

3. ИССЛЕДОВАНИЕ И ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Цель лабораторной работы – изучение поляризации электромагнитных волн, экспериментальное преобразование линейной поляризации электромагнитной волны в эллиптическую и круговую в поляризаторе на квадратном волноводе.

3.1. Теоретическая часть

Поляризацией электромагнитной волны называют изменение величины и ориентации векторов \vec{E} и \vec{H} в фиксированной точке пространства в течение периода колебания волны. При этом концы векторов поля \vec{E} и \vec{H} описывают в пространстве замкнутые кривые, называемые *годографами*. По форме годографа выделяют три вида поляризации: линейную, круговую и эллиптическую.

Рассмотрим плоские волны в неограниченном однородном изотропном пространстве без потерь. У этих волн векторы \vec{E} и \vec{H} поперечны к направлению распространения и расположены в плоскости фронта. Годографы векторов \vec{E} и \vec{H} в фиксированной точке пространства ортогональны и совпадают по форме, так что поляризацию волны достаточно определить по электрическому полю.

Пусть некоторый источник возбуждает две волны, распространяющиеся в направлении оси z , у которых векторы электрического поля взаимно перпендикулярны. В точке наблюдения z составляющие электрического поля равны:

$$\begin{cases} E_x = E_{mx} \cos(\omega t - kz + \varphi_x), \\ E_y = E_{my} \cos(\omega t - kz + \varphi_y), \end{cases} \quad (3.1)$$

где E_{mx} , E_{my} – амплитуды напряженностей электрического поля, В/м; φ_x , φ_y – начальные фазы при $z = 0$, $t = 0$, рад; k – волновое число, рад/м.

Введя обозначение $\xi = \omega t - kz$, получим из формул (3.1) соотношения:

$$\begin{cases} \frac{E_x}{E_{mx}} = \cos(\xi + \varphi_x) = \cos \xi \cos \varphi_x - \sin \xi \sin \varphi_x, \\ \frac{E_y}{E_{my}} = \cos(\xi + \varphi_y) = \cos \xi \cos \varphi_y - \sin \xi \sin \varphi_y. \end{cases} \quad (3.2)$$

Решив систему уравнений (3.2) относительно $\cos \xi$ и $\sin \xi$, возведя обе части этих решений в квадрат и почленно складывая полученные выражения, приходим к уравнению:

$$\left(\frac{E_x}{E_{mx}} \right)^2 + \left(\frac{E_y}{E_{my}} \right)^2 - 2 \left(\frac{E_x}{E_{mx}} \right) \left(\frac{E_y}{E_{my}} \right) \cos \psi = \sin^2 \psi, \quad (3.3)$$

Выражение (3.3) представляет собой уравнение эллипса, лежащего в плоскости XOY (рис. 3.1). Ось z направлена от нас и соответствует направлению распространения электромагнитной волны.

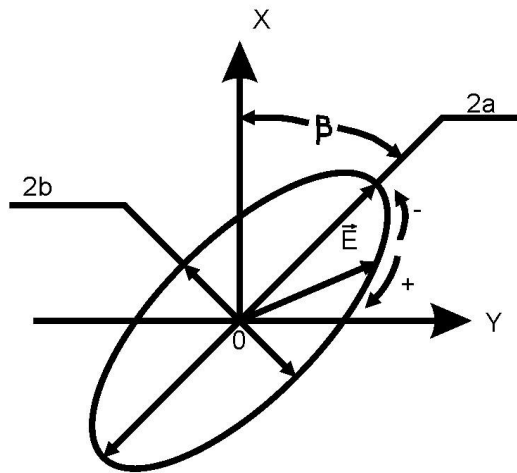


Рис. 3.1. Поляризационный эллипс

Суммарный вектор \vec{E} из выражений (3.1) в фиксированной точке z с течением времени меняет свою величину и ориентацию, и его конец описывает эллипс за период частоты колебаний. Направление вращения суммарного вектора E зависит от знака сдвига фаз между его составляющими. Существует понятие круговой поляризации правого вращения (правой поляризации), когда вектор E вращается по часовой стрелке, если смотреть вдоль направления распространения волны. При круговой поляризации левого вращения (левой

поляризации) вектор E вращается против часовой стрелки. С помощью выражений (3.1) можно показать, что правая поляризация получается, когда $\sin \psi > 0$, а левая поляризация – когда $\sin \psi < 0$. Существует простое правило: вектор E вращается в сторону составляющей, отстающей по фазе.

