

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

ИССЛЕДОВАНИЕ ФЕРРИТОВЫХ ВЕНТИЛЕЙ И ЦИРКУЛЯТОРОВ

Руководство к лабораторной работе
для студентов технических направлений подготовки и специальностей

Томск
2024

УДК 53.17 + 53.08
ББК 22.3
Ж43.2

Авторы:

Е. С. Жечев, В. А. Трубченинов, А. В. Фатеев

Жечев Евгений Сергеевич

Исследование ферритовых вентилях и циркуляторов: руководство к лабораторной работе / Е. С. Жечев, В. А. Трубченинов, А. В. Фатеев — Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2024. – 20 с.

В руководстве содержится методический материал по работе с исследованием ферритовых вентилях и циркуляторов. Отмечается теоретический материал по изучению принципа действия и устройства ферритовых вентилях и циркуляторов на основе волноводов и исследование их характеристик. Представлены основные параметры циркуляторов и методика их измерения.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по техническим направлениям подготовки и специальностям.

Одобрено на заседании каф. СВЧиКР, протокол №4 от 20.11.2023

УДК 53.17 + 53.08

ББК 22.3

© Жечев Е. С., Трубченинов В. А.,
Фатеев А. В. 2024

© Томск. гос. ун-т систем упр. и
радиоэлектроники, 2024

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1.1 Свойства ферритов	5
1.2 Особенности распространения электромагнитной волны в волноводе с поперечно-намагниченным ферритом.....	5
1.3 Матрицы рассеяния многополюсников.....	7
1.4 Основные устройства на ферритах	8
1.5 Ферритовые вентили	8
1.6 Ферритовые циркуляторы	9
1.7 Основные параметры циркуляторов и методика их измерения.....	13
2 ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ	15
3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ.....	16
3.1 Описание экспериментальной установки	16
3.2 Порядок выполнения работы	16
3.3 Обработка экспериментальных данных	17
3.4 Требования к оформлению отчёта.....	18
4 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	19
5 СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	20

ВВЕДЕНИЕ

Целью работы является изучение принципа действия и устройства ферритовых вентилях и циркуляторов на основе волноводов и исследование их характеристик.

В постановке лабораторной работы принимали участие следующие сотрудники кафедры сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники: Замотринский В.А., Никифоров А.Н., Гошин Г.Г., Соколова Ж.М., Падусова Е.В.

1. ОСНОВНЫЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ

1.1 Свойства ферритов

Ферриты – вещества, полученные спеканием окиси железа Fe_2O_3 с окислами других металлов – никеля, марганца и др. По своим электрическим свойствам ферриты являются магнитоэлектриками, т.е., обладая способностью намагничиваться, они почти не проводят электрический ток, так как имеют малую проводимость. Например, феррит марки 80СЧ имеет относительную диэлектрическую проницаемость $\epsilon_r = 12,5$ и проводимость $\sigma \approx 3 \cdot 10^{-3}$ См. Электромагнитные волны могут проникать и распространяться внутри феррита, как в любом диэлектрике. Поскольку относительная магнитная проницаемость феррита $\mu_r > 1$, то это приводит к возрастанию магнитной индукции внутри ферритового стержня. На этом основано применение ферритов в качестве ферритовых антенн.

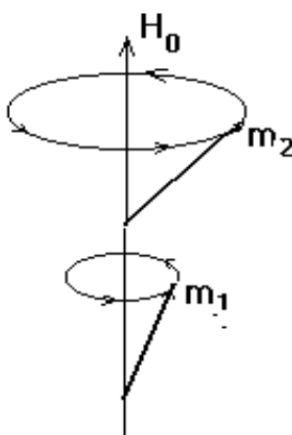


Рисунок 1.1– Прецессия спинов m_1 и m_2 вокруг поля H_0

Если феррит поместить в постоянное магнитное поле амплитудой H_0 , то он становится анизотропной средой, в которой магнитная проницаемость зависит от направления распространения волны и представляется в виде тензора [1, 2]. Анизотропия феррита вызвана тем, что все магнитные моменты электронов атомов железа (спины) вращаются вокруг вектора H_0 с постоянной частотой ω_0 , пропорциональной H_0 , в одном направлении, а именно, по часовой стрелке, если смотреть вдоль вектора H_0 (Рисунок 1.1). Это явление называется прецессией спинов. Из-за потерь энергии прецессия спинов быстро затухает и через короткий промежуток времени (порядка 10^{-8} с.) спины ориентируются вдоль вектора H_0 .

Свойства электромагнитной волны, распространяющейся в такой среде, зависят от направления распространения по отношению к полю H_0 . Различают случаи продольного и поперечного распространения. В первом случае волна распространяется вдоль H_0 и наблюдается поворот плоскости поляризации волны вдоль направления распространения (эффект Фарадея). В данной работе исследуются устройства с поперечно – намагниченными ферритами, поэтому рассмотрим этот случай подробнее.

