

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО СВЯЗИ

**Федеральное государственное образовательное бюджетное
учреждение высшего профессионального образования
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ
им. проф. М.А. БОНЧ-БРУЕВИЧА»**

**РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН И АНТЕННО-
ФИДЕРНЫЕ УСТРОЙСТВА.**

Методические указания к лабораторным работам

СПб ГУТ)))

**Санкт-Петербург
2017**

УДК 621.396.67(076.5)

**ББК 3845я73
К 14**

Рекомендовано к печати редакционно-издательским советом СПбГУТ

Косарев А.В., Смирнов Р.В., Трещинская Г.И.

Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства : методические указания к лабораторным работам. *Косарев А.В., Смирнов Р.В.* – СПб.: Изд-во «Телеком» ГОУВПО СПбГУТ, 2017.- 61 с.

Содержатся методические указания по выполнению лабораторных работ по курсу «Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства» на учебном оборудовании, разработанном и изготовленном ООО «УМЦ СПбГУТ». Приведено необходимое описание измерительной аппаратуры, методики ее использования для измерения характеристик исследуемых антенн и элементов их конструкций. Приводятся пояснения принципов обработки результатов измерений. Предназначено для студентов, изучающих дисциплину «Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства».

Косарев А.В., Смирнов Р.В.2017
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Санкт-Петербургский государственный университет
Телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича», 2017

**Работа 1.
«ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НАПРАВЛЕННОСТИ
СИММЕТРИЧНЫХ ВИБРАТОРОВ».**

Цель исследований:

- исследование влияния на диаграмму направленности симметричного вибратора и симметричного вибратора с плоским металлическим экраном соотношения между длиной его плеча и длиной волны;
- исследование влияния на диаграмму направленности симметричного вибратора с плоским металлическим экраном соотношения между расстоянием между ним и экраном и длиной волны;
- исследование влияния на диаграмму направленности симметрирования питающей коаксиальной линией;
- исследование диапазонных свойств симметричных вибраторов;
- исследование поляризационных свойств симметричных вибраторов.

Методические указания по самоподготовке

При подготовке к выполнению лабораторной работы необходимо изучить [1, 2, 3, 4]:

- основные характеристики антенных устройств. Особое внимание обратить на определение амплитудной и фазовой диаграммы направленности антенны;
- конструкцию антенны «Симметричный вибратор»;
- основы теории симметричного вибратора. Особое внимание обратить на формирование его поля излучения в дальней (волновой) зоне и связь этого поля с распределением тока;
- особенности питания антенны «Симметричный вибратор».

Описание лабораторной установки.

Функциональная схема лабораторной установки показана на рис. 1.1. Она включает в себя две антенны – передающую и приемную, которые образуют радиолинию. Антенны обеспечивают работу в диапазоне 500 -1000 мГц.

Передающая антенна представляет собой симметричный вибратор с плоским экраном (1) и устройством симметрирования и согласования (3). Приемная антенна (2) отличается от передающей отсутствием экрана.

Обе антенны фиксируются во втулке подшипников трения (4), внешняя обойма которых крепится к диэлектрическим штангам (5). За счет подшипника обеспечивается возможность вращения антенн вокруг горизонтальной оси и изменения вида поляризации излучаемой волны. Этим обеспечивается возможность исследования диаграмм направленности в плоскостях Е и Н и исследование поляризационных свойств. Передающая антенна закреплена на штанге с помощью устройства, позволяющего менять ее наклон в вертикальной плоскости. На рис. 1.1 оно не показано.

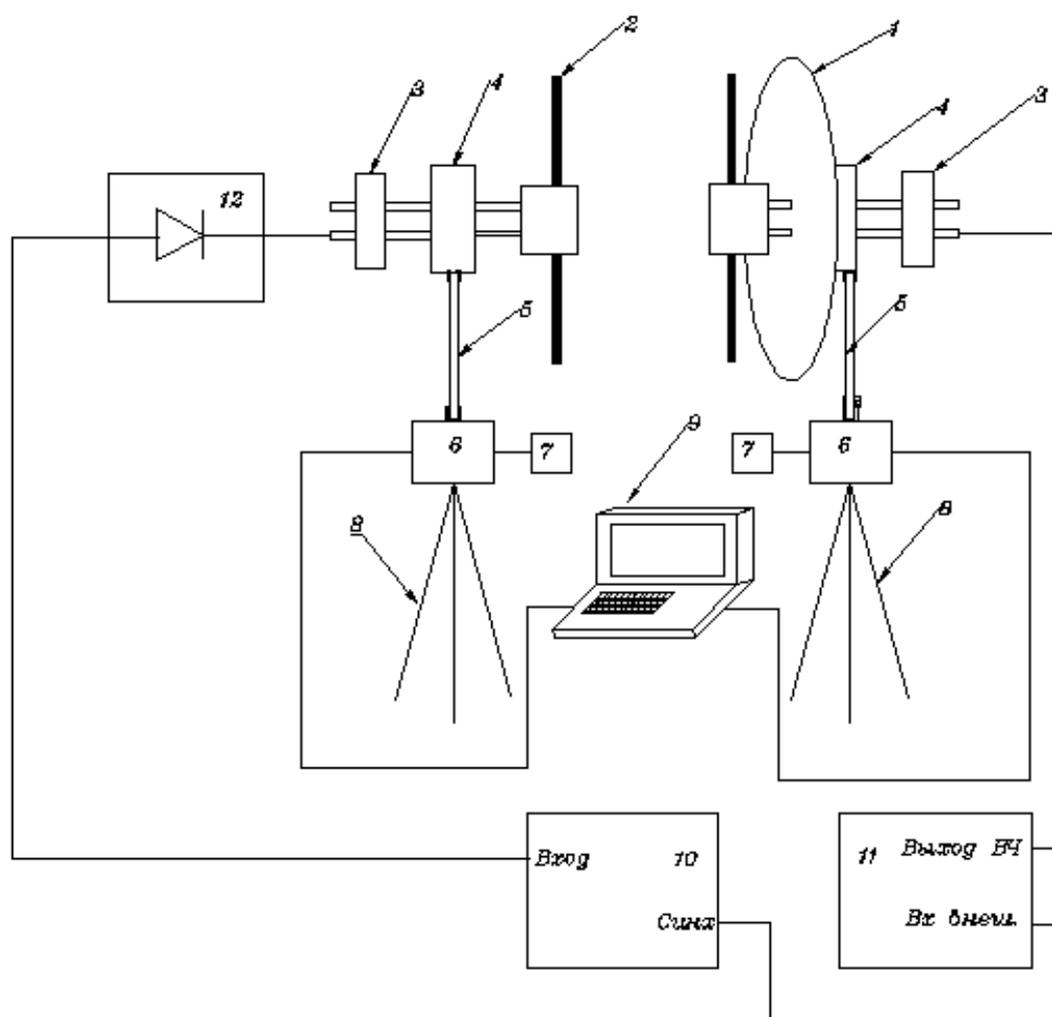


Рис.1.1.

Нижний конец штанг (5) фиксируется в поворотных устройствах с электронным управлением (6). Питание поворотных устройств осуществляется от отдельных сетевых адаптеров (7), которые подключаются к сети 220 v/50 Hz. Управление поворотными устройствами осуществляется от ПК (9), который соединен с поворотными устройствами кабелями USB(A) – USB(D). Особенности управления положением антенн поясняются в приложении 1, 2.

Оба поворотных устройства (6) располагаются на двух однотипных штативах (8), которые устанавливаются на полу лабораторного помещения. Предусмотрена возможность регулировки высоты штативов.

Питание передающей антенны осуществляется от генератора высокой частоты (11). Антенна соединяется с выходом генератора (гнездо «ВЫХОД ВЧ») коаксиальным кабелем.

Приемная антенна с помощью ВЧ кабеля соединяется с детекторной секцией (12), которая закреплена в непосредственной близости от приемной антенны на диэлектрической штанге (5).

Продетектированный секцией сигнал поступает на вход регистратора (10). Выход синхронизирующего сигнала регистратора (гнездо «СИНХ»)-соединяется со входом синхронизации генератора (гнездо «ВХ ВНЕШ»).

Поворотные устройства, генератор высокой частоты, детекторная секция и регистратор являются общими элементами лабораторных макетов. Поэтому особенности их конструкции, органы управления и принцип действия описаны в приложении 1.

На рис.1.2 приведен эскиз конструкции симметричного вибратора с металлическим экраном.

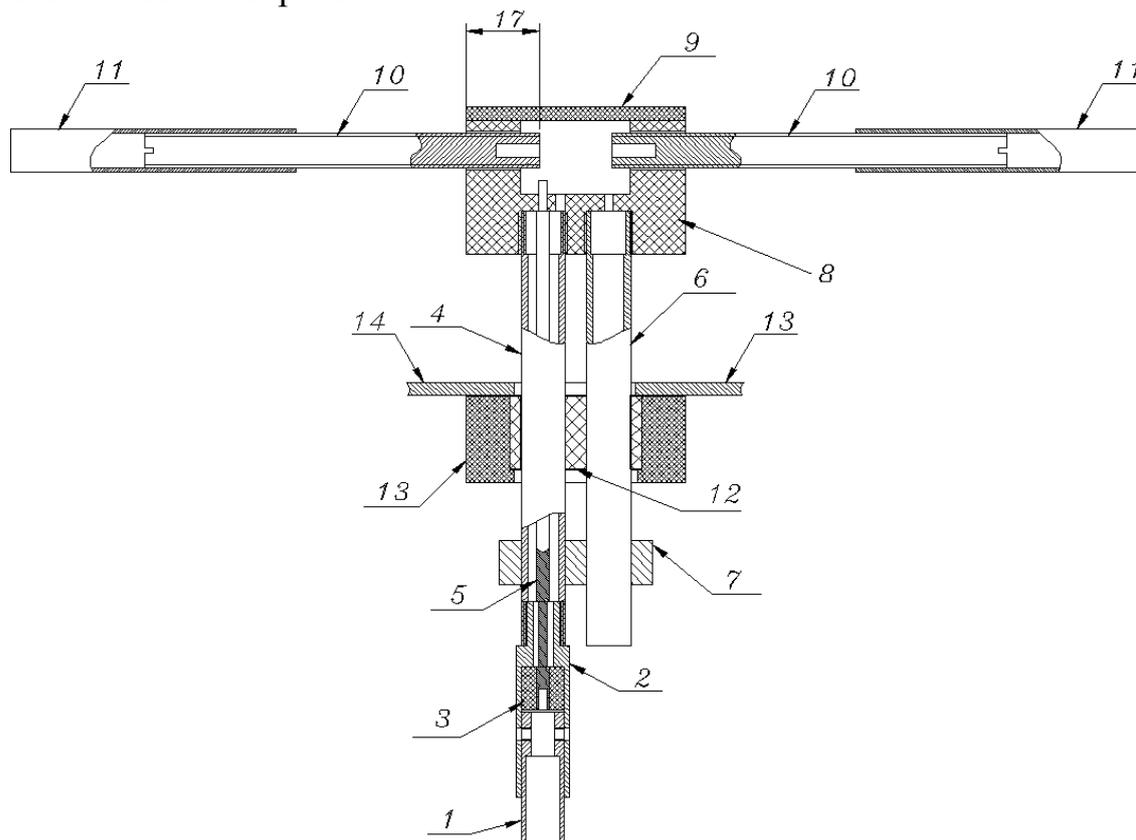


Рис.1.2.

Плечи симметричного вибратора образованы осями (10) с навернутыми по резьбе на них полыми трубками (11). Вращение последних по резьбе позволяет менять длину плеч вибраторов в широких пределах, что используется при проведении измерений.

Плечи зафиксированы в основании (8). При измерении их длины следует учитывать отрезок оси 17 мм, который ввернут в основание (рис.1.2).

В основании выполнена полость, в которой осуществляется коммутация плеч с проводниками симметрирующего устройства (4, 5, 6) в соответствии с рис. 1.3. Пустота закрыта крышкой (9). Настройка симметрирующего устройства осуществляется с помощью короткозамыкателя (7), положение которого на проводниках (5, 6) фиксируется винтами, не показанными на рис. 1.2.

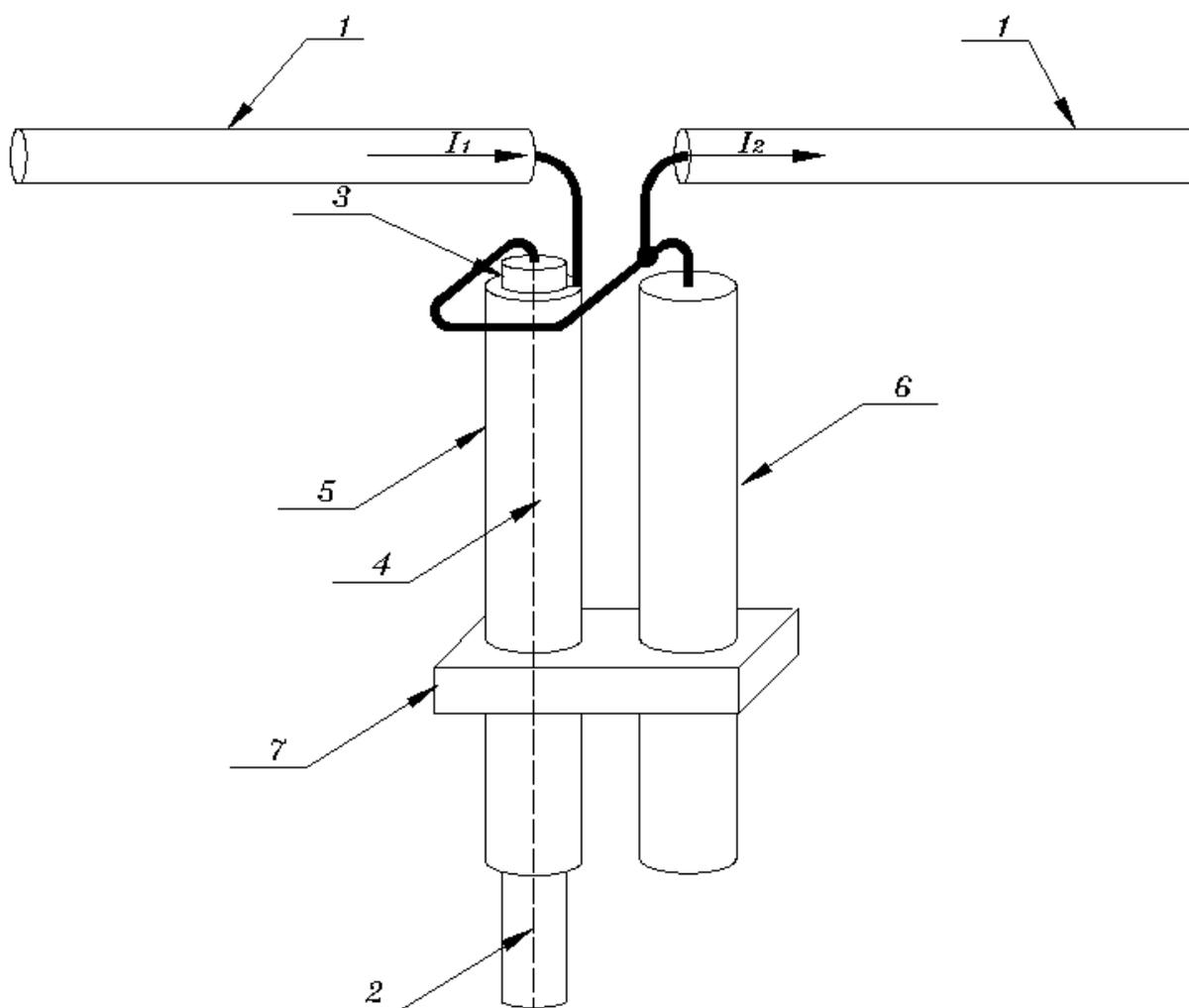


Рис. 1.3.

Вращение симметричного вибратора вокруг горизонтальной оси, параллельной проводниками симметрирующей линии позволяет менять плоскость, в которой исследуются направленные свойства антенны (плоскости E и H). Для этого имеется узел, образованный обоймой (13) и втулкой (12). Во втулке имеются два отверстия, в которых проходят полые латунные трубки (4, 6) устройства симметрирования и согласования. Обойма и втулка выполнены из капрлона, что обеспечивает минимальное трение при повороте вокруг оси. В одной из трубок проложен кабель питания, образованный элементами (1, 2, 3, 5).

Кроме вращения антенны вокруг горизонтальной оси, с помощью рассмотренного выше узла обеспечивается возможность продольного перемещения симметричного вибратора относительно металлического экрана (14), что необходимо при проведении лабораторных исследований.

Предварительная настройка лабораторного макета предполагает регулировку углового положения антенн в вертикальной плоскости. Это обеспечивается с помощью кронштейна для крепления передающей антенны (1) на рис. 1.1 – симметричного вибратора с плоским экраном - к штанге (5).

Кронштейн является общим элементом и для нескольких других макетов. Поэтому его описание и описание настройки макетов с его помощью вынесено в приложение 2.

Приемная антенна – симметричный вибратор (2) на рис. 1 – крепится к диэлектрической штанге жестко и его угловое положение в процесс настройки не меняется. Конструкция этого узла не приводится.

Порядок выполнения работы

Измерения.

1.1. По заданным значениям l/λ и частоте f определить длины плеч симметричных вибраторов:

$$l = \frac{3 \cdot 10^8}{f} \frac{l}{\lambda}.$$

1.2. Установить длины плеч приемного и передающего вибратора в соответствии с первым расчетным значением. Для этого вращать полые трубки 11 по резьбе на осях 10 до получения нужного размера. Следует учитывать при определении длины плеча скрытую в основании (8) часть оси (10) длиной 17 мм (рис. 1.2). При длинах плеч 200 мм и более следует использовать удлиненные трубки (11), которые входят в состав оборудования макета.

1.3. По заданным значениям d/λ и частоте f определить расстояние d между экраном и симметричным вибратором

$$d = \frac{3 \cdot 10^8}{f} \frac{d}{\lambda}$$

1.4. Установить расстояние d между экраном и симметричным вибратором в соответствии с расчетным значением для этого переместить симметричный вибратор передающей антенны относительно экрана на необходимое расстояние (рис. 1.2). Перемещение осуществляется с легким усилием за счет передвижения всей конструкции симметричного вибратора по трубкам (4, 6) симметрирующего устройства в узле (12, 13) на рис. 1.2.

1.5. Установить необходимую для измерений поляризацию излучаемой волны. Для этого вращать передающий и приемный вибратор с небольшим усилием в узле (12, 13) до установления нужного положения антенн.

ВНИМАНИЕ. После выполненных регулировок все плечи симметричных вибраторов должны иметь одинаковую длину, а сами вибраторы должны быть параллельны друг другу.

1.6. Выполнить действия по включению и юстировке оборудования, предусмотренные в приложении 2.

1.7. В макетах антенн предусмотрена возможность симметрирования их питания. Оно осуществляется путем перемещения короткозамыкателя (7) вдоль трубок (4, 6) симметрирующего устройства. Короткозамыкатель зафиксирован на трубках с помощью винтов, которые перед настройкой необходимо ослабить. Настройка осуществляется за счет перемещения короткозамыкателя как передающей, так и приемной антенны методом

последовательных приближений до получения максимального сигнала на регистраторе.

1.8. Провести измерение диаграммы направленности антенны в соответствии с приложением П.1. Результатом измерений будет автоматически сформированная таблица 1 и соответствующая ей диаграмма направленности, построенная в полярной системе координат. В результате конструктивных особенностей реальных антенн, влияния отражений от окружающих предметов и многих других факторов, диаграммы направленности могут отличаться от расчетных. Также следует учесть, что показания прибора q не остаются неизменными при вращении антенны. Из всех значений q следует выбрать максимальное, которое и заносится в таблицу.

Таблица 1. Диаграмма направленности симметричного четвертьволнового вибратора. Плоскость... $f=...$, $l=...$.

α (град.)	0	α_1		0	$-\alpha_1$	
q (от. ед.)						
q_n (от.ед.)						

1.9. Повторить измерения диаграммы направленности для остальных вариантов. Перед каждым новым измерением необходимо проводить предварительную юстировку антенн.

1.10. Произвести измерения поляризационных свойств симметричного вибратора с плоским контррефлектором и без него для заданного преподавателем значений l/λ и d/λ . Перед измерениями необходимо проводить предварительную юстировку антенн.

1.10.1. После предварительной юстировки повернуть антенны так, чтобы их плоскость Н совпала бы с горизонтальной. Произвести подстройку симметризирующего устройства антенн за счет перемещения короткозамыкателя как передающей, так и приемной антенны методом последовательных приближений до получения максимального сигнала на регистраторе. После этого отметить показания по шкале регистратора q_0 и занести их в таблицу 2.

1.10.2. Повернуть приемную антенну вокруг горизонтальной оси на угол 90 градусов, удерживая ее от продольного перемещения. При этом с горизонтальной плоскостью уже совпадает плоскость Е приемной антенны.

