

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра антенн и устройств СВЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЩЕЛЕЙ В СТЕНКАХ ВОЛНОВОДА

Методические указания
к лабораторной работе №3 по дисциплинам «Электродинамика
и распространение радиоволн», «Электромагнитные поля и волны»
для студентов радиотехнических специальностей
всех форм обучения

Минск 2006

УДК 621.372 (075.8)
ББК 22.313 я 73
И 85

С о с т а в и т е л и:

Д.В. Гололобов, И.Н. Кижлай, В.Б. Кирильчук,
А.В. Кухарев, А.А. Тамело, Н.А. Чмырев, О.А. Юрцев

Исследование параметров щелей в стенках волновода: Метод. указ.
И 85 к лаб. раб. №3 по дисц. «Электродинамика и распространение радиоволн», «Электромагнитные поля и волны» для студ. радиотех. спец. всех форм обуч. / Сост. Д.В. Гололобов, И.Н. Кижлай, В.Б. Кирильчук и др. – Мн.: БГУИР, 2006. – 15 с.: ил.

Содержатся теоретические сведения об излучении щелей, прорезанных в стенках прямоугольного волновода. Рассмотрены различные варианты расположения щелей в волноводе, их эквивалентные схемы и соотношения, позволяющие рассчитать сопротивления и проводимости на резонансной частоте. Приведены методика экспериментального определения сопротивлений и проводимостей щелей и контрольные вопросы, которые помогают студентам самостоятельно овладеть данным разделом. Дана методика выполнения лабораторной работы и оформления отчета.

Материал может быть рекомендован для студентов специальностей I-39 01 02, I-39 01 03, I-45 01 02 и I-39 02 01 при изучении дисциплин «Электродинамика и распространение радиоволн» и «Электромагнитные поля и волны».

УДК 621.372 (075.8)
ББК 22.313 я 73

© Коллектив авторов, составление, 2006
© БГУИР, 2006

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЩЕЛЕЙ В СТЕНКАХ ВОЛНОВОДА

1. Цель работы

1.1. Освоить «правило» излучения щелей, прорезанных в стенках волновода.

1.2. Экспериментально исследовать зависимость входной проводимости (сопротивления) одиночного щелевого излучателя от частоты.

1.3. Закрепить методику определения сопротивлений (проводимостей) по диаграмме Вольперта-Смитта

2. Общие сведения

В волноводной технике широко распространены различные сверхвысоко-частотные устройства, работа которых основана на применении волноводов с отверстиями в боковых или торцевых стенках. Отверстия обычно имеют круглую форму или форму узких щелей.

Щели, излучающие электромагнитную энергию, применяются для передачи энергий из одного волновода в другой (связь волноводов через отверстие) или для излучения энергии во внешнее пространство (щелевые антенны). Неизлучающие щели применяются в измерительных линиях для исследования поля в волноводе.

В зависимости от назначения щель должна быть определенным образом ориентирована относительно силовых линий поля в волноводе. Следовательно, для выбора рационального положения щели, предназначенной для тех или иных целей, необходимо знать структуру поля в волноводе. Она в свою очередь определяет поверхностные токи на стенках волновода.

В соответствии с уравнением непрерывности (1) если прорезать стенку волновода так, чтобы щель прерывала поверхностные токи проводимости, то последние перейдут в щели в токи смещения. В щели возникнет изменяющееся во времени электрическое поле, которое в соответствии с первым уравнением Максвелла вызовет появление электромагнитных волн во внешнем пространстве.

$$\operatorname{div}\left(\delta + \frac{dD}{dt}\right) = 0, \quad (1)$$

где δ – плотность тока проводимости;

$\frac{dD}{dt}$ – плотность тока смещения.

Щель, прорезанная параллельно линиям поверхностного тока, почти не прерывает линий этого тока. Поэтому электромагнитное поле в волноводе с та-

кой щелью почти не отличается от поля обычного волновода без щели. Излучение электромагнитной энергии через такую щель практически отсутствует.

В лабораторной работе исследуются щели в прямоугольном волноводе с волной типа H_{10} .

