

Министерство науки, высшего образования и технической  
политики РСФСР

Самарский ордена Трудового Красного Знамени  
авиационный институт имени академика С.П. Королева

ИССЛЕДОВАНИЕ ФЕРРИТОВЫХ  
РАЗВЯЗЫВАЮЩИХ ПРИБОРОВ С В Ч

Методические указания  
к лабораторным работам

Самара 1992

Составитель И.Е.К а л а ш н и к

УДК 621.372.832.8

Исследование ферритовых развязывающих приборов СВЧ: Метод. указания к лаборат. работам /Самар. авиац. ин-т. Сост. И.Е.К а л а ш н и к. Самара, 1992. 44 с.

Излагается методика теоретического и экспериментального исследований ферритовых развязывающих приборов: вентилях, циркуляторов в волноводном, коаксиальном, полосковом и микрополосковом исполнении. Исследуются резонансные вентили, вентили на смещении поля и  $Y$ -циркуляторы по электрическим характеристикам: КСВН, ослаблению в прямом и обратном направлении распространения электромагнитной энергии, вентильному отношению, развязке между плечами  $Y$ -циркулятора.

Приводится порядок подготовки и выполнения лабораторных работ из цикла "Антенны и устройства СВЧ", выполняемых студентами радиотехнического факультета специальности 2301.

Составлены на кафедре "Радиотехнические устройства".

Печатаются по решению редакционно-издательского совета Самарского ордена Трудового Красного Знамени авиационного института имени академика С.П.Королева.

Рецензент В.И.К а т о л и к о в

## Ц е л и   р а б о т ы :

1. Изучить принцип действия и конструкцию ферритовых развязывающих приборов СВЧ.

2. Исследовать основные электрические характеристики ферритовых приборов СВЧ в рабочем диапазоне частот: прямые и обратные потери, развязку, согласование.

## I. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

При подготовке к лабораторному занятию необходимо изучить соответствующие разделы лекций, материалы, изложенные в литературе [1-6], и настоящие методические указания.

### I.1. Краткие сведения о ферритовых материалах диапазона СВЧ

Ферриты составляют группу ферромагнитных веществ, обладающих очень большим удельным сопротивлением и, соответственно, малой проводимостью. Развязывающие невзаимные приборы СВЧ разрабатываются на основе специально разработанных ферритовых материалов. Свойства ферритов существенным образом зависят от их кристаллической структуры. Поликристаллические ферриты состоят из большого числа кристаллитов, ориентация которых имеет случайный характер. При этом каждый кристаллит ведет себя как монокристалл, изолированный от соседних кристаллов небольшими воздушными порами. Поликристаллические ферриты получают спеканием смеси окиси железа с окислами других металлов ( $Ni$ ,  $Zn$ ,  $Mn$ ,  $Mg$ ,  $Co$ ,  $Li$ ,  $Co$  и др.).

Общая формула ферритов со структурой шпинели записывается [2] как  $M\overset{x}{E}O \cdot Fe_2O_3$ , где  $M\overset{x}{E}$  - ион двухвалентного металла.

В технике хорошо известны ферриты, в которых в качестве  $Me^{\text{II}}$  служат ионы  $Ni, Co, Fe, Mn, Mg, Cu$ , а также одновалентный  $Li$ . Иттриевые ферриты со структурой граната имеют формулу  $3Me_2^{\text{III}}O_3 \cdot 5Fe_2O_3$ , где  $Me^{\text{III}}$  - трехвалентный ион редкоземельного металла, обычно это  $Y, Cd, Eu$  [1].

Получение тех или иных заданных свойств обычно достигается созданием смешанных ферритов: никель-цинковых, магний-марганцевых и других феррошпинелей, где вместо  $Me^{\text{II}}$  в формулу подставляется  $Ni_x Zn_{1-x}, Mg_x Mn_{1-x}$ , где  $x$  означает долю никеля и магния в составе двухвалентных ионов, иттрий-гадолиниевых феррогранатов и т.д.

Поликристаллические ферриты изготавливают по технологии, принятой при производстве керамических изделий. Окислы соответствующих металлов измельчают в шаровых мельницах, а затем перемешивают с пластификатором (например, с парафином). Из полученной таким образом массы методом прессования в металлических пресс-формах или другим способом изготавливают полуфабрикаты. Обжиг полуфабрикатов производят в камерах или туннельных печах при температуре 1000...1400°C. Некоторые ферриты обжигают не в воздушной, а в инертной среде. Температура Кюри, т.е. минимальная температура, при которой происходит исчезновение ферромагнитных свойств ферритов, для различных ферритов имеет разные значения.

Так же, как и сверхвысокочастотная керамика, ферриты обладают большим удельным электрическим сопротивлением, которое для большинства ферритов лежит в пределах  $10^2 \dots 10^6$  Ом·см и зависит от условий изготовления феррита и от имеющихся в нем примесей. Поэтому ферриты на сверхвысоких частотах имеют сравнительно небольшие диэлектрические потери ( $\text{tg} \delta = 10^{-2} \dots 10^{-4}$ ).

Относительная диэлектрическая проницаемость ферритов на сантиметровых волнах имеет порядок 5...20 в зависимости от их состава и условий изготовления.

Под диэлектрической проницаемостью ферритов понимается действительная часть комплексной проницаемости  $\epsilon_{\text{ф}} = \epsilon_{\text{ф}}' - j\epsilon_{\text{ф}}''$ . Тангенс угла диэлектрических потерь определяется выражением  $\text{tg} \delta_{\text{ф}} = \epsilon_{\text{ф}}'' / \epsilon_{\text{ф}}'$ . Основные магнитные и диэлектрические параметры стандартизованных марок ферритов СВЧ приведены в работе [1].

В размагниченном состоянии ферриты представляют собой совокупность небольших областей (доменов), размеры которых имеют порядок

$10^{-4}$  см. В каждой из этих областей магнитные моменты отдельных электронов направлены в одну и ту же сторону. Следовательно, суммарный магнитный момент домена является произведением числа электронов на магнитный момент спина электрона. Если отнести это произведение к единице объема, то мы получим намагниченность домена. Таким образом, элементарная ячейка ферромагнитного вещества — домен характеризуется наличием магнитного момента в отсутствие внешнего магнитного поля.

## 1.2. Физические явления в ферритах в диапазоне СВЧ

Известно, что атомы всех веществ состоят из положительно заряженного ядра и определенного числа отрицательно заряженных электронов. Каждый электрон вращается по некоторой орбите вокруг ядра, одновременно вращаясь вокруг своей собственной оси. Движение электрона по орбите создает ток, который обуславливает появление орбитального магнитного момента  $\vec{M}_{orb}$ . При вращении электрона вокруг своей оси возникает спиновый магнитный момент  $\vec{M}_{сп}$ .

Электрон — частица с определенной массой, поэтому каждый электрон может рассматриваться в первом приближении как волчок (гироскоп) с массой  $m$ , вращающийся вокруг центра атома и одновременно вокруг собственной оси. Это обуславливает наличие у электрона орбитального механического момента количества движения ( $\vec{L}_{orb}$ ) или просто орбитального механического момента и спинового механического момента количества движения (спинового механического момента  $\vec{L}_{сп}$ ). Теоретические и экспериментальные исследования показали, что

$$\vec{M}_{orb} = -\mu_0 \frac{e}{2m} \vec{L}_{orb}, \quad (1)$$

$$\vec{M}_{сп} = -\mu_0 \frac{e}{m} \vec{L}_{сп}, \quad (2)$$

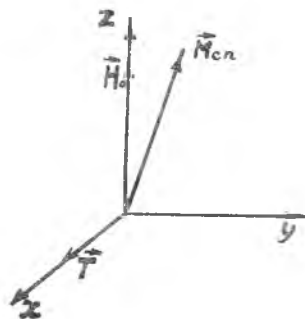
где  $e$  и  $m$  — соответственно заряд и масса электрона (знак минус в (1) и (2) обусловлен отрицательным зарядом электрона).

Полный магнитный и механический моменты атома есть геометрическая сумма соответственно магнитных и механических спиновых и

орбитальных моментов всех электронов в атоме. В свою очередь, полный магнитный и механический моменты молекулы вещества являются геометрической суммой моментов атомов в молекуле и т.д. Магнитный момент ядра примерно на три порядка меньше магнитного момента электрона, поэтому влиянием магнитного момента ядра можно пренебречь.

Вопрос о том, какой из магнитных моментов электрона, спиновый или орбитальный, обуславливает явление ферромагнетизма, решен впервые экспериментальным путем. При этом оказалось, что ферромагнитные свойства вещества связаны, главным образом, со спиновым магнитным моментом, и поэтому в первом приближении орбитальный магнитный момент электрона можно не принимать во внимание.

Таким образом, в простейшей модели атомы ферромагнитного вещества могут быть представлены в виде волчков, обладающих собственным механическим моментом количества движения (спином) и магнитным спиновым моментом, причем, эти моменты, как следует из теории, направлены в противоположные стороны.



Р и с. 1. Вращательный момент электрона

При помещении такого волчка в магнитное поле напряженности  $\vec{H}_0$  на него будет действовать вращательный момент  $\vec{T}$ , равный векторному произведению спинового момента  $\vec{M}_{сп}$  на напряженность магнитного поля  $\vec{H}_0$  (рис. 1):

$$\vec{T} = [\vec{M}_{сп} \vec{H}_0], \quad (3)$$

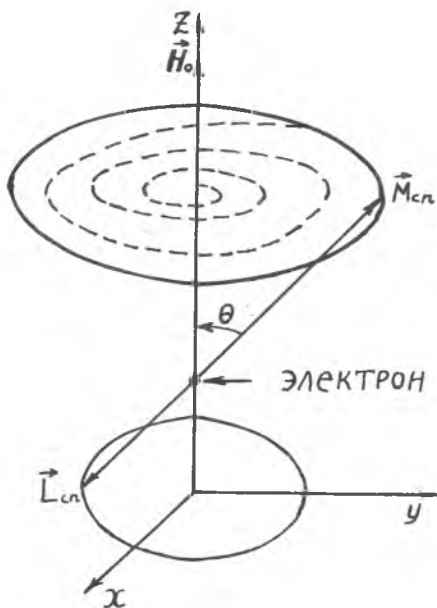
где  $\vec{M}_{сп}$  — спиновый магнитный момент электрона;

$\vec{H}_0$  — напряженность внешнего магнитного поля.

Под влиянием приложенного магнитного поля  $\vec{H}_0$  магнитный момент  $\vec{M}_{сп}$  стремится повернуться и установиться параллельно вектору  $\vec{H}_0$ . Однако наличие механического момента  $\vec{L}_{сп}$  делает электрон подобным гироскопу, ось которого под влиянием действующих сил прецессирует (вращается). Поэтому под воздействием внешнего магнитного поля концы векторов  $\vec{L}_{сп}$  и  $\vec{M}_{сп}$  начинают пре-

цессировать вокруг вектора  $\vec{H}_0$  (рис. 2). Скорость перемещения конца вектора  $\vec{L}_{cn}$  равна величине вращательного момента  $\vec{T}$  :

$$\frac{d\vec{L}_{cn}}{dt} = \vec{T} = [\vec{M}_{cn} \vec{H}_0]. \quad (4)$$



Р и с. 2. Траектория движения концов векторов

Подставляя в (4) вместо  $\vec{L}_{cn}$  его значение из (2), получаем

$$\frac{d\vec{M}_{cn}}{dt} = -\gamma_{cn} [\vec{M}_{cn} \vec{H}_0] = [\gamma_{cn} \vec{H}_0 \vec{M}_{cn}], \quad (5)$$

где  $\gamma_{cn} = \mu_0 \frac{|e|}{m}$  - гиромангнитное отношение.