1.10.3. Отметить показания измерительного прибора усилителя q_{90} и занести его в таблицу 2.

1.10.4. Вычислить коэффициент поляризации p по формуле:

$$p = q_0 / q_{90}$$

1.10.5. Изменяя угол поворота приемной антенны α с шагом, заданным преподавателем, измерить зависимость коэффициента поляризации от α . Измерения коэффициента поляризации проводить согласно методике, описанной выше. Данные измерений занести в таблицу 2.

Таблица 2 Поляризационные свойства симметричного вибратора.
 $f=, \dots, l=, \dots$

α (град.)	0	180^0
q_0 (от.ед.)			
q_{90} (от.ед.)			
p			

1.11. Произвести измерения диапазонных свойств исследуемой антенны. Для этого выполнить следующие операции.

1.11.1. Изменяя в небольших пределах частоту генератора, добиться максимальных показаний измерительного прибора усилителя. Поскольку определение геометрических размеров антенны производилось по приближенным формулам, а также вследствие неточности сборки антенны, она оказывается не настроенной точно в резонанс. В этом пункте производится ее точная настройка и определение резонансной частоты $f_{рез}$, которой соответствует максимальные показания прибора Q_{max} . Как и ранее, показания прибора прямо пропорциональны принимаемой мощности.

1.11.2. Снять зависимость принимаемой мощности (показания измерительного прибора вой панели регистратора) от частоты генератора f . Данные измерений занести в таблицу 3.

Таблица 3. Диапазонные свойства симметричного вибратора. $f=, \dots, l=, \dots$

F (МГц)	$F_{рез}$	
q (от. ед.)	Q_{max}	
q_n (от.ед.)	1	

Содержание отчета

В отчете должны быть представлены:

1. Схема лабораторной установки с пояснением назначения ее элементов.
2. Таблицы 1 – 3 с результатами экспериментальных исследований и построенные по этим результатам графики.
4. Выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Пояснить эквивалентную схему для симметричного вибратора.
2. В чем особенности определения напряжения в эквивалентной длинной линии?
3. Какие составляющие поля присутствуют в дальней зоне излучения симметричного вибратора?
4. Пояснить назначение металлического экрана (контррефлектора). Пояснить анализ работы антенны с контррефлектором с использованием метода зеркальных изображений.
5. Пояснить принцип определения плоскостей E и H.

6. Пояснить связь формы диаграммы направленности симметричного вибратора и распределения тока по его плечам.
7. Чем определяется входное сопротивление симметричного вибратора?
8. Пояснить настройку вибратора в резонанс. Что происходит в питающей линии при рассогласовании?
9. Зачем нужно симметрировать питание симметричного вибратора и для каких линий связи это не делается?
10. На действующем макете пояснить конструкцию приемной и передающей антенн и назначение отдельных элементов.

**Лабораторная работа №2.
«ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НАПРАВЛЕННОСТИ
ВИБРАТОРНЫХ АНТЕНН».**

Цель исследований:

- изучение особенностей конструкции логопериодической антенны и антенны «Волновой канал»;
- исследование диаграмм направленности антенны «Волновой канал»;
- исследование диаграмм направленности логопериодической антенны;
- исследование диапазонных свойств антенн.

Методические указания по самоподготовке

При подготовке к выполнению лабораторной работы необходимо изучить [1, 2, 3, 4]:

- основные характеристики антенных устройств. Особое внимание обратить на определение амплитудной и фазовой диаграммы направленности антенны;
- определение поля излучения системы двух симметричных вибраторов. Определение директоров и рефлекторов;
- метод зеркальных отражений и его использование для определения поля излучения антенны, расположенной над проводящей поверхностью;
- способы расширения рабочей полосы частот антенн и ее связь с их геометрическими размерами;
- принцип действия антенны волновой канал и логопериодической антенны и методики определения их геометрических размеров.

Описание лабораторной установки.

Функциональная схема лабораторной установки показана на рис. 2.1. Она включает в себя две антенны – передающую и приемную, которые образуют радиолинию. Антенны обеспечивают работу в диапазоне 500 -1000 мГц.

В качестве передающей используется логопериодическая антенна (1), а в качестве приемной – антенна «Волновой канал» (2) с устройством симметрирования и согласования. На рис.2.1 для наглядности они ориентированы в двух разных плоскостях Е и Н.

Обе антенны крепятся с помощью соединителей к диэлектрическим штангам (3). Нижний конец штанг (3) фиксируется в поворотных устройствах (4) питающихся от сети 220 в/50 Hz с помощью отдельных сетевых адаптеров (5). Поворотные устройства управляются от персонального компьютера (7) и обеспечивают вращение антенн вокруг вертикальной оси для снятия диаграмм направленности.

Питание передающей антенны осуществляется от генератора высокой частоты (8). Входной кабель логопериодической антенны соединяется с разъемом «ВЫХОД ВЧ» на его лицевой панели.

Приемная антенна с помощью ВЧ кабеля соединяется с детекторной секцией (10). Продетектированный с ее помощью сигнал поступает по соединительному шнуру на блочный разъем «ВХОД», расположенный на лицевой панели регистратора (9). Его уровень отражается на его цифровом табло.

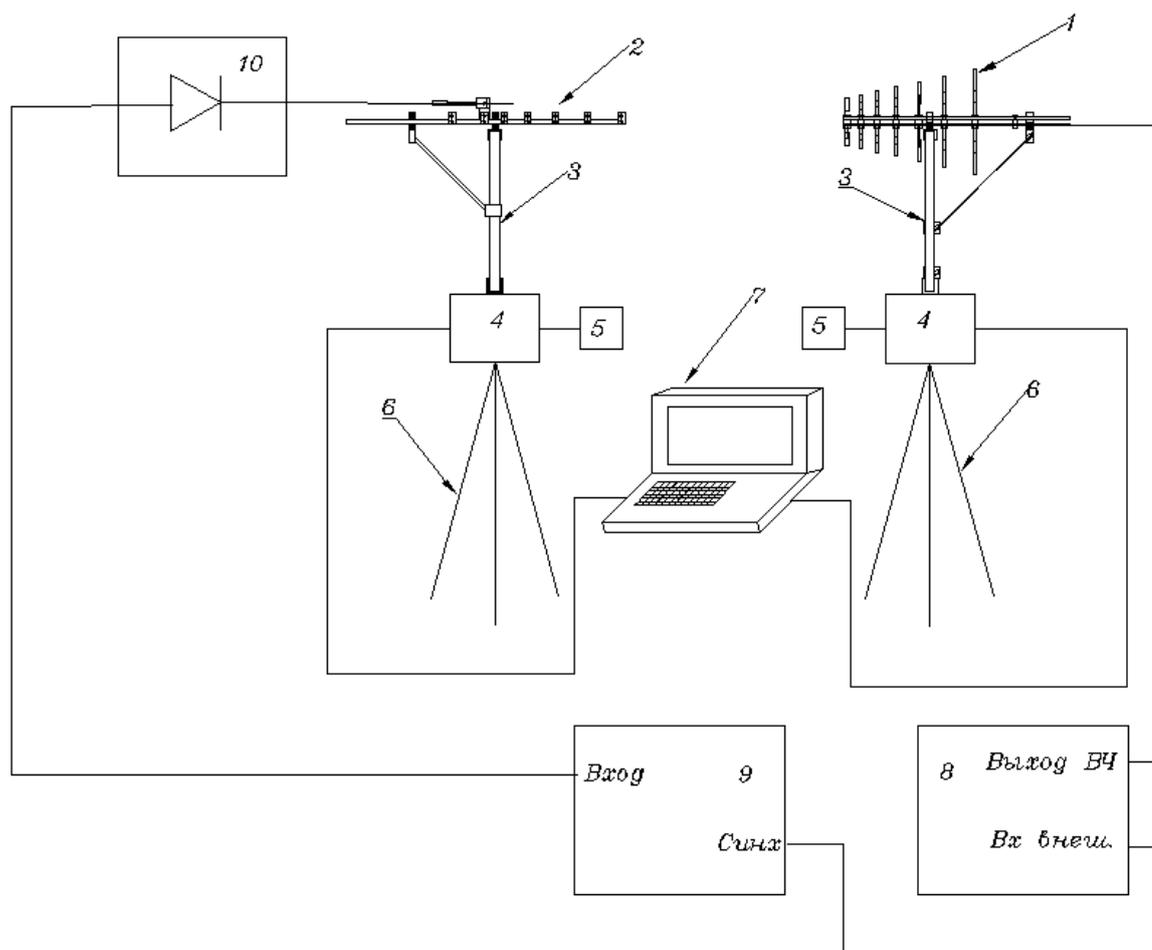


Рис. 2.1.

Кроме этого, регистратор обеспечивает выработку синхросигнала, представляющего собой меандр с частотой 7 кГц. Он снимается с блочного разъема «СИНХ» регистратора и по соединительному шнуру поступает на блочный разъем «ВХ. ВНЕШ.» на лицевой панели генератора (8).

Поворотные устройства, генератор высокой частоты, детекторная секция и регистратор являются общими элементами для нескольких лабораторных макетов. Поэтому особенности их конструкции, органы управления и принцип действия описаны в приложении 1.

На рис. 2.2 приведен эскиз фиксации одного из 7 симметричных вибраторов логопериодической антенны, поясняющий ее конструкцию.

Оси (1) с накрученными на них по резьбе полыми металлическими трубками образуют одну из семи пар плеч логопериодической антенны. Длины вибраторов изменяются за счет перемещения трубок (2) по резьбе на осях (1). Кроме того, все оси и трубки имеют разную длину, обеспечивающую возможность регулировки плеч логопериодической антенны в диапазоне 500 – 1000 мГц для разных вариантов ее реализации.

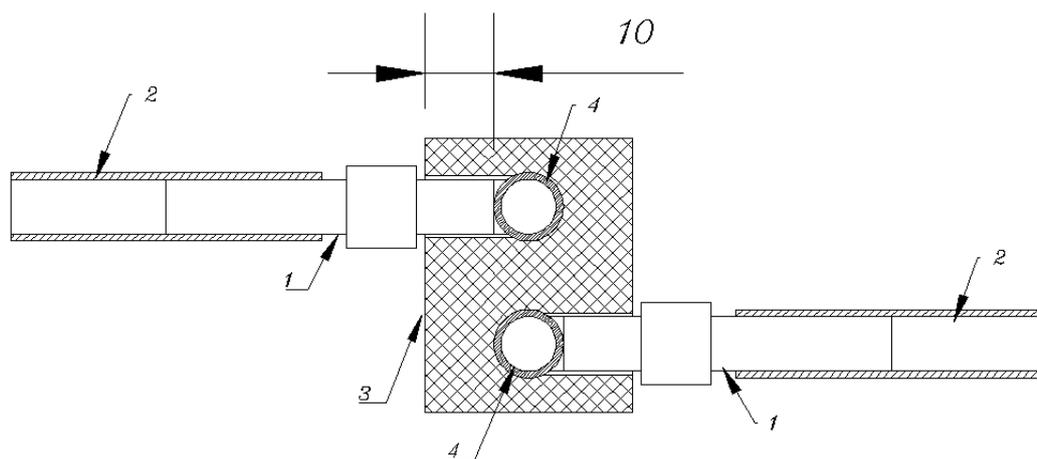


Рис. 2.2.

Плечи фиксируются в капрлоновом основании (3) на резьбе. По центральной вертикальной оси в нем выполнены два отверстия, через которые проходят трубки (4) двухпроводной собирающей линии. По этой линии сигнал от генератора распределяется по всем семи парам симметричных вибраторов ЛПА. Кроме того, эта линия обеспечивает и механическую жесткость всей конструкции. В одной из этих трубок проложен кабель питания.

Отверстия с резьбой для осей (1) в основании (3) выполнены таким образом, что при их вворачивании в соединитель правая имеет омический контакт с верхней трубкой двухпроводной линии, а левая – с нижней. В соседних вибраторах положение осей изменено на противоположное (правая с нижней трубкой, левая – верхней). Этим обеспечивается питание вибраторов с дополнительным сдвигом фаз равным 180 градусам.

При ввернутых до упора осях (1) они имеют омический контакт с трубками собирающей линии. Их положение жестко зафиксировано. При повороте осей на пол-оборота по резьбе появляется возможность продольного перемещения 6 из 7 оснований (3) с осями вдоль проводников (4) собирающей линии. Таким образом устанавливаются требуемые расстояния между всеми семью симметричными вибраторами ЛПА.

Положение первого основания фиксировано. В него ввернуты трубки собирающей линии (рис. 2.3). Внутри одной из них (нижней) проложен питающий кабель. С выступающей части кабеля снята защитная оболочка и оголена оплетка, которая зажимается между основанием (3) и трубкой.

Центральная жила с диэлектрическим заполнением пропущена через 2 отверстия в основании (3) и омически соединена с верхней трубкой собирающей линии (рис.2.3).

Кроме рассмотренных элементов в состав ЛПА входит короткозамыкатель, положение которого на трубках соединительной линии фиксируется двумя винтами.

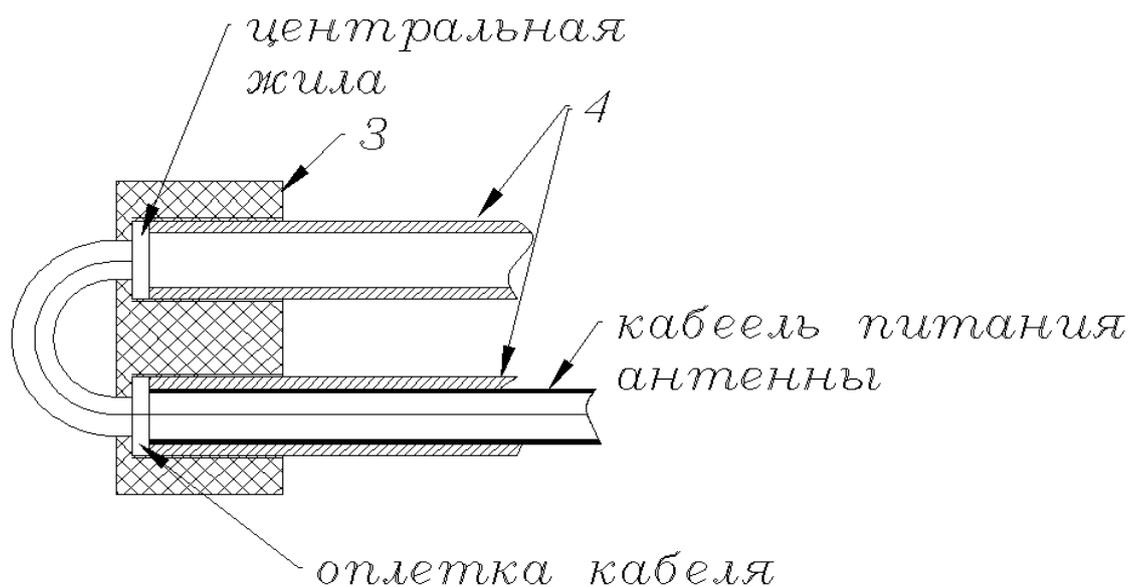


Рис. 2.3.

На рис. 2.4, 2.5 приведены эскизы, поясняющий конструкцию антенны «Волновой канал». Показана только часть антенны, включающая один активный петлевой вибратор Пистолькорса (рис.2.4) и директор (рис. 2.5).

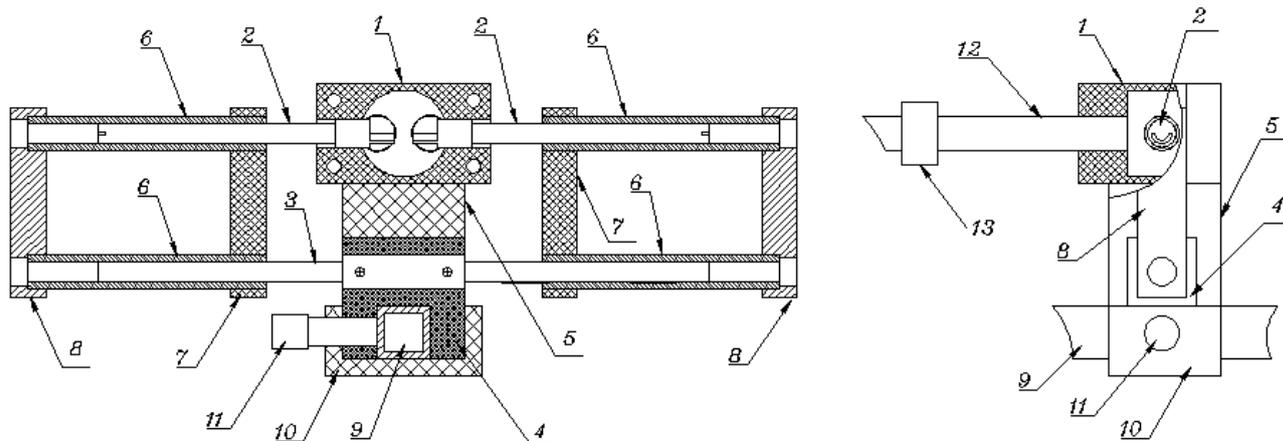


Рис. 2.4.

Петлевой вибратор образован двумя осями (2) ввернутыми в основание (1) и одной сплошной осью (3) закрепленной в фиксаторе (4). На внешней поверхности осей резьба отсутствует.

Основание (1) и фиксатор (4) соединены планкой (5), с помощью которой устанавливается требуемое расстояние между осями (2) и (3).

На оси (2) надеваются петли, состоящих из двух полых трубок (6) с короткозамыкателем (8). На противоположном конце петель установлена для обеспечения жесткости стойка (7). В последнюю ввернуты два фиксирующих винта, которые кроме дополнительной жесткости обеспечивают омический контакт между петлями и осями. Петли могут передвигаться вдоль осей и менять продольный размер вибратора. За счет этого передвижения осуществляется настройка антенны.

В основание (1) ввернуты полые металлические трубки (12) симметрирующего и согласующего устройства. В его состав также входит короткозамыкатель (13), который на них фиксируется винтами. При ослаблении винтов он допускает продольное перемещение вдоль трубок симметрирующего устройства для его настройки.

Вся конструкция крепится к траверсе прямоугольного сечения 9 и фиксируется на ней с помощью скобы (10) с винтом (11). При его ослаблении появляется возможность продольного перемещения активного вибратора вдоль траверсы для настройки антенны в целом.

На рис. 2.5 показан эскиз пассивного вибратора.

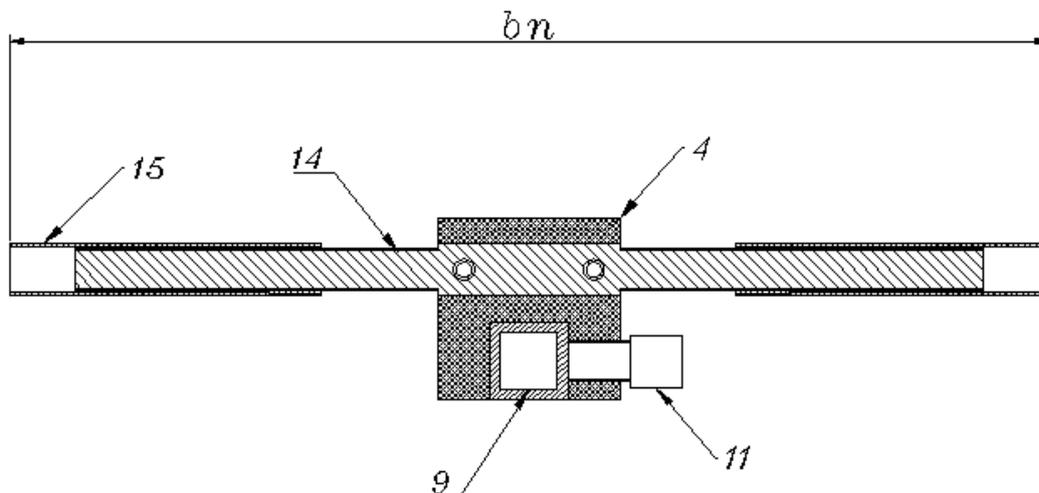


Рис.2.5.

Его ось с нанесенной на поверхность резьбой, закреплена в фиксаторе (4). На оси накручены полые металлические трубки (15). Их перемещение обеспечивает настройку антенны в целом. Таким образом устанавливается необходимый размер b_n .

Фиксатор одевается на металлическую траверсу (9) и стопорится винтом (11). Его ослабление позволит проводить настройку антенны за счет продольного перемещения пассивного вибратора вдоль траверсы.

На рис. 2.6 приведен эскиз, поясняющий крепление логопериодической антенны к поворотному устройству. Антенна «Волновой канал» фиксируется аналогичным образом.

