

11. Семенов Н.А. Техническая электродинамика: учеб. пособ. для вузов / Н.А. Семенов. — М.: Связь, 1973. — 480 с.
12. Фальковский О.И. Техническая электродинамика / О.И. Фальковский. — М.: Связь, 1978. — 243 с.
13. Марков Г.Т. Электродинамика и распространение радиоволн / Г.Т. Марков, Б.М. Петров, Г.П. Грудинская. — М: Сов. радио, 1979. — 376 с.
14. Никольский В.В. Электродинамика и распространение радиоволн / В.В. Никольский, Т.И. Никольская. — М.: Наука, 1989. — 544 с.
15. Григорьев А.Д. Электродинамика и техника СВЧ: учеб. для вузов по спец. «Электронные приборы и устройства автоматики» / А.Д. Григорьев. — М.: Высшая школа, 1990. — 335 с.
16. Витевский В.Б. Электромагнитные волны в технике связи / В.Б. Витевский, Э.А. Павловская. — М.: Радио и связь, 1995. — 121 с.



**Министерство образования и науки Украины
Севастопольский национальный технический
университет
Факультет радиоэлектроники
Кафедра радиотехники и телекоммуникаций**

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

Методические рекомендации по выполнению
лабораторного практикума
для студентов дневной и заочной форм обучения
направления 6.050901 — Радиотехника

**Севастополь
2013**

Электродинамика и распространение радиоволн: методические рекомендации по выполнению лабораторного практикума для студентов дневной и заочной форм обучения направления 6.050901 — Радиотехника / Сост. **В.В. Саламатин, И.Л. Афонин**. — Севастополь: изд-во СевНТУ, 2013. — 72 с.

Целью методических указаний является оказание помощи в выполнении и защите лабораторных работ по фундаментальной дисциплине «Электродинамика и распространение радиоволн». Излагаются порядок подготовки и выполнения лабораторных работ, требования к содержанию и оформлению отчета, таблицам, рисункам и необходимым расчетам.

Методические указания предназначены для студентов направления 6.050901 — Радиотехника факультета радиоэлектроники СевНТУ.

Методические рекомендации рассмотрены и переутверждены на заседании кафедры радиотехники и телекоммуникаций (протокол № 3 от **14 октября 2013** года)

Допущены учебно-методическим центром СевНТУ в качестве методических указаний

Рецензент:

Слезкин В.Г., канд. техн. наук, доцент кафедры радиотехники и телекоммуникаций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Саламатин В.В. Основы электродинамики (традиционной и геометрической): учеб. пособие / В.В. Саламатин, И.Л. Афонин; Под ред. В.В. Саламатина. — Севастополь: изд-во СевНТУ, 2005. — 270 с.
2. Электродинамика и распространение радиоволн: методические рекомендации по проведению практических занятий и организации самостоятельной работы студентов дневной формы обучения направления 6.050901 — радиотехника / СевНТУ сост. В.В. Саламатин, И.Л. Афонин. — Севастополь: изд-во СевНТУ, 2011. — 28 с.
3. Электродинамика и распространение радиоволн: методические рекомендации по изучению дисциплины и выполнению контрольных работ для студентов заочной формы обучения направления 0509 — Радиотехника / СевНТУ, сост. И.Л. Афонин, В.В. Саламатин. — Севастополь: изд-во СевНТУ, 2011. — 64 с.
4. Электродинамика и распространение радиоволн: методические рекомендации по выполнению домашней контрольной работы студентами дневной формы обучения направления 6.050901 — Радиотехника / СевНТУ, сост. И.Л. Афонин, В.В. Саламатин. — Севастополь: изд-во СевНТУ, 2013. — 44 с.
5. Электродинамика и распространение радиоволн. Часть 1. Электродинамика: учебное пособие по изучению дисциплины для студентов дневной и заочной форм обучения направления 6.050901 — радиотехника / СевНТУ; сост. В.В. Саламатин, И.Л. Афонин. — Севастополь: изд-во СевНТУ, 2013. — 84 с.
6. Электродинамика и распространение радиоволн. Часть 2. Геометрическая электродинамика: учебное пособие по изучению дисциплины для студентов дневной и заочной форм обучения направления 6.050901 — радиотехника / СевНТУ; сост. В.В. Саламатин, И.Л. Афонин. — Севастополь: изд-во СевНТУ, 2013. — 60 с.
7. Электродинамика и распространение радиоволн. Часть 3. Распространение радиоволн: учебное пособие по изучению дисциплины для студентов дневной и заочной форм обучения направления 6.050901 — радиотехника / СевНТУ; сост. В.В. Саламатин, И.Л. Афонин. — Севастополь: изд-во СевНТУ, 2013. — 57 с.
8. Федоров Н.Н. Основы электродинамики / Н.Н. Федоров. — М.: Высшая школа, 1980. — 399 с.
9. Вольман В.И. Техническая электродинамика / В.И. Вольман, Ю.В. Пименов. — М.: Связь, 1971. — 402 с.
10. Гольдштейн Л.Д. Электромагнитные поля и волны / Л.Д. Гольдштейн, Н.А. Зернов. — М.: Сов. радио, 1971. — 664 с.

фазосдвигающих пластин?

6.6.6. Объясните методику измерения коэффициента эллиптичности волны.

6.6.7. Круглый волновод. Какой основной тип волны в круглом волноводе?

6.6.8. Из какого материала изготавливаются оконечные поглощающие нагрузки? Нарисуйте их конструкцию, приведите основные параметры.

6.6.9. На чем основан принцип работы поглощающего аттенюатора? Поясните основные особенности конструкции.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
Методические указания к выполнению лабораторных работ	6
1. Лабораторная работа № 1. Исследование объемного резонатора	8
1.1. Краткие теоретические сведения	8
1.2. Расчетное задание	12
1.3. Описание лабораторной установки	12
1.4. Порядок выполнения работы	13
1.5. Оформление отчета	13
1.6. Контрольные вопросы	14
2. Лабораторная работа № 2. Исследование структуры электромагнитного поля волны типа H_{10} в прямоугольном волноводе	15
2.1. Краткие теоретические сведения	15
2.1.1. Параметры волн в полых волноводах прямоугольного сечения	15
2.1.2. Структура электромагнитного поля прямоугольного волновода	16
2.1.3. Волна H_{10} в прямоугольном волноводе	17
2.2. Расчетное задание	18
2.3. Описание лабораторной установки	18
2.4. Порядок выполнения работы	20
2.5. Оформление отчета	21
2.6. Контрольные вопросы	21
3. Лабораторная работа № 3. Исследование волноводного ответвителя вращающейся поляризации	22
3.1. Краткие теоретические сведения	22
3.1.1. Поляризация электромагнитных волн	22
3.1.2. Устройство и принцип работы ответвителя круговой (вращающейся) поляризации	26
3.2. Расчетное задание	28
3.3. Описание лабораторной установки	28
3.4. Порядок выполнения работы	29
3.5. Оформление отчета	30
3.6. Контрольные вопросы	31

4. Лабораторная работа № 4. Исследование дисперсионных свойств волноводной линии передачи	32
4.1. Краткие теоретические сведения	32
4.1.1. Классификация направляемых волн	32
4.1.2. Критическая длина волн	33
4.1.3. Понятие о дисперсионной характеристике волновода	35
4.1.4. Фазовая скорость	36
4.1.5. Групповая скорость	37
4.1.6. Энергетическая скорость	39
4.2. Расчетное задание	40
4.3. Описание лабораторной установки	40
4.4. Порядок выполнения работы	42
4.5. Оформление отчета	43
4.6. Контрольные вопросы	45
5. Лабораторная работа № 5. Исследование прямых и отраженных волн в регулярных волноводах	46
5.1. Краткие теоретические сведения	46
5.1.1. Режимы работы линии передачи	46
5.1.2. Основные параметры и их зависимость	48
5.1.3. Волна <i>TEM</i> в коаксиальном волноводе	51
5.1.4. Конструкции и принцип работы измерительной линии	51
5.2. Расчетное задание	54
5.3. Описание лабораторной установки	54
5.4. Порядок выполнения работы	58
5.5. Оформление отчета	59
5.6. Контрольные вопросы	59
6. Лабораторная работа № 6. Исследование поляризации электромагнитных волн	60
6.1. Краткие теоретические сведения	60
6.2. Расчетное задание	64
6.3. Описание лабораторной установки	64
6.4. Порядок выполнения работы	68
6.5. Оформление отчета	69
6.6. Контрольные вопросы	69
Библиографический список	71

Таблица 6.1 — Экспериментальные данные для «90°» секции

θ	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°
$A_{\max}$									
$A_{\min}$									
$K_{\text{эл}}$									

5. Установив «90°» секцию под углом $\theta = 0^\circ$, определите коэффициент эллиптичности волны при различных положениях «180°» секции от 0° до 120° через каждые 15° . Результаты измерений оформите в виде аналогичной таблице 6.1. Повторите измерения при других углах θ , в том числе угле $\theta_{\text{кр}}$, когда наблюдается круговая поляризация.

6.5. Оформление отчета

6.5.1. Сформулируйте задачи исследований, приведите структурную схему лабораторной установки с пояснением назначения и принципа работы основных блоков.

6.5.2. Приведите конструкцию поляризатора и поясните принцип преобразования линейно-поляризованной волны в эллиптически-поляризованную волну.

6.5.3. Рассчитайте коэффициент эллиптичности по результатам экспериментальных исследований. Проанализируйте полученные результаты.

6.5.4. Сделайте выводы по проделанной работе.

6.6. Контрольные вопросы

6.6.1. Чем отличаются поляризованные волны от неполяризованных волн?

6.6.2. Сформулируйте понятия волны с линейной поляризацией, с круговой поляризацией и с эллиптической поляризацией?

6.6.3. Объясните принципы преобразования волны с линейной поляризацией в волну с круговой и эллиптической поляризацией при прохождении через «90°» секцию.

6.6.4. Объясните поворот плоскости поляризации волны с линейной поляризацией при прохождении через «180°» секцию.

6.6.5. Поясните принципы работы четвертьволновой и полуволновой

Степень отклонения поляризации волны от круговой оценивается **коэффициентом эллиптичности**, равным отношению большой оси эллипса к малой

$$K_{\text{эл}} = E_{\text{max}} / E_{\text{min}} . \quad (6.9)$$

Для измерения коэффициента эллиптичности используется разделитель поляризации 4, вращая который вокруг оси круглого волновода легко по показаниям индикатора оценить параметры поляризации волны. Максимальное показание индикатора A_{max} соответствует большой оси эллипса, минимальное A_{min} — малой оси эллипса. Ввиду квадратичности вольтамперной характеристики детектора, коэффициент эллиптичности определяется выражением

$$K_{\text{эл}} = \sqrt{\frac{A_{\text{max}}}{A_{\text{min}}}} = \sqrt{\frac{k_d E_{\text{max}}^2}{k_d E_{\text{min}}^2}} , \quad (6.10)$$

где k_d — коэффициент преобразования детектора.

В лабораторной установке использован генератор типа Г4–83. Для регулировки уровня мощности СВЧ генератора в схему включен поглощающий аттенюатор, см. рис. 6.5.

6.4. Порядок выполнения работы

6.4.1. Приведите аттенюатор в крайнее правое положение, повернув ручку по часовой стрелке до упора. Это положение соответствует максимальному ослаблению.

6.4.2. Включите генератор на прогрев в течение (5 ... 10) минут.

6.4.3. Выполните предварительные настройки лабораторной установки:

- фазосдвигающие секции установите в положение, соответствующее углу $\theta = 0^\circ$;
- установите частоту сигнала СВЧ генератора, равную 7979 МГц.
- уменьшая ослабление аттенюатора, добейтесь показаний индикатора без перегрузки, зашкаливания стрелки индикатора, при любом положении разделителя поляризации.

6.4.4. Поворачивая «90°» секцию, добейтесь, чтобы волна на ее выходе имела поляризацию, наиболее близкую к круговой. Определите коэффициент эллиптичности при этом положении 90° секции и при двух других положениях секции, отличающихся от данного на 15° в обе стороны, а также при $\theta = 0^\circ$; $\theta = 90^\circ$. Результаты измерений оформите по образцу таблицы 6.1.

ВВЕДЕНИЕ

Методические рекомендации по выполнению каждой лабораторной работы (ЛР) содержат следующие разделы: цель работы, описание лабораторной установки, порядок выполнения лабораторной работы, расчетное задание, рекомендации по оформлению отчета и контрольные вопросы.

Лабораторные работы выполняются в следующем семестре после изучения теоретического курса дисциплины «Электродинамика и распространение радиоволн». Однако перед выполнением каждой работы необходимо по учебному пособию [1] повторить соответствующий раздел, а при выполнении ЛР № 3 и № 5 изучить дополнительные теоретические сведения, изложенные в описании. Предварительная подготовка студентов к лабораторным занятиям, поскольку их тематика заранее известна, позволяет преподавателю проводить краткий опрос студентов и допускать их к выполнению лабораторной работы.

Бригада состоит, как правило, из двух студентов. Оба студента активно участвуют в проведении экспериментов. Результаты экспериментальных исследований проверяются преподавателем и при их положительной оценке, студенты приступают к оформлению отчета.

Защита отчета по ЛР проводится на очередном занятии перед выполнением следующей лабораторной работы. В процессе защиты студент должен объяснить методику эксперимента, дать сравнительный анализ экспериментальных и расчетных результатов, сделать выводы по работе и ответить на вопросы, поставленные преподавателем.

Лабораторный практикум предусматривает выполнение шести лабораторных работ, четыре из которых выполняется за два академических часа, а ЛР № 1 и № 3 — за четыре.

Перечень выполняемых работ следующий:

ЛР № 1 Исследование объемного резонатора;

ЛР № 2 Исследование структуры электромагнитного поля волны типа H_{10} в прямоугольном волноводе;

ЛР № 3 Исследование волноводного ответвителя вращающейся поляризации;

ЛР № 4 Исследование дисперсионных свойств волноводной линии передачи;

ЛР № 5 Исследование прямых и отраженных волн в регулярных волноводах;

ЛР № 6 Исследование поляризации электромагнитных волн.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Цель выполнения лабораторных работ

Настоящие методические указания и описание лабораторных работ предназначены для глубокого усвоения основных разделов фундаментальной дисциплины «Электродинамика и распространение радиоволн» направления 6.050901 — Радиотехника. Они выполняются после изучения дисциплины согласно учебной программе и имеют своей целью:

- формирование базовых знаний по теоретической радиотехнике;
- освоение расчетов, выполняемых с помощью ПК;
- приобретение практических навыков анализа характеристик и параметров СВЧ устройств с использованием теории поля и векторного анализа.

Содержание лабораторной работы и правила оформления отчета

Каждая лабораторная работа состоит из:

- цели работы;
- кратких теоретических сведений;
- расчетного задания;
- описания лабораторного стенда;
- порядка работы;
- требований к оформлению отчета;
- контрольных вопросов;
- библиографический список.

Отчет по лабораторной работе оформляется в соответствии с правилами оформления текстовой документации (ГОСТов и ЕСКД).

Каждый студент выполняет отчет индивидуально!

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- цель и задачи исследований;
- структурную схему лабораторной установки (стенда);
- расчетное задание и все необходимые рисунки (например, картины векторов напряженности электромагнитного поля исследуемого типа колебания);
- результаты экспериментальных исследований в виде таблиц;
- графики экспериментальных зависимостей, расчетных параметров и характеристик, согласно заданию;
- выводы по проделанной работе.

Отчет оформляется на стандартных листах белой бумаги формата А4 (297 × 210 мм). Текст пишется разборчивым почерком с одной стороны черными или фиолетовыми чернилами (пастой). Использование красных, зелёных чернил (пасты) не допускается. По краям должны быть оставлены

Длина L «90°» секции выбирается таким образом, чтобы разность фазовых сдвигов ψ_t и ψ_n на выбранной частоте равнялась $\pi/2$, т.е.

$$\psi_t - \psi_n = 90^\circ.$$

Если диэлектрическая пластина находится под углом $\theta = 45^\circ$ к плоскости поляризации входной волны, то на выходе секции волна будет иметь круговую поляризацию в силу равенства амплитуд частичных волн, а также их ортогональности в пространстве и сдвига по фазе на 90° .

При $\theta = 0^\circ$ или $\theta = 90^\circ$ поляризация волны при прохождении через секцию не изменится, т.е. останется линейной. Если угол поворота пластины не равен 45° и отличается от 0° или 90° , то на выходе секции волна имеет эллиптическую поляризацию.

«180°» секция работает аналогичным образом, но длина пластины выбрана так, что обеспечивает сдвиг фаз между параллельной составляющей и перпендикулярной ей составляющей на 180° . Эту секцию можно считать двумя каскадно-соединенными «90°» секциями. Следовательно, если одна «90°» секция преобразует линейную поляризацию в круговую, то вторая «90°» секция из круговой поляризации формирует линейную.

При подаче на вход «180°» секции волны с круговой поляризацией также происходит два преобразования: «круговая — линейная» и «круговая — линейная», но так как оба преобразования связаны с изменением фазы на 90° в одну и ту же сторону, круговая поляризация на выходе имеет противоположное направление вращения.

Таким образом, при прохождении волны через «180°» секцию частичные волны претерпевают фазовые сдвиги, отличающиеся на 180° . Поэтому при подаче на вход «180°» секции волны с линейной поляризацией (угол θ для «90°» секции равен 0° или 90°) вид поляризации не изменится. При подаче на вход «180°» секции волны с круговой поляризацией происходит изменение направления вращения ее на обратное.

С выхода «180°» секции волна поступает на разделитель поляризации 4, представляющий собой соединение перпендикулярно расположенных отрезков прямоугольного и цилиндрического волноводов. Широкая стенка прямоугольного волновода расположена параллельно оси цилиндрического волновода. Волна на входе разделителя поляризации разделяется на две частичные волны с линейными поляризациями в плоскостях, параллельных широкой и узкой стенкам прямоугольного волновода. Частичная волна, поляризованная параллельно узкой стенке, ответвляется в волновод прямоугольного сечения и поступает на детекторную секцию, выход которой подключен к индикатору (например, к стрелочному микроамперметру). Волна, поляризованная параллельно широкой стенке, затухает в прямоугольном волноводе, для которой он является запертым, и не влияет на показания индикатора.