Для характеристики поляризационного эллипса вводят параметры: угол β наклона большой оси эллипса к одной из осей системы координат (рис. 3.1), коэффициент эллиптичности r . Угол β определяется следующим выражением:

$$\beta = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \left(\frac{2E_{mx}E_{my}}{E_{mx}^2 - E_{my}^2} \cos \psi \right). \quad (3.4)$$

Коэффициент эллиптичности – это отношение малой полуоси b к большой полуоси a :

$$r = \frac{b}{a} = \frac{2E_{mx}E_{my}|\sin \psi|}{E_{mx}^2 + E_{my}^2 + \sqrt{(E_{mx}^2 - E_{my}^2)^2 + 4E_{mx}^2E_{my}^2 \cos^2 \psi}}. \quad (3.5)$$

Из выражений (3.3)–(3.5) легко получить формулы для полей линейной или круговой поляризации как частных случаев более общего вида поляризации – эллиптической. Рассмотрим эти случаи подробнее.

Линейная поляризация. Если составляющие E_x и E_y синфазны ($\psi = 0$) или противофазны ($\psi = \pm 180^\circ$), то эллипс вырождается в прямую линию ($r = 0$). Угол наклона этой линии можно подсчитать по формуле (3.4).

Круговая поляризация. Если составляющие E_x и E_y имеют равные амплитуды $E_{mx} = E_{my}$ и сдвиг фаз $\psi = \pm \pi/2$, то согласно выражению (3.3), годограф будет иметь вид окружности, и, как это следует из выражения (3.5), коэффициент эллиптичности $r = 1$.

У плоских однородных волн годографы векторов E и \vec{H} ортогональны, лежат в одной плоскости (плоскости фронта) и не меняют формы ни вдоль фронта, ни вдоль направления распространения. Эти свойства не сохраняются у плоских неоднородных волн.

Неоднородная волна – это волна, у которой поверхность равных фаз не совпадает с поверхностью равных амплитуд. Годографы E и H неоднородных волн могут лежать в разных плоскостях и иметь различный вид. Это можно показать на примере волны H_{10} в прямоугольном волноводе. Вектор E волны H_{10} имеет одну составляющую, перпендикулярную широкой стенке волновода. Поэтому по электрическому полю волна H_{10} линейно поляризована, причем в любых точках поперечного и продольного сечения волновода вид поляризации сохраняется. Вектор \vec{H} имеет две составляющие – поперечную и продольную. Годограф вектора \vec{H} лежит в продольной плоскости, параллельной широкой стенке волновода. В этой плоскости амплитуды составляющих вектора H меняются по поперечной координате. В режиме бегущей волны составляющие вектора H сдвинуты по фазе на 90° и в зависимости от соотношения амплитуд вид поляризации по вектору H будет меняться. Так, у узких стенок существует только продольная составляющая, и поляризация будет линейная. На оси волновода магнитное поле имеет только поперечную составляющую, и поляризация также линейная. На некотором расстоянии от узкой стенки, где обе составляющие имеют одинаковые амплитуды, поляризация будет круговой. В остальных точках поляризация по вектору H эллиптическая.

В тех случаях, когда открытый конец волновода используется для излучения электромагнитной энергии, практический интерес представляет поляризация поля в поперечном сечении, в котором виды поляризации по векторам E и H совпадают.

Поляризатор на квадратном волноводе. Поляризатор – это устройство, преобразующее волну с одним видом поляризации в волну с другим видом поляризации. Поляризатор на квадратном волноводе преобразует волну с линейной поляризацией в волну с эллиптической или круговой поляризацией. Для работы поляризатора должны быть обеспечены следующие условия: существование двух волн с взаимно перпендикулярными линейными поляризациями в поперечной плоскости; сдвиг фаз между ними.