Из уравнения (5) следует, что вектора  $\vec{M}_{cn}$  и  $\vec{L}_{cn}$  вращаются около направления  $\gamma_{cn} \vec{H}_0$  с угловой скоростью

$$\omega_0 = \gamma_{сп} H_0, \quad (6)$$

где  $\omega$  — частота ферромагнитного резонанса, т.е. частота прецессии электрона в магнитном поле  $\vec{H}_0$ .

Если бы не было затухания, прецессия магнитного момента продолжалась бы бесконечно долго. В реальных ферромагнитных средах всегда имеют место потери. Поэтому конец вектора  $\vec{M}_{сп}$  сдвигается по свертывающейся спирали, как показано пунктиром на рис. 2. Через 0,01 мкс прецессия практически полностью прекращается, и вектор  $\vec{M}_{сп}$  устанавливается параллельно вектору  $\vec{H}_0$ .

При определенной напряженности магнитного поля все нескомпенсированные магнитные моменты ориентируются в феррите параллельно друг другу и приложенному полю  $\vec{H}_0$ . Феррит намагничивается до насыщения. В результате вектор магнитного момента единицы объема феррита, равный произведению  $\vec{M}_{сп}$  на число  $N$  упорядоченных магнитных моментов в единице объема, установится параллельно вектору  $\vec{H}_0$ , т.е.

$$\vec{M}_\Sigma = N \vec{M}_{сп} = \chi_0 \vec{M}_m. \quad (7)$$

Внешнее магнитное поле оказывает одинаковое влияние на все нескомпенсированные магнитные моменты. Тогда уравнение (5) описывает движение не только магнитного момента отдельного электрона, но и всех магнитных моментов в единице объема, т.е. в уравнение (7) можно вместо  $\vec{M}_{сп}$  подставить величину  $\vec{M}$ :

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = -\gamma [\vec{M}, \vec{H}] = \gamma [\vec{H}, \vec{M}]. \quad (8)$$

Явление ферромагнитного резонанса можно очень просто объяснить, исходя из квантовомеханических представлений. Как известно, ферромагнетизм обусловлен нескомпенсированными спиновыми магнитными моментами электронов, находящихся на "недостроенных"  $3d$ - или  $4f$  - оболочках атомов или ионов [5]. В силу обменного взаимодействия между этими электронами энергетически выгодным оказывается состояние, когда все спиновые моменты электронов ориентированы параллельно друг другу.

Возможны лишь две ориентации спиновых моментов относительно направления магнитного поля  $H_0$ : параллельная и антипараллельная.



Различие их энергий составляет  $\Delta W = 2 M_{сп} H$ , где  $M_{сп}$  — магнитный момент спина. Имеется, таким образом, два энергетических уровня, разделенных интервалом  $\Delta W$ .

В отсутствие теплового движения (при температуре 0 К) все спины находятся на нижнем уровне, т.е. в случае однородного, изотропного намагниченного до насыщения ферромагнетика — ориентированы по полю  $H_0$ . Для перехода на верхний уровень или уровень "опрокидывания" спина необходима энергия  $\Delta W$ . Эта энергия может быть передана тепловым движением или квантами электромагнитного поля. В последнем случае переходы будут происходить, когда энергия кванта составит  $\Delta W$ , т.е., когда

$$\hbar \omega_0 = 2 M_{сп} H, \quad (9)$$

где  $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ , а  $h = 6,6238 \cdot 10^{-27}$  эрг·с — постоянная Планка.

Отсюда следует, что интенсивное поглощение ферромагнетиком энергии электромагнитного поля будет иметь место при выполнении условия (9), т.е. при ферромагнитном резонансе.

Магнитный момент спина равен одному магнетону Бора:

$$M_{сп} = \mu_B = \frac{\hbar e}{2 m c},$$

где  $e = 4,8022 \cdot 10^{10}$  эл·см·ед. — заряд электрона,

$m = 9,1072 \cdot 10^{-28}$  г — масса покоя электрона,

$c = 2,9979 \cdot 10^{10}$  см/с — скорость света.

С учетом этих значений из (9) следует

$$\omega_0 = \gamma_{сп} H_0, \quad (10)$$

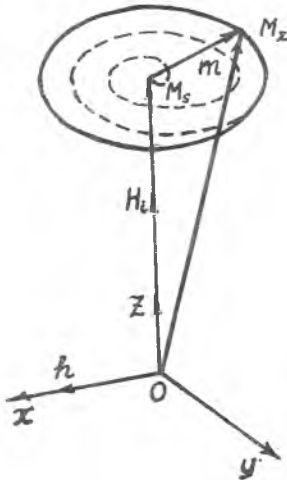
где гиромагнитное отношение для электронного спина

$$\gamma_{сп} = \frac{e}{m c} = 1,7653 \cdot 10^7 \text{ I/э.с}$$

Механический момент спина равен  $\frac{\hbar}{2}$ . Отсюда ясно, что  $\gamma_{сп}$  имеет смысл отношения магнитного момента к механическому моменту спина.

### 1.3. Магнитная проницаемость намагниченного феррита

Возможность построения невзаимных приборов на основе ферритов обусловлена уникальной для СВЧ-полей магнитной проницаемостью этих ферритов, находящихся в намагниченном состоянии. У ферритов, намагниченных постоянным магнитным полем, для СВЧ-полей в общем случае магнитная проницаемость является тензорной величиной  $\mu$ , и вектор магнитной индукции  $\vec{B}$  может иметь отличие от вектора  $\vec{H}_0$  направления. Это значит, что в намагниченном феррите при действии



Р и с. 3. Прецессия спина в магнитном поле

СВЧ-магнитного поля  $\vec{h}$ , например, по оси  $x$ , магнитная индукция может возникнуть не только по оси  $x$ , но и по оси  $y$ . Магнитное поле создает дополнительную составляющую намагниченности феррита  $\vec{m}$ .

Если СВЧ-магнитное поле действует длительное время, то в феррите устанавливается состояние, при котором вектор намагниченности  $\vec{M}_s$  совершает прецессионное движение вокруг оси  $z$  с частотой приложенного СВЧ-магнитного поля  $f$  (рис.3). Интенсивность прецессии зависит от соотношения частот  $f$  и собственной частоты прецессии  $f_1$ , а также от амплитуды переменного поля. Если  $f = f_1$ , то энергия СВЧ-магнитного поля эффективно передается системе спинов. При этом амплитуда (угол) прецессии существенно возрастает, потери в феррите также значительно возрастают и имеют резонансный характер. В конечном итоге потери органичивают рост амплитуды (угла) прецессии. Это явление, которое в приборах носит невзаимный характер, называется ферромагнитным резонансом. Частота СВЧ-магнитного поля  $f = f_1 = f_{рез}$  называется частотой ферромагнитного резонанса, где  $f_1 = \gamma H_0$ ,  $\gamma = 2,8 \text{ МГц/э}$  – гиромангнитное отношение электрона, определяемое отношением его магнитного момента к механическому.

Однородное переменное магнитное поле  $\vec{h}$ , приложенное к намагниченному до насыщения ферритовому образцу полем  $\vec{H}_0$ , создает в том переменную магнитную индукцию  $\vec{B}$ :

$$\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{h}. \quad (11)$$

Выражения для составляющих магнитной индукции получены впервые Полдером и имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} B_x &= \mu h_x - j k h_y, \\ B_y &= j k h_x + \mu h_y, \\ B_z &= \mu_0 h_z, \end{aligned} \quad (12)$$

где  $\mu$ ,  $k$  и  $\mu_0$  - компоненты тензора магнитной проницаемости.

Тензор относительной магнитной проницаемости феррита, кососимметричный тензор второго ранга

$$\vec{\mu} = \begin{vmatrix} \mu & -jk & 0 \\ jk & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu_0 \end{vmatrix}. \quad (13)$$

Кососимметричность тензора определяет возможность создания на основе ферритов невзаимных приборов, а зависимость компонент тензора  $\mu$  и  $k$  от подмагничивающего поля  $H_0$  позволяет создать на их основе электрически управляемые устройства. Компоненты  $\mu$  и  $\mu_0$  называются диагональными, а  $k$  - недиагональной компонентами тензора  $\vec{\mu}$ . Компонента  $k$  определяет величину невзаимности (гиротропности) ферритового материала, прибора. Обычно для оценки невзаимности пользуются отношением  $\frac{k}{\mu}$ . Если  $\frac{k}{\mu} = 0$ , то невзаимность феррита исчезает.

Величины  $\mu$ ,  $k$  и  $\mu_0$  являются комплексными:  $\mu = \mu' - j\mu''$ ,  $k = k' - jk''$ ,  $\mu_0 = \mu_0' - j\mu_0''$ . Действительные составляющие компонент тензора магнитной проницаемости определяют фазовую скорость распространения электромагнитной волны, а мнимые - магнитные потери в феррите. В свою очередь, значения  $\mu$ ,  $k$  и  $\mu_0$  зависят от частоты переменного магнитного поля, величины постоянного магнитного поля и намагниченности феррита:

$$\left. \begin{aligned} \mu &= \mu_0 - \frac{\gamma^2 M \omega_0}{\omega_0^2 - \omega^2}, \\ k &= \frac{\gamma M \omega}{\omega_0^2 - \omega^2}, \\ \omega_0 &= \gamma H_i, \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

где  $\mu_0$  - магнитная проницаемость свободного пространства;  
 $\gamma$  - гиромагнитное отношение;  
 $H_i$  - внутреннее постоянное магнитное поле, направленное по оси  $z$ .

В области СВЧ удобно выражать частоту прецессии электрона в мегагерцах. В этом случае  $\gamma = 2,8$  МГц/э, тогда  $f$  (МГц) =  $[\gamma/2\pi \times 10^6] H_0 = 2,8 H_0$  (э) [6, с. 151].

Намагниченность и магнитное поле выражаются через частоты  $\omega_H = \gamma(4\pi \bar{M})$  и  $\omega_0 = \gamma H_0$  (или  $\omega_0 = \gamma H_0$  для неограниченной среды). При этом  $4\pi \bar{M}$  выражается в гаусах, а магнитное поле - в эрстедах.

Внутреннее поле равно:

$$\bar{H}_i = \bar{H}_0 - N(4\pi \bar{M}), \quad (15)$$

где  $\bar{H}_0$  - постоянное магнитное поле для неограниченной среды;

$4\pi \bar{M}$  - намагниченность;

$N$  - размагничивающий фактор.

Предположим, что в феррите распространяется электромагнитная волна, у которой вектор магнитного поля поляризован по кругу в плоскости, перпендикулярной вектору  $\bar{H}$ , т.е. в плоскости  $xy$ . Обозначим через  $h_{\text{прав}}$  вектор, вращающийся по часовой стрелке, если смотреть вдоль направления постоянного магнитного поля. Тогда

$$h_y = -j h_x. \quad (16)$$

Подставляя (16) в выражение (12) для составляющих магнитной индукции, получаем

$$\left. \begin{aligned} v_x &= (\mu - k) h_x, \\ v_y &= -j(\mu - k) h_x. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Составляющие (17) образуют вектор магнитной индукции, имеющий круговую поляризацию с направлением вращения по часовой стрелке. Обозначим его  $\vec{h}_{\text{прав}}$ .

Для волны круговой поляризации с противоположным направлением вращения, вектор магнитного поля которой обозначим  $h_{\text{лев}}$ , имеем

$$\left. \begin{aligned} h_y &= j h_x, \\ v_x &= (\mu + k) h_x, \\ v_y &= j(\mu + k) h_x. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Мы получим вектор магнитной индукции  $\vec{v}_{\text{лев}}$ , вращающийся против часовой стрелки.

