



Кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры

А.С. Шостак, И.И. Горелкин, В.П. Зайцев

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

по курсу “Антенны и устройства СВЧ”,
“Микроволновые антенны и устройства СВЧ”

Томск 2018

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

А.С. Шостак, И.И. Горелкин, В.П. Зайцев

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

по курсу “Антенны и устройства СВЧ”,
“Микроволновые антенны и устройства СВЧ”

2018

Рецензент: профессор кафедры КИПР ТУСУР, д. т. н. Масалов Е.В.

Технический редактор: доцент кафедры КИПР ТУСУР,
к. т. н. Кривин Н.Н.

А.С. Шостак, И.И. Горелкин, В.П. Зайцев. Лабораторный практикум
по курсу “Антенны и устройства СВЧ”,
“Микроволновые антенны и устройства СВЧ”

Томск: Томский государственный университет систем управления и радио-
электроники, 2018 – 54 с.

Содержит разделы: средства измерения на СВЧ, 4 лабораторные работы, тесты по указанным курсам, а также приложение, содержащее инструкцию по работе с электромагнитным излучением. Лабораторный практикум может быть использован при изучении дисциплин смежных специальностей радиотехнического направления.

© А.С. Шостак, И.И. Горелкин, В.П. Зайцев 2018

© Кафедра КИПР Томского государственного
университета систем управления и
радиоэлектроники, 2018

Содержание

| | |
|---|----|
| 1. Средства измерений на СВЧ | 5 |
| 1.1 Классификация измерительных приборов | 5 |
| 1.2 Измерительная линия для измерений параметров СВЧ трактов | 6 |
| 1.3 Панорамный измеритель коэффициента стоячей волны (КСВН)..... | 6 |
| 1.4 Оконечные согласованные нагрузки (вид Э9) | 9 |
| 1.5 Атенюаторы..... | 10 |
| 1.6 Направленные ответвители (вид Э5)..... | 11 |
| 1.7 Рупорная антенна (вид П6)..... | 12 |
| 2. Лабораторные работы | 13 |
| 2.1 Измерение диаграммы направленности ДН и коэффициента усиления КУ пирамидального рупора | 13 |
| 2.2. Исследование поляризационной характеристики антенны | 19 |
| 2.3 Миноискатель Литта | 25 |
| 2.4 Измерение параметров слоистых сред..... | 29 |
| 3. Тесты | 37 |
| Приложение 1 | 42 |
| П 1. Воздействие электромагнитных полей на живой организм | 42 |
| П 2. Принципы защиты от электромагнитного излучения | 47 |
| П 3. Защита от излучений радиотехнического оборудования и приборов . | 49 |
| П 4. Некоторые правила безопасности..... | 51 |
| П 5. Средства индивидуальной защиты | 52 |
| Заключение | 53 |
| СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ | 54 |

1. Средства измерений на СВЧ

1.1 Классификация измерительных приборов

В лабораторной практике измерений на СВЧ чаще всего приходится иметь дело с приборами и методикиующих подгрупп:

Г – генераторы измерительные;

Д – аттенюаторы и приборы для измерения ослаблений;

Э – измерительные устройства коаксиальных и волноводных трактов;

М – приборы для измерения мощности;

Ч – приборы для измерения частоты и времени;

Р – приборы для измерения параметров элементов и трактов с распределенными постоянными;

П – приборы для измерения напряженности поля и радиопомех;

У – усилители измерительные;

В – приборы для измерения напряжения;

Б – источники питания для измерений или измерительных приборов.

Каждая подгруппа по основной выполняемой функции делится на виды, обозначаемые цифрами по порядку. По совокупности технических характеристик и очередности разработок виды делятся на типы. Каждому типу прибора присвоены порядковые номера, перед которыми ставится черточка (дефис). В случае модернизации или усовершенствования прибора в конце обозначения прибора добавляется буква А (при первой модернизации), В (при второй) и т. д. по порядку. Например, Г4–70, Г4–50 – генераторы высокочастотные (вид Г4); М3–1А, М3–10 – измерители малых уровней мощности (вид М3); Ч2–9А, Ч2–32 – частотомеры резонансные (вид Ч2); Р1–3, Р1–7 – измерительные линии (вид Р1); Р2–53, Р2–72 – измеритель КСВН, панорамный (вид Р2) и т. д.

1.2 Измерительная линия для измерений параметров СВЧ трактов

Линии измерительные предназначены для измерения КСВ, полных сопротивлений, длины волны и других характеристик волноводных и коаксиальных трактов различных радиоустройств.

Измерительные линии разделяются на коаксиальные и волноводные.

Коаксиальные измерительные линии в настоящее время перекрывают диапазон частот от 500 МГц до 40 ГГц и в свою очередь разделяются на щелевые и бесщелевые.

Волноводные измерительные линии перекрывают диапазон частот от 2.6 до 220 ГГц и могут выполняться как на отдельные сечения волноводов, так и комплектами, состоящими из нескольких секций с общими механической и индикаторной системами.

К достоинствам как коаксиальных, так и волноводных измерительных линий следует отнести то, что источники их погрешности определяются поэлементно и при необходимости могут быть исключены или уменьшены за счет статистической обработки результатов измерений, что позволяет получить высокую точность измерения, не предъявляя особо жестких требований к параметрам измерительных линий.

1.3 Панорамный измеритель коэффициента стоячей волны (КСВН)

К этой группе приборов относятся панорамные измерители КСВН и ослабления, в основе которых лежит рефлектометрический принцип измерения, использующий выделение падающей и отраженной от измеряемого объекта

волн и определение коэффициента отражения по значению отношения их амплитуд.

В состав приборов входят следующие основные блоки и узлы:

1. Индикатор КСВН и ослабления ("индикатор")
2. Генератор качающейся частоты.
3. Измерительные СВЧ узлы, основным из которых является рефлектометр.

Рефлектометр состоит из двух направленных ответвителей с встроенными детекторными головками (направленными детекторами). Направленный детектор падающей волны является одновременно датчиком АРМГКЧ (автоматическая регулировка мощности генератора качающейся частоты). Переориентация направленного детектора отраженной волны обеспечивает возможность измерения либо КСВ двух- и четырехполюсников (рисунок 1.1), либо ослабления четырехполюсника (рисунок 1.2). Измерения основаны на выделении направленными детекторами падающего на исследуемый объект и отраженного от него (при измерении КСВ) или прошедшего через исследуемый объект (при измерении ослабления) СВЧ сигналов.

Выделенные сигналы детектируются детекторными головками, встроенными во вторичные тракты направленных детекторов (НД) и подаются в индикатор. Сигнал на выходе детекторной головки НД падающей волны поддерживается постоянным системой АРМ генератора. Шкалы индикатора проградуированы в значениях КСВ и ослабления и позволяет производить непосредственный отсчет измеряемой величины. Работа детекторов в квадратичном режиме обеспечивается низким уровнем мощности во вторичном тракте НД.

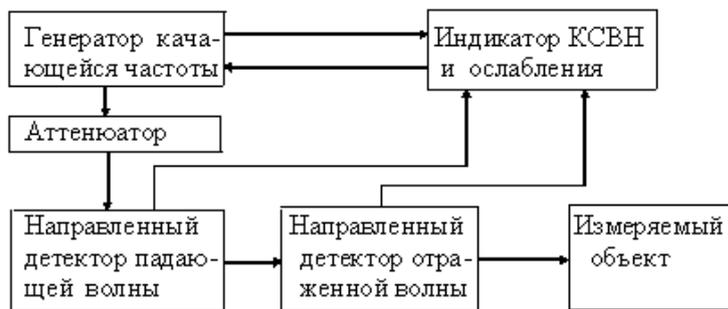


Рисунок 1.1 – Схема измерения КСВ панорамным измерителем КСВН и ослабления



Рисунок 1.2 – Схема измерения ослабления панорамным измерителем КСВ и ослабления

Индикатор представляет собой измеритель отношений. Отсчет измеряемых величин КСВ и ослабления осуществляется по экрану ЭЛТ и отсчетному устройству с переключаемыми шкалами. Чувствительность канала отраженной волны не хуже 1 мкВ.

Пределы входных напряжений падающей волны 0.03 - 10 мВ; пределы измерения КСВ 1.01 - 5.0; пределы измерения ослабления 0 - 40 дБ; погреш-

ность измерения ослабления $\pm(0.2 + 0.03 A)$ дБ, где A - измеряемое ослабление.

Погрешность измерения КСВ от 1.01 до 2.0 при калибровке в рабочем диапазоне частот прибора в процентах не превышает величины, определяемой по формуле

$$\delta \cdot S = \pm(5 \cdot S + 2) \quad , \quad (1.1)$$

где S - измеряемый КСВН.

Погрешность в пределах от 2 до 5, определяется по формуле

$$\delta \cdot S = \frac{\pm(5 \cdot S + 2)}{100 - [(5 \cdot S + 2)] \cdot \frac{S}{S+1}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (1.2)$$

Отечественные коаксиальные панорамные измерители КСВ и ослабления перекрывают диапазон частот 20 МГц ÷ 12.4 ГГц, волноводные 2.6 ÷ 78.33 ГГц и имеют погрешность измерения КСВ $\pm(5 - 15)\%$, ослабления $\pm(0.5 - 2.5)$ дБ.

Внимание! Перед началом работы с прибором обязательно ознакомиться с инструкцией по эксплуатации.

1.4 Оконечные согласованные нагрузки (вид Э9)

Оконечные согласованные нагрузки служат для полного поглощения без отражения и без излучения в окружающее пространство всей передаваемой по тракту мощности. Они выполняются в виде коаксиальных или волноводных конструкций и применяются в качестве эквивалента антенн при испытании и настройке различной СВЧ аппаратуры, нагрузок вспомогательных линий направленных ответвителей, эталонов согласования.

Основные требования к ним следующие: сопротивление должно быть чисто активным и равным волновому сопротивлению линии передачи СВЧ энергии, для которой они предназначены; величина допустимой мощности рассеивателя должна быть равна или больше мощности, поступающей в линию передачи, нагруженной на окончательную нагрузку.

Коаксиальная нагрузка с поглощающим наполнителем выполняется в виде короткозамкнутого отрезка коаксиальной линии постоянного поперечного сечения. Внутренний проводник нагрузки окружается слоем диэлектрика, обладающим потерями. Толщина поглощающего слоя увеличивается по направлению к концу нагрузки (короткому замыканию).

