

Кафедра 406 МАИ  
Радиофизика, антенны и микроволновая техника  
Учебная лаборатория «Антенны и микроволновая техника»

**Лабораторная работа № 15.**

**ИССЛЕДОВАНИЕ  
ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ  
СПИРАЛЬНОЙ АНТЕННЫ**

# Работа № 15. ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ СПИРАЛЬНОЙ АНТЕННЫ

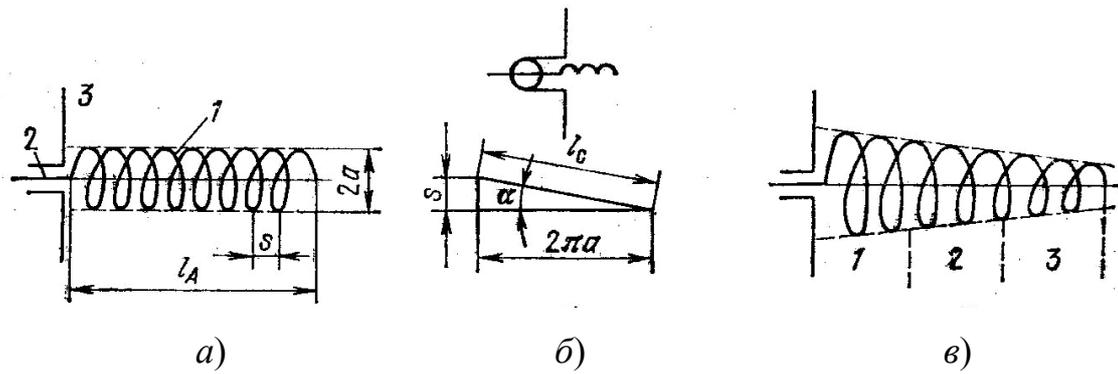
## Цель работы

1. Изучение принципа работы спиральной цилиндрической антенны и получение навыков ее расчета.
2. Теоретическое и экспериментальное исследование ДН и поляризационной характеристики спиральной антенны.
3. Экспериментальное определение влияния диаметра и числа витков спирали на ее ДН.

## Теоретическая подготовка к работе

Для выполнения работы необходимо изучить материал по теории спиральных антенн, имеющийся в лекциях по курсу «Устройства СВЧ и антенны», а также в [1, 2]. Кроме того, необходимо изучить определение характеристик направленности антенн (Приложение А).

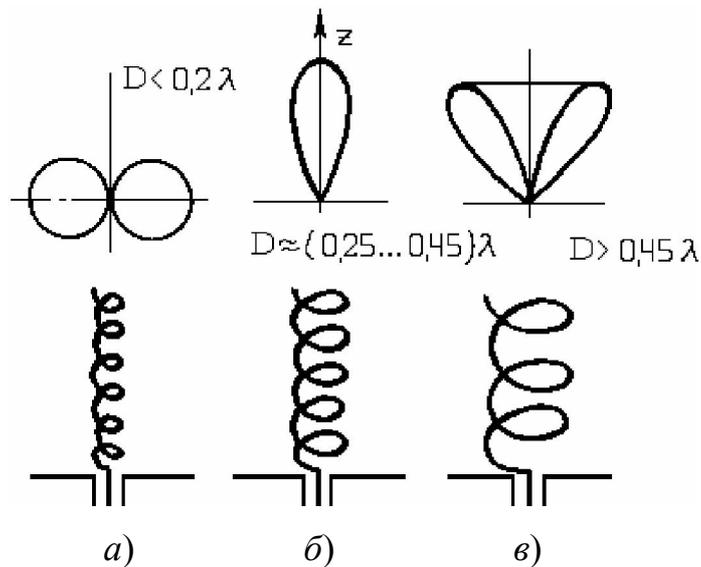
Спиральные антенны относятся к классу антенн бегущей волны с вращающейся поляризацией. Спиральная антенна (рис. 15.1, а) представляет собой намотанную из провода (ленты) цилиндрическую спираль 1, питаемую с одного конца коаксиальной линией 2, внешний проводник которой соединен с металлическим диском 3, который может быть сплошным или сетчатым. Этот диск диаметром  $(0,7...0,9)\lambda_{cp}$  играет роль рефлектора для ослабления излучения в заднюю полусферу и уменьшения токов, наводимых на внешнем проводнике коаксиальной линии. Диаметр проводника спирали обычно на порядок меньше диаметра цилиндрической поверхности  $D = 2a$ . Число витков  $N = 4...11$ . Осевая длина антенны  $L$  находится в пределах  $(0,5-3)\lambda_{max}$ . Спираль может быть не только цилиндрической, но и конической (рис. 15.1, в). Часто для увеличения жесткости конструкции намотка спирали осуществляется на диэлектрическом каркасе, что одновременно приводит к дополнительному замедлению фазовой скорости волны в антенне.



**Рис. 15.1.** Геометрия спиральных антенн: *а* – цилиндрическая; *б* – развёрнутый виток; *в* – коническая

Строгое решение электродинамической задачи для спирали как излучающей системы показывает, что в ней может распространяться система волн  $T_n$ , называемых собственными. В зависимости от отношения диаметра спирали к длине волны в собственной волне  $T_n$  может резонировать та или иная азимутальная пространственная гармоника. Индекс  $n$  резонирующей пространственной гармоники определяет характер излучения спиральной антенны (ДН, поляризационные и фазовые характеристики).

Различают три вида форм ДН цилиндрической (рис. 15.2) спиральной антенны.



**Рис. 15.2.** Режимы излучения спиральной антенны в зависимости от ее поперечных размеров

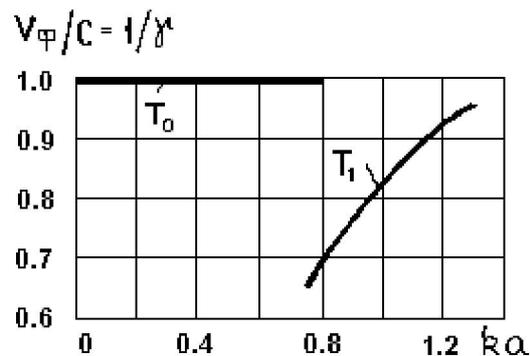
1. При диаметре витка спирали  $D < 0,2\lambda$  (рис. 15.2, а) максимальное излучение получается в плоскости, перпендикулярной оси спирали (режим бокового или поперечного излучения). В этом случае в спирали преобладает волна типа  $T_0$ , характеризующаяся изменением фазы тока в пределах  $360^\circ$  на протяжении нескольких витков. Амплитуда волны вдоль спирали постоянна, а фазовая скорость  $v_\phi = c$ . За счет отражения волны  $T_0$  от конца спирали в ней устанавливается режим стоячей волны, излучение вдоль оси спирали отсутствует и максимум излучения антенны получается в поперечной плоскости спирали. Ближайший тип волны  $T_1$  при этом имеет весьма малую амплитуду и вклад этой волны в общее поле излучения незначителен.

2. При  $D = (0,25-0,45)\lambda$  (рис. 15.2, б) максимальное излучение осуществляется вдоль оси спирали  $Oz$  (режим осевого излучения). В этом случае в антенне преобладает волна  $T_1$ , и максимум излучения направлен вдоль оси спирали. Возникающая при этом в спирали волна низшего типа  $T_0$ , а также волны высших типов  $T_n$  с  $n > 1$  быстро затухают по длине спирали и их вклад в ДН невелик.