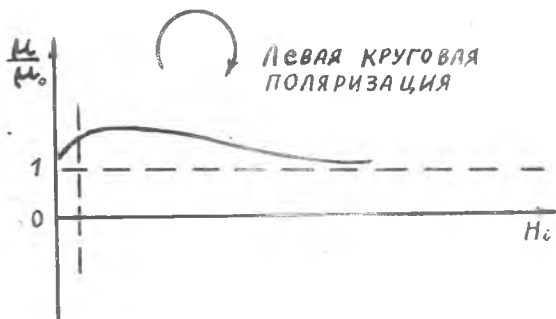
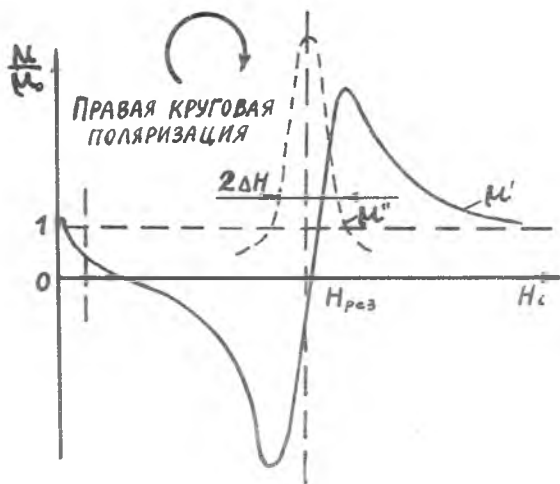
Таким образом, для волн круговой поляризации магнитные проницаемости, устанавливающие связь между векторами поля и магнитной индукции, описываются скалярными величинами и определяются формулами

$$\mu_{\text{прав}} = \frac{v_{\text{прав}}}{h_{\text{прав}}} = \mu - k = \mu_0 - \frac{\gamma M}{\omega_0 - \omega}, \quad (19)$$

$$\mu_{\text{лев}} = \frac{v_{\text{лев}}}{h_{\text{лев}}} = \mu + k = \mu_0 - \frac{\gamma M}{\omega_0 + \omega}. \quad (20)$$

Из (19) видно, что для волн правого вращения при  $\omega_0 = \omega$ , т.е. при ферромагнитном резонансе,  $\mu_{\text{прав}} \rightarrow \infty$ . На рис. 3 этому моменту соответствует максимальное отклонение вектора магнитного момента  $\mu_0$  от направления постоянного магнитного поля  $H_0$ .

На рис. 4 показана зависимость  $\mu_{\text{прав}}$  и  $\mu_{\text{лев}}$  от постоянного магнитного поля  $H_i$ . Формулы приведены без учета потерь, кривые на рис. 4 - с учетом потерь. В точке ферромагнитного резонанса действительная часть  $\mu'$  не обращается в бесконечность. Характеризующая потери мнимая часть магнитной проницаемости  $\mu''$  достигает при резонансе максимальной величины. Величина поглощающей мощности пропорциональна  $\mu''$  и зависит в первую очередь от свойств ферритового материала. Качество феррита можно оценить по ширине ре-



Р и с. 4. Зависимость магнитной проницаемости право- и левополяризованных волн от постоянного магнитного поля

зонансной кривой  $\mathcal{L}\Delta H$ , отсчитываемой на уровне 0,5 от максимального значения поглощаемой мощности. Чем меньше величина  $\mathcal{L}\Delta H$ , тем сильнее (при прочих равных условиях) поглощение электромагнитной энергии. Ширина резонансной кривой измеряется в эрстедах.

#### 1.4. Электромагнитные параметры и разновидности развязывающих приборов

Для обеспечения нормального функционирования систем РЭС, в измерительной технике на сверхвысоких частотах применяются ферритовые развязывающие приборы, разработанные на основе специальных ферритовых материалов, созданных для этого диапазона частот.

Ферритовые развязывающие приборы являются невзаимными устройствами: электромагнитная энергия со входа на выход проходит практически без потерь (или с малыми потерями) и не проходит с выхода на вход, поглощаясь в самом приборе или в специальной нагрузке.

В настоящее время существует много различных типов ферритовых развязывающих приборов, которые можно разбить на две группы: вентили и циркуляторы. Эксплуатационные характеристики и электромагнитные параметры ферритовых развязывающих приборов приведены в табл. I.

##### 1.4.1. Расчет вентиля

**В е н т и л ь** – это прибор, выполненный в виде невзаимного четырехполюсника, у которого энергия при обратном направлении распространения поглощается в самом приборе. Схематично вентиль изображен на рис. 5. Основными параметрами вентиля являются потери прямой и обратной волн, а также коэффициент стоячей волны напряжения в рабочем диапазоне частот.

Прямое затухание определяется как

$$\alpha_{пр} = 10 \lg \frac{P_{вх1}}{P_{вых2}}, \quad (21)$$



Р и с. 5. Схематичное изображение вентиля

## Т а б л и ц а I

Эксплуатационные характеристики и электромагнитные параметры ферритовых вентилялей и циркуляторов

Вид устройства	Электромагнитные параметры		Эксплуатационные характеристики	
	Основные	Вспомогательные	Основные	Вспомогательные
Вентиль	Центральная рабочая частота, МГц	Вентильное	Допустимая импульсная мощность, Вт	Габаритные размеры, мм
	Долоса рабочих частот, МГц или %	относительное	Допустимая средняя мощность, Вт	Вес, г
Циркулятор	Диапазон рабочих частот, МГц	Входное сопротивление (импеданс)	Допустимый КСВН нагрузки	Допустимая импульсная мощность, Вт
	Потери в прямом направлении, дБ		Интервал рабочих температур, °С	
Циркулятор	Загухание в обратном направлении, дБ	Стабильность импеданса	Тип линии передачи	Допустимая средняя мощность, Вт
	КСВН входа		Допустимые механические воздействия	
Циркулятор	Центральная рабочая частота, МГц	Входное сопротивление (импеданс)	Допустимая импульсная мощность, Вт	Габаритные размеры, мм
	Долоса рабочих частот, МГц		Допустимая средняя мощность, Вт	
Циркулятор	Диапазон рабочих частот, МГц	Стабильность импеданса	Интервал рабочих температур, °С	Вес, г
	Вносимые потери в прямом направлении, дБ		Тип линии передачи	
Циркулятор	Развязка между каналами, дБ	КСВН каждого плеча	Допустимые механические воздействия	
	КСВН каждого плеча			



обратное затухание -

$$\alpha_{обр} = 10 \lg \frac{P_{вх2}}{P_{вх1}}, \quad (22)$$

где  $P_{вх1,2}$  - мощности на входах при прямой и обратной передаче электромагнитной волны соответственно;

$P_{вых2,1}$  - мощности на выходе вентили при прямой и обратной передаче электромагнитной волны соответственно.

Вентильное отношение имеет вид

$$\beta = \frac{\alpha_{обр}}{\alpha_{пр}}. \quad (23)$$

Коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) со стороны входа и выхода запишется как

$$Z_{1,2} = \frac{U_{макс1,2}}{U_{мин1,2}} = \frac{1 + |\Gamma_{1,2}|}{1 - |\Gamma_{1,2}|}, \quad (24)$$

где  $|\Gamma_{1,2}|$  - модуль коэффициента отражения со стороны входа и выхода соответственно;

$Z_{1,2}$  - КСВН со стороны входа и выхода соответственно;

$U_{макс}$ ,  $U_{мин}$  - максимальные и минимальные значения напряжения в линии при подключении генератора ко входу 1 и 2.

Затухание в прямом направлении в основном определяется диссипативными потерями в феррите.

Количество движения вектора  $\vec{M}_S$  также зависит от диссипативных потерь и определяется уравнением [1]

$$\frac{d\vec{M}_S}{dt} = -\gamma [\vec{M}_S, \vec{H}_S] + \vec{D}, \quad (25)$$

где  $\vec{H}_S$  - суммарная величина магнитного поля в феррите;

$\vec{D}$  - член, определяемый диссипативными потерями в феррите;

$t$  - время.

Наиболее часто член  $\vec{D}$  записывается в форме Ландау-Лифшица:

$$\vec{D} = -\frac{\gamma}{|M_S|} \delta [\vec{M}_S [\vec{M}_S, \vec{H}_S]], \quad (26)$$

где  $\delta$  — коэффициент потерь Ландау-Лифшица, который определяется экспериментальным путем:

$$\delta = \gamma \frac{\Delta H}{2 f_{рез}}, \quad (27)$$

где  $\Delta H$  — ширина кривой поглощения ферромагнитного резонанса на половинном уровне (см. рис. 4), определяемая экспериментально.

Величина  $\Delta H$  является важным параметром СВЧ ферритового материала и оказывает существенное влияние на прямые потери развязывающих приборов.

Прямое затухание вентили складывается из затухания в феррите, диэлектрических деталях и в линии передачи. Из всех вносимых потерь в прямом направлении существенный вклад вносит затухание в феррите, в ферритовых подложках и составляет от 0,2 до 1 дБ. Обратные потери, затухание электромагнитной волны, распространяющейся в обратном направлении, зависят от типа вентили, его конструктивных особенностей, рабочей полосы частот и могут быть в пределах 15...30дБ. Для получения КСВН  $\rightarrow 1$ , при разработке развязывающих устройств используют различные методы согласования: феррит-диэлектрические вкладыши в волноводных приборах делают с плавными скосами, в полосковых применяют шлейфы, подстроечные винты и т.д.

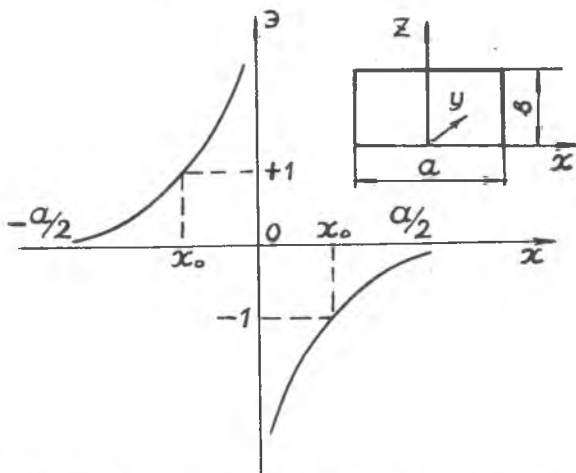
В зависимости от конструктивных особенностей и принципа работы в технике СВЧ разработано много типов развязывающих устройств. К рассмотрению некоторых из них мы и перейдем.

Резонансные вентили. Резонансные развязывающие устройства могут быть выполнены волноводными, коаксиальными и на микрополосковых линиях передачи. В основе работы резонансных вентиляей лежит явление поглощения СВЧ-энергии в гиромагнитной среде при ферромагнитном резонансе.

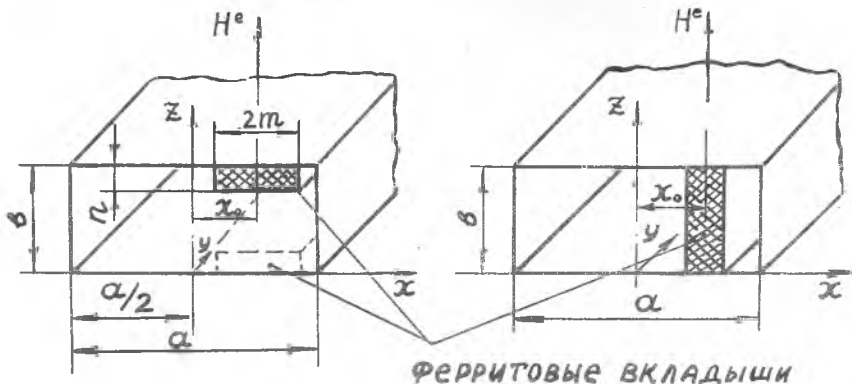
Волноводные резонансные вентили. Вентили этого типа широко применяются в качестве развязывающих приборов в волноводных трактах.