Волноводные нагрузки низкого уровня мощности выполняются в виде отрезков волновода, закороченных на конце и содержащих поглощающие пластины. Согласование пластин с линией осуществляется путем придания им специальной клиновидной формы. Длина скоса (клина) подбирается таким образом, чтобы получить наименьшую величину КСВН в возможно более широкой полосе частот.

Значение КСВН должно удовлетворять следующим условиям: $КСВН \leq 1.015$ для первого класса, $КСВН \leq 1.05$ для второго класса и $КСВН \leq 1.1$ для третьего класса.

1.5 Аттенюаторы

Для уменьшения мощности сигнала, проходящего по волноводному или коаксиальному тракту, служат аттенюаторы или ослабители. Их применяют для ослабления мощности на выходе генератора сигнала в определенное число раз, для ослабления мощности на выходе ваттметра при измерении мощности, уровень которой превосходит верхний допустимый предел, используют в качестве развязывающих устройств, с помощью которых устраняется влияние нагрузки исследуемого устройства на режим работы генератора.

Классифицируются аттенюаторы по принципу действия: поглощающие, предельные, вентильные, поляризационные; по конструктивному признаку: волноводные, коаксиальные, полосковые; по возможности регулировки затухания: с регулируемым и фиксированным затуханием; по уровню ослабляе-

мой мощности: низкого уровня (до 1 Вт) и высокого уровня; по точности градуировочной характеристики: калиброванные и грубые.

Аттенюатор характеризуется величиной ослабления (затухания) и коэффициентом стоячей волны. Как правило, аттенюаторы являются симметричными четырехполюсниками.

Ослаблением аттенюатора называют отношение мощности на входе к мощности на выходе, выраженное в децибеллах

$$C = 10 \cdot \lg \frac{P_{\text{вх}}}{P_{\text{вых}}}, \quad (1.3)$$

Поглощающие аттенюаторы представляют собой отрезок линии передачи СВЧ энергии (коаксиала, волновода), внутрь которых вводятся поглощающие элементы в виде пластин, покрытых проводящим слоем. Согласование по входу и выходу достигается соответствующими скосами пластин.

Мощность, поглощаемая пластиной, пропорциональна величине σE^2 , где σ - проводимость поверхностного слоя пластины. Поэтому степень поглощения мощности зависит от места расположения пластины: чем ближе пластина к центральному сечению волновода, тем она больше. Регулировка ослабления может осуществляться перемещением пластины внутри волновода от узкой стенки (волна H_{10}) по направлению к середине широкой стенки.

1.6 Направленные ответвители (вид Э5)

В измерительных приборах и схемах широкое применение находят направленные ответвители - устройства, предназначенные для ответвления части СВЧ энергии, распространяющейся по основному тракту во вспомогательную линию в определенном направлении.

Направленный ответвитель состоит из двух отрезков линии передачи - основного и дополнительного, имеющих общую стенку. Направленное ответвление осуществляется при помощи одного, двух и более отверстий связи

в общей стенке. Число отверстий и их величина определяют степень связи между линиями и диапазонность устройства.

Направленные ответвители характеризуются обычно двумя параметрами: переходным ослаблением или переходным затуханием S , которое определяется соотношением

$$S = 10 \cdot \lg \frac{P_{\text{вх}}}{P_{2\text{вых}}}, \quad (1.4)$$

где $P_{\text{вх}}$ - мощность на входе направленного ответвителя, $P_{2\text{вых}}$ - мощность на выходе дополнительного волновода при наличии бегущей волны в основном волноводе.

1.7 Рупорная антенна (вид Пб)

Для создания направленного излучения радиоволн часто применяют рупорные антенны или кратко рупоры. Рупоры особенно удобны для измерений в сантиметровом диапазоне радиоволн (СВЧ), поскольку в конструктивном отношении они хорошо сочетаются с волноводами, являясь как бы их естественным продолжением. Рупор дает более направленное излучение, чем открытый конец волновода, так как благодаря рупору площадь излучающего отверстия возрастает. Кроме того, рупор улучшает согласование открытого конца волновода с открытым пространством, благодаря чему от генератора отбирается большая мощность и излучаемая мощность растет.

Основные свойства рупоров легко понять и даже приближенно рассчитать, если рассматривать его как постепенно расширяющийся волновод.

В настоящее время, наибольшее применение получил пирамидальный (конический) рупор, который является равномерно расширяющимся волноводом, как по узкой стенке, так и по широкой. При этом в расширяющейся части рупора возможно появление высших типов колебаний как H_{mn} так и E_{mn} типов. В этом смысле, рупорную антенну нельзя считать широкополосной и желательно измерения проводить на фиксированной частоте. В этом случае,

волноводная волна, приходящая к горлу рупора, почти полностью преобразуется в соответствующую рупорную волну и наоборот.

Наилучшего согласования выходного сопротивления рупора со свободным пространством можно достичь, если угол раскрыва рупора изменяется по логарифмическому закону, особенно в длинноволновой части СВЧ диапазона.

Выпускаемые промышленностью рупорные антенны П6-12 ÷ П6-22 имеют стандартные волноводные разъемы на выходах (горловинах).

Основной характеристикой рупора является действующая площадь, которая в общем случае не совпадает с площадью раскрыва.

2. Лабораторные работы

2.1 Измерение диаграммы направленности ДН и коэффициента усиления КУ пирамидального рупора

Цель работы

- 1) Изучение основ техники измерения диаграмм направленности и коэффициента усиления антенн.
- 2) Исследование направленных свойств рупорной антенны.

Введение

Волноводно-рупорные антенны являются широкополосными устройствами, обеспечивающими полуторное перекрытие по диапазону, с низким уровнем бокового излучения. Они распространены в сантиметровом диапазоне волн. Рупорные антенны представляют собой волновод с плавно увеличивающимися размерами поперечного сечения. Конструкция рупоров достаточно проста, они используются как в качестве самостоятельных антенн, в частности при проведении измерений ДН и КУ, так и в качестве облучателей

более сложных антенн, например рупорно-параболических, рупорно-линзовых и др..

Существующие типы рупоров можно разделить на пирамидальные, секториальные, конические и их разновидности. У секториальных рупоров расширяется одна пара стенок, в зависимости от того, в какой плоскости происходит расширение, различают Е-секториальные и Н-секториальные рупора. Распределение амплитуд поля в раскрыве рупора такое же, как и у питающего волновода – при возбуждении волной типа Н₁₀ направления векторов поля имеют следующую ориентацию. (рисунок 2.1)

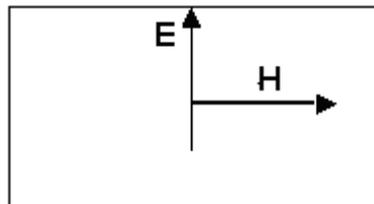


Рисунок 2.1

В плоскости Е раскрыва рупора распределение поля равномерное, а в плоскости Н- косинусоидальное. Размеры пирамидального рупора выбирают по требуемой ширине ДН в соответствующей плоскости.

При синфазном возбуждении ширина ДН связана с размерами раскрыва a_p и b_p следующим образом:

в плоскости вектора Н

$$2\varphi_{0,5} = 67.6 \frac{\lambda}{a_p}, \text{ град} \quad (2.1)$$

в плоскости вектора Е

$$2\theta_{0,5} = 51 \frac{\lambda}{b_p}, \text{ град} \quad (2.2)$$

Однако, поле в раскрыве рупора в принципе несинфазно. Это можно объяснить тем, что центральный и периферийные лучи проходят разные пути от горловины до раскрыва рупора. За счет этого фазы поля на краях рупора будут иными, чем в центре, и возникают фазовые ошибки.

Чем больше угол раскрыва рупора, тем больше разность хода между центральным лучом и периферийным лучом, приходящим к краю раскрыва, и тем больше фазовые искажения на его краях $\psi = k\Delta r$. на его краях. Фазовые искажения в раскрыве рупора подчинены приблизительно квадратичному закону. В секториальных рупорах получается цилиндрический фронт волны, в пирамидальных - сферический фронт. Нарушение синфазности излучающей поверхности приводит к искажениям ДН рупора. Вследствие этого происходит расширение главного лепестка ДН, увеличивается интенсивность боковых лепестков, исчезают нулевые провалы между лепестками. В плоскости Е (при равномерном амплитудном распределении) ДН искажается больше, чем в плоскости Н (при косинусоидальном распределении).

Рупоры, размеры которых соответствуют максимальному значению КНД, называются оптимальными. И для оптимального рупора фазовые ошибки в плоскости Е не превышают 90° , а в плоскости Н 135° .

Коэффициент направленного действия оптимального рупора можно вычислить по формуле:

$$D = \frac{4\pi S}{\lambda^2} \nu \quad (2.3)$$

где S - площадь раскрыва; λ - длина волны; ν - коэффициент использования поверхности.

Для оптимального рупора $\nu = 0.61$.

В случае, когда размеры рупора отличны от оптимального, коэффициент направленного действия пирамидального рупора вычисляется по следующей формуле:

$$D = \frac{\pi\lambda^2}{32a_p b_p} D_E D_H \quad (2.4)$$

где D_E -КНД Е – секториального рупора, D_H -КНД Н-секториального рупора.

Коэффициент усиления рупора, как и любой антенны, связан с коэффициентом направленного действия соотношением

$$G = D \cdot \eta, \quad (2.5)$$

η - коэффициент полезного действия антенны.

Для рупоров КПД практически равен 1.

Существенным недостатком рупорных антенн является сравнительно большая длина рупоров, которая пропорциональна квадрату размеров раскрыва. Это накладывает ограничения на использование рупоров в качестве остронаправленных антенн, поэтому рупорные антенны применяются в случаях, когда не требуется очень направленная ДН. Частотный диапазон рупорной антенны ограничен только питающим волноводом.

Методика измерений

Соберите схему измерения ДН. Схема измерения (рисунок 2.2) включает в себя генератор (Г), передающую антенну (А1), испытываемую антенну (А2), амперметр (А).