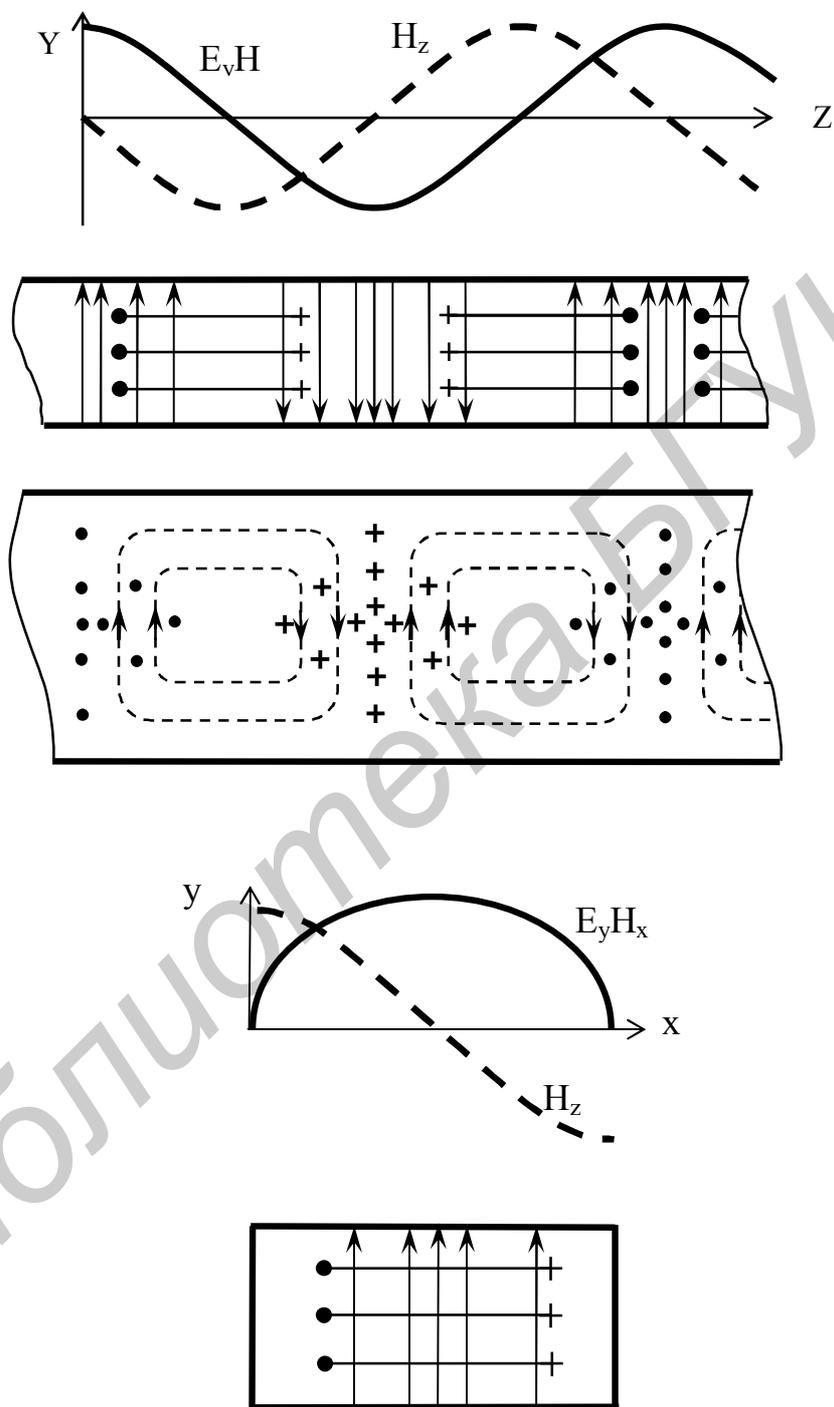


Рис. 1

Структура электромагнитного поля в прямоугольном волноводе при волне H_{10} показана на рис.1. Электромагнитное поле имеет составляющие: E_y , H_x , H_z .

По известной структуре поля легко установить распределение тока в стенках волновода. Для этого достаточно рассмотреть граничные условия на границе проводника и диэлектрика, заполняющего волновод.

