



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой радиофизики,
профессор

_____ В.П. Якубов

" 05 " 12 _____ 2000

**ИССЛЕДОВАНИЕ СИММЕТРИЧНОГО ВИБРАТОРА И
ДИРЕКТОРНОЙ АНТЕННЫ**

Методические указания



Томск – 2000

Указания РАССМОТРЕНЫ И УТВЕРЖДЕНЫ методической
комиссией радиофизического факультета



Протокол № _____ от " ____ " _____ 2000 г.

Председатель методической комиссии радиофизического
факультета,

доцент

Г.М. Дейкова

В методических указаниях содержится описание лабораторной работы по потоковому курсу «Волновые процессы» для студентов 3-го курса радиофизического факультета. Даны краткие теоретические сведения и подробное изложение методики выполнения экспериментальной части работы.

Работа может быть использована студентами, аспирантами и специалистами и других специальностей, занимающихся изучением волновых процессов.

Работу подготовил:

доцент Завьялов А.С.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Ознакомление с приближенной теорией симметричного вибратора, устройством и принципом действия симметрирующих устройств, формированием диаграммы направленности директорной антенны.

1. СИММЕТРИЧНЫЙ ВИБРАТОР

Симметричный электрический вибратор широко используется как самостоятельная антенна и как элемент сложных антенных систем.

Под симметричным вибратором понимают антенну, состоящую из двух проводников или, как говорят, двух плеч равной длины, расположенных на одной оси и питаемых в середине, причем в симметричных относительно середины точках токи должны быть равны по величине и одинаковы по направлению (рис. 1).

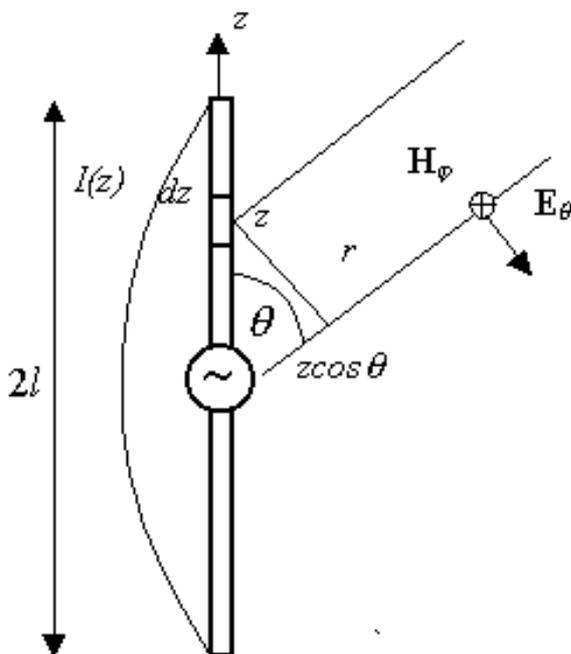


Рис.1. Симметричный вибратор

Равенство токов при питании антенны обеспечивается симметрирующим устройством. Симметрирующее устройство представляет собой четырехполюсник с одной парой несимметричных (коаксиальный вход) и одной парой симметричных клемм. На симметричных клеммах напряжения по отношению к экрану (в том числе и по отношению к экрану коаксиального кабеля – его наружной оболочке) равны по величине и обратны по знаку (противофазны).

Симметричный вибратор часто используется в качестве облучателей зеркальных антенн, элементов антенных решеток, возбуждателей директорных антенн.

Строгое решение задачи об излучении симметричного вибратора связано с большими трудностями, так как закон распределения тока по вибратору неизвестен.

Существует приближенный метод расчета поля, создаваемого симметричным вибратором в дальней зоне. В основе этого метода лежит предположение о синусоидальном распределении тока по вибратору, основанное на аналогии между симметричным вибратором и двухпроводной разомкнутой на конце линии без потерь. Действительно, от двухпроводной линии можно перейти к симметричному вибратору, если провода развернуть под углом 180^0 друг к другу.

Представим вибратор в виде нити тока, находящейся на его оси. Мысленно разобьем вибратор на бесконечно большое число элементов dz . Так как длина каждого элемента бесконечно мала, то можно полагать, что в пределах его ток не изменяется ни по амплитуде, ни по фазе. Весь симметричный вибратор можно рассматривать как совокупность элементарных электрических вибраторов (диполей Герца), а поле, создаваемое им, как результат сложения полей, излучаемых элементарными вибраторами.