В прямоугольном волноводе с волной типа  $H_{10}$  существует две продольные плоскости, параллельные узким стенкам волновода, в которых СВЧ-магнитное поле распространяющейся волны имеет круговую поляризацию. Направления вращения векторов магнитного СВЧ-поля в

этих плоскостях взаимно противоположны и меняются на обратные при изменении направления распространения СВЧ-энергии в волноводе. Поместим в одной из указанных плоскостей волновода ферритовую пластинку так, чтобы поляризация магнитного поля в ней была близка к круговой. Пластика намагничена перпендикулярно широкой стенке волновода. Если напряженность постоянного магнитного поля выбрать равной или близкой  $H_{рез}$  (см. рис. 4), то феррит поглотит мощность волны, создающей правополяризованное высокочастотное магнитное поле. Волна, распространяющаяся вдоль волновода в противоположном направлении, испытывает малое затухание. При уменьшении частоты распространяющейся волны плоскости с круговой поляризацией магнитного СВЧ-поля смещаются к центру волновода, при ее увеличении – наоборот, к узким стенкам. В произвольных продольных сечениях волновода магнитное СВЧ-поле имеет эллиптическую поляризацию. Эллиптичность поляризации определяется коэффициентом эллиптичности  $K_3 = H_x/H_y$ , где  $H_{x,y}$  – амплитудные значения соответствующих составляющих магнитного поля волны  $H_{10}$ . Изменение коэффициента эллиптичности вдоль широкой стенки "невозмущенного" волновода показано на рис. 6. В плоскостях, где наблюдается чисто круговая поляризация,  $K_3 = 1$ . На узких стенках волновода ( $x = \pm \frac{a}{2}$ ) и в его центре ( $x = 0$ ) магнитное поле имеет линейную поляризацию ( $K_3 = 0$  или  $\infty$ ).



Р и с. 6. Изменение коэффициента эллиптичности СВЧ магнитного поля вдоль широкой стенки волновода с волной  $H_{10}$



ФЕРРИТОВЫЕ ВКЛАДЫШИ

Р и с. 7. Конструктивные варианты волноводных резонансных вентиляей

При конструировании волноводных резонансных вентиляей ферритовые вкладыши, имеющие обычно форму пластин, размещаются вдоль волновода так, чтобы ось симметрии их поперечного сечения лежала в одной из плоскостей с круговой поляризацией магнитного СВЧ-поля ( $\alpha = x_0$ ).

Ферритовые вкладыши могут быть ориентированы либо в плоскости  $H$  (рис. 7, а), либо в плоскости  $E$  (рис. 7, б).

Расширение рабочей полосы частот и улучшение электрических характеристик резонансного вентиля могут быть достигнуты при использовании неоднородного внешнего магнитного поля по длине вентиля, а также в связи с применением ферритовых материалов с разным значением  $\overline{M_s}$ .

Коаксиальные и полосковые резонансные вентиляи. Основной тип волны в коаксиальной и полосковой линии — волна типа ТЕМ — не имеет продольной составляющей переменного магнитного поля. В связи с этим в такой линии отсутствует круговая поляризация магнитного СВЧ-поля, что мешает созданию на этих линиях передачи резонансных вентиляей. Поэтому обязательным предварительным условием для реализации резонансного вентиля является получение в коаксиальной и полосковой линиях области, в которой поляризация магнитного СВЧ-поля будет круговой.

Основным способом создания круговой поляризации является применение вкладышей из диэлектрика с большой диэлектрической прони-

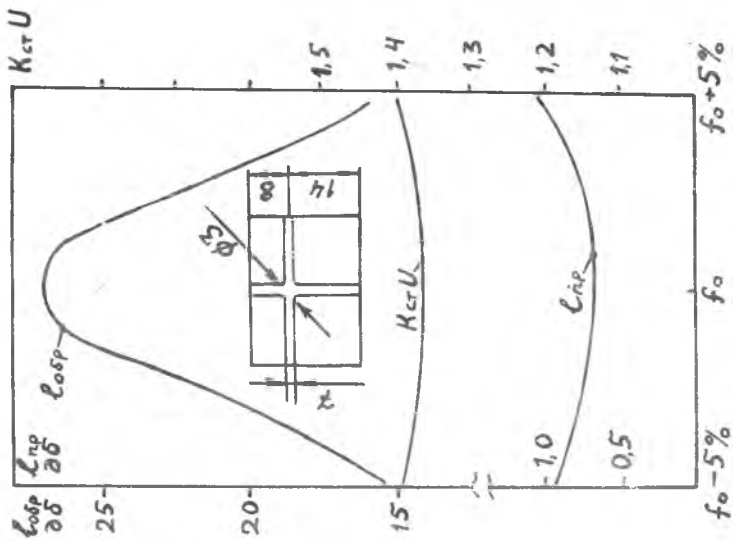
цаемостью. В результате искажения волны основного типа на границе раздела диэлектрик-воздух возникает продольная составляющая переменного СВЧ-поля. Вследствие этого, на границе раздела магнитное поле будет иметь эллиптическую поляризацию. При определенных условиях, подобрав степень заполнения линии диэлектриком, его форму и величину диэлектрической проницаемости, можно добиться того, что поляризация переменного магнитного поля станет круговой. Из-за отсутствия дисперсии основного типа волны в коаксиальной и полосковой линиях круговая поляризация переменного магнитного поля сохраняется неизменной в очень широкой полосе частот. Поэтому рабочая полоса частот вентилей, использующих диэлектрические пластины, определяется, в основном, шириной полосы ферромагнитного резонанса и может быть достаточно большой. Вентили этого типа имеют активную полосу частот. Другим достоинством такого вентилей является возможность его использования на высоком уровне мощности.

Второй способ создания круговой поляризации переменного магнитного СВЧ-поля, особенно удобный для полосковой линии, основан на использовании коротковолновых шлейфов. Третий способ — использование замедляющих систем (типа гребенок).

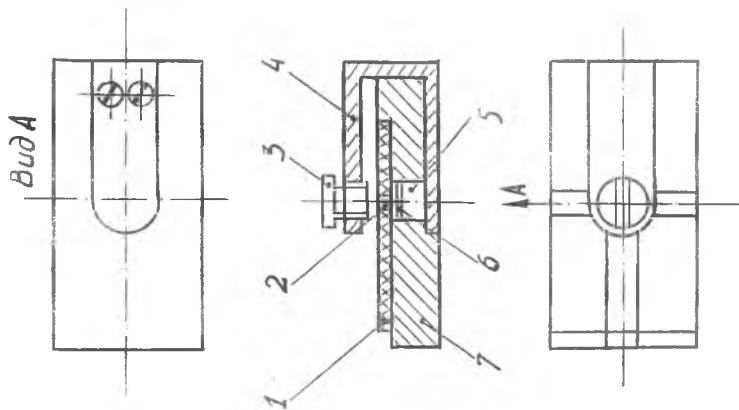
Полосковые резонансные вентили. В настоящее время используются полосковые резонансные вентили в основном двух типов: выполненные на основе полосковой линии с реактивными шлейфами и на основе гребенчатой структуры. Полосковая структура вентилей при хорошем согласовании должна обеспечивать в определенном объеме полосковой линии, в котором помещается намагниченный ферритовый образец, поляризацию магнитного СВЧ-поля, близкую к круговой.

Вентиль, выполненный на короткозамкнутых шлейфах, показан на рис. 8. Два короткозамкнутых шлейфа длиной  $\frac{\lambda}{8}$  и  $\frac{3\lambda}{8}$  размещаются перпендикулярно основной линии. Электромагнитная волна, отраженная от шлейфов, имеет фазовый сдвиг  $+\frac{\pi}{2}$  и  $-\frac{\pi}{2}$  относительно волны в основной полосковой линии. Кроме того, сами шлейфы имеют еще пространственный сдвиг относительно основной линии также  $+\frac{\pi}{2}$  и  $-\frac{\pi}{2}$ , поэтому в области пересечения основной полосковой линии и короткозамкнутых шлейфов переменное магнитное СВЧ-поле будет иметь круговую поляризацию.

Выбор марки феррита и определение величины подмагничивающего поля производится так же, как и для волноводных резонансных вентилей. Ферритовый образец имеет форму диска и обычно помещается в



Р и с. 9. Характеристики резонансного вентиля со шлейфами



Р и с. 8. Конструкция резонансного вентиля со шлейфами: 1 - шлейф; 2 - феррит; 3 - феррит; 4 - феррит; 5 - феррит; 6 - феррит; 7 - феррит

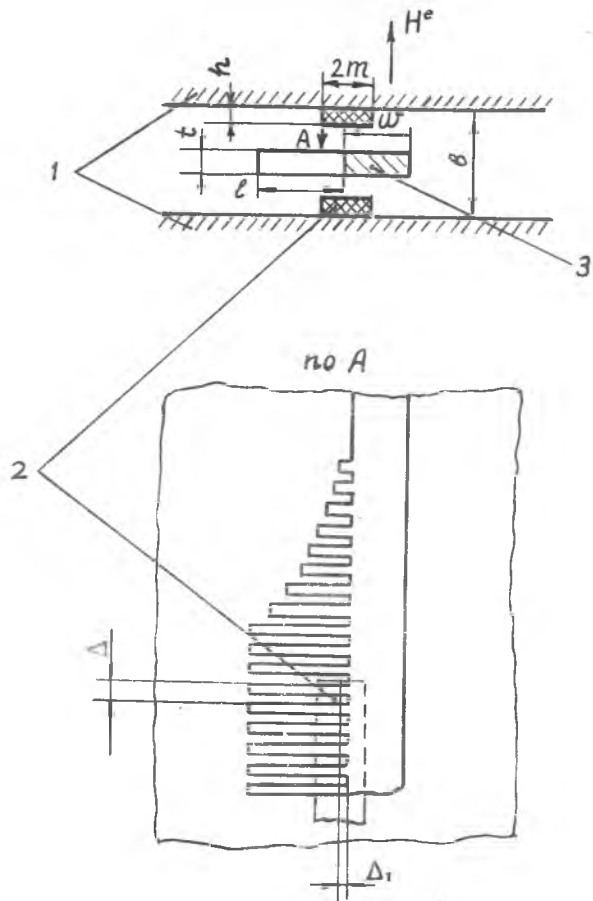
отверстие основания или подложки полосковой линии в области разветвления. Геометрические размеры ферритового образца существенно влияют на характеристики вентилей. На рис. 9 приведены характеристики такого типа вентилей. Достоинством резонансных вентиляей со шлейфами является простота конструкции полоскового проводника, а также сравнительно небольшие размеры ферритового образца, что особенно ощутимо в дециметровом диапазоне. Полоса рабочих частот таких вентиляей составляет 10...15%.

