

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ПРЯМОУГОЛЬНОМ ВОЛНОВОДЕ

1. Цель работы

Экспериментальное исследование поперечно-электрической волны в прямоугольном волноводе при различных видах неоднородности.

2. Основные теоретические положения

Волноводы являются основным видом систем, служащих для передачи энергии от источника к нагрузке в диапазоне сверхвысоких частот. Волновод представляет собой металлическую полую трубку прямоугольного или круглого сечения. Затухание распространяющихся в волноводе электромагнитных волн много меньше, чем в других системах, например, в двухпроводной линии.

2-1. Структура полей в прямоугольном волноводе

Прямоугольный волновод (рис. 1) является наиболее простым типом волновода, имеющим в то же время наибольшее практическое применение.

Из теории идеальных волноводов известно, что в общем случае в волноводе существуют два типа волн: поперечно-электрические, обозначаемые символами TE или H , и волны поперечно-магнитные, обозначаемые символами TM или E .

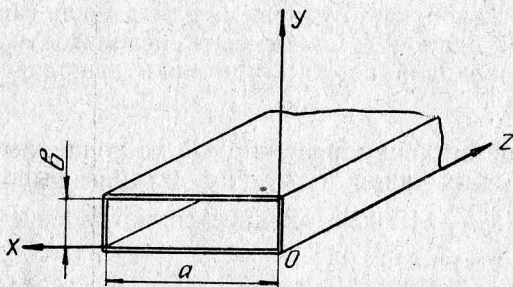


Рис. 1. Расположение координатных осей в прямоугольном волноводе

В поперечно-электрических волнах вектор E расположен в плоскости, перпендикулярной направлению распространения. Поперечно-магнитными называют такие волны, у которых вектор H расположен в плоскости, перпендикулярной к направлению распространения. Структуру поля для каждого из указанных типов волн можно определить, пользуясь выражениями для проекций векторов E и H . Для поперечно-электрических волн эти выражения в комплексной форме имеют вид

$$\left. \begin{aligned}
 \dot{E}_{mx} &= \frac{j\omega\mu}{k_{mn}^2} \frac{n\pi}{b} A_{mn} \cos \frac{m\pi}{a} x \sin \frac{n\pi}{b} y e^{-j\beta_{mn}z}; \\
 \dot{E}_{my} &= -\frac{j\omega\mu}{k_{mn}^2} \frac{m\pi}{a} A_{mn} \sin \frac{m\pi}{a} x \cos \frac{n\pi}{b} y e^{-j\beta_{mn}z}; \\
 \dot{E}_{mz} &= 0; \\
 \dot{H}_{mx} &= \frac{j\alpha_{mn}}{k_{mn}^2} \frac{m\pi}{a} A_{mn} \sin \frac{m\pi}{a} x \cos \frac{n\pi}{b} y e^{-j\beta_{mn}z}; \\
 \dot{H}_{my} &= \frac{j\alpha_{mn}}{k_{mn}^2} \frac{n\pi}{b} A_{mn} \cos \frac{m\pi}{a} x \sin \frac{n\pi}{b} y e^{-j\beta_{mn}z}; \\
 \dot{H}_{mz} &= A_{mn} \cos \frac{m\pi}{a} x \sin \frac{n\pi}{b} y e^{-j\alpha_{mn}z},
 \end{aligned} \right\} (1)$$

где $\beta = \sqrt{\omega^2 \mu \epsilon - k_{mn}^2}$ — коэффициент фазы; $k_{mn}^2 = \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2$; A_{mn} — коэффициент, зависящий от величины энергии, передаваемой от генератора в волновод; a и b — размеры волновода (рис. 1); m и n — пара чисел, принимающих значение 0, 1, 2 ...

Из приведенных выражений видно, что в волноводе может существовать множество различных волн, соответствующих всем значениям чисел m и n . В символическом обозначении волн $TE_{mn}(H_{mn})$ и $TH_{mn}(E_{mn})$ индекс m показывает число полуволн стоячей волны, укладываемых по ширине волновода a вдоль оси x , а n — число полуволн по высоте волновода b вдоль оси y . Волна, для которой $m=n=0$, не существует, поэтому простейшим типом волны будет такой, для которого, например, $m=1$ и $n=0$, что соответствует поперечно-электрической волне TE_{10} .

При заданных размерах волновода a и b в нем могут распространяться без затухания лишь те электромагнитные волны, длина которых не превосходит так называемой критической длины волны $\lambda_{кр}$, определяемой как

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

При этом фазовая скорость электромагнитной волны будет

$$v_{\phi} = \frac{v_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2}}, \quad (3)$$

где $v_0 = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$ — фазовая скорость электромагнитной волны в свободном пространстве, λ — длина волны в свободном пространстве (длина волны генератора).