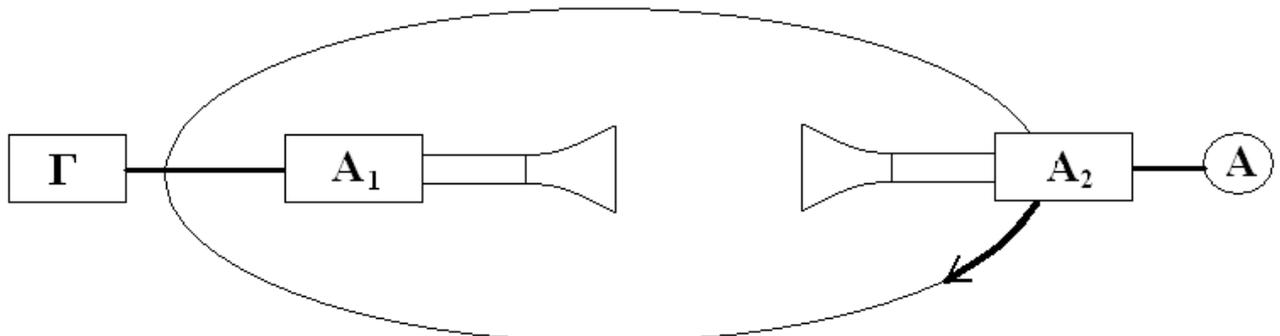


Рисунок 2.2 – схема измерения ДН

Установите в качестве излучающей антенны рупорную антенну; испытываемую рупорную антенну установите на опорно-поворотное устройство (ОПУ), позволяющее снимать ДН антенны в горизонтальной плоскости в секторе углов от 0 до 360 градусов. Расстояние между антеннами должно соответствовать дальней зоне излучения. Ориентация вектора E вертикальная.

Начальная установка антенны на ОПУ для удобства отсчета углов и ориентация осей антенн в пространстве представлена на рисунке 2.3.

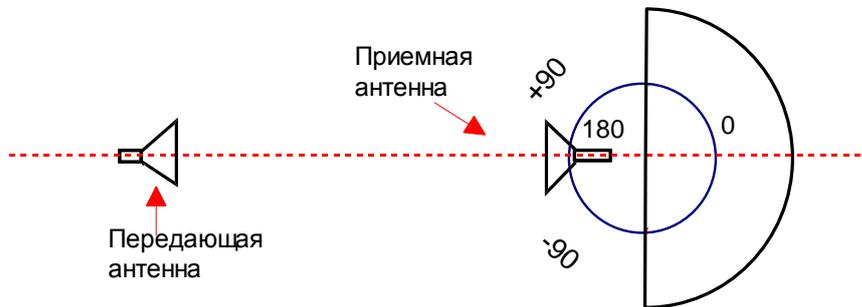


Рисунок 2.3 - начальная установка антенны на ОПУ

Установите частоту генератора, указанную преподавателем (4,5-5 ГГц), сигнал непрерывный. Вращая ОПУ вокруг осей, определите с помощью амперметра направление максимального сигнала. Вращать ОПУ вокруг горизонтальной оси в секторе углов $\pm 90^\circ$ через 5-15 градусов, относительно сигнала, соответствующего главному максимуму, по линейной шкале для каждого отчета углов в децибелах.

Разверните рупор на 90° , повторите измерения в плоскости Е.

Пронормируйте измеренные значения относительно максимального.

Постройте зависимости полученных значений от углов для обеих плоскостей и из графика определите ширину по уровню -3 дБ, сравните с расчетным значением.

Измерение коэффициента усиления проводится методом сравнения с эталонной антенной. Метод сравнения заключается в сравнении коэффициента усиления исследуемой антенны с коэффициентом усиления эталонной антенны, в качестве которой обычно используется оптимальный пирамидальный рупор. В методе сравнения при ориентации измеряемой антенны главным максимумом на облучающую антенну измеряют мощность сигнала ($P_{и}$) на выходе антенно-фидерного тракта. Затем, не меняя уровня излучаемой мощности, чувствительности приемника, на место измеряемой антенны устанавливают эталонную (образцовую) антенну с аттестованным $G_{эт}$, эта-

лонную антенну ориентируют главным максимумом на облучающую антенну, измеряют мощности амплитуды ($P_{эт}$) сигнала. Значение КУ испытываемой антенны определяется из соотношения $G_u = G_{эм} + (P_u - P_{эм}), дБ$.

Порядок работы

1. По формулам (1.1) и (1.2) рассчитать ширину ДН рупора в плоскостях Е и Н, исходя из размеров рупора.
2. Измерить и построить диаграммы направленности в двух ортогональных плоскостях (Е-и Н-плоскости), определить ширину ДН по уровню $0,5 P_{max}$ (-3 дБ по мощности) по данным эксперимента.
3. Измерить значение КУ.

Содержание отчета

Титульный лист, цель работы, краткое описание принципа действия рупорных антенн, схема измерения, таблицы измеренных значений, графики ДН в декартовой системе координат, выводы.

Контрольные вопросы

1. Область применения рупорных антенн, типы рупорных антенн.
2. Каково распределение амплитуд электромагнитного поля в раскрыв рупорной антенны, как оно связано с распределением в питающем волноводе?
3. Из-за чего возникают фазовые искажения в раскрыве рупора?
4. Как определяется ширина ДН по уровню половинной мощности в Е- и Н-плоскостях?

5. Что такое оптимальный рупор?
6. Что такое коэффициент усиления, КНД?
7. Чему равен коэффициент полезного действия рупора?
8. Как влияют фазовые искажения в раскрыве рупора на ДН?
9. Фазовые искажения для оптимального рупора?
10. Сущность измерения КУ методом сравнения с эталонной антенной.

2.2. Исследование поляризационной характеристики антенны

Цель работы

Целью данной лабораторной работы является экспериментальное исследование поляризационной характеристики рупорной антенны.

Введение

Поляризационная характеристика (ПХ) – это кривая, описываемая концом вектора напряженности электрического поля за период высокой частоты в данной точке пространства.

В общем случае ПХ представляет собой эллипс. При распространении в воздухе поле на больших расстояниях от антенны чисто поперечное, и поляризационный эллипс (ПЭ) лежит в плоскости, перпендикулярной направлению распространения (вектору Пойнтинга) (рисунок. 2.4).

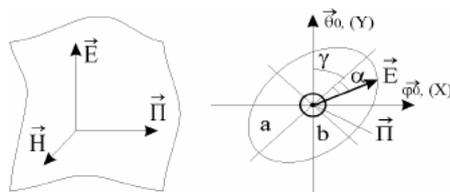


Рисунок. 2.4 – ПХ в общем виде
ПЭ определяется следующими параметрами:

- коэффициентом равномерности (эллиптичности), равным отношению малой полуоси эллипса к большой: $r = b/a$

- углом γ , который большая полуось эллипса образует с направлением орта θ сферической системы координат (или с осью OY декартовой системы координат); этот угол называют углом ориентации (или углом поляризации);

- углом α , который образует вектор E поля с большой полуосью эллипса в момент начала отсчета времени; этот угол называют начальной фазой поляризации;

- направлением вращения вектора E поля – правым или левым;

если в уходящей волне вектор E вращается по часовой стрелке, то направление вращения будет правым, а если против часовой стрелки левым.

Эллиптически поляризованное поле представляют в виде комплексного вектора:

$$\vec{E} = \vec{\varphi}^0 E_\varphi + \vec{\theta}^0 E_\theta \quad \text{или} \quad \vec{E} = \vec{i}^0 E_x + \vec{j}^0 E_y$$

где E_φ и E_θ – комплексные амплитуды ортогональных линейно-поляризованных компонент электрического вектора в сферической системе координат; E_x и E_y – аналогичные величины в декартовой системе координат.

Поляризация поля полностью определяется поляризационным отношением:

$$\dot{p} = \frac{E_\varphi}{E_\theta} = \left| \frac{E_\varphi}{E_\theta} \right| \exp i \cdot (\psi_\varphi - \psi_\theta) \quad \text{или} \quad \dot{p} = \frac{E_x}{E_y} = \left| \frac{E_x}{E_y} \right| \exp i \cdot (\psi_x - \psi_y)$$

где E_φ , E_θ и ψ_φ , ψ_θ – амплитуды и начальные фазы линейно-поляризованных компонент в сферической системе координат; E_x , E_y и ψ_x , ψ_y – аналогичные величины в декартовой системе координат.

Анализ выражения (1.10) позволяет установить следующее:

1. При $\Delta \psi = \Psi_x - \Psi_y = n\pi$, $n = 0, 1, 2, \dots$ волна будет линейно-поляризованной с результирующим вектором E , наклоненным к оси OY , с углом наклона, зависящим от отношения $|E_x/E_y|$. При $|E_x| > |E_y|$ вектор E будет ближе к оси OX , а при $|E_x| < |E_y|$ - ближе к оси OY .

2. При $\Delta \Psi = (2n+1)\pi/2$, $|E_x| \neq |E_y|$ волна будет эллиптически поляризованной с ориентацией осей эллипса по OX и OY . При $|E_x| > |E_y|$ большая ось эллипса будет ориентирована по оси OX , а при $|E_x| < |E_y|$ - по оси OY .

3. При $\Delta \Psi = \pi/2$, $|E_x| = |E_y|$ волна будет круглополяризованной.

4. При $\Delta \Psi = \pi \cdot n$, $\Delta \Psi \neq (2n+1)\pi/2$ волна будет эллиптически поляризованной с коэффициентом равномерности γ и углом ориентации γ , зависящими как от соотношения амплитуд $|E_x|$ и $|E_y|$, так и от соотношения начальных фаз Ψ_x и Ψ_y .

Во многих практических применениях используются антенны, создающие волны с круговой поляризацией. Круглополяризованные волны получаются в результате сложения двух волн при следующих условиях:

- а) волны имеют равную частоту;
- б) плоскости поляризации составляющих волн взаимно перпендикулярны;
- в) интенсивность составляющих волн одинакова;
- г) между составляющими имеется постоянный сдвиг по фазе, равный $\pi/2$.

На рисунке. 2.5 показан процесс получения волн с круговой поляризацией как результат сложения двух волн, удовлетворяющих вышеперечисленным условиям.

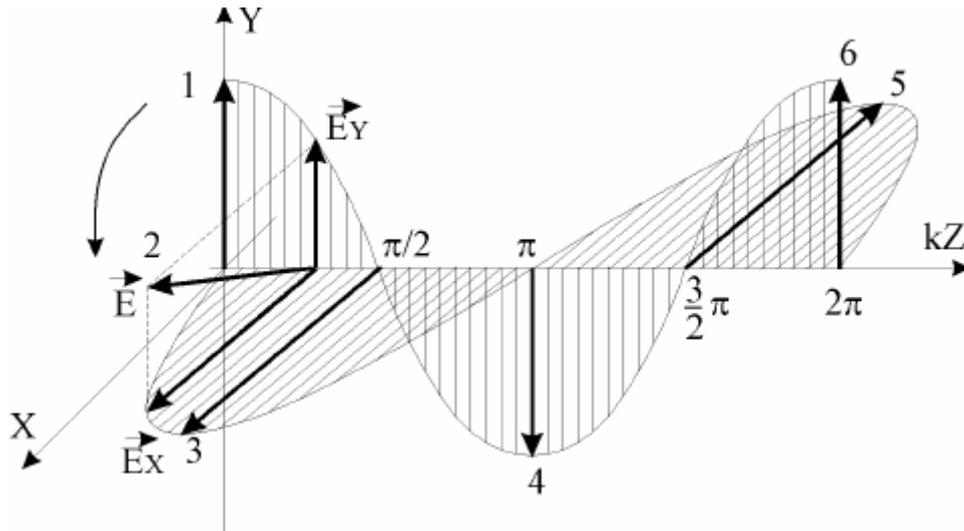


Рисунок. 2.5

Методика измерений

Соберите схему измерения ДН. Схема измерения (рисунок 2.6) включает в себя генератор (1), передающую антенну (2), испытываемую антенну (3), амперметр (4).