Рассмотрим работу поляризатора на квадратном волноводе более подробно. В квадратном волноводе одновременно могут существовать две волны: H_{10} и H_{01} , имеющие одинаковые критические длины волн $\lambda_{кр}^{10} = \lambda_{кр}^{01} = 2a$. Для создания этих волн в квадратном волноводе применяют диагональное возбуждение с помощью прямоугольного волновода, работающего на основной волне H_{10} (вектор E на рис. 3.2, а). Волна прямоугольного волновода с вектором E , диагональным в квадратном волноводе, возбуждает волны H_{10} и H_{01} в квадратном волноводе. В выбранной системе координат волна H_{10} имеет E_y -составляющую поля с вариацией амплитуды по координате x (рис. 3.2, б), а волна H_{01} имеет E_x -составляющую с вариацией амплитуды по координате y (рис. 3.2, в). Диагональный способ возбуждения квадратного волновода обеспечивает равенство амплитуд волн H_{10} и H_{01} . В данной работе сдвиг по фазе между волнами H_{10} и H_{01} может быть осуществлен двумя способами.

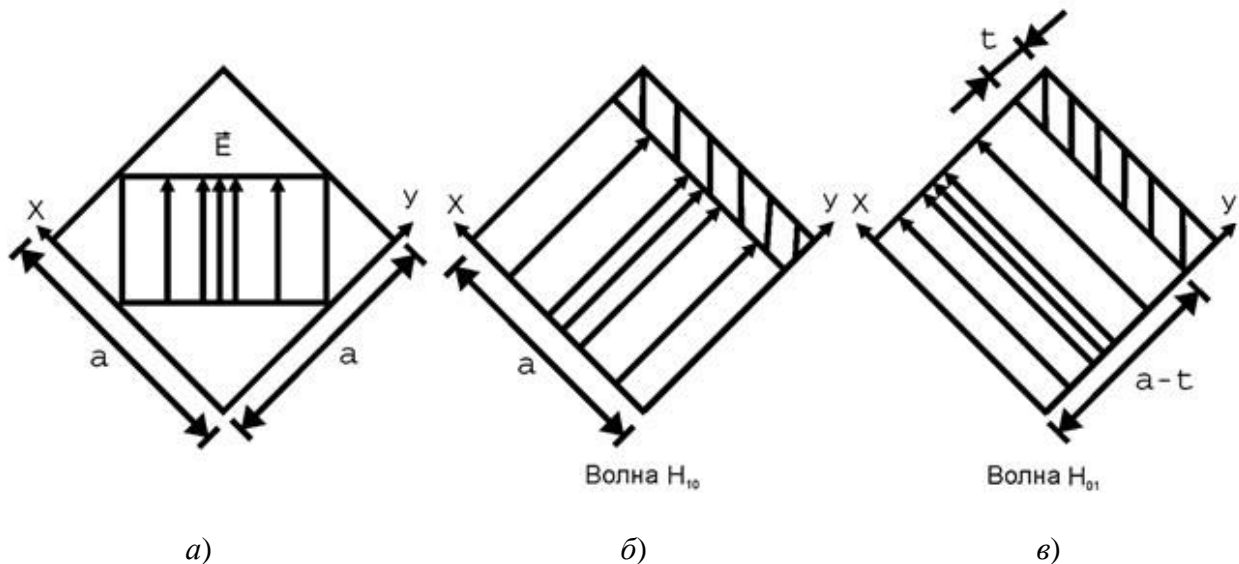


Рис. 3.2. Поляризатор с металлической пластиной

Первый способ. В квадратный волновод вставляется металлическая пластинка шириной a , толщиной t и длиной l , плотно прижатая к одной из стенок (рис. 3.2, б и в). Соответствующий размер сечения волновода уменьшается до величины $a-t$. Для H_{10} критическая длина волны сохраняет значение $\lambda_{кр}^{10} = 2a$. Для волны H_{01} критическая длина волны изменяется и рассчитывается по

формуле $\lambda_{\text{кр}}^{01}=2(a-t)$. При этом изменяются фазовые скорости и длины волн в волноводе.