1.2 Особенности распространения электромагнитной волны в волноводе с поперечно-намагниченным ферритом

Рассмотрим силовую линию магнитного поля в прямоугольном волноводе на волне основного типа H_{10} в плоскости xoz (рисунок 1.2).

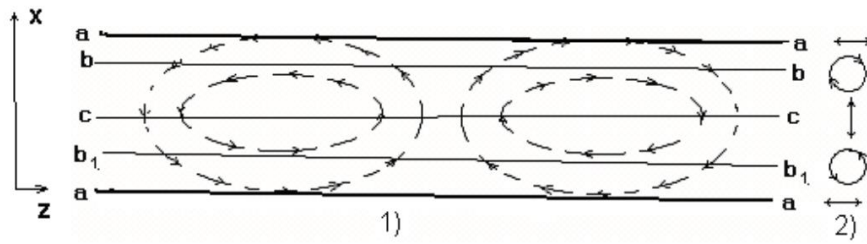


Рисунок 1.2–Силловые линии магнитного поля в волноводе (1) и поляризация в сечениях a-a, b-b, c-c, b1-b1

Если наблюдатель находится в какой-либо точке внутри волновода, то он наблюдает изменение направления вектора H при прохождении волны мимо него, представленное на рис 1.2. Из него видно, что на поверхности стенки (линии a-a) и посередине волновода (линия c-c) магнитное поле поляризовано линейно. На некотором расстоянии от боковой стенки (линии b-b и b1-b1) поле имеет полполяризацию близкую к круговой, причем по разные стороны от оси волновода направление вращения противоположны. При изменении направления движения волны направление вращения вектора H меняется в этих точках на обратное. Если на линии b-b или b1-b1 поместить феррит, намагниченный в направлении узкой стенки волновода, то направление вращения магнитного поля волны будет либо совпадать (право поляризованная волна), либо противоположно направлению вращения спинов (лево поляризованная волна). Волны, распространяющиеся по волноводу в противоположных направлениях, будут по-разному взаимодействовать с ферритом и иметь разные фазовые скорости и коэффициенты затухания. Наиболее сильно будут изменяться параметры волны, у которой направления вращения вектора магнитного поля и спинов совпадают, т.е. у право поляризованной волны. Зависимости магнитных проницаемостей право (μ') и лево (μ'') поляризованных волн от величины H_0 представлены на рис. 1.3 [1, 3, 4]. Действительные части магнитных проницаемостей (μ' и μ'') определяют фазовые скорости волн, а мнимые части (μ'' и μ''') – затухание этих волн ($\mu''' \approx 0$ и на рисунке не показана).

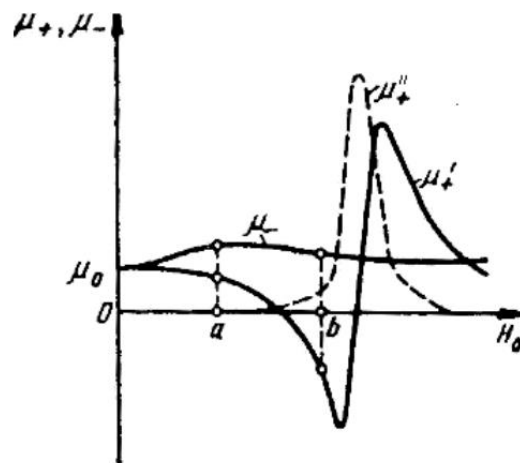


Рисунок 1.3 – Зависимости вещественной и мнимой частей магнитной проницаемости от H_0

Зависимость μ'' от частоты имеет резонанс, при котором частота право поляризованной волны совпадает с частотой вращения спинов. В этом случае наблюдается сильное поглощение волны – гиромангнитный резонанс. По этому принципу работают резонансные ферритовые вентили – устройства, пропускающие волну в одном направлении и поглощающие в другом. При некоторых значениях H_0

действительная часть магнитной проницаемости принимает отрицательные значения. В этом случае право поляризованная волна не может распространяться в феррите, она вытесняется в оставшуюся часть поперечного сечения волновода и распространяется по нему с малым затуханием. Волна с противоположным направлением распространения наоборот втягивается в феррит из-за его большой диэлектрической проницаемости и затухает в специально нанесенных на поверхность феррита поглотителях. По этому принципу работают вентили на эффекте смещения электромагнитного поля.

Отличие фазовых скоростей волн, распространяющихся в противоположных направлениях, используется для создания невзаимных фазовращателей – устройств в которых волны, бегущие в противоположных направлениях, имеют дополнительный фазовый сдвиг. Если этот сдвиг составляет 180^0 , то такой фазовращатель называется гиратором.

1.3 Матрицы рассеяния многополюсников

Волновая матрица рассеяния связывает между собой параметры волн, приходящих к данному устройству (падающих) и уходящих от него (отражённых).