3. При  $D > 0,45\lambda$  (рис. 15.2, в) максимальное излучение получается в направлениях, образующих острый угол относительно оси спирали (режим наклонного излучения). В этом случае преобладающей является вторая азимутальная пространственная гармоника (волна  $T_2$ ), и ДН приобретает коническую (воронкообразную) форму. Угол раскрытия «воронки» зависит от относительного диаметра спирали.

Практическое применение находят в основном спиральные антенны с осевым излучением, когда  $D = (0,25-0,45)\lambda$  и длина провода витка спирали примерно равна рабочей длине волны ( $L \approx \lambda$ ). В режиме осевого излучения витки спирали излучают весьма интенсивно, благодаря чему к концу спирали излучается практически вся подводимая к антенне мощность. Отражение от конца спирали отсутствует, и в ней устанавливается режим бегущей волны. Фазовая скорость волны  $T_1$  при этом меньше скорости света  $c$ :  $v_\phi \approx 0,8c$  (рис. 15.3). Для обеспечения круговой или близкой к ней поляризации поля, а

также интенсивного излучения каждого витка в осевом направлении (ось  $Oz$ ) необходимо, чтобы выполнялось то же условие  $L \approx \lambda$ .



**Рис. 15.3.** Графики зависимости фазовой скорости двух типов собственных волн от величины  $ka$  в цилиндрической спиральной антенне

Спиральные антенны в режиме осевого излучения обеспечивают максимальный КНД и круговую поляризацию в направлении максимума ДН при выполнении условия  $L \approx \lambda$ . Для приближенного анализа можно считать, что амплитуда бегущей волны не меняется по длине спирали, и тогда ДН спирали будет определяться произведением ДН одиночного витка  $F_1(\theta)$  и множителя системы  $F_n(\theta)$ :

$$F(\theta) = F_1(\theta)F_n(\theta).$$

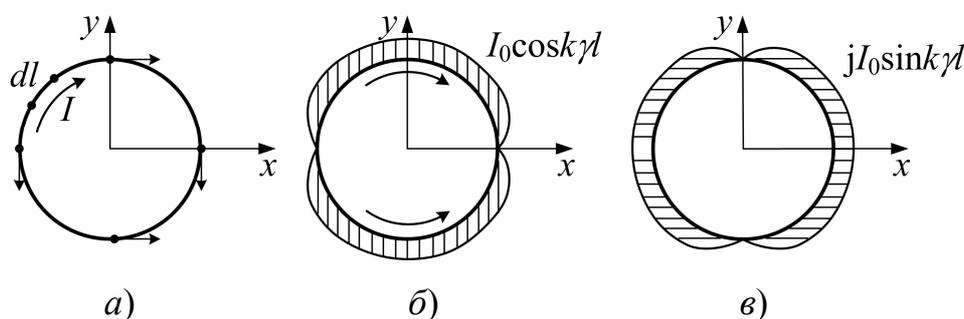
Диаграмма направленности  $F_1(\theta)$  может быть определена в результате суммирования поля излучения кольца с бегущей волной тока  $I = I_0 e^{-jk\gamma l}$

(рис. 15.3). Волна вдоль витка замедленная с коэффициентом  $\gamma = \frac{c}{v_{ph}} = \frac{\lambda}{\lambda_3} > 1$ .

Рассмотрим случай осевого излучения, когда длина витка  $L = \lambda_3$  ( $D = \lambda_3/\pi = 0,32\lambda_3$ ). Вдоль оси  $Oz$  излучается поле круговой поляризации (две взаимно ортогональные составляющие поля в пространстве  $E_x$  и  $E_y$ , равные по амплитуде и сдвинутые во времени по фазе на  $90^\circ$ ). Можно интерпретировать это по-другому:

$$I = I_0 e^{-jk\gamma l} = I_0 \cos(k\gamma l) - jI_0 \sin(k\gamma l).$$

Тогда виток можно представить в виде двух витков с распределениями, сдвинутыми по фазе на  $90^\circ$  и в пространстве (рис. 15.4, б и в).



**Рис. 15.4.** Распределение тока вдоль витка

В свою очередь, каждый из этих витков можно представить в виде совокупности двух изогнутых синфазных вибраторов. Следовательно, максимум излучения направлен вдоль оси  $Oz$ .

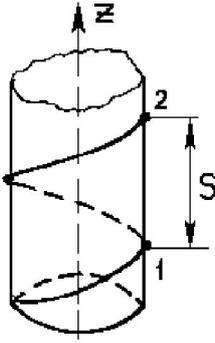
Круговая поляризация при  $L = \lambda_3$  получается лишь вдоль оси  $Oz$ . В остальных направлениях получается в общем случае эллиптическая поляризация, а в плоскости  $xOy$  – линейная.

В реальной спиральной антенне виток лежит не в одной плоскости, а имеет некоторый шаг намотки  $S$  (рис. 15.5) Если шаг намотки и диаметр витка выбраны так, что сдвиг фаз между напряженностями полей, создаваемых первым (1) и последним (2) элементами витка, равен  $2\pi$ , то в направлении оси спирали сохраняется круговая поляризация и максимум излучения будет определяться следующим соотношением:

$$\frac{2\pi}{\lambda_3} L - \frac{2\pi}{\lambda} S = 2\pi, \quad (15.1)$$

где  $\frac{2\pi}{\lambda_3} L$  – сдвиг фаз полей начального и конечного элементов витка,

определяемый сдвигом фаз токов этих элементов;  $\frac{2\pi}{\lambda} S$  – сдвиг фаз между полями начального и конечного элементов витка, определяемый разностью хода лучей.



**Рис. 15.5.** Выбор шага намотки спиральной антенны

Из (15.1) следует соотношение между параметрами спирали  $L$  и  $S$ , при которых будет обеспечиваться круговая поляризация:

$$L = \frac{S + \lambda}{\gamma}, \quad (15.2)$$

где  $\gamma = c/V_{\text{ф}} = \lambda/\lambda_3$  – замедление волны в спирали.

Удовлетворение условию (15.1) при конструировании антенны не обеспечивает максимального значения КНД. Максимальный КНД получается при сдвиге фаз между полями излучения первого и последнего витков, равном  $\pi$ , т.е. вместо (15.1) должно выполняться условие

$$\frac{2\pi}{\lambda_3} L - \frac{2\pi}{\lambda} S = 2\pi + \frac{\pi}{N}, \quad (15.3)$$

где  $N$  – число витков спирали.

Отсюда получают выражение для  $L$ , при котором обеспечивается максимальное значение КНД:

$$L = \frac{S + \lambda + \frac{\lambda}{2N}}{\gamma}. \quad (15.4)$$

Таким образом, при выборе  $L$  в соответствии с (15.2) в направлении оси антенны получается круговая поляризация, а при выборе  $L$  в соответствии с (15.4) будет достигнут максимальный КНД при некоторой эллиптичности поля излучения. Поскольку замедление волны с ростом длины волны увеличивается, соотношения (15.1) и (15.3) нарушаются незначительно, и спиральная антенна

сохраняет удовлетворительные значения параметров в диапазоне длин волн  $(0,7...1,2)\lambda_0$ , где  $\lambda_0$  – длина волны, для которой подобраны оптимальные размеры антенны. При этом угол подъема витка спирали  $\alpha = \arcsin(S/L)$  может лежать в пределах  $12^\circ...20^\circ$ . Максимальный коэффициент перекрытия по частоте получается при угле намотки около  $19^\circ$ .