Как известно, напряженность магнитного поля у поверхности проводника численно равна поверхностной плотности тока и параллельна поверхности проводника. В векторной форме связь между плотностью тока и напряженностью поля определяется соотношением:

$$\delta = \left[\overline{H} * \overline{n_0} \right], \quad (2)$$

где $\overline{n_0}$ – орт внешней нормали к поверхности проводника.

Используя последнее равенство, нетрудно убедиться, что составляющей вектора напряженности магнитного поля H_x соответствует продольный ток, параллельный оси z . Составляющей поля H_z соответствуют поперечные токи, протекающие по проводящим стенкам волновода в направлениях, перпендикулярных оси z .

Общий характер линий токов, текущих по стенкам волновода, показан на рис. 2. Как видно, продольные составляющие токов имеют место только на широких стенках волновода. Поперечные составляющие тока имеют место, как на широких, так и на узких стенках.

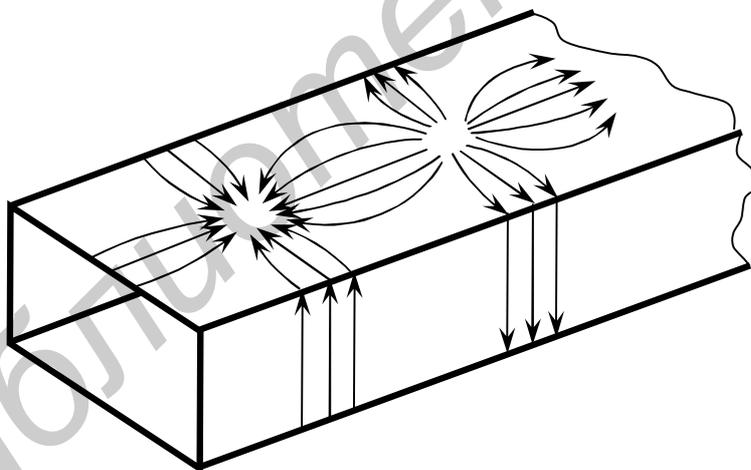


Рис. 2

Заметим кстати, что щель для зонда измерительной волноводной линии располагается посередине широкой стенки прямоугольного волновода, возбуждаемого волной типа H_{10} . Следовательно, она не излучает.

Щели 3, 4 и 5 прорезаны так, что они пересекают линии тока, а поэтому излучают электромагнитные волны. Эти щели могут быть применены в качестве излучателей при проектировании волноводно-щелевых антенн.

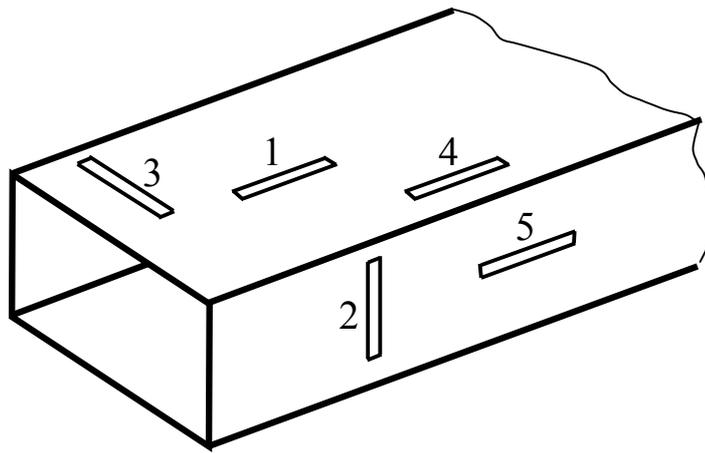


Рис. 3

При решении вопроса о наиболее целесообразном расположении щелей не обязательно исходить из распределения тока на поверхности стенок волновода. Можно непосредственно пользоваться картиной магнитных силовых линий поля на внутренних стенках волновода до образования щелей. Щель, расположенная перпендикулярно магнитным линиям поля, не излучает. Щель же, прорезанная параллельно магнитным линиям, излучает электромагнитные волны.

Интенсивность излучения зависит от плотности тока и, соответственно, от напряженности магнитного поля в месте образования щели.

Если требуется создать максимальное излучение, например, продольной щели на широкой стенке волновода, то ее нужно расположить по краю стенки (щель 4 на рис. 3), где она будет пересекать поперечный ток максимальной плотности и совпадать с продольным магнитным полем максимальной напряженности.