Траверса антенны «Волновой канал» и собирательная двухпроводная линия ЛПА проходят в во втулках подшипников (6). Обоймы их неподвижны и соединены через стакан (7) с диэлектрической штангой (5) или через опору (8) с откосом (10). Нижний конец откоса (10) опирается через упор (9) на диэлектрическую штангу и обеспечивает дополнительную жесткость конструкции.

Подшипники (6) обеспечивают возможность вращения антенн вокруг горизонтальной оси, что позволяет снимать диаграммы направленности антенн в двух ортогональных плоскостях Н и Е.

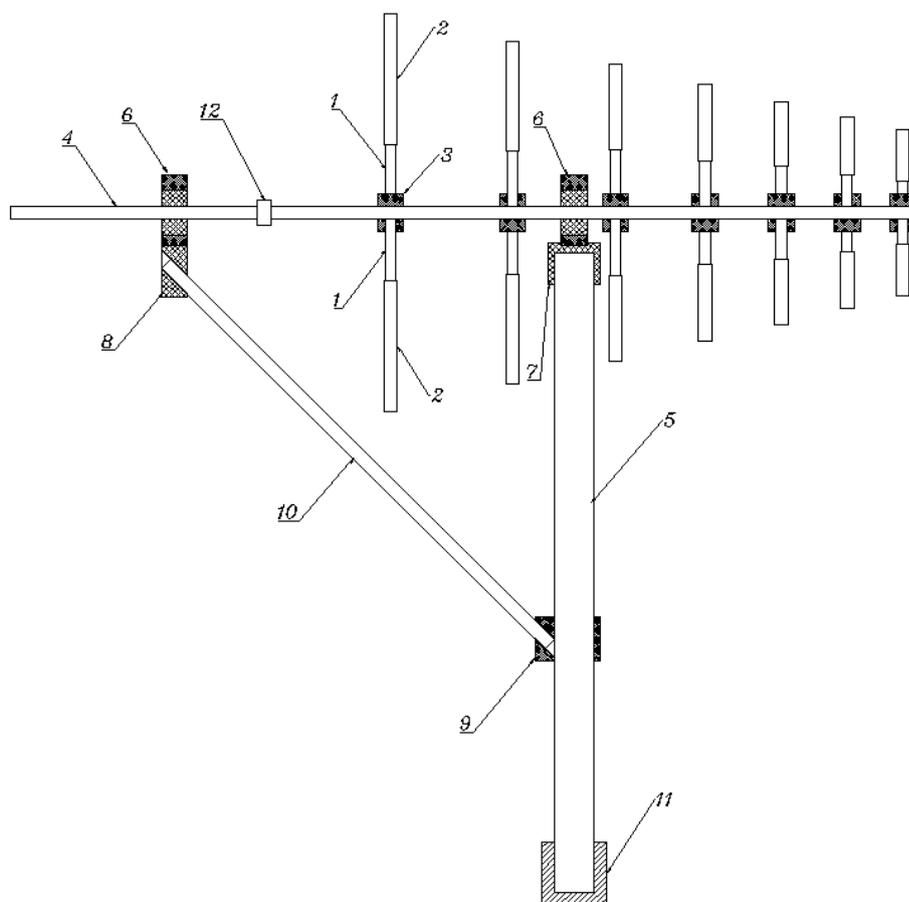


Рис. 2.6.

Порядок выполнения работы.

Предварительные расчеты.

Используя изученные при самоподготовке материалы [1, 2, 3, 4] и приведенные в них методики расчета размеров логопериодической антенны и антенны «Волновой канал» рассчитать по заданию преподавателя варианты конструкции этих антенн для экспериментального исследования.

Измерения.

2.1. По данным, полученным в результате расчетов собрать антенну «Волновой канал». Для этого выполнить следующие действия:

- ослабить фиксирующие винты (11) (рис.2.5) пассивных вибраторов и снять их с траверсы;

- вращая трубки по резьбе на осях (14) (рис.2.5) установить требуемые размеры b_n . При этом контролировать одинаковость размеров плеча вибратора с разных сторон от основания (4);

- ослабить винты фиксации петель активного вибратора (элементы (6, 7, 8) на рис. 2.4) и передвигая петли вдоль осей (2, 3) установить их расчетную длину. После этого зафиксировать их положение винтами, обеспечив дополнительно омический контакт с осями;

-установить необходимое количество директоров и рефлектор на траверсу на расчетном расстоянии друг от друга. Первым устанавливается рефлектор, вторым – ближайший к активному вибратору директор.

2.2. По данным, полученным в результате расчетов собрать логопериодическую антенну. Для этого выполнить следующие действия:

-ослабить оси (1) (рис. 2.2) и переместить капролоновые основания на необходимое расстояние друг от друга. Если собирается вариант антенны с числом элементов меньше (7), из лишних оснований, расположенных на последних позициях, необходимо выкрутить оси;

-вращая трубки (2) по резьбе на осях (1) установить необходимые размеры плеч симметричных вибраторов антенны. При этом необходимо учитывать дополнительную длину оси 10 мм погруженную в основание (рис.2.2).

2.3. Ослабить фиксирующие винты в обоймах подшипников (6) (рис. 2.6) и повернуть передающую и приемную антенны вокруг горизонтальной оси для установления заданной плоскости поляризации.

2.4. Выполнить действия по включению и юстировке оборудования, предусмотренные в приложении П.2.

2.5. В макетах антенн предусмотрена возможность симметрирования их питания. Оно осуществляется путем перемещения короткозамыкателя (7) вдоль трубок (4, 6) симметрирующего устройства. Короткозамыкатель зафиксирован на трубках с помощью винтов, которые перед настройкой необходимо ослабить. Настройка осуществляется за счет перемещения короткозамыкателя как передающей, так и приемной антенны методом последовательных приближений до получения максимального сигнала на регистраторе.

2.6. Провести измерение диаграммы направленности приемной и передающей антенны в соответствии с приложением П.1,2. Измерения провести в двух взаимноортогональных плоскостях Е и Н. Результатом измерений будет автоматически сформированная таблица 1 (например, для антенны «Волновой канал») и соответствующая ей диаграмма направленности, построенная в полярной системе координат. В результате конструктивных особенностей реальных антенн, влияния отражений от окружающих предметов и многих других факторов, диаграммы направленности могут отличаться от расчетных. Также следует учесть, что показания прибора q не остаются неизменными при вращении антенны. Из всех значений q следует выбрать максимальное, которое и заносится в таблицу.

Таблица 1. Диаграмма направленности антенны «Волновой канал».
Плоскость.... $f=,,,,$ Число элементов, длины плеч элементов.....,
расстояние между элементами....

α (град.)	0	α_1		0	$-\alpha_1$	
q (от. ед.)						
q_n (от.ед.)						

2.7. Повторить измерения диаграммы направленности для логопериодической антенны и остальных вариантов. Перед каждым новым измерением необходимо проводить предварительную юстировку антенн.

2.8. Произвести измерения диапазонных свойств антенны «Волновой канал».

Поскольку в лабораторном макете используется широкодиапазонная логопериодическая антенна, можно приближенно считать, что она обеспечивает равномерные характеристики во всем диапазоне частот используемого генератора. Антенна «Волновой канал», напротив, является относительно узкополосной. Для оценки ее полосы пропускания необходимо выполнить следующие операции:

-при необходимости выполнить операции, предусмотренные пунктами 2.3, 2.4, 2.5. Вид поляризации в этом измерении неважен.

-изменяя в небольших пределах частоту генератора, добиться максимальных показаний измерительного прибора регистратора. Поскольку определение геометрических размеров антенны производилось по приближенным формулам, а также вследствие неточности сборки антенны, она оказывается не настроенной точно в резонанс. В этом пункте производится ее точная настройка и определение резонансной частоты $f_{рез}$, которой соответствует максимальные показания прибора Q_{max} . Как и ранее, показания прибора прямо пропорциональны принимаемой мощности;

-снять зависимость принимаемой мощности (показания измерительного прибора на лицевой панели регистратора) от частоты генератора f . Данные измерений занести в таблицу.

Таблица. Диапазонные свойства антенны «Волновой канал». $f=,,, , l=...$ Число элементов, длины плеч элементов..., расстояние между элементами....

F (МГц)	$F_{рез}$	
q (от. ед.)	Q_{max}	
q_n (от.ед.)	1	

Содержание отчета

В отчете должны быть представлены:

1. Схема лабораторной установки с пояснением назначения ее элементов.
2. Результаты численного анализа, выполненного в разделе «Расчеты».
3. Таблицы 1 – 2 с результатами экспериментальных исследований и построенные по этим результатам графики.
4. Выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Пояснить принципы создания антенн с однонаправленной диаграммой направленности.
2. Пояснить основные характеристики пассивных и активных директоров и рефлекторов.
3. Пояснить принцип работы антенны «Волновой канал».

4. Пояснить связь между количеством директоров и рефлекторов антенны «Волновой канал» с основными характеристиками антенны: КНД, коэффициент защитного действия и другие.

5. Пояснить принцип работы логопериодической антенны.

6. Как осуществляется симметрирование питания в логопериодической антенне?

7. Пояснить основные геометрические характеристики логопериодической антенны и их влияние на ее характеристики направленности и полосу пропускания.

8. Чем определяется размер активной области логопериодической антенны?

9. Пояснить происхождение термина «логопериодическая».

10. На действующем макете пояснить конструкцию приемной и передающей антенн и назначение отдельных элементов.

Работа 3.

"ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НАПРАВЛЕННОСТИ И ДИАПАЗОННЫХ СВОЙСТВ СПИРАЛЬНЫХ АНТЕНН".

Цель исследований.

1. Экспериментальное исследование диаграмм направленности спиральных антенн.
2. Определение частотных границ осевого и конического излучения.
3. Исследования поляризационных свойств спиральных антенн.

Методические указания по самоподготовке

При подготовке к выполнению лабораторной работы необходимо изучить [1, 2, 3, 4]:

-основные характеристики антенных устройств. Особое внимание обратить на определение амплитудной и фазовой диаграммы направленности антенны;

-описание поля излучения спиральной антенны с использованием разложения в ряд по пространственным гармоникам. Условия, необходимые для реализации режимов бокового, осевого и конического излучения;

-принцип формирования поля спиральной антенной в дальней зоне и определение его поляризации. Условия, необходимые для получения поля с круговой поляризацией;

-анализ спиральной антенны как антенны бегущей волны. Условие получения максимального коэффициента направленного действия.

Описание лабораторной установки.

Функциональная схема лабораторной установки показана на рис. 3.1. Она включает в себя две спиральные антенны – передающую (1) и приемную (2), которые образуют радиолинию. Они идентичны по конструкции и отличающиеся только числом витков и шагом.

Обе антенны крепятся к диэлектрическим штангам (3). Крепление осуществляется с помощью узла позволяющего менять ее наклон в вертикальной плоскости на угол $\pm 20^\circ$. Он расположенного на противоположной стороне экрана и на рис. 10 не показан,. Подробно его конструкция рассмотрена ниже.

Нижний конец штанг (3) фиксируется в поворотных устройствах с электронным управлением (4). Питание поворотных устройств осуществляется от отдельных сетевых адаптеров (5), которые подключаются к сети 220 v/ 50 Hz. Управление поворотными устройствами осуществляется от ПК (7), который соединен с поворотными устройствами кабелями USB(A) – USB(D). Особенности управления положением антенн поясняются в приложении 1, 2.

Оба поворотных устройства (4) располагаются на двух однотипных штативах (6), которые устанавливаются на полу лабораторного помещения. Предусмотрена возможность регулировки высоты штативов.

Питание передающей антенны осуществляется от генератора высокой частоты (9). Антенна соединяется с выходом генератора (гнездо «ВЫХОД ВЧ») ВЧ кабелем.

Приемная антенна с помощью ВЧ кабеля соединяется с детекторной секцией (10), которая закреплена в непосредственной близости от приемной антенны на диэлектрической штанге (3).

Продетектированный секцией сигнал поступает на вход регистратора (8). Выход синхронизирующего сигнала регистратора (гнездо «СИНХ».)соединяется со входом синхронизации генератора (гнездо «ВХ ВНЕШ»).

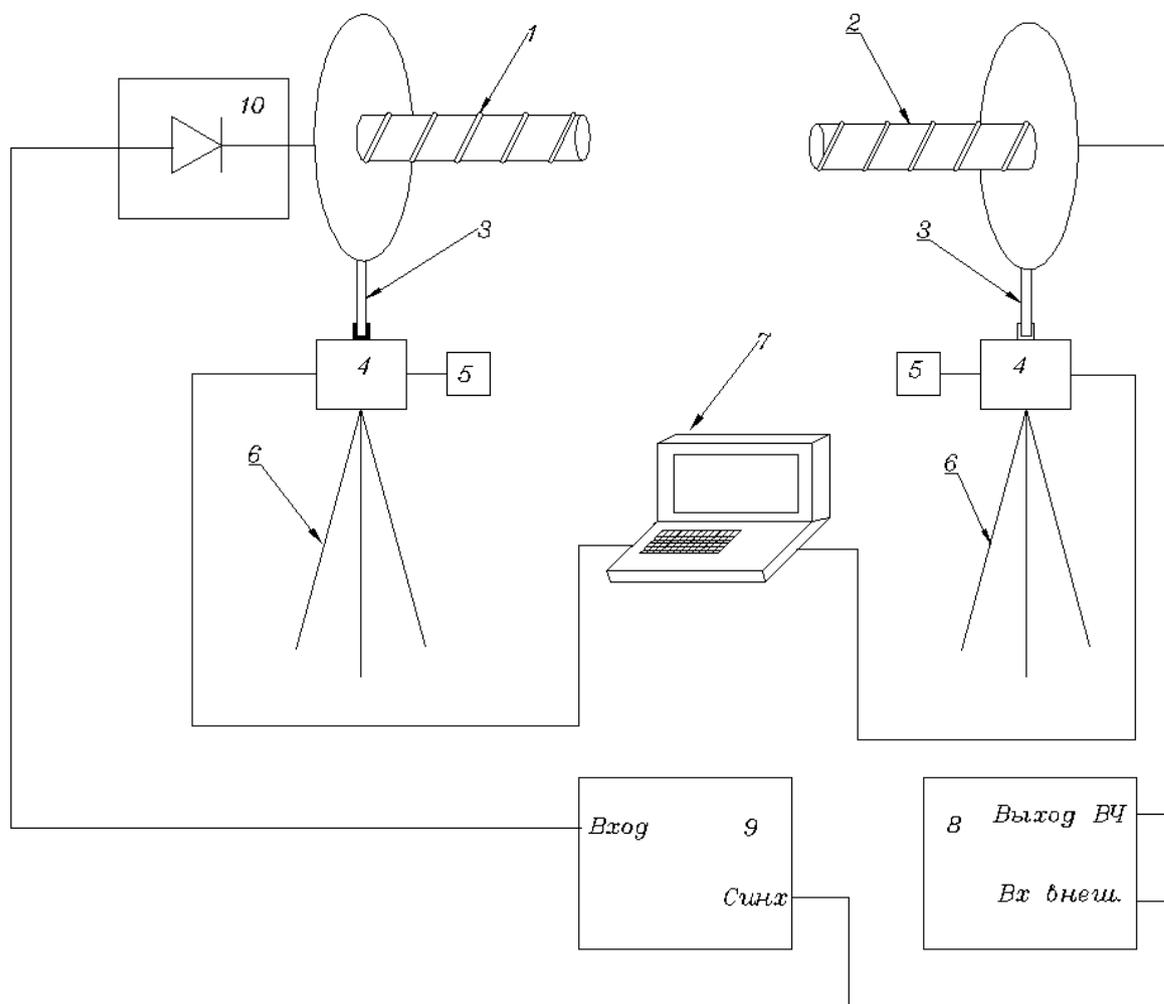


Рис.3.1.

Поворотные устройства, генератор высокой частоты, детекторная секция и регистратор являются общими элементами для нескольких лабораторных макетов. Поэтому особенности их конструкции, органы управления и принцип действия описаны в приложении 1.

На рис. 3.2 приведен эскиз спиральной антенны. Спираль (1) выполнена из медного проводника круглого сечения (диаметр 4 мм), навитого на полый диэлектрический опорный цилиндр (2). На рис. 3.2 показана только начальная ее часть.

Основой является капролоновая втулка (3) левая часть которой расположена внутри опорного цилиндра, а правая выступает за его пределы. В этом месте втулки на ее торцевой части имеется паз, в котором фиксируется основание опорного цилиндра. На внешней боковой стороне втулки (3) имеется угловая шкала, по которой определяется угол поворота спиральной антенны вокруг продольной оси.

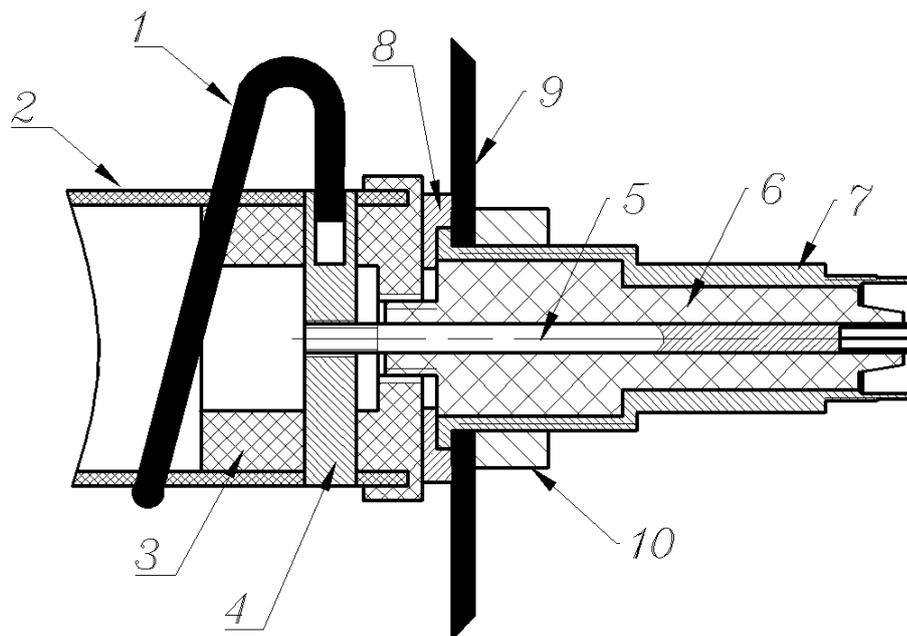


Рис.3.2.

В состав узла крепления входит латунный соединитель (4), который обеспечивает дополнительную жесткость соединения цилиндра и втулки – он проходит через выполненные в них соосные отверстия. Кроме того, с его помощью обеспечивается омический контакт спирали (1) и центрального проводника коаксиального разъема (5). Последний ввернут в соединитель по резьбе.

Коаксиальный разъем служит для соединения антенны с питающим кабелем и состоит из латунного посеребренного корпуса (7), фторопластового заполнения (6) и центрального проводника (5). Форма деталей на противоположной, относительно спирали стороне, соответствует ответной части разъема СР50 – 164 ФВ. Именно этим разъемом снабжены кабели, соединяющие спирали передающей и приемной антенн с генератором (8) и детектором (10) (рис. 3.1).

Фторопластовое заполнение (6) фиксируется в корпусе (7) с помощью шайбы (8). Выступающая часть заполнения снабжена резьбой и ввернута по ней во втулку (3). Вся конструкция крепится на дюралевом экране (9) с помощью прижимной гайки (10).

С внешней стороны экрана расположена тонкая дюралевая шайба с прямоугольным загнутым выступом, выполняющим роль стрелки для проведения отсчетов по шкале на внешней части втулки (3).

Предусмотрена возможность вращения спиральной антенны вокруг горизонтальной оси, необходимое для проведения измерений. Это обеспечивается действием следующих факторов:

- малым значением коэффициента трения пары «корпус – заполнение» и «корпус – центральный проводник», чем обеспечивается относительно свободное вращение этих деталей друг относительно друга;

-вращением центрального проводника по резьбе в соединителе (3) совместно со всей конструкцией разъема.

При вращении спиральной антенны вокруг горизонтальной оси против часовой стрелки заполнение (6) может выкрутиться по резьбе из втулки (3). Чтобы избежать этого необходимо спираль вращать только в одну сторону – по часовой стрелке. При полном вворачивании заполнения в основание малое значение коэффициента трения пары «корпус – заполнение» и «корпус – центральный проводник» предотвратит чрезмерное усилие.

Предварительная настройка лабораторного макета предполагает регулировку углового положения антенн в вертикальной плоскости. Это обеспечивается с помощью кронштейна для крепления приемной (1) и передающей (2) антенн на рис. 3.1 к штанге (3).

Кронштейн является общим элементом и для нескольких других макетов. Поэтому его описание вынесено в приложение 1.

Порядок выполнения работы

3.1. Выполнить действия по включению и юстировке оборудования, предусмотренные в приложении П.2.