Если цилиндрическая спиральная антенна обеспечивает режим осевого излучения при коэффициенте перекрытия по частоте  $K_{\Pi} = \lambda_{\max}/\lambda_{\min} \approx 1,7$ , то конические спиральные антенны (рис. 15.1, в) более широкополосны ( $K_{\Pi} \approx 2...3$ ). Так как в конической спирали витки имеют различную длину, то на любой частоте рабочего диапазона в спирали имеется группа витков (рабочая область), на каждом из которых укладывается примерно одна длина волны типа  $T_1$ . При изменении частоты рабочая область перемещается вдоль оси спирали. Следовательно, характеристики направленности таких антенн определяются не общим числом витков (или полной длиной спирали), а лишь числом витков в группе с волной  $T_1$  (длиной этого участка спирали). Излучение остальных витков слабо влияет на общее поле антенны.

Ширина ДН спиральной антенны с постоянным диаметром витка, ее КНД и входное сопротивление могут быть определены по формулам

$$2\theta_{0,7} = \frac{52}{\frac{L}{\lambda} \sqrt{NS}} \text{ град}, \quad D_0 = 15 \left( \frac{L}{\lambda} \right)^2 N \frac{S}{\lambda}, \quad R_{\text{вх}} \approx 140 \frac{L}{\lambda} \text{ Ом.}$$

Фазовая ДН цилиндрической спиральной антенны без экрана в плоскости  $\varphi = \text{const}$  в пределах главного лепестка ДН представляет собой окружность с центром на оси спирали. Для антенны с экраном диаметром  $0,9\lambda_{\text{ср}}$  фазовый центр расположен от экрана на расстоянии  $(0,33...0,38)L$ , т.е. фазовый центр смещен в сторону экрана. Эта закономерность присуща и другим типам антенн, например, вибраторным или турникетным, если они используются с экраном.

Активная часть входного импеданса спиральной антенны составляет  $(60...90)$  Ом и несколько растет с увеличением значением  $ka$ . Она почти не зависит от числа витков, так как на входное сопротивление основное влияние

оказывает область антенны, непосредственно примыкающая к ее входу, т.е. размеры, положение первого витка относительно экрана и его соединение с коаксиальной линией. Реактивная часть входного сопротивления невелика и колеблется в пределах  $\pm(10...20)$  Ом.

Спиральные антенны в основном применяются в дециметровом и сантиметровом диапазонах длин волн. Имея круговую поляризацию, они используются в радиолокации для получения более контрастного изображения цели на фоне помех, в системах телеметрии и связи с летательными аппаратами, положение которых не стабилизировано в пространстве. Спиральные антенны используются также в качестве облучателей зеркальных антенн и элементов решеток.

Недостатком спиральной антенны является то, что она не позволяет формировать ДН с шириной уже  $10...15^\circ$  и шире  $70...80^\circ$ . Первое обусловлено быстрым излучением энергии спиралью, что делает нецелесообразным использование числа витков, большего  $10...12$ , второе – возникновением режима осевого излучения при числе витков, не меньшем  $3...4$ . Для получения более узких ДН необходимо строить многоспиральные синфазные антенны.

Для применения в системах с высокими требованиями к габаритным размерам и аэродинамическим характеристикам широко используются плоские спиральные антенны (например, плоская арифметическая спиральная антенна).

### **Расчетное задание и расчетные формулы**

Во время подготовки к лабораторной работе каждый студент должен рассчитать ряд основных характеристик цилиндрической спиральной антенны: ДН, коэффициент направленного действия и входное сопротивление.

Диаграмма направленности спиральной антенны рассчитывается в режиме осевого излучения для заданной средней длины волны рабочего диапазона  $\lambda_{\text{ср}}$ , заданных размеров спирали и числа витков  $n$ . Длина витка спирали  $l$  (рис. 15.6) примерно равна средней длине волны диапазона  $\lambda_{\text{ср}}$ , угол подъема провода спирали составляет  $\alpha=7^\circ$ . Диаметр спирали  $D$ , ее шаг  $S$  и длина витка  $l$  связаны соотношениями

$$D \cong \frac{l \cos \alpha}{\pi}, \quad S = l \sin \alpha. \quad (15.5)$$

Исходные данные для расчета приведены в табл. 15.1. Число витков спирали  $N=7$  для всех вариантов.

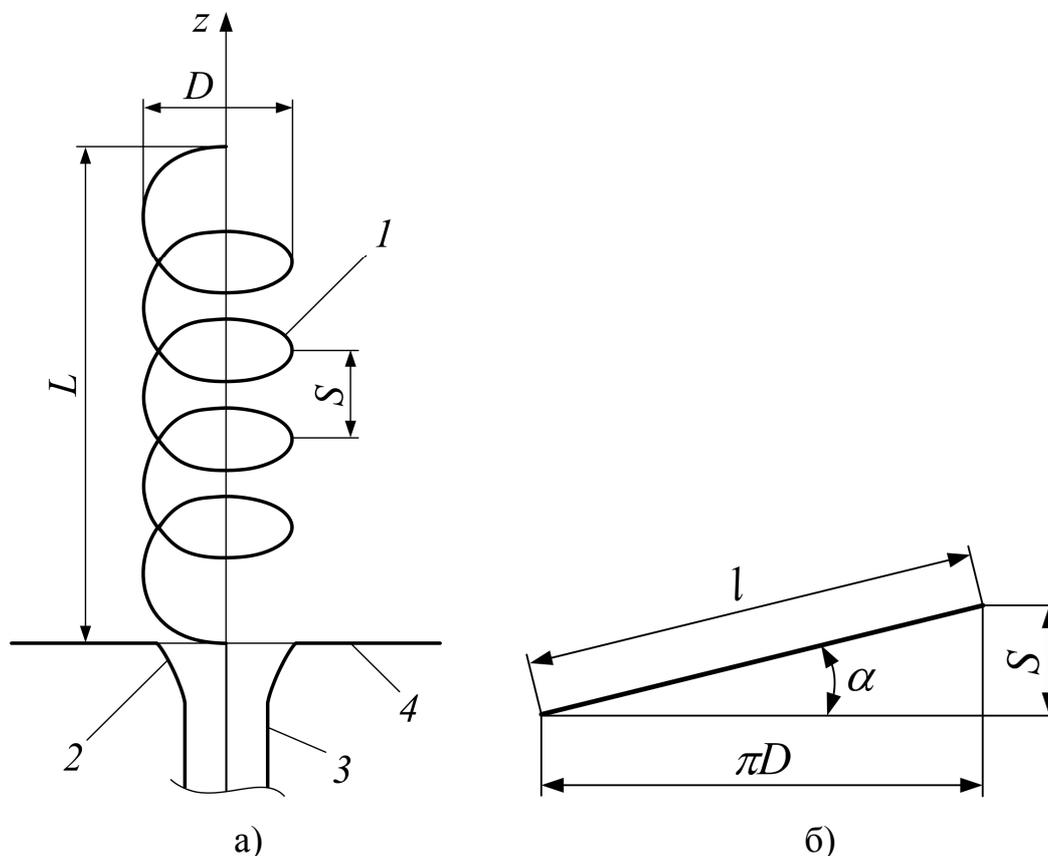


Рис. 15.6. Цилиндрическая спиральная антенна: *а* – конструктивная схема антенны (*1* – цилиндрическая спираль; *2* – согласующий трансформатор; *3* – коаксиальный фидер; *4* – рефлектор в виде диска); *б* – развертка витка спирали