В последнее время в дециметровом диапазоне широко начали применяться полосковые резонансные вентили с гребенчатой замедляющей структурой (гребенкой). Такие вентили имеют полосу рабочих частот до 40% и хорошо работают на высоких уровнях средней мощности. Конструкция такого вентилей изображена на рис. 10. К заземленным платам крепятся ферритовые пластины размерами  $2m \times h \times \ell \varphi$ . Центральная полосковая линия имеет в поперечном сечении регулярную часть шириной  $a$  и ряд разомкнутых реактивных шлейфов длиной  $\ell$  за исключением начала и конца вентилей, где длина шлейфов для обеспечения широкополосного согласования плавно меняется от нуля до  $\ell$ . Длина шлейфов выбирается в пределах  $\ell = (0,1 \dots 0,125) \lambda$ . При этом круговая поляризация магнитного СВЧ-поля имеет место в вертикальной плоскости, отстоящей от начала реактивных шлейфов на расстоянии  $A_1 = 0,02 \lambda$ . Продольные оси ферритовых пластин должны находиться в этой плоскости. Ширина их выбирается в пределах  $2m = (0,05 \dots 0,1) \lambda$ , а толщина  $h = (0,1 \dots 0,2) \delta$ . Шаг замедляющей структуры  $A < \frac{\delta}{3}$  при примерном равенстве ширины шлейфов и зазора между ними.

При использовании современных иттриевых феррогранатов развязка не ниже 20 дБ обеспечивается при длине ферритовых пластин  $\ell \varphi < (0,5 \dots 0,7) \lambda$ .

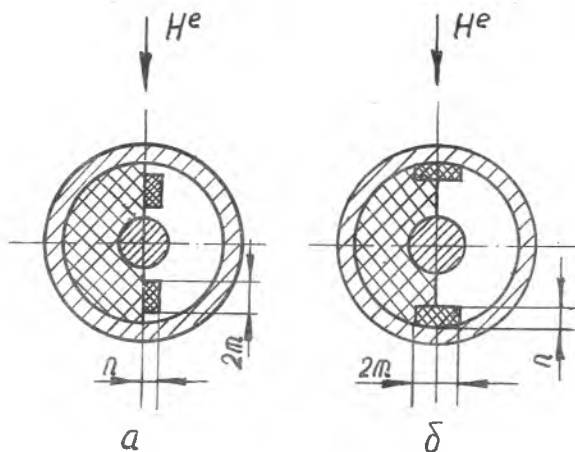
Коаксиальные резонансные вентили. Резонансные вентили в коаксиальном волновом режиме выполняются обычно с частичным заполнением его внутреннего объема диэлектриком. Конструктивные схемы таких вентиляей изображены на рис. 11.

Область с эллиптической поляризацией магнитного СВЧ-поля, наиболее близкой к круговой, находится у поверхности диэлектрика. Диэлектриком заполняется половина сечения линии. По обе стороны центрального проводника располагаются два ферритовых образца. Плоскость ферритовой пластины может быть ориентирована по направлению подмагничивающего поля узкой стороной  $h$  (вентиль типа Б) или широкой стороной  $2m$  (см. рис. 11).



Р и с. 10. Конструктивная схема полоскового резонансного вентиля с гребенчатой полосковой структурой: 1 - заземленные платы; 2 - ферритовые пластины; 3 - центральный проводник





Р и с. II. Конструктивные схемы коаксиальных резонансных вентиляй: а - вентиль типа В ; б - вентиль типа Н

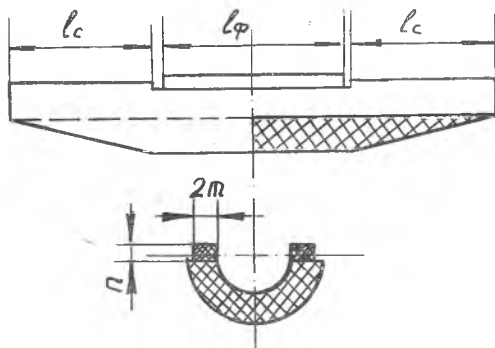
Выбор оптимальной величины диэлектрической проницаемости материала диэлектрика зависит от требований к габаритам вентиля и к полосе рабочих частот. С ростом диэлектрической проницаемости увеличиваются обратные потери на единицу длины, а структура магнитного СВЧ-поля у поверхности диэлектрика по поляризации приближается к круговой. Оптимальной является  $\epsilon_q = 10 \dots 20$ . При таких значениях  $\epsilon_q$  для получения у поверхности диэлектрика поляризации магнитного СВЧ-поля, близкой к круговой, необходимо выполнение неравенства

$$\frac{\pi}{2} < \frac{\lambda}{D+d} < \pi, \quad (28)$$

где  $D$  - внутренний диаметр коаксиала;

$d$  - диаметр центрального проводника.

В качестве диэлектрика используются материалы типа ПТ, СТ или ПЭНДТ. Они имеют хорошие электрические параметры, механически хорошо обрабатываются. Конструкция феррито-диэлектрического вкладыша для коаксиального вентиля приведена на рис. 12. Длина ферритовых образцов  $l_f$  при необходимости получения  $\alpha_{обр} > 20$  дБ должна



Р и с. 12. Конструктивная схема феррито-электрического вкладыша

быть не менее  $\frac{\lambda}{2}$ . Такую же длину должны иметь плавные согласующие переходы (скоосы).

Расчет таких вентилях осуществляется в следующем порядке. Выбирают, исходя из средней длины волны рабочего диапазона, марку феррита и из конструктивных соображений и заданного волнового сопротивления – размеры коаксиального волновода  $D$  и  $d$ .

Толщину ферритовых пластин выбирают в пределах

$$\frac{n}{D+d} \ll 0,1 \dots 0,5. \quad (29)$$

Определив геометрию ферритовых пластин, зная  $\varepsilon_\phi$ , рассчитаем величину  $\varepsilon_g$ :

$$n = \left\{ \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon_g - \varepsilon_\phi} \operatorname{tg} \left[ \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon_g - \varepsilon_\phi} \frac{\pi}{2} (D+d) \right] \right\}^{-1} - \left( \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon_\phi - 1} \right). \quad (30)$$

Достоинством коаксиальных резонансных вентилях такого типа является широкий диапазон рабочих частот.

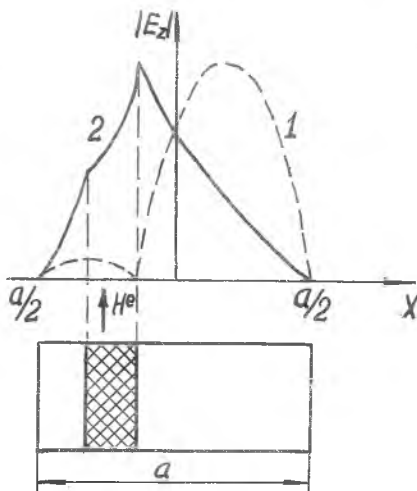
Вентили со смещением поля. Вентили этого типа применяются в сантиметровом диапазоне длин волн на относительно низких уровнях мощности.

Работа вентилях основана на использовании явления смещения поля. При достаточном заполнении объема прямоугольного волновода намагниченным ферритом структура электромагнитного поля волны, распространяющейся по волноводу, сильно искажается. При определенных

условиях кососимметричные свойства тензора магнитной проницаемости намагниченного феррита проявляется таким образом, что появляются существенные отличия в структуре волн, распространяющихся во взаимно противоположных направлениях. Если ферритовый вкладыш намагничен поперечно постоянным магнитным полем так, что величина эффективной магнитной проницаемости  $\mu_z'$  становится отрицательной; одна из распространяющихся волн – будем считать ее обратной – приобретает характер поверхностной волны. Такая волна распространяется вдоль поверхности вкладыша и имеет максимальную амплитуду поля  $E_z$  на границе раздела феррит – незаполненный волновод. По мере удаления от этой границы амплитуда поля уменьшается экспоненциально (рис. 13).

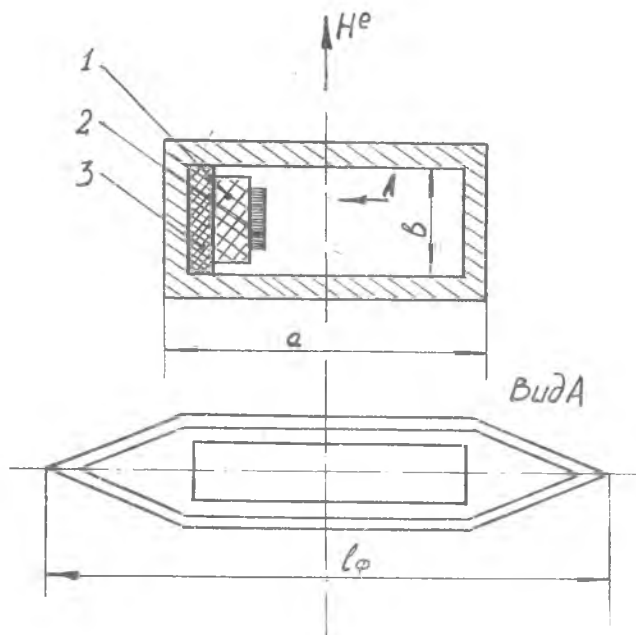
Волна противоположного направления – прямая – не является поверхностной, изменение амплитуды поля  $E_z$  в поперечном сечении имеет гармонический характер, но она при этом сильно отличается по структуре от основного типа волны  $H_{10}$ .

При определенном соотношении геометрических размеров волновода и ферритового вкладыша, параметров ферритового материала и величины постоянного магнитного поля распределение амплитуды электрического поля в поперечном сечении волновода с ферритовым вкладышем будет соответствовать графику на рис. 13. В этом случае достаточно на правую сторону ферритовой пластины нанести поглощающую пленку, и обратная волна будет сильно поглощаться этой пленкой, поскольку концентрация электрического поля волны в месте расположения пленки очень велика. В то же время потери прямой волны будут невелики, так как амплитуда электрического поля в месте расположения пленки практически равна нулю и, следовательно, пленка не вносит затухания.



Р и с. 13. Изменение амплитуды электрического поля по поперечному сечению волновода с намагниченным ферритовым вкладышем: 1 – прямая волна; 2 – обратная волна

Конструктивно такой вентиль представляет собой отрезок прямоугольного волновода с ферритовой пластиной, расположенной вблизи одной из узких стенок волновода (рис. 14). На внешней стороне ферритовой пластины I нанесен поглощающий слой 2, и пластина намагничена в направлении, перпендикулярном широким стенкам волновода, магнитным полем, создаваемым постоянным магнитом, надетым на волновод. Величина постоянного магнитного поля, необходимого для работы вентиля, оказывается в несколько раз меньше, чем в случае резонансного вентиля.



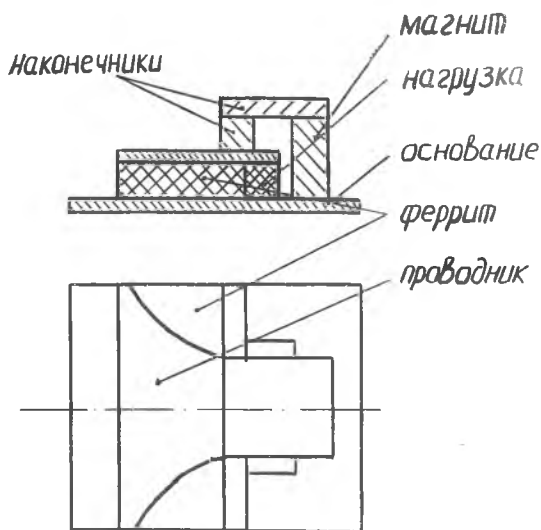
Р и с. 14. Конструкция вентиля со смещением поля:  
 1 - ферритовая пластина; 2 - резистивный слой;  
 3 - диэлектрическая прокладка

Прямые потери вентиля "на смещении поля" складываются из потерь в самом феррите и потерь в поглощающей пленке. Большую часть при этом составляют потери в ферритовой пластине.