Напряженность электрического поля, создаваемая элементарным вибратором в дальней зоне, равна

$$dE = -i \frac{30 k_0 I(z) dz}{r(z)} \sin \theta e^{ik_0 r(z)}, \quad (1)$$

где Z - координата точки на проводе, отсчитываемая от середины вибратора, $r(Z)$ - расстояние от элемента тока до точки наблюдения, k_0 - постоянная распространения в свободном пространстве.

Напряженность электрического поля, создаваемую всем вибратором, определим как

$$E = -i 30 k_0 \sin \theta \int_{-1}^1 \frac{I(z) e^{ik_0 r(z)}}{r(z)} dz. \quad (2)$$

Учитывая, что на больших расстояниях

$$r(z) \approx r - z \cos \theta,$$

для синусоидального распределения тока по вибратору

$$I(z) = \frac{I_0}{\sin k_0 l} \sin k_0 (l - |z|), \quad (3)$$

где I_0 - ток в точках питания вибратора, получим окончательно

$$E = i \frac{60 I_0}{r \sin k_0 l} \frac{\cos(k_0 l \cos \theta) - \cos k_0 l}{\sin \theta} e^{ik_0 l}. \quad (4)$$

Диаграмма направленности симметричного вибратора определяется выражением

$$f(\theta) = \frac{\cos(\frac{\pi}{2} \cos \theta)}{\sin \theta} \approx \sin \theta. \quad (5)$$

Таким образом, диаграмма полуволнового вибратора близка к диаграмме элементарного вибратора, т.е. в плоскости, проходящей через ось вибратора, представляет собой фигуру, состоящую из двух окружностей.

В плоскости, перпендикулярной оси антенны, симметричный вибратор направленными свойствами не обладает, и следовательно, диаграмма направленности представляет собой окружность.

Входное сопротивление симметричного вибратора $Z_{\text{вх}}$ равно отношению напряжения на зажимах вибратора (точки питания) к току в точках питания

$$Z_{\text{вх}} = \frac{U_0}{I_0} = R_{\text{вх}} + iX_{\text{вх}}. \quad (7)$$

В общем случае $Z_{\text{вх}}$ имеет как активную, так и реактивную составляющие. Часть мощности, подводимой от генератора к антенне, излучается. Другая

часть мощности теряется в самом вибраторе (идет на нагревание). Излученная часть мощности характеризуется активным сопротивлением излучения R_{Σ} , мощность потерь – активным сопротивлением потерь R . Обычно $R \ll R_{\Sigma}$ и $R_{\text{вх}} \ll R_{\Sigma}$.

Входное сопротивление полуволнового вибратора при $a \ll 1$, где a - радиус поперечного сечения вибратора, $l = \frac{\lambda_0}{4}$ оказывается комплексным и

равным

$$z_{\text{вх}} = (73,1 - i42,5) \text{ Ом}. \quad (8)$$

Реактивная составляющая входного сопротивления имеет индуктивный характер. Укорочение Δl , необходимое для того, чтобы сделать вибратор резонансным, определяется по формуле

$$\frac{\Delta l}{l} \approx \frac{0,225}{\ln \frac{l}{a}}. \quad (9)$$

В диапазоне декаметровых и метровых волн вибратор запитывается при помощи двухпроводной симметричной линии (рис.2).

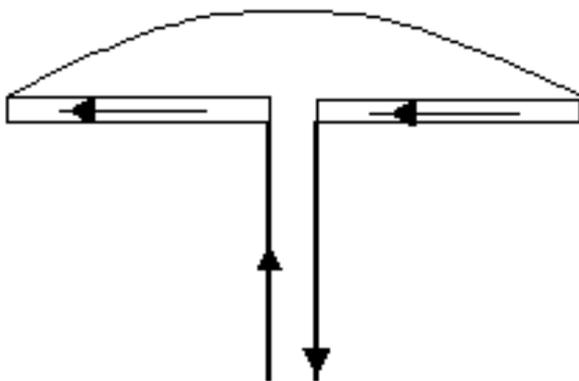


Рис. 2. Симметричный вибратор, запитываемый двухпроводной линией

режиме работы токи в разных проводах линии равны по величине и противоположны по фазе (это так называемая противофазная волна). Токи в обоих плечах вибратора будут равны по величине и будут иметь одно направление. При увеличении частоты начинает сказываться излучение энергии самой линией (антенный эффект линии). Это приводит к дополнительным потерям энергии

и искажению диаграммы направленности.