тору можно представить в виде суммы двух частичных волн, взаимно перпендикулярных поляризаций. Одна из них поляризована в плоскости диэлектрической пластины, а другая — в плоскости, перпендикулярной пластине (рис. 6.7).

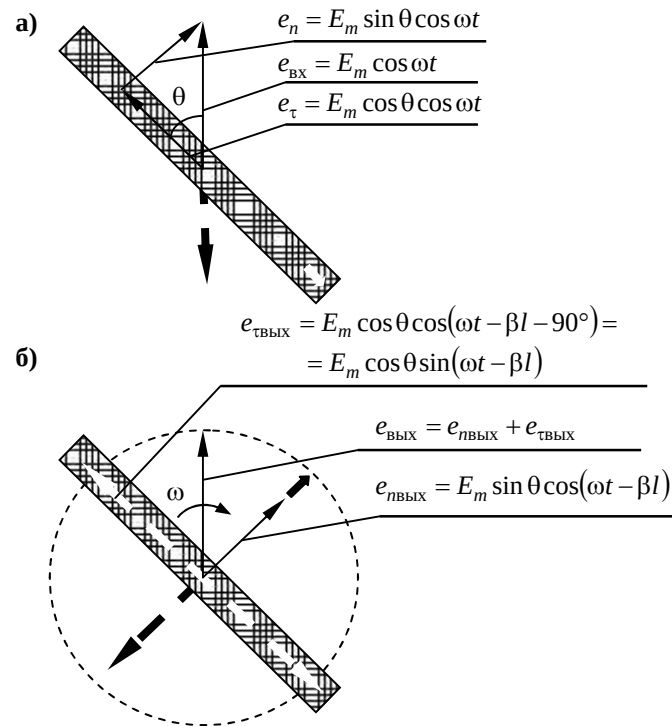


Рис. 6.7 — Преобразование линейно-поляризованной волны в эллиптически-поляризованную волну при прохождении ее через «90»° секцию

Фазовая скорость $V_{\text{фт}}$ волны, вектор электрической напряженности E_t которой параллелен пластине, меньше фазовой скорости $V_{\text{фн}}$ волны, вектор электрической напряженности E_n которой перпендикулярен пластине. Поэтому их длины волн в волноводе и фазовые сдвиги удовлетворяют неравенствам

$$\lambda_{\text{Вт}} = V_{\text{фт}} / f < \lambda_{\text{Вн}} = V_{\text{фн}} / f,$$

$$\psi_t = 2\pi L / V_{\text{фт}} > \psi_n = 2\pi L / V_{\text{фн}}. \quad (6.8)$$

поля: левое — 25 мм, верхнее и нижнее — 20 мм, правое — 10 мм. Использование ПК — приветствуется.

Формулы должны быть вписаны в текст тщательно и разборчиво с четким обозначением индексов и показателей степени. Формулы нумеруются в круглых скобках, например, (5). Формулы должны быть приведены в тексте полностью, с объяснением буквенных обозначений, если они ранее не были объяснены. При подстановке в формулы числовых значений необходимо указывать их в основных единицах в соответствии с СИ и ДСТУ «Метрология. Единицы физических величин». Окончательный результат должен быть вычислен до третьей значащей цифры, с указанием его основной или производной размерности (А, мА, Ф, пФ, Ом, кОм).

Все таблицы, рисунки, схемы выполняются простым карандашом. Графики выполняется на миллиметровой бумаге. Допускается цветовая окраска графиков.

Выводы по работе должны быть изложены грамотно, без сокращений, кроме общепринятых, по всем аспектам изучаемых вопросов.

Выполнение лабораторной работы, защита отчета

На протяжении семестра студент регулярно консультируется у ведущего преподавателя согласно установленному расписанию. Цель консультаций состоит в обеспечении планомерности выполнения заданий, получении методических указаний и разъяснении вопросов, вызвавших затруднения, развитии самостоятельности и творческой инициативы студента.

В ходе защиты лабораторной работы студент должен рассказать в течение (2 ... 3) минут основные результаты работы и затем ответить на вопросы по существу лабораторной работы.

Лабораторная работа № 1 ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЪЕМНОГО РЕЗОНАТОРА

Цель работы: теоретическое и экспериментальное определение резонансных частот прямоугольного резонатора заданных размеров, а также его добротности.

1.1. Краткие теоретические сведения

Исследуемый резонатор представляет собой отрезок полого прямоугольного волновода с замкнутыми концами. Один конец закорочен металлической пластиной, к другому подсоединён подвижный короткозамыкатель. Длина отрезка равна $l_1 = 5,1$ см. Подвижный короткозамыкатель позволяет увеличить длину резонатора до 11,1 см. Возбуждается резонатор при помощи крестообразных щелей связи.

Резонансная частота полого прямоугольного резонатора определяется по формуле

$$f_{mnp} = \frac{c}{\lambda_{mnp}} = \frac{c \times \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{l}\right)^2}}{2},$$

где a, b, l — размеры прямоугольного параллелепипеда (объемного резонатора);

m, n, p — количество полувольт, укладываемых вдоль осей параллелепипеда;

c — скорость света;

λ_{mnp} — резонансная длина волны.

Если частоту измерять в ГГц, а длину волны в сантиметрах, то

$$f_{mnp} = \frac{30}{\lambda_{mnp}}.$$

Колебания типов H_{mnp} и E_{mnp} в прямоугольном резонаторе создают дискретный спектр резонансных частот, определяемых индексами m, n, p .

Количество резонансных частот определяется как размерами a, b, l резонатора, так и полосой частот.

Исследуемый резонатор имеет размеры: $a = 2,3$ см; $b = 1,0$ см; $l = (5,1 \dots 11,1)$ см. Измерения проводятся в полосе частот $(7,1 \dots 11,5)$ ГГц.

При $l_1 = 5,1$ см наблюдаются три резонанса; при $l_2 = 8,1$ см — четы-

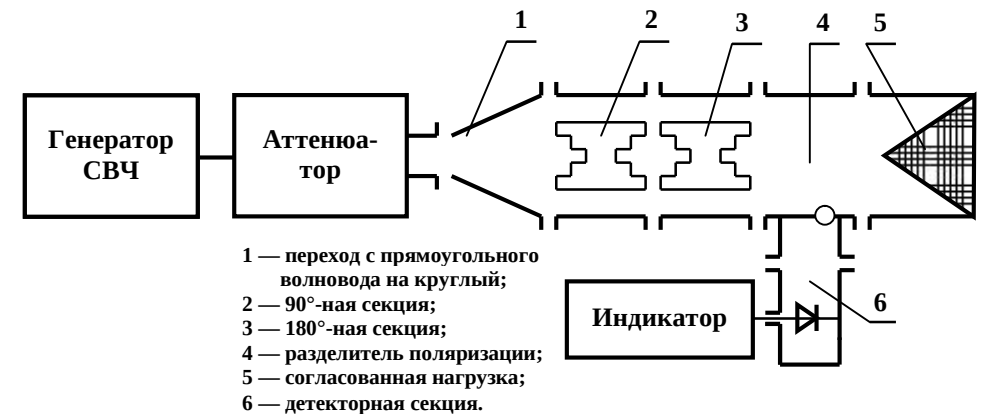


Рис. 6.5 — Схема установки для исследования электромагнитных волн с различными типами поляризации

Фазосдвигающие секции 2 и 3 выполнены в виде отрезка круглого волновода с диэлектрической вставкой, представляющей собой пластину из полистирола со ступенчатыми вырезами по краям для уменьшения коэффициента отражения. Конструкция фазосдвигающей секции показана на рис. 6.6.

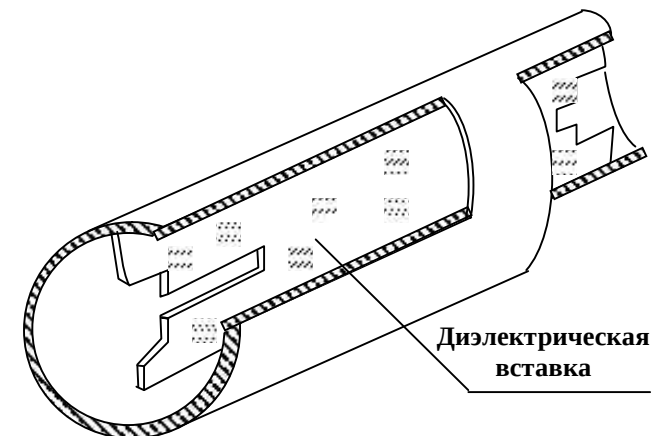


Рис. 6.6 — Конструкция фазосдвигающей секции

На вход «90°» секции поступает линейно поляризованная волна, ко-

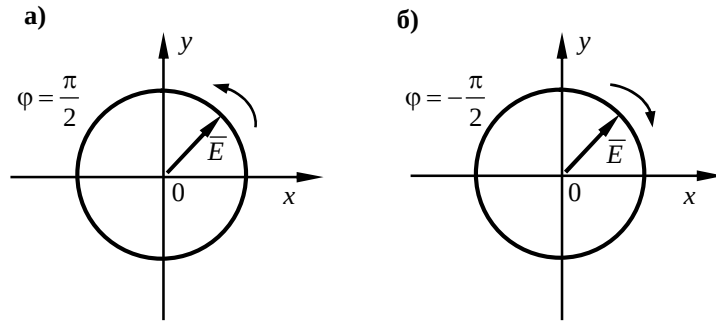


Рис. 6.4 — К определению волны с круговой поляризацией

Эллиптическую и круговую поляризацию часто называют **вращающейся поляризацией**. Очевидно, что волну с вращающейся поляризацией можно представить в виде совокупности двух линейно-поляризованных волн, векторы $\vec{E}$ или $\vec{H}$ которых взаимно ортогональны.

6.2. Расчетное задание

6.2.1. Зарисуйте структуру электрического и магнитного полей круглого волновода при распространении в нем волны типа H_{11} .

6.2.2. Рассчитайте одноволновый режим работы круглого волновода при $a = 12$ мм.

6.2.3. Постройте диаграмму типов колебаний в круглом волноводе, используемом в лабораторной работе, рассчитав предварительно $\lambda_{кр}$ и $f_{кр}$ (5 низших типов).

6.3. Описание лабораторией установки

Схема установки, предназначенной для исследования электромагнитных волн с различными типами поляризации, изображена на рис. 6.5. С выхода СВЧ генератора электромагнитная энергия поступает в волноводный переход 1 с прямоугольного на круглое сечение. Форма сечения перехода плавно меняется от прямоугольного до круглого, благодаря чему при прохождении электромагнитной волны через переход происходит преобразование волны типа H_{10} прямоугольного волновода в волну типа H_{11} круглого волновода.

ре, а при $l_3 = 11,1$ см — шесть.

Измеренные резонансные частоты при различных значениях длины резонатора l необходимо идентифицировать с конкретными типами колебаний.

В соответствии с граничными условиями на стенках резонатора касательная составляющая вектора $\vec{E}$ (E_τ) и нормальная составляющая вектора $\vec{H}$ (H_n) равны нулю, а нормальная составляющая вектора $\vec{E}$ (E_n) и касательная составляющая вектора $\vec{H}$ (H_τ) — максимальны.

Уравнения плоскостей, соответствующих боковым широким и торцевым стенкам резонатора, имеют вид: $x = 0$, $x = a$; $y = 0$, $y = b$; $z = 0$, $z = l$.

Учитывая граничные условия, проекции векторов $\vec{E}$ и $\vec{H}$ собственных колебаний прямоугольного резонатора имеют вид:

$$E_x = E_{x0} \cos \frac{m\pi}{a} x \sin \frac{n\pi}{b} y \sin \frac{p\pi}{l} z ;$$

$$E_y = E_{y0} \sin \frac{m\pi}{a} x \cos \frac{n\pi}{b} y \sin \frac{p\pi}{l} z ;$$

$$E_z = E_{z0} \sin \frac{m\pi}{a} x \sin \frac{n\pi}{b} y \cos \frac{p\pi}{l} z ;$$

$$H_x = H_{x0} \sin \frac{m\pi}{a} x \cos \frac{n\pi}{b} y \cos \frac{p\pi}{l} z ;$$

$$H_y = H_{y0} \cos \frac{m\pi}{a} x \sin \frac{n\pi}{b} y \cos \frac{p\pi}{l} z ;$$

$$H_z = H_{z0} \cos \frac{m\pi}{a} x \cos \frac{n\pi}{b} y \sin \frac{p\pi}{l} z ,$$

Колебания H_{mnp} и E_{mnp} отличаются только амплитудными коэффициентами: E_{x0} , E_{y0} , E_{z0} ; H_{x0} , H_{y0} , H_{z0} .

Отсутствие вариации поля вдоль одной из осей приводит к равенству нулю соответствующего индекса (m, n, p) и соответствующих векторов поля $\vec{E}$ и $\vec{H}$. Следует помнить, что в колебаниях типа H_{mnp} — $E_z = 0$, а в E_{mnp} — $H_z = 0$.

Рассмотрим структуры полей простейших типов колебаний.

$$H_{101}$$

$$H_{011}$$

$$\begin{aligned}
E_y &= E_{y0} \sin \frac{\pi}{a} x \sin \frac{\pi}{l} z; & E_x &= E_{x0} \sin \frac{\pi}{b} y \sin \frac{\pi}{l} z; \\
H_x &= H_{x0} \sin \frac{\pi}{a} x \cos \frac{\pi}{l} z; & H_y &= H_{y0} \sin \frac{\pi}{b} y \cos \frac{\pi}{l} z; \\
H_z &= H_{z0} \cos \frac{\pi}{a} x \sin \frac{\pi}{l} z; & H_z &= H_{z0} \cos \frac{\pi}{b} y \sin \frac{\pi}{l} z; \\
E_x &= 0; \quad E_z = 0; \quad H_y = 0. & E_y &= 0; \quad E_z = 0; \quad H_x = 0.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
H_{102} & & E_{110} \\
E_y &= E_{y0} \sin \frac{\pi}{a} x \sin \frac{2\pi}{l} z; & E_z &= E_{z0} \sin \frac{\pi}{a} x \sin \frac{\pi}{b} y; \\
H_x &= H_{x0} \sin \frac{\pi}{a} x \cos \frac{2\pi}{l} z; & H_x &= H_{x0} \sin \frac{\pi}{a} x \cos \frac{\pi}{b} y; \\
H_z &= H_{z0} \cos \frac{\pi}{a} x \sin \frac{2\pi}{l} z; & H_y &= H_{y0} \cos \frac{\pi}{a} x \sin \frac{\pi}{b} y; \\
E_x &= 0; \quad E_z = 0; \quad H_y = 0. & E_x &= 0; \quad E_y = 0; \quad H_z = 0.
\end{aligned}$$

Структура поля колебания типа H_{101} показана на рис. 1.1.

Наименьшие собственные (резонансные) частоты имеют колебания типов H_{101} и E_{110} :

$$f_{101} = \frac{c}{2} \sqrt{\frac{1}{a^2} + \frac{1}{l^2}}; \quad f_{110} = \frac{c}{2} \sqrt{\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2}}.$$

Структура поля волны E_{110} аналогична структуре поля волны H_{101} . Однако эти поля по-разному ориентированы относительно осей x , y и z .

Добротность объёмного резонатора рассчитывается по формуле

$$Q_{mnp} = 2\pi \frac{f_{mnp} W_{mnp}}{P_{\pi(mnp)}}$$

где W — энергия, запасённая в резонаторе за период колебаний;
 $P_{\pi(mnp)}$ — суммарная мощность потерь.

Резонатор с колебанием типа H_{101} имеет добротность

Совершенно ясно, что волну с линейной поляризацией можно рассматривать как предельный случай эллиптически поляризованной волны, когда малая полуось равна нулю.

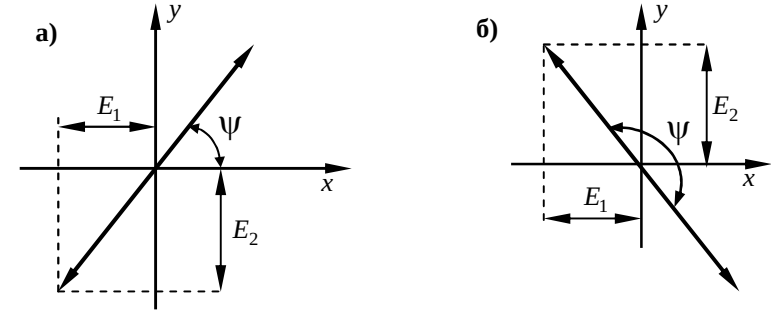


Рис. 6.3 — К определению линейно-поляризованной волны

Случай 2. Предположим далее, $\varphi = \pm \pi/2$, а $E_1 = E_2 = E$. При таких условиях уравнение (6.3) превращается в уравнение окружности

$$E_x^2 + E_y^2 = E^2, \quad (6.6)$$

и, стало быть, годографом вектора $\vec{E}$ в плоскости $z=0$ становится окружность. На рис. 6.3, а и 6.3, б изображены графики уравнения (6.6), и указаны направления вращения вектора $\vec{E}$ при $\varphi = \pi/2$ и $\varphi = -\pi/2$. Электромагнитная волна, характеризуемая уравнением (6.6) называется волной с **круговой поляризацией**. При движении этой волны вдоль оси z концы векторов $\vec{E}$ и $\vec{H}$ описывают в пространстве винтовые линии с шагом, равным длине волны (рис. 6.4).

Случай 3. Если фазовый угол φ , как и в предыдущем случае, равен $\pm \pi/2$ а $E_1 \neq E_2$, то уравнение (6.3) принимает вид

$$\frac{E_x^2}{E_1^2} + \frac{E_y^2}{E_2^2} = 1. \quad (6.7)$$

Таким образом, снова получается уравнение эллипса. Только оси его теперь уже совпадают с осями прямоугольной системы координат.

Таким образом, вектор $\vec{E}$ вращается в плоскости $z = \text{const}$, совершая полный оборот за период $T = 2\pi/\omega$. При этом соответственно меняется и его длина.

Аналогичный вывод можно сделать о векторе $\vec{H}$, так как он в любой момент времени перпендикулярен вектору $\vec{E}$.