Если волновод закорочен на конце поршнем, перемещающимся вдоль оси волновода, то интенсивность излучения щели зависит также от расстояния между центром щели и стенкой поршня. В самом деле, в пространстве между поршнем и щелью образуются стоячие волны. При этом у стенки поршня суммарная составляющая H_z падающей и отраженной волн равна нулю (H_z является нормальной составляющей к плоскости поршня и, согласно граничным условиям у металлической поверхности с проводимостью $\sigma \rightarrow \infty$, она должна быть равна нулю). У металлической стенки поршня должна оставаться только тангенциальная составляющая вектора H , т.е. H_x , причем ее значение удваивается, так как поверхность металла ведет себя аналогично короткому замыканию: коэффициент отражения равен единице. На расстояниях, равных целому числу полуволен $\lambda_B/2$, от стенки поршня образуются пучности H_x и узлы H_z (рис. 4). На этих же расстояниях образуются пучности продольных и узлы поперечных составляющих тока

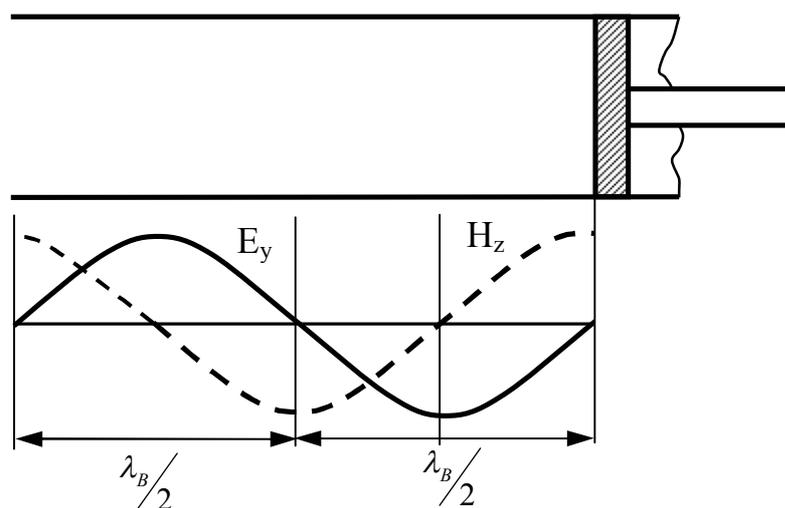


Рис. 4

На расстояниях, кратных нечетному числу $\lambda_B/4$, образуются узлы H_x и пучности H_z соответственно, узлы продольных и поперечных составляющих тока.

Таким образом, максимальное излучение продольной щели получается при расстоянии от ее середины до стенки поршня, кратном нечетному числу $\lambda_B/4$. Поперечная щель излучает наибольшую мощность, когда расстояние до поршня кратно $\lambda_B/2$.

Излучающая щель нарушает однородность волновода. Для характеристики щели, как неоднородности в волноводе, часто пользуются аналогиями с двухпроводной линией. Волновод заменяют эквивалентной двухпроводной линией, а щель при этом можно представить сосредоточенным сопротивлением, включенным в эту линию последовательно или параллельно в зависимости от типа щели:

- продольная щель, пересекающая линии поперечного тока (рис. 5,а), представляется в эквивалентной длинной линии проводимостью (параллельно включенным сопротивлением);
- поперечная щель, пересекающая линии продольного тока, представляется последовательно включенным сопротивлением (рис. 5,б).

Если длина излучающей щели равна половине длины волны, то она является резонансной и представляется в эквивалентной линии чисто активным сопротивлением.

Нормированные, т.е. отнесенные к волновым сопротивлению и проводимости волновода, сопротивления и проводимости волноводных щелей могут быть рассчитаны по формулам, полученным исходя из энергетического баланса.