Поэтому на метровых, дециметровых и сантиметровых волнах для питания антенн применяются главным образом коаксиальные линии. При

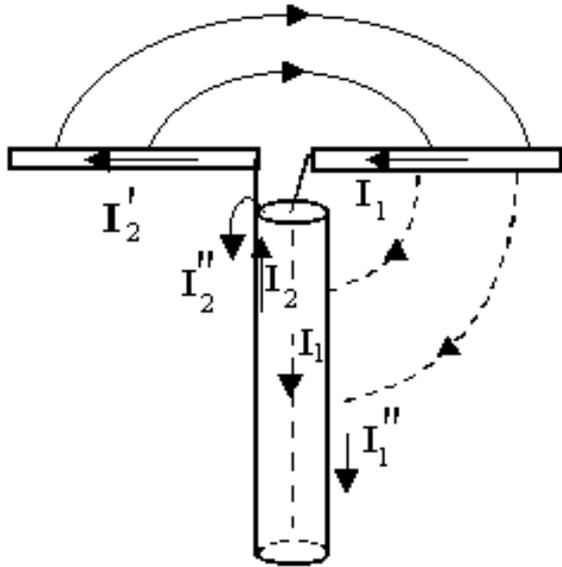


Рис. 3. Симметричный вибратор, запитываемый коаксиальной линией

образуют линию, возбуждаемую в месте подключения к кабелю антенны. Ток, текущий по центральному проводнику кабеля, полностью переходит в

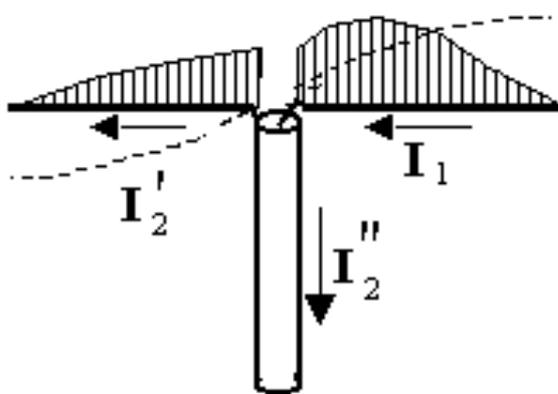


Рис. 4. Распределение токов вдоль плеч вибратора, запитываемого коаксиальной линией

непосредственном присоединении коаксиального кабеля к симметричному вибратору (рис.3) ток I_2 , текущий по внутренней поверхности экрана, в точке присоединения плеча вибратора разветвляется на два тока : I_2' , который течет по левому плечу вибратора, и I_2'' - по внешней поверхности оболочки кабеля.

Внешняя оболочка кабеля и поверхность Земли (объект, на котором расположена антенна)

образуют линию, возбуждаемую в месте подключения к кабелю антенны. Ток, текущий по центральному проводнику кабеля, полностью переходит в правое плечо. Поскольку $I_1 = -I_2$, то $I_2' \neq I_1$. Таким образом, плечи вибратора возбуждаются

неодинаковыми по амплитуде и фазе токами (рис.4), что искажает диаграмму направленности. Кроме того, наличие тока I_2'' приводит к

потерям во внешней оболочке кабеля и созданию излучения, поляризованного перпендикулярно излучению вибратора. Это так

называемый антенный эффект фидера. В связи с этим присоединение коаксиального кабеля к симметричному вибратору должно осуществляться только при помощи специальных симметрирующих устройств.

2. СИММЕТРИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

На длинных волнах вплоть до дециметровых, где сосредоточенные реактивности (катушки индуктивности, трансформаторы и т.п.) физически реализуемы, применяются симметрирующие устройства в виде элементов с сосредоточенными реактивностями.

Простейшим симметрирующим устройством рассматриваемого типа является симметричный трансформатор, схема которого показана на рис.5.