Длина волны в волноводе

$$\lambda_{в} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2}}. \quad (4)$$

Рассмотрим структуру волны TE_{10} , полагая в уравнениях (1) $m=1$ и $n=0$. Замечаем, что комплексные амплитуды составляющих $\dot{E}_{mx}=0$, $\dot{E}_{mz}=0$ и $\dot{H}_{my}=0$. Следовательно, вектор \vec{E} имеет лишь одну составляющую \dot{E}_{my} , отличную от нуля. Силовые линии электрического поля перпендикулярны широким стенкам волновода, начинаются на одной из них и заканчиваются на другой.

Вектор \vec{H} имеет две составляющие, отличные от нуля, — \dot{H}_{mx} и \dot{H}_{mz} . Силовые линии магнитного поля лежат в плоскостях, параллельных плоскости xOz , и являются замкнутыми кривыми.

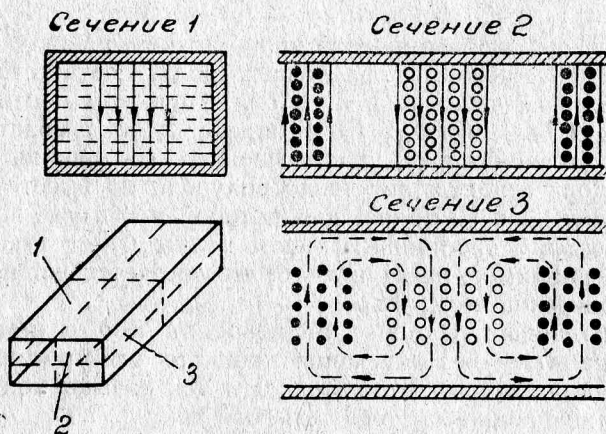


Рис. 2. Структура волны TE_{10}

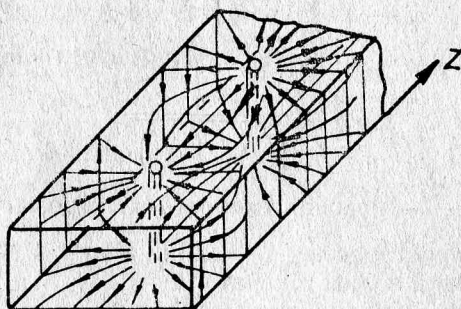


Рис. 3. Пути электрического тока в волноводе при волне TE_{10}

Структура поля волны TE_{10} изображена на рис. 2 для некоторого момента времени; сплошными линиями показаны силовые линии электрического поля, пунктирными — магнитного поля. Ориентацию векторов \vec{E} и \vec{H} в поперечном сечении волновода можно установить и экспериментально (раздел «Неоднородности в волноводе»).

Электрические токи, протекающие по стенкам волновода, являются токами проводимости. На рис. 3 схематически по-

казаны пути электрического тока волны TE_{10} . Сплошные линии соответствуют току проводимости, пунктирные — току смещения, плотность которого равна

$$\bar{\delta}_{\text{см}} = \epsilon_0 \frac{\partial \bar{E}}{\partial t}.$$

2-2. Неоднородность в волноводе

Волновод, у которого форма и размеры сечения, граничные условия на поверхности стенок и свойства диэлектрика сохраняются неизменными по всей длине, называется регулярным.

Все предыдущие рассуждения относились к регулярным волноводам. Любое нарушение указанных условий делает волновод нерегулярным.

Простейшие нерегулярности — открытый конец волновода, короткозамкнутый конец волновода, изгиб волновода, ответвление и т. п.

Если в регулярном волноводе имеет место лишь прямая, бегущая волна, то в нерегулярном волноводе образуется и отраженная.

Для количественной оценки влияния различных неоднородностей на распределение электромагнитного поля волновод условно можно заменить эквивалентной линией с распределенными параметрами. Напряженность электрического и магнитного полей далее рассматривается как напряжение и ток этой линии с волновым сопротивлением $Z_{\text{в}}$ и коэффициентом фазы β ; нерегулярность волновода можно представить в виде комплексного сопротивления $Z_{\text{н}}$, нагружающего эквивалентную линию.