Таблица 15.1. Исходные данные для расчета спиральной антенны

Параметры антенны	Номер варианта		
	1	2	3
$\lambda_{\text{ср}}$ , см	24	25	27
$\lambda_{\text{min}} \dots \lambda_{\text{max}}$ , см	19...29	20...30	22...32
$S$ , см	2,9	3	3,2
$D$ , см	7,6	8	8,4
$l$ , см	24	25	27

Диаграмма направленности антенны вычисляется в виде произведения ДН одиночного витка  $F_1(\theta)$  на множитель антенной решетки  $F_n(\theta)$

$$F(\theta) = F_1(\theta)F_n(\theta), \quad (15.6)$$

где  $\theta$  – угол, отсчитываемый от оси спирали.

Как показывают расчеты и экспериментальные данные, ДН одиночного витка отличается в горизонтальной и вертикальной плоскостях, но при достаточно большом числе витков ( $N \geq 5$ ) в пределах главного лепестка с достаточной для практических расчетов точностью ДН одиночного витка в обеих плоскостях можно приближенно аппроксимировать функцией

$$F_1(\theta) = \cos\theta. \quad (15.7)$$

Множитель решетки определяется выражением

$$F_n(\theta) = \frac{\sin\left(\frac{N\psi}{2}\right)}{N\sin\left(\frac{\psi}{2}\right)}, \quad (15.8)$$

где  $\psi = \psi_1 + \psi_2$ ;  $\psi_1 = \frac{2\pi}{\lambda} S \cos\theta$  – сдвиг фаз между полями соседних излучателей;  $\psi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} l \xi$  – сдвиг фаз между токами смежных витков;  $\xi$  – замедление электромагнитной волны в спирали в рабочем диапазоне волн (обычно меняется в пределах 1,1...1,4).

Для средней длины волны  $\xi = 1,23$ , и ДН спиральной антенны может быть рассчитана по формуле

$$F(\theta) = \cos\theta \frac{\sin\left[\frac{N\pi S}{\lambda} \left(1,23 \frac{l}{S} - \cos\theta\right)\right]}{N\sin\left[\frac{\pi S}{\lambda} \left(1,23 \frac{l}{S} - \cos\theta\right)\right]}. \quad (15.9)$$

При расчете ДН угол  $\theta$  изменяют в интервале от 0 до 90° с шагом в 15°. По полученным расчетным данным в полярной системе координат в пределах  $\pm 90^\circ$  строят ДН «по мощности», т.е.  $F^2(\theta)$ , и определяют ширину главного лепестка по уровню  $0,5P_{\max}$ .

Для этой же спиральной антенны рассчитывают для средней волны диапазон:

а) ширину ДН «по мощности»:

$$2\theta_{0,5} = \frac{52}{\frac{l}{\lambda} \sqrt{\frac{NS}{\lambda}}}, \text{ град}; \quad (15.10)$$

б) коэффициент направленного действия антенны в направлении максимума излучения:

$$D_0 = 15 \left( \frac{l}{\lambda} \right)^2 N \frac{S}{\lambda}; \quad (15.11)$$

в) входное сопротивление антенны:

$$R_{\text{вх}} = 140 \frac{l}{\lambda}, \text{ Ом}. \quad (15.12)$$

Важным параметром спиральной антенны является коэффициент эллиптичности, который определяется отношением малой оси поляризационного эллипса к большой оси [2].

В лабораторной работе исследуется поляризационная характеристика цилиндрической спиральной антенны. При совпадении направления оси приемного вибратора с направлениями осей эллипса поляризации амплитуды наведенных в нем ЭДС пропорциональны полуосям эллипса. Зная поляризационную характеристику, можно определить коэффициент равномерности эллиптической поляризации по соотношению

$$K_s = \frac{E_b}{E_a}, \quad (15.13)$$

где  $E_b$  и  $E_a$  – амплитуды наведенных ЭДС, совпадающих с малой и большой осями эллипса.

Цилиндрическая спиральная антенна в режиме осевого излучения в направлении оси спирали имеет поляризацию, близкую к круговой, а в других направлениях поляризация поля получается эллиптической.

## Экспериментальная часть

### Описание лабораторной установки

Общий вид лабораторной установки представлен на рис. 15.7, а ее электрическая схема – на рис. 15.8.

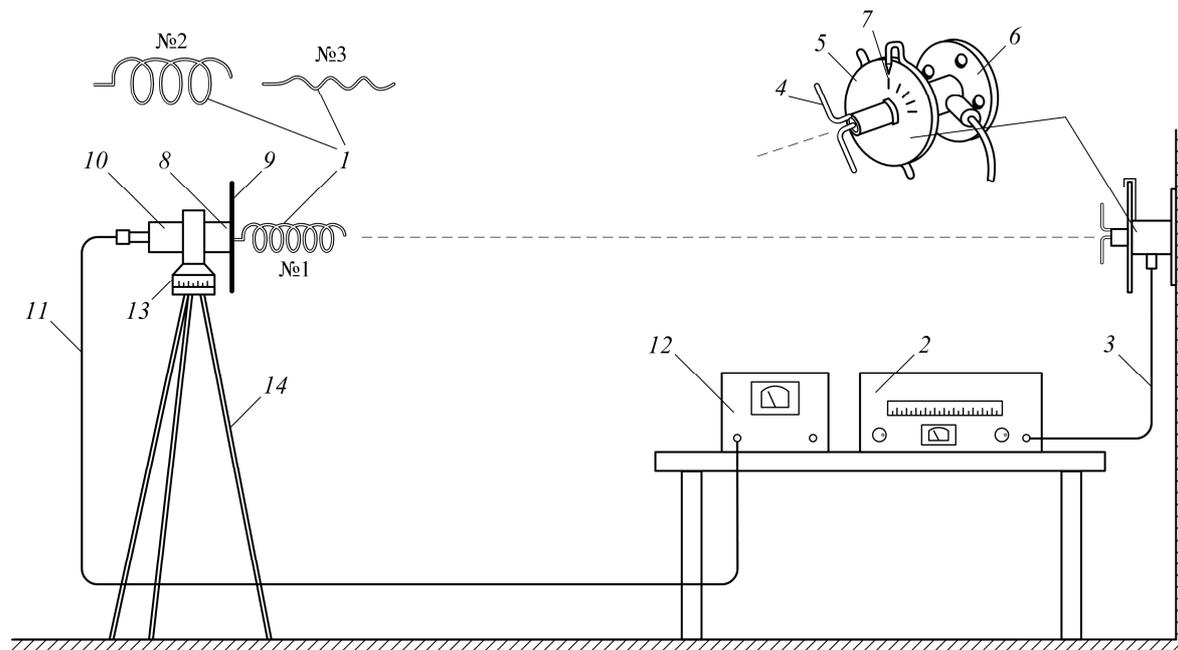


Рис. 15.7. Схематический вид лабораторной установки: 1 – исследуемая спиральная антенна; 2 – СВЧ-генератор; 3, 11 – коаксиальные кабели; 4 – передающий симметричный вибратор; 5 – рефлектор-лимб; 6 – корпус передающей антенны; 7 – шкала; 8 – согласующий трансформатор; 9 – рефлектор; 10 – детекторная секция; 12 – измерительный прибор (милливольтметр ВЗ-38); 13 – головка со шкалой, 14 – стойка