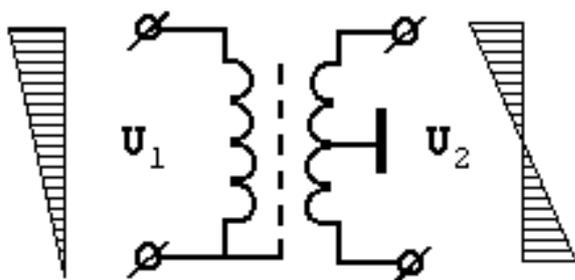


Рис. 5. Симметричный трансформатор

На этом же рисунке показаны эпюры напряжений на витках первичной и вторичной обмоток. Между обмотками трансформатора прокладывается электростатический экран, который представляет собой незамкнутый виток фольги или однослойную

обмотку, соединенную одним концом с заземленной клеммой.

Симметричное питание в широком диапазоне частот можно осуществить, применив так называемую симметрирующую приставку (рис.6), работающую по принципу компенсации тока в наружной оболочке кабеля. Она представляет собой четвертьволновой отрезок короткозамкнутой на конце двухпроводной линии, образованный наружной поверхностью коаксиального фидера и трубкой или стержнем, параллельным фидеру.

Короткое замыкание обеспечивает подвижный мостик. Один конец симметрирующей нагрузки (одно плечо вибратора) присоединяется к наружной оболочке коаксиальной линии, а второй конец (второе плечо

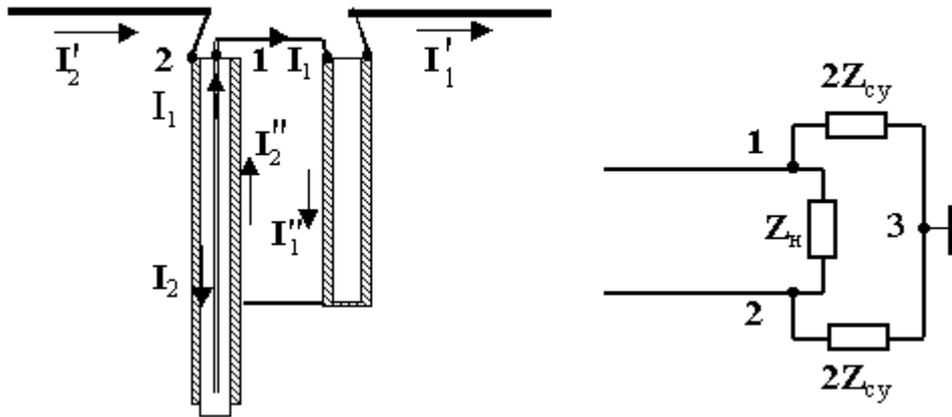


Рис. 6. Симметрирующая приставка

вибратора) к внутреннему проводу коаксиальной линии и одновременно к металлической трубке, имеющей тот же диаметр, что и наружный проводник коаксиальной линии. Часть тока, текущего по внутренней поверхности наружного проводника коаксиальной линии, ответвляется на его наружную поверхность (I_2''). В то же время часть тока, текущего по внутреннему проводу коаксиала, ответвляется на поверхность трубки или стержня (I_1''). При этом ответвляющиеся токи оказываются равными друг другу, как токи в проводах симметричной двухпроводной линии. Следовательно, токи, возбуждающие плечо вибратора (I_1' и I_2'), также равны друг другу, т.е. вибратор возбуждается симметрично.

Входное сопротивление короткозамкнутого отрезка двухпроводной линии, образованной внешним проводником коаксиала и стержнем,

$$Z_{cy} = -iZ_{ош} \operatorname{tg} k_0 l_{ш}, \quad (10)$$

где $Z_{ош}$ - волновое сопротивление двухпроводной линии.

Последнее может быть рассчитано по формуле

$$Z_{\text{ош}} = 276 \lg \frac{2D}{d}, \quad (11)$$

где d - диаметр провода двухпроводной линии, D - расстояние между проводами.