Например, для четырехполюсника эти соотношения имеют вид

$$U_{10} = S_{11}U_{1П} + S_{21}U_{2П}$$

$$U_{20} = S_{21}U_{1П} + S_{22}U_{2П}$$

здесь $U_{10}, U_{20}, U_{1П}, U_{2П}$ – напряжения отражённых и падающих волн со стороны

1-го и 2-го плеч четырехполюсника. Коэффициент $S_{11} = \left. \frac{U_{10}}{U_{1П}} \right|_{U_{2П}=0}$ – коэффициент

отражения от 1-го плеча при согласованной нагрузке во 2-м, $S_{21} = \left. \frac{U_{20}}{U_{1П}} \right|_{U_{2П}=0}$ –

коэффициент передачи по напряжению из 1-го плеча во второе при согласованной нагрузке во 2-м плече. Аналогично определяется смысл остальных коэффициентов матрицы рассеяния.

Для волноводов под параметром U понимается нормированное напряжение, квадрат модуля которого равен мощности, переносимой по волноводу. Для прямоугольного волновода с волной H_{10} нормированное напряжение равно [1]

$$\dot{U} = \dot{E}_{\max} \sqrt{\frac{ab}{2Z_x H}}$$

где E_{\max} – максимальное значение комплексной амплитуды напряжённости поля в центре волновода, a и b – поперечные размеры волновода, Z_x – характеристическое сопротивление волновода для волны H_{10} . Нормированные напряжения могут быть введены и для линий передач с Т-волнами. Поскольку в линиях передачи напряжения и напряжённости электрического поля пропорциональны, то в дальнейшем будем использовать термин «напряжение». Во всех предыдущих формулах напряжение U и элементы матрицы рассеяния S_{ik} являются комплексными величинами.

Для матриц рассеяния справедливы два важных положения:

- 1) Взаимному многополюснику соответствует симметричная матрица рассеяния.
- 2) Многополюснику без потерь энергии (не диссипативному) соответствует унитарная матрица [S].

Унитарными называются матрицы, удовлетворяющие условию:

$$[S]^t \cdot [S] = [E]$$

где $[S], [S], [E]$ – транспонированная, комплексно-сопряжённая и единичная матрицы. Для унитарной матрицы сумма квадратов модулей элементов каждого столбца равна единице, а сумма произведений элементов одного столбца на комплексно сопряжённые элементы другого столбца равна нулю. По матрице рассеяния многополюсника (N – количество пар полюсов или плеч многополюсника) можно определить долю внутренних потерь энергии волны, поданной в i -ое плечо при согласованных нагрузках в остальных плечах.

$$P_{i,nom} = 1 - \sum_{k=1}^N |S_{k,i}|^2$$

1.4 Основные устройства на ферритах

Использование свойств намагниченного феррита, расположенного в линии передачи (волноводе, коаксиальной линии, полосковом волноводе), позволяет создавать различные невзаимные устройства, свойства которых зависят от направления распространения волны. Основными из них являются вентили, невзаимные фазовращатели и циркуляторы. Идеальный вентиль пропускает энергию СВЧ в одном направлении и поглощает в другом (рисунок 1.4а). Идеальный невзаимный фазовращатель создаёт для волн, распространяющейся в противоположных направлениях, различные фазовые сдвиги. Если этот дополнительный фазовый сдвиг составляет π радиан, то такой фазовращатель называется гиратором (рисунок 1.4б). Идеальный циркулятор полностью пропускает энергию между соседними плечами, в определённом направлении и не пропускает в противоположном (рисунок 1.4в).

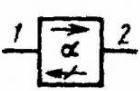
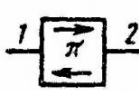
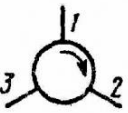
Вентиль	Гиратор	В-полюсный циркулятор
		
$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ e^{-j\varphi} & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & e^{-j\varphi} \\ e^{-j(\varphi+\pi)} & 0 \end{bmatrix}$	$e^{-j\varphi} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$
а)	б)	в)

Рисунок 1.4 – Схематическое изображение вентилья, гиратора, циркулятора и их идеальные матрицы рассеяния

1.5 Ферритовые вентили

Как отмечалось в п. 1.2, ферритовые вентили пропускают волну в прямом направлении с небольшим ослаблением и значительно поглощают волну в обратном направлении. Матрица рассеяния идеального вентилья приведена на рисунке 1.4а, направление передачи 1-2 является прямым, а 2-1 – обратным. Такой вентиль не отражает волны с прямого и обратного направлений ($S_{11}=0$ и $S_{22}=0$), полностью не пропускает волну в обратном направлении ($S_{12}=0$). Значение коэффициента $S_{21}=e^{-j\varphi}$ свидетельствует о том, что в прямом направлении ослабления волны не происходит ($|S_{21}|=1$), а фаза волны изменяется на величину $-\varphi$. Матрицы реальных вентильей

отличаются от приведённой выше. Это выражается в том, что коэффициенты матрицы по модулю не равны строго нулю или единице.