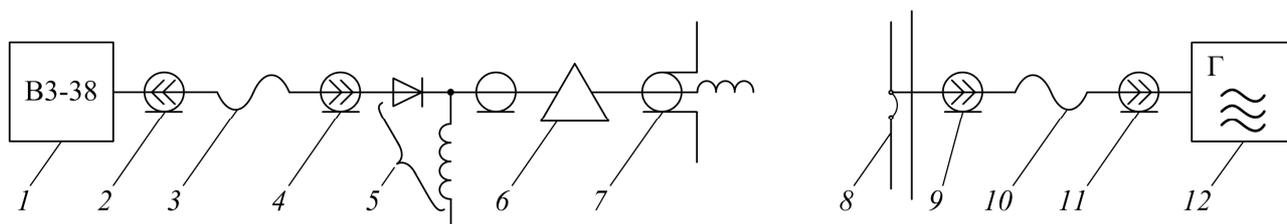


Рис. 15.8. Электрическая схема лабораторной установки: 1 – измерительный прибор (милливольтметр ВЗ-38); 2, 4, 9, 11 – высокочастотные разъемы; 3, 10 – гибкие коаксиальные кабели; 5 – детекторная секция; 6 – согласующий трансформатор; 7 – спиральная антенна; 8 – симметричный вибратор с согласующим устройством и рефлектором; 12 – СВЧ-генератор

Спиральная антенна 1 работает в режиме приема. Высокочастотные колебания от генератора 2 подводятся по коаксиальному кабелю 3 к передающей антенне в виде симметричного вибратора 4 с рефлектором-лимбом 5. Для снятия поляризационных характеристик этот вибратор с рефлектором-лимбом поворачивается в корпусе 6 вокруг горизонтальной оси в пределах 360°. Угол поворота вибратора отмечается также по шкале 7. В составе передающей антенны имеется симметрирующее устройство в виде четвертьволнового стакана.

Приемная спиральная антенна 1 через согласующий трансформатор 8, на корпусе которого укреплен рефлектор в виде диска 9, присоединяется к детекторной секции 10. Принятый сигнал после детектирования подается через коаксиальный кабель 11 на вход милливольтметра ВЗ-38 12. Вследствие нелинейной характеристики детектора показания милливольтметра ВЗ-38 пропорциональны квадрату напряженности измеряемого поля. Для удобства монтажа и демонтажа спираль ввинчивается во внутреннюю втулку коаксиального трансформатора. Корпус трансформатора вместе со спиралью и рефлектором закреплен в головке со шкалой 13, которая свободно вращается в горизонтальной плоскости в пределах 360° в стойке 14, укрепленной на полу на расстоянии 2 м от передающей антенны. При снятии ДН угол поворота спиральной антенны отмечается по шкале на головке, ее положение может фиксироваться стопорным винтом стойки.

При выполнении лабораторной работы исследуются три цилиндрические спиральные антенны (№ 1,2,3), работающие на прием. Номера спиралей отмечены у их основания соответствующими цифрами. Спиральная антенна № 1 работает в режиме осевого приема и исследуется в диапазоне на трех фиксированных длинах волн:  $\lambda_{\min}$ ,  $\lambda_{\text{ср}}$  и  $\lambda_{\max}$ . Для нее проводится теоретический расчет параметров, а ее размеры приведены в табл. 15.1. Спиральная антенна № 2 имеет тот же шаг и диаметр, что и спираль № 1, но число витков уменьшено до трех. У спиральной антенны № 3 сохраняется шаг и число витков

спиральной антенны № 1, но резко уменьшен диаметр ( $D = 3$  см), поэтому спиральная антенна № 3 уже не работает в режиме осевого приема, и ее ДН имеет многолепестковый характер, так как длина всей спирали получается около  $2\lambda$ .

Спиральные антенны № 2 и № 3 исследуются только на средней длине волны.

### Порядок выполнения эксперимента

В начале занятий каждой бригаде студентов необходимо с разрешения преподавателя или лаборанта включить приборы установки для их предварительного прогрева перед началом эксперимента.

#### 1. Снять ДН спиральной антенны № 1 на средней длине волны.

Генератор настраивают на среднюю волну диапазона  $\lambda_{\text{ср}}$ . Спиральную антенну № 1 ввинчивают в трансформатор и устанавливают в положение, соответствующее направлению оси спирали на центр передающего вибратора. ДН снимается через каждые  $5^\circ$  в пределах  $\pm 90^\circ$ , занося данные в табл. 15.2. Снятая ДН является ДН «по мощности» вследствие квадратичности детектора. Экспериментальную ДН нормируют и изображают на том же рисунке, что и теоретическую. Определяют ширину главного лепестка ДН на уровне  $0,5P_{\text{max}}$  и сравнивают со значениями, полученными при теоретическом расчете.

Таблица 15.2. ДН спиральной антенны № 1 на  $\lambda_{\text{ср}}$

$\theta$ , град	-90	-85	-80	...	0	...	80	85	90
Спиральная антенна № 1									
$f^2(\theta)$									
$F^2_{\text{норм}}(\theta)$									

2. Снять поляризационную характеристику спиральной антенны № 1 на средней длине волны.

Для этого спиральную антенну устанавливают в положение, соответствующее исходному положению в п. 1. Поворачивая передающий вибратор 4 вокруг горизонтальной оси от 0 до 360° (указателем угла поворота служит шкала 7 на рефлекторе-лимбе 5 (см. рис. 15.7)), записывают показания милливольтметра В3-38 в табл. 15.3 через каждые 30° поворота. По полученным данным в полярных координатах строят поляризационную характеристику в относительных величинах

$$E(\varphi) = \sqrt{\frac{P(\varphi)}{P_{\max}(\varphi)}}, \quad (15.14)$$

где  $P$  – показания милливольтметра В3-38, и рассчитывают коэффициент эллиптичности антенны по формуле (15.13).

Таблица 15.3. Поляризационная характеристика спиральной антенны № 1 на  $\lambda_{\text{ср}}$

$\varphi$ , град	0	30	60	90	120	150	180	...	360
$P(\varphi)$									
$E(\varphi)$									

3. Снять ДН спиральных антенн № 2 и № 3 на средней длине волны.

Порядок снятия ДН спиральных антенн № 2 и № 3 такой же, как в п. 1; данные заносятся в табл. 15.4. После нормирования результатов ДН спиральных антенн № 2 и № 3 строят на отдельном рисунке.

4. Снять ДН спиральной антенны № 1 на минимальной и/или максимальной длине волны диапазона (по согласованию с преподавателем).