При $l_{\text{ш}} = \frac{\lambda}{4} Z_{\text{сy}}$ очень велико и ток, ответвляющийся на внешнюю поверхность коаксиала, мал, Если $l_{\text{ш}} \neq \frac{\lambda}{4}$, то ответвляющиеся на внешнюю поверхность токи увеличиваются. Однако, с одной стороны, при достаточно большом $Z_{\text{ош}}$, чего нетрудно достигнуть в случае двухпроводной линии, увеличение тока будет незначительно; с другой стороны, ток I_2'' равен и находится в противофазе с I_1'' . Симметрия питания не нарушается, происходит лишь некоторое, хотя и симметричное, уменьшение тока в плечах вибратора.

Реактивность шлейфа может быть использована для компенсации реактивной составляющей входного сопротивления антенны.

3. ДИРЕКТОРНАЯ АНТЕННА

Системы, состоящие из одинаковых излучателей, в частности, симметричных вибраторов, позволяют концентрировать излучение энергии преимущественно в одном направлении. Симметричный полуволновой вибратор создает максимальную напряженность поля в направлении, перпендикулярном своей оси. Суммарная же напряженность поля, создаваемая вибраторами, соединенными в систему, и направление, в котором она создается, зависят от взаимного расположения вибраторов, амплитуды и фазы токов, текущих по ним. Если все вибраторы расположены в одной плоскости, параллельны друг другу и питаются в фазе, то они создают максимальную напряженность поля в направлении, перпендикулярном этой плоскости, Изменением фазировки токов на вибраторах можно менять направление, в котором суммарная

напряженность поля системы будет максимальна. Так например, если расположить в одной плоскости в линию несколько симметричных вибраторов на расстоянии четверти волны друг от друга и питать их токами одной и той же амплитуды, но со сдвигом по фазе на 90° (рис.7), то в

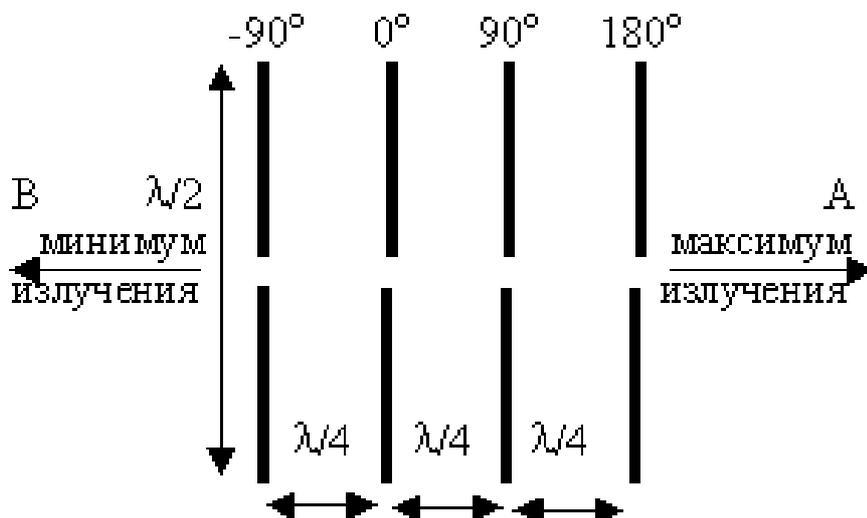
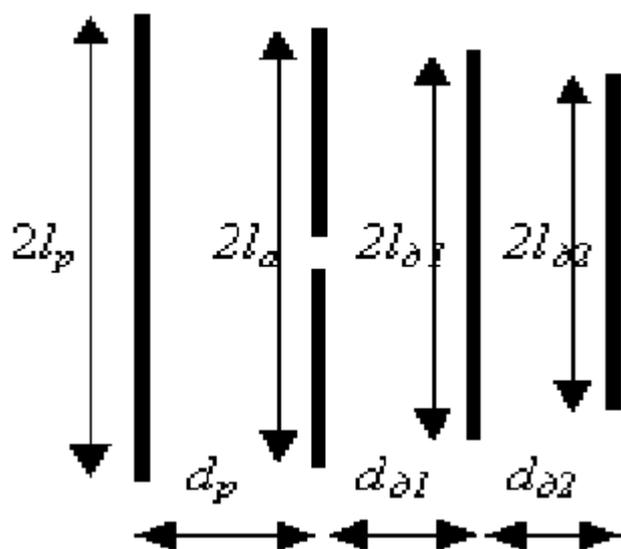