Техническими параметрами реальных вентиляей являются:

$$L = 10 \lg \frac{P_{np}}{P_{обр}} = 20 \lg \left| \frac{S_{21}}{S_{12}} \right|, \text{ дБ};$$

вентильное отношение

$$KCB = U_{\max} / U_{\min} = E_{\max} / E_{\min} = \frac{1 + |S_{11}|}{1 - |S_{11}|}$$

где P_{np} и $P_{обр}$ – мощности, проходящие через вентиль в прямом и обратном направлениях, KCB – коэффициент стоячей волны, равный отношению максимальной амплитуды напряженности поля E_{\max} к минимальной E_{\min} в линии питания на входе устройства.

1.6 Ферритовые циркуляторы

В зависимости от числа плеч циркуляторы могут быть трёх- и четырёхплечими. В настоящее время известно несколько типов циркуляторов, основанных на различных явлениях в намагниченном феррите, в частности, на эффекте Фарадея, на эффекте смещения поля, на эффекте невязимного фазового сдвига. Ознакомимся кратко с устройством и принципом действия исследуемых в данной работе циркуляторов.

Трёхплечный фазовый циркулятор представляет собой последовательное соединение элементов волнового тракта: щелевого моста, двух невязимных фазовращателей и перехода со сдвоенного волновода к одинарному (рисунок 1.5).

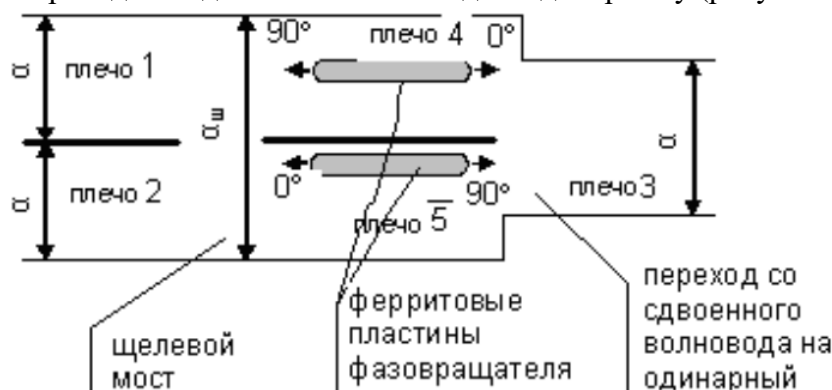


Рисунок 1.5 – Трёхплечный фазовый циркулятор

Щелевой мост образуется из двух стандартных прямоугольных волноводов, имеющих общую узкую стенку, в которой вырезано окно длиной ℓ и высотой b (рисунок 1.6).

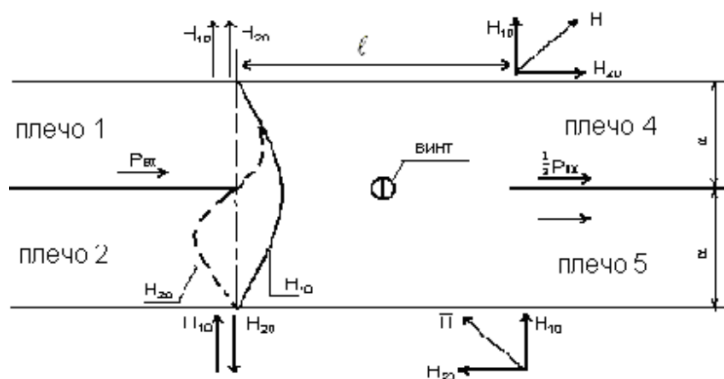


Рисунок 1.6 – Волноводно-щелевой мост

Когда в плечо 1 поступает волна H_{10} , то на участке с окном возможно распространение кроме волны основного типа H_{10} , также волны H_{20} , т.к. ширина волновода увеличилась в два раза. Фазовые скорости волн H_{10} и H_{20} различны. Длина окна выбирается такой, чтобы на его длине ℓ разность фаз $\Delta\varphi$ между этими волнами составила 90° , т.е. удовлетворяла соотношению

$$\Delta\varphi = (\beta_{H_{20}} - \beta_{H_{10}}) \cdot \ell = \frac{\pi}{2},$$

Где $\beta_{H_{20}} = \omega / V_{\Phi H_{20}}$, $\beta_{H_{10}} = \omega / V_{\Phi H_{10}}$ – постоянные распространения волн соответствующих типов;

$$V_{\Phi H_{20}} = \frac{c}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\alpha_{ш}}\right)^2}}, \text{ и } V_{\Phi H_{10}} = \frac{c}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2\alpha_{ш}}\right)^2}},$$

фазовые скорости волн H_{10} и H_{20} в волноводе со щелью высотой α ; ω и λ – рабочие круговая частота и длина волны;

$\alpha_{ш}$ – ширина волновода со щелью (в нашем случае равна 46 мм).