Электромагнитная волна подобного типа носит наименование волны с **эллиптической поляризацией** или **эллиптически поляризованной волны**, а эллипс, описываемый концом вектора $\vec{E}$, называется **эллипсом поляризации**. Плоскость поляризации такой волны непрерывно вращается в пространстве, причем направление вращения зависит от знака угла φ .

Различают волны с правым и левым направлениями вращения. В первом случае плоскость поляризации и векторы поля относительно наблюдателя, смотрящего по направлению распространения волны, вращаются по часовой стрелке, а во втором — в обратном направлении.

Рассмотрим возможные частные случаи поляризации плоской волны, вытекающие из выражения (6.3).

Случай 1. Пусть фазовый сдвиг $\varphi = 0$. Соотношение (6.3) принимает вид

$$\frac{E_x}{E_1} - \frac{E_y}{E_2} = 0, \quad (6.4)$$

откуда следует, что $E_y = \frac{E_2}{E_1} E_x$, при $-E_1 \leq E_x \leq E_1$.

Последнее выражение представляет собой уравнение отрезка прямой (рис. 6.3, а). Стало быть, при $\varphi = 0$ эллиптически поляризованная волна превращается в волну линейно поляризованную. Угол наклона плоскости поляризации такой волны к оси x , как вытекает из (6.4), равен

$$\psi = \arctg\left(\frac{E_2}{E_1}\right).$$

Если фазовый сдвиг $\varphi = \pm\pi$, то волна вновь будет иметь **линейную поляризацию**, потому что из (6.3) имеем

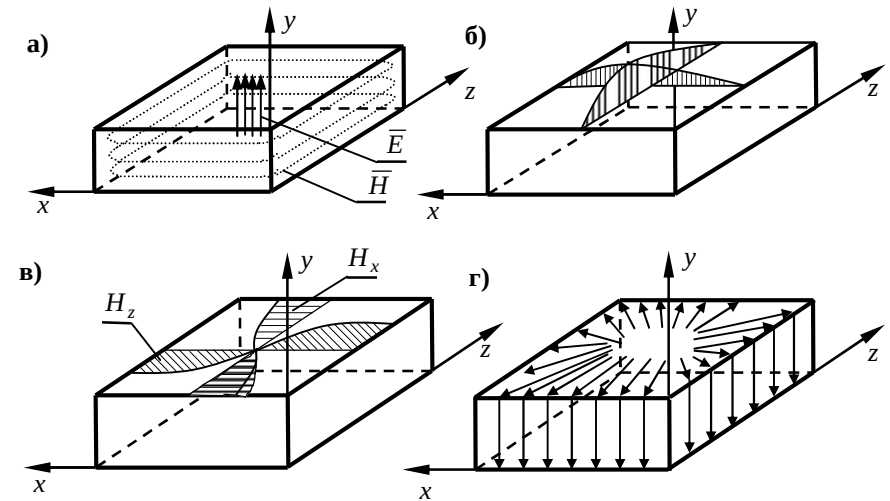
$$E_y = -\frac{E_2}{E_1} E_x. \quad (6.5)$$

Теперь плоскость поляризации имеет уже противоположный по знаку угол наклона, (рис. 6.3, б)

$$\psi = -\arctg\left(\frac{E_2}{E_1}\right).$$

$$Q_{101} = \frac{b}{\delta_0} \frac{a^2 + l^2}{\frac{bl^2}{a} + \frac{a^2b}{l} + \frac{a^2}{2} + \frac{l^2}{2}},$$

$$\text{где } \delta_0 = \frac{0,066}{\sqrt{f [\text{Гц}]}} \text{, м.}$$



- а) — силовые линии векторов $\vec{E}$ и $\vec{H}$;
- б) — зависимость проекций вектора $\vec{E}$ от координат x и z (при $t = \text{const}$);
- в) — зависимость проекций вектора $\vec{H}$ от координат x и z (при $t = \text{const}$);
- г) — силовые линии вектора плотности тока

Рис. 1.1 — Структура поля волны H_{101} в прямоугольном резонаторе

Добротность резонатора можно определить экспериментально по формуле

$$Q = \frac{f_0}{2\Delta f},$$

где f_0 — резонансная частота;

$2\Delta f$ — полоса пропускания на уровне 0,5 (этот уровень обусловлен

режимом квадратичного детектирования СВЧ диода, используемого в работе).

1.2. Расчётное задание

1.2.1. Рассчитать собственные (резонансные) частоты колебаний типов H_{101} , H_{102} , H_{103} , H_{104} , H_{105} для резонатора с размерами: $a = 2,3$ см; $b = 1,0$ см; $l_1 = 5,1$ см; $l_2 = 11,1$ см.

1.2.2. Рассчитать собственную добротность резонатора для колебаний типа H_{101} . Размеры резонатора: a ; b ; l_1 ; l_2 .

1.3. Описание лабораторией установки

Структурная схема лабораторной установки для исследования объёмного резонатора приведена на рис. 1.2.

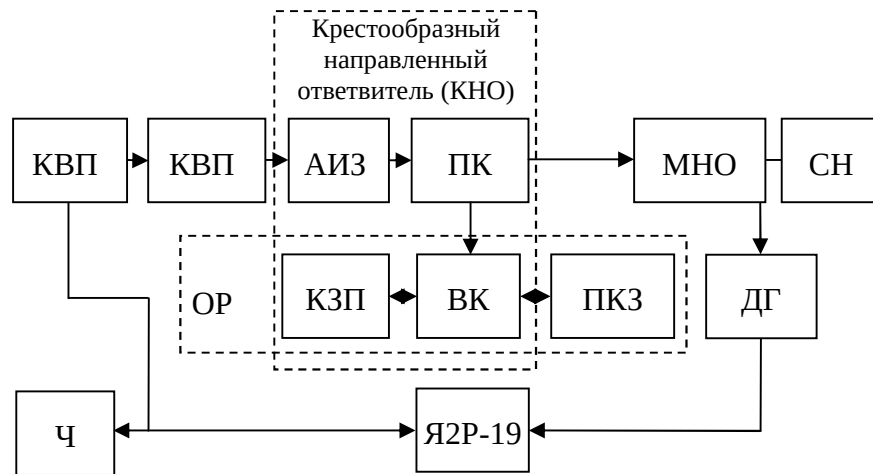


Рис. 1.2 — Структурная схема лабораторной установки

СВЧ колебания с генератора качающейся частоты (ГКЧ) через коаксиально-волноводный переход (КВП), аттенюатор с изменяемым затуханием (АИЗ), первичные каналы (ПК) крестообразного (КНО) и многодырочного направленных ответвителей (МНО) поступают на согласованную нагрузку (СН). Вторичный канал крестообразного направленного ответвителя (ВК), закороченный с одной стороны проводящей пластиной (КЗП), а

$$E_x = E_1 \cos \omega t \quad \text{и} \quad E_y = E_2 (\cos \omega t - \varphi). \quad (6.2)$$

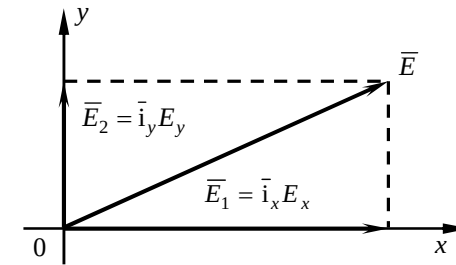


Рис. 6.1 — Вектор напряженности электрического поля суммарной волны в плоскости $z = 0$

Выясним, как ведет себя этот вектор $\vec{E}$ во времени. Учтя, что $E_x/E_1 = \cos \omega t$ и $E_y/E_2 = \cos \omega t \cos \varphi + \sin \omega t \sin \varphi$ можем получить соотношение

$$\frac{E_x^2}{E_1^2} + \frac{E_y^2}{E_2^2} - 2 \frac{E_x E_y}{E_1 E_2} \cos \varphi = \sin^2 \varphi. \quad (6.3)$$

Полученное равенство представляет собой уравнение эллипса, повернутого относительно координат x и y на некоторый угол (рис. 6.2). Этот эллипс является геометрическим местом точек, в которых находится конец вектора $\vec{E}$ в различные моменты времени. Иными словами, эллипс (6.3) есть годограф вектора $\vec{E}$ в плоскости $z = 0$ (или $z = \text{const}$).

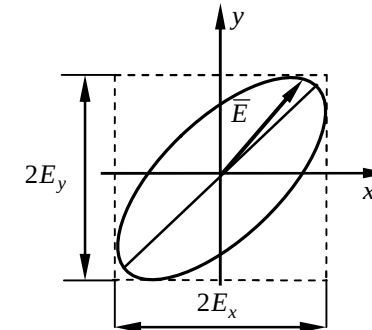


Рис. 6.2 — Годограф вектора напряженности электрического поля за период колебания

Лабораторная работа № 6 ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Цель работы: освоение методики экспериментальных исследований электромагнитных волн с линейной, круговой и эллиптической поляризацией в круглом волноводе.

6.1. Краткие теоретические сведения

Электромагнитное поле с векторами $\vec{E}$ и $\vec{H}$, направление которых может быть определено в любой момент времени, называется **поляризованным**. Если же направление вектора $\vec{E}$, и соответственно вектора $\vec{H}$, изменяется в пространстве случайным образом, поле будет **неполяризованным**.

Простейшим примером поляризованного электромагнитного поля является поле плоской волны (волна, у которой векторы $\vec{E}$ и $\vec{H}$ являются функциями времени и только одной пространственной координаты). Плоскость, проходящая через направление распространения этой волны и вектор $\vec{E}$, называется **плоскостью поляризации**.

Если положение плоскости поляризации относительно некоторой неподвижной системы координат остается неизменным, плоская волна будет иметь **линейную** поляризацию. В этом случае вектор $\vec{E}$ всегда оказывается параллельным некоторой фиксированной оси, например, оси x прямоугольной системы координат.

Пусть вдоль оси z распространяются две плоские волны с взаимно перпендикулярными векторами электрического поля

$$\vec{E}_1 = \vec{i}_x E_1 \cos(\omega t - \beta z) \quad \text{и} \quad \vec{E}_2 = \vec{i}_y E_2 \cos(\omega t - \beta z - \varphi), \quad (6.1)$$

где φ — угол фазового сдвига между волнами;

β — фазовая постоянная;

ω — круговая частота.

Совокупность этих волн можно рассматривать как одну плоскую волну с более сложной поляризационной структурой.

Из выражений (6.1) видно, что вектор напряженности электрического поля $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$ суммарной волны имеет две проекции E_x и E_y , причем в плоскости $z = 0$ (см. рис. 6.1)

с другой стороны — подвижным короткозамыкателем (ПКЗ), является исследуемым объемным резонатором (ОР). Напряжение с детекторной головки (ДГ) многодырочного направленного ответвителя, пропорциональное мощности генератора, поступает на панорамный индикатор Я2Р-19. Сигнал с генератора ответвляется также на частотомер (Ч), а с него частотная метка поступает на индикатор.

1.4. Порядок выполнения работы

1.4.1. Соберите лабораторную установку в соответствии со структурной схемой, показанной на рис. 1.2. Разъём детекторной головки соедините коаксиальным кабелем с разъёмом «Падающая» на индикаторе Я2Р-19. Ручками «Начальная частота» и «Полоса» на генераторе установите полосу частот (7,0 ... 12,6) ГГц.

1.4.2. Включите тумблеры «Сеть» генератора и индикатора Я2Р-19.

1.4.3. По шкале подвижного короткозамыкателя установите заданную длину резонатора.

1.4.4. Включите тумблер «Генератор».

1.4.5. По амплитудно-частотной характеристике (АЧХ), наблюдаемой на электронно-лучевой трубке индикатора, определите количество резонансов.

1.4.6. С помощью перемещаемой метки определите значения резонансных частот. Для увеличения точности измерения с помощью ручки «Полоса» уменьшите наблюдаемую полосу частот, а ручкой «Начальная частота» переместите выбранную полосу на нужный участок АЧХ.

1.4.7. Измерьте полосу частот резонатора для двух типов колебаний.

1.4.8. Определить добротности резонатора на этих колебаниях, согласно методике, изложенной в подразделе 1.1.

1.5. Оформление отчета

1.5.1. Сформулируйте задачи исследований.

1.5.2. Кратко изложите методику экспериментального исследования характеристик объемного резонатора.

1.5.3. Приведите результаты расчётного задания.

1.5.4. Приведите результаты измерения резонансных частот и расчёта соответствующих собственных частот типов колебаний, а также добротности резонатора.

1.5.5. Сделайте выводы по результатам исследования резонатора.

1.6. Контрольные вопросы

- 1.6.1. Сформулируйте определение объёмного резонатора.
- 1.6.2. Поясните назначение объёмного резонатора.
- 1.6.3. Перечислите способы возбуждения резонаторов и извлечения энергии из них.
- 1.6.4. Запишите выражения для проекций векторов $\vec{E}$ и $\vec{H}$ в прямоугольном резонаторе.
- 1.6.5. Запишите формулы для определения собственных частот и собственных длин волн колебаний типов H_{mn} и E_{mn} .
- 1.6.6. Приведите простейшие типы колебаний в объёмном резонаторе и запишите выражения для проекций векторов поля, а также формулы для расчета собственных длин волн.
- 1.6.7. Изложите методики теоретического и экспериментального определения добротности резонатора.
- 1.6.8. В чём отличие нагружённой добротности резонатора от собственной?
- 1.6.9. Изложите методику измерения резонансных частот резонатора.

ной линии при различных нагрузках.

- 5.4.9. Определите фазовый сдвиг, вносимый исследуемой нагрузкой.
- 5.4.10. По результатам измерений рассчитайте φ , полное сопротивление нагрузок, нормированное значение сопротивления нагрузок. Запишите выражение для $\dot{\Gamma}$.

5.5. Оформление отчета

- 5.5.1. Сформулируйте цель работы.
- 5.5.2. Изобразите схему лабораторной установки.
- 5.5.3. Приведите результаты расчетного задания.
- 5.5.4. Зарисуйте структуру электрического и магнитного полей волны *ТЕМ* в коаксиальном волноводе.
- 5.5.5. Постройте графики экспериментальных зависимостей распределения поля для всех исследуемых нагрузок.
- 5.5.6. Приведите расчеты ρ , КСВН, КБВ, $\dot{\Gamma}$, $|\dot{\Gamma}|$, φ , Z , Z_n/ρ , R_n/ρ , X_n/ρ .
- 5.5.7. В выводах необходимо отразить следующее:
 - сопоставить результаты теории и эксперимента;
 - выявить причины расхождения теоретических и экспериментальных исследований.

5.6. Контрольные вопросы

- 5.6.1. Охарактеризуйте режимы работы линии передачи (стоячих, бегущих и смешанных волн).
- 5.6.2. Приведите основные соотношения и параметры, характеризующие линии передачи.
- 5.6.3. Каковы особенности волны *ТЕМ* в коаксиальной линии.
- 5.6.4. Устройство и принцип действия различных типов измерительных линий.
- 5.6.5. Как определяется комплексный коэффициент отражения и чему равны его $|\dot{\Gamma}|$ и φ ?
- 5.6.6. Что представляет собой кривая распределения поля вдоль волновода при КСВН = ∞ ?
- 5.6.7. Дайте определения КСВН и КБВ.
- 5.6.8. При каком сопротивлении нагрузки в волноводе устанавливается стоячая волна?
- 5.6.9. Что представляет собой кривая распределения поля при КБВ близким к единице?

мерения по индикатору, и в то же время не перегружающий индикатор при любом положении вдоль линии подвижной каретки измерительной линии. Для регулировки чувствительности индикатора линии имеется потенциометр, расположенный под индикатором.

5.4.6. Снимите распределение напряженности поля вдоль волновода измерительной линии в случае холостого хода (отсутствие нагрузки на конце измерительной линии). Количество отсчетных точек должно быть достаточным, чтобы построить зависимость на графике (приблизительно две полуволны).

Поскольку индикатор обладает существенной инерционностью установления показаний, то при измерении распределения подвижную каретку необходимо перемещать плавно, без рывков. Результаты измерений оформите в виде таблицы 5.1.

Таблица 5.1 — Экспериментальные данные

l , мм							
$k_d E^2$							

5.4.7. Снимите распределение напряженности поля вдоль волновода измерительной линии при подключении 3 нагрузок (короткозамыкателя, согласованной и рассогласованной нагрузок). Результаты оформите в виде таблицы 5.2.

Таблица 5.2 — Экспериментальные данные

Нагрузка						Вывод о типе нагрузки
№ 1 $k_d E^2$						
№ 2 $k_d E^2$						
№ 3 $k_d E^2$						

5.4.8. По результатам измерений рассчитайте КСВН, КБВ и модуль коэффициента отражения $|\Gamma|$ для каждого из режимов работы измеритель-

Лабораторная работа № 2 ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ВОЛНЫ ТИПА H_{10} В ПРЯМОУГОЛЬНОМ ВОЛНОВОДЕ

Цель работы: исследование амплитудного распределения составляющих векторов поля волны типа H_{10} в поперечной плоскости прямоугольного волновода.

2.1. Краткие теоретические сведения о волноводах прямоугольного сечения

2.1.1. Параметры волн в полых волноводах прямоугольного сечения

В полых волноводах прямоугольного сечения распространяются два класса волн H_{mn} и E_{mn} . Класс волны определяется наличием либо отсутствием продольных составляющих поля E_z и H_z . Тип волны, называемой также модой, определяется структурой поля волны данного класса. Он обозначается двумя числовыми индексами m и n , где m — число полуволн, укладываемых вдоль оси Ox на размере широкой стенки волновода (a), а n — число полуволн, укладываемых вдоль оси Oy на размере узкой стенки волновода (b). Во всех типах волн класса H_{mn} — $E_z=0$, а в E_{mn} — $H_z=0$. Каждой комбинации m и n соответствует своя структура поля и свои параметры.