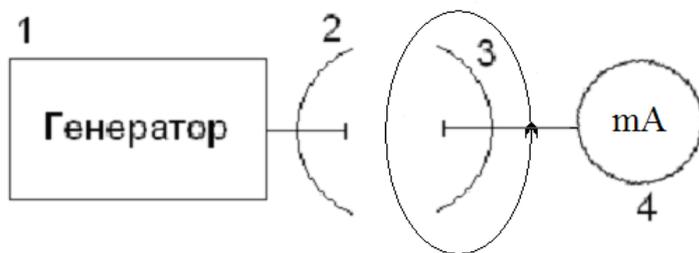


Рисунок. 2.6

Установите в качестве приемной антенны рупорную антенну на опорно-поворотное устройство, обеспечивающее вращение вокруг вертикальной оси и вокруг продольной оси антенны; испытываемую антенну установите на опорно-поворотное устройство (ОПУ), обеспечивающее вращение антенны в горизонтальной плоскости в секторе углов от 0 до 360 градусов. Расстояние между антеннами должно соответствовать дальней зоне излучения. Начальная установка антенны на ОПУ для удобства отсчета углов и ориентация осей антенн в пространстве представлена на рисунке 2.7.

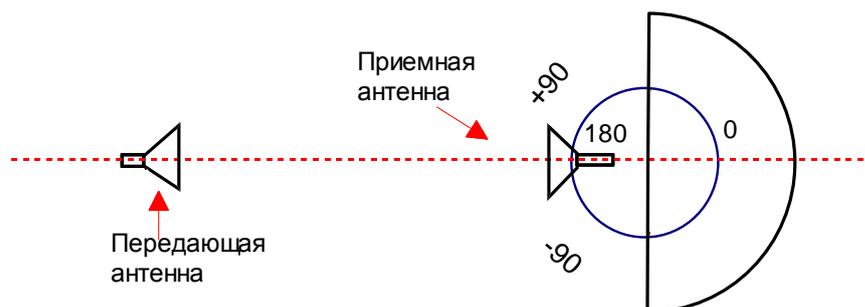


Рисунок. 2.7

Установите частоту генератора, указанную преподавателем, сигнал непрерывный. Вращая рупор вокруг продольной оси, определяем отношения компонент электрического поля для направления главного.

Вращая ОПУ вокруг осей, определите направление максимального сигнала. Вращая испытываемую антенну вокруг оси в секторе углов $\pm 90^\circ$ через 10 градусов, определять уровни сигнала для каждого отчета углов.

Порядок работы

1. Производится подбор расстояния и угла между антеннами для достижения в точке приёма максимального значения амплитуды поля (в нашем случае об уровне поля мы можем судить по току, отображаемому стрелочным прибором).

2. Производится вращение приёмной антенны и записываются значения тока, соответствующие некоторым углам поворота приёмной антенны.

Содержание отчета

Титульный лист, цель работы, схема измерения, таблицы измеренных значений, выводы.

Контрольные вопросы

1. Области применения эллиптически поляризованных антенн их достоинства.
2. Разновидности поляризации.

3. Основные параметры, характеризующие поляризованное поле?
4. Преимущества поляризованных антенн.
5. Недостатки поляризованных антенн.
6. При каком условии эллиптическая поляризация превращается в круговую?
7. Что такое поляризационная диаграмма?
8. Как измеряется поляризационная диаграмма?
9. Поле какой поляризации принимает рупорная антенна?
10. Какую траекторию описывает магнитная составляющая эллиптически поляризованного поля?

2.3 Миноискатель Литта

Цель работы:

Исследование изделия «Литта»:

- её технических требований; принципов работы каналов и режимов обнаружения;
- состава изделия;
- чувствительности при различных режимах работы.

Работа изделия

Изделие Литта представляет собой устройство, состоящее из двух независимых, одновременно работающих приборов (каналов), размещенных в одном корпусе - радиоволновый канал и индукционный канал. Индукция срабатывания каналов осуществляется по схеме "ИЛИ- И", что достигается за счет разных тонов звучания -высокого и низкого.

Принцип работы индукционного канала:

В основу работы индукционного канала заложен индукционный импульсный метод переходный процессов. Этот метод основан на измерении неустановившегося электромагнитного поля вихревых токов, наведенных в проводящем материале (металле) объекте поиска после ступенчатого изменения (отключения) в некоторый момент времени первичного возбуждающего электромагнитного поля. При резком отклонении первичного поля в поверхностном слое проводящего объекта возникают токи, стремящиеся сохранить внутри проводника первичное поле и постепенно затухающие вследствие тепловых потерь.

Функция возбуждения первичного поля и преобразования имеющегося (нестационарного) вторичного поля в электрический сигнал выполняет датчик индукционного канала (Б) схема электрическая функциональная), который состоит из многовитковых генераторной(1), приемной(Н) катушек ин-

дуктивности рамочной конструкции и располагается в корпусе поискового элемента (ПЭ) изделия Литта.

Во время работы изделия через катушку I периодически пропускаются импульсы тока $1(1)$ амплитудной $(0.8-1)$ А, длительностью $(75-81)$ мкс и частотой следования 400 Гц. При этом в пространстве, окружающем датчик, возбуждается импульсное первичное поле $11(1)$. Если в этом поле находится металлический предмет, то он в свою очередь становится источником вторичного поля, затухающего от максимального значения, соответствующего наибольшей скорости отключения первичного поля, до минимального, обусловлено внешними полями (шумами).

Всякий раз, после ступенчатого отключения первичного поля, возникающее вторичное поле проводящего объекта возбуждает в приемной катушке II ЭДС, затухающую от максимального значения в момент отключения первичного поля до максимального значения соответствующего уровню шумов.

Скорость спада зависит от геометрических размеров, электрических свойств проводящего объекта, а также от взаимного расположения объекта и датчика.

Измеряя блоком обработки сигналов, мгновенные значения переходного процесса в заданные моменты времени между импульсами возбуждения можно судить о наличии или отсутствии металлического объекта в зоне датчика.

Принцип работы радиоволнового канала:

Работа радиоволнового канала основана на регистрации результата взаимодействия первичного электромагнитного поля, создаваемого излучателем (генератор ВЧ с антенной) с контролируемой средой (грунт, снег, вода). Регистрация осуществляется с помощью двух идентичных приемников (антенна с детектором), расположенных симметрично относительно излучателя с дифференциальным включением детекторов.

Над однородной контролируемой средой дифференциальная сумма сигналов с приемников равна нулю. Неоднородность контролируемой среды по диэлектрической проницаемости или электропроводности, расположенная под одной из приемных антенн, вызывает неравенство сигналов на приемных антеннах. По форме, длительности и амплитуде дифференциального сигнала можно судить о характере неоднородности.

Технические требования:

1. Изделие обнаруживает объекты из металла и диэлектрика или содержащие одновременно металл и диэлектрик, установленные в укрывающие среды:

Индукционным каналом - объекты из металла диаметром 80-50 мм на дальности не менее 10 см;

Радиоволновым каналом - объекты из диэлектриков (цилиндр из стеклопластика, заполненный парафином диаметром 300-100 мм, установленные в грунт на глубину до 10 см; индукционным каналом объекты из металла диаметром 300-100 мм на поверхности дна водоемов глубиной до 1 м. При этом дальность обнаружения в воде должна быть не менее 30 см;

2. Факт обнаружения неоднородности, содержащий металл, сопровождается подачей звукового сигнала низкой частоты (400 Гц).

3. Обнаружение неоднородности, не содержащей металл, сопровождается подачей звукового сигнала высокой частоты (1600 Гц).

4. По условиям эксплуатации на климатические и механические воздействия и по надежности изделие соответствует требованиям военных стандартов. Диапазон рабочих температур от минус 30°C до плюс 50°C.

5. Контроль качества источников тока осуществляется автоматически.

При снижении напряжения батарей ниже допустимого в головных телефонах появляется сигнал низкой частоты (400 Гц). В изделии предусмотрена защита электронной схемы от неправильного подключения источника питания (смены полярности).

6. Время готовности изделия к работе с момента включения не превышает 1 мин.

Назначение режимов работы

В зависимости от условий работы, поставленной задачи и индивидуальных особенностей оператора поиск объектов может производиться в одном из пяти режимов. В МУ режимах изделие обеспечивает поиск, как металлодержащих объектов, так и поиск объектов, не содержащих металл. При этом чувствительность изделия к объектам, не содержащим металл, возрастает от I режима к IV. V режим предназначен для поиска только металлодержащих объектов на всех типах грунтов и воде на бродах.

Чувствительность изделия к металлодержащим объектам во всех режимах остается постоянной.

I-II - режимы работы предназначены для поиска неоднородностей в сухом снегу и сухом грунте.

II-III -режимы работы предназначены для поиска неоднородностей в сыром снегу, сыром грунте.

IV - режимы работы предназначены для поиска неоднородностей, находящихся под водой, при этом ПЭ должен находиться на расстоянии (2+1) см над поверхностью воды.

Порядок проведения работы

1. Изучить инструкцию по применению прибора.
2. Привести прибор в рабочее состояние (по инструкции).
3. Освоить работу прибора.
4. Изучить работу прибора в I - IV режимах.
5. Измерить чувствительность прибора к различным пробным телам (по заданию преподавателя)
6. Разобрать прибор и поместить его в штатную упаковку
7. Составить отчет о проделанной работе.

8. Отчет должен содержать результаты работ по каждому пункту.

2.4 Измерение параметров слоистых сред

Цель работы.

Целью данной работы является изучение теоретических и практических способов измерения параметров слоистых сред радиолокационным методом с помощью различных типов антенн.

Основные положения.