Относительные значения фаз полей для волн H_{10} и H_{20} в плечах моста (рис. 1.6) условно показаны стрелками. Если амплитуды полей H_{10} и H_{20} равны (это достигается регулировкой глубины погружения в щель настраиваемого винта), то энергия волны, поступающей в плечо 1, делится поровну между плечами 5 и 4 и не передается в плечо 2. Поля в плечах 5 и 4 сдвинуты по фазе относительно друг друга на 90° . В плечо 2 энергия из плеча 1 не поступает и они называются «развязанными». Восьмиполюсник, имеющий два развязанных входа, в котором мощность делится поровну между двумя другими плечами называется мостом. Если деление мощности неравное, то такой восьмиполюсник является направленным ответвителем. Таким образом мост – частный случай направленного ответвителя.

Матрица рассеяния идеального волноводно-щелевого моста, для нумерации плеч, принятой на рис. 1.5, имеет вид

$$[S] = \frac{j}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & j \\ 0 & 0 & j & 1 \\ 1 & j & 0 & 0 \\ j & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, (j = \sqrt{-1}).$$

Матрица рассеяния полностью характеризует свойства многополюсника. Рассмотрим, например, элементы первого столбца матрицы (1.7). Они определяют прохождение сигнала через волноводно-щелевой мост, когда энергия подается в первое плечо, а остальные нагружены на согласованные нагрузки. $S_{11}=0$ – в плече 1 нет отражённой волны, $S_{21}=0$ – энергия в плечо 2 не поступает; $S_{41} = \frac{j}{\sqrt{2}}$ и $S_{51} = \frac{-1}{\sqrt{2}}$

означает, что мощность делится поровну между плечами 4 и 5.

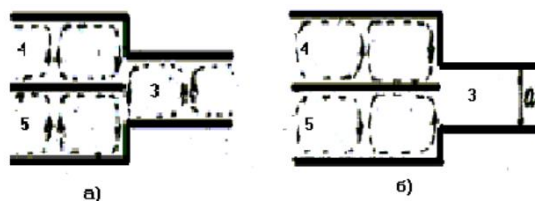
Волноводы в плечах 4 и 5 с включенными в них ферритами (рис. 1.5) являются взаимными фазовращателями со сдвигом фаз $\Delta\varphi = 90^\circ$, включённые в разных направлениях. Цифры 0° и 90° (рис. 1.5) показывают величину дополнительного фазового сдвига $\Delta\varphi$ при прохождении волны через феррит в направлении, указанном стрелкой в каждом волноводе. Таким образом, общий фазовый сдвиг волны в тракте, включающем плечи 1–5, оказался на 180° больше, чем в тракте с плечами 1–4, то есть волны на переходе со двоярного волновода на одинарный (плечо 3, рис. 1.7б) будут противофазны. Энергия в плечо 3 передаваться не будет; волны отразятся полностью и

пойдут в обратном направлении.

Проследим изменение фаз этих волн. Примем фазу волны в плече 4 за 0° , а фазу в плече 5 за 180° . После прохождения невзаимных фазовращателей в плече 4 фаза увеличится на 90° , а в плече 5 останется равной 180° , амплитуды волн будут равны. Представим комплексные амплитуды падающих волн на волноводно-щелевой мост в виде:

$$U_{1П} = 0, U_{2П} = 0, U_{4П} = j, U_{5П} = -1$$

Перемножая матрицу рассеяния (1.7) на вектор-столбец падающих волн $[U_0] = [U_{П}] \cdot [S]$, получим $U_{10} = 0, U_{20} = -j\sqrt{2}, U_{4П} = 0, U_{5П} = 0$



а) – в вдвоенном волноводе

б) – в вдвоенном волноводе

синфазные волны

противофазные волны

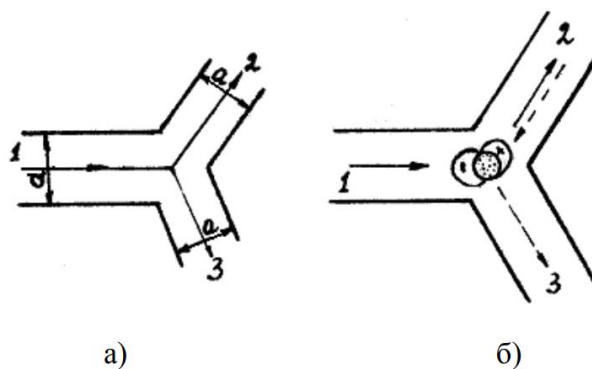
Рисунок 1.7 – Переход со вдвоенного волновода на одинарный

Таким образом, после прохождения волноводно-щелевого моста волна, отражённая от плеча 3, поступит в плечо 2. Конечно, к этому выводу можно прийти и путём физических рассуждений об изменении фаз в невзаимных фазовращателях и волноводно-щелевом мосте.

Аналогичные рассуждения и выкладки показывают, что из плеча 2 волна поступит в плечо 3, а из плеча 3 – в плечо 1. Кратко это записывают в виде $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 1$.