Рис. 7. Решетка симметричных вибраторов

направлении точки А поля будут складываться, а в направлении точки В (при четном числе вибраторов) – взаимно уничтожаться. Получается антенная система с однонаправленным излучением. Этот принцип положен в основу антенны типа «волновой канал» (рис.8). Антенна представляет



собой системы одинаково ориентированных приблизительно полуволновых вибраторов. При большом числе вибраторов в антенне ее можно рассматривать как антенну

Рис. 8. Антенна типа «волновой канал»

бегущей волны (типа «волновой канал») К фидерной линии подключается только один вибратор, называемый активным. В остальных вибраторах, называемых пассивными, токи индуцируются электромагнитным полем активного вибратора. Амплитуды и фазы токов пассивных вибраторов зависят от их длины, диаметра и взаимного расположения по отношению к активному вибратору и друг другу. Пассивный вибратор, расположенный сзади активного вибратора и направляющий излучение в сторону активного вибратора, называется рефлектором (отражателем). Пассивный вибратор, расположенный впереди активного и направляющий излучение в свою сторону, называется директором (направителем). Обычно в антенне «волновой канал» используется несколько директоров, поэтому эту антенну называют еще и «директорной антенной».

Все пассивные вибраторы крепятся к диэлектрической или металлической рейке. Последнее возможно потому, что распределение напряжения вдоль вибраторов таково, что в центре каждого имеется точка нулевого потенциала. Ввиду сложности точного расчета антенн типа «волновой канал» задача получения максимальной направленности обычно решается экспериментально, настройкой, т.е. подбором длин пассивных вибраторов и расстояний между ними. Длина рефлектора должна быть больше длины активного вибратора на 5–10%. Его реактивное сопротивление носит тогда индуктивный характер, следовательно, ток в рефлекторе отстает по фазе от возбуждающего его электрического поля. В свою очередь, электрическое поле, создаваемое наведенным током, отстает на 90° от тока. С учетом того, что возбуждающее электрическое поле в месте расположения рефлектора отстает по фазе от поля активного вибратора на 90° , общий фазовый сдвиг приближается к 270° , а это равносильно тому, что поле переизлучения рефлектора (ток в рефлекторе) опережало поле (ток) активного вибратора примерно на 90° . Длина директоров берется на 5–15% меньше длины активного вибратора. Их реактивное сопротивление носит емкостной характер, следовательно, ток

опережает по фазе возбуждающее ток электрическое поле. Тем самым 90^0 – фазовый сдвиг за счет отставания поля переизлучения от тока – оказывается скомпенсированным, и общее отставание поля переизлучения директора от поля активного вибратора составляет 90^0 . При таком соотношении фаз система приближается по своим свойствам к антенне, представленной на рис.7

Несмотря на кажущуюся простоту, настройка такой антенны довольно сложна, поскольку токи в вибраторах получаются неодинаковыми по амплитуде, а регулировки амплитуды и фазы токов в элементах взаимозависимы. При этом условии возбуждения токов максимальной амплитуды и получения наиболее благоприятных фазовых соотношений для сложения полей в главном направлении не совпадают. Например, чем ближе длина вибратора к резонансной, тем больше амплитуда тока, но тем меньше меняются фазы токов, и возникает необходимость в “тонкой” регулировке. Наоборот, когда директора антенны сильно укорочены ($2l_g < 0,4\lambda_0$), поля в главном направлении складываются почти синфазно, но при этом токи, возбуждаемые в вибраторах, малы по сравнению с током в активном вибраторе. Практически добиваются такого компромиссного соотношения амплитуд и фаз в полосе резонанса для данной системы вибраторов, при котором получается максимальное усиление в главном направлении. Возможны различные комбинации длины, сечений вибраторов и расстояний между ними, при которых достигается определенный коэффициент направленного действия директорной антенны. Ширина диаграммы направленности директорной антенны тем меньше, чем больше в ней директоров. Однако обычно количество директоров берется в пределах 3–10, так как при дальнейшем его увеличении антенна становится громоздкой, а диаграмма направленности сужается с добавлением директоров значительно слабее, чем при увеличении их количества в пределах первого десятка. Наличие пассивных вибраторов изменяет входное

сопротивление активного за счет так называемых вносимых сопротивлений. При этом активная составляющая уменьшается и появляется реактивная составляющая у предварительно настроенного в резонанс вибратора.