Полосковые вентили со смещением поля. Полосковые вентили со смещением поля представляют собой отрезок линии (симметричной или несимметричной) с феррито-диэлектрическим заполнением, причем, используется диэлектрик с большими потерями. Принцип работы вентили основан на невзаимном распределении СВЧ-поля при изменении направления распространения (намагничивания). Если для прямой волны максимум электрического и магнитного полей смещается к левому краю проводника (рис. 15), то для обратного направления максимум полей смещается в сторону диэлектрика (нагрузки), где волна будет интенсивно затухать за счет поглощения СВЧ-поля в нагрузке. Такой режим обеспечивается в дорезонансной области намагничивающих полей и сохраняется как при отрицательных, так и при положительных значениях  $\mu'_1$ . Полосковые вентили со смещением поля являются малогабаритными и обладают хорошей широкополосностью. Основное условие эффективной работы вентили заключается в обеспечении большого перепада амплитуды поля на противоположных краях проводника линии, который зависит от параметров ферритового материала, диапазона рабочих частот, конструкции линии. Конструкция таких вентиля может выполняться как на симметричной полосковой линии, так и на несимметричной.

Широкополосность вентиля на смещении поля может быть существенно увеличена за счет использования неоднородного по поперечному сечению линии намагничивания или, что более эффективно, за счет использования ферритов с различной величиной намагниченности насыщения. Слой феррита, прилегающий к поглотителю, должен находиться в более сильном подмагничивающем поле или иметь более высокую намагниченность насыщения, которая определяется выражением  $\mu_{s \max} = \frac{k_1 f_{\max}}{f}$ , где  $f_{\max}$  - максимальная частота рабочего диапазона, Гц;  $k_1 = 0,75 \dots 0,85$ . Левый участок многослойного ферритового вкладыша должен выполняться из материала, обладающего  $\mu_{s \max} = k_2 f_{\min} / f$ , где  $f_{\min}$  - минимальная частота рабочего диапазона;  $k_2 = 1,40$  для ферритов с  $\Delta H < 8$  кА/м и  $k_2 = 1,25 \dots 1,35$  для ферритов с  $\Delta H > 8$  кА/м. Суммарная ширина ферритового заполнения (мм):  $\omega_{\text{ф}} = 250 / (t_{\max} \sqrt{\epsilon_{\text{ф}}})$ ;  $\epsilon_{\text{ф}}$  - эффективная относительная диэлектрическая проницаемость вкладыша.

Величина волнового сопротивления несимметричной регулярной линии с ферритовым заполнением (без диэлектрика) может быть найдена из следующего соотношения:



Р и с. 15. Конструкция полоскового вентиль со смещением поля

$$Z_0 = \frac{150 \omega_{\phi}}{\sqrt{\epsilon'_{\phi}} \left(1 + \frac{\omega_{\phi}}{h}\right)} \operatorname{ctg} h \frac{\omega_{\phi} \beta}{2}, \quad (31)$$

где  $\beta = \frac{2\pi}{\lambda} k' \frac{\epsilon_{\phi}}{\mu'}$ ;

$\omega_{\phi}$  - поперечное сечение феррита под проводником;

$h$  - толщина феррита.

#### 1.4.2. Расчет циркуляторов

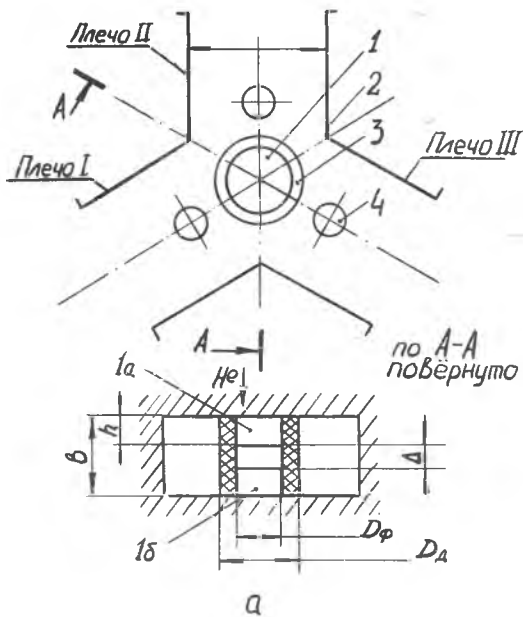
Волноводные Y-циркуляторы. Циркуляторы представляют не-  
 взаимные согласованные устройства с намагниченным ферритовым вкла-  
 дышем, размещенным в разветвлении линии передачи. Циркуляторы на-  
 ходят широкое применение не только как развязывающие приборы, но и  
 как переключатели, модуляторы и т.п. Волноводные Y-циркуляторы  
 применяются как на низком, так и на высоком уровнях мощности в мил-  
 лиметровом и сантиметровом диапазонах.

Простейшая конструктивная схема волноводного  $Y$ -циркулятора (рис. 16, а) включает в себя симметричное 3-плечное волноводное разветвление в  $H$ -плоскости, круглый цилиндрический ферритовый вкладыш, закрепленный строго по центру разветвления, и магнитную систему. Величина намагничивающего поля  $H_0$  значительно меньше резонансной. Принцип действия циркулятора можно объяснить следующим образом. Волна типа  $H_{10}$ , поступающая в плечо I, дифрагирует на ферритовом цилиндрическом вкладыше и возбуждает равные по амплитуде поверхностные волны, огибающие феррит в противоположных направлениях. Взаимодействие этих поверхностных волн с намагниченным ферритом характеризуется различными значениями магнитной проницаемости. При этом фазовые скорости поверхностных волн оказываются различными. Подбирая диаметр ферритового цилиндра и величину намагничивающего поля  $H_0$ , можно при сложении поверхностных волн получить пучность напряженности электрического поля в центре плеча II, а узел напряженности электрического поля в центре плеча III. При этом энергия из плеча I поступает в плечо II и не поступает в плечо III. Если энергия подается со стороны плеча II, то она передается в плечо III и не поступает в плечо I. При подаче энергии в плечо III она поступает в плечо I и не поступает в плечо II. В реальных конструкциях циркуляторов имеет место просачивание мощности из плеча I в плечо III и т.д. Поэтому для характеристики циркуляторов применяются такие параметры, как развязка между плечами, прямые потери, КСВН (см. табл. I и формулы (21)-(24)).

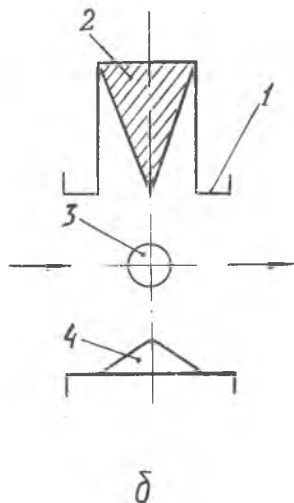
Для расширения полосы рабочих частот циркулятора необходимо улучшать его согласование. Для этого используется диэлектрический трансформатор в виде кольца, надеваемого на ферритовый вкладыш. Иногда устанавливаются в каждом плече циркулятора дополнительные согласующие диэлектрические штыри.

Для расширения полосы ферритовый вкладыш разбивают на два симметрично установленных диска (Ia) и (Iб) со специально подбравшим зазором между ними  $\Delta$ .

При расширении полосы рабочих частот до 20...25% добавляют к сложным феррито-диэлектрическим вкладышам согласующие диэлектрические штыри или используют разветвления из  $H$ -образных волноводов со ступенчатыми переходами на обычный прямоугольный волновод, выполненными одновременно в  $E$ - и  $H$ -плоскостях. Для обеспечения широкополосного согласования здесь используются ступенча-



Р и с. 16. Конструктивная схема циркулятора: а -  $Y$ -циркулятора: 1 - волновое разветвление в  $H$ -плоскости, 2 - ферритовые вкладыши, 3 - диэлектрическое кольцо, 4 - согласующие диэлектрические штыри; б -  $T$ -циркулятора: 1 - волновое разветвление в  $H$ -плоскости, 2 - поглощающая нагрузка, 3 - ферритовый или феррито-диэлектрический вкладыш, 4 - согласующий металлический клин

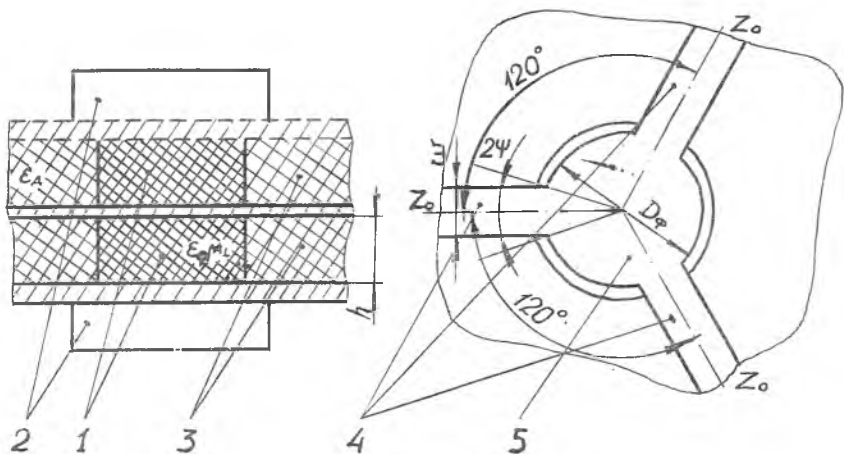




тые диэлектрические трансформаторы, располагаемые по оси симметрии сочленяемых волноводов.

В вентиляльном режиме находят применение так называемые  $\Upsilon$ -циркуляторы, у которых развязанное плечо с поглощающей нагрузкой подсоединяется к основному тракту под прямым углом (рис. 16, б). Размеры согласующего клина и смещения ферритового вкладыша от центра волновода подбираются экспериментально.

Полосковые  $\Upsilon$ -циркуляторы. В настоящее время наиболее распространенными развязывающими приборами являются полосковые  $\Upsilon$ -циркуляторы, что обусловлено простотой и технологичностью их конструкции, высокими электрическими характеристиками и простотой настройки и регулировки. Они выполняются либо путем установки ферритовых дисков на диэлектрические подложки, либо путем использования ферритовых подложек с нанесенными на них проводниками. Конструктивная схема такого прибора приведена на рис. 17. Принцип действия полоскового  $\Upsilon$ -циркулятора такой же, как волноводного, режиму циркуляции соответствует совпадение положения одного из узлов стоячей волны с развязанным плечом. Полосковый  $\Upsilon$ -циркулятор может быть выполнен как на симметричной, так и на несимметричной полосковой линии.



Р и с. 17. Конструктивная схема полоскового  $\Upsilon$ -циркулятора: 1 - ферритовые диски, 2 - магниты, 3 - диэлектрик, 4 - подводящие полосковые проводники, 5 - металлический диск сочленения

Расчет полосковых  $Y$ -циркуляторов можно произвести путем решения волнового уравнения. Используя граничные условия на поверхности ферритового диска и решая волновое уравнение, определяют поля в феррите. Зная выражения для полей, можно найти входное сопротивление циркулятора. Для выполнения условия согласования необходимо соблюдать равенство входного сопротивления подводящих полосковых линий.