Ниже приводятся формулы для расчета длин волн $\lambda_{\text{в}}^{01}$ и $\lambda_{\text{в}}^{10}$.

$$\lambda_{\text{в}}^{10} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}}. \quad (3.6)$$

$$\lambda_{\text{в}}^{01} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2(a-t)}\right)^2}}, \quad (3.7)$$

При прохождении участка волновода с металлической пластиной длиной l возникает фазовый сдвиг между составляющими E_y и E_x волн H_{10} и H_{01} :

$$\psi = \frac{2\pi}{\lambda_{\text{в}}^{10}} l - \frac{2\pi}{\lambda_{\text{в}}^{01}} l. \quad (3.8)$$

В зависимости от длины и толщины пластинки фазовый сдвиг принимает разные значения. При сдвиге $\psi = \pi 2n$ (составляющие синфазны) поляризация на выходе квадратного волновода остается линейной вертикальной, а при $\psi = \pi(2n - 1)$ (составляющие противофазны) поляризация становится линейной горизонтальной. При сдвиге фаз $\psi = \pm\pi 2$ поляризация будет круговой правого или левого вращения. Подставив данный сдвиг фаз в формулу (3.8), определим наименьшую длину металлической пластинки, обеспечивающей круговую поляризацию поля на выходе квадратного волновода:

$$l = \frac{\lambda_{\text{в}}^{10} \cdot \lambda_{\text{в}}^{01}}{4|\lambda_{\text{в}}^{10} - \lambda_{\text{в}}^{01}|}. \quad (3.9)$$

При произвольной длине пластинки (произвольном сдвиге фаз в формуле (3.8)) поляризация поля на выходе квадратного волновода будет эллиптической.

Второй способ. В середину сечения квадратного волновода помещается тонкая диэлектрическая пластина шириной a , толщиной t и длиной l (рис. 3.3).

При частичном заполнении волновода диэлектриком замедление фазовой скорости (укорочение длины волны $\lambda_{\text{в}}$) зависит от доли мощности, проходящей через сечение диэлектрической пластинки. У волны H_{10} (вектор E параллелен пластинке) максимум поля приходится на область, занятую пластинкой (рис. 3.3), что приводит к максимальному замедлению фазовой скорости и уменьшению длины волны $\lambda_{\text{в}}^{10}$.

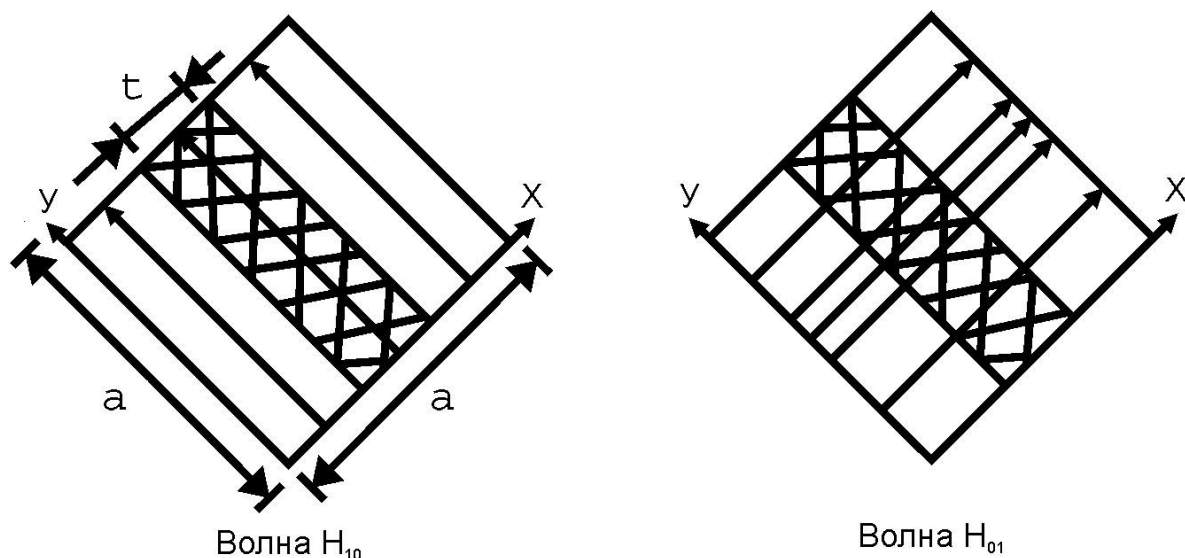


Рис. 3.3. Поляризатор с диэлектрической пластинкой

Для волны H_{01} (вектор E перпендикулярен пластинке) через область диэлектрика проходит меньшая доля мощности, чем в случае волны H_{10} . Это приводит к незначительному уменьшению длины волны $\lambda_{\text{в}}^{01}$, и ее можно рассчитать приближенно по формуле (3.6). Длина волны H_{10} с учетом существенного влияния диэлектрической пластинки рассчитывается по следующей приближенной формуле [1]:

$$\lambda_{\text{в}}^{10} = \frac{1}{(\epsilon - 1) \frac{t}{a} \frac{\lambda_{\text{в}}^{01}}{\lambda_0^2} + \frac{1}{\lambda_{\text{в}}^{01}}}, \quad (3.10)$$