3.2. По шкале генератора установить значение частоты, соответствующей круговой поляризации передающей антенны из области осевого излучения. При необходимости произвести подстройку частоты генератора в небольших пределах области осевого излучения, добившись максимальных показаний на шкале регистратора.

Внимание. *При вращении спиральной антенны вокруг горизонтальной оси против часовой стрелки заполнение (5) может выкрутиться по резьбе из втулки (3). Чтобы избежать этого необходимо спираль вращать только в одну сторону – по часовой стрелке. При полном вворачивании заполнения в основание малое значение коэффициента трения пары «корпус – заполнение» и «корпус – центральный проводник» предотвратит чрезмерное усилие.*

3.3. Провести измерение диаграммы направленности передающей спиральной антенны в соответствии с приложением П.1, 2. Результатом измерений будет автоматически сформированная таблица 1 и соответствующая ей диаграмма направленности, построенная в полярной системе координат. В результате конструктивных особенностей реальных антенн, влияния отражений от окружающих предметов и многих других факторов, диаграммы направленности могут отличаться от расчетных. Также следует учесть, что показания прибора q не остаются неизменными при вращении антенны. Из всех значений q следует выбрать максимальное, которое и заносится в таблицу.

Таблица 1. Диаграмма направленности передающей спиральной антенны. $N=... S=... f=...$

α (град.)	0	α_1		0	$-\alpha_1$	
q (от. ед.)						
q_n (от.ед.)						

3.4. По шкале генератора установить значение частоты, соответствующей получению максимального значения коэффициента направленного действия приемной антенны из области осевого излучения. При необходимости произвести подстройку частоты генератора в небольших пределах области осевого излучения, добившись максимальных показаний на шкале регистратора. Перед началом измерения диаграммы направленности следует провести предварительную юстировку приемной и передающей антенны и устанавливать новое значение нулевого отсчета угла предусмотренные в приложении П.1, 2. Данные измерений занести в таблицу, аналогичную таблице 1.

3.5. По шкале генератора установить значение частоты, соответствующей области конического излучения. При необходимости произвести подстройку частоты генератора в небольших пределах, добившись максимальных показаний на шкале регистратора. Перед началом измерения диаграммы направленности следует провести предварительную юстировку приемной и передающей антенны и устанавливать новое значение нулевого отсчета угла предусмотренные в приложении П.1, 2. Данные измерений занести в таблицу, аналогичную таблице 1.

3.6. Произвести измерения диапазонных свойств одной из спиральных антенн, входящих в состав макета (по указанию преподавателя). Для этого изменяя в небольших пределах частоту генератора, добиться максимальных показаний измерительного прибора на лицевой панели регистратора. В этом пункте производится ее точная настройка и определение резонансной частоты $f_{рез}$, которой соответствует максимальные показания прибора q_{max} .

3.7. Снять зависимость принимаемой мощности (показания измерительного прибора на лицевой панели регистратора) от частоты генератора f . Данные измерений занести в таблицу 3.

Таблица 3. Диапазонные свойства спиральной антенны . $N=... S=... f=...$

F (МГц)	$F_{рез}$	
q (от. ед.)	q_{max}	
q_n (от.ед.)	1	

Содержание отчета

В отчете должны быть представлены:

1. Схема лабораторной установки с пояснением назначения ее элементов.
2. Результаты численного анализа, выполненного в разделе «Расчеты».
3. Таблицы с результатами экспериментальных исследований и построенные по этим результатам графики.
4. Выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы.

1. Пояснить конструкцию спиральной антенны, входящей в состав лабораторного макета.
2. Дать определение основных геометрических характеристик спиральной антенны.

3. Пояснить причины определения поля излучения спиральной антенны с помощью пространственных гармоник.
4. Пояснить условие пространственного резонанса.
5. Пояснить приближения, которые делаются при представлении спиральной антенны эквивалентной антенной бегущей волны.
6. Пояснить условия формирования режима «бокового излучения».
7. Пояснить условия формирования режима «осевого излучения».
8. Пояснить условия формирования режима «конического излучения».
9. Пояснить условия формирования поля излучения с круговой поляризацией и максимальным значением коэффициента направленного действия.
10. Пояснить особенности исследования характеристик направленности спиральной антенны в дальней зоне в режиме «осевого и конического излучения».
11. Пояснить особенности исследования поляризационных характеристик спиральной антенны в дальней зоне в режиме «осевого и конического излучения».

Работа 4.

"ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НАПРАВЛЕННОСТИ ФАЗИРОВАННОЙ ЛИНЕЙКИ СПИРАЛЬНЫХ АНТЕНН".

Цель исследований.

1. Исследование особенностей настройки фазированной линейки спиральных облучателей. Оценка влияния разфазировки облучателей на характеристики направленности антенной решетки.
2. Исследование влияния на характеристики направленности фазированной линейки расстояний между ее элементами.

3. Исследование влияния параметров фазового распределения токов на характеристики направленности фазированной линейки для линейного, квадратичного и кубического законов.

Методические указания по самоподготовке

При подготовке к выполнению лабораторной работы необходимо изучить [1, 2, 3, 4]:

- основные характеристики антенных устройств. Особое внимание обратить на определение амплитудной и фазовой диаграммы направленности антенны;

- принципы формирования поля линейкой спиральных антенн в дальней зоне. Связь между количеством элементов в линейке и комплексной амплитудой поля. Оценка факторов приводящих к снижению амплитудного значения поля в дальней зоне;

- условия, определяющие разность фаз полей от отдельных спиральных элементов в дальней зоне. Влияние расстояния между элементами на ширину диаграммы направленности, количество и уровень боковых лепестков;

- анализ характеристик направленности фазированной антенной решетки в дальней зоне и влияние на них амплитудного и фазового распределения токов, питающих элементы линейки;

- связь направления главного максимума диаграммы направленности фазированной линейки и ширины ее главного лепестка с параметрами фазового распределения токов, питающих ее элементы.

Описание лабораторной установки и методики измерений.

Функциональная схема лабораторной установки показана на рис. 4.1. Она включает в себя передающую и приемную антенны, которые образуют радиолинию, работающую в диапазоне 2 – 4 ГГц.

В качестве передающей используется спиральная антенна с плоским металлическим экраном (1). Ее геометрические размеры подобраны таким образом, что на одной из частот рабочего диапазона она позволяет реализовать излучение с круговой поляризацией.

В качестве приемной используется фазированная линейка (2) составленная из 4 одинаковых спиральных антенн СА1-СА4, закрепленных на прямоугольном экране и совпадающих по геометрии и конструкции с передающей.

В состав линейки входит сумматор 4x1, составленный из тройников Т1-Т3 типа СР 50-194ФВ. На четыре входа тройников Т2, Т3 подключены спиральные антенны через отрезки коаксиальных кабелей К1-К4, а их выходы непосредственно подключены к входам Т1. Выход Т1 соединяется с детекторной секцией Д.

Отрезки кабелей К1-К4 имеют одинаковую длину, волновое сопротивление 50 Ом и снабжены разъемами типа СР 50 – 164 ФВ для подключения к спиральным антеннам.

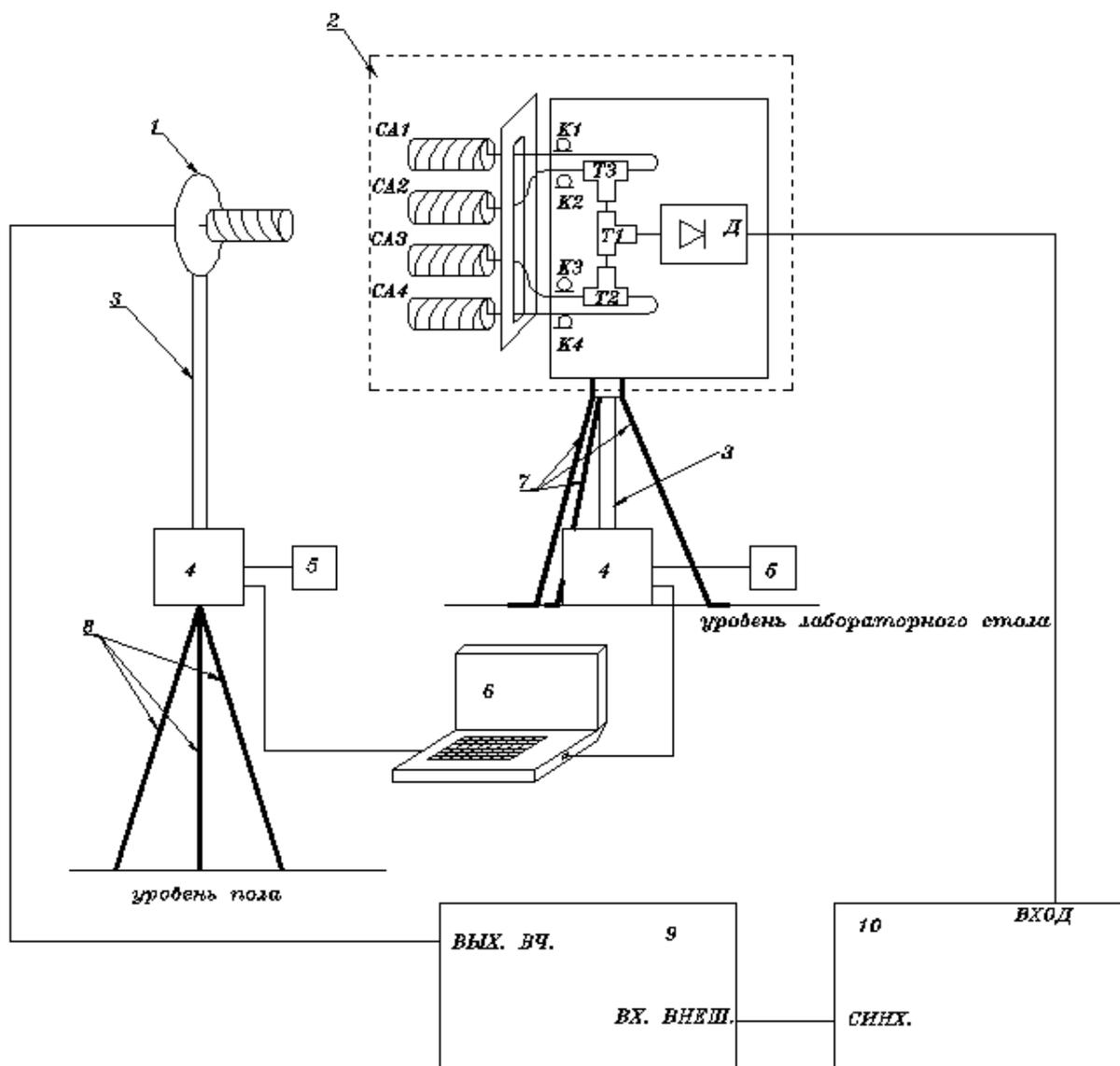


Рис. 4.1.

Все перечисленные элементы располагаются на плате, которая крепится к экрану. Передающая и приемная антенны (1, 2) устанавливаются на верхние концы диэлектрических штанг (3), нижний конец которых опирается на поворотные устройства с электронным управлением (4). Длины штанг подобраны таким образом, что при ориентации приемной и передающей антенн главными максимумами диаграмм направленности друг на друга, прямая, соединяющая эти максимумы горизонтальна.

Поскольку конструкция приемной антенны (2) имеет значительные габариты и вес, ее поворотное устройство располагается на лабораторном столе, а вертикальное положение ее диэлектрической штанги дополнительно фиксируется тремя откосами (7). Они выполнены из дюралевого тавра и нижним концом крепятся к поверхности лабораторного стола, а верхним – к внешней обойме опорного подшипника трения (на рис. 6 не показан), в котором диэлектрическая штанга (3) вращается совместно с приемной антенной. Такой вариант расположения фазированной линейки разгружает

поворотное устройство за счет того, что основной вес приходится на обойму опорного подшипника.

Поворотное устройство передающей антенны (1) крепится к штативу (8), который устанавливается на полу лабораторного помещения. Предусмотрена возможность регулировки его высоты.

Питание поворотных устройств осуществляется от отдельных сетевых адаптеров (5), которые подключаются к сети 220 в. Управление поворотными устройствами осуществляется от персонального компьютера (7), который соединен с поворотными устройствами кабелями USB(A) – USB(D). Особенности управления положением антенн поясняются в приложении П.1.

Питание передающей антенны (1) осуществляется от генератора высокой частоты (9) ВЧ кабелем, который соединяется с выходом генератора (гнездо «ВЫХОД ВЧ на лицевой панели»).

Сигнал от детектора приемной антенны (2) поступает на вход регистратора (10). Выход синхронизирующего сигнала регистратора (гнездо «СИНХ»).соединяется со входом синхронизации генератора (гнездо «ВХ ВНЕШ»).

Поворотные устройства, генератор высокой частоты, детекторная секция и регистратор являются общими элементами для нескольких лабораторных макетов. Поэтому особенности их конструкции, органы управления и принцип действия описаны в приложении 1.

На рис. 4.2 приведен эскиз приемной фазированной линейки состоящей из четырех спиральных антенн СА1-СА4, закрепленных на прямоугольном металлическом экране (1) в продольной щели, прорезанной в его центральной части. Под щелью имеется метрическая шкала (2), с помощью которой определяется расстояние между спиральными антеннами.

Под эскизом прямоугольного экрана на рис. 4.2 показан узел крепления отдельной спиральной антенны. Сама спираль (3) выполнена из медного проводника круглого сечения (диаметр 4 мм), навитого на полый диэлектрический опорный цилиндр (4). На рис. 4.2 показана только ее начальная часть.

Основой узла крепления является капролоновая втулка (5) левая часть которой расположена внутри опорного цилиндра, а правая выступает за его пределы. В этом месте втулки на ее торцевой части имеется паз, в котором фиксируется основание опорного цилиндра. На внешней боковой стороне втулки (5) имеется угловая шкала, по которой определяется угол поворота спиральной антенны вокруг продольной оси.

В состав узла крепления входит латунный соединитель (6), который обеспечивает дополнительную жесткость соединения цилиндра и втулки – он проходит через выполненные в них соосные отверстия. Кроме того, с его помощью обеспечивается омический контакт спирали (3) и центрального проводника коаксиального разъема (10). Последний ввернут в соединитель по резьбе.

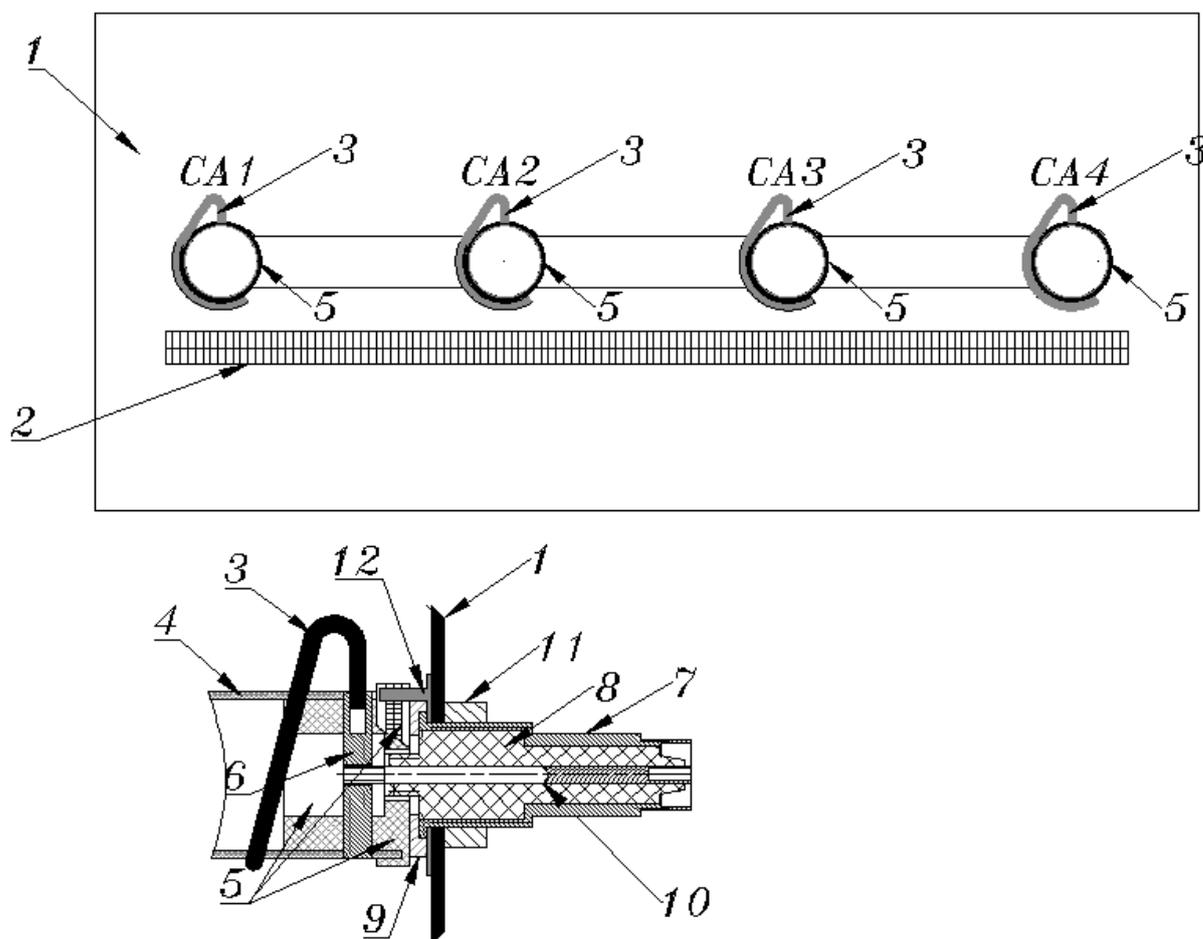


Рис. 4.2.

Коаксиальный разъем служит для соединения антенны с питающим кабелем и состоит из латунного посеребренного корпуса (7), фторопластового заполнения (8) и центрального проводника (10). Форма деталей на противоположной, относительно спирали стороне, соответствует ответной части разъема CP50 – 164 ФВ. Именно этим разъемом снабжены кабели К1-К4, соединяющие спирали и тройники сумматора Т1-Т3 и кабель, соединяющий передающую антенну и генератор детектора (10) (рис. 4.1).

Фторопластовое заполнение (8) фиксируется в корпусе (7) с помощью шайбы (9). Выступающая часть заполнения снабжена резьбой и ввернута по ней во втулку (5). Вся конструкция крепится на дюралевом экране (1) с помощью прижимной гайки (11).

С внешней стороны экрана расположена тонкая дюралевая шайба с прямоугольным загнутым выступом (12), выполняющим роль стрелки для проведения отсчетов по шкале на внешней части втулки (5).

Предусмотрена возможность вращения спиральной антенны вокруг горизонтальной оси, необходимое для проведения измерений. Это обеспечивается действием следующих факторов:

- малым значением коэффициента трения пары «корпус – заполнение» и «корпус – центральный проводник», чем обеспечивается относительно свободное вращение этих деталей друг относительно друга;

-вращением центрального проводника по резьбе в соединителе (3) совместно со всей конструкцией разъема.

При вращении спиральной антенны вокруг горизонтальной оси против часовой стрелки заполнение (5) может выкрутиться по резьбе из втулки (3). Чтобы избежать этого необходимо спираль вращать только в одну сторону – по часовой стрелке. При полном вворачивании заполнения в основание малое значение коэффициента трения пары «корпус – заполнение» и «корпус – центральный проводник» предотвратит чрезмерное усилие.

Предварительная настройка лабораторного макета предполагает регулировку углового положения передающей спиральной антенны в вертикальной плоскости. Это обеспечивается с помощью кронштейна для ее крепления к штанге (3) на рис. 4.1.

Кронштейн является общим элементом для нескольких других макетов. Поэтому его описание вынесено в приложение П.2.

Порядок выполнения работы

Измерения.

4.1. Выполнить действия по включению и юстировке оборудования, предусмотренные в приложении 2.

4.2. По шкале генератора установить значение частоты, соответствующей круговой поляризации передающей антенны из области осевого излучения. При необходимости произвести подстройку частоты генератора в небольших пределах области осевого излучения, добившись максимальных показаний на шкале регистратора.

4.3. Установить заданное преподавателем расстояние между спиралями фазированной линейки. Для этого выполнить следующие операции.

4.3.1. Ослабить фиксирующие гайки (11) (рис. 4.2), с помощью которых спирали крепятся к экрану (1).

4.3.2. Перемещая спирали вдоль экрана установить между ними требуемое расстояние d . Расстояние между спиралями определяется по шкале (2) на внешней поверхности экрана (1). При установке спиралей необходимо обеспечить совпадение точки, соответствующей половине расстояния между второй и третьей спиралью с серединой отсчетной шкалы (спирали должны быть расположены симметрично относительно вертикальной оси, проходящей через середину экрана).

4.3.3. Зафиксировать спирали на экране с помощью гайки 11.