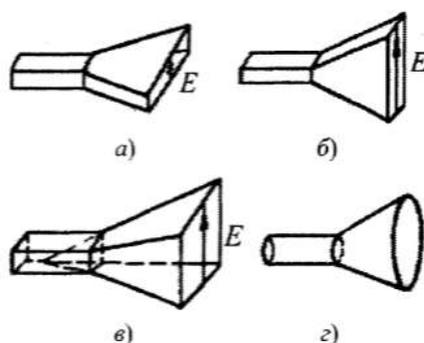


Рисунок 2.8– Рупорные антенны:

а) – *H*-секториальный рупор; б) – *E*-секториальный рупор; в) – пирамидальный; г) - конический

Как известно из курса АиУСВЧ, рупорная антенна образуется в результате расширения прямоугольного или круглого волновода. Основные типы рупорных антенн показаны на рисунке 2.8. На практике наиболее часто используются пирамидальные и секториальные рупоры. Конические рупоры из-за неустойчивости плоскости поляризации и наличия кроссполяризационных потерь применяются реже.

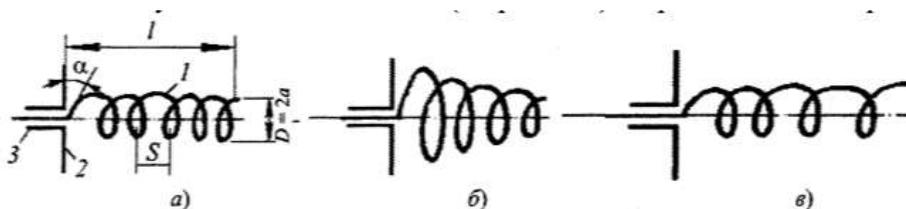


Рисунок 2.9 – Спиральные антенны:

а) – цилиндрическая регулярная; б,в) – нерегулярные (соответственно коническая и цилиндрическая)

Спиральная антенна представляет собой намотанную из провода цилиндрическую спираль 1 длиной несколько λ , один конец которой свободен, а другой соединяется с внутренним проводником коаксиальной линии 3. Внешний проводник коаксиальной линии присоединяется к металлическому диску (экрану) 2, служащему для ослабления обратного излучения антенны.

Приборы, используемые в работе

- 1 индикатор КСВН и ослабления Я2Р-67;
- 2 генератор качающей частоты (ГКЧ57);
- 3 антенны типа «прямоугольный рупор»;
- 4 направленные ответвители.;
- 5 коаксиальные кабели

Домашнее задание

- 1 Ознакомиться с принципом действия, функциональной схемой и техническими характеристиками индикатора КСВН и ослабления Я2Р-67;
- 2 Ознакомиться с принципом действия, функциональной схемой и техническими характеристиками генератора качающей частоты (ГКЧ57);
- 3 Изучить, как производится калибровка оборудования;

Контрольные вопросы

- 1 Что такое КСВН?
- 2 Что такое коэффициент отражения? В чем измеряется?
- 3 Какие типы антенн вы знаете?
- 4 Какой тип антенн имеет наибольшую полосу пропускания?
- 5 Чем обуславливается полоса пропускания антенн?
- 6 Что такое КНД?

Лабораторное задание

Теоретическая часть:

1. Произвести расчеты размеров рупорной антенны, с заданными техническими характеристиками исходя из заданного преподавателем варианта задания.
2. Произвести теоретический расчет коэффициентов отражения в программном обеспечении «MathCad» для различных толщин исследуемого объекта (10см, 20см, 30см);
3. По результатам п. 6.2 выполнить построение графиков зависимости коэффициентов отражения от частоты. Сделать выводы по полученным графикам. Вставить полученные результаты в отчет.

Практическая часть:

4. Собрать измерительную установку для проведения калибровки как показано на рисунке 2.10. Произвести калибровку измерительной установки;
5. Собрать измерительную установку для измерения КСВН как показано на рисунке 2.11. Произвести измерения КСВН для каждой из антенн. Сделать выводы исходя из полученных результатов.
5. Собрать измерительную установку для измерения КСВН различных поверхностей как показано на рисунке 2.12. Провести измерения КСВН для различных толщин измеряемых объектов (10см, 20см, 30см). Зарисовать полученные на индикаторе кривые и записать полученные значения КСВН.
6. Рассмотреть различные схемы расположения антенн для проведения измерений (рис. 2.13). Сделать измерения КСВН для каждого типа подключения. Проанализировав полученные кривые выбрать наилучший тип подключения для проведения более точных измерений.
7. Результаты измерений внести в таблицу 1.

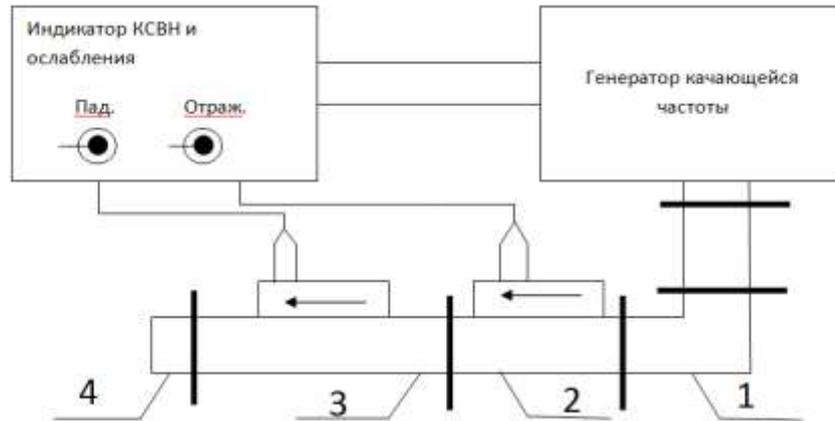


Рисунок 2.10 – Схема расположения прибора для калибровки

1- Коаксиальный переход; 2-детектор направленной падающей волны; 3-детектор направленной отраженной волны; 4-согласованная нагрузка.

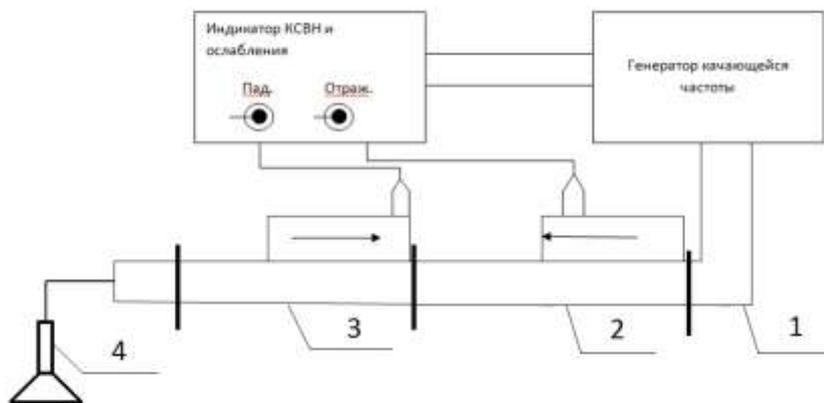


Рисунок 2.11– Схема расположения прибора для измерения КСВН антенны

1 – коаксиальный переход; 2-детектор направленной падающей волны; 3-детектор направленной отраженной волны; 5-антенна.

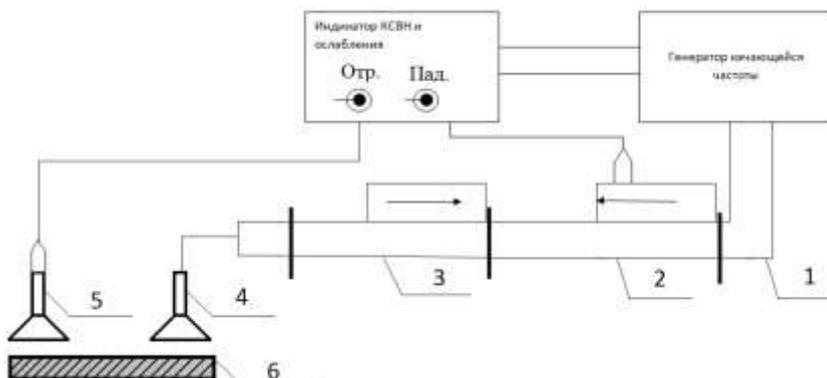


Рисунок 2.12 – Схема расположения прибора для измерения КСВН различных поверхностей

1-коаксиальный переход; 2-детектор направленной падающей волны; 3-детектор направленной отраженной волны; 4-антенна №1; 5- антенна №2; 6-исследуемый объект

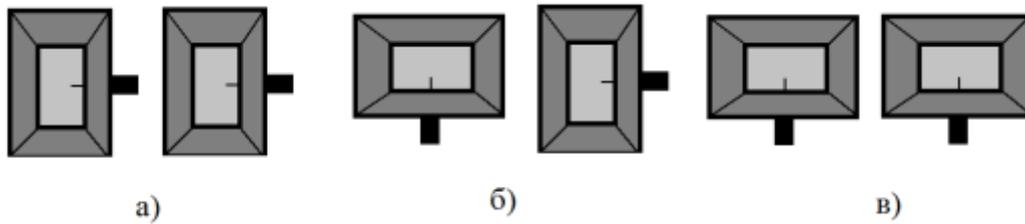


Рисунок 2.13 – Различные схемы подключения

а) последовательное; б) перпендикулярное; в) параллельное;

Таблица 1

| Тип подключения/КСВН | 10см | 20см | 30см |
|----------------------|------|------|------|
| Последовательное | | | |
| Перпендикулярное | | | |
| Параллельное | | | |

Методические указания по выполнению работы

1 Выбор размеров волновода:

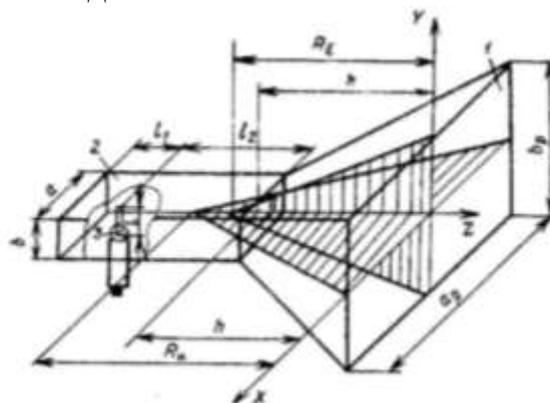


Рисунок 2.14 – Схема рупорной антенны

$$0.6\lambda \leq a \leq 0.9\lambda \quad (2.6)$$

$$b := \frac{a}{2} \quad (2.7)$$

Длину волны для заданной частоты определяем по формуле:

$$\lambda := \frac{c}{f} \quad (2.8)$$

Где $c=3 \cdot 10^8$ – скорость света в вакууме,

f – частота, заданная вариантом.