В общем случае входное сопротивление циркулятора является комплексной величиной, а волновое сопротивление полосковой линии — действительной. Поэтому необходимо, чтобы мнимая часть входного сопротивления была равна нулю, а действительная — волновому сопротивлению линии. Для прибора типа циркулятора в точке циркуляции должны выполняться два соотношения между геометрическими размерами прибора и электродинамическими параметрами феррита, которые называются уравнениями циркуляции [1]:

$$R_{\varphi} = -\frac{0,29\lambda}{\sqrt{\epsilon_{\varphi}'\mu_{\perp}'}} , \quad (32)$$

$$k = 0,00153 \frac{z_0}{\alpha_z} m \frac{k'/\mu_{\perp}'}{\mu_{\perp}'} \lambda , \quad (33)$$

где  $m = 1$  для несимметричной и  $m = 2$  для симметричной полосковой линии;

для несимметричной полосковой линии

$$\alpha_z = \frac{1}{1 + 1,735 \epsilon_{\varphi}' - 0,0724 \left(\frac{\omega}{k}\right) - 0,836} , \quad (34)$$

для симметричной полосковой линии

$$\alpha_z = 1 - 0,00456 z_0 \sqrt{\epsilon_{\varphi}'} = \frac{1}{1 + 0,43 \frac{2k}{\omega}} . \quad (35)$$

$$\mu_{\perp}' = 1 + \frac{\rho(\rho + \sigma)}{\sigma^2 + \rho\sigma - 1} , \quad (36)$$

$$\frac{k'}{\mu_{\perp}'} = -\frac{\rho}{\sigma^2 + \sigma\rho - 1} , \quad (37)$$

$\rho = \gamma \frac{H^i}{f}$  - намагниченность насыщения,

$\sigma = \gamma' \frac{H^i}{f}$  - относительное внутреннее поле подмагничивания,

при ферромагнитном резонансе  $\sigma = 1$ ,  $R_{\phi}$  - расчетный радиус, который является радиусом металлического диска сочленения или радиусом круга металлизации на поверхности ферритовой подложки. Действительный радиус ферритовых дисков должен быть на 0,5...1,5 мм больше.

Большую группу  $Y$ -циркуляторов составляют приборы резонансного типа, работа которых обусловлена электродинамическим резонансом в полосковом ферритовом резонаторе, образованном одним или двумя ферритовыми дисками.

Следует отметить, что расчеты циркуляторов, работающих в области магнитных полей до и за ферромагнитным резонансом, несколько отличаются. В дорезонансной области магнитных полей ферриты обычно работают в ненасыщенном состоянии, и за резонансом они всегда намагничены до насыщения. Для обоих случаев использует одну методику расчета. Порядок расчета следующий.

I. Выбирается значение подмагничивающего поля:

а) для  $Y$ -циркулятора, работающего в зарезонансной области,

$$\sigma > \rho, \quad \sigma = 1,4 \dots 1,6, \quad H^i = \frac{\sigma}{\gamma'} f;$$

б) для  $Y$ -циркулятора, работающего в дорезонансной области, целесообразно выбирать поле  $H^i$ , при котором наступает насыщение феррита (обычно это значение равно 1,6...4,0 кА/м):

$$\sigma = \gamma' \frac{H^i}{f}.$$

2. Определяются параметры феррита  $K'/\mu'$  и  $\mu'$  по выражениям (36) и (37).

3. Определяются радиус  $R_{\phi}$  и высота  $h$  по выражениям (32) и (33).

4. Определяется величина внешнего подмагничивающего поля из выражения

$$H^i = H^e - N_z M, \quad (38)$$

где  $H^e$  - внешнее подмагничивающее поле,

$H^i$  - внутреннее магнитное поле ферритового образца,

$M$  - намагниченность ферритового образца,

$N_x$  - размагничивающий фактор.

Ориентировочные значения полосы рабочих частот для таких приборов по уровню развязки  $\alpha_{раз} > 20$  дБ определяются соотношением

$$\frac{\Delta f}{f} = 0,3 \frac{K'}{\mu'} \quad (39)$$

Для расширения полосы рабочих частот в каждое плечо  $Y$ -циркулятора включаются четвертьволновые трансформаторы.

Выбрав намагниченность насыщения и величину подмагничивающего поля, определяют параметры  $K'/\mu'$  и  $\mu'_z$ . Затем из выражения

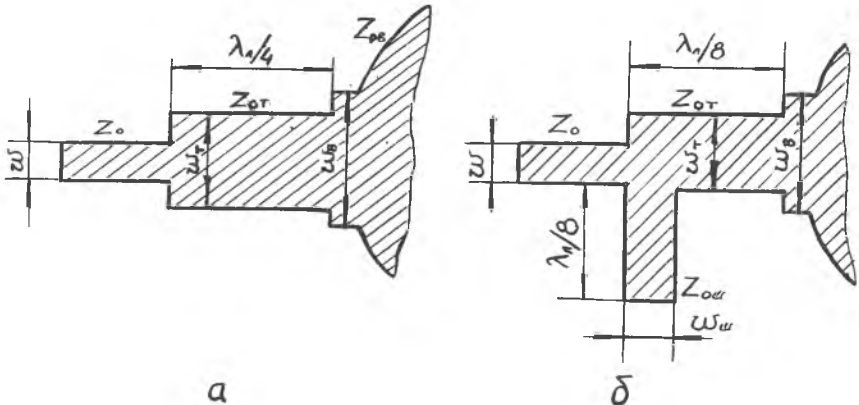
$$\frac{Z_{0\delta}}{\alpha_x} = 653 \frac{h}{\lambda} \frac{1}{m} \frac{K'\mu'}{\mu'_z} \quad (40)$$

с учетом (34), (35) определяется величина волнового сопротивления входной полосковой линии  $Z_{0\delta}$ . Далее определяется величина волнового сопротивления линии трансформатора (рис. 18, а):

$$Z_{0T} = \sqrt{Z_0 Z_{0\delta}}; \quad (41)$$

где  $Z_0$  - волновое сопротивление подводящей полосковой линии,

$Z_{0\delta}$  - волновое сопротивление входной полосковой линии.

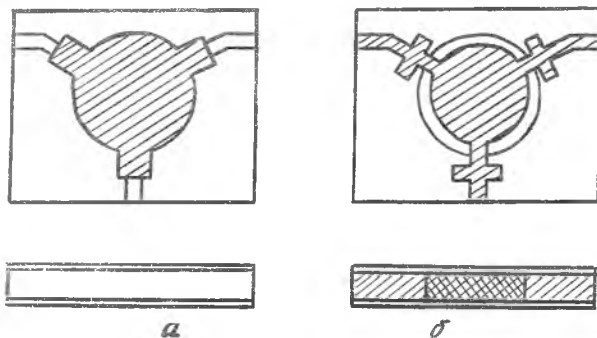


Р и с. 18. Расчетная схема полосковой структуры с четвертьволновым трансформатором (а) и из отрезков линий длиной  $\lambda/8$  (б)

Далее определяются геометрические размеры полосковой структуры. Если ширина полоскового проводника  $w\delta$  окажется неприемлемо большой ( $w\delta > \frac{\sqrt{\epsilon'}}{2} D\phi$ ), то необходимо либо уменьшить высоту  $h$ , либо взять диэлектрическое основание с большим значением  $\epsilon_g'$ .

Вместо четвертьволнового трансформатора может быть использован четырехполосник из отрезков линии длиной  $\frac{\lambda_n}{8}$  (рис. 18,б).

Микрополосковые развязывающие приборы. В настоящее время широкое применение в радиотехнических системах получили линзополосковые развязывающие приборы из-за их малой массы, технологичности и надежности. Они представляют собой конструкцию в виде ферритовой или феррито-диэлектрической подложки с нанесенной на ее поверхности полосковой схемой (рис. 19). Сплошные ферритовые подложки (рис. 19,а) применяются в приборах сантиметрового и коротковолновой части дециметрового диапазона волн, работающих в резонансной области подмагничивающих полей.



Р и с. 19. Конструкции подложек микрополосковых развязывающих приборов

Одним из основных требований к ферритовому материалу подложек таких приборов являются малые потери в ненамагниченном состоянии, так как большая часть объема подложки, в том числе и области, где располагаются подводящие полосковые проводники и согласующие элементы, остается ненамагниченной. В приборах дециметрового диапазона, работающих в резонансной области подмагничивающих полей, ис-

пользуются феррито-диэлектрические подложки, причем в этом случае намагничивается весь объем феррита (рис. 19,б).

Существенным конструктивным параметром микрополосковых развязывающих приборов является их общая высота, которая определяется соответствующими размерами элементов магнитной системы – высотой магнитотвердых элементов и длиной рабочего зазора постоянного магнита.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### 2.1. Исследование вентиляей

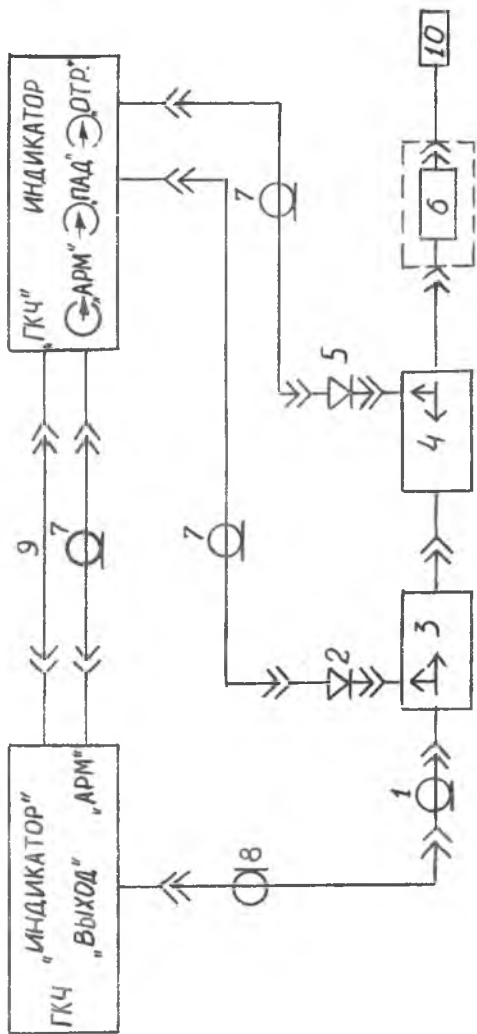
Для исследования характеристик различных типов развязывающих приборов собирается установка (рис. 20, 21). Метод измерения характеристик с помощью установки называется методом направленного ответвителя. Он основан на раздельном ответвлении из исследуемого тракта колебаний с амплитудами, пропорциональными падающей и отраженной волнам. Такие установки называются рефлекторными. Источниками погрешности являются: неидеальная направленность, неточность измерения отношений.

Успехи в создании широкополосных ответвителей и детекторных секций позволили разработать панорамные рефлектометры, позволяющие наблюдать на экране ЭЛТ изменение КСВН и ослабления в диапазоне частот. В настоящее время промышленностью выпускается серия измерителей КСВН и ослабления типа P2-54, P2-83, P2-102, P2-103, P2-104, P2-108.

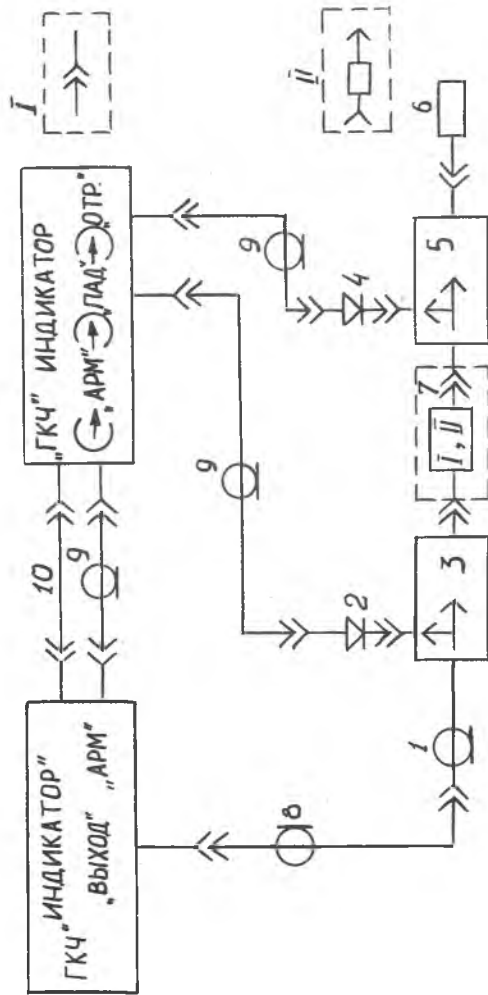
На лабораторном занятии проводится исследование развязывающих устройств различных типов, вентиляей и циркуляторов, волноводных и коаксиальных, полосковых и микрополосковых.