4.4. Провести фазировку облучателей передающей и приемной антенны. За счет неточности изготовления элементов спирали и соединительных кабелей, а также ошибки при установке нулевого отсчета при предварительной юстировке оборудования (приложение П.2) фазовые сдвиги токов, питающих элементы линейки, не обеспечивают максимума сигнала на приемной антенне лабораторного макета.

Внимание. При вращении спиральной антенны вокруг горизонтальной оси против часовой стрелки заполнение (5) может выкрутиться по резьбе из втулки (3). Чтобы избежать этого необходимо спираль вращать только в одну сторону – по часовой стрелке. При

полном вворачивании заполнения в основание малое значение коэффициента трения пары «корпус – заполнение» и «корпус – центральный проводник» предотвратит чрезмерное усилие.

Вращая крайнюю правую спираль вокруг своей оси установить по шкале на внешней боковой стороне втулки (5) рис.4.2 угол поворота, равный 0^0 . Не меняя положение крайней правой спирали попеременно вращать вокруг своей оси остальные три, добиваясь каждый раз максимальных показаний на шкале регистратора. Повторяя указанные действия, добиться методом последовательных приближений максимальных показаний на шкале регистратора.

После подстройки фазированной линейки углы поворота 2, 3, 4 спиралей будут отличаться от нулевых значений. Занести эти значения в таблицу 1.

Таблица 1. Значение углов поворота спиральных антенн, соответствующее направлению главного максимума диаграммы направленности $\theta_0=0^0$. Расстояние между спиральями $d = \text{мм}$.

№ элемента	1	2	3	4
Угол поворота ϕ^0	$\phi_1=0^0$	ϕ_2	ϕ_3	ϕ_4

4.5. Провести измерение диаграммы направленности фазированной линейки спиральных элементов в соответствии с приложением 2. Результатом измерений будет автоматически сформированная таблица 2 и соответствующая ей диаграмма направленности, построенная в полярной системе координат. В результате конструктивных особенностей реальных антенн, влияния отражений от окружающих предметов и многих других факторов, диаграммы направленности могут отличаться от расчетных. Также следует учесть, что показания прибора q не остаются неизменными при вращении антенны. Из всех значений q следует выбрать максимальное, которое и заносится в таблицу.

Таблица 2. Диаграмма направленности фазированной линейки из 4 спиральных элементов. Направление главного максимума диаграммы направленности $\theta_0=0^0$. Расстояние между спиральями $d = \text{мм}$.

α (град.)	0	α_1		0	$-\alpha_1$	
q (от. ед.)						
q_n (от.ед.)						

4.6. Повторить измерения диаграммы направленности для остальных заданных значений расстояния между спиральями фазированной линейки. Перед каждым новым измерением необходимо проводить предварительную юстировку антенн и фазировку элементов линейки.

4.7. Провести исследование зависимости направления главного максимума диаграммы направленности θ_0 от разности фаз соседних спиралей для линейного фазового распределения. Для этого выполнить следующие операции.

4.7.1. Установить требуемое расстояние между спиральями, соответствующее заданному преподавателем значению d . После этого

провести предварительную юстировку антенн и фазировку спиралей.

4.7.2. В соответствии с приведенными ниже формулами рассчитать углы поворота спиральных антенн $\Delta\psi_i$ ($i=1-4$). Результаты расчета занести в таблицу 3.

$$\Delta\psi_1 = -\frac{3kd}{2}\sin(\theta_0); \Delta\psi_2 = -\frac{kd}{2}\sin(\theta_0);$$

$$\Delta\psi_3 = \frac{kd}{2}\sin(\theta_0); \Delta\psi_4 = \frac{3kd}{2}\sin(\theta_0);$$

4.7.3. Установить рассчитанные значения углов поворота спиралей (из таблицы 3) вращая их вокруг своей оси. Значения углов отсчитывать по шкале на внешней боковой стороне втулки (5) рис.2.

4.7.4. По указанию преподавателя либо измерить диаграмму направленности линейки (в соответствии с указаниями пункта 5), либо определить направление главного максимума диаграммы направленности θ_0 и ее ширину $\Delta\theta_{0,5}$ по уровню половинной мощности. В последнем случае необходимо:

-вращая линейку фазированных облучателей с помощью поворотного устройства, установить ее в положение, соответствующее максимальным показаниям измерительного прибора;

-зафиксировать значения θ_0 и соответствующее ему показание измерительного прибора q_{max} . Значение θ_0 занести в таблицу 3;

-вращая линейку фазированных облучателей с помощью поворотного устройства по часовой стрелке, установить ее в положение, соответствующее показаниям измерительного прибора $q_{max}/2$;

-отметить и зафиксировать абсолютную величину угла поворота $(\theta_{0,5})_1$;

-вращая линейку фазированных облучателей с помощью поворотного устройства против часовой стрелки, установить ее в положение, соответствующее показаниям измерительного прибора $q_{max}/2$;

-отметить и зафиксировать абсолютную величину угла поворота $(\theta_{0,5})_2$;

-вычислить ширину диаграммы направленности из соотношения:

$$\Delta\theta_{0,5} = (\theta_{0,5})_1 + (\theta_{0,5})_2$$

и занести его значение в таблицу 3.

Таблица 3. Значение углов поворота главного максимума диаграммы направленности θ_0 линейки из 4 спиральных антенн, соответствующих линейному фазовому распределению. Расстояние между спиральями $d = \text{мм}$.

№ эл-та	угол поворота гл. максимума (расчет)	угол поворота спирали.	угол поворота гл. максимума (эксперимент)	ширина главного лепестка (эксперимент)
1	θ_0	$\phi_1 + \Delta\psi_1$	θ_0	$\Delta\theta_{0,5}$
2		$\phi_2 + \Delta\psi_2$		

3		$\phi_3 + \Delta\psi_3$		
4		$\phi_4 + \Delta\psi_4$		

4.7.5. Повторить измерения для остальных значений угла поворота главного максимума диаграммы направленности θ_0 .

4.8. Измерить диаграмму направленности фазированной линейки с квадратичным и кубичным фазовым распределением токов, питающих спиральные элементы. Для этого:

4.8.1. Установить требуемое расстояние между спиралями, соответствующее заданному преподавателем значению d . После этого провести предварительную юстировку антенн и фазировку спиралей заполнив таблицу 4 и определив углы поворота спиралей ϕ_i , соответствующие направлению главного максимума диаграммы направленности $\theta_0 = 0^\circ$.

4.8.2. В соответствии с формулами, приведенными в ячейках таблицы 4, рассчитать фазовые сдвиги соответствующие поворотам спиралей вокруг своей оси. Значение ψ задается преподавателем. Значения ϕ_i соответствуют углам поворота спиралей после предварительной фазировки.

Таблица 4. Значение углов поворота спиральных антенн, соответствующее квадратичному ($s=2$) и кубичному ($s=3$) фазовому распределению. Расстояние между спиралями $d = \text{мм}$.

№ элемента	1	2	3	4
Угол поворота ϕ^0	$\phi_1 = 0^0$	ϕ_2	ϕ_3	ϕ_4
Угол поворота для $s=2$	$\phi_1 + 9/4 \psi$	$\phi_2 + 1/4 \psi$	$\phi_3 + 1/4 \psi$	$\phi_4 + 9/4 \psi$
Угол поворота для $s=3$	$\phi_1 - 27/8 \psi$	$\phi_2 - 1/8 \psi$	$\phi_3 + 1/8 \psi$	$\phi_4 + 27/8 \psi$

4.8.3. Установить рассчитанные значения углов поворота спиралей (из таблицы 4) вращая их вокруг своей оси. Значения углов отсчитывать по шкале на внешней боковой стороне втулки (5) рис.4.2

4.8.4. Провести измерение диаграммы направленности фазированной линейки спиральных элементов в соответствии с приложением 2 для квадратичного и кубичного фазового распределения. Результатом измерений будет автоматически сформированная таблица 5 и соответствующая ей диаграмма направленности, построенная в полярной системе координат. В результате конструктивных особенностей реальных антенн, влияния отражений от окружающих предметов и многих других факторов, диаграммы направленности могут отличаться от расчетных. Также следует учесть, что показания прибора q не остаются неизменными при вращении антенны. Из всех значений q следует выбрать максимальное, которое и заносится в таблицу.

Таблица 5. Диаграмма направленности фазированной линейки из 4 спиральных элементов. Направление главного максимума диаграммы направленности $\theta_0 = \dots$. Расстояние между спиралями $d = \text{мм}$.

α (град.)	0	α_1		0	$-\alpha_1$	
------------------	---	------------	--	---	-------------	--

q (от. ед.)						
q _n (от.ед.)						

Содержание отчета

В отчете должны быть представлены:

1. Схема лабораторной установки с пояснением назначения ее элементов.
2. Результаты численного анализа, выполненного в разделе «Расчеты».
3. Таблицы с результатами экспериментальных исследований и построенные по этим результатам графики.
4. Выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы.

1. Пояснить принцип формирования поля в дальней зоне от нескольких синфазно питаемых антенн.
2. Какие упрощающие предположения делаются при определении поля в дальней зоне фазированной линейки.
3. Пояснить принцип управления направлением главного максимума диаграммы направленности фазированной линейки
4. Почему диаграмма направленности элемента фазированной линейки ограничивает диапазон перестройки направления главного максимума диаграммы фазированной линейки.
5. Какой закон изменения фазы токов, питающих элементы линейки, используется для управления направлением главного максимума диаграммы направленности линейки.
6. Как обеспечивается изменение разности фаз токов, питающих спиральные элементы лабораторного макета.
7. Как связаны углы поворота спирали вокруг горизонтальной оси в лабораторном макете и фазовый сдвиг между токами соседних спиралей в дальней зоне.
8. Как реализуется квадратичный закон изменения разности фаз токов, питающих элементы фазированной линейки и как этот закон влияет на форму диаграммы направленности фазированной линейки.
9. Как реализуется кубичный закон изменения разности фаз токов, питающих элементы фазированной линейки и как этот закон влияет на форму диаграммы направленности фазированной линейки.
10. Какие еще характеристики спирального элемента фазированной линейки (кроме его диаграммы направленности) влияют на ее характеристики.
11. Перед началом каждого измерения выполняется фазировка элементов линейки. Почему она необходима и как она выполняется.

Работа 5.
«ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НАПРАВЕННОСТИ
РУПОРНЫХ АНТЕНН».

Цель работы.

Целью работы является:

- изучение конструкции рупорной антенны диапазона 10 ГГц с питающей линией в виде прямоугольного волновода сечением (23x10)мм ;
- экспериментальное определение диаграмм направленности рупорной антенны в двух взаимно перпендикулярных плоскостях (плоскости E и H);
- экспериментальное определение степени влияния геометрических размеров рупорной антенны на ширину диаграммы направленности;
- экспериментальное определение коэффициента поляризации излучения рупорной антенны в различных направлениях.

Методические указания по самоподготовке

При подготовке к выполнению лабораторной работы необходимо изучить [1, 2, 3, 4]:

- основные характеристики антенных устройств. Особое внимание обратить на определение амплитудной и фазовой диаграммы направленности антенны;

- принципы формирования поля излучающей поверхностью и основные расчетные соотношения, определяющие характеристики направленности. Влияние формы излучающей поверхности и ее размеров на ширину диаграммы направленности, количество и уровень боковых лепестков;

- классификацию рупорных антенн, принципы формирования ими поля излучения в дальней зоне, связь геометрии рупорной антенны и ее характеристик направленности;

- влияние амплитудного и фазового распределения поля в раскрыве рупора на его диаграмму направленности. Идеальный рупор;

- способы коррекции фазовых искажений на раскрыве рупорной антенны.

Примеры практической реализации.

Описание лабораторной установки.

Функциональная схема лабораторной установки приведена на рис. 5.1. Она включает в себя приемную (1) и передающую антенну, которые образуют радиолинию.

В качестве приемной используется зеркальная параболическая антенна, состоящая из зеркала (З) и облучателя, представляющего собой конический рупор (КР), объединенный с детекторной секцией на основе волновода круглого сечения (Д).

Зеркало представляет собой вырезку из поверхности параболоида вращения, смещенную от центра (офсетного типа). Этим устраняется теневой эффект.

Облучатель располагается в фокусе параболоида. Его крепление допускает смещение в продольном и поперечном направлении по отношению к оси зеркала, чем обеспечивается настройка лабораторного макета и проведение необходимых измерений.

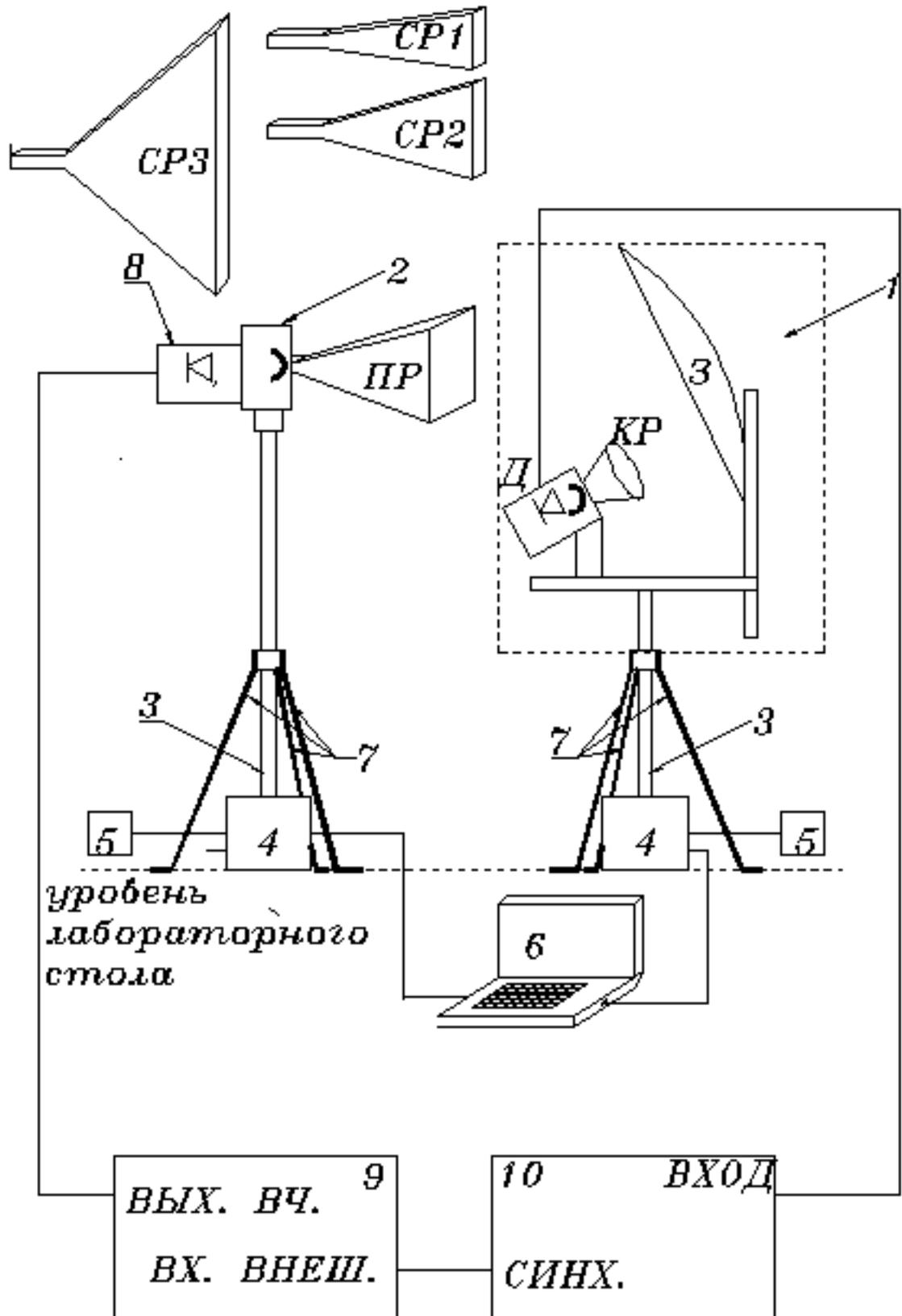


Рис. 5.1.

В качестве передающей антенны в лабораторной установке используется одна из четырех рупорных антенн: пирамидальный рупор ПР и три E-секториальных рупора СР1-3 (рис.5.1). Их геометрию определяют

следующие параметры (на рис. 5.2 они определены для E-секториального рупора):

- длина расширяющегося участка в соответствующей плоскости (L_E , L_H). Следует отметить, что (L_E , L_H) отличается от параметра «длина рупора», который измеряется от плоскости раскрыва до фазового центра и не допускает непосредственного измерения;

- угол раскрыва в соответствующей плоскости (Φ_E , Φ_H);

- ширина раскрыва в соответствующей плоскости (D_E , D_H).

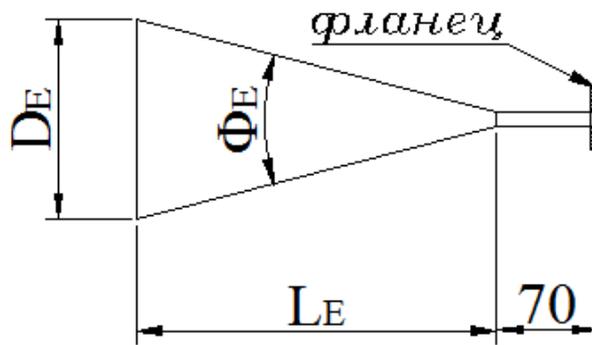


Рис. 5.2.

Ниже приведены численные значения размеров для используемых рупорных антенн.

Пирамидальный рупор, плоскость H :

- длина рупора $L_H = 253$ мм;

- угол раскрыва $\Phi_H = 14^\circ$;

- ширина раскрыва в плоскости H $D_H = 140$ мм.

Пирамидальный рупор плоскость E :

- длина рупора $L_E = 253$ мм;

- угол раскрыва $\Phi_E = 18^\circ$;

- ширина раскрыва в плоскости E $D_E = 180$ мм.

Три E-секториальных рупора имеют одинаковую длину расширяющегося участка $L_E = 240$ мм. Углы и соответствующая ширина раскрыва имеют следующие значения:

- $\Phi_E = 10^\circ$; $D_E = 95$ мм;

- $\Phi_E = 30^\circ$; $D_E = 287$ мм;

- $\Phi_E = 50^\circ$; $D_E = 582$ мм.

Все рупорные антенны имеют в основании прямоугольный волновод сечением 23x10 мм и заканчиваются его отрезком длиной 70 мм с соединительным фланцем (рис. 5.2).

Отрезок прямоугольного волновода позволяет крепить рупорные антенны в узле (2), который обеспечивает изменение угла наклона рупора в вертикальной плоскости в пределах $\pm 10^\circ$, чем обеспечивается настройка радиолинии по максимуму принимаемого сигнала в процессе проведения измерений.

К соединительному фланцу рупора пристыкована генераторная секция на основе диода Ганна (8). Конструкция узла (2) обеспечивает возможность

оперативной замены рупорных антенн, которые используются в лабораторном макете.

Передающая рупорная антенна в узле (2) и конический рупор (КР) облучателя с детектором (Д) приемной зеркальной параболической антенны (1) рассчитаны на прием линейно поляризованной волны. Узлы из крепления предусматривают возможность регулировки направления поляризации, на которую они настроены, за счет их вращения вокруг своей оси.

Эскиз узла (2) крепления рупорной антенны, в котором предусмотрены все перечисленные выше функции, приведен на рис. 5.3.