Генератор настраивают на минимальную (максимальную) длину волны заданного диапазона и снимают ДН спиральной антенны № 1. Порядок проведения эксперимента и построения кривых остаются теми же, что и в п. 1. Данные измерения заносятся в табл. 15.5. Определяют изменение ширины ДН спиральной антенны № 1 по сравнению с шириной ДН на средней длине волны.

Таблица 15.4. ДН спиральных антенн № 2 и № 3 на  $\lambda_{cp}$

$\theta$ , град	-90	-85	-80	...	0	...	80	85	90
Спиральная антенна № 2									
$f^2(\theta)$									
$F^2_{норм}(\theta)$									
Спиральная антенна № 3									
$f^2(\theta)$									
$F^2_{норм}(\theta)$									

Таблица 15.5. ДН спиральной антенны № 1 на  $\lambda_{min(max)}$

$\theta$ , град	-90	-85	-80	...	0	...	80	85	90
Спиральная антенна № 1									
$f^2(\theta)$									
$F^2_{норм}(\theta)$									

### Требования к отчету

Оформление отчета должно отвечать требованиям, изложенным в разделе «Правила оформления отчета». В отчете должны быть представлены:

- 1) цель работы и электрическая схема лабораторной установки (см. рис. 15.8);
- 2) результаты выполнения расчетного задания – формулы расчета, таблицы с полученными данными, график ДН, расчетные параметры антенны;
- 3) таблицы с результатами измерений;
- 4) рисунки с результатами экспериментальных зависимостей;
- 5) выводы по каждому пункту работы и по всей работе в целом.

### Контрольные вопросы

1. Поясните принцип работы цилиндрической спиральной антенны.
2. Объясните особенности трех режимов работы спиральной антенны.
3. Почему спиральная антенна в основном направлении излучает поле с поляризацией, близкой к круговой? Что такое коэффициент эллиптичности поля излучения?
4. Почему спиральная антенна работает в диапазоне волн без существенного изменения ее электрических параметров? Какая ширина рабочего диапазона в режиме осевого излучения цилиндрической спирали? Почему конические спиральные антенны имеют более широкий рабочий диапазон волн?
5. При каком условии цилиндрическая спиральная антенна имеет синфазное сложение полей в осевом направлении и круговую поляризацию излучаемого поля?
6. При каком условии получается максимальный коэффициент направленного действия цилиндрической спиральной антенны? Как меняется при этом коэффициент эллиптичности?
7. Как рассчитать размеры цилиндрической спиральной антенны, если задан рабочий диапазон волн?
8. Какие размеры спиральной антенны определяют ширину ДН? Поясните метод расчета ДН цилиндрической спиральной антенны.
9. В антеннах какого типа ширина ДН определяется отношением  $\lambda/L$ , и в каких –  $\sqrt{\lambda/L}$ , где  $L$  – размер излучающей системы?
10. В каком режиме излучения работает спиральная антенна № 3 (см. рис. 15.7)?
11. Какого характера и порядка входное сопротивление спиральной антенны и как его можно определить экспериментально?

## Приложение А. Определение характеристик направленности антенны

### Снятие диаграммы направленности

Величина напряженности поля, излучаемого антенной, зависит от положения точки наблюдения. Функциональное описание этой зависимости производят в сферической системе координат  $(R, \theta, \varphi)$ , центр которой находится в электрическом центре антенны. Для дальней зоны, т.е. на расстояниях  $R$ , во много раз больших рабочей длины волны  $\lambda$  и наибольшего излучающего размера антенны  $D$ , величину напряженности поля можно описать формулой

$$E = \frac{E_{\max}}{R} F(\theta, \varphi). \quad (\text{A.1})$$

Функцию  $F(\theta, \varphi)$ , описывающую зависимость амплитуды поля от угловых координат, называют амплитудной характеристикой направленности антенны, или сокращенно – характеристикой направленности антенны. Графическое изображение характеристики направленности называют ДН.

Амплитудные ДН (например, в плоскости угла  $\theta$ ) строят как в полярной, так и в прямоугольной системе координат (рис. А.1), по модулю. Вопрос о том, в какой системе координат строить ДН, определяет ее ширина. Для широких ДН (примерно  $30^\circ$  и более) наглядней изображение получается в полярной системе координат, а для узких ДН – в прямоугольной.

Довольно часто при построении ДН в любой системе координат возникает задача точного изображения относительно малого уровня боковых лепестков. В этом случае для отсчета величины  $F(\theta, \varphi)$  применяют логарифмический масштаб.

При работе антенны в режиме приема характеристика направленности описывает изменение напряжения (или тока) на входе антенны в зависимости от направления прихода электромагнитной волны. В соответствии с принципом взаимности характеристика направленности антенны при работе на передачу и прием одна и та же. Это обстоятельство позволяет снимать ДН антенны в режиме передачи или приема в зависимости от того, что более удобно.

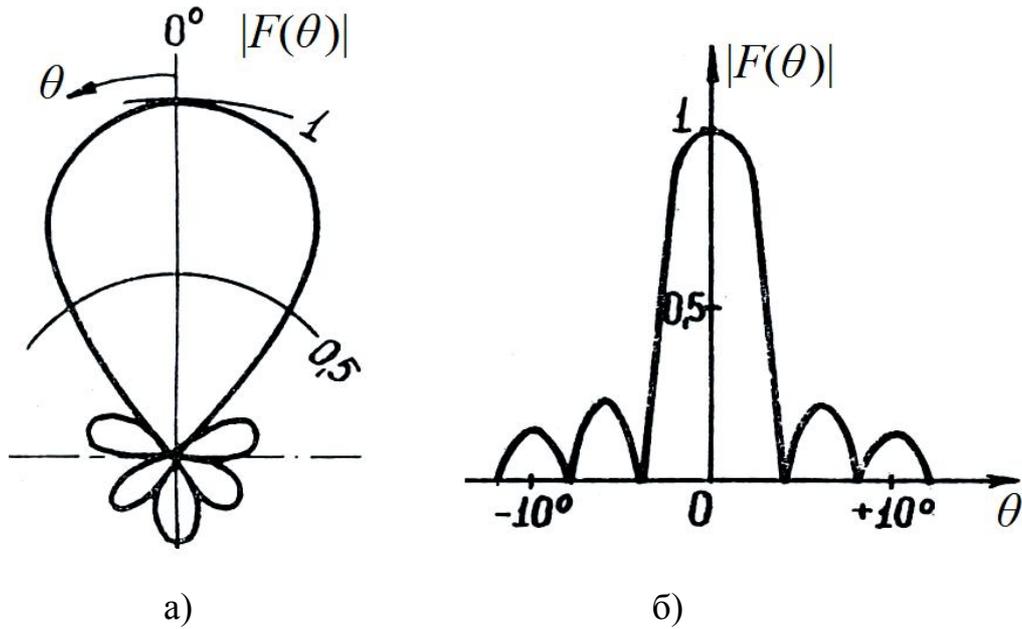


Рис. А.1. Амплитудные ДН:

а – в полярной системе координат; б – в прямоугольной системе координат

Для снятия ДН антенны в любом режиме необходима вторая (вспомогательная) антенна (рис. А.2). Для исследуемой антенны направление на вторую антенну меняется, а для вспомогательной антенны оно постоянно; при этом расстояние между двумя антеннами остается неизменным.