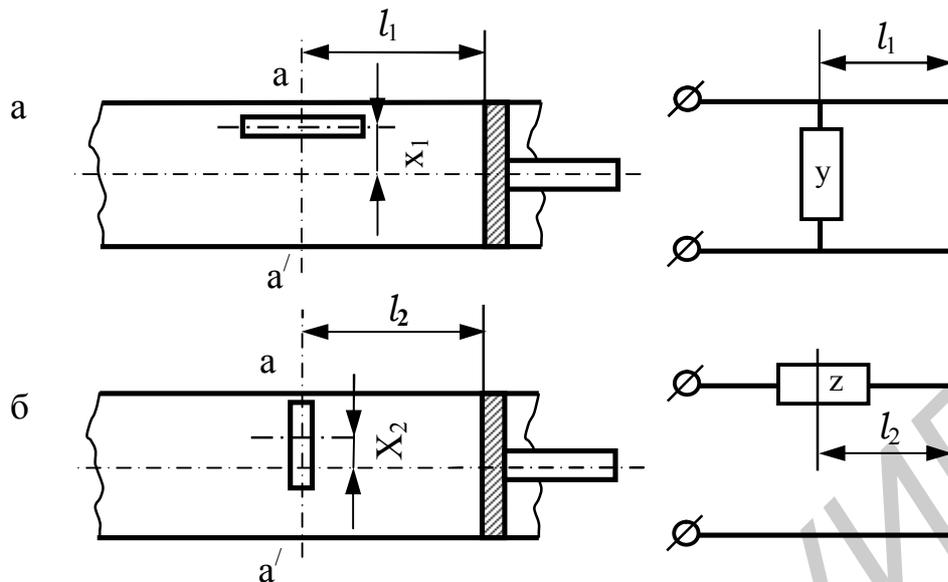


Рис. 5

Для продольной полуволновой щели, прорезанной в широкой стенке волновода с волной \mathbf{H}_{10} на расстоянии x_1 от середины волновода (рис.5), параллельная нормированная проводимость равна:

$$g = 2,09 \frac{\lambda_B}{\lambda} \frac{a}{b} \cos^2 \left(\frac{\pi \lambda}{2 \lambda_B} \right) \sin^2 \left(\frac{\pi x_1}{a} \right), \quad (3)$$

где λ_B – длина волны в волноводе;

λ – длина волны в свободном пространстве;

a, b – размеры широкой и узкой стенок волновода.

Длина волны в волноводе:

$$\lambda_B = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{KP}} \right)^2}}, \quad (4)$$

где λ_{KP} – критическая длина волны (для волны \mathbf{H}_{10} в прямоугольном волноводе $\lambda_{KP} = 2a$).

Для продольной полуволновой щели, прорезанной в узкой стенке прямоугольного волновода с волной \mathbf{H}_{10} , независимо от расстояния до граней, нормированная проводимость равна:

$$g = 2,09 \frac{\lambda_B}{\lambda} \frac{a}{b} \cos^2 \left(\frac{\pi \lambda}{2 \lambda_B} \right). \quad (5)$$

Для поперечной полуволновой щели, прорезанной в широкой стенке прямоугольного волновода с волной \mathbf{H}_{10} и сдвинутой относительно центра стенки на расстояние x_2 , последовательное нормированное сопротивление равно:

$$y = 0,523 \frac{\lambda_B}{ab} \cos^2 \left(\frac{\pi \lambda}{4a} \right) \cos^2 \left(\frac{\pi x_2}{a} \right). \quad (6)$$

Нормированные проводимости и сопротивления щелей в волноводе могут быть определены экспериментально.

Суммарная нормированная проводимость в сечении а-а' определяется нормированной проводимостью продольной щели и входной нормированной проводимостью отрезка короткозамкнутой линии длиной (рис. 5,а). Очевидно, что нормированная входная проводимость в сечении а-а' будет равна нормированной проводимости щели, если входная проводимость короткозамкнутой линии равна нулю. Входная проводимость последней обращается в нуль при длине короткозамкнутой линии:

$$l_1 = (2n + 1) \frac{\lambda_B}{4}. \quad (7)$$

Суммарное нормированное сопротивление в сечении б-б' определяется нормированным сопротивлением поперечной щели и входным нормированным сопротивлением короткозамкнутой линии длиной l_2 (рис. 5,б).

В этом случае нормированное входное сопротивление в сечении б-б' будет совпадать с нормированным сопротивлением щели, если входное сопротивление линии равно нулю, а это имеет место при длине короткозамкнутой линии:

$$l_2 = n \frac{\lambda_B}{2}. \quad (8)$$

Таким образом, при измерении входной нормированной проводимости продольной щели короткозамыкающий поршень должен находиться на расстоянии $l_1 = (2n + 1) \frac{\lambda_B}{4}$ от центра щели, а при измерении нормированного со-

противления поперечной щели на расстоянии $l_2 = n \frac{\lambda_B}{2}$.