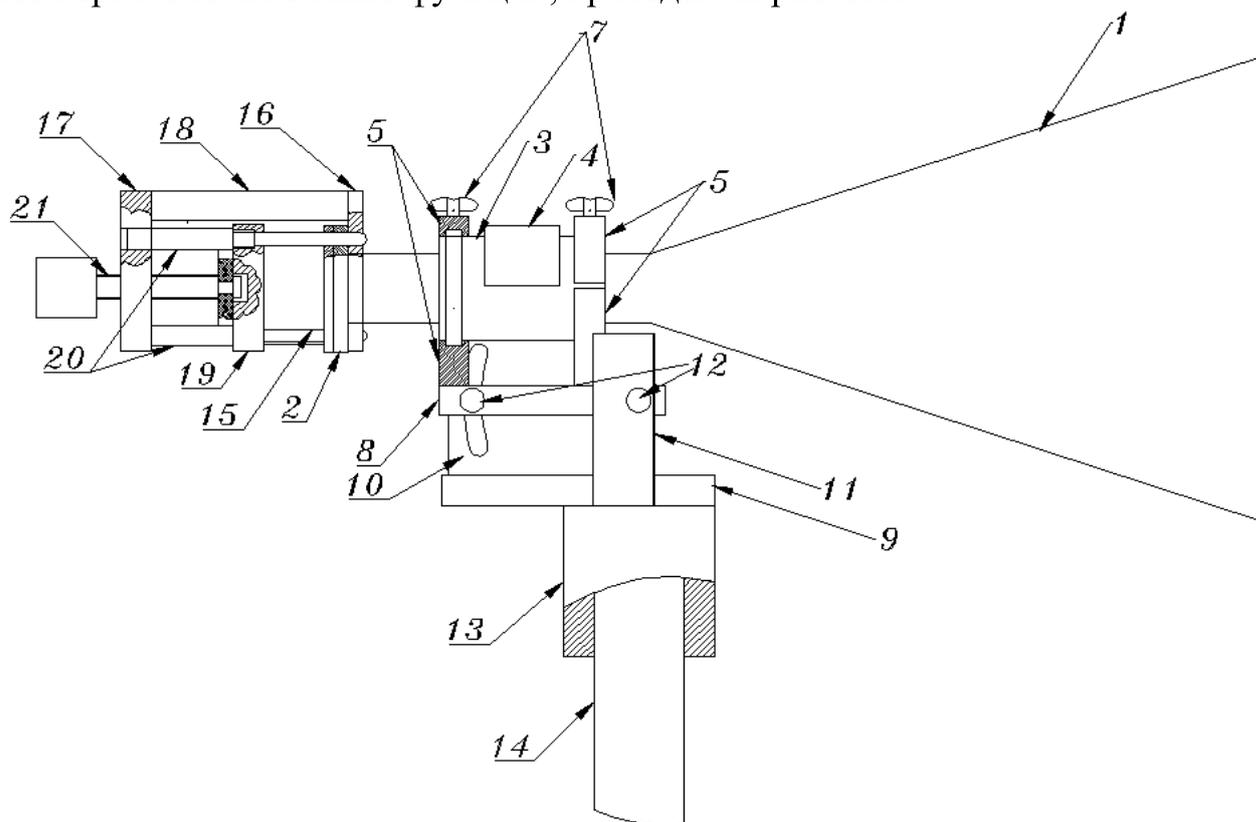


Рис.5.3.

Рупорная антенна (1) с фланцем (2) на торце отрезка прямоугольного волновода и составным капролоновым вкладышем (3,4) фиксируется в двух разрезных скобах (5). Между собой их части скреплены фигурными винтами (7). Такое крепление волновода с рупорной антенной обеспечивает возможность вращения всей конструкции вокруг продольной оси, что необходимо для изменения в ходе выполнения лабораторной работы поляризации излучаемой рупором электромагнитной волны. Капролоновые вкладыши имеются на всех рупорных антеннах, что обеспечивает возможность их оперативной замены в ходе выполнения лабораторной работы.

Основой узла (2) (рис.5.1) являются два основания - неподвижное (9) и подвижное (8) (рис. 5.3). Разрезные скобы укреплены на подвижном основании. Для фиксации положения подвижного основания (8), в нем имеются сквозные отверстия. Через них проходят две оси (12), на концах

которых имеется резьба. С помощью гаек положение осей с подвижным основанием фиксируется на вертикальных стойках (10, 11), нижние концы которых закреплены на нижнем основании (9). В стойке (10) имеется фигурное отверстие, по которому одна из осей может перемещаться. Таким образом изменяется угол наклона рупорной антенны в вертикальной плоскости.

К нижнему неподвижному основанию (9) крепится дюралевый стакан (13), в который вставлена диэлектрическая штанга (14), противоположный нижний конец которой опирается на поворотное устройство.

К фланцу отрезка волновода передающего рупора крепится фланец генераторной секции выполненной на основе диода Ганна (15). Диод помещен в резонатор, образованный отрезком прямоугольного волновода сечением 23x10 мм.

Узел крепления генераторной секции состоит из платы (18), на которой закреплены две пластины. Первая (16) имеет прямоугольный вырез и 4 отверстия, соосные с отверстиями во фланце волновода. Прямоугольный вырез по размеру совпадает с узкой стенкой волновода.

Во второй пластине (17) имеется отверстие с резьбой. В него ввернут прижимной винт (21) с площадкой (19). На ней имеются такие же отверстия, как на фланце волновода и пластине (16). Кроме того на этой же пластине (17) укреплены четыре направляющие (20).

Генераторная секция на основе диода Ганна (13) расположена между площадкой (19) и фланцем питающего рупорную антенну волновода (2). Направляющие проходят через отверстия в площадке прижимного винта (19), во фланце волновода генераторной секции (15) и во фланце (2). Эта конструкция обеспечивает совмещение поперечных сечений двух прямоугольных волноводов –генераторной секции и рупорной антенны между собой. Прижимной винт (21) обеспечивает контакт между фланцами волновода и генераторной секции.

Настройка зеркальной параболической антенны в ходе выполнения лабораторных исследований выполняется за счет перемещения облучателя, представляющего собой конический рупор (КР), объединенный с детекторной секцией на основе волновода круглого сечения (Д) (Рис.5.1). Эскиз этого узла приведен на рис. 5.4.

Облучатель (1) фиксируется в капролоновых разрезных скобах (2), которые скреплены между собой с помощью винтов (3). Ослабление этих винтов обеспечивает возможность вращения облучателя (1) вокруг продольной оси, что обеспечивает возможность подстройки поляризации принимаемой антенной волны.

С противоположной стороны вся эта конструкция крепится с помощью центрирующего (5) и фиксирующих (4) винтов к фигурной скобе (6). В скобе (6) имеются фигурные вырезы, через которые проходят фиксирующие винты. Их ослабление обеспечивает возможность вращения облучателя (1) в вертикальной плоскости, чем обеспечивается настройка зеркальной параболической антенны.

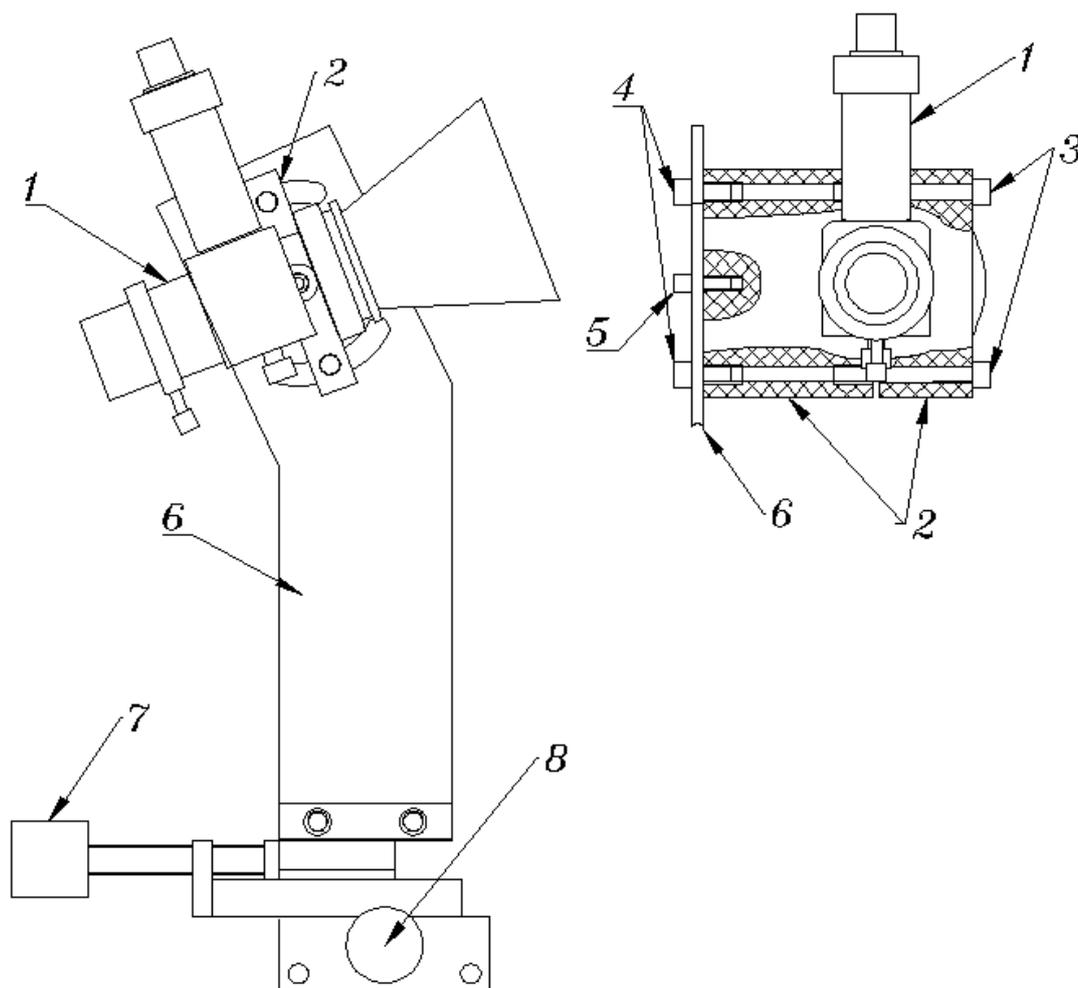


Рис. 5.4.

Нижний конец скобы (6) крепится к плате устройства перемещения облучателя. Вращение винта (7) приводит к смещению облучателя относительно фокуса параболического зеркала в продольном направлении. Винт (8) обеспечивает смещение в поперечном направлении. В ходе выполнения лабораторных исследований смещение облучателя необходимо фиксировать. Для этого на подвижных частях устройства перемещения облучателя имеются шкалы, по которым определяется его смещение в двух взаимно перпендикулярных направлениях – продольном x и поперечном y .

Для обеспечения рабочих токов и напряжений генераторной секции на основе диода Ганна используется блок питания (9) ГС-11. Его органы управления рассмотрены в приложении 1.

Излученный рупорной антенной сигнал регистрируется приемной зеркальной параболической антенной, детектируется детектором (Д) и поступает на гнездо «ВХОД» регистратора (10). Выход синхронизирующего сигнала (гнездо «СИНХ») соединяется со входом синхронизации блока питания (9) ГС-11 (гнездо «ВХ ВНЕШ»).

Поскольку конструкции приемной и передающей антенны имеют значительные габариты и вес, их поворотные устройства располагается на

лабораторном столе, а вертикальное положение ее диэлектрической штанги дополнительно фиксируется тремя откосами (7). Они выполнены из дюралевого тавра и нижним концом крепятся к поверхности лабораторного стола, а верхним – к внешней обойме подшипника трения (на рис. 1 не показан), в котором диэлектрическая штанга (3) вращается совместно с установленной антенной. Такой вариант расположения фазированной линейки разгружает поворотное устройство за счет того, что основной вес приходится на обойму опорного подшипника.

Питание поворотных устройств осуществляется от отдельных сетевых адаптеров (5), которые подключаются к сети 220 в. Управление поворотными устройствами осуществляется от персонального компьютера (6), который соединен с поворотными устройствами кабелями USB(A) – USB(D). Особенности управления положением антенн поясняются в приложении П.1.

Поворотные устройства, генераторная секция с блоком питания, детекторная секция и регистратор являются общими элементами для нескольких лабораторных макетов. Поэтому особенности их конструкции, органы управления и принцип действия описаны в приложении 1.

Порядок выполнения работы

Измерения.

Внимание. Все действия, связанные с заменой рупорных антенн на штативе производить только при отключенной мощности СВЧ на выходе генератора.

5.1. В ходе выполнения лабораторных исследований предполагается использование в качестве приемной четырех различных рупорных антенн – трех секционных с различными углами раскрытия и одного пирамидального. Перед началом исследования характеристик одной из них необходимо выполнить операции по ее установке на поворотное устройство. Для этого необходимо:

5.1.1. Отвернуть полностью фиксирующие винты (7) на узле крепления рупорной антенны (рис.5.3).

5.1.2. Разъединить разрезные скобы (5) и снять установленную ранее рупорную антенну со штатива.

5.1.3. Вывернуть до упора прижимной винт (21). При этом четыре направляющие (20) должны выйти из отверстий в скобе (16) узла крепления генераторной секции и волноводного фланца (2) рупорной антенны.

5.1.4. Снять генераторную секцию с узлом ее крепления с рупорной антенны.

5.1.5. Установить генераторную секцию с узлом ее крепления на исследуемый рупор поместив отрезок питающего волновода в скобу (16) так, чтобы направляющие (20) оказались приблизительно напротив отверстий в фланце (2).

5.1.6. Завернуть до упора прижимной винт (21), проследив за тем, чтобы четыре направляющие (20) проходили через отверстия в скобе (16) узла крепления генераторной секции и волноводном фланце (2) рупорной

антенны. При этом между фланцами генераторной секции и рупорной антенны должен обеспечиваться омический контакт.

5.1.7. Установить рупорную антенну с генераторной секцией на узел крепления рупорной антенны, проследив за тем, чтобы капролоновые вкладыши (3, 4) на питающем волноводе рупора попали в углубления на нижней части разрезных скоб (5).

5.1.8. Установить верхние части разрезных скоб (5) и привернуть их фиксирующими винтами (7) на узле крепления рупорной антенны. Винты не затягивать до упора, предусмотрев возможность вращения рупора вокруг горизонтальной оси для установления заданной поляризации.

5.2.В лабораторном макете используется линейно поляризованная волна. Направление поляризации задается передающей рупорной антенной (рис.5.3). В питающей рупор линии устанавливается одноволновый режим (распространяется основная волна H_{10} прямоугольного волновода). Поэтому приближенно направление вектора напряженности электрического поля можно определить по нормали к широкой стенке отрезка волновода длиной 70 мм с соединительным фланцем (рис. 5.2).

Для облучателя зеркальной параболической антенны (рис. 4, рис.П.7) вектор напряженности электрического поля E должен быть ориентирован вдоль направления, определяемого детекторным диодом (9) и элементами (8,20) (рис.П.7).

Установить передающую рупорную антенну и облучатель зеркальной параболической антенны в положение соответствующее заданной поляризации (определяется преподавателем). Для этого:

5.2.1. При необходимости ослабить фиксирующие винты (7) на узле крепления рупорной антенны (рис.3).

5.2.2. Повернуть рупорную антенну с установленной генераторной секцией в положение, при котором плоскость E или H исследуемого рупора (определяется преподавателем) займет горизонтальное положение.

5.2.3. Затянуть фиксирующие винты (7) на узле крепления рупорной антенны с усилием, исключая случайный поворот рупора вокруг своей оси.

5.2.4.Ослабить винты (3), фиксирующие положение облучателя (1) в капролоновых разрезных скобах (2) (рис. 4) и повернуть его вокруг своей оси в положение, приближенно с соответствующее приему волны с направлением поляризации, установленном в передающем рупоре. В дальнейшем предполагается производить настройку макета за счет регулировки поляризации, поэтому окончательную затяжку винтов (3) не производить. Следует подтянуть их так, чтобы исключить свободное вращение облучателя (1).

5.3. Выполнить действия по включению и предварительной юстировке оборудования, предусмотренные в приложении 2. Дополнительно произвести настройку макета, выполнив следующие действия:

5.3.1. Ослабить крепление гаек на осях (12) (рис.3) и изменяя угол наклона рупорной антенны в вертикальной плоскости добиться максимальных показаний цифрового индикатора на лицевой панели регистратора. Зафиксировать оси (12) затянув гайки их крепления.

5.3.2. Ослабить крепление гаек (4) крепления разрезной скобы фиксации облучателя зеркальной параболической антенны (1) (рис.4) и изменяя его угол наклона в вертикальной плоскости добиться максимальных показаний цифрового индикатора на лицевой панели регистратора. Зафиксировать угловое положение облучателя (1) затянув гайки (4).

5.3.3. Ослабить при необходимости винты (3), фиксирующие положение облучателя (1) в капролоновых разрезных скобах (2) (рис. 4) и вращая его вокруг своей оси добиться максимальных показаний цифрового индикатора на лицевой панели регистратора. Зафиксировать угловое положение облучателя (1) затянув гайки (3).

5.3.4. Повторить действия, описанные в пунктах 3.1.-3.3. и методом последовательных приближений добиться максимальных показаний цифрового индикатора на лицевой панели регистратора.

5.4. Выбрать значение шага изменения угла поворота исследуемого рупора $\delta\Psi$. Для этого используя органы управления поворотным устройством с установленным на него рупором вращать его вокруг вертикальной оси и отметить при этом значения углов, соответствующих максимальным Ψ_{max} и минимальным Ψ_{min} показаниям цифрового индикатора на лицевой панели регистратора. Грубо оценить ширину диаграммы направленности исследуемой антенны:

$$\Delta\Psi = \Psi_{min} - \Psi_{max}.$$

Выбрать шаг изменения угла поворота антенны $\delta\Psi$ так, чтобы в интервале $\{\Psi_{min}; \Psi_{max}\}$ укладывалось бы не менее 7 отсчетных точек:

$$\Delta\Psi / \delta\Psi > 10.$$

5.5. Провести измерение диаграммы направленности передающей спиральной антенны в соответствии с приложением 1, 2. При проведении измерений использовать значение шага изменения угла поворота $\delta\Psi$, определенного в предыдущем пункте.

На первом этапе снять диаграмму направленности исследуемого рупора в пределах главного максимума. Для этого изменять угол поворота антенны Ψ в пределах

$$\Psi_{min} - (-\Psi_{min})$$

Результатом измерений будет автоматически сформированная таблица 1 и соответствующая ей диаграмма направленности, построенная в полярной системе координат. В результате конструктивных особенностей реальных антенн, влияния отражений от окружающих предметов и многих других факторов, диаграммы направленности могут отличаться от расчетных. Также следует учесть, что показания прибора q не остаются неизменными при вращении антенны. Из всех значений q следует выбрать максимальное, которое и заносится в таблицу.

Таблица 1. Диаграмма направленности рупорной антенны. Тип рупора (ПР, СР). Геометрические размеры $L_{E,H}=\dots, D_{E,H}=\dots, \Phi_{E,H}=\dots$

α (град.)	0	α_1		0	$-\alpha_1$	
q (от. Ед.)						
q_n (от. ед.)						

5.6. По указанию преподавателя определить положение и уровень боковых лепестков диаграммы направленности рупорной антенны. Для этого:

5.6.1. Вращая антенну в пределах $-90^\circ < \theta < 90^\circ$ отметить угловое положение θ_j , при котором показания на индикаторе регистратора возрастают (j – номер бокового лепестка). Отсчет лепестков проводить от угла $\theta=0$, $j < 0$ для $\theta < 0$ и $j > 0$ для $\theta > 0$. При выполнении этого пункта следует переопределить значение шага изменения угла поворота исследуемого рупора и чувствительность регистратора, исходя из удобства проведения измерений;

5.6.2. Отметить соответствующее θ_j показания q_j индикатора регистратора и зафиксировать эти данные в таблице 2;

5.6.3. Дополнительно отметить значение q_0 , соответствующее главному максимуму диаграммы направленности рупора;

5.6.4. Вычислить уровень измеренных боковых лепестков по формуле:

$$\xi_i = q_j / q_0.$$

Таблица 2. Уровни боковых лепестков рупорной антенны. Тип рупора (ПР, СР). Геометрические размеры $L_{E,H}=\dots, D_{E,H}=\dots, \Phi_{E,H}=\dots$

i	θ_i	q_j	$\xi_i = q_j / q_0$
0			-
1			
2			
3			

5.7. Произвести измерение диаграммы направленности исследуемого рупора изменив его поляризацию на ортогональную. При изменении поляризации рупорной антенны следовать указаниям, приведенным в пунктах 2, 3.

5.8. Повторить весь цикл измерений для остальных рупоров, входящих в состав лабораторной установки. При замене рупорной антенны следовать указаниям, приведенным в пунктах 1, 2, 3.

Содержание отчета

В отчете должны быть представлены:

1. Схема лабораторной установки с пояснением назначения ее элементов.
2. Результаты численного анализа, выполненного в разделе «Расчеты».
3. Таблицы с результатами экспериментальных исследований и построенные по этим результатам графики.

4. Выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы.

1. Пояснить принцип формирования поля излучения поверхностью. Дать определение для понятий: «амплитудное и фазовое распределение».
2. Как связаны геометрические размеры излучающей поверхности и ее характеристики направленности при равномерном амплитудном и фазовом распределении эквивалентных токов по ее поверхности.
3. Пояснить причины отражения волны при излучении от открытого конца волновода.
4. Пояснить связь формы диаграммы направленности излучающей поверхности и фазового распределения (для линейного, квадратичного и кубичного распределения).
5. Пояснить связь формы диаграммы направленности излучающей поверхности и амплитудного распределения спадающего к краям.
6. Дать классификацию рупорных антенн на основе волноводов. Пояснить их геометрические характеристики.
7. Пояснить структуру поля в плоскости Е и Н рупорной антенны на основе волновода прямоугольного сечения.
8. Пояснить причину формирования квадратичного фазового распределения на раскрыве рупора.
9. Дать определение понятия «идеальный рупор».
10. Привести примеры практического использования рупорных антенн.

Работа 6.

«ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НАПРАВЕННОСТИ ЗЕРКАЛЬНОЙ ПАРАБОЛИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ».

