытый конец волновода, имеющей комплексное сопротивление.

3.3. Настроить колебательную систему измерительной линии на частоту генератора по максимуму показаний микроамперметра, подключенного к детектору измерительной линии. Одновременно регулировкой аттенюатора установить удобный для измерения уровень мощности (максимальные показания микроамперметра должны быть в последней четверти шкалы).

3.4. Измерить длину волны в измерительной линии (длину волны в волноводе) методом двух засечек.

Примечания:

1. Длину волны в волноводе измерить в режиме стоячей волны. Такой режим реализуется, если конец волновода закрыть металлической пластиной.

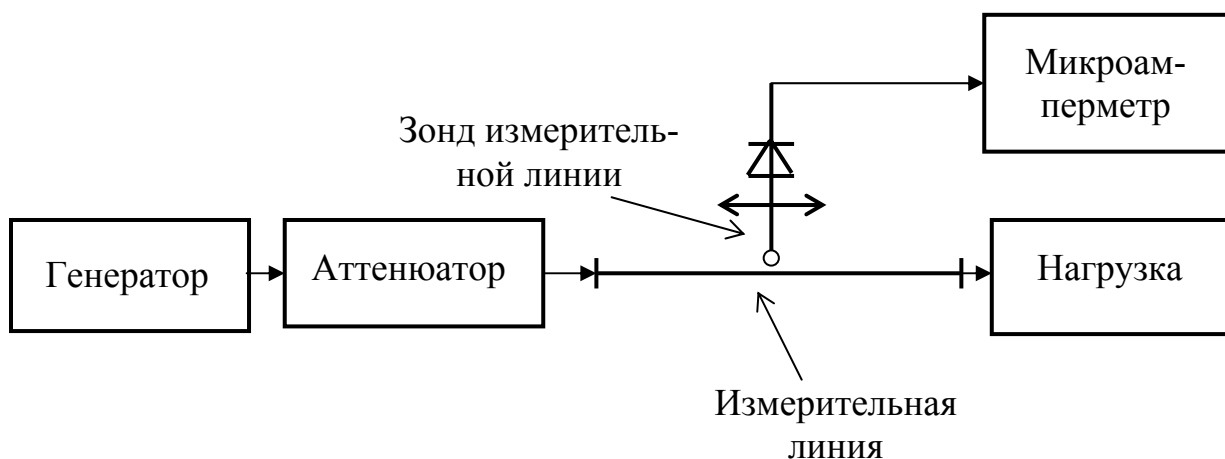


Рис.15. Схема лабораторной установки

Метод двух засечек поясняется рис.16.

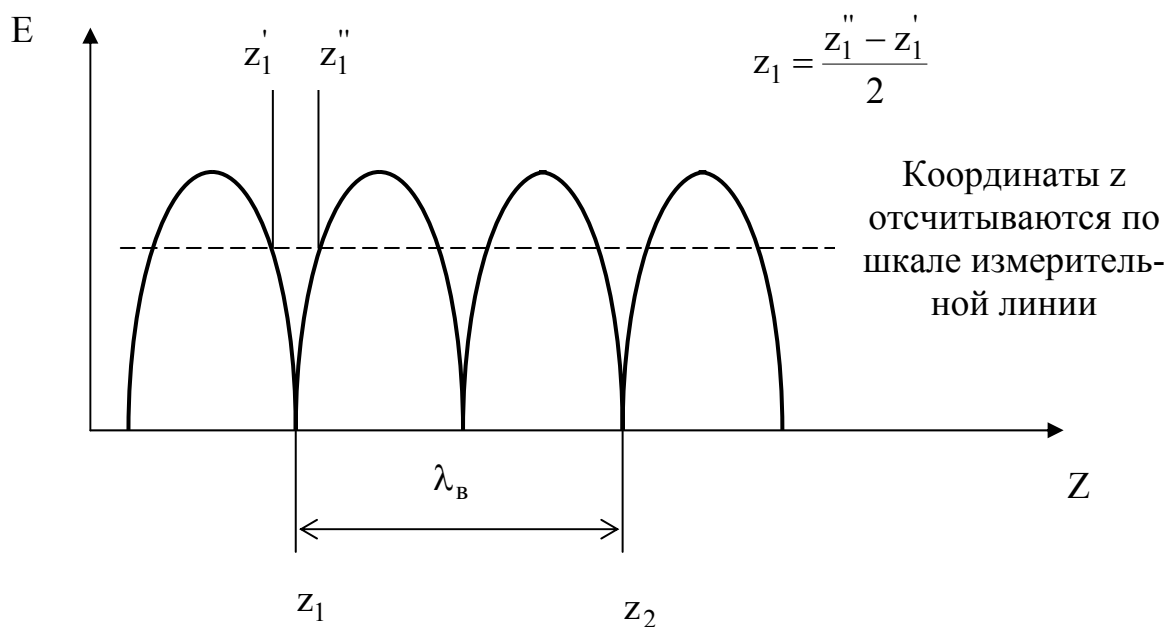


Рис.16. Пояснение метода двух засечек

2. Если в пределах длины щели измерительной линии не укладывается одна полуволна, измерения длины волны в волноводе проводить по четверти длины волны. При этом положение максимума поля измерять методом двух засечек

3.5. Измерить распределение поля вдоль оси волновода для трех режимов:

режима смешанных волн (реализуется если в качестве нагрузки измерительной линии использовать открытый конец);

режима стоячих волн (реализуется, если в качестве нагрузки измерительной линии использовать короткое замыкание - конец линии закрыть металлической пластиной);

режима бегущих волн (на конец линии ставится согласованная нагрузка).