Фазовые циркуляторы находят широкое применение в качестве вентиля и переключателей в мощных передатчиках, так как в них феррит располагается в области минимального электрического поля, а контакт со стенкой позволяет обеспечить хороший теплоотвод. На малых уровнях мощности обычно применяются Y-циркуляторы, которые, благодаря малым размерам и хорошим параметрам, нашли в технике СВЧ широкое применение. Они разработаны в настоящее время для очень широкого диапазона частот (длины волн от 15 м до 2 мм).

Волноводный Y-циркулятор представляет собой симметричное соединение волноводов под углом 120° (рисунок 1.8а), то есть шестиполюсник на основе симметричного волноводного H-тройника.



а) – волноводный тройник без феррита б) – распределение поля в стоячей волне около феррита

Рисунок 1.8 – Волноводный Y-циркулятор

Если бы феррита не было, то энергия электромагнитной волны, поступающей, например, в плечо 1 такого разветвления, делилась бы поровну между плечами 2 и 3. Если в этих плечах включены согласованные нагрузки, то нагрузка для плеча 1 будет равна половине волнового сопротивления волновода, коэффициент отражения будет равен $1/3$, а коэффициент стоячей волны (КСВ) равен 2.

Если поместить в центр разветвления поперечно-намагниченный феррит, то устройство станет невзаимным. В зависимости от направления постоянного магнитного поля, намагничивающего феррит (по оси y или против оси y), электромагнитные волны в разветвлении будут распространяться или в направлении $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 1$ или $1 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 1$. Таким образом, наше устройство превратится в циркулятор. В идеальном случае к плечу 1 оказывается подключенным сопротивление, равное волновому (либо плечо 2, либо 3) коэффициент отражения от циркулятора тогда будет равен нулю, а коэффициент стоячей волны – единице. В общем случае полного согласования не удаётся добиться и часть энергии будет отражаться и просачиваться в развязанное плечо.

Рассмотрим подробнее принцип работы Y-циркулятора. Пусть электромагнитная волна типа H_{10} поступает в плечо 1. Достигнув феррита, она распадается на две волны того же типа, одна из которых (левая) обегает феррит по часовой стрелке, другая («правая») – против часовой стрелки. Вращение вектора магнитного поля в «левой» и «правой» волнах противоположно, поэтому они имеют различные фазовые скорости и проходя один и тот же путь l_n вдоль поверхности феррита получают разные фазовые сдвиги

$$\varphi^+ = \beta^+ l_n, \varphi^- = \beta^- l_n$$

Две волны, бегущие навстречу друг другу по поверхности ферритового цилиндра, интерферируют и образуют стоячую волну, положение максимумов и минимумов в которой определяется размерами и параметрами феррита. При этом образуется пучность напряженности напротив плеча 2 и узел – напротив плеча 3 (рис. 1.8б). Это приводит к возбуждению плеча 2 и к отсутствию энергии в плече 3. Аналогично можно объяснить прохождение энергии из плеча 2 в 3 и из 3 в 1. То есть, распространение волны в Y – циркуляторе происходит в направлении $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 1$. Полоса частот, в которой развязка между каналами не ниже 20 – 25 дБ, для Y-циркуляторов составляет 3 – 7 % от f_0 . Окружение образца феррита диэлектрической оболочкой с $\epsilon_r = 2 \dots 6$ способствует расширению рабочей полосы частот устройства. Этому же способствует размещение диэлектрических стержней в каждом плече.

1.7 Основные параметры циркуляторов и методика их измерения

Введем обозначения:

$P_{ВХ}$ – мощность, поступающая на входное плечо циркулятора от генератора, P_i – мощность, поступающая из проводящего плеча в согласованную нагрузку, P_K – мощность, поступающая из непроводящего плеча в согласованную нагрузку.

Основной характеристикой циркулятора является его матрица рассеяния (рис. 1.4б). Кроме неё, на практике используются следующие технические параметры:

1) развязка между плечами D_{ik} в дБ;

$$D_{ik} = 10 \lg \frac{P_i}{P_k}$$

2) прямые потери (переходное ослабление) L_i в дБ;

$$L_i = 10 \lg \frac{P_{ex}}{P_i}$$

Если в формуле заменить P_i на P_K , то потери называют обратными;

3) коэффициент стоячей волны на входе циркулятора КСВ. Все эти параметры зависят от частоты.

Так как в формулах (1.9) и (1.10) фигурируют отношения мощностей, то измерители мощности могут быть заменены устройствами, показания которых пропорциональны мощности. Например, таким устройством может быть детекторная секция с индикаторным прибором: микроамперметром или усилителем. В данной работе используется измерительный усилитель. Для токов детекторов, меньших 1–3 мА, что имеет место в нашем случае, характеристику детекторов, т.е. зависимость тока детектора от напряжения на нём, можно считать квадратичной ($i_D \approx u_D$). Показания усилителя (α) будут пропорциональны квадрату напряжения на детекторе. Следовательно, для определения отношения напряжений следует извлекать квадратный корень из отношения показаний усилителя, а отношение мощностей будет равно отношению α , т.е.

$$P_1 / P_2 = \alpha_1 / \alpha_2; U_1 / U_2 = \sqrt{\alpha_1 / \alpha_2}.$$

Для определения среднего значения переходного ослабления можно использовать метод, при котором измеряется КСВ на входе циркулятора при короткозамкнутых остальных плечах, как показано на рисунке 1.9.