При таких положениях поршня отражения в сечении а-а' будут минимальными, чему будет соответствовать минимальный коэффициент стоячей волны K_c в волноводе.

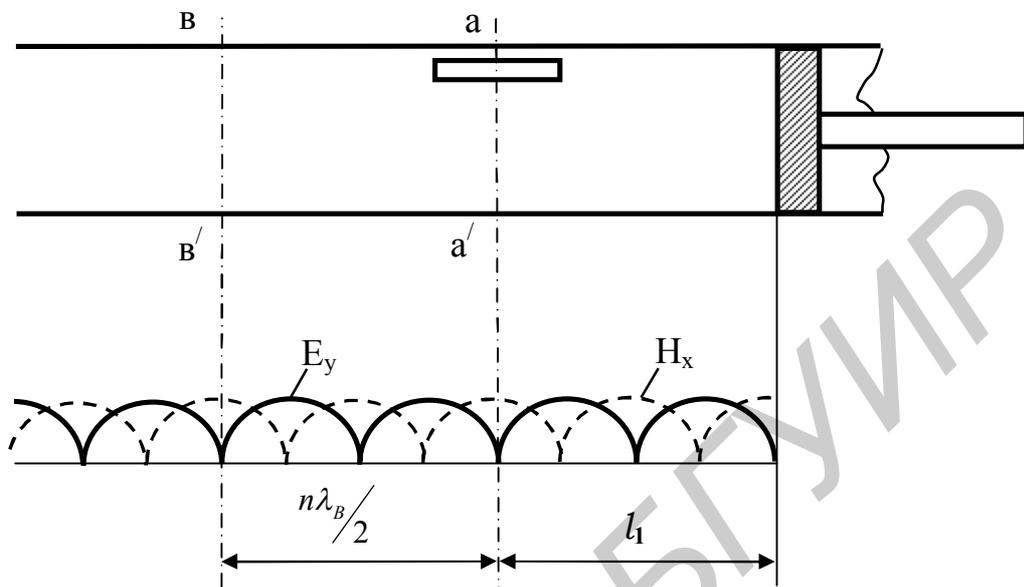


Рис. 6

Если короткозамыкающий поршень установить так, чтобы расстояние между ним и центром продольной щели составило целое число полувольт $l_1 = n \frac{\lambda_B}{2}$ (рис. 6), то входная проводимость в сечении а-а' (отношение H_x к E_y) будет равна бесконечности. В волноводе установится режим стоячих волн, причем один из узлов стоячей волны совпадает с центром щели. В любом сечении, отстоящем от сечения а-а' на целое число полувольт, например, в сечении б-б', входное сопротивление и входная проводимость повторяют сопротивление и проводимость в сечении а-а'. Это может быть использовано для измерения входной проводимости сечения а-а'.

Практически измерения выполняются так. По положению узла напряженности электрического поля в измерительной линии определяют положение какого-либо эквивалентного сечения. Затем смещают короткозамыкающий поршень на четверть длины волны так, чтобы расстояние l_1 стало равным $(2n + 1) \frac{\lambda_B}{4}$. В волноводе устанавливается режим смешанных волн. Измеряется коэффициент стоячей волны K_c и расстояние до минимума напряженности электрического поля от эквивалентного сечения.

По измеренным величинам с помощью круговой диаграммы сопротивлений определяют входную нормированную проводимость в эквивалентном сечении.