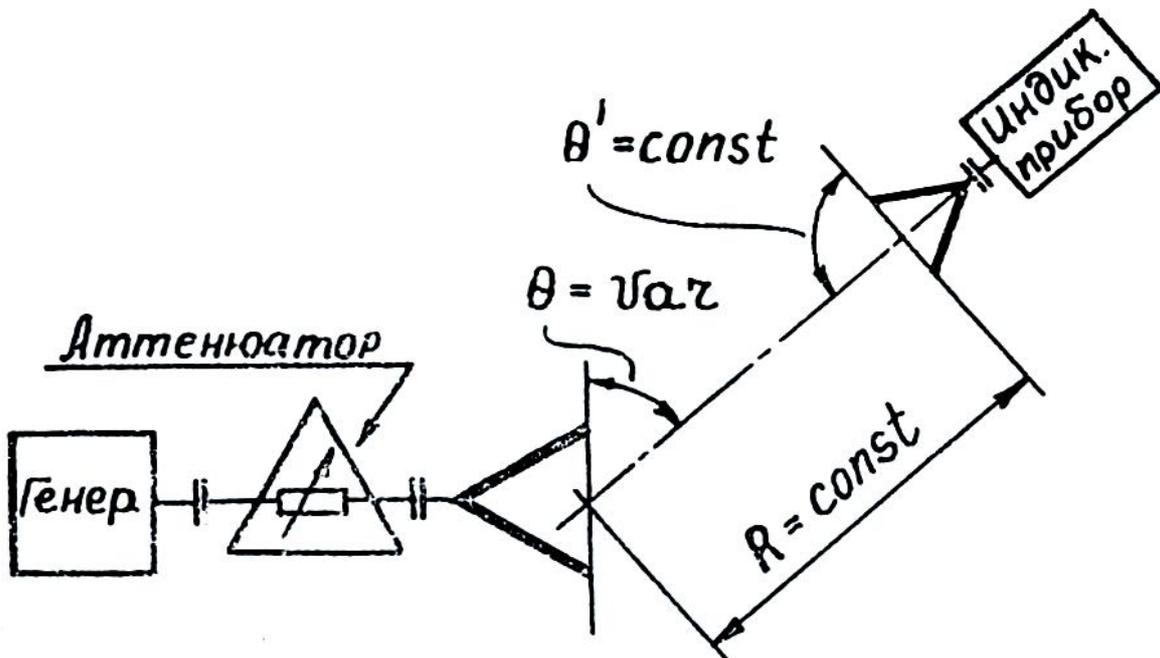


Рис. А.2. Схема установки для снятия ДН

При снятии ДН необходимо определить, с каким интервалом изменять координатный угол и на каком расстоянии располагать антенны.

Первый вопрос связан с шириной главного лепестка ДН антенны. Построение главного лепестка, а также боковых лепестков ДН следует производить по достаточному числу экспериментальных точек.

Для наиболее точного построения ДН в пределах главного лепестка необходимо иметь 12...16 экспериментально полученных точек. Для этого в начале эксперимента производят предварительное определение ширины главного лепестка «по нулям», и  $\frac{1}{12} \dots \frac{1}{16}$  этой величины укажет на максимальный интервал изменения угла  $\theta$ . Положение нулей ДН при эксперименте фиксируют по возможности точнее.

Интервал изменения угла  $\Delta\theta$  до эксперимента приближенно можно оценить по формулам, поскольку обычно размер излучающего раскрыва  $D$  антенны и рабочая длина волны  $\lambda$  известны. Ширину луча большинства антенн по нулевому уровню определяют по формуле

$$2\theta_0 \approx 120 \frac{\lambda}{D}, \text{ град.} \quad (\text{A.2})$$

Следовательно, интервал изменения угла  $\Delta\theta_0 \leq 10 \frac{\lambda}{D}$ .

Выбор необходимого расстояния между антеннами связан с фазовой и амплитудной ошибками в их раскрывах. Вследствие сферичности фронта волны, излученной антенной с размером раскрыва  $d$  (рис. А.3,а), раскрыв  $D$  приемной антенны будет возбуждаться несинфазно. В случае, когда размер раскрыва одной антенны намного больше размера раскрыва другой антенны ( $D \gg d$ ), амплитудную ошибку можно не учитывать. Фазовая ошибка будет допустимой (меньше  $\pi/8$ ), если расстояние между антеннами выбрать из соотношения

$$R \geq \frac{2D^2}{\lambda}. \quad (\text{A.3})$$

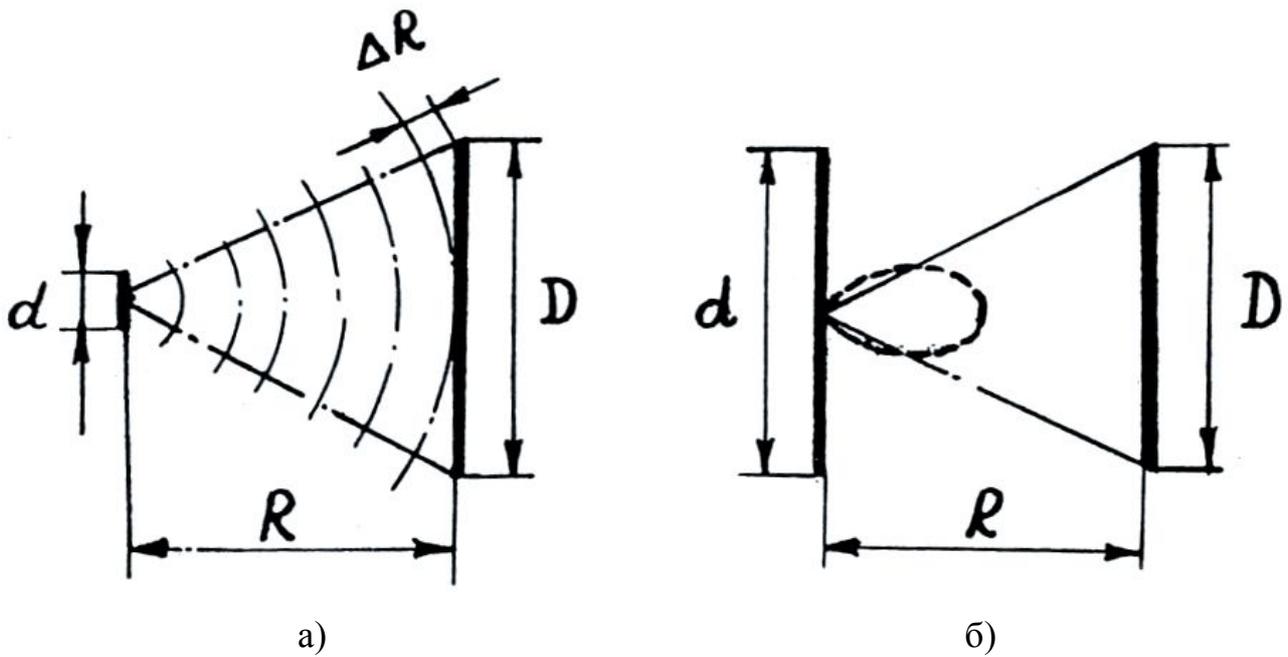


Рис. А.3. Схема для определения расстояния между антеннами при измерении ДН: *a* – с учетом только фазовой ошибки; *б* – с учетом только амплитудной ошибки

В случае антенн с соизмеримыми размерами раскрывов к фазовой ошибке добавляется еще амплитудная ошибка. Последняя возникает вследствие того, что равномерность возбуждения раскрыва приемной антенны зависит от ширины ДН передающей антенны (рис. А.3,б). Влияние указанных ошибок становится незначительным, если ДН снимать на расстоянии

$$R \geq \frac{2(D+d)^2}{\lambda}. \quad (\text{А.4})$$

При измерениях ДН антенн надо иметь в виду, что характеристики детекторов, применяемых в индикаторных приборах, нелинейны. В первом приближении характеристики кристаллических детекторов можно считать квадратичными, и тогда данные индикаторных приборов будут соответствовать ДН «по мощности», т.е.  $F^2(\theta, \varphi)$ .