где $\lambda_{\text{в}}^{01}$ – длина волны H_{10} , м, рассчитываемая по формуле (3.6);

λ_0 – длина волны в свободном пространстве, м, $\lambda_0 = c / f$;

ε – относительная диэлектрическая проницаемость материала пластинки.

При прохождении участка волновода с диэлектрической пластиной длиной l возникает фазовый сдвиг, определяемый формулой (3.8), между составляющими E_x и E_y волн H_{10} и H_{01} . В зависимости от величины фазового сдвига поляризация поля на выходе квадратного волновода аналогично случаю с металлической пластинкой может быть линейной, круговой или эллиптической. Длина диэлектрической пластинки для круговой поляризации рассчитывается также по формуле (3.9).

3.2. Описание лабораторной установки

Лабораторная установка, предназначенная для исследования поляризации электромагнитных волн и преобразования линейной поляризации поля в эллиптическую или круговую в поляризаторе на квадратном волноводе и снятия поляризационных кривых, показана на рис. 3.4.

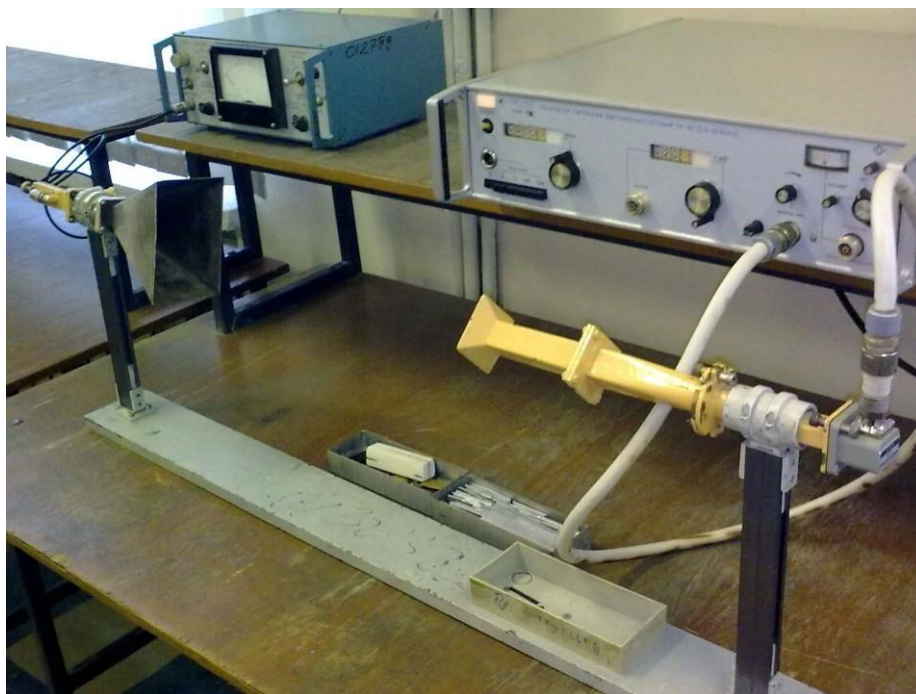


Рис. 3.4. Лабораторный стенд для исследования поляризации электромагнитных волн

Схема лабораторной установки изображена на рис. 3.5. Модулированные по амплитуде высокочастотные колебания от генератора 1 через коаксиальный кабель и коаксиально-волноводный переход 2 поступают в плавный переход 3 от прямоугольного волновода к круглому и переход 4 от круглого волновода к