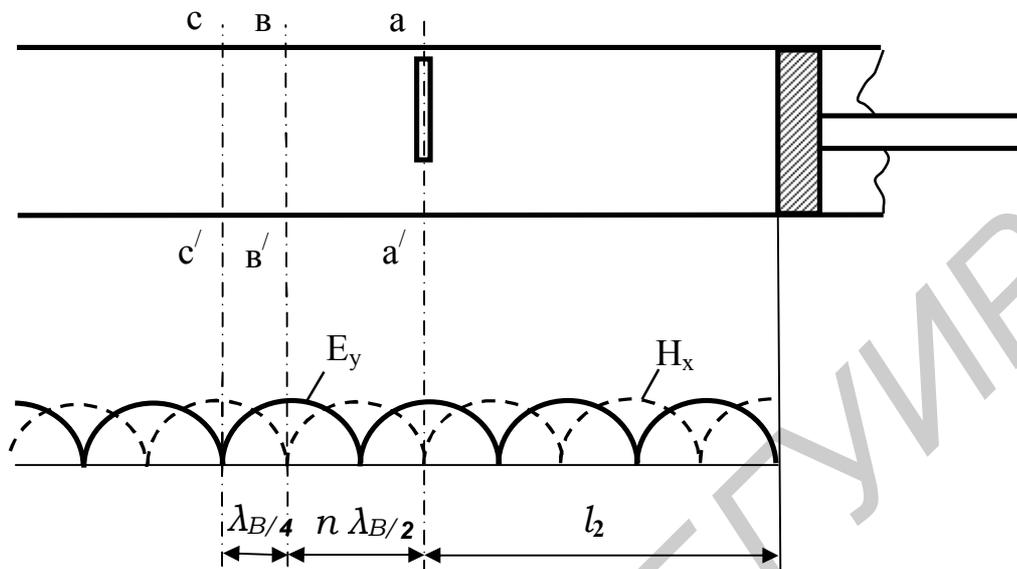


Рис. 7

Аналогичным образом измеряется входное сопротивление поперечной щели. Если расстояние l_2 от центра поперечной щели до короткозамыкающего поршня сделать равным $(2n + 1) \frac{\lambda_B}{4}$ (рис. 7), то входное сопротивление в сечении а-а' (отношение E_y к H_x) обратится в бесконечность. В волноводе установится стоячая волна. Но теперь с центром щели совпадает не узел, а максимум напряженности электрического поля.

Следовательно, эквивалентные сечения будут находиться в точках максимума напряженности электрического поля. Узлы электрической напряженности будут сдвинуты относительно эквивалентных сечений на расстояние, равное $\frac{\lambda_B}{4}$. Из теории длинных линий известно, что линия длиной в четверть длины волны трансформирует входное сопротивление в проводимость, и наоборот.

Таким образом, можно утверждать, что входная нормированная проводимость в сечении с-с' (см. рис. 7) равна входному нормированному сопротивлению b-b', равна входному нормированному сопротивлению в сечении а-а'.

$$y_c = z_b = z_a. \quad (9)$$

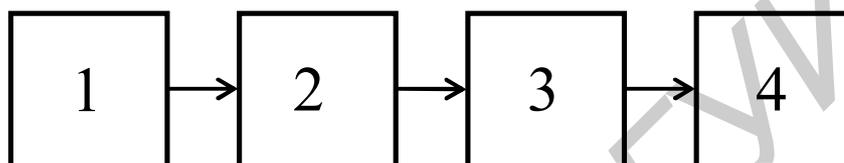
В режиме бегущих волн, когда $l_2 = n \frac{\lambda_B}{2}$, входное сопротивление в сечении а-а' равно входному сопротивлению щели $z_a = z_{щ}$, поэтому в этом режиме проводимость y_c дает значение сопротивления щели $y_c = z_{щ}$.

3. Измерительная установка

В лабораторной работе измеряются:

- входные проводимости продольных щелей, прорезанных в узкой и широкой стенках волновода;
- входное сопротивление поперечной щели, прорезанной в широкой стенке;
- исследуются частотные зависимости щелей в диапазоне частот, указанном преподавателем.

Измерения проводятся по блок-схеме, представленной на рис. 8.



- 1 - генератор высокочастотных колебаний;
- 2 - волноводная измерительная линия;
- 3 - секция прямоугольного волновода с исследуемой щелью;
- 4 - волноводная секция с короткозамыкающим поршнем.