Критическая длина волны любой моды определяется соотношением

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

Критическая частота равна

$$f_{кр}^{mn} = \frac{c}{\lambda_{кр}^{mn}}.$$

Длина волны λ_v в волноводе, фазовая V_ϕ и групповая $V_{гр}$ скорости соответственно равны:

$$\lambda_v = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2}}; \quad V_\phi = \frac{c}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2}}; \quad V_{гр} = c \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2}.$$

Волну, обладающую минимальной критической частотой, называют

основной. Таковой является волна типа H_{10} . Критическая длина волны $\lambda_{кр}^{10} = 2a$. Критическая длина волны ближайшей моды H_{20} равна $\lambda_{кр}^{20} = a$. В диапазоне длин волн $a < \lambda < 2a$ имеет место одномодовый режим работы волновода. Выбор размеров одномодового волновода практически осуществляется при условии $a < \lambda < 1,8a$, так как при

$$\lambda = 2a \quad V_{гр} = 0.$$

Стандартные размеры поперечного сечения $a \times b$ некоторых стандартных типов волноводов приведены ниже:

90 × 45 мм,	72 × 34 мм,	48 × 24 мм,	35 × 15 мм,
23 × 10 мм,	17 × 8 мм,	11 × 5,5 мм,	7,2 × 3,4 мм,
3,6 × 1,8 мм,	1,6 × 0,8 мм.		

1.2. Структура электромагнитного поля прямоугольного волновода

Зависимости составляющих векторов поля от координат в волноводе с идеально проводящими стенками при известных граничных условиях ($E_{\tau} = 0$, $E_n = E_{\max}$, $H_{\tau} = H_{\max}$, $H_n = 0$) определяются по формулам:

$$\begin{aligned} E_x &= E_{x0} \cos(m\pi x / a) \sin(n\pi y / b) e^{-Y_{mn}z}; \\ E_y &= E_{y0} \sin(m\pi x / a) \cos(n\pi y / b) e^{-Y_{mn}z}; \\ E_z &= E_{z0} \sin(m\pi x / a) \sin(n\pi y / b) e^{-Y_{mn}z}; \\ H_x &= H_{x0} \sin(m\pi x / a) \cos(n\pi y / b) e^{-Y_{mn}z}; \\ H_y &= H_{y0} \cos(m\pi x / a) \sin(n\pi y / b) e^{-Y_{mn}z}; \\ H_z &= H_{z0} \cos(m\pi x / a) \cos(n\pi y / b) e^{-Y_{mn}z}, \end{aligned} \quad (2.1)$$

где E_{x0} , E_{y0} , E_{z0} , H_{x0} , H_{y0} , H_{z0} — амплитудные коэффициенты (различны для волн H_{mn} и E_{mn});

Y_{mn} — постоянная распространения.

Как видно из (2.1), при $m = n = 0$ все компоненты векторов, за исключением H_z , обращаются в нуль. Следовательно, числа m и n могут принимать любые значения, равные 0, 1, 2, ..., но они не должны одновременно равняться нулю. Для класса волн H_{mn} — $E_{z0} = 0$. А для волн типа E_{mn} — $H_{z0} = 0$.

отсчетной шкале расстояний и, перемещая зонд в направлении к генератору, отмечают положения следующих узлов, которые отстоят друг от друга на расстоянии, равному $\lambda/2$, как показано на рис. 5.11 (кривая 1). Затем вместо короткозамыкателя включают испытываемую нагрузку, и в линии устанавливается режим смешанных волн. Распределение поля вдоль линии имеет минимумы и максимумы конечных значений; минимумы оказываются сдвинутыми относительно узлов при коротком замыкании (кривая 2).

Зонд устанавливают в положение минимума, ближайшего к ранее определенному узлу, и фиксируют по шкале расстояний отсчет l_n . Разность между этими отсчетами $l_0 = l_n - l_{кз}$, определяет фазовый угол

$$\varphi = 2\beta l_0 = 4\pi l_0 / \lambda. \quad (5.16)$$

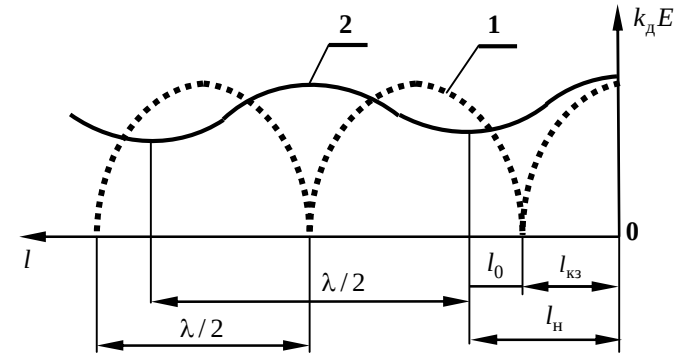


Рис. 5.11 — Распределение поля вдоль линии

5.4. Порядок выполнения работы

5.4.1. Соберите схему, показанную на рис. 5.9. Разъем **ВЫХОД** генератора СВЧ соедините кабелем с входом измерительной линии.

Генератор СВЧ должен быть выключен!

5.4.2. Переключатель рода работы генератора поставьте в положение **НГ** (непрерывная генерация).

5.4.3. Ручкой настройки генератора установите частоту 1000 МГц.

5.4.4. Включите тумблер питания **СЕТЬ**. Готовность генератора СВЧ к работе после кратковременного прогрева сигнализирует включение надписи **АНОД**.

5.4.5. Установите уровень мощности генератора достаточный для из-

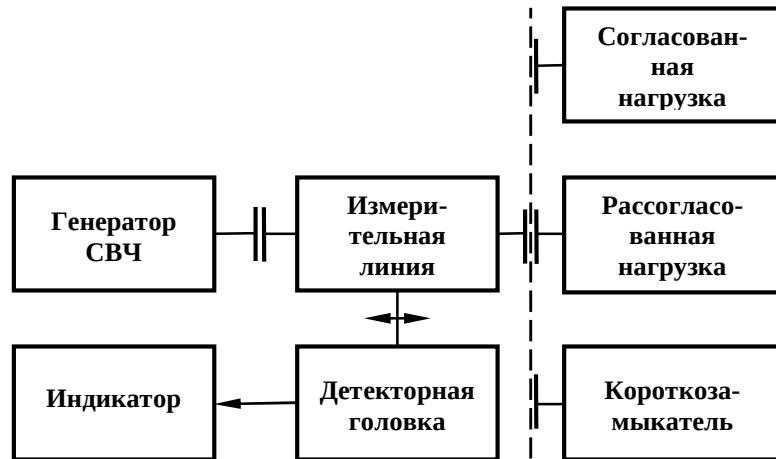
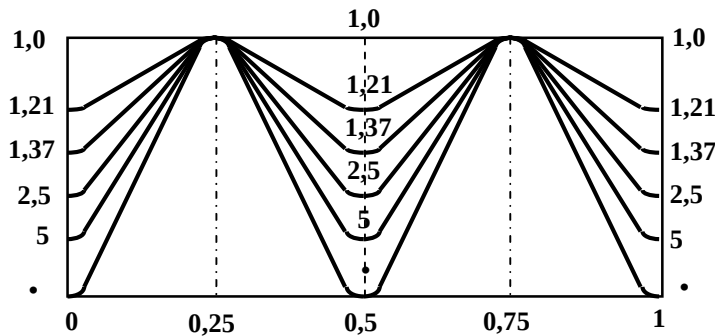


Рис. 5.9 — Схема установки для исследования распределения поля

Рис. 5.10 — Нормированная зависимость модуля амплитудной функции результирующей напряженности от электрической длины βz для различных значений КСВН

Методика определения фазового сдвига, вносимого исследуемой нагрузкой, заключается в следующем. Сначала измерительную линию замыкают накоротко с помощью короткозамыкателя; в линии возникает стоячая волна, и зонд устанавливают в сечении первого узла напряжения вблизи короткозамыкателя. Положение этого сечения $l_{кз}$ фиксируют по

2.1.3. Волна H_{10} в прямоугольном волноводе

Полагая в формулах (2.1) $m=1$ и $n=0$, получим выражения для проекций векторов поля волны типа H_{10} :

$$\begin{aligned} E_x &= 0, & E_z &= 0, & H_y &= 0, \\ E_y &= E_{y0} \sin(m\pi x / a) e^{-i\beta_{10}z}; \\ H_x &= H_{x0} \sin(m\pi x / a) e^{-i\beta_{10}z}; \\ H_z &= H_{z0} \cos(m\pi x / a) e^{-i\beta_{10}z}, \end{aligned} \quad (2.2)$$

где $\beta_{10} = 2\pi / \lambda_{b10}$ — постоянная распространения волны H_{10} .

Если в (2.2) ввести временной множитель $e^{i\omega t}$ и выразить амплитудные коэффициенты E_{y0} и H_{x0} через H_{z0} , то в этом случае получаем:

$$\begin{aligned} E_x &= 0, & E_z &= 0, & H_y &= 0, \\ E_y &= -i(2a / \lambda) Z_0 H_{z0} \sin(m\pi x / a) e^{i(\omega t - \beta_{10}z)}; \\ H_x &= i(2a / \lambda_b) H_{z0} \sin(m\pi x / a) e^{i(\omega t - \beta_{10}z)}; \\ H_z &= H_{z0} \cos(m\pi x / a) e^{i(\omega t - \beta_{10}z)}, \end{aligned} \quad (2.3)$$

где $Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_a}{\epsilon_a}}$ — волновое сопротивление среды, заполняющей волновод.

Для воздушного заполнения $\mu_a = \mu_0$, и $\epsilon_a = \epsilon_0$.

В тригонометрическом виде система уравнений (2.3) принимает вид:

$$\begin{aligned} E_x &= 0, & E_z &= 0, & H_y &= 0, \\ E_y &= (2a / \lambda) Z_0 H_{z0} \sin(m\pi x / a) \sin(\omega t - \beta_{10}z); \\ H_x &= -(2a / \lambda_b) H_{z0} \sin(m\pi x / a) \sin(\omega t - \beta_{10}z); \\ H_z &= H_{z0} \cos(m\pi x / a) \cos(\omega t - \beta_{10}z). \end{aligned} \quad (2.4)$$

Критическая длина волны моды H_{10} определяется соотношением

$$\lambda_{\text{кр}H_{10}} = 2a ,$$

критическая частота —

$$f_{\text{кр}H_{10}} = \frac{c}{\lambda_{\text{кр}H_{10}}} .$$

Длина волны $\lambda_{\text{в}}$ в волноводе, фазовая $V_{\text{ф}}$ и групповая $V_{\text{гр}}$ скорости соответственно равны:

$$\lambda_{\text{в}H_{10}} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}} ; \quad V_{\text{ф}} = \frac{c}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}} ; \quad V_{\text{гр}} = c \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2} .$$

2.2. Расчётное задание

2.2.1. Определите сечение волновода и координаты x_0 и z_1 емкостного зонда коаксиально-волноводного перехода для заданной средней частоты $f_{\text{ср}}$.

2.2.2. Найдите поперечные координаты продольных плоскостей, в которых будет круговая поляризация магнитного поля.

2.2.3. Рассчитайте длину волны в полном металлическом волноводе, фазовую и групповую скорости при $f = f_{\text{ср}}$, $f = f_{\text{max}}$, $f = f_{\text{min}}$, если диапазон длин волн равен

$$\lambda_{\text{min}} = a < \lambda < 1,8a = \lambda_{\text{max}} .$$

2.3. Описание лабораторией установки

Схема установки, предназначенной для исследования электромагнитного поля волновода, приведена на рис. 3.1.

СВЧ колебания с генератора поступают в коаксиально-волноводный переход (КВП), представляющий собой закороченный с одной стороны отрезок волновода с емкостным зондом, который возбуждает в волноводе электромагнитную волну. Последняя распространяется через волноводную секцию к согласованной нагрузке, выполненную в виде отрезка волновода, внутри которого находится клинообразный поглотитель электромагнитной энергии. В секции волновода практически имеет место режим бегущей волны.

Для измерения распределения составляющих векторов поля E и H волны типа H_{10} используются детекторные головки с емкостным и индуктивными элементами связи, схемы конструкций которых показаны на рис. 2.2.

произвольном сечении запишется следующим образом

$$U = U_{\text{п}} + U_{\text{о}} = U_{\text{по}} e^{-\gamma z} + U_{\text{оо}} e^{\gamma z} . \quad (5.13)$$

Здесь $U_{\text{по}}$ и $U_{\text{оо}}$ — амплитуды падающей и отраженной волн в опорной плоскости $Z_0 = 0$.

При отсутствии потерь в волноводе $\gamma = i\beta$, где β — фазовая постоянная или волновое число. При этом получаем

$$U = U_{\text{по}} e^{-i\beta \gamma} + U_{\text{оо}} e^{i\beta \gamma} . \quad (5.14)$$

Физически это значит, что в общем случае в произвольном сечении волновода наблюдается прямая волна, обусловленная энергией, распространяющейся от СВЧ генератора к нагрузке и отраженная волна, переносящая часть энергии, которая не поглотилась нагрузкой и возвращается к источнику. Видно, что с изменением координаты фазы падающей и отраженной волн изменяются противоположным образом. В случае квадратичного режима детектирования можно записать, что

$$\frac{U_{\text{max}}}{U_{\text{min}}} = \frac{k_{\text{д}} |E_{\text{max}}|^2}{k_{\text{д}} |E_{\text{min}}|^2} = \text{КСВН}^2 \quad \text{т.е.} \quad \text{КСВН} = \sqrt{\frac{U_{\text{max}}}{U_{\text{min}}}} , \quad (5.15)$$

где $k_{\text{д}}$ — коэффициент преобразования детектора.

На рис. 5.10 изображено семейство кривых, описывающих зависимость модуля амплитудной функции результирующей напряженности электрического поля волны, отнесенной к ее максимальному значению, от электрической длины βz для различных значений КСВН. При этом фаза ККО принята одинаковой для всех нагрузок.

При КСВН = ∞ кривая принимает вид так называемой коммутируемой синусоиды. Из рис. 5.10 видно, что минимум кривых, особенно для больших значений КСВН, выражен более отчетливо, чем максимум, поэтому его положение может быть определено более точно, чем положение максимума. С уменьшением КСВН минимум становится менее остроко-нечным, оставаясь все же более узким, чем максимум. Лишь для малых значений КСВН, близких к единице, кривая приближается к синусоиде.

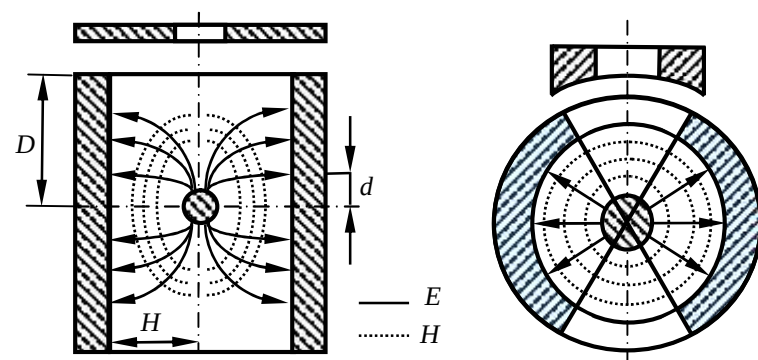


Рис. 5.8 — Распределение поля в ИЛ с параллельными пластинами

5.2. Расчетное задание

5.2.1. Рассчитайте волновое сопротивление коаксиальной линии, зная, что $D = 7$ мм, а $d = 3$ мм.

5.2.2. Зарисуйте структуру электрического и магнитного полей коаксиальной линии при распространении в ней колебания типа *TEM*.

5.2.3. Рассчитайте параметры $|\Gamma|$, КСВН, КБВ для различных сопротивлений Z_H и наоборот.

5.3. Описание лабораторной установки

Схема установки, предназначенной для исследования распределения поля вдоль коаксиального волновода, изображена на рис. 5.9.

СВЧ колебания с генератора через измерительную линию поступают к исследуемой нагрузке. Отраженная волна интерферирует с падающей волной. Анализ распределения поля осуществляется с помощью измерительной линии, принцип работы которой описан в первом разделе. В лабораторной работе рассматриваются основные соотношения амплитудных функций и их связь с картиной распределения электромагнитного поля вдоль волновода.

Для исследования распределения поля необходимо выбрать плоскость начала отсчета, которая обычно совпадает с сечением, проходящим через конец волновода, ближайший к исследуемой нагрузке. В этом случае отсчет расстояний производится в направлении от нагрузки к источнику СВЧ колебаний. Амплитудная функция результирующего поля в

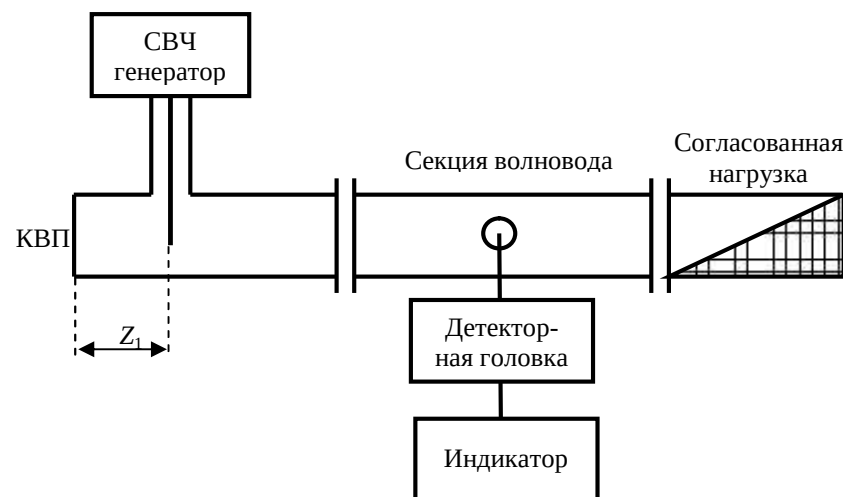


Рис. 2.1 — Схема установки для исследования электромагнитного поля в прямоугольном волноводе

Детекторная головка размещена в диэлектрической трубке и включает в себя: зонд (емкостной, рис. 2.2, а или индуктивный, рис. 2.2, б), СВЧ диод с барьером Шотки и конструктивную емкость. Емкостной зонд через небольшую индуктивность соединен с экраном проводника (рис. 2.2, а). Диэлектрическая трубка с детекторной головкой вставляется в отверстия, выполненные в узких стенках волновода, и может перемещаться в поперечной плоскости. Ток детектора индицируется индикаторным прибором.

Примечание:

- сечение прямоугольного волновода — 72×34 мм;
- диаметр трубки — 8 мм;
- толщина стенки — 1 мм;
- диаметр экранирующего провода — минимальный.