квадратному, представляющему собой поляризатор 5. Поляризатор 5 оканчивается квадратным рупором 6. Переходы 3 и 4 осуществляют плавную трансформацию прямоугольного волновода в квадратный волновод, обеспечивая тем самым согласование в тракте. Рупор 6 излучает волну линейной, эллиптической или круговой поляризации в зависимости от параметров фазосдвигающей пластинки в квадратном волноводе. Излученный сигнал принимается прямоугольным рупором 7, откуда подается в детекторную секцию на прямоугольном волноводе 9. Низкочастотная огибающая сигнала усиливается и индицируется на измерительном усилителе 10. Показания прибора усилителя, обозначенные далее через U , пропорциональны квадрату амплитуды измеряемой составляющей поля, что обусловлено квадратичностью характеристики детектирования при слабых сигналах. Приемный прямоугольный рупор может вращаться вокруг оси, и угол поворота отсчитывается по лимбу 8.

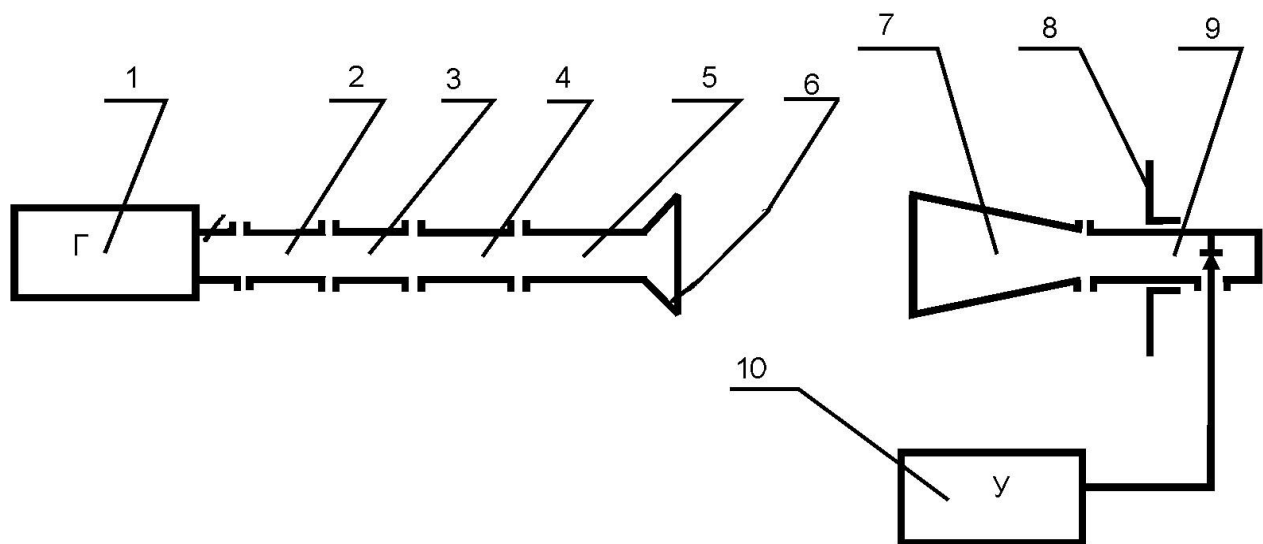


Рис. 3.5. Схема установки

При вращении рупора вокруг продольной оси снимается зависимость сигнала от угла поворота рупора, которая представляет собой поляризационную кривую. Приемный рупор соединен с прямоугольным волноводом и возбуждается составляющей вектора E , нормальной к широкой стенке рупора. Когда у принимаемой волны вектор электрического поля E перпендикулярен широкой стенке рупора, на его выходе вырабатывается максимальный сигнал.

При других положениях рупора сигнал на усилителе будет пропорционален лишь проекции вектора E на узкую стенку рупора. В силу этого форма поляризационной кривой будет отличаться от годографа вектора E . Для поля эллиптической поляризации на рис. 3.6 показана поляризационная кривая (сплошная линия) в полярной системе координат. В поляризационную кривую вписывается поляризационный эллипс. Большая и малая оси эллипса совпадают с максимальным и минимальным сигналом при снятии поляризационной кривой. Коэффициент эллиптичности вычисляется по формуле:

$$r = \sqrt{\frac{U_{\min}}{U_{\max}}}, \quad (3.11)$$

где U_{\min} , U_{\max} – соответственно минимальное и максимальное показания измерительного усилителя при повороте приемного рупора.