Рис. 8

Измерения выполняются следующим образом:

а) в измерительном тракте с исследуемым щелевым излучателем устанавливается режим стоячей волны путем перемещения короткозамыкающего поршня (при перемещении поршня одновременно контролируется режим волны в линии, обычно по величине сигнала индикатора измерительной линии в сечении минимума);

б) по положению узла напряженности электрического поля в измерительной линии определяется и фиксируется положение эквивалентного сечения, фиксируется также положение короткозамыкающего поршня;

в) производится измерение длины волны в волноводе по положениям узлов напряженности электрического поля и последующее смещение короткозамыкающего поршня от зафиксированного положения на четверть длины волны (в волноводе устанавливается режим смешанных волн);

г) измеряется коэффициент стоячей волны K_c и расстояние от эквивалентного сечения до ближайшего минимума напряженности электрического поля;

д) по измеренным величинам с помощью круговой диаграммы полных сопротивлений определяется входная нормированная проводимость или входное нормированное сопротивление в эквивалентном сечении.

4. Порядок выполнения работы

4.1. Выполняется в лаборатории

4.1.1. Ознакомиться с блок-схемой измерительной установки, описанием приборов и правилами пользования СВЧ генератором, измерительной волноводной линии;

4.1.2. Включить и настроить измерительный стенд;

4.1.3. В заданном рабочем диапазоне снять частотную зависимость K_c и смещения минимума распределения электрического поля относительно эквивалентного сечения для заданных отрезков волновода со щелевыми излучателями;

г) измерить смещение центра щелевого излучателя (расстояния $x_1; x_2$) относительно продольного осевого сечения волновода.

4.2. Выполняется при домашней подготовке

4.2.1. По данным эксперимента с помощью круговой диаграммы полных сопротивлений рассчитать нормированные сопротивления (проводимости) исследованных излучающих щелей (для поперечной щели значение $\Delta z^* = \Delta z / \lambda_B + 0.25$);

4.2.2. Построить графики частотной зависимости активной и реактивной составляющей нормированных сопротивлений (проводимостей) щелей излучателей и определить резонансные частоты;

4.2.3. По формулам (3), (5) и (6) рассчитать нормированные сопротивления (проводимости) соответствующих щелевых излучателей на полученных резонансных частотах и сравнить с величинами, полученными в результате эксперимента.

5. Содержание отчета

1. Результаты экспериментального исследования щелевых излучателей в виде таблиц.

2. Графики зависимости входной проводимости (сопротивления) щелевых излучателей от частоты.

3. Результаты расчета проводимостей (сопротивлений) щелевых излучателей на частоте резонанса.

4. Анализ полученных результатов и выводы.

6. Контрольные вопросы

1. Нарисовать распределение токов проводимости на стенках волновода с волной H_{10} .

2. Нанести на стенках согласованного волновода излучающие щели и привести примеры использования их в технике СВЧ.

3. На короткозамкнутом отрезке волновода расположить излучающие щели в точках с заданными расстояниями от сечения короткого замыкания.
4. Для системы резонансных излучающих щелей, прорезанных в стенках короткозамкнутого отрезка волновода, определить расстояния от сечения короткого замыкания до щелей.
5. Объяснить методику определения входного сопротивления (проводимости) излучающей щели.
6. Дать определение резонансной щели.
7. Объяснить максимальное излучение резонансной щели.

Литература

1. Ширман Я.Д. Радиоволноводы и объемные резонаторы. М.: Связьиздат, 1959.
2. Красюк Н.П., Дымович Н.Д. Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Высш. шк. 1974.
3. Семенов И.А. Техническая электродинамика. М.: Связь, 1973.
4. Вольман В.И., Пименов Ю.В. Техническая электродинамика. М.: Связь, 1971.
5. Вольман В.И., Пименов Ю.В. Техническая электродинамика. М.: Связь, 2002.

Учебное издание

Исследование параметров щелей в стенках волновода

Методические указания
к лабораторной работе №3 по дисциплинам «Электродинамика
и распространение радиоволн», «Электромагнитные поля и волны»
для студентов радиотехнических специальностей
всех форм обучения

С о с т а в и т е л и:

Гололобов Дмитрий Владимирович,
Кижлай Игорь Николаевич,
Кирильчук Валерий Владимирович и др.

Ответственный за выпуск Н.А. Чмырев

Подписано в печать 23.06.2006.	Формат 60x84 1/16	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс»	Печать ризографическая	Усл. печ. л. 1,05.
Уч.-изд. л. 0,7.	Тираж 200 экз.	Заказ 363.

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/0056964 от 01.04.2004. ЛП №02330/0131666 от 30.04.2004.
220013, Минск, П.Бровки, 6