4. СНЯТИЕ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННЫ

Простейшая директорная антенна состоит из трех элементов: активного вибратора и двух пассивных – рефлектора и директора.

Настройка директорной антенны проводится в следующем порядке:

1. По заданной рабочей длине волны λ_0 рассчитывают длину активного вибратора $2l$ с учетом укорочения

$$2l = \frac{\lambda_0}{2} - 2\Delta l. \quad (12)$$

В предлагаемой лабораторной работе нужно решить другую задачу: по заданной длине активного вибратора, учитывая коэффициент укорочения, найти резонансную длину волны

$$\lambda_0 = 4l \left(1 + \frac{\Delta l}{l}\right). \quad (13)$$

2. Выбирают длину рефлектора $2l_p$ на 5–15% больше длины активного вибратора и устанавливают его на расстоянии порядка $0,2\lambda_0$ от активного вибратора. В предлагаемом наборе имеется два вибратора, длина которых на 5 и 15% больше длины активного вибратора.

3. С помощью индикатора поля (приемная антенна с детекторной секцией и усилителем) измеряют относительные напряженности поля в сторону активного вибратора (E_{0°) и в сторону рефлектора (E_{180°) и регулировкой расстояния d_p между вибраторами добиваются минимального

отношения $\frac{E_{180^\circ}}{E_{0^\circ}}$ для системы из двух вибраторов.

4. Добавляют директор, длина которого $2l_d$ должна быть на 5-15% меньше длины активного вибратора (в наборе имеется два директора с крайними из указанных значений отклонений длин от длины активного

вибратора), а расстояние d_d до активного вибратора устанавливается порядка $0,2\lambda_0$. Регулировкой d_d добиваются минимального отношения $\frac{E_{180^\circ}}{E_{0^\circ}}$ для системы из трех вибраторов, при этом может потребоваться небольшая подстройка рефлектора.

Следует иметь в виду, что при наладке антенны необходимо добиваться минимального отношения, а не максимума поля, излучаемого вперед, так как излучаемое поле зависит не только от взаимного расположения вибраторов, а и от степени согласования антенны с питающим фидером. Появляющуюся при наличии пассивных вибраторов реактивную составляющую компенсируют с помощью симметрирующего шлейфа.

Измерение полного входного сопротивления антенны осуществляется по схеме на рис. 9.

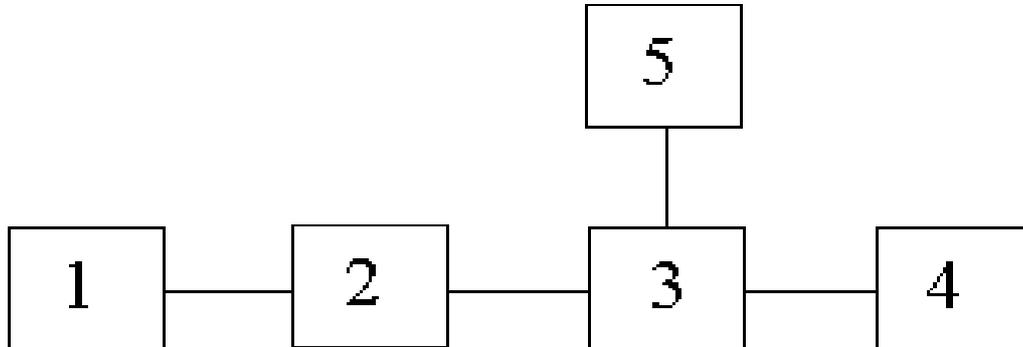


Рис. 9. Структурная схема измерения входного сопротивления антенны:

- 1 – генератор, 2 – развязывающий аттенюатор, 3 – измерительная линия,
4 - испытуемая антенна, 5 - индикатор

Снятие диаграммы направленности можно осуществлять двумя способами: методом неподвижной антенны или методом вращающейся антенны. Когда исследуемая антенна работает на излучение, то при первом методе она неподвижна и вокруг нее по кругу перемещается индикатор поля

со вспомогательной антенной, показывающей величину напряженности поля в разных точках круга.

При втором методе исследуемая антенна вращается вокруг своей оси, а индикатор поля неподвижен и показывает напряженность поля в зависимости от угла поворота антенны. Исследуемая антенна может работать и на прием.