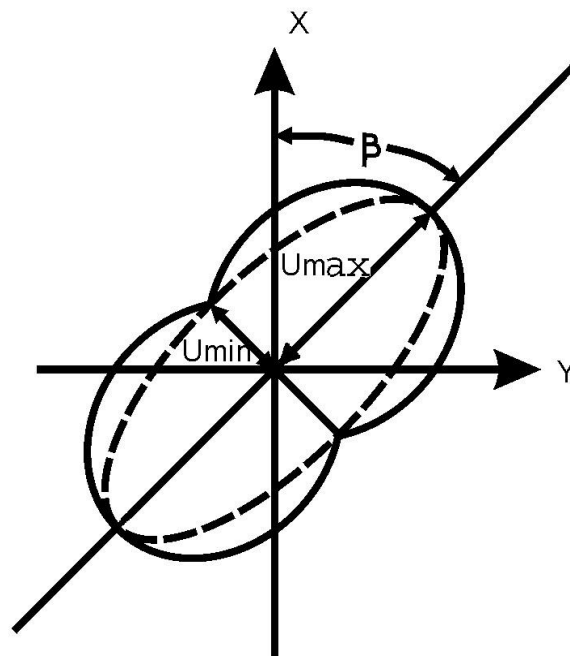


Рис. 3.6. Поляризационная кривая

Угол наклона большой оси эллипса β равен углу поворота рупора при максимальном показании усилителя U_{\max} .

1. Рассчитать длину металлической пластинки для получения круговой поляризации. Толщина t_1 пластинки указана в табл. 3.1.

Таблица 3.1

f (МГц)	8900
a (мм)	23
t_1 (мм)	3
t_2 (мм)	2
ε	2,8

3.3. Лабораторное задание

1. Включить генератор СВЧ и измерительный усилитель. Установить на генераторе частоту согласно табл. 3.1.

2. Установить нуль шкалы на измерительном усилителе с помощью тумблера и ручки установки нуля. При измерениях максимальные показания стрелочного индикатора должны составлять 80–90 % от шкалы усилителя при положении делителя входного напряжения « $\times 1$ ». Если показания выходят за пределы шкалы, необходимо уменьшить уровень сигнала с помощью ручки регулировки уровня выходного напряжения генератора.

3. Вращая приемный рупор, определить минимальный и максимальный сигналы, когда в квадратном волноводе отсутствуют фазосдвигающие пластинки. Рассчитать коэффициент эллиптичности по формуле (3.11). При $r = 0$ снять поляризационную кривую с шагом 15° в пределах от 0 до 360° . Данные записать в таблицу. Качественно построить поляризационную кривую в полярной системе координат и определить вид поляризации.

4. Металлическую пластинку произвольной длины вставить в квадратный поляризатор к одной из стенок квадратного волновода. Вращая приемный рупор, измерить и записать U_{\min} и U_{\max} сигнала. Вычислить коэффициент эллиптичности. Если коэффициент эллиптичности находится в пределах 0,2–0,7, снять поляризационную кривую с шагом 15° в пределах от 0 до 360° . Если коэффициент эллиптичности находится вне указанного интервала, повторить эксперимент с другими пластинками. Поляризационная кривая

снимается лишь для той пластинки, для которой выполняется указанное ограничение на величину коэффициента эллиптичности. Качественно построить поляризационную кривую в полярной системе координат.

5. В середину сечения квадратного волновода с помощью держателя поместить диэлектрическую пластинку произвольной длины. Вращая приемный рупор, измерить и записать U_{\min} и U_{\max} сигнала. Вычислить коэффициент эллиптичности. Если коэффициент эллиптичности находится в пределах 0,2–0,7, снять поляризационную кривую с шагом 15° в пределах от 0 до 360° . Если коэффициент эллиптичности находится вне указанного интервала, повторить измерения с другими пластинками. Поляризационная кривая снимается лишь для той пластинки, для которой выполняется указанное ограничение на величину коэффициента эллиптичности. Качественно построить поляризационную кривую в полярной системе координат.

6. Рассчитать длину металлической пластинки для получения круговой поляризации, толщина которой указана в таблице. Металлическую пластинку, соответствующего размера, вставить в квадратный волновод и снять поляризационную кривую. Измерить коэффициент эллиптичности и сравнить его значение с теоретическим.