Цель работы.

Целью работы является:

- изучение конструкции зеркальной параболической антенны диапазона 10 ГГц ;
- экспериментальное определение диаграмм направленности зеркальной параболической антенны;
- экспериментальное определение степени влияния смещения облучателя зеркальной параболической антенны из фокуса зеркала для:
 - продольного смещения облучателя;
 - поперечного смещения облучателя.

Методические указания по самоподготовке

При подготовке к выполнению лабораторной работы необходимо изучить [1, 2, 3, 4]:

- основные характеристики антенных устройств. Особое внимание обратить на определение амплитудной и фазовой диаграммы направленности антенны;

- принципы формирования поля излучения возбужденной поверхностью параболоида вращения и основные расчетные соотношения, определяющие характеристики направленности;

- классификацию зеркальных параболических антенн, связь геометрии антенны и ее характеристик направленности, оценка влияния положения облучателя на форму диаграмму направленности с использованием приближения геометрической оптики.

Описание лабораторной установки.

Функциональная схема лабораторной установки, приведенная на рис. 6.1 практически полностью повторяет приведенную в описании к предыдущей лабораторной работе № 5. Отличие лишь в том, что здесь исследуется приемная зеркально-параболическая антенна. Поэтому в состав макета не входят секториальные рупоры, а в качестве передающей антенны используется пирамидальный рупор, который постоянно фиксируется в узле (2). В остальном описание функциональной схемы совпадает с приведенным в соответствующем разделе к работе № 5.

Порядок выполнения работы

Измерения.

6.1.Выполнить операции по предварительной настройке макета описанные в пунктах 2, 3 методических указаний к работе №5.

6.2.Установить отсчет $x=0$ и $y=0$ по шкалам поперечного и продольного смещения облучателя (рис. 5.4). Для этого перемещать облучатель с помощью винтов (7, 8) Занести установленные отсчеты x , y в таблицу 1.

Таблица 1. Результаты измерения диаграммы направленности зеркальной параболической антенны при положении облучателя $x=$, $y=$.

θ (град.)	
q (отн. ед.)	
q/q_{max}	

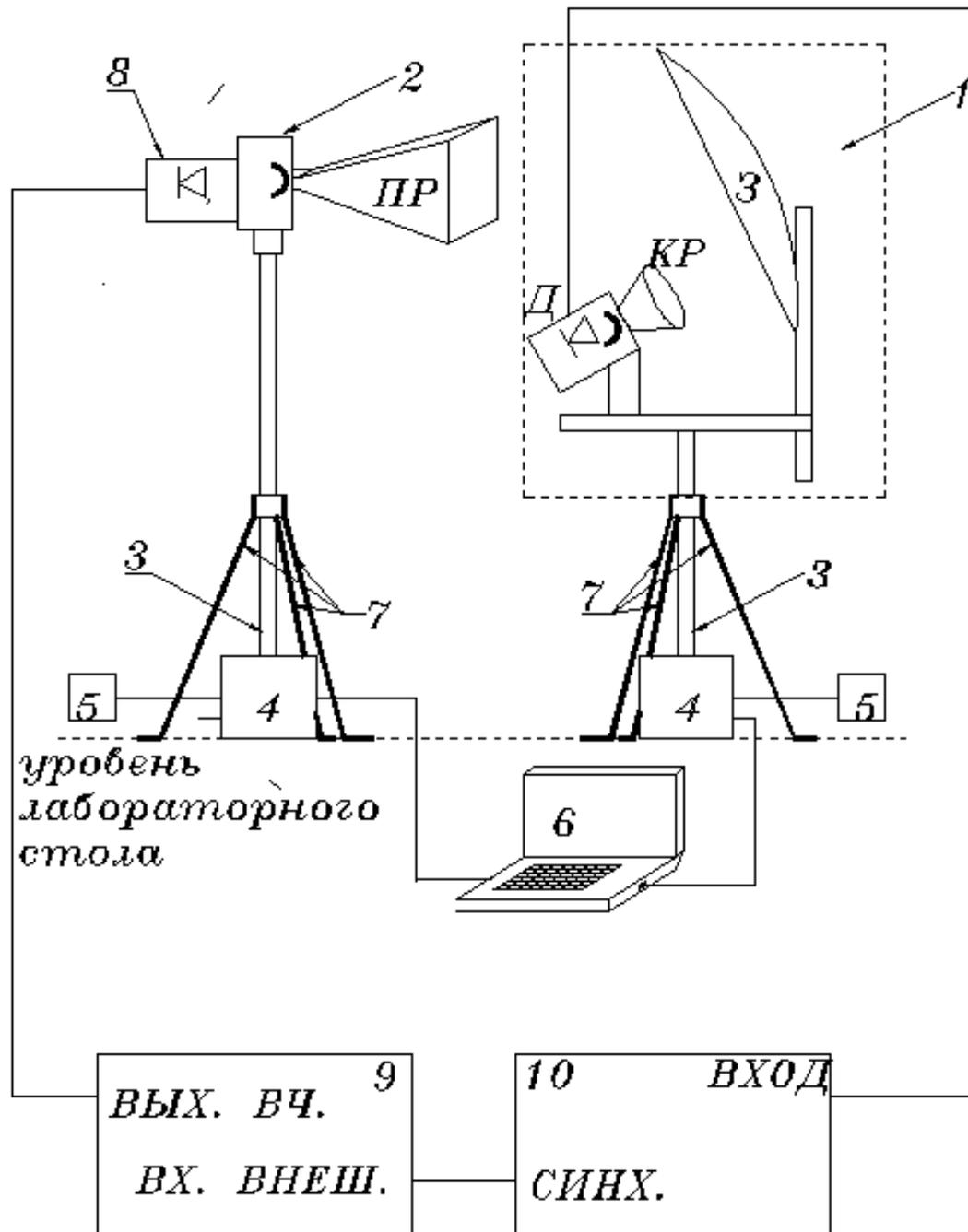


Рис. 6.1.

6.3. Произвести исследование характеристик направленности зеркальной параболической антенны с облучателем, помещенным в выбранную точку. Для этого выполнить действия, предусмотренные в пунктах 5.4, 5.5, 5.6 методических указаний к работе №5. При определении шага изменения угла поворота зеркальной параболической антенны $\delta\Psi$ и диапазона $\{\Psi_{min}; \Psi_{max}\}$ следует помнить, что для нее эти значения составляют доли и единицы градуса, в отличие от предыдущего случая исследования рупорной антенны, где их значения составляют десятки градусов.

Численные данные по исследованию характеристик направленности и уровня боковых лепестков занести в соответственно в таблицы 1 или 2.

Таблица 2. Уровни боковых лепестков зеркальной параболической антенны при положении облучателя $x=$, $y=$.

i	θ_i	q_j	$\xi_i = q_j / q_0$
0			-
1			
2			
3			

6.4. Повторить измерение диаграмм направленности антенны при положениях облучателя x , y и поляризации волны указанных преподавателем. При каждом изменении условий исследования характеристик направленности необходимо повторять действия предусмотренные в пунктах 5.4, 5.5, 5.6 методических указаний к работе №5.

Содержание отчета

В отчете должны быть представлены:

1. Схема лабораторной установки с пояснением назначения ее элементов.
2. Таблицы с результатами экспериментальных исследований и построенные по этим результатам графики.
4. Выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы.

1. Пояснить принцип действия зеркальной параболической антенны и ее основные геометрические характеристики.
2. Пояснить возможность приближенного анализа зеркальной параболической антенны с использованием законов геометрической оптики.
3. Пояснить формирование поля излучения антенны при продольном смещении облучателя из фокуса зеркала.
4. Пояснить формирование поля излучения антенны при поперечном смещении облучателя из фокуса зеркала.
5. Пояснить критерии выбора соотношения между радиусом раскрыва зеркала и его фокусным расстоянием.
6. Привести примеры облучателей зеркальной параболической антенны и объяснить критерий выбора их характеристик направленности.
7. В чем заключается теневой эффект. Привести примеры его минимизации.
8. Как обеспечивается согласование линии, питающей облучатель зеркальной параболической антенны (устранение влияния зеркала на облучатель).
9. Пояснить причины возникновения кросс поляризации.
10. Чем определяются требования к точности изготовления профиля параболического зеркала.

Приложение 1.

Описание общих элементов лабораторных макетов и особенностей их устройства и управления.

П1.1. Поворотные устройства.

Ниже описываются общие действия по возможным регулировкам и включению поворотных устройств с установленными на них макетами антенн. Предусмотрена возможность их расположения на треногах и

лабораторных столах. В последнем случае механическая часть поворотных устройств не допускает никаких регулировок.

Расположение поворотных устройств на штативах предусматривает прежде всего регулировку высоты установленной антенны, предусмотренную механизмом штатива. Кроме того, имеется возможность горизонтального смещения оси вращения исследуемой антенны.

Эскиз поворотного устройства приведен на рис. П.1 На их верхней плоскости (1) крепятся направляющие (2). В них имеются пазы, в которых в продольном (горизонтальном) направлении может перемещаться капролоновая пластина (3). Положение пластины фиксируется четырьмя винтами (4). На пластине (3) устанавливаются дюралевые опорные цилиндры (5). В них фиксируются нижние концы диэлектрических штанг (6) с установленными на них антеннами.

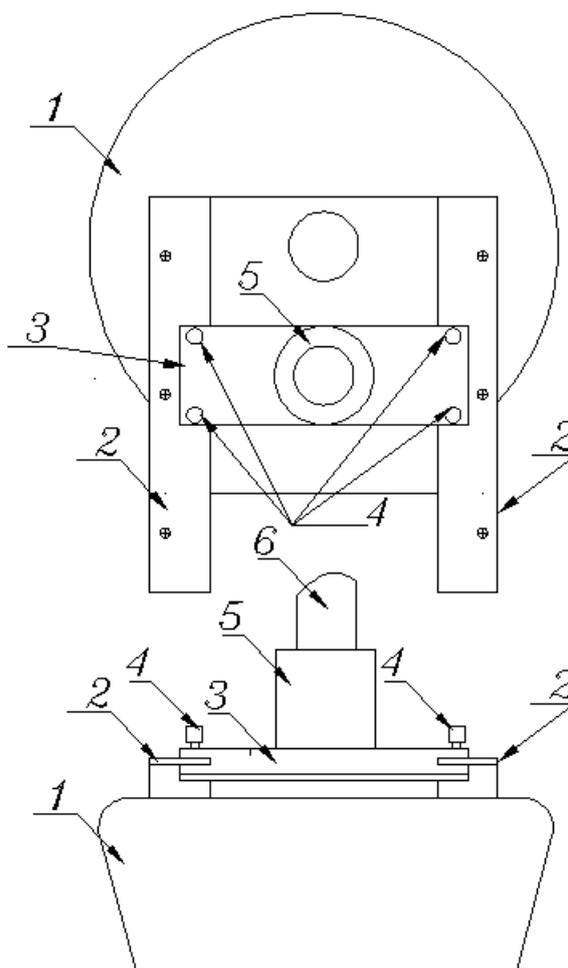


Рис.П.1.

Положение дюралевых цилиндров выбирается так, чтобы вертикальная ось вращения соответствующих антенн при исследовании диаграмм направленности проходила через точку их фазового центра.

Управление поворотными устройствами, расположенными на штативах и лабораторных столах однотипно. Они управляются с помощью ноутбука с использованием специально разработанного программного обеспечения. Особенности включения поворотных устройств и управления положением антенн поясняются ниже.

1. Включить питание поворотных устройств приемной и передающей антенны. Управление ими однотипно. Питание осуществляется от отдельных блоков. О включении питания сигнализирует загорание красного светодиода на панели поворотного устройства рядом с соответствующим кабелем.

2. Включить питание ПК. О включении питания сигнализирует загорание зеленого светодиода на панели поворотного устройства рядом с соответствующим кабелем. На экране монитора ПК должно появиться окно с кнопками управления поворотными устройствами передающей и приемной антенны (рис. П.2).

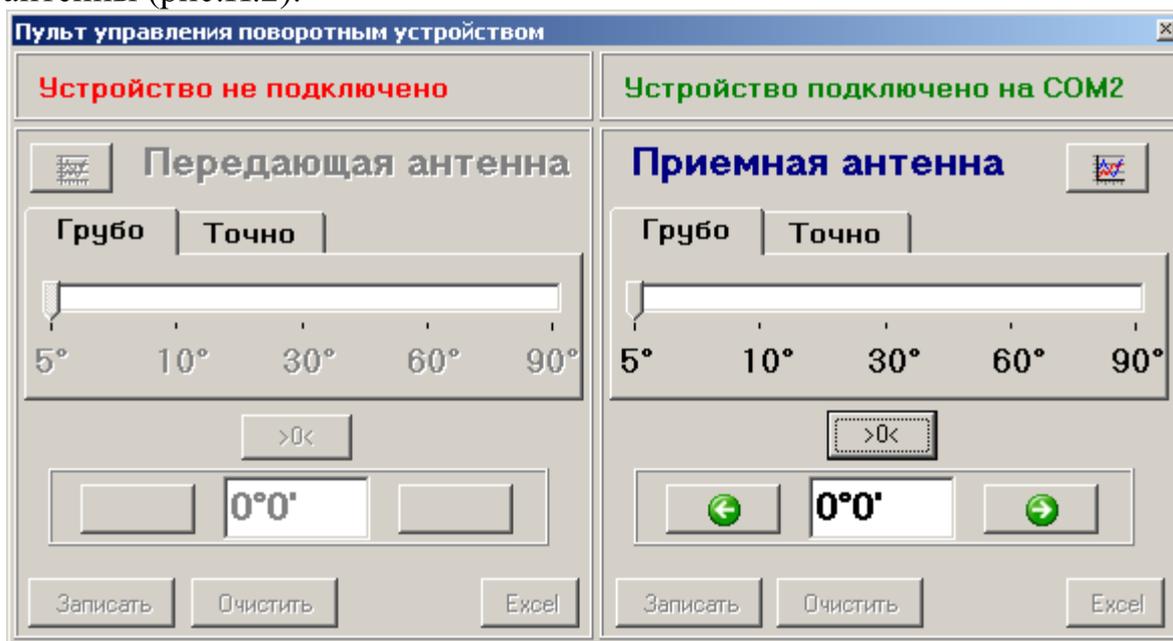


Рис. П.2.

ПК управляет работой обоих поворотных устройств, обеспечивающих вращение как передающей, так и приемной антенны. Для переключения поворотных устройств следует щелкнуть кнопкой мыши по одной из кнопок в правой или левой части окна.

Вращение антенн осуществляется в двух режимах. При нажатии кнопки «грубо» вращение антенны происходит с дискретой в 5° , 10° , 30° , 60° , 90° (рис. П.3). Переключение значений дискретности производится перетаскиванием движка по шкале. Текущее значение угла отображается в нижнем окне.

Кнопка $>0<$ служит для установления нулевого отсчета для текущего значения угла. Зеленые кнопки со стрелками меняют направление вращения антенны.

При нажатии кнопки «точно» вращение антенны происходит с дискретой в $10'$, $20'$, $30'$, $40'$, $50'$, 1° , 2° , 5° (рис. П.3). Остальные кнопки выполняют те же функции, что и режиме «грубо».

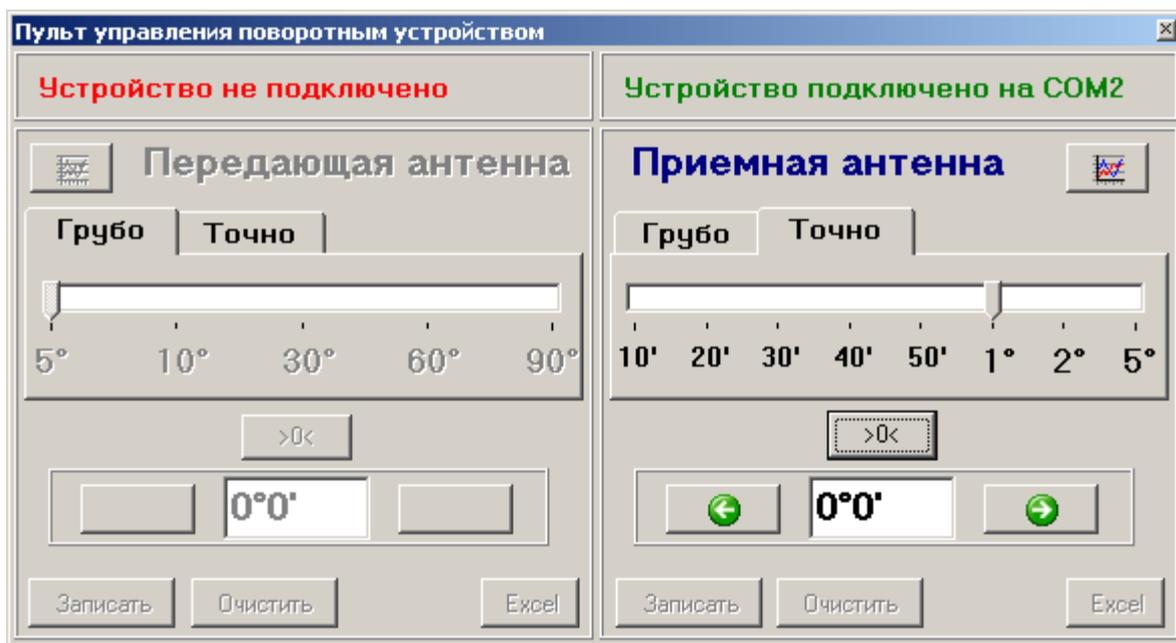


Рис.П.3.

Для снятия диаграммы направленности приемной или передающей антенны необходимо сделать активным соответствующее окно, нажав одну из перечисленных выше кнопок. Затем нажать на кнопку «график», расположенную левее надписи «передающая антенна» или правее надписи «приемная антенна». При этом появляется шкала для отображения диаграммы направленности антенны в полярной системе координат и таблица для фиксации текущего отсчета. Значение угла отражается меткой на полярной диаграмме (рис.П.4).

Нажатие на кнопку «записать» (она в этом режиме становится доступной) приводит к появлению окна ввода значения показаний регистратора «запишите значение показаний регистратора в mV». В это окно вводится соответствующие углу поворота антенны показания регистратора. График диаграммы направленности начинает отображаться на полярной диаграмме после ввода минимум 4 отсчетных точек.

При занесении в таблицу численных значений доступна кнопка «очистить», нажатие на которую приводит к уничтожению всех численных данных.

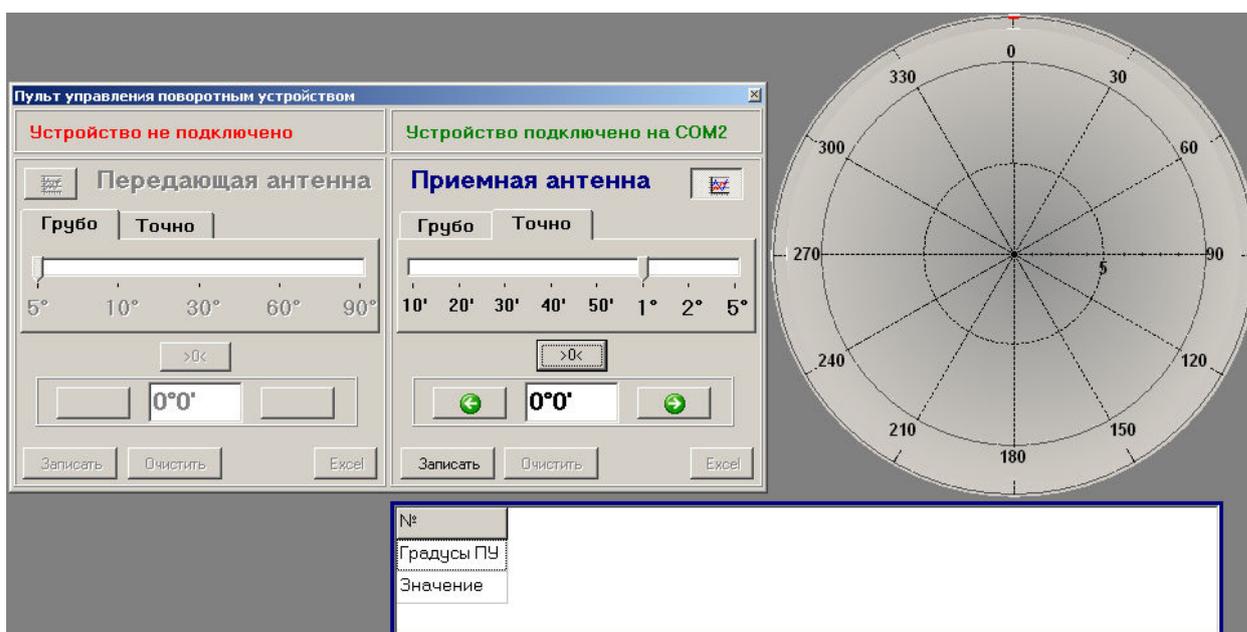


Рис.П.4.