Для волны TE_{mn} волновое сопротивление и коэффициент фазы определяются выражениями

$$Z_{\text{в}} = \frac{Z_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{кр}}}\right)^2}}, \quad (5)$$

$$\beta = \frac{2\pi}{\epsilon_{\text{в}}}, \quad (6)$$

где $Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 377$ Ом — волновое сопротивление свободного пространства.

Сопротивление $Z_{\text{н}}$, являющееся эквивалентным параметром нерегулярности, определяется путем измерения коэффициента бегущей волны $k_{\text{БВ}}$ и фазового угла β_z в волноводе, имеющем нерегулярность.

По величине $k_{\text{БВ}}$ и фазового угла комплексное сопротивление $Z_{\text{н}}$ можно вычислить по круговой диаграмме. Диаграмма и порядок ее использования приведены в пособии, находящемся на рабочем месте.

Ориентацию векторов E и H в волноводе можно экспериментально определить, создавая нерегулярность в виде «открытого конца» волновода и измеряя коэффициент стоячей волны $k_{\text{СВ}}$ (или величину, обратную — $k_{\text{БВ}}$). Для этого конец волновода закрывают поочередно двумя решетками и измеряют коэффициент бегущей волны. Проводники первой из решеток параллельны, второй — перпендикулярны широкой стенке волновода, а расстояние между проводниками много меньше длины волны в волноводе (рис. 4).

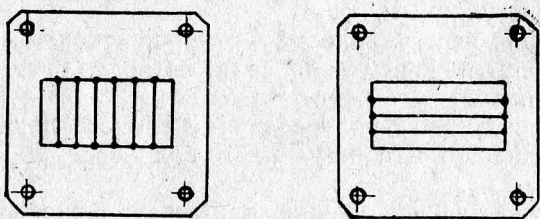


Рис. 4. Расположение проводников в решетках для экспериментального определения ориентации векторов поля \vec{E} и \vec{H} в волноводе

Если силовые линии электрического поля параллельны проводникам решетки, то по ним потечет ток, который возбудит отраженную волну; $k_{\text{БВ}}$ в этом случае будет равен нулю. Если силовые линии электрического поля перпендикулярны проводникам решетки, то тока в них не будет и отраженная волна не возникнет; $k_{\text{БВ}}$ при этом будет равен той же величине, что и при открытом конце волновода.

2-3. Согласование сопротивлений волновода и нагрузки

Если волновое сопротивление волновода и сопротивление нагрузки имеют разные значения $Z_{\text{в}} \neq Z_{\text{н}}$ (не согласованы), то в волноводе возникают отраженные волны, т. е. имеет место отражение части энергии от нагрузки.

Для согласования прибегают к различного рода трансформаторам. В лабораторной работе используется трансформатор в виде отрезка волновода с двумя кварцевыми пластинами внутри: толщина пластин составляет четверть длины волны в волноводе. Трансформатор помещают между волноводом и нагрузкой. Согласование осуществляется подбором

расстояния между кварцевыми пластинами и положения этих пластин относительно конца волновода с тем, чтобы сопротивление трансформатора удовлетворяло соотношению

$$Z_{\text{ТР}} = \sqrt{Z_{\text{В}} Z_{\text{Н}}},$$

где $Z_{\text{ТР}}$ — комплексное сопротивление трансформатора.

О степени согласования удобно судить по величине $k_{\text{БВ}}$ в волноводе. При полном согласовании $k_{\text{БВ}} \approx 1$.

3. Содержание работы

3-1. Ознакомиться по инструкции с измерительной аппаратурой.

3-2. Измерить длину волны генератора.

3-3. Измерить длину волны в волноводе.

3-4. Установить ориентацию векторов \vec{E} и \vec{H} электромагнитного поля волновода.

3-5. Измерить коэффициент бегущей волны $k_{\text{БВ}}$ и фазовый угол β_z нагрузок, создающих нерегулярность в волноводе открытого конца волновода, рупорной антенны, эквивалента антенны, полуволнового щелевого излучателя.

3-6. Согласовать нагрузку, указанную преподавателем, с волноводом с помощью трансформатора сопротивлений.

4. Порядок выполнения работы

4-1. По описаниям, находящимся на рабочем месте, ознакомиться с измерительной аппаратурой; обратить внимание на правила включения и настройки приборов.

4-2. С помощью волномера, расположенного в самом приборе, измерить длину волны генератора λ .