Ориентируясь на соотношения (2.6) и (2.7), определить a и b .

Выбор размеров рупора:

Для заданного варианта КНД, размеры раскрыва рупора определяются по графикам, изображенным на рис. 2.15 и рис. 2.16.

При КНД больше 20дБ, необходимо разделить его пополам и спроектировать две идентичные антенны, питающиеся синфазно.

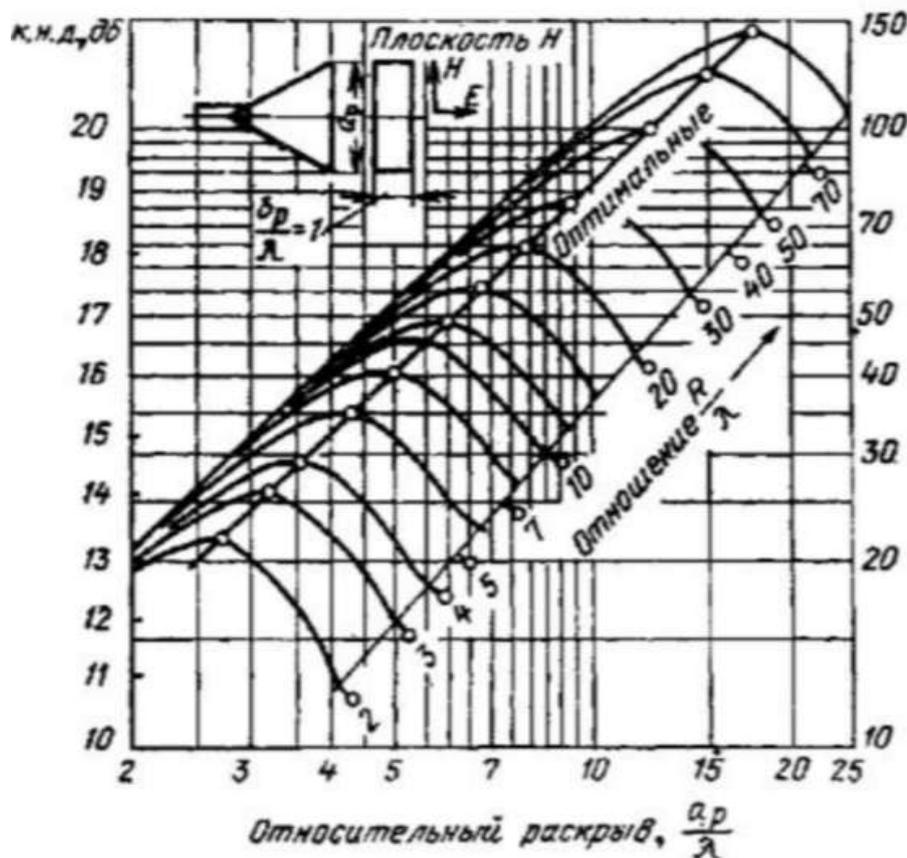


Рисунок 2.15 – КНД рупора в плоскости Н

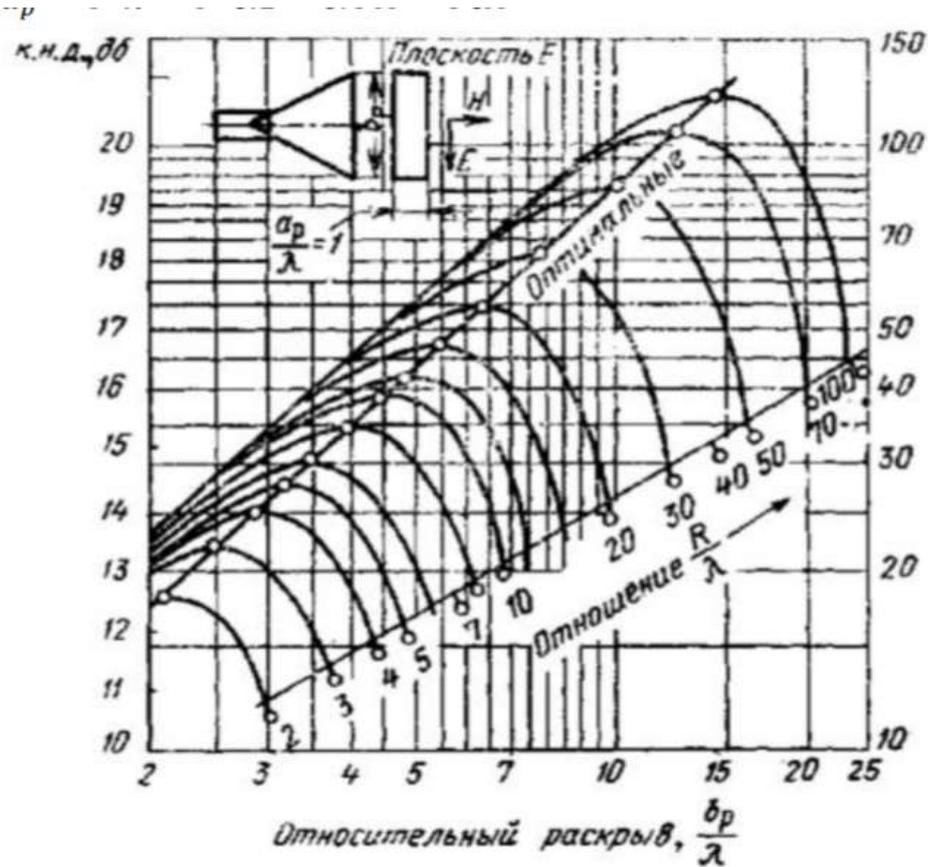


Рисунок 2.16– КНД рупора в плоскости E

При выборе длины пирамидального рупора следует обеспечить два условия:

- 1) Допустимая фазовая ошибка в раскрыве;
- 2) Правильная стыковка рупора с питающим волноводом.

Формула для допустимой фазовой ошибки в плоскости H имеет вид:

$$\psi_{\max} = \frac{\pi a_p^2}{4\lambda R_H} \leq \frac{3}{4}\pi, \quad (2.9)$$

Где R_H – длина рупора в плоскости H.

Формула для допустимой фазовой ошибки в плоскости E имеет вид:

$$\psi_{\max} = \frac{\pi b_p^2}{4\lambda R_E} \leq \frac{\pi}{2}, \quad (2.10)$$

Из выражений (2.9) и (2.10) получаем необходимые соотношения для определения длины рупора:

$$R_H = \frac{a_p^2}{3\lambda} \quad (2.11)$$

$$R_E = \frac{b_p^2}{2\lambda} \quad (2.12)$$

Полученные результаты заносятся в таблицу 2.

Таблица 2– Результаты вычислений

| | |
|-----------|--|
| a | |
| b | |
| λ | |
| a_p | |
| b_p | |
| R_H | |
| R_E | |

Расчёт коэффициентов отражения.

Для расчета КО, необходимо:

- 1) Открыть файл «Расчёт КО» в программном обеспечении MathCad;
- 2) Ввести диапазон частот, заданный вариантом;
- 3) Ввести поочередно толщины измеряемых слоев;
- 4) Выполнить построение графиков;
- 5) Исходя из числа минимумов сделать выводы о зависимости полученных графиков, от толщины измеряемых слоев;
- 6) Занести полученные графики в отчёт.

Калибровка.

Для проведения калибровки измерительной установки необходимо выполнить следующую последовательность действий:

1 Устанавливаем диапазон качания частоты, соответствующий диапазону указанному на блоке СВЧ;

2 Устанавливаем метки по краям экрана;

3 Устанавливаем визир индикатора на отметку $2-3\text{mV}$, вращая ручку «Отсчёт»;

4 С помощью ручки «Пад», добиваемся совмещения линии уровня падающей мощности с линией электронного визира;

5 Устанавливаем переключатель «Пределы» в положение 0;

6 Ручкой «Отсчёт» устанавливаем визир индикатора на отметку $+0,5\text{dB}$;

7 Вращая ручку «Калибр», совмещаем линию калибровки с линией электронного визира;

8 Выполнить пункты 4-7.

Для расчёта геометрических размеров спиральной антенны необходимо воспользоваться файлом «Расчёт спиральной антенны». Результаты работ вставить в отчёт.

9 Подготовить итоговый отчёт

3. Тесты

По дисциплине «Антенны и устройства СВЧ», по дисциплине

«Микроволновые антенны и устройства СВЧ»

Тестовые задания:

- 1 Линия передачи называется регулярной, если в продольном направлении: а) поперечное сечение удовлетворяет условию $S=\text{const}$; б) $\epsilon, \mu = \text{const}$; в) $S=\text{const}, \epsilon = \text{const}, \mu = \text{const}$; с) $\epsilon = \text{const}$.
- 2. Линии передачи СВЧ энергии бывают открытые и в виде волноводов. А к какому виду вы отнесете микрополосковую линию передачи?: а) открытой; б) закрытой; в) определяется конструкцией; с)

конструкцией и . 3. Различают следующие типы волн: Т – волны, Е – волны, Н – волны и гибридные ЕН и НЕ волны. А к какому типу волн вы отнесете волну, имеющую продольные составляющие ? а) гибридная волна; б) Т – волна; в) Е – или с) Н – волны. 4. Известно, что фазовая скорость волны равна скорости света в материальной среде, заполняющей волновод. Какой тип волны распространяется по волноводу?: а) гибридная волна; б) Е – или в) Н – волна; с) Т – волна. 5. Полые волноводы с Е - или Н – волнами относятся к дисперсионным линиям передачи, поскольку фазовая скорость зависит от величины: а) ϵ ; б) μ ; в) σ и с) отношения $\lambda_0 / \lambda_{кр}$. 6. Длина волны в волноводе с Е - или Н – волнами определяется а) ϵ ; б) μ ; в) σ и с) отношения $\lambda_0 / \lambda_{кр}$. б_А Максимальная пропускаемая мощность по линии передачи ограничивается: а) электрическим пробоем; б) тепловым разрушением; в) необоснованным уменьшением поперечного сечения. 7. Режим смешанных волн имеет место в волноводе при: а) наличии отраженной от нагрузки волны; б) наличии несогласованной нагрузки; в) появлении высших типов колебаний; с) наличие активной нагрузки. 8. Коэффициент бегущей волны не зависит от продольной координаты, если: а) отсутствует излучение из волновода; б) отсутствуют омические потери; в) линия передачи однородна; с) погонная реактивность равна нулю. 9. Коэффициент полезного действия линии передачи максимален, если: а) отсутствуют омические потери; б) ; в) . 10. Для достижения максимальной электрической прочности необходим: а) согласованный режим работы линии пере-