Кнопка «Excel» приводит к выгрузке в буфер обмена графика соответствующей диаграммы направленности и запуску приложения Excel из пакета MS Office, при условии, что данный пакет установлен. После запуска программы Excel происходит автоматическая загрузка в нее таблицы численных значений. Для загрузки графика диаграммы необходимо нажать кнопку «вставить из буфера». На экране появятся соответствующие объекты, с которыми далее можно проводить необходимые манипуляции

П1.2. Генераторы высокой частоты.

В работах 1-2 используются генераторы высокой частоты диапазона (500 -1000) мГц, а в работах 3- 4 - диапазона (2000 – 3000) мГц. Все их лицевые панели и органы управления, расположенные на них, идентичны. Вид этой лицевой панели приведен на рис. П.5.

Выходной разъем кабеля от передающей антенны подключается к блочному разъему в окне «ВЫХОД ВЧ». Свечение зеленого светодиода в этом же окне свидетельствует о поступлении мощности в передающую антенну.

К блочному разъему «ВХ. ВНЕШ.» в окне модуляция подключается кабель синхронизации от блока регистратора. Трехпозиционный переключатель «НГ. ВЫКЛ. ВНЕШ.» в рабочем положении должен находиться в положении «ВНЕШ.». Два других его положения используются для отключения ВЧ мощности от передающей антенны при необходимости провести регулировку и настройку исследуемых антенн.

В левом углу лицевой панели расположен цифровой индикатор «ЧАСТОТА МГц», на котором отображается текущее значение частоты. Ее значение устанавливается с помощью двух потенциометров «ГРУБО», «ТОЧНО», расположенных ниже индикатора.



Рис.П.5.

Включение генератора осуществляется тумблером «СЕТЬ» в правом нижнем углу. При включении загорается его подсветка.

В работах 5 и 6 для питания передающей рупорной антенны используется генератор на диоде Ганна с вынесенным блоком питания. Генераторная секция крепится непосредственно к передающему рупору и однотипна для обоих макетов. Генерация осуществляется на фиксированной частоте 9.5 ГГц.

На рис. П.5 показана лицевая панель блока питания генератора на основе диода Ганна. К блочным разъемам на лицевой панели присоединяется кабель питания генераторной секции (разъем «ПИТАНИЕ ГС») и кабель синхронизации от блока регистратора (разъем «СИНХР.»).

На лицевой панели расположен цифровой индикатор «ТОК ГЕНЕРАТОРНОЙ СЕКЦИИ», на котором отображается его текущее значение.

Включение генератора осуществляется нажатием тумблера «СЕТЬ» на лицевой панели. При этом загорается его подсветка.

Кнопочные переключатели «ВКЛ.», «ВЫКЛ.» служат для включения и выключения процесса генерации. При нажатии на кнопку «ВКЛ.» ток генераторной секции возрастает до рабочих значений порядка 300 мА и загорается зеленый светодиод «РАБОТА» и начинается процесс генерации.

Нажатие на кнопку «ВЫКЛ.» приводит к срыву генерации. Ток генераторной секции падает до минимальных значений и загорается красный светодиод «ПЕРЕГРУЗКА».



Рис. П.5.

Горение желтого светодиода «ИМПУЛЬС ЗАПУСКА» свидетельствует о наличии на входе блока синхроимпульсов, поступающих от регистратора.

П1.3. Детекторные секции.

Для измерения уровня электромагнитной волны, поступающей на приемную антенну, служит детекторный диод, расположенный в детекторной секции. Поскольку детекторный диод работает без смещения, его вольт-амперная характеристика квадратична и, как следствие, значение продетектированного тока пропорционально мощности электромагнитной волны.

Для работ 1 – 4 детекторная секция выполнена на основе коаксиальной линии передачи. Ее эскиз приведен на рис. П.6. В работах 5 и 6 ее основой служит волновод круглого сечения. Эскиз этой детекторной секции приведен на рис. П.7. Для одинаковых элементов детекторов на рис. П.6, П.7 использована одинаковая нумерация.

Оболочка коаксиальной линии для детекторной секции, используемой в работах 1 – 4, образована внутренностью латунного корпуса (1) (рис. П.6). Центральный проводник (2) фиксируется фторопластовым заполнением (3). В корпус (1) ввернута блочная часть разъема СР-50-164 ФВ (4), к которому подключается кабель от приемной антенны.

Детали крепления детекторного диода помещены внутрь корпуса (6). Детекторный диод (9) зафиксирован в разъемной проводящей обойме состоящей из двух частей (10) и (11). С помощью контакта (13) анод детекторного диода соединяется с центральным проводником блочной части разъема СР-50 (15). Последний ввернут по резьбе в крышку (14) на корпусе (6) и соединяется с кабелем от регистратора.

Диод (9) с разъемной обоймой помещен в изолятор (12). Катод диода через удлинитель (8) соединяется с центральным проводником коаксиальной линии (2). Удлинитель помещен в диэлектрический изолятор (7).

Корпус (6) со всей внутренней начинкой фиксируется на цилиндре (1) с помощью переходника (5).

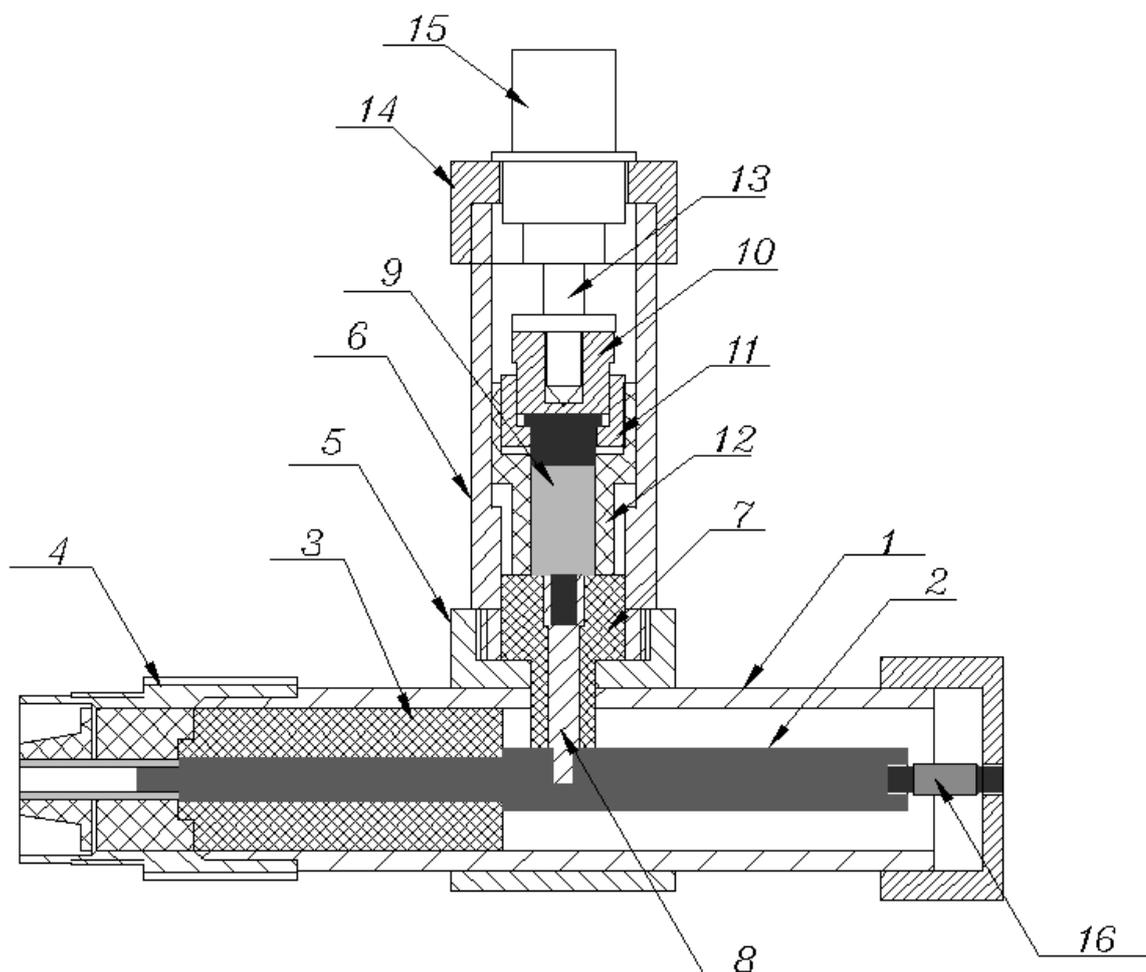


Рис.П.6.

На противоположный относительно входного разъема стороне детекторной секции установлено нагрузочное сопротивление (16) величиной 50 Ом. Оно служит для установления режима бегущей волны в коаксиальной линии детекторной секции.

Для детекторных секций, используемых в работах 5,6, основой является отрезок волновода круглого сечения (16) (рис. П.7). В его центральной части имеется утолщение с отверстием, в которое вворачивается корпус (6) с деталями (7 – 15), образующими крепление детекторного диода (9). Этот узел полностью совпадает по конструкции с приведенным на рис. П.6.

В нижней части утолщения имеется отверстие с резьбой, в которое ввернут винт (20), обеспечивающий омический контакт катода детекторного диода с поверхностью волновода круглого сечения.

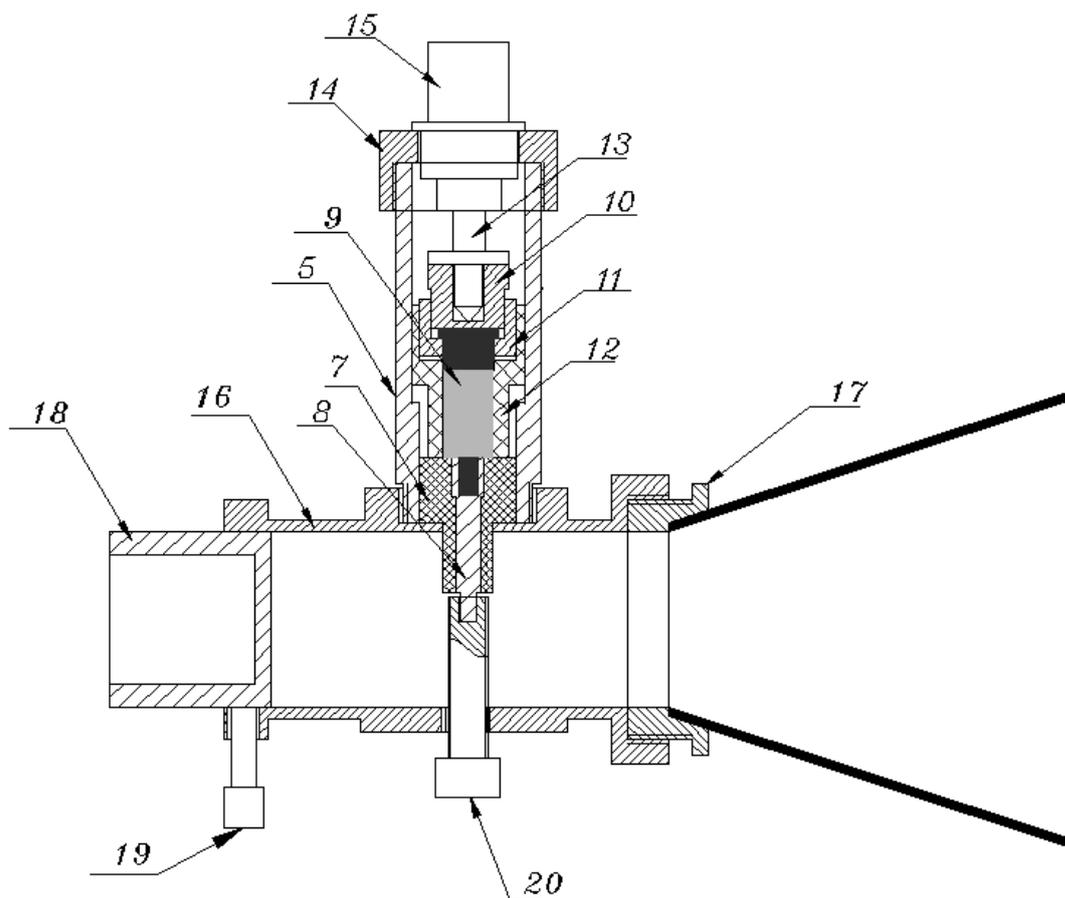


Рис.П.7.

Справа расположен конический рупор (17), фланец которого ввернут по резьбе и состыкован по начальному внутреннему диаметру с отрезком волновода круглого сечения. Противоположный конец волновода закрыт короткозамыкателем (18), положение которого фиксируется винтом (19).

В отличие от детекторной секции на основе коаксиала, здесь в волноводе круглого сечения создается режим стоячей волны. Настройка детекторной секции производится путем продольного перемещения короткозамыкателя. Но, поскольку генератор, создающий излучение в работах 5, 6, обеспечивает его на фиксированной частоте, настройки детектора в процессе эксплуатации оборудования не требуется.

П1.4. Регистратор.

Во всех 6 работах для регистрации тока детектора и индикации уровня принимаемой мощности используется регистратор. На рис. П.8 изображена его лицевая панель. Индикация принимаемого уровня мощности производится цифровым четырехразрядным индикатором. Его показания соответствуют напряжению на выходе усилителя тока детекторного диода.

Поскольку детекторный диод работает без смещения, его вольт-амперная характеристика квадратична. Как следствие, показания индикатора пропорциональны уровню принимаемой мощности.

На лицевой панели расположен кнопочный переключатель переключения пределов измерения. Включение соответствующего предела производится простым нажатием соответствующей кнопки.



Рис.П.8.

Ток детекторного диода поступает на регистратор по соединительному кабелю, который подключается к блочному разъему СР-50 с надписью «вход». Второй блочный разъем СР-50 с надписью «синх» служит для подключения модулирующего сигнала, вырабатываемого внутри блока, к генератору ВЧ. В качестве такого сигнала используется прямоугольный меандр с частотой 7кГц.

Включение регистратора производится тумблером «сеть» на лицевой панели. При включении загорается подсветка тумблера.

Приложение 2.

Порядок включения оборудования и предварительная юстировка приемной и передающей антенны.

П.2.1. Порядок включения оборудования.

Ниже описаны действия, которые необходимо выполнить перед включением любого из шести лабораторных макетов.

Перед включением оборудования проверить наличие следующих соединений:

- разъем «ВХОД ВНЕШНИЙ» на лицевой панели генератора ВЧ с разъемом «СИНХР» на лицевой панели регистратора с разъемом «СИНХР» на лицевой панели регистратора (работы 1-4) или разъем «СИНХР» на лицевой панели блока питания ГС – 11 генератора ВЧ с разъемом «СИНХР» на лицевой панели регистратора (работы 5-6) ;

- разъем «ВЫХОД ВЧ» на лицевой панели генератора ВЧ с разъемом кабеля от передающей антенны (работы 1-4) или разъем «ПИТАНИЕ ГС» на лицевой панели блока питания ГС – 11 со шнуром питания генераторной секции;

- выходной кабельный разъем приемной антенны со входом детекторной секции (элемент 4 на рис. 5) (работы 1-4);

- выходной разъем детекторной секции (элемент 15 на рис. 5) с разъемом «ВХОД» на лицевой панели регистратора.

После проверки соединений включить электронные блоки в сеть, нажав тумблеры «СЕТЬ» на их лицевой панели.

Перед выполнением лабораторной работы необходимо произвести предварительную юстировку приемной и передающей антенны. Результатом ее является ориентация максимумов диаграмм направленности приемной и передающей антенн друг на друга и установка отсчета “0,0⁰” на шкалах поворотного устройства. Для этого выполнить следующие операции:

1. Установить по шкале генератора частоту, заданную преподавателем.

2. Включить ноутбук и поворотные устройства выполнив действия, описанные в разделе П.1. На экране монитора должен отображаться рис. П.1.2 или П.1.3.

3. Последовательно изменяя угловое положение приемной и передающей антенны в горизонтальной плоскости добиться появления заметных показаний на цифровой шкале блока «Регистратор» постепенно доведя их до максимальных. Вращение антенн осуществлять вручную (не используя поворотные устройства), прилагая к ним незначительные усилия.

4. При необходимости осуществить подстройку положения антенн, используя дополнительные узлы их крепления, описанные ниже.

5. Установить значение нулевого отсчета для поворотных устройств передающей и приемной антенн, выполнив действия, описанные в разделе П.1. После этого аппаратура готова к проведению лабораторных исследований.

П.2.2. Регулировка углового положения антенн в вертикальной плоскости в работах 1, 3, 4.

Угловое положение симметричного вибратора с металлическим экраном (работа 1) и спиральных антенн (работы 3, 4) в вертикальной

плоскости регулируется с помощью шарнира, эскиз которого приведен на рис. П.9.

Он состоит из двух П-образных скоб (1,2), вложенных друг в друга. Внутренняя скоба жестко укреплена на экране (3), а внешняя с помощью фигурной планки (4) – с диэлектрической штангой (5). Симметричный вибратор крепится к экрану в его центральной области. На рис. 4 он не показан.

Скобы связаны между собой винтами (6) через отверстия в их боковых стенках. Верхнее отверстие во внешней скобе выполнено в виде дуги окружности. Это позволяет изменять угол наклона передающей антенны в вертикальной плоскости. Для этого следует ослабить фигурные болты (6) и повернуть антенну. Затем болты следует зафиксировать.

Кроме того, предусмотрена возможность изменения высоты подвеса антенны. Для этого необходимо ослабить винты (7) крепления фигурной планки (4) и переместить всю конструкцию антенны в вдоль штанги (5) в вертикальном направлении. После этого винты (7) необходимо зафиксировать.

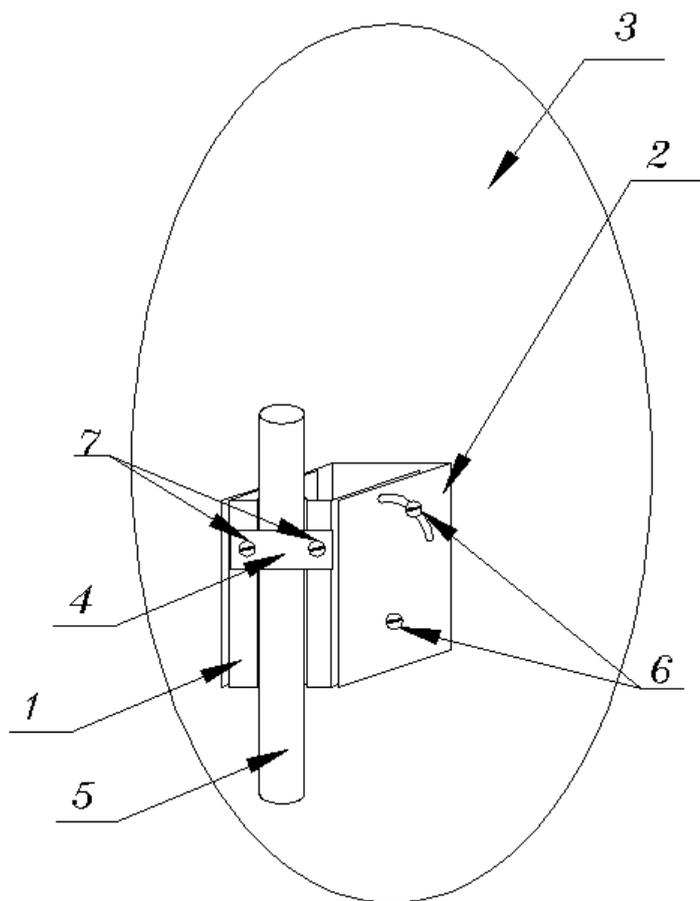


Рис. П.9

ЛИТЕРАТУРА.

1. В. А. Неганов, Д. С. Ключев, Д. П. Табаков. Устройства СВЧ и антенны. Ч. 2: Теория и техника антенн / Под ред. В. А. Неганова. Изд. стереотипное. – М.: ЛЕНАРД, 2016. – 728 с.

2. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток: Учебное пособие для вузов / Под редакцией Д.И. Воскресенского. Изд. 4, переработанное и дополненное – М.: Радиотехника, 2012. – 744 с. : ил.

3. Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн : учебник для вузов / под ред. Г. А. Ерохина. - 3-е изд. - М. : Горячая линия - Телеком, 2007. - 491 с.

4. Антенны сухопутных подвижных систем связи / А. Н. Волков, В. А. Гаврилов, Е. Р. Милютин ; ред. Е. Р. Милютин. - СПб. : Энергомашиностроение, 2007. - 218 с.

Косарев Александр Васильевич, Смирнов Роман Владимирович.

**РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН И АНТЕННО – ФИДЕРНЫЕ
УСТРОЙСТВА.**

Учебно –методическое пособие по лабораторным работам.