4-3. Измерение длины волны в волноводе выполняется на приборах, представленных на рис. 5. В качестве исследуемого используется основной волновод измерительной линии 33-И с размерами в поперечном сечении 10×24 мм; открытый конец волновода закрывается проводящей пластиной, в результате чего вдоль волновода образуется стоячая волна. Перемещая каретку линии от закрытого конца волновода к генератору, находят распре-

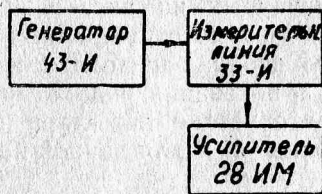


Рис. 5. Схема измерительной установки для определения длины волны в волноводе

деление напряженности электрического поля вдоль волновода (рис. 6). Расстояние между двумя соседними максимумами равно половине длины волны в волноводе.

4-4. Используя решетки в качестве нагрузок, установить ориентацию векторов \vec{E} и \vec{H} поля волновода. Если при подключении одной из решеток $k_{БВ}$ равен нулю, то проводники этой решетки параллельны вектору \vec{E} поля волновода. Подключение другой решетки не изменит $k_{БВ}$ открытого конца волновода, что будет свидетельствовать о перпендикулярности проводников решетки вектору \vec{E} поля волновода.

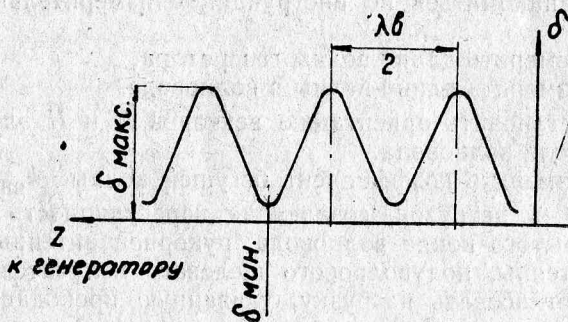


Рис. 6. Характер распределения напряженности электрического поля вдоль волновода при короткозамкнутом конце

4-5. Измерение $k_{БВ}$ и β_z нагрузок, создающих нерегулярность в волноводе, выполняется на комплексе приборов, указанных на рис. 5. К концу волновода присоединяется с помощью струбинок нагрузка. Перемещая каретку вдоль волновода, определить максимальное $\delta_{\text{макс}}$ и минимальное $\delta_{\text{мин}}$ показания индикатора усилителя. При квадратичной характеристике детектора измерительной линии коэффициент волны $k_{БВ}$ для данной нагрузки будет

$$k_{БВ} = \sqrt{\frac{\delta_{\text{мин}}}{\delta_{\text{макс}}}}$$

Определение фазового угла производится измерением расстояния

$$\Delta Z = z_2 - z_1,$$

где z_1 — положение первого минимума кривой напряженности электрического поля в случае, когда конец волновода закрыт проводящей пластинкой, z_2 — положение первого ми-

нимума кривой напряженности электрического поля в случае когда к волноводу присоединена исследуемая нагрузка. Отсчет z_1 и z_2 производится по шкале измерительной линии

Фазовый угол определяется из равенства

$$\beta_z = \frac{2\pi}{\lambda_B} \Delta Z.$$

Эквивалентное полное сопротивление нагрузок находится при помощи круговой диаграммы сопротивлений.



Рис. 7. Схема согласования волновода с нагрузкой посредством трансформатора сопротивлений

4-6. Согласование нагрузки с волноводом посредством трансформатора сопротивлений выполняется по схеме рис. 7. Меняя расстояние между пластинами трансформатора и их положение относительно конца волновода, добиться согласования нагрузки с волноводом, о чем будет свидетельствовать величина $k_{БВ} \approx 1$.

5. Содержание отчета

1. Результаты измерений длины волны генератора, длины волны в волноводе и результаты вычислений длины волны и волнового сопротивления волновода.

2. Картина силовых линий поля в волноводе для волны TE_{10} .

3. Таблица значений эквивалентного полного сопротивления нагрузок, определенных по круговой диаграмме.

4. График распределения напряженности электрического поля вдоль волновода при различных нагрузках.

6. Контрольные вопросы

1. Как представить графически структуру поля волны TE_{10} в волноводе?

2. Как протекают токи проводимости по стенкам волновода и тока смещения в диэлектрике при волне TE_{10} ?

3. Чем обусловлен характер распределения напряженности электрического поля вдоль волновода?
4. Как с помощью решеток можно определить ориентацию векторов \vec{E} и \vec{H} в поле волновода?
5. Как определить с помощью измерительной линии и номограммы полное эквивалентное сопротивление нагрузки?
6. Каково назначение согласующего трансформатора?

ЛИТЕРАТУРА

Купалян С. Д. Теоретические основы электротехники. Ч. III, «Энергия», 1970, § 7—2, 7—3, 7—4, 7—5.