В каждом режиме измерить коэффициент стоячей волны (КСВ), определить коэффициент отражения (Γ) и мощность, поступающую в нагрузку в процентах от мощности падающей волны: $\frac{P_{наг}}{P_{пад}} 100\%$. Результаты измерений за-

нести в таблицы 1 (2, 3).

В таблицах: $I(z)$ - значение тока по микроамперметру при заданном значении z , I_{max} - значение тока в максимуме поля в измерительной линии (соответствующее положению E_{max}).

По таблицам построить графики зависимости $\frac{E(z)}{E_{max}}$ и сделать выводы о характере распределения поля вдоль оси линии при различных нагрузках.

Примечание: координату z менять в пределах всей длины щели с заданным преподавателем дискретом. Обязательно зафиксировать положения E_{max} и E_{min} по шкале измерительной линии и их значения по микроамперметру.

Таблица 1 (2, 3). Нагрузка:

Режим:

КСВ= , Γ = , $\frac{P_o}{P_{II}} 100\%$

z , мм						
I , μA						
$\frac{E(z)}{E_{max}} = \sqrt{\frac{I(z)}{I_{max}}}$						

3.6. По измеренной длине волны (λ_g) в волноводе рассчитать длину волны в свободном пространстве (λ) и частоту генератора (f).

3.7. Все результаты измерения и расчета представить преподавателю на проверку.

3.8. Сдать во включенном состоянии установку преподавателю или лаборанту.

4. Содержание отчета

4.1. Название и цель работы.

4.2. Схема измерительной установки с перечнем используемых приборов.

4.3. Название каждого пункта работы с таблицами результатов расчета и измерения, графиками полученных зависимостей.

4.4. Вывод по каждому пункту работы.

5. Вопросы для подготовки

- 5.1. В чем заключается принцип передачи энергии по волноводам?
- 5.2. Какие типы волн существуют в прямоугольных, круглых и коаксиальных волноводах?
- 5.3. Какой физический смысл имеют символы m и n , обозначающих тип волны в прямоугольном волноводе.
- 5.4. Как расшифровать символы: $H_{10}, H_{01}, E_{11}, E_{32}$?
- 5.5. Дать определение длины волны в волноводе.
- 5.6. Дать определение критической длины волны в волноводе.
- 5.7. Дать определение фазовой скорости в волноводе.
- 5.8. Изобразить зависимость длины волны в волноводе от длины волны в свободном пространстве.
- 5.9. Изобразить зависимость фазовой скорости в волноводе от длины волны в свободном пространстве.
- 5.11. Изобразить зависимость скорости переноса энергии в волноводе от длины волны в свободном пространстве.
- 5.12. Записать условие распространения волны по волноводу.
- 5.14. Записать условие существования местного (нераспространяющегося) поля в волноводе.
- 5.15. Изобразить ряд критических длин волн в прямоугольном волноводе.
- 5.16. Какая волна в волноводе называется основной? Записать условие одномодового режима в волноводе.
- 5.17. Какая волна является основной в прямоугольном волноводе?
- 5.18. Записать условие, при котором в прямоугольном волноводе будет распространяться только основная волна.
- 5.19. Изобразить структуру силовых линий векторов \vec{E} и \vec{H} основной волны в прямоугольном волноводе.
- 5.20. Изобразить зависимость λ_g, V_ϕ, V_g от λ для основной волны в прямоугольном волноводе.
- 5.21. Изобразить зависимость амплитуды поля в линии передачи от продольной координаты в режиме смешанных волн. Объяснить эту зависимость.
- 5.22. Изобразить зависимость амплитуды поля в линии передачи от продольной координаты в режиме бегущей волны. Объяснить эту зависимость.
- 5.23. Изобразить зависимость амплитуды поля в линии передачи от продольной координаты в режиме стоячих волн. Объяснить эту зависимость.
- 5.24. Какими параметрами характеризуется режим в линии передачи?
- 5.25. Как можно определить мощность, поступающую в нагрузку, по мощности падающей волны?
- 5.26. Пояснить методику измерения длины волны в волноводе.

Литература

1. Кураев А.А., Попкова Т.Л., Сеницын А.К. Электродинамика и распространение радиоволн. –Мн.: Бестпринт, 2004.
2. Вольман В.И., Пименов Ю.В., Муравцов А.Д. Техническая электродинамика. – М.: Радио и связь, 2002.
3. Никольский В.В., Никольская Т.И. Электродинамика и распространение радиоволн. – М.: Наука, 1989. – 543 с.