дачи; б) частотно независимый коэффициент отражения от нерегулярностей; в) по возможности минимальный КБВ; с) по возможности минимальная реактивность. 11. Различают фильтры нижней частоты (ФНЧ), фильтры верхней частоты (ФВЧ), полосно – пропускающие фильтры (ППФ) и полосно – запирающие фильтры (ПЗФ). А какой фильтр обозначает значок на схемах?: а) ПЗФ; б) ППФ; в) ФВЧ; с) ФНЧ. 12. Широкополосно – согласующие цепи обеспечивают: а) полосу частот при максимально достижимом КБВ; б) максимально высокий КБВ в заданной полосе частот; в) максимальную полосу согласования при заданном КБВ. 13. Схема замещения (прототипа) фильтра содержит: а) R, C – цепочки; б) R, L – цепочки; в) L, C – цепочки; с) L, C, R – цепочки. 14. По конструкции волноводные аттенюаторы внешне не отличаются от волноводного фазовращателя. А в чем состоит отличие?: а) по форме пластины диэлектрика; б) диэлектрическая пластина имеет большой тангенс угла диэлектрической проницаемости; в) используется пластина из поглощающего материала; используется магнитный материал. 15. Магнитная проницаемость намагниченного феррита имеет резонансный характер для: а) левополяризованной волны (наблюдатель смотрит по полю); б) правополяризованной волны; в) обоих видов поляризации; с) H_0 и H взаимно перпендикулярны. 16. Устройства с ферритами могут быть: а) взаимные; б) невзаимные; в) управляющие; с) показывающие. 17 Эффект Фарадея имеет место: а) при совпадении направления распространения волны с направлением поля подмаг-

ничивания б) при нормальном распространении волны; в) при наклонном падении волны на магнетодиэлектрик; с) независимо от ориентации. 18. В вентиле с резонансным поглощением на прямоугольном волноводе используется: а) продольно намагниченный ферритовый вкладыш; б) поперечно намагниченный ферритовый вкладыш; в) произвольно намагниченный ферритовый вкладыш; ферритовый вкладыш располагают по центру волновода. 19. В дециметровом СВЧ диапазоне, с учетом масса – габаритных размеров ферритового фильтра, предпочтение следует отдать фильтру на: а) прямоугольных волноводах; б) микрополосковых волноводах; в) коаксиальных волноводах; круглых волноводах. 20. По определению к линейным антенным решеткам относятся рассмотренные выше: а) протяженная щель в металлическом экране; б) директорная антенна; в) логопериодическая антенна; с) спиральная антенна. 21. Линейная излучающая система (антенная решетка) полностью определяется: а) ДН элементов системы; б) законом размещения центров излучателей вдоль оси; в) законом распределения комплексных амплитуд возбуждения по отдельным элементам; с) законом поляризации элементов. 22 В соответствии с теоремой перемножения, ДН линейной излучающей системы определяется: а) ДН элементарных излучателей; б) множителем направленности; в) коэффициентом замедления фазовой скорости волны; видом модуляции сигнала. 23 Для снижения уровня боковых лепестков необходимо: а) использовать неравномерное амплитудное возбуждение системы, спадающее

к краям антенны; б) использовать случайное фазовое искажение возбуждения; в) использовать направленные элементы решетки; с) использовать неравномерное амплитудное возбуждение системы, спадающее к центру антенн. 24 Для излучения круговой поляризации волноводно – щелевой антенной используют: а) продольную щель; б) поперечную щель; в) крестообразную щель; с) круглую щель.

Приложение 1

Инструкция по охране труда

П 1. Воздействие электромагнитных полей на живой организм

Ткани живого организма состоят из клеток с жидким содержимым и межклеточной жидкости. Внутриклеточная и межклеточная среды обладают удельным электрическим сопротивлением в (1-3) Ом·м и относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 80$. Оболочки (мембраны) клеток имеют удельное поверхностное сопротивление до $10 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$, их удельная поверхностная емкость $(0.1- 3)\cdot 10^{-10} \text{ Ф/м}^2$. Если такую ткань поместить в постоянное электрическое поле, то она в той или иной степени поляризуется: заряженные частицы - ионы (катионы), всегда имеющиеся в жидких средах тканей, вследствие электролитической диссоциации молекул - переместятся вдоль силовых линий поля в стороны полюсов, противоположные их зарядам дипольные молекулы примут ориентацию в том же направлении. Однако ионные токи будут протекать только по межклеточной жидкости, так как при постоянном напряжении мембраны клеток, являясь хорошим изолятором, надежно изолируют внутриклеточное содержимое. Однако при высоком постоянном напряжении возможен электрофорез - перемещение таких крупных заряженных частиц, как клетки и макромолекулы.

В переменных электромагнитных полях электрические свойства живых тканей оказываются зависящими от частоты, причем с возрастанием частоты они все больше теряют свойства диэлектриков и приобретают свойства проводников (например, мышцы при частоте 1 ГГц имеют $\text{tg}\delta = 5$). Изменение свойств с частотой происходит неравномерно. Это особенно заметно для

проводимости. До частот порядка 10^4 Гц имеет место плавное уменьшение ϵ и увеличение σ , в диапазоне от 10^4 до 10^5 Гц наклон кривых изменяется и при частотах 10^9 - 10^{10} Гц обнаруживается резкий скачок σ , кроме того, наблюдаются резонансные явления. На этих частотах возбужденные молекулы приходят в колебательное движение.

Поглощаемая тканями энергия электромагнитного поля превращается в тепловую энергию. На частоте примерно до 10 МГц размеры тела человека малы по сравнению с длиной волны, диэлектрические процессы в тканях выражены еще слабо. Поэтому можно считать тело человека однородным проводящим эллипсоидом. Если большая (продольная) ось тела параллельна силовым линиям электрической составляющей поля, в теле индуцируются наибольшие токи.

При более высоких частотах, особенно в диапазонах УВЧ и СВЧ, с длиной волны сравнимы и отдельные фрагменты тела, и толщины слоев тканей. В тканях становятся существенными и даже преобладающими диэлектрические потери, заметными оказываются и различия в свойствах тканей - тело уже нельзя считать однородным. Более того, подкожный жировой слой может играть роль четвертьволнового трансформатора, согласующего волновые сопротивления воздуха и мышечной ткани, граничащей с жировым слоем. При этом доля проходящей в тело человека энергии значительно возрастает. Например, при облучении на частоте 3 ГГц подкожный слой жира толщиной около 9 мм может быть таким трансформатором. Этим можно объяснить, что волны длиной (10÷30) см полностью поглощаются телом человека. При длинах волн (30÷100) см энергия поглощается в количестве 30- 40 %, но в основном во внутренних органах, и это определяет его наибольшую вредность как термогенного (разогрев тела) фактора. Излучение с длинами волн меньше 10 см в основном поглощается в слое кожи.

Пороговые интенсивности излучения, вызывающие тепловой эффект, уменьшаются с повышением частоты, так как коэффициент поглощения пропорционален частоте, а также удельной проводимости и диэлектрической проницаемости среды, которые у живых тканей в свою очередь являются функциями частоты.

Некоторые органы и ткани тела человека, обладающие (за счет сравнительно небольшого числа находящихся в них кровеносных сосудов или вследствие менее интенсивного кровообращения) слабо выраженным механизмом терморегуляции, более чувствительны к облучению, чем другие ткани и органы. Сюда относятся: мозг, глаза, почки, желудок, желчный и мочевой пузыри, семенники. Для них тепловой порог составляет всего 5 мВт/см^2 .

Однако исследования показали, что влияние электромагнитных полей высоких и особенно СВЧ частот на живой организм обнаруживается и при интенсивностях ниже тепловых порогов, то есть, имеет место нетепловое их воздействие. Это является результатом некоторых микропроцессов, протекающих в организме под действием полей.

Первый такой процесс состоит в том, что суспензированные частицы тканей, например, эритроциты и лейкоциты крови, выстраиваются в цепочки, вытянутые параллельно электрическим силовым линиям, вследствие чего структура и функции тканей изменяются.

Второй процесс определяется как поляризация боковых цепей макромолекул тканей и ориентация их вдоль поля, что может приводить к разрыву внутри- и межмолекулярных связей, к коагуляции молекул и изменению их свойств.

Третий процесс, обусловленный действием силы Лоренца, состоит в том, что положительные и отрицательные ионы в тканях- электролитах перемещаются перпендикулярно магнитным силовым линиям, в результате этого нарушаются химический состав и электрическое равновесие тканей.

Четвертый процесс - ранее рассмотренное резонансное поглощение энергии поля.

Отрицательное воздействие электромагнитных полей вызывает различные изменения в организме, которые могут быть обратимыми, а при больших интенсивностях облучения или при систематическом облучении с малыми, но выше предельно допустимых интенсивностями - необратимыми. Эти изменения могут быть морфологическими, то есть касающимися строения и внешнего вида тканей и органов тела человека: от ожогов, омертвлений, кровоизлияний, изменений структуры клеток и до умеренных или слабых, обратимых сосудистых изменений, расстройства питания тканей, органов или организма в целом.

Морфологические изменения чаще наблюдаются в тканях периферической и центральной нервной системе. При этом они нарушают ее регулярные функции, вызывая нарушение нервных связей в организме или даже изменения структуры самих нервных клеток. Такой характер морфологических изменений в нервной системе отмечается при воздействии полей самых различных частот, вплоть до постоянного магнитного поля, однако выраженность этих изменений различна: при миллиметровых волнах они локальны, имеют вид очагов, при сантиметровых концентрируются вокруг сосудов мозга, дециметровые и более длинные волны вызывают также нарушение питания тканей, органов или организма в целом. По суммарному влиянию на нервную систему наибольшим воздействием обладают дециметровые волны.

Необходимо особо отметить морфологические изменения, которые могут возникнуть в глазах и приводить в тяжелых случаях к катаракте (помутнению хрусталика). Эти изменения обнаружены при воздействии излучений с различными длинами волн - от 3 см до 20 м. Изменения возникали как при кратковременном облучении с высокой, термогенной интенсивностью (более 100 мВт/см^2) так и при длительном, до нескольких лет, облучении с интен-

сивностью несколько мВт/см², то есть много ниже теплового порога. Импульсное излучение оказывается более опасным для глаз, чем непрерывное.