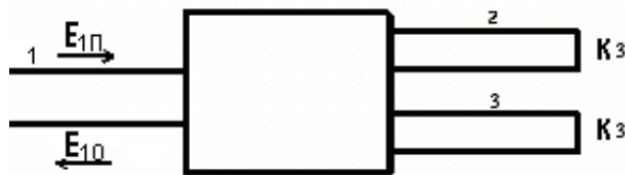


Рисунок 1.9 – Схема измерения среднего значения переходного ослабления

Если на вход циркулятора (плечо 1) поступает волна с амплитудой напряженности E_{1n} , (соответствующее показание усилителя α_n), то при короткозамкнутых плечах 2 и 3, она вернется в плечо 1 в виде волны с амплитудой E_{10} (показание усилителя α_{om}), полностью отразившись от короткозамыкателей в плечах 2 и 3 и пройдя путь $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 1$. Обозначим коэффициент отражения для этого случая как $\Gamma = E_{10} / E_{1n} = \sqrt{\alpha_{om} / \alpha_n}$.

Тогда приближенно можно считать, что $|\Gamma| \approx |S_{21}| \cdot |S_{32}| \cdot |S_{13}|$.

Среднее значение переходного ослабления для всех трёх переходов между

плечами будет равно $D_{cp} \approx \sqrt[3]{|\Gamma|}$.

Параметры циркулятора (развязку, прямые и обратные потери) можно выражать в разгах, децибелах и неперах. Пусть $L_P = P_1/P_2$ – отношение некоторых мощностей и $L_U = |U_1|/|U_2|$ – соответствующих модулей напряжений. В бегущей волне или на активной нагрузке $L_P = L_U$. В децибелах эти отношения выражаются следующим образом:

$$L_{P,дБ} = 10 \lg \left(\frac{P_1}{P_2} \right); L_{U,дБ} = 20 \lg \left(\left| \frac{U_1}{U_2} \right| \right); L_{P,дБ} = L_{U,дБ}.$$

Обратный переход выполняется так $P_1/P_2 = 10^{\frac{L_{P,дБ}}{10}}; U_1/U_2 = 10^{\frac{L_{U,дБ}}{20}}$.

2 ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ

1. Рассчитать длину ℓ (1.5) щелевого 3-х дБ моста для частоты, заданной таблицей 3.1.

Таблица 2.1. Расчётное задание

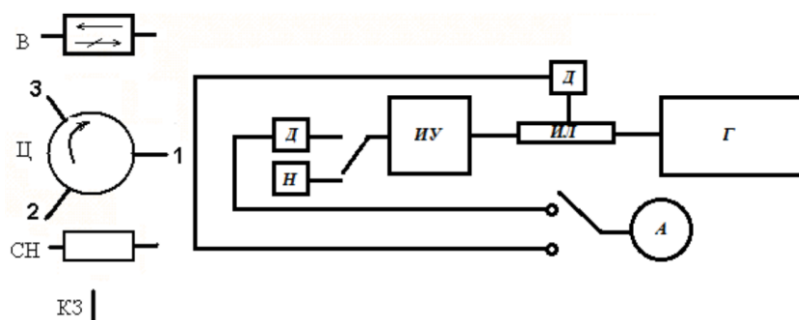
Заданные параметры	Номер бригады студентов					
	I	II	III	IV	V	VI
f , МГц	8600	8800	9100	9400	9700	10000

2. Рассчитать и построить амплитудно-частотную характеристику щелевого моста (рис. 1.6), изменяя частоту в пределах $\pm 25\%$ относительно заданной в табл. 2.1 для найденной в п.1 длины щели ℓ , пользуясь формулой

$$\left| \frac{E_4}{E_5} \right| = \operatorname{ctg}^2 \left(\frac{\Delta\varphi}{2} \right), \text{ где } \Delta\varphi = (\beta_{H20} - \beta_{H10}) \cdot \ell.$$

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

3.1 Описание экспериментальной установки



Г–генератор, ИЛ–измерительная линия, Д–детекторная секция,
А–амперметр, В и Ц–исследуемые вентиль и циркулятор,
Н–нагрузка: СН и КЗ–согласованная и короткозамыкатель.
Рисунок 3.1 – Схема экспериментальной установки

Экспериментальная установка (рис. 3.1) работает в 3-х сантиметровом диапазоне волн на волноводе сечением $23 \times 10 \text{ мм}^2$ и состоит из генератора ГЗ-14А (Г), измерительной линии типа Р1-4 (ИЛ), включающей детекторную секцию (Д), исследуемые вентиль (В) и циркулятор (Ц) (фазовый или Y-циркулятор) и набора волноводных элементов, включающих согласованные нагрузки (СН) и короткозамыкающие пластинки (КЗ). Устройство и порядок работы с генератором, усилителем, измерительной линией даются в соответствующих описаниях [4].