Детекторная головка с емкостным зондом применяется для исследования составляющей E_y .

Детекторная головка с индуктивным элементом связи применяется как для исследования составляющей H_z (плоскость рамки перпендикулярна оси Oz), так и для — H_x (плоскость рамки перпендикулярна оси Ox).

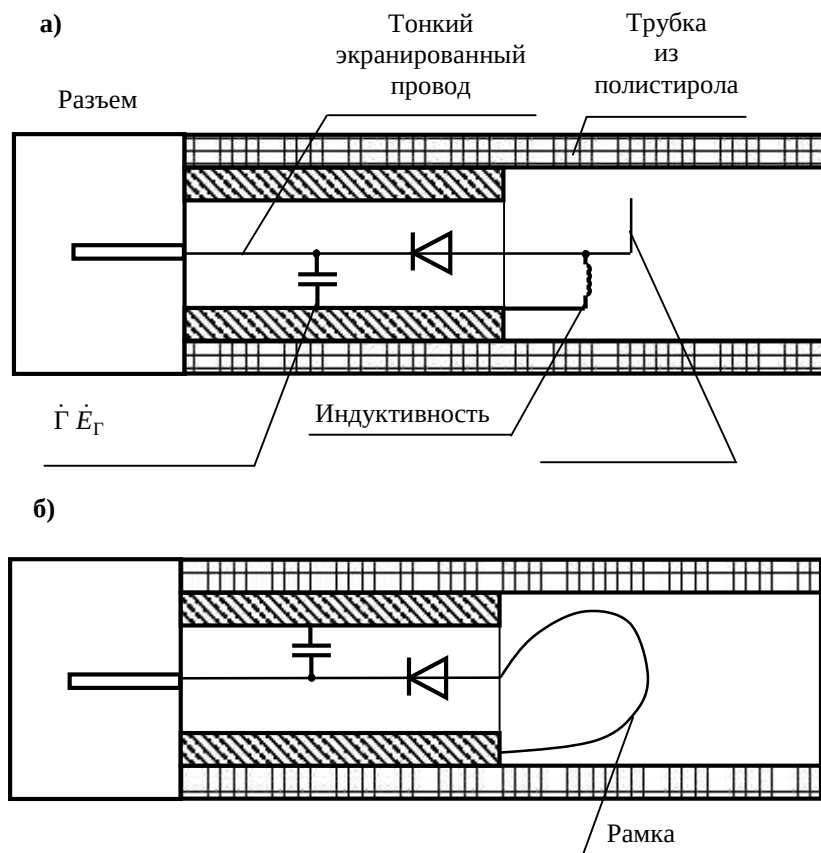


Рис. 2.2 — Схемы конструкций детекторных головок

2.4. Порядок выполнения работы

2.4.1. Соберите схему лабораторной установки в соответствии с рис. 3.1.

2.4.2. Включите генератор и индикатор в соответствие с их инструкциями по эксплуатации. Установите рабочую частоту, указанную преподавателем.

2.4.3. Перемещая детекторную головку в волноводе, исследуйте зависимость амплитуд составляющих векторов поля E_y , H_x , H_z от координаты x в пределах $0 \leq x \leq a$. Достаточно измерить амплитуды в пяти точках: $x = 0$,

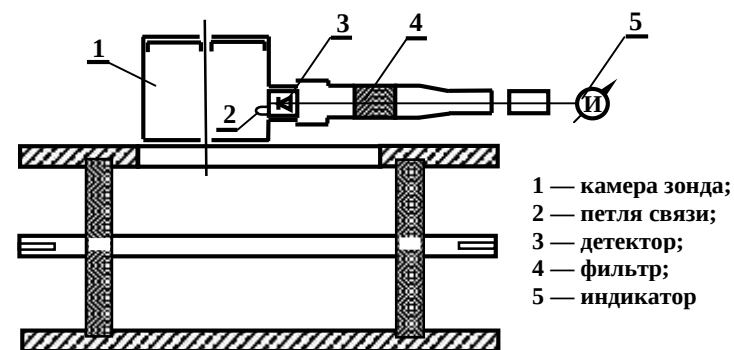


Рис. 5.6 — Измерительная линия с ручным перемещением зонда

ИЛ с параллельными пластинами (рис. 5.7), используемая в ЛР, позволяет значительно уменьшить влияние изменения глубины погружения зонда связи при движении каретки, а также ослабить излучение через щель. Ширина эквивалентной щели зависит от высоты пластин и расстояния между ними

$$\Delta = \frac{2}{\text{sh}(\pi D/2A)}, \quad (5.12)$$

где Δ — ширина щели в коаксиальной линии, выраженная в радианах; D и d — размеры, показанные на рис. 5.8, а.

Рассмотрим распределение поля в такой линии. Как видно из рис. 5.8, для данной линии имеет место более медленное изменение интенсивности поля в области щели, где располагается индикаторная головка, чем в коаксиальной линии. Таким образом, небольшие радиальные перемещения индикаторной головки вызывают значительно меньшие изменения результирующего напряжения в головке.

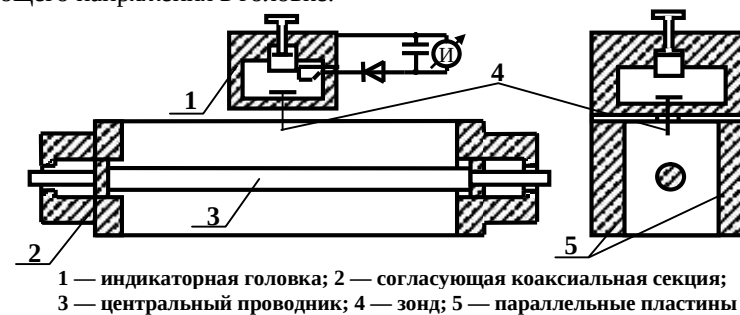


Рис. 5.7 — Конструкция ИЛ с параллельными пластинами

поля внутри передающей линии. В качестве измерительной линии используются коаксиальные, волноводные и полосковые линии.

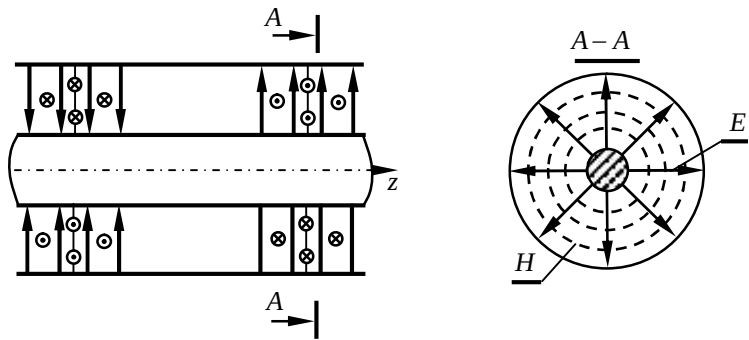


Рис. 5.5 — Структура электромагнитного волны типа *TEM* в коаксиальной линии

Измерительная линия имеет продольную щель, вдоль которой перемещается измерительная головка с зондом и детектором, подключенным к прибору постоянного тока. Зонд связан с детектором, выпрямленный ток которого находится в определенном соотношении с величиной наводимой ЭДС, зависящей от напряженности электрического поля и от глубины погружения зонда. Поэтому при измерении распределения поля зонд должен перемещаться со строго постоянной глубиной погружения. Перемещение зонда позволяет определить максимум и минимум амплитуды электрической напряженности. При измерениях с такой линией предполагается, что она однородна и зонд не влияет на распределение электрического поля в линии.

ИЛ с ручным перемещением зонда (рис. 5.6) состоит из отрезка коаксиальной линии, зонда связи, настраивающегося колебательного контура и связанного с ним детектора и индикаторного устройства. Индикаторное устройство содержит зонд, коаксиальный контур, кристаллический детектор, фильтр и другие элементы, необходимые для закрепления и перемещения индикаторной головки.

Глубину погружения зонда линии регулируют специальным винтом, расположенным сверху индикаторной головки. Настройка контура выполнена в виде перемещающегося плунжера. Связь детектора с контуром индуктивная — с помощью петли. Фильтр, расположенный между детектором и индикатором, представляет собой отрезок коаксиальной линии, заполненный магнетиком, и служит для предотвращения высокочастотных наводок от внешних полей на цепь детектора.

$x = a / 4, x = a / 2, x = 3a / 4, x = a$. Для исследования каждой составляющей используется соответствующая детекторная головка, которая вставляется в отверстия, расположенные на узких стенках волновода.

2.4.4. Результаты измерений оформите в виде таблицы 2.1.

Таблица 2.1 — Результаты экспериментальных исследований

Координата x	0	$a / 4$	$a / 2$	$3a / 4$	a
E_y					
H_x					
H_z					

2.5. Оформление отчета

- 2.5.1. Сформулируйте задачи исследований.
- 2.5.2. Кратко изложите результаты проведенного эксперимента.
- 2.5.3. Постройте графики зависимостей составляющих амплитуд векторов поля от координаты x и проанализируйте их.
- 2.5.4. Приведите результаты расчетного задания.
- 2.5.5. Сделайте выводы по проделанной работе.

2.6. Контрольные вопросы

- 2.6.1. Как определяются классы волн и их типы?
- 2.6.2. Перечислите способы возбуждения волноводов.
- 2.6.3. Используя граничные условия на поверхности идеального проводника, запишите уравнения для составляющих векторов поля.
- 2.6.4. Запишите и объясните условие одномодового режима работы волновода на волне типа H_{10} .
- 2.6.5. Запишите формулы для определения основных параметров волн в прямоугольном волноводе.
- 2.6.6. Какие условия необходимо выполнить, чтобы две линейно-поляризованные волны в сумме образовали волну с круговой поляризацией.
- 2.6.7. Изложите методику экспериментального исследования зависимостей составляющих векторов поля от координаты x .
- 2.6.8. Объясните схему конструктивного выполнения детекторных головок.

Лабораторная работа № 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНОВОДНОГО ОТВЕТВИТЕЛЯ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Цель работы: изучение методов построения волноводных ответвителей круговой поляризации для поляризационных измерителей КСВН и фазы коэффициента отражения. Исследование частных случаев вращающейся поляризации электромагнитных волн: круговой, линейной и эллиптической.

3.1. Краткие теоретические сведения

3.1.1. Поляризация электромагнитных волн

Электромагнитное поле с векторами $\vec{E}$ и $\vec{H}$, направление которых может быть определено в любой момент времени, называется **поляризованным**. Если же направление вектора $\vec{E}$, и соответственно вектора $\vec{H}$, изменяется в пространстве случайным образом, поле будет **неполяризованным**.

Простейшим примером поляризованного электромагнитного поля является поле плоской волны (волна, у которой векторы $\vec{E}$ и $\vec{H}$ являются функциями времени и только одной пространственной координаты). Плоскость, проходящая через направление распространения этой волны и вектор $\vec{E}$, называется **плоскостью поляризации**.

Если положение плоскости поляризации относительно некоторой неподвижной системы координат остается неизменным, плоская волна будет иметь **линейную** поляризацию. В этом случае вектор $\vec{E}$ всегда оказывается параллельным некоторой фиксированной оси, например, оси x прямоугольной системы координат.

Пусть вдоль оси z распространяются две плоские волны с взаимно перпендикулярными векторами электрического поля

$$\vec{E}_1 = \vec{i}_x E_1 \cos(\omega t - \beta z) \quad \text{и} \quad \vec{E}_2 = \vec{i}_y E_2 \cos(\omega t - \beta z - \varphi), \quad (3.1)$$

где φ — угол фазового сдвига между волнами;

β — фазовая постоянная;

ω — круговая частота.

Совокупность этих волн можно рассматривать как одну плоскую волну с более сложной поляризационной структурой.

Из выражений (3.1) видно, что вектор напряженности электрического поля $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$ суммарной волны имеет две проекции E_x и E_y , причем в плоскости $z = 0$ (см. рис. 3.1)

$\lambda_{\text{в}}$ — длина волны в волноводе.

Волновое сопротивление свободного пространства определяется выражением

$$\sqrt{\mu_0/\epsilon_0} = 120\pi, \text{ Ом} \approx 377 \text{ Ом}, \quad (5.11)$$

где $\epsilon_0 = 1/36\pi \text{ нФ/м} = 8,85 \text{ нФ/м}$ — абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума;

$\mu_0 = 0,4\pi \text{ мкГн/м} = 1,26 \text{ мкГн/м}$ — абсолютная магнитная проницаемость вакуума.

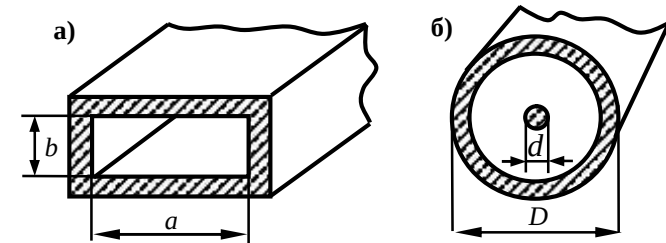


Рис. 5.4 — Прямоугольный волновод (а) и коаксиальная линия (б)

5.1.3. Волна TEM в коаксиальном волноводе

Силовые линии магнитного поля поперечной волны TEM в пространстве между цилиндрами представляют собой концентрические окружности. Структура электромагнитного поля волны TEM изображена на рис. 5.5.

Коаксиальная линия является направляющей системой закрытого типа, состоящей из изолированных друг от друга металлических проводников (рис. 5.4, б). В направляющих системах такого типа возможно существование волн TEM, E и H. Поскольку у волны TEM $f_{\text{кр}} = 0$, то эта волна является низшим типом волны в коаксиальной линии.

Фазовая скорость и скорость переноса энергии у волны TEM в коаксиальной линии, как у любой волны TEM, равны скорости света в среде, заполняющей пространство между внутренним и внешним проводниками.

5.1.4. Конструкции и принцип работы измерительной линии

Измерительными линиями (ИЛ) называются приборы для измерения КСВН, $Z_{\text{н}}$, $|\Gamma|$, потерь в фидерах и волноводах, длины волны λ и добротности Q колебательной цепи, основанные на определении распределения

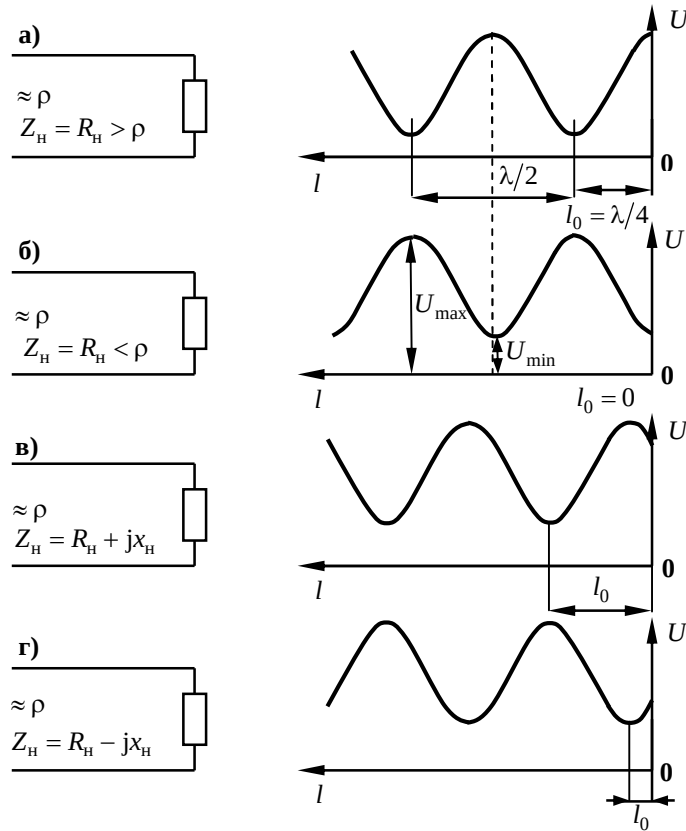


Рисунок 5.3 — Распределение напряжения вдоль линии передачи в режиме смешанных волн

Волновое сопротивление коаксиальной линии (рис. 5.4, б) определяется по формуле

$$\rho = 138 \sqrt{\frac{\mu_a}{\varepsilon_a}} \lg \frac{D}{d}, \text{ Ом}, \quad (5.9)$$

а для прямоугольного волновода (рисунок 5.4, а) для колебания H_{10}

$$\rho = 120\pi \frac{\lambda_B}{\lambda}, \text{ Ом}, \quad (5.10)$$

где ε_a и μ_a — абсолютная диэлектрическая и магнитная проницаемости среды, заполняющей коаксиальную линию, соответственно;

$$E_x = E_1 \cos \omega t \quad \text{и} \quad E_y = E_2 (\cos \omega t - \varphi). \quad (3.2)$$

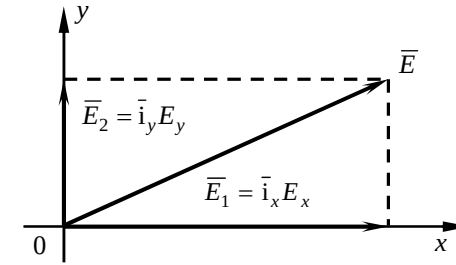


Рис. 3.1 — Вектор напряженности электрического поля суммарной волны в плоскости $z = 0$

Выясним, как ведет себя этот вектор $\vec{E}$ во времени. Учитывая, что $E_x/E_1 = \cos \omega t$ и $E_y/E_2 = \cos \omega t \cos \varphi + \sin \omega t \sin \varphi$ можем получить соотношение

$$\frac{E_x^2}{E_1^2} + \frac{E_y^2}{E_2^2} - 2 \frac{E_x E_y}{E_1 E_2} \cos \varphi = \sin^2 \varphi. \quad (3.3)$$

Полученное равенство представляет собой уравнение эллипса, повернутого относительно координат x и y на некоторый угол (рис. 3.2). Этот эллипс является геометрическим местом точек, в которых находится конец вектора $\vec{E}$ в различные моменты времени. Иными словами, эллипс (3.3) есть годограф вектора $\vec{E}$ в плоскости $z = 0$ (или $z = \text{const}$).