Метод неподвижной антенны применяется всегда при снятии диаграмм направленности громоздких и неподвижных антенн (коротковолновые антенны магистральных линий связи, передающие телевизионные антенны метрового диапазона).

Метод вращающейся антенны применяется при изучении антенн сверхвысоких частот, простейших антенн метровых и дециметровых волн (симметричный вибратор, антенна «волновой канал»). Метод вращающейся антенны позволяет применять автоматическую запись диаграммы направленности. Для этого испытываемая антенна должна работать «на прием».

Режим работы на прием удобен и по ряду других соображений:

1. Отпадает необходимость вращать генератор вместе с антенной, либо применять гибкие кабели СВЧ, использовать вращающиеся сочленения.

2. Поскольку персоналу при настройке антенны и снятии диаграммы направленности удобнее находиться вблизи испытываемой антенны, то при работе антенны на прием он будет находиться в поле значительно меньшей интенсивности, чем в случае режима

Настройку директорной антенны и снятие диаграммы направленности в работе рекомендуется осуществлять, собрав схему (рис. 10).

5. ЗАДАНИЕ К РАБОТЕ

1. Измерить длину активного вибратора и, пользуясь формулами (9) и (13), определить рабочую длину волны и частоту.

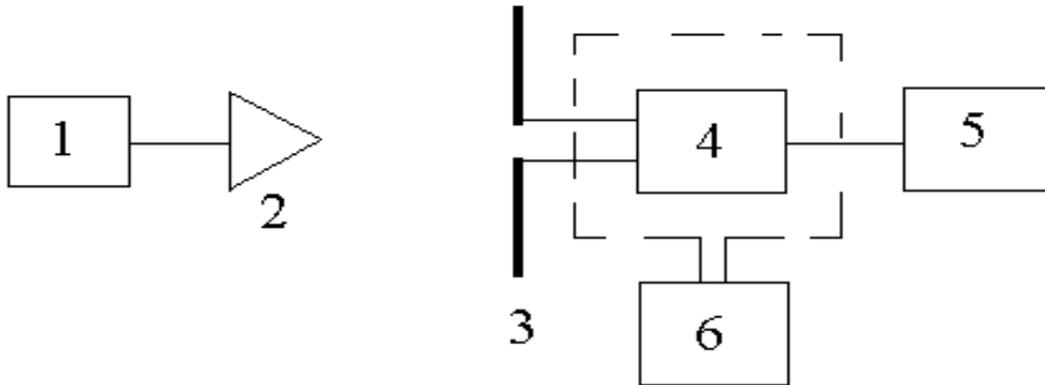


Рис. 10. Схема снятия диаграммы направленности антенны

в режиме «на прием»:

1 – генератор, 2 – передающая антенна, 3 – приемная (испытуемая) антенна, 4 – симметрирующее устройство, 5 – индикатор, 6 – поворотное устройство.

В режиме «на передачу»: генератор 1 и индикатор 5 меняются местами

2. Собрать схему измерения полного входного сопротивления (рис. 9), установить на шкале генератора найденную частоту и проверить ее по волномеру. При наличии расхождений шкал выставить частоту по волномеру. Снять зависимость $\frac{R}{Z_0}$ и $\frac{X}{Z_0}$ от длины шлейфа (точки можно брать через 1,5 см).
3. Собрать схему измерения диаграммы направленности, используя вибратор в качестве приемной антенны (рис. 10) и закрепив его на треногу. Снять диаграмму направленности антенны в H - плоскости.
4. Закрепить на вибраторной антенне стрелку. Выбрать рефлектор и подобрать расстояние между вибратором и рефлектором d_p ,

удовлетворяющее условию максимума отношения $\frac{E_{0^0}}{E_{180^0}}$. Снять и

построить диаграмму направленности.

5. Добавить к системе директор. Провести настройку, снять и построить диаграмму направленности директорной антенны.
6. Определить входное сопротивление директорной антенны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Драбкин А.Л., Зузенко В.Л., Кислов А.Г. Антенно-фидерные устройства. М.: Советское радио, 1974. С. 122-141.
2. Завьялов А.С. Основы измерений на сверхвысоких частотах. Томск: Изд-во ТГУ, 1981. С. 120-134.