Морфологические изменения в крови выражаются в изменениях ее состава и также свидетельствуют о наибольшем воздействии сантиметровых и дециметровых волн.

Другим видом изменений, вызываемых воздействием электромагнитных полей, являются изменения регуляторной функции нервной системы, что выражается в нарушении:

- а) ранее выработанных условных рефлексов;
- б) характера и интенсивности физиологических и биохимических процессов в организме;
- в) функций различных отделов нервной системы;
- г) нервной регуляции сердечно - сосудистой системы.

Результатом воздействия импульсных электромагнитных полей может быть также нарушение естественных биоэлектрических процессов в организме человека. Известно, что в организме человека существуют низкочастотные биотоки. Известно также, что, например, сердце генерирует электрические колебания с частотой от 30 до 700 Гц, а мозг - с частотами 200 - 500 Гц. Наконец, установлено, что некоторые элементы организма обладают свойствами детектора. В случае нахождения человека в потоке модулированных колебаний (особенно при импульсной модуляции, когда амплитуды модулированных колебаний могут в сотни раз превышать амплитуды колебаний непрерывного излучения при равных значениях средней по времени плотности потока энергии) в его организме могут детектироваться токи с частотой модуляции. При совпадении или кратности этой частоты частоте биотоков последние могут сбиваться, искажаться, что приводит к определенным нарушениям нормального функционирования организма.

Из физических принципов формирования и распространения электромагнитных волн непосредственно следует, что уменьшение напряженностей полей (ближняя зона) и плотности потока мощности излучения (дальняя зона) может быть достигнуто:

- 1) увеличением расстояния между излучающим устройством и защищаемым объектом;
- 2) уменьшением мощности излучения.

"Защита расстоянием" является наиболее простым и эффективным методом защиты. Он вполне применим для персонала, которому при выполнении работы нет необходимости находится вблизи источников излучения, а также в случаях возможности дистанционного управления излучающей установкой. В других случаях необходимо идти по пути уменьшения мощности излучения до предельного минимума, необходимого для проведения работ. Одним из таких путей является замена мощного основного генератора установки менее мощным вспомогательным, измерительным классом, если позволяет технология работ. В целом ряде случаев таким путем добиваются ослабления излучения при настройках, регулировках и испытаниях радиоэлектронной аппаратуры в процессе ее изготовления или установки на изделия - носители.

Другим путем косвенного уменьшения мощности излучения может быть применение специальных устройств, которые полностью поглощают, отражают или в необходимой степени ослабляют передаваемую энергию на ее пути от генератора к излучающему устройству, внутри последнего или, наконец, в пространстве, где находятся люди.

Благодаря весьма высоким коэффициентам поглощения и почти полному отсутствию волнового сопротивления металлы обладают высокой отражающей способностью и поэтому широко применяются для экранирования излучающих устройств.

В ряде случаев для экранирования излучения применяются металлические сетки (часто в целях экономии металла), которые позволяют производить наблюдение и осмотр экранированных устройств или вентиляцию пространства внутри замкнутых экранов.

Наличие отраженных волн внутри помещения в ряде случаев нежелательно и увеличивает вероятность облучения обслуживающего персонала. В этом случае отражающие предметы покрываются материалами, обладающие незначительной отражающей и большой поглощающей способностями.

Радиопоглощающие материалы изготавливаются в виде эластичных и жестких пенопластов, тонких листов, рыхлой сыпучей массы или заливочных компаундов. Большинство из них невоспламеняющиеся и огнестойкие. Обычно эти материалы отражают примерно 1 % падающей на них энергии, в некоторых случаях отражение может быть снижено до 0.01 - 0.001 %. Максимальная плотность поглощаемой мощности зависит от свойств материала - основы. Для радиопоглощающих материалов на основе каучука, поролон она составляет $0.155 \div 0.465 \text{ Вт/см}^2$, при полиуретановой основе она достигает 1.3 Вт/см^2 , а у пенокерамических материалов - 7.75 Вт/см^2 . Воздушное охлаждение задней поверхности материала может существенно увеличить плотность поглощаемой им энергии.

П 3. Защита от излучений радиотехнического оборудования и приборов

Работы по настройке, регулировке и испытаниям радиотехнических установок должны производиться в отдельных специально выделенных помещениях. Что же касается специальных помещений для настройки, отработки и испытаний СВЧ аппаратуры, то они должны отвечать целому ряду специфических требований.

Прежде всего, такие помещения должны быть изолированы от других помещений данного здания и иметь непосредственные выходы в коридор или наружу. Как правило, допуск лиц не связанный с обслуживанием аппаратуры в эти помещения не разрешается. Изнутри такие помещения должны быть экранированы, либо изолированы от смежных помещений радиопоглощающими материалами.

Весь комплекс мероприятий по защите от опасного облучения радиоволнами при выполнении работ по настройке, отработке, испытаниям и эксплуатации радиоизлучающей аппаратуры состоит из организационных (создание для этих работ наиболее благоприятных условий) и технических мер (применение средств общей и индивидуальной защиты).

Прежде всего, необходимо, чтобы технические меры защиты работающих были включены как составная часть в технологию выполнения работ и соответственно оформлены, то есть технологические карты должны содержать указания по применению в нужных случаях средств защиты и изменению технологического процесса в связи с этим.

Работа в условиях облучения, превышающего допустимые нормы, запрещается. Поэтому режим работы излучающих установок, направление излучения электромагнитных волн и меры защиты от облучения нужно выбирать такие, чтобы на любом рабочем месте в лаборатории максимальная интенсивность облучения не превышала предельно допустимые уровни.

Работы с излучающими установками должны производиться, насколько возможно, без излучения энергии в пространство (при выключенном генераторе) или при значительном ее ослаблении, с применением поглощающих нагрузок (эквивалент антенны).

Для понижения уровня мощности до необходимого значения применяются аттенюаторы. Аттенюаторы могут быть переменными или фиксированными. Выпускаемые промышленностью аттенюаторы диапазонов УВЧ и СВЧ позволяют ослабить в пределах от 0 до 120 дБ излучение с мощностью

до 100 Вт. Эффективность действия эквивалентов антенн и аттенуаторов, при правильном их использовании, позволяет в большинстве случаев ослабить поток мощности на рабочих местах до 10 мкВт/см^2 .

Если же технологический процесс не позволяет полностью избежать излучения в пространство или ослабить до безопасных уровней то для каждой излучающей установки, должна быть выделена зона излучения, вход в которую людей запрещен. На границах зон с плотностью потока мощности, превышающей предельно допустимую, нужно устанавливать ограждения или предупреждающие знаки с надписями "Не входить, опасно !".

П 4. Некоторые правила безопасности

Во время настройки, отработки и испытаний радиоизлучающих устройств нужно выполнять следующие правила:

1. Обязательно пользоваться соответствующими средствами защиты от облучения радиоволнами.
2. Направлять излучаемый антенной поток энергии только в пределы выделенной зоны (сектора) излучения.
3. Смотреть в открытый конец волновода или антенну по направлению ее оси при работе в режиме излучения только в крайних случаях и только при защищенных глазах - облучение глаз с интенсивностью выше 100 мкВт/см^2 опасно.
4. Определять наличие генерируемой мощность индикаторами поля (например, неоновой лампой).
5. Нельзя находиться в зоне (секторе) излучения.
6. Нельзя нарушать экранировку источников излучения и снимать защитные устройства.
7. Не допускать посторонних лиц в помещения, где ведутся указанные работы.

8. Не оставлять без надзора включенную установку.
9. Работа студентов (учащихся) в таких помещениях без преподавателя запрещена !

П 5. Средства индивидуальной защиты

При настройке антенно-фидерных устройств лицами, непосредственно выполняющим эти работы, следует пользоваться средствами индивидуальной защиты.

Применяемые на практике средства индивидуальной защиты от радиоволновых излучений в принципе представляют собой экраны, изготовленные из металлизированных материалов.

К средствам индивидуальной защиты относятся радиозащитные очки ОРЗ-5, радиозащитный капюшон, радиозащитный халат, радиозащитный комбинезон. Капюшон, халат и комбинезон изготавливают из металлизированной ткани с расстоянием между металлическими нитями не более 0.5 мм и способны ослаблять излучение с длинами волн больше 3.2 см на 20 дБ и более.

Средний вес индивидуальных средств защиты: металлизированных очков - 0.3 кг, капюшона - 0.52 кг, халата - 1.5 кг, комбинезона - 1.7 кг.

Каждое экранирующее защитное устройство, как общего, так и индивидуального пользования должно иметь технический паспорт с указанием допустимой мощности, диапазона частот или длин волн, на которые оно рассчитано, и места его применения.

Все постоянно используемые защитные устройства должны раз в два месяца проверяться на эффективность защиты от облучения в рабочих условиях при максимальных мощностях излучения. Результаты проверки заносятся в технический паспорт изделия.

Заключение

Учебный материал, изложенный в приложении: "Инструкция по охране труда", должен рассматриваться как обязательный, поскольку при проведении лабораторных занятий имеется два опасных фактора, высокое напряжение (свыше 1000 В) и ионизирующее излучение (СВЧ излучение). На это занятие должно быть отведено два часа аудиторных занятий с обязательным показом (демонстрацией) безопасных приемов работы.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баскаков С. И. Электродинамика и распространение радиоволн. М., Высшая школа, 1992.
2. Фальковский О. И. Техническая электродинамика. М., Связь, 1978.
3. Чернушенко А. М. и др. Конструкции СВЧ устройств и экранов. М., Радио и Связь, 1983.
4. Завьялов А. С., Дунаевский Т. Е. Измерение параметров материалов на СВЧ. Томск, Изд - во Томского университета, 1985.
5. Беляев Б. А. и др. Исследование микрополосковых резонаторов и устройств СВЧ на их основе, ч1, 2, 3. изд - во СОАН РФ, институт физики, Красноярск, 1987.
6. Крылов А. В., Юченков Т. В. Защита от электромагнитных излучений. М., Сов. радио, 1972.
7. Шостак А.С. Основы электродинамики и распространение радиоволн. Электромагнитные поля и волны. – Томск: ТУСУР, 2005.
8. Шостак А.С. Основы электродинамики и распространение радиоволн. Распространение радиоволн. – Томск: ТУСУР, 2005.
9. Грудинская Г.П. Распространение радиоволн. – М.: Высшая школа, 1967.
10. Ерохин Г.А. Антенно - фидерные устройства и распространение радиоволн. – М.: Горячая линия - Телеком, 2004.