При точных измерениях ДН влияние нелинейности характеристики детектора можно избежать за счет применения градуированного аттенюатора (рис. А.2), включенного в любое место высокочастотного тракта установки. В

этом случае измерения уровня сигнала ведутся путем изменения затухания, вносимого аттенюатором. Перед измерениями вспомогательную антенну устанавливают в направлении главного максимума ДН исследуемой антенны. Регулировка аттенюатора состоит в установке его в положение максимального затухания, величина которого определяется чувствительностью принимаемой аппаратуры и удобным положением стрелки индикаторного прибора. При снятии ДН за счет уменьшения затухания аттенюатора стрелка индикаторного прибора возвращается к первоначальному положению. Данные об измерении уровня сигнала считываются со шкалы градуированного аттенюатора (с учетом градуировочного графика) в децибелах, которые затем можно пересчитать в относительные величины. При таком способе измерения ДН рабочий режим детектора неизменен и вид его характеристики не имеет значения.

#### Измерение коэффициента усиления антенн

Для измерения коэффициента усиления (КУ) антенн с применением эталонной антенны используют ту же схему установки, что и для снятия ДН. Минимально допустимое расстояние между антеннами также определяется по формуле (А.4). Поскольку на КУ антенн сказываются фазовые и амплитудные ошибки в обеих плоскостях, то в формулу (А.4) необходимо подставить наибольшие размеры раскрывов антенн.

При измерении КУ вспомогательную антенну устанавливают в направлении главного максимума исследуемой антенны с неизвестным коэффициентом усиления  $G_x$ . После записи показаний индикаторного прибора  $\alpha_x$  исследуемую антенну заменяют на эталонную с известным коэффициентом усиления  $G_{эт}$ . При квадратичной характеристике детектора изменения в показаниях индикаторного прибора будут прямо пропорциональны изменению КУ при перемене антенн:

$$G_x = G_{эт} \frac{\alpha_x}{\alpha_{эт}}, \quad (\text{А.5})$$

где  $\alpha_{эт}$  – показания индикаторного прибора при использовании эталонной антенны.

При применении градуированного аттенюатора измерение отношения  $\frac{\alpha_x}{\alpha_{эт}}$  производится точнее. Поэтому при точных измерениях КУ предпочтительнее пользоваться аттенюатором. Если КУ необходимо измерить очень точно, то учитывают величины отраженных мощностей от входов исследуемой и эталонной антенн. Обычно эти отражения малы и при измерениях их не учитывают.

В качестве индикаторного прибора в лаборатории используется милливольтметр ВЗ-38.

### Измерение при помощи милливольтметра ВЗ-38

Аналоговый милливольтметр переменного тока ВЗ-38 (рис. А.4) предназначен для измерения величины напряжения переменного тока в диапазоне 100 мкВ...300 В частотой 20 Гц...5 МГц.



Рис. А.4. Милливольтметр ВЗ-38 (передняя панель)

В милливольтметре ВЗ-38 имеется детектор среднего значения. Шкала прибора проградуирована в среднеквадратических значениях синусоидального напряжения. Прибор ВЗ-38 удобен для измерения затуханий и частотных характеристик по шкале, проградуированной в децибелах (0 дБ – 0,775 В).

Предел допускаемой основной погрешности прибора, выраженный в процентах от верхнего предела установленного поддиапазона измерения, равен  $\pm 2,5\%$ . Входная емкость: 30 пФ (1...300 мВ) и 15 пФ (1...300 В). Входное сопротивление: 5 МОм (1...300 мВ) и 4 МОм (1...300 В).

На его передней панели имеются:

- стрелочный прибор, по положению стрелки которого отсчитывается входное напряжение;
- входной разъём для подачи измеряемого напряжения;
- переключатель пределов измерения напряжения;
- выключатель сети и индикатор включения.

Для начала работы необходимо включить прибор в сеть, щёлкнуть вверх сетевым выключателем и дать прибору прогреться 5 минут.

Устанавливаем переключатель пределов на значение, немного превышающее предполагаемую величину измеряемого напряжения. Например, если планируется измерять напряжение примерно 1...2 В, ставим переключатель на «3 В» (как на рис. А.4).

Важно! Предел измерения прибора обозначает величину напряжения, подаваемого на вход, при котором стрелка прибора отклонится до максимального (крайнего правого) положения.

Подаём на вход прибора измеряемое напряжение. Стрелка его отклонится и покажет величину поданного напряжения. Если стрелка ушла вправо за границу шкалы (зашкалила), то входное напряжение больше установленного предела, нужно переключатель пределов переключить на больший предел; если стрелка отклонилась меньше, чем четверть шкалы, то нужно переключиться на меньший предел, иначе будет велика погрешность измерения.

По какой шкале производить отсчёт? Верхняя шкала имеет деления до 10, по ней удобно измерять на пределах, кратных 10; средняя шкала имеет деления до 30, по ней удобно измерять на пределах, кратных 3. На нижнюю шкалу для ясности не будем обращать внимания – для лабораторных работ она не требуется.

На рис. А.4 переключатель пределов стоит в положении «3 V», значит, считывать показания будем по средней шкале. По ней стрелка максимально может отклониться до числа 30 при входном напряжении 3 В, т.е. значение, которое стрелка показывает на средней шкале (рис. А.4), нужно разделить на 10. Тогда получим величину измеряемого напряжения. В нашем случае стрелка показывает «21», считаем:  $21/10 = 2,1$  В.

## Содержание

<b>Цель работы</b> .....	2
<b>Теоретическая подготовка к работе</b> .....	2
<b>Расчетное задание и расчетные формулы</b> .....	9
<b>Экспериментальная часть</b> .....	13
Описание лабораторной установки .....	13
Порядок выполнения эксперимента .....	15
<b>Требования к отчету</b> .....	17
<b>Контрольные вопросы</b> .....	18
<b>Приложение А. Определение характеристик направленности антенны</b>	<b>19</b>
Снятие диаграммы направленности .....	19
Измерение коэффициента усиления антенн.....	23
Измерение при помощи милливольтметра ВЗ-38 .....	24

## Литература

- 1 Воскресенский Д.И., Гостюхин В.Л., Максимов В.М., Пономарев Л.И. и др. Устройства СВЧ и антенны / Под ред. Д.И. Воскресенского. М.: Радиотехника. 2016.
- 2 Марков Г.Т., Сазонов Д.М., Антенны. М.: Энергия. 1975.