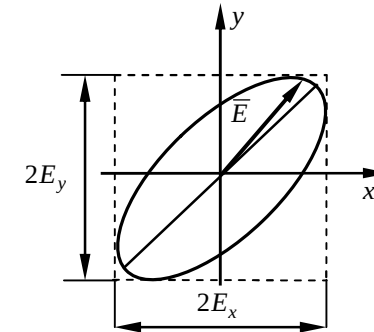


Рис. 3.2 — Годограф вектора напряженности электрического поля за период колебания

Таким образом, вектор $\vec{E}$ вращается в плоскости $z = \text{const}$, совершая полный оборот за период $T = 2\pi/\omega$. При этом соответственно меняется и его длина.

Аналогичный вывод можно сделать о векторе $\vec{H}$, так как он в любой момент времени перпендикулярен вектору $\vec{E}$.

Электромагнитная волна подобного типа носит наименование волны с **эллиптической поляризацией** или **эллиптически поляризованной волны**, а эллипс, описываемый концом вектора $\vec{E}$, называется **эллипсом поляризации**. Плоскость поляризации такой волны непрерывно вращается в пространстве, причем направление вращения зависит от знака угла φ .

Различают волны с правым и левым направлениями вращения. В первом случае плоскость поляризации и векторы поля относительно наблюдателя, смотрящего по направлению распространения волны, вращаются по часовой стрелке, а во втором — в обратном направлении.

Рассмотрим возможные частные случаи поляризации плоской волны, вытекающие из выражения (3.3).

Случай 1. Пусть фазовый сдвиг $\varphi = 0$. Соотношение (3.3) принимает вид

$$\frac{E_x}{E_1} - \frac{E_y}{E_2} = 0, \quad (3.4)$$

откуда следует, что $E_y = \frac{E_2}{E_1} E_x$, при $-E_1 \leq E_x \leq E_1$.

Последнее выражение представляет собой уравнение отрезка прямой (рис. 3.3, а). Стало быть, при $\varphi = 0$ эллиптически поляризованная волна превращается в волну линейно поляризованную. Угол наклона плоскости поляризации такой волны к оси x , как вытекает из (3.4), равен

$$\psi = \arctg\left(\frac{E_2}{E_1}\right).$$

Если фазовый сдвиг $\varphi = \pm\pi$, то волна вновь будет иметь **линейную поляризацию**, потому что из (3.3) имеем

$$E_y = -\frac{E_2}{E_1} E_x. \quad (3.5)$$

Теперь плоскость поляризации имеет уже противоположный по знаку угол наклона, (рис. 3.3, б)

$$\psi = -\arctg\left(\frac{E_2}{E_1}\right).$$

характер полного сопротивления нагрузки Z_H , и вычислить его значение по формуле

$$\dot{Z}_H = R_H + jX_H = \rho \frac{KCBH - 0,5j(KCBH - 1)\sin 2\beta l_0}{KCBH^2 \cos^2 \beta l_0 + \sin^2 \beta l_0}. \quad (5.6)$$

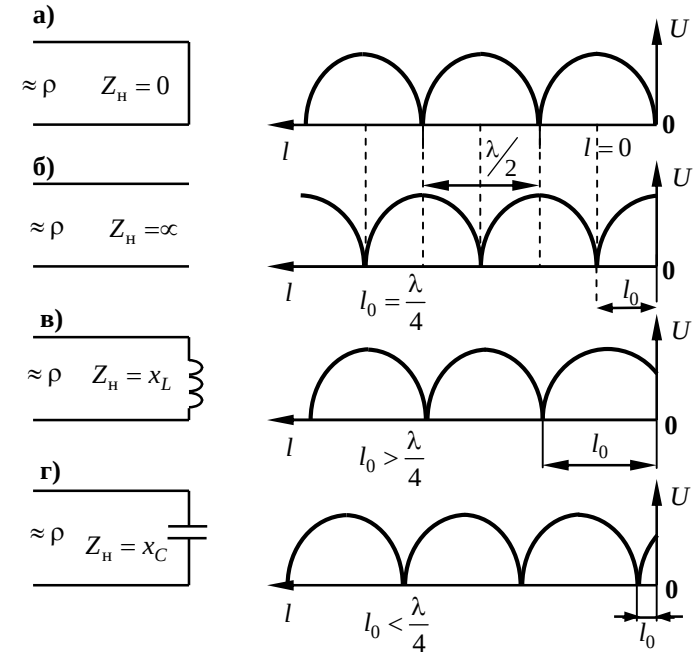


Рис. 5.2 — Распределение напряжения в линии передачи в режиме стоячей волны

Подставляя вместо значения КСВН коэффициент бегущей волны, получаем

$$\dot{Z}_H = \rho \frac{2КБВ - j(1 - КБВ^2)\sin 2\beta l_0}{1 + КБВ^2 + (1 - КБВ^2)\sin^2 2\beta l_0}. \quad (5.7)$$

Выражения (5.6) и (5.7) равноценны по точности результатов и трудоемкости вычислений. Часто пользуются нормированным значением сопротивления нагрузки

$$\frac{\dot{Z}_H}{\rho} = \frac{R_H}{\rho} + j \frac{X_H}{\rho}. \quad (5.8)$$

падающей, а фаза отраженной волны противоположна фазе падающей, вследствие чего напряжение и ток в любом сечении линии различны и принимают значения от нуля (узел напряжения), до некоторого максимума (пучность напряжения). В месте короткого замыкания образуется первый узел напряжения; затем узлы повторяются по длине линии в направлении к генератору через расстояния $l = \lambda/2$. Первая пучность возникает в сечении $l = \lambda/4$ и повторяется через $l = \lambda/2$. При разомкнутой линии (рис. 5.2, б) картина аналогична предыдущей, с тем отличием, что в конце линии образуется пучность напряжения, а первый узел возникает в сечении $l_0 = \lambda/4$.

Если линия нагружена чисто реактивным сопротивлением, то при индуктивной нагрузке первый узел напряжения устанавливается на расстоянии $l_0 \geq \lambda/4$ от места включения нагрузки, а при емкостной — на расстоянии $l_0 < \lambda/4$ (рис. 5.2, в, г). В режиме стоячей волны:

$$|\dot{\Gamma}| = 1; \quad \text{КСВН} = \infty; \quad \text{КБВ} = 0.$$

Режим смешанных волн устанавливается при нагрузке линии активным сопротивлением, не равным волновому сопротивлению линии, или произвольным комплексным сопротивлением. В этом режиме амплитуда падающей волны больше амплитуды отраженной, энергия переносится в сторону нагрузки и часть энергии в ней поглощается. В линии устанавливается распределение напряжения, показанное на рис. 5.3 для различных нагрузок. Расстояние l_0 от нагрузки до первого минимума напряжения в этом режиме зависит от характера и значения нагрузки. В режиме смешанных волн коэффициент отражения и коэффициенты стоячей и бегущей волн могут принимать любые значения в следующих пределах:

$$0 < |\dot{\Gamma}| < 1; \quad 1 < \text{КСВН} < \infty; \quad 0 < \text{КБВ} < 1.$$

5.1.2 Основные параметры и их зависимость

Взаимосвязь комплексного коэффициента отражения $\dot{\Gamma}$, коэффициента стоячей волны КСВН и коэффициента бегущей волны КБВ рассмотрены в подразделе 5.1.1 выражения (5.1) ... (5.4).

Коэффициент отражения удобно выразить через волновое сопротивление линии ρ и сопротивление нагрузки Z_n как

$$\dot{\Gamma} = \frac{Z_n - \rho}{Z_n + \rho}. \quad (5.5)$$

По виду распределения напряжения вдоль линии можно определить

Совершенно ясно, что волну с линейной поляризацией можно рассматривать как предельный случай эллиптически поляризованной волны, когда малая полуось равна нулю.

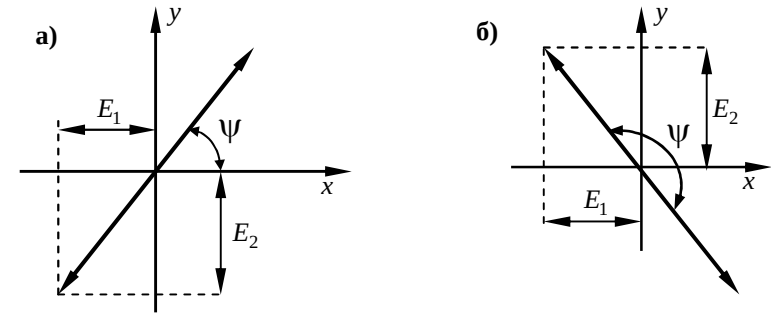


Рис. 3.3 — К определению линейно-поляризованной волны

Случай 2. Предположим далее, $\varphi = \pm \pi/2$, а $E_1 = E_2 = E$. При таких условиях уравнение (3.3) превращается в уравнение окружности

$$E_x^2 + E_y^2 = E^2, \quad (3.6)$$

и, стало быть, годографом вектора $\vec{E}$ в плоскости $z = 0$ становится окружность. На рис. 3.3, а и 3.3, б изображены графики уравнения (3.6), и указаны направления вращения вектора $\vec{E}$ при $\varphi = \pi/2$ и $\varphi = -\pi/2$. Электромагнитная волна, характеризуемая уравнением (6.6) называется волной с **круговой поляризацией**. При движении этой волны вдоль оси z концы векторов $\vec{E}$ и $\vec{H}$ описывают в пространстве винтовые линии с шагом, равным длине волны (рис. 3.4).

Случай 3. Если фазовый угол φ , как и в предыдущем случае, равен $\pm \pi/2$ а $E_1 \neq E_2$, то уравнение (3.3) принимает вид

$$\frac{E_x^2}{E_1^2} + \frac{E_y^2}{E_2^2} = 1. \quad (3.7)$$

Таким образом, снова получается уравнение эллипса. Только оси его теперь уже совпадают с осями прямоугольной системы координат.

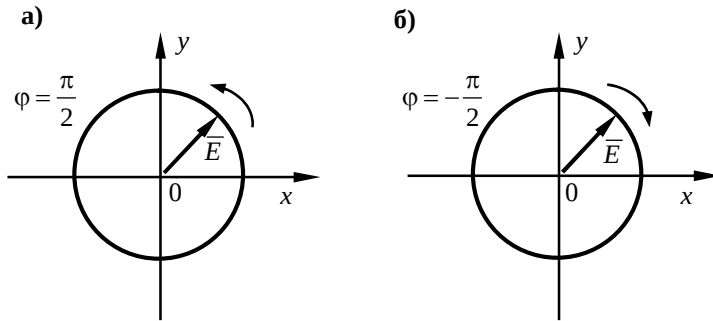


Рис. 3.4 — К определению волны с круговой поляризацией

Эллиптическую и круговую поляризацию часто называют **вращающейся поляризацией**. Очевидно, что волну с вращающейся поляризацией можно представить в виде совокупности двух линейно-поляризованных волн, векторы $\vec{E}$ или $\vec{H}$ которых взаимно ортогональны.

3.1.2. Устройство и принцип работы ответвителя круговой (вращающейся) поляризации

Ответвитель круговой поляризации (ОКП) представляет собой отрезок прямоугольного волновода, на широкой стенке которого установлен торцом отрезок круглого волновода. Элементами связи прямоугольного волновода ОКП с круглым являются две разнесенные наклонные щели, прорезанные в их общей стенке (рис. 3.5). Каждая из щелей возбуждает в круглом волноводе волну с линейной поляризацией, вектор $\vec{E}$ которой перпендикулярен оси щели. В совокупности они возбуждают волну круговой поляризации при выполнении трех условий:

- равенстве амплитуд линейно-поляризованных волн;
- ортогональности их векторов $\vec{E}$ (и $\vec{H}$);
- 90°-ном фазовом сдвиге между ответвляемыми сигналами.

Указанное будет достигнуто, если щели будут одинаковыми, взаимно перпендикулярными и их центры смещены относительно узкой стенки и разнесены вдоль волновода на определенные расстояния x_0 и z_0 в соответствии с соотношением

$$\varphi = \frac{2\pi z_0}{\lambda_b} + 2\arctg \left(\frac{\lambda_b}{2a} \frac{\tg \alpha}{\tg \frac{\pi x_0}{a}} \right), \quad (3.8)$$

$U_{\min} = U_n - U_o$. Коэффициент стоячей волны по напряжению определяется соотношением

$$КСВН = \frac{U_{\max}}{U_{\min}} = \frac{U_n + U_o}{U_n - U_o} = \frac{1 + |\dot{\Gamma}|}{1 - |\dot{\Gamma}|} \quad (5.2)$$

или

$$|\dot{\Gamma}| = \frac{КСВН - 1}{КСВН + 1}. \quad (5.3)$$

Коэффициент бегущей волны

$$КБВ = \frac{1}{КСВН} = \frac{U_{\min}}{U_{\max}} = \frac{1 - |\dot{\Gamma}|}{1 + |\dot{\Gamma}|}. \quad (5.4)$$

В зависимости от характера назначения нагрузки в линии устанавливается один из трех режимов: бегущей волны, стоячей волны или смешанных волн. Здесь и дальше полагаем, что в начале линии включен генератор синусоидального напряжения с выходным сопротивлением $Z_{\text{вых}}$, равным волновому сопротивлению ρ .

Режим бегущей волны устанавливается при нагрузке линии активным сопротивлением, равным ее волновому $Z_n = R_n = \rho$, то есть когда осуществлено полное согласование. В этом режиме по линии распространяется поток энергии падающей волны, поглощаемый нагрузкой, отраженной волны нет. Напряжение и ток во всех сечениях линии изменяются по синусоидальному закону, и их амплитуды вдоль линии одинаковы (рис. 5.1). В режиме бегущей волны $|\dot{\Gamma}_0| = 0$; $КСВН = КБВ = 1$.

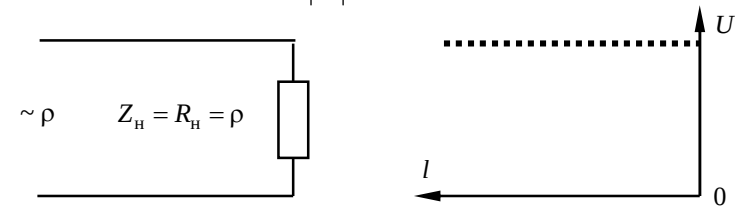


Рис. 5.1 — Распределение напряжения вдоль линии передачи в режиме бегущей волны

Режим стоячей волны устанавливается при коротком замыкании линии ($Z_n = 0$), при разомкнутой линии ($Z_n = \infty$), при нагрузке линии реактивным сопротивлением x_L или x_C . При коротком замыкании линии (рис. 5.2, а) амплитуда отраженной волны напряжения равна амплитуде

Лабораторная работа № 5 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЯМЫХ И ОТРАЖЕННЫХ ВОЛН В РЕГУЛЯРНЫХ ВОЛНОВОДАХ

Цель работы: изучение принципа работы измерительной линии и исследование распределения поля вдоль коаксиального волновода при различных соотношениях амплитуд падающей и отраженной волн.

5.1. Краткие теоретические сведения

5.1.1. Параметры и режимы работы линии передачи

Для передачи высокочастотной энергии электромагнитной волны на небольшие расстояния применяются тракты с распределёнными постоянными — коаксиальные и волноводные линии.

Линия передачи конечной длины, нагруженная на сопротивление Z_n , характеризуется комплексным коэффициентом отражения (ККО) $\dot{\Gamma}$, коэффициентом стоячей волны по напряжению КСВН и коэффициентом бегущей волны КБВ. Эти понятия вытекают из представления процесса распространения энергии от генератора к нагрузке в виде двух бегущих волн напряжения, движущихся в противоположных направлениях с одинаковой скоростью. Волну, движущуюся от генератора к нагрузке, называют падающей U_n , волну, движущуюся от нагрузки к генератору, — отраженной U_o .

$$\dot{\Gamma} = \frac{|U_o|e^{j\varphi_o}e^{-i\beta z}}{|U_n|e^{j\varphi_n}e^{i\beta z}} = |\dot{\Gamma}|e^{j(\varphi' - 2\beta z)} = |\dot{\Gamma}|e^{j\varphi}, \quad (5.1)$$

где $|\dot{\Gamma}| = |U_o|/|U_n|$ — модуль ККО в сечении $z_0 = 0$; $\varphi' = \varphi_o - \varphi_n$ — фазовый угол ККО в сечении $z_0 = 0$; $\varphi = \varphi' - 2\beta l_0$ — фазовый угол ККО в сечении с координатой z ; φ_n , φ_o — фазы падающей и отраженной волн соответственно; l_0 — расстояние от конца линии до первого минимума напряжения в сечении линии по направлению к генератору; $\beta = \omega/V_\phi = 2\pi f/V_\phi = 2\pi/\lambda$ — коэффициент фазы (волновое число).

Вследствие противоположных направлений распространения падающей и отраженной волн и изменения фазового сдвига между ними вдоль линии устанавливается некоторое распределение напряжения (тока), максимальные и минимальные значения которого $U_{\max} = U_n + U_o$ и

где λ_v — длина волны в волноводе.

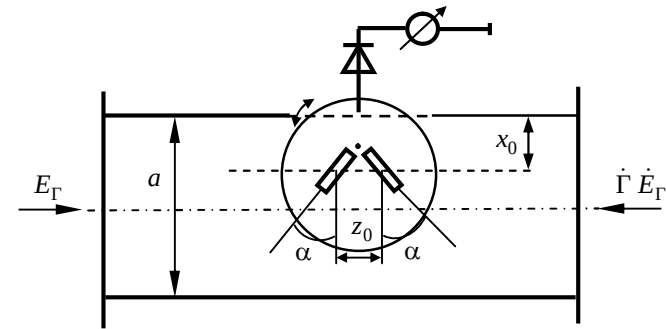


Рис. 3.5 — Расположение элементов связи

На средней длине волны $\varphi = 90^\circ$, на других частотах рабочего диапазона фазовый сдвиг незначительно отличается от 90° .

Волна, отраженная от нагрузки, в круглом волноводе также будет иметь круговую поляризацию, но с противоположным направлением вращения вектора $\vec{E}$. Сложение двух волн с круговой поляризацией и разными направлениями вращения создает волну с эллиптической поляризацией, частным случаем которой является линейная поляризация в случае равенства амплитуд падающей и отраженной волн при короткозамыкающей нагрузке. Для создания эллиптически поляризованной волны в круглом волноводе можно использовать в качестве нагрузки сочленение емкостной диафрагмы (рис. 3.6) с согласованной нагрузкой.