Настройка детекторных секций проводится поршнями, входящими в их конструкцию, до получения максимальных показаний амперметра. Измерительная линия служит для измерения КСВ нагрузок по измеренным значениям α_{\max} и α_{\min} (1.4), (1.11).

3.2 Порядок выполнения работы

1. Собрать схему для установки частоты и уровня мощности генератора. Сигнал с ИЛ подаётся на амперметр через Д. Переключатель установить в необходимое положение.

2. Включить генератор и усилитель и дать им прогреться в течение 5 минут. Настроить генератор на частоту, указанную преподавателем, и максимальную генерируемую мощность. Поскольку в процессе работы необходимо измерять сигналы с большим динамическим диапазоном уровня мощности, то следует установить с помощью левого аттенюатора на генераторе максимальную выходную мощность.

3. Настроить детекторную секцию поршнем на максимальные показания амперметра ($\alpha_{\text{вх}}$), которые соответствуют мощности генератора, подаваемой на вход вентилей или циркуляторов ($P_{\text{вх}}$). Далее никакие настройки на генераторе и детекторной секции не делать.

4. Подключить к измерительной линии вентиль в прямом направлении. Измерить:
а) проходящую через вентиль мощность ($\alpha_{\text{вых}}$), переключатель П на входе усилителя находится в положении 1;

б) КСВ. Для этого зафиксировать показания амперметра в максимуме и минимуме напряжения по измерительной линии (α_{\max} и α_{\min}). Результаты занести в таблицу 3.2. Таблица 3.2 Исследование вентилей в прямом (обратном) направлении $\alpha_{\text{вх}}$

$\alpha_{\text{вх}}$	$\alpha_{\text{вых}}$	α_{min}	α_{max}	KCB	$ S_{11} $	$ S_{21} $
				$\sqrt{\alpha_{\text{max}}/\alpha_{\text{min}}}$	$\frac{KCB-1}{KCB+1}$	$\sqrt{\frac{\alpha_{\text{вых}}}{\alpha_{\text{вх}}}}$

5. Повторить измерения п.4 для вентиля, включенного в обратном направлении. Соответственно заменить название таблицы 3.2 и обозначения $|S_{11}|$ на $|S_{22}|$ и $|S_{21}|$ на $|S_{12}|$.

6. Подключить на выход измерительной линии плечо 1 исследуемого циркулятора и с помощью детекторной секции измерить мощность, проходящую в плечи 2 и 3 (α_{21} и α_{31}). В обозначениях сигналов α_{21} и α_{31} , как и в обозначения элементов матрицы рассеяния следует понимать, что передача энергии происходит по направлению от второго индекса к первому. В свободное от детекторной секции плечо циркулятора следует включать согласованную нагрузку при каждом изменении схемы. Измерить KCB по измерительной линии аналогично п.4.

7. Заменить детекторную секцию и согласованную нагрузку в плечах 2 и 3 короткозамыкающими пластинами и измерить KCB по измерительной линии ($KCB_{\text{кз}}$). Результаты измерений (пункты 6 и 7) и результаты последующей обработки рекомендуется оформить в виде таблицы 3.3

Таблица 3.3 Исследование циркулятора, плечо1 (2, 3)

$\alpha_{\text{вх}1}$	α_{21}	α_{31}	KCB ₁	$ S_{21} $	$ S_{31} $	$ S_{11} $	KCB _{кз}
1	2	3	4	5	6	7	8
			$\sqrt{\alpha_{\text{max}}/\alpha_{\text{min}}}$	$\sqrt{\alpha_{21}/\alpha_{\text{вх}1}}$	$\sqrt{\alpha_{31}/\alpha_{\text{вх}1}}$	$\frac{KCB_1-1}{KCB_1+1}$	$\sqrt{\alpha_{\text{max}}/\alpha_{\text{min}}}$

Столбцы 1, 2, 3, 4 и 8 таблицы заполняются при измерениях, остальные – при обработке результатов.

8. Повторить п.6 и п.7, подсоединяя к измерительной линии плечи 2 и 3 циркулятора и заполнить таблицу 3.3 для каждого случая.

3.3 Обработка экспериментальных данных.

Проведённые измерения с вентилем и циркулятором позволяют составить их матрицы рассеяния только для модулей коэффициентов, поскольку фазы полей в данной установке не могут быть измерены. Однако и в таком виде эти матрицы представляют практический интерес, поскольку определяют технические параметры вентиля и циркуляторов: вентиляльное отношение, переходное ослабление, развязку и др. Для краткости будем в дальнейшем называть матрицей рассеяния – матрицу из модулей её коэффициентов.

1. По данным измерений с вентилем (п.4. и п.5) составить его матрицу рассеяния. По формуле (1.4) определить вентиляльное отношение, выразив его в децибелах и разгах. По формуле (1.3) определить долю внутренних потерь энергии в прямом и обратном направлениях ($P