Проводится исследование одного прибора в полосе частот, определяемой преподавателем из всего рабочего диапазона прибора P2-54. Для проведения исследования параметров развязывающих приборов необходимо изучить техническое описание и инструкцию по эксплуатации измерителя КСВН и ослабления панорамного P2-54.

На лабораторном занятии проводится исследование нескольких типов вентиляей: волноводных, коаксиальных, полосковых и микрополосковых в частотном диапазоне, определяемом преподавателем.



Р и с. 20. Схема электрическая структурная измерения КСВН: 1 — линия коаксиальная, 2 — головка детекторная, 3 — ответвление направленный, 4 — ответвление направленный, 5 — головка детекторная, 6 — измеряемый объект, 7 — кабель соединительный ВЧ, 8 — кабель соединительный ВЧ, 9 — кабель соединительный, 10 — нагрузка согласованная



Р и с. 21. Схема структурная электрическая калибровки и измерения ослабления:  
 I — линия коаксиальная, 2 — головка детекторная, 3 — ответвитель направленный,  
 4 — головка детекторная, 5 — ответвитель направленный, 6 — нагрузка согласованная,  
 7 — измерительный объект, 8 — кабель соединительный ВЧ, 9 — кабель соединительный ВЧ, 10 — кабель соединительный, I — калибровка; II — измерение



Исследования проводят в следующей последовательности.

1. Измерить КСВН вентиля со стороны входа. Для этого собирается схема электрическая структурная измерения КСВН. Согласно описанию и инструкции по эксплуатации измерителя КСВН и ослабления устанавливаются граничные частоты рабочего диапазона. Выбирается режим периодической перестройки частоты. Исследуемый вентиль устанавливается согласно схеме рис. 20.

Установить один из рекомендуемых периодов развертки I; IO; 40 с при измерении малых КСВН.

Установить пределы измерения КСВН на ЭЛТ прибора, удобные для наблюдения и измерения. Зарисовать кривую КСВН и нанести на нее минимальное и максимальное значения КСВН, для чего совместить ручкой ОТСЧЕТ отсчетную линию на экране ЭЛТ с минимальной (максимальной) точкой на кривой КСВН и по отсчетному устройству шкалы КСВ индикатора отсчитать измеренное значение и нанести на кривую КСВН. Затем на кривую значения КСВН нанести IO точек значений КСВН, измеренных аналогичным способом. По полученным I2 значениям КСВ рассчитать модуль коэффициента отражения.

Согласно схеме рис. 20 включить измеряемый прибор со стороны выхода, а нагрузку — со стороны входа и повторить измерения. Результаты записать в отчет.

2. Для измерения ослабления собрать схему, приведенную на рис. 21. Провести калибровку прибора согласно техническому описанию и инструкции по эксплуатации. Обратит особое внимание на УКАЗАНИЕ МЕР БЕЗОПАСНОСТИ и на работу с индикатором Я2Р -67 и ГКЧ. Собрать измерительный тракт и подключить измеряемый объект. Установить переключатель ПРЕДЕЛЫ так, чтобы амплитудно-частотная характеристика (кривая ослабления) занимала на экране ЭЛТ положение, удобное для наблюдения и измерения. Совместить ручкой ОТСЧЕТ линию электронного визира с минимальной (максимальной) точкой на кривой ослабления; произвести отсчет по линейной шкале дБ; определить измеряемое значение ослабления как алгебраическую сумму показаний переключателя ПРЕДЕЛЫ и отсчета по линейной шкале дБ. Измерение ослабления вентиля произвести в IO точках, данные занести в таблицу. Измерение ослабления вентиля провести в прямом и обратном направлениях.

По формуле (23) определить вентиляное отношение вентиля. Результаты измерения вентиля свести в таблицу, построить графики зависимости  $\alpha_{np} = F(f)$ ,  $\alpha_{обр} = F(f)$ ,  $\beta = F(f)$ .

## 2.2. Исследование У-циркуляторов

На лабораторном занятии провести исследование различных типов У-циркуляторов: волноводных, полосковых, микрополосковых.

Для проведения исследований У-циркуляторов по КСВН собирается схема рис.20. К плечу I подсоединяется выход направленного ответвителя 4, а к двум другим плечам подсоединяются согласованные нагрузки. Подготовка прибора к проведению измерений осуществляется в соответствии с техническим описанием и инструкцией по эксплуатации измерителя КСВН панорамного Р2-54. Далее проводятся измерения КСВН по методике, описанной в п. I "Исследование вентиляй".

Затем выход направленного ответвителя 4 соединяется с плечом 2, а нагрузки подсоединяются к плечу 3 и I, и измерения повторяются. Затем - с плечом 3, а нагрузки подсоединяются к плечу I и 2 и измерения повторяются. Результаты измерения заносятся в отчет.

Для измерения затухания собирается схема, приведенная на рис. 21. Проводится калибровка прибора согласно техническому описанию и инструкции по эксплуатации. В качестве измеряемого объекта подключается У-циркулятор. Плечо I подсоединяется к аттенюатору 3, а плечо 2 - к аттенюатору 5. Плечо 3 подсоединяется к нагрузке. Измерение затухания между плечами I и 2 проводится в соответствии с п. 2 "Измерение вентиляй", техническим описанием и инструкцией по эксплуатации. Затем проводится измерение затухания между плечами 2 и 3, 3 и I при нагруженных плечах I и 2 соответственно.

Далее проводится измерение затухания между плечами I и 3, 2 и I, 3 и 2 при нагруженных плечах 2, 3, I соответственно. Измеряются минимальные и максимальные затухания, а также проводятся измерения в 10 точках исследуемого диапазона для развязки между плечами I и 3, 2 и I, 3 и 2 и в прямом направлении между плечами I и 2, 2 и 3, 3 и I. Результаты измерения заносятся в таблицу и строятся графики  $\alpha_{пр} = F(f)$ ,  $N_{разв} = F(f)$ .

### 3. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Цель работы.
2. Расчетные соотношения.
3. Схемы экспериментальных установок.
4. Результаты экспериментов.
5. Краткие выводы по каждому пункту эксперимента.

Оформление отчетов должно выполняться в соответствии с требованиями ЕСКД.

#### К о н т р о л ь н ы е      в о п р о с ы

1. Каковы основные свойства и отличия диамагнитных, парамагнитных и ферромагнитных веществ?
2. Что такое развязывающие приборы?
3. Что такое точка Кюри? Чем она характерна для ферромагнетиков?
4. Какова связь между спиновым магнитным и механическим моментами?
5. Чем характеризуется ферромагнитный резонанс в ферритах?
6. Что такое гиротропное отношение, чему оно равно?
7. Чему равна диэлектрическая проницаемость ферритов на сантиметровых волнах?
8. Какова зависимость действительной и мнимой составляющей магнитной проницаемости от величины подмагничивающего поля  $H_z$  ?
9. Каковы основные параметры развязывающих приборов?
10. Как работают резонансные вентили? Какова их конструкция? В чем их преимущества и недостатки?
11. Каков принцип действия вентиляей на "смещении поля"? Их преимущества и недостатки, конструкции?
12. Каков принцип работы  $Y$  -циркуляторов, их основные параметры и конструкции?
13. Каковы конструкции и принцип действия микрополосковых  $Y$  -циркуляторов?
14. Каковы пути расширения рабочей полосы частот вентиляей и  $Y$  -циркуляторов?
15. Каков принцип работы измерителя КСВН панорамного?

16. Каким образом производится калибровка измерителя КСВН и ослабления при подготовке его к работе для измерения КСВН и измерения ослабления?

17. Каким образом осуществляется исследование параметров развязывающих устройств с помощью панорамного измерителя КСВН и ослабления?

18. Каким образом проводится документирование параметров исследуемых устройств?

19. В какой последовательности проводится измерение КСВН и ослабления развязывающих устройств на измерителе КСВН и ослабления? Какова точность измерения?

#### Библиографический список

1. В а м б е р с к и й М.В., А б р а м о в В.Л., К а з а н -  
ц е в В.И. Конструирование ферритовых развязывающих приборов СВЧ  
/Под ред. М.В.В а м б е р с к о г о. М.: Радио и связь, 1982.  
136 с.

2. М и к а э л я н А.Л. Теория и применение ферритов на  
сверхвысоких частотах. М.-Л.: Говэнергоиздат, 1963. 664 с.

3. Конструкция СВЧ устройств и экранов: Учебное пособие для  
вузов. А.М.Ч е р н у ш е н к о, Н.Е.М а л а н ч е н к о, Л.Г.М а -  
л о р а ц к и й, Б.В.П е т р о в; Под ред. А.М.Ч е р н у ш е н -  
к о. М.: Радио и связь, 1983. 400 с.

4. В о л ь м а н В.И., П и м е н о в Ю.В. Техническая  
электродинамика. М.: Связь, 1971. 487 с.

5. Г у р е в и ч А.Г. Ферриты на сверхвысоких частотах.  
М.: Госизд. физ-мат. лит., 1960.

6. Л а к с Б., Б а т о н К. СВЧ ферриты и ферромагнетики:  
Пер. с англ. /Под ред. А.Г.Г у р е в и ч а. М.: Мир, 1965.

7. Измеритель КСВН панорамный, Р2-54. Техническое описание и  
инструкция по эксплуатации.

## СОДЕРЖАНИЕ

I. Теоретические сведения.....	I
I.1. Краткие сведения о ферритовых материалах диапазона СВЧ .....	I
I.2. Физические явления в ферритах в диапазоне СВЧ .....	3
I.3. Магнитная проницаемость намагниченного феррита .....	8
I.4. Электромагнитные параметры и разно- видности развязывающих приборов .....	13
2. Экспериментальная часть .....	36
2.1. Исследование вентиля .....	36
2.2. Исследование $\Upsilon$ -циркуляторов .....	40
3. Содержание отчета .....	41
Контрольные вопросы .....	41
Библиографический список .....	42

ИССЛЕДОВАНИЕ ФЕРРИТОВЫХ  
РАЗВЯЗЫВАЮЩИХ ПРИБОРОВ СВЧ

Составитель К а л а ш н и к Иван Емельянович

Редактор Е.Д.А н т о н о в а  
Техн.редактор Г.А.У с а ч е в а  
Техн.редактор Н.С.К у п р и я н о в а

Подписано в печать 21.04.92. Формат 60x84<sup>I</sup>/16.  
Бумага оберточная. Печать оперативная.  
Усл.п.л. 2,6. Уч.-изд.л. 2,5. Усл.кр.-отт. 2,7.  
Тираж 200 экз. Заказ № 1896. Бесплатно.

Самарский ордена Трудового Красного Знамени  
авиационный институт имени академика С.П.Королева.  
43086 Самара, Московское шоссе, 34.

Типография им. В.П.Мяги Самарского полиграфического  
объединения. 443099 Самара, ул. Венцека, 60.