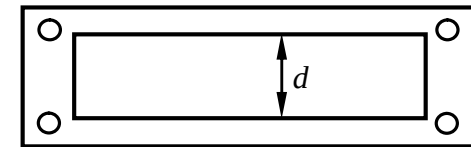


Рис. 6.6 — Емкостная диафрагма

Согласованная нагрузка состоит из волновода, в котором расположен клин из поглощающего материала. Форма клина, состав материала и допуски на изготовление волноводного канала обеспечивают коэффициент стоячей волны согласованной нагрузки порядка 1,03. Емкостная диаграмма представляет собой бронзовую пластинку с окном, широкая сторона которого равна размеру волновода. Размер узкой стороны окна диа-

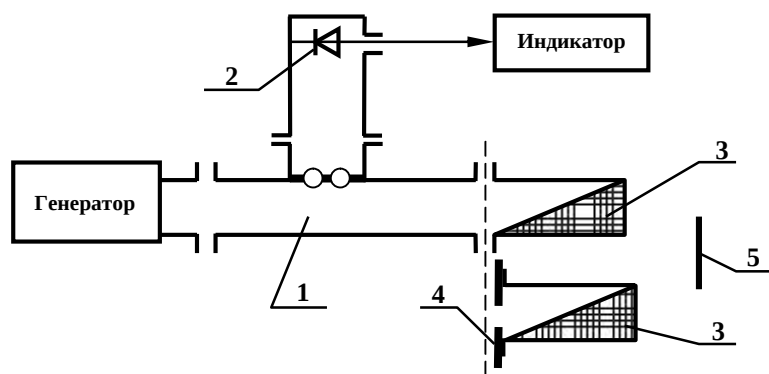
фрагмы и ее толщина определяют значение КСВН и фазы коэффициента отражения. Коэффициент стоячей волны и фаза нагрузки изменяются с изменением частоты.

3.2. Расчетное задание

Рассчитайте значения геометрических параметров щелей связи: x_0 , z_0 , α и отклонение $\Delta\varphi = \varphi - 90^\circ$ в соответствии с (3.8) для заданных сечений волновода и рабочего диапазона частот. На промежуточной частоте $\varphi = 90^\circ$, на крайних частотах отклонения $\Delta\varphi$ должны быть одинаковыми.

3.3. Описание лабораторной установки

Схема установки, предназначенной для исследования частных случаев вращающейся поляризации электромагнитного поля, изображена на рис. 3.7.



- 1 — ответвитель круговой поляризации; 2 — детекторная головка;
3 — согласованная нагрузка; 4 — емкостная диафрагма;
5 — короткозамыкающая пластина (короткозамыкатель)

Рис. 3.7 — Схема лабораторной установки

Вращающаяся детекторная головка представляет собой отрезок законченного с одной стороны прямоугольного волновода, соединенного в торец с круглым волноводом ответвителя вращающейся поляризации. В широкой стенке прямоугольного волновода имеется круглое отверстие, через которое внутрь введен штырь. Токи СВЧ, наводимые на штырь,

дении радиоимпульсов через дисперсионную линию передачи. Сформулировать условия, при которых искажения будут минимальными;

— проанализировать причины несовпадения экспериментальных и расчетных значений длины волны в волноводе.

4.6. Контрольные вопросы

- 4.6.1. Приведите классификацию направляемых волн.
- 4.6.2. Чем отличаются *TEM* волна от волн типов *E* и *H*?
- 4.6.3. Что такое критическая длина волны?
- 4.6.4. В каком диапазоне длин волн прямоугольный металлический волновод является одноволновым, т.е. в нем будет распространяться только волна H_{10} ?
- 4.6.5. Как определяется критическая длина волны для различных типов колебаний?
- 4.6.6. Нарисуйте диаграмму типов колебаний в прямоугольном волноводе.
- 4.6.7. Из каких соображений выбирается рабочий диапазон частот прямоугольного волновода?
- 4.6.8. Как определяется длина волны в волноводе?
- 4.6.9. Что такое дисперсия?
- 4.6.10. Нарисуйте дисперсионную характеристику прямоугольного волновода. Проанализируйте ее основные области.
- 4.6.11. Что понимается под фазовой скоростью волны? Как она определяется? Приведите пример.
- 4.6.12. Что представляет собой групповая скорость волны? Как она связана с фазовой скоростью волны?
- 4.6.13. Что такое энергетическая скорость волны? Как она определяется?

от длины волны в свободном пространстве $\lambda_{в\text{ эксп}} = f_1(\lambda_0)$; $\lambda_{в\text{ расщ}} = f_2(\lambda_0)$. Длины волн в свободном пространстве соответствуют частотам колебаний f_{0i} , на которых производились измерения, согласно п. 4.4.3. Результаты технического расчета и эксперимента оформите в виде таблицы 4.3 и изобразите на одном графике.

4.5.5. Постройте дисперсионную характеристику волновода, определив по ней область «прозрачности» и область «непрозрачности».

Примечание! Сечение волновода — 72×34 мм; основной тип колебаний — H_{10} .

Таблица 4.3 — Расчетные данные

Номер отсчетной точки	1	2	3	...	7	8
λ_0 , мм						
$\lambda_{в\text{ эксп}}$, мм						
$\lambda_{в\text{ расщ}}$, мм						

4.5.6. Рассчитайте и постройте графики зависимостей: $V_\phi = f_3(\lambda_0)$ и $V_{гр} = f_4(\lambda_0)$. Результаты оформите в виде таблицы 4.4 и изобразите на одном графике.

Таблица 4.4 — Расчетные данные

Номер отсчетной точки	1	2	...	— 1	
λ_0 , мм	$\lambda_0 = 1,05a$			$\lambda_0 = 1,05a$	$\lambda_0 = \lambda_{кр}$
V_ϕ					
$V_{гр}$					

4.5.7. Постройте зависимость распределения напряженности поля вдоль волновода согласно п.4.4.8.

4.5.8. В выводах необходимо отразить следующее.

— описать характер искажений сигналов, возникающих при прохож-

подводятся к детектору, расположенному в коаксиальном патрубке. Для замыкания цепи постоянной составляющей тока детектора между штырем и детектором размещается шайбовый резистор. Высокочастотная составляющая выходного тока детектора блокируется конструктивной емкостью. Конструктивно узел детектора выполнен съемным. Детекторная головка вращается в подшипнике, образованном ее корпусом и корпусом круглого волновода.

Нижняя отчетная шкала **ФАЗА** представляет собой полуокружность, разбитую рисками на 180 равных частей. Цена каждого деления этой шкалы 2° измеряемого фазового угла коэффициента отражения, отсчет фазы производится относительно неподвижного нониуса, расположенного ниже шкалы.

Для обеспечения начальной калибровки прибора по фазе относительно измерительного фланца, без применения фланцевого короткозамыкателя и пересоединения измеряемого узла при изменении частоты, имеется шкала начальной калибровки с надписью **ЧАСТОТА**. Шкала **ЧАСТОТА** рассчитана таким образом, что при установке на частоту измерения детекторная головка поворачивается на угол, равный набегу фазы от плоскости симметрии прибора до измерительного фланца; этим исключается необходимость в начальной калибровке по короткозамыкателю.

С генератора СВЧ колебаний электромагнитная энергия поступает в ответвитель вращающейся поляризации I, нагруженным согласованной нагрузкой 3 (при исследовании поля круговой поляризации), либо короткозамыкателем 5 (при исследовании поля линейной поляризации), либо емкостной диафрагмой 4 и согласованной нагрузкой (при исследовании поля эллиптической поляризации).

Сигнал с детекторной головки поступает на индикатор (в качестве индикатора может применяться стандартный измеритель отношений).

В выпускаемых промышленностью поляризационных измерителях типов РЗ-37 ... РЗ-48 для уменьшения отклонения фазового сдвига от 90° прорезана еще одна щель — компенсирующая.

3.4. Порядок выполнения работы

3.4.1. Соберите схему, показанную на рис. 3.7. Установите на СВЧ генераторе частоту, на которой будете производить измерение. Детекторную головку соедините с индикатором. К измерительному фланцу ответвителя вращающейся поляризации подсоедините согласованную нагрузку. Отраженная волна в тракте в этом случае будет отсутствовать. Электромагнитное поле в круглом волноводе будет иметь круговую поля-

ризацию.

3.4.2. Поворачивая детекторную головку, снимите зависимость величины сигнала с детектора от угла поворота, используя при этом шкалу **ФАЗА** на круглом волноводе. Результаты измерений занесите в таблицу 3.1.

3.4.3. К ответвителю круговой поляризации подсоедините емкостную диафрагму и согласованную нагрузку. В прямоугольном волноводе будет существовать отраженная волна. Ее амплитуда будет меньше, чем амплитуда падающей волны. В круглом волноводе две волны с круговой поляризацией с противоположными направлениями вращения и неравными амплитудами создадут результирующую волну с эллиптической поляризацией. Снимите зависимость величины сигнала с детектора от угла поворота. Результаты исследований занесите в таблицу 3.1.

3.4.4. К ответвителю круговой поляризации подключите короткозамыкатель. Амплитуда отраженной волны в этом случае равна амплитуде падающей. Волны с круговой поляризацией в круглом волноводе создадут результирующую волну с линейной поляризацией. Снимите зависимость величины сигнала с детектора от угла поворота. Результаты исследований занесите в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 — Экспериментальные данные

Фаза	0°	15°	...	165°	180°	Тип нагрузки
$P_{сн}$						Согласованная нагрузка
1 / $P_{сн}$						
$P_{ед}$						Емкостная диафрагма
1 / $P_{ед}$						
$P_{кз}$						Короткозамыкатель
1 / $P_{кз}$						

Примечание: $P_{сн}$, $P_{ед}$, $P_{кз}$ — показания индикатора при подключении согласованной нагрузки, емкостной диафрагмы с согласованной нагрузкой и короткозамыкателя соответственно.

3.5. Оформление отчета

3.5.1. Сформулируйте задачи исследований.

3.5.2. Приведите схему лабораторной установки.

Таблица 4.1 — Экспериментальные данные

Номер измерения	1	2	3	...	7	8
λ_0 , см						
f_0 , МГц						
Z_{min1}	Z'_{min1}					
	Z''_{min1}					
	Расчет					
Z_{min2}	Z'_{min2}					
	Z''_{min2}					
	Расчет					
$\lambda_{в\text{ эксп}}$						

4.4.7. Аналогичные измерения проведите на остальных (7 ... 9) частотах, согласно п. 4.4.3.

4.4.8. На одной из частот снимите распределение напряженности поля вдоль всего волновода измерительной линии. Количество отсчетных точек должно быть достаточным, чтобы построить эту зависимость на графике. Результаты оформите в виде таблицы 4.2.

Таблица 4.2 — Экспериментальные данные

Z, мм	1	2	...	10
$k_d E ^2$				

4.5. Оформление отчета

4.5.1. Сформулируйте цель работы.

4.5.2. Приведите схему лабораторной установки.

4.5.3. Приведите результаты расчетного задания.

4.5.4. Рассчитайте и постройте зависимость длины волны волновода

Отсчитав по линейке измерительной линии положения зонда в двух соседних минимумах, легко определить длину волны в волноводе (рис. 4.7)

$$\lambda_{\text{в}} = 2(Z''_{\text{min}} - Z'_{\text{min}}) = 2(Z''_{\text{max}} - Z'_{\text{max}}). \quad (4.13)$$

Для получения большей точности измерений обычно пользуются методом «вилки» при определении экстремума (минимума или максимума). Замечают показания линейки измерительной линии при одинаковых, небольших отклонениях (порядка пяти — десяти малых делений) индикатора вблизи экстремума в одну и другую сторону от него. Затем сумму показаний делят пополам — это и будет точное положение экстремума.

Основным типом волны, исследуемым в волноводе, является магнитная волна H_{10} , для которой должно соблюдаться условие $a < \lambda < 2a$.

4.4. Порядок выполнения работы

4.4.1. Соберите схему, показанную на рис. 4.6. Для этого к разъему **ВХОД** генератора СВЧ подключите соединительный кабель, который соедините с входом коаксиально-волноводного перехода.

Генератор СВЧ должен быть выключен!

4.4.2. Включите генератор (время прогрева генератора (5 ... 10) минут).

4.4.3. Ручкой **НАСТРОЙКА** установите необходимую частоту. Исследуемые частоты возьмите из расчетного задания, п. 4.4.3.

4.4.4. Ручкой **РЕГУЛИРОВКА ВЫХОДА** установите максимальную мощность.

4.4.5. Настройте в резонанс контур зонда измерительной линии. В случае зашкаливания стрелки индикатора (микроамперметра) ручкой генератора **РЕГУЛИРОВКА ВЫХОДА** уменьшите мощность на выходе генератора.

Примечание! Зонд может случайно оказаться в минимуме поля, поэтому при настройке зонда рекомендуется в наибольших пределах перемещать его вдоль измерительной линии до появления сигнала. Затем зонд поставьте в максимум напряженности поля и продолжайте настройку его до максимального значения сигнала.

4.4.6. По отсчетной линейке измерительной линии найдите положение двух соседних минимумов напряженности поля, используя метод «вилки». По полученным данным рассчитайте экспериментально найденную длину волны в волноводе. Результаты оформите в виде таблицы 4.1.

3.5.3. Постройте годографы экспериментальных зависимостей для трех случаев поляризации электромагнитных волн, т.е. зависимости величины сигнала с детектора от угла поворота.

3.5.4. Выполните чертёж, поясняющий сложение двух волн с круговой поляризацией и противоположными направлениями вращения.

3.5.5. Приведите результаты расчетного задания.

3.5.6. В выводах необходимо отразить следующее:

- необходимо проанализировать полученные результаты;
- необходимо оценить степень соответствия полученных результатов теоретическим данным;
- объяснить причины расхождения.

3.6. Контрольные вопросы

3.6.1. Какое электрическое поле называется поляризованным (неполяризованным)? Что называется плоскостью поляризации?

3.6.2. Какие виды поляризации имеют гармонические электромагнитные волны?

3.6.3. Какие условия необходимы, чтобы система двух линейно-поляризованных волн образовала волну с круговой поляризацией?

3.6.4. В каких случаях возникает волна с эллиптической поляризацией? Какую поляризационную структуру будет иметь волна в результате сложения двух составляющих ее волн с круговой поляризацией с одинаковыми амплитудами и противоположными направлениями вращения?

3.6.5. На чем основан поляризационный принцип измерения комплексных параметров? Как устроен поляризационный измеритель КСВН и фазы ККО φ ?

Лабораторная работа № 4 ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСПЕРСИОННЫХ СВОЙСТВ ВОЛНОВОДНОЙ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ

Цель работы: Исследование зависимости фазовой скорости волны в волноводе от частоты.

4.1. Краткие теоретические сведения

4.1.1. Классификация направляемых волн

Направляемые волны делятся на поперечные, электрические, магнитные и смешанные.

Поперечными или волнами *ТЕМ* (*T* — первая буква английского слова *transfers*, что означает «поперечный»), называются волны, у которых в продольном направлении, то есть в направлении распространения энергии, отсутствуют составляющие векторов напряженностей электрического и магнитного полей. Векторы $\vec{E}$ и $\vec{H}$ лежат в плоскости, перпендикулярной направлению распространения.

Электрическими, или волнами *E*, называются волны, у которых вектор электрического поля, помимо поперечных составляющих, имеет продольную составляющую. Продольная составляющая вектора магнитного поля равна нулю. Волны *E* иногда называют поперечно магнитными волнами, или, волнами *ТН*.

Магнитными, или волнами *H*, называют волны, у которых вектор магнитного поля, помимо поперечных составляющих, имеет продольную составляющую.

Продольная составляющая вектора электрического поля равна нулю. Волны *H* иногда называют поперечными электрическими волнами, или волнами *ТЕ*.

Смешанными (гибридными) называют волны, у которых векторы электрического и магнитного полей имеют как продольную, так и поперечные составляющие.

4.1.2. Критическая длина волны

При выборе геометрических размеров волновода следует исходить из того, что для волн как *E*, так и *H* типов критическая длина волны находится по одной и той же формуле

$$\lambda_{кр} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}}, \quad (4.1)$$

тельную линию, нагруженную коротко замыкающей металлической пластиной. Полностью отразившись от короткозамыкателя, СВЧ энергия проходит через измерительную линию в обратном направлении и поглощается во встроенных в СВЧ генератор аттенуаторах. В результате интерференции падающей и отраженной волн в линии устанавливается режим стоячих волн, т.е. в данном случае расстояние между соседними минимумами (максимумами) равно половине длины волны в волноводе $\lambda_B/2$.

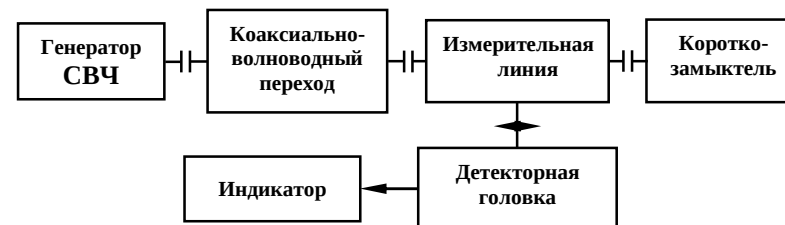
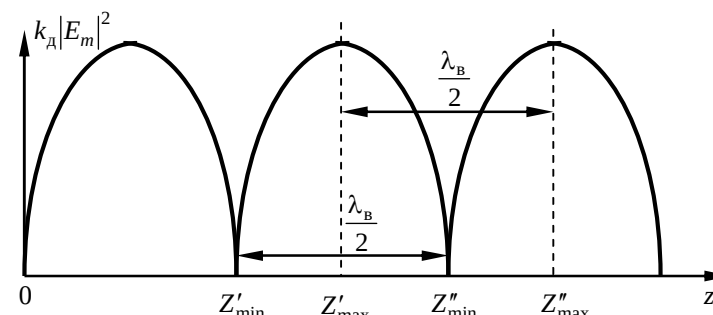


Рис. 4.6 — Структурная схема лабораторной установки

Измерительная линия представляет собой отрезок волновода, посередине широкой стенки которого прорезана щель. В щели расположен зонд, возбуждаемый электрическим полем колебания. Зонд может перемещаться вдоль измерительной линии. При перемещении зонда напряжение, наводимое на нем, изменяется в соответствии с распределением поля вдоль волновода (рис. 4.7). Это вызывает соответствующее изменение тока детектора, связанного с зондом, и показания индикатора. Подробно принцип работы измерительной линии изложен в лабораторной работе № 5.



k_d — коэффициент преобразования детектора

Рис. 4.7 — Картина стоячих волн в прямоугольном волноводе

Выделенное выше понятие групповой скорости сигнала определяло скорость перемещения её огибающей, и это понятие имело смысл, пока огибающая перемещалась без изменения формы.

Если частотный спектр сигнала не широк, то искажение огибающей происходит медленно. В этом случае изменение форма сигнала на небольших расстояниях от источника можно не учитывать, и групповая скорость будет определять движение всей группы колебаний в целом. Очевидно, такой сигнал по своим свойствам приближается к волновому пакету.

Скорость движения энергии электромагнитных колебаний для плоской волны определяется как отношение среднего значения вектора Пойнтинга к средней плотности энергии в данной точке. Для направляющей системы скорость движения энергии следует определить как отношение среднего потока мощности через поперечное сечение системы к средней энергии поля на единицу ее длины. Очевидно, что скорость движения энергии не может быть больше скорости распространения электромагнитных волн в вакууме.

Советский ученый М.А. Леонтович показал, что во всех случаях, когда групповая скорость имеет физический смысл, она совпадает со скоростью движения энергии.

4.2. Расчетное задание

4.2.1. Рассчитайте рабочий диапазон частот волновода сечением 72×34 мм.

4.2.2. Рассчитайте и постройте диаграмму типов колебаний для прямоугольного металлического волновода сечением 72×34 мм или стандартного волновода другого сечения (по заданию преподавателя).

4.2.3. Выберите (8 ... 10) рабочих длин волн λ_{0i} , где $i = 0, 1, 2, \dots, 10$, входящих в одноволновый диапазон волновода (имеется в виду основной тип колебаний — H_{10}). Пересчитайте длину волны в частоту по известной формуле $f_{0i} = c/\lambda_{0i}$.

4.3. Описание лабораторной установки

Структурная схема установки, предназначенной для исследования дисперсионных свойств волноводной линии передачи, изображена на рис. 4.6.

Электромагнитная энергия от генератора СВЧ через отрезок коаксиального кабеля и коаксиально-волноводный переход поступает в измери-

где m, n — число стоячих полуволн, укладывающихся соответственно на широкой a и узкой b стенках волновода;

$\lambda_{кр}$ — это длина волны, при которой постоянная распространения обращается в нуль, причем $\lambda_{кр}$, тем меньше, чем больше индексы волн m и n .

Рассмотрим совокупность типов волн с наибольшими значениями $\lambda_{кр}$. Непосредственное вычисление дает:

$$\begin{aligned} (\lambda_{кр})_{H_{10}} &= 2a; & (\lambda_{кр})_{H_{01}} &= 2b; \\ (\lambda_{кр})_{H_{20}} &= a; & (\lambda_{кр})_{H_{11}} &= (\lambda_{кр})_{E_{11}} = \frac{2ab}{\sqrt{a^2 + b^2}}. \end{aligned} \quad (4.2)$$

Для простоты будем, полагать, что $b = a/2$, что обычно достаточно хорошо выполняется на практике. Следовательно,

$$(\lambda_{кр})_{H_{10}} = 2a; \quad (\lambda_{кр})_{H_{01}} = a; \quad (\lambda_{кр})_{H_{20}} = a; \quad (\lambda_{кр})_{H_{11}} = (\lambda_{кр})_{E_{11}} = \frac{2a}{\sqrt{5}}. \quad (4.3)$$

Последний результат позволяет построить диаграмму типов колебаний прямоугольного волновода, изображенную на рис. 4.1. Принцип построения такой диаграммы весьма прост: на оси длин волн вертикальными штрихами обозначаются критические длины волн различных типов колебаний в порядке их убывания. На диаграмме типов колебаний можно выделить три характерные области:

— область отсечки ($\lambda_0 > 2a$), в которой распространяющихся волн не существует вообще;

— область одноволновости ($a \leq \lambda_0 \leq 2a$), в пределах которой возможно распространение лишь основного типа колебаний H_{10} ;

— область многоволновости ($\lambda_0 < a$), в которой помимо основной волны по волноводу принципиально могут распространяться колебания высших типов.

Например, если рабочая длина волны лежит в интервале между a и $2a/\sqrt{5}$, то в волноводе могут одновременно существовать три распространяющихся типа колебаний — H_{10} , H_{20} и H_{01} . Если длина волны становится меньше, чем $2a/\sqrt{5}$, то к ним добавляются еще колебания типов H_{11} и E_{11} . Разумеется, что в области многоволновости расположено бесконечное множество высших типов, не показанных на рис. 4.1.

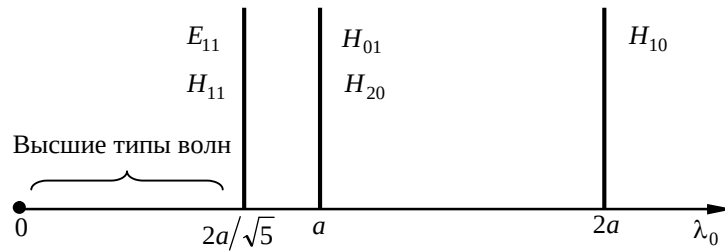


Рис. 4.1 — Диаграмма типов колебаний в прямоугольном волноводе при $b/a = 1/2$

Подчеркнем здесь одно очень важное обстоятельство. Сам факт многоволновости какого-либо волновода еще не означает, что по нему действительно распространяются все возможные виды колебаний. Можно таким образом возбудить волновод, что в нем будет существовать только один, причем не обязательно низший тип колебаний.

Пусть, например, $\lambda_0 < a$ так что по волноводу могут распространяться волны типов H_{10} и H_{01} . На рис. 4.2 показаны два способа возбуждения такого волновода с помощью штыря. Из рисунка видно, что при первом способе возбуждения штырь оказывается параллельным вектору $\vec{E}$ для волны H_{10} и перпендикулярным к вектору $\vec{E}$ для волны H_{01} . В соответствии с принципом, речь о котором шла ранее, при таком способе возбуждения в данном многоволновом волноводе будет создан лишь тип колебаний H_{10} , в то время как амплитуда колебаний типа H_{01} будет равна нулю тождественно. При втором способе возбуждения ситуация станет диаметрально противоположной: возбужден будет лишь тип колебаний H_{01} . Однако, несмотря на принципиальную возможность селективного возбуждения низшего типа колебаний в многоволновом волноводе, практическое использование таких систем оказывается нецелесообразным ввиду неизбежного возбуждения волн высших типов на нерегулярностях передающих линий.

Итак, принципиально волновод с отношением сторон 2:1 может обеспечить одноволновый режим в интервале длин волн $a \leq \lambda_0 \leq 2a$. Однако на практике весь этот интервал никогда не используется по следующим причинам. Во-первых, слишком близкий подход к значению $\lambda_0 = a$, нежелателен из-за возможности случайной перестройки генератора в область многоволновости. Во-вторых, в окрестности критической длины

к критической частоте колебания выбранного типа, также стремится к нулю; при повышении средней частоты групповая скорость увеличивается, причем верхним пределом скорости при $\lambda_0 \rightarrow 0$ является $V_{гр} = c$.

На рисунке 4.5 показаны графики изменения фазовой и групповой скоростей в зависимости от частоты колебаний, согласно выражений:

$$V_{\phi} = \frac{c}{\sqrt{1 - (f_{кр} / f_0)^2}}; \quad V_{гр} = c \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{f_{кр}}{f_0}\right)^2}. \quad (4.12)$$

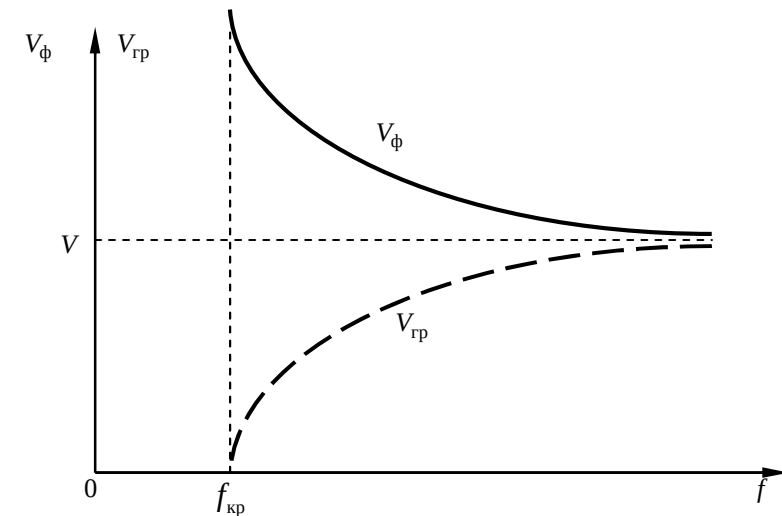


Рис. 4.5 — Зависимости фазовой и групповой скоростей волны, распространяющейся между параллельными проводящими плоскостями от частоты колебаний

4.1.6. Энергетическая скорость

Исследование вопроса о распространении сигнала в дисперсионной среде представляет собой очень сложную задачу. В общем случае этот процесс, как ясно из вышеизложенного, не может быть полностью охарактеризован величинами фазовой и групповой скоростей.

Сложность вопроса заключается в том, что форма сигнала при движении деформируется, сигнал по мере распространения расплывается. В этой ситуации понятие скорости вообще становится неоднозначным, ибо нет одинаковых сигналов, занимающих в разное время разные положения в пространстве.

группы волн показаны пунктиром.

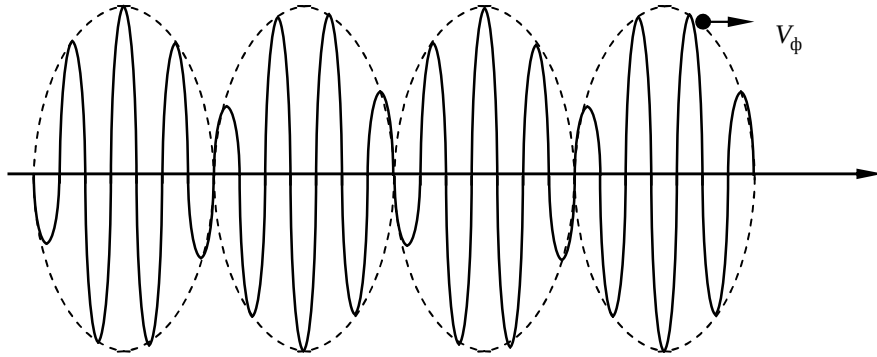


Рис. 4.4 — Иллюстрация волнового распространения огибающей

Скорость распространения групп волн вдоль оси Z называется **групповой скоростью**. Если сложное колебание, распространяющееся по волноводу, в достаточной мере узкополосно, то понятие групповой скорости адекватно описывает распространение по волноводу соответствующих импульсных сигналов. Заметим, что на частотах СВЧ диапазона такое условие выполняется, как правило, всегда, поскольку здесь частоты модуляции значительно ниже несущей частоты.

Резюмируя сказанное, можно отметить, что максимум сигнала непрерывно перемещается вдоль оси Z , причем скорость перемещения максимума равна

$$V_{гр} = \frac{dz}{dt} = \frac{1}{d\beta/d\omega}. \quad (4.9)$$

Групповая скорость в полном металлическом волноводу, работающем на волне произвольного типа, определяется по формуле

$$V_{гр} = c \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{кр}}\right)^2}. \quad (4.10)$$

Согласно выражению (4.10) можно сделать следующие выводы:

— групповая скорость волн в волноводу всегда меньше фазовой скорости и меньше скорости света;

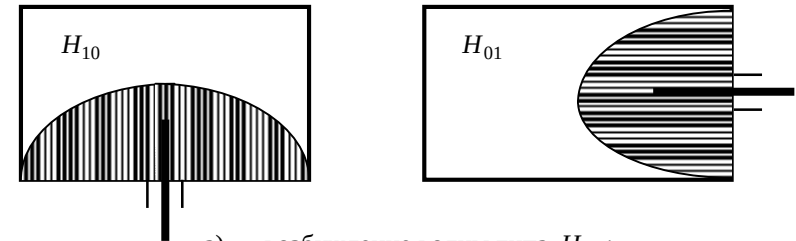
— фазовая и групповая скорости связаны соотношением

$$V_{\phi} V_{гр} = c^2; \quad (4.11)$$

— групповая скорость сигналов, средняя частота которых стремится

волны, то есть $\lambda_0 \approx 2a$, энергетическая скорость стремится к нулю. По этим причинам существующие стандарты рекомендуют следующее использование рабочей полосы:

$$\lambda_{0\min} = 1.05a; \quad \lambda_{0\max} = 1.6a, \quad (4.4)$$



а) — возбуждение волны типа H_{10} ;

б) — возбуждение волны типа H_{01} .

Рис. 4.2 — Возможность селективного возбуждения различных типов волн в волноводу

Для любого участка СВЧ и УВЧ диапазонов существует рекомендуемые или стандартные сечения прямоугольных волноводов (см. раздел 2.1.2 лабораторной работы 2). В таблице 4.1 приведены сечения волноводов для некоторых часто употребляемых диапазонов длин волн.

Таблица 4.1 — Примеры сечения волноводов

Диапазон длин волн	Сечение волновода	
	a , мм	b , мм
4 мм	3.6	1.8
8 мм	7.2	3.4
3 см	23	10
10 см	72	34

4.1.3. Понятие о дисперсионной характеристике волновода

Закон изменения длины волны в волноводу от длины волны в свободном пространстве носит название дисперсионной характеристики волновода. Длина волны в волноводу $\lambda_{в}$ определяется формулой

$$\lambda_{\text{в}} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - (\lambda_0 / \lambda_{\text{кр}})^2}}, \quad (4.5)$$

где λ_0 — длина волны в свободном пространстве (длина волны генератора).

Дисперсионную характеристику весьма удобно изобразить на графике (рис. 4.3). Вся область длин волн, меньших, чем $\lambda_{\text{кр}}$ является областью «прозрачности» данного волновода на рассматриваемом типе колебаний; причем, если $\lambda_0 \ll \lambda_{\text{кр}}$ то длина волны в волноводе, лишь в очень малой степени отличается от длины волны в свободном пространстве, всегда превосходя ее. Если λ_0 , стремится к $\lambda_{\text{кр}}$ слева, то длина волны в волноводе стремится к бесконечности. При переходе λ_0 , через граничное значение $\lambda_{\text{кр}}$ в волноводе имеются уже не бегущие, а экспоненциально затухающие волны. Всю область частот, которой соответствуют длины волн $\lambda_0 > \lambda_{\text{кр}}$ называют областью «непрозрачности» или областью отсечки.

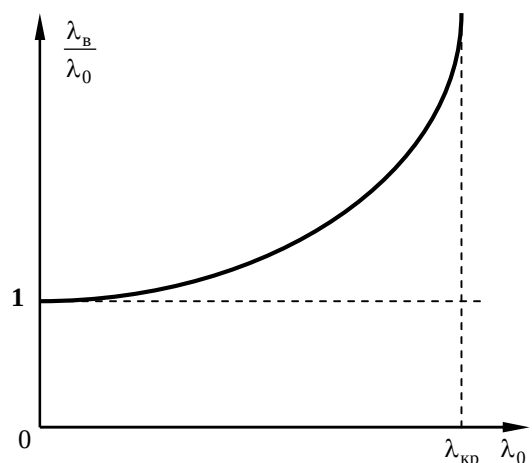


Рис. 4.3 — Дисперсионная характеристика волновода

4.1.4. Фазовая скорость

Поскольку фазовая скорость, длина волны и частота связаны соотношением

$$V_{\phi} = \frac{\omega}{\beta} = \frac{2\pi f}{2\pi / \lambda_{\text{в}}} = f \lambda_{\text{в}}, \quad (4.6)$$

то, учитывая (4.5) получаем

$$V_{\phi} = \frac{c}{\sqrt{1 - (\lambda_0 / \lambda_{\text{кр}})^2}}, \quad (4.7)$$

где c — скорость электромагнитных волн в свободном пространстве, β — фазовая постоянная.

Длина волны в волноводе может быть определена по следующей формуле

$$\lambda_{\text{в}} = V_{\phi} / f. \quad (4.8)$$

При воздушном заполнении металлического волновода $V_{\phi} > c$. Согласно теории относительности материя не может перемещаться со скоростью, превышающей $c \approx 3 \cdot 10^8$ м/с — скорость света. Поэтому фазовая скорость не является скоростью движения электромагнитной волны, представляющей собой одну из форм материи. Фазовая скорость является скоростью движения интерференционной картины, образованной суммой парциальных волн в волноводе. С движением материи она не связана.

Зависимость фазовой скорости волны от частоты называется **дисперсией**. Среда, или направляющая система, в которой наблюдается дисперсия, называется **дисперсной**.

Если фазовая скорость волны понижается с ростом частоты, то дисперсия называется **нормальной**, повышение V_{ϕ} с частотой соответствует аномальной дисперсии. В металлическом волноводе наблюдается нормальная дисперсия направляемых волн.

4.1.5. Групповая скорость

Немонохроматический сигнал, подаваемой на вход волноводной линии передачи, всегда может быть представлен при помощи спектрального разложения в виде ряда или интеграла Фурье. Так, если для полого металлического волновода с произвольной формой поперечного сечения при распространении в нем двух волн изобразить распределение мгновенных значений в какой-либо фиксированный момент времени, получится характерная картина биений, изображенная на рисунке 4.4.

Здесь можно выделить низкочастотную сгибающую и высокочастотное заполнение. Однако, следует учитывать, что изучаемый процесс носит волновой характер. Поэтому как огибающая, так и заполнение являются волнами, скорости распространения которых вдоль оси z различны.

Характерная картина распределения в пространстве огибающей волнового процесса, образованного монохроматическими составляющими, близкими по частоте, называется группой волн. На рис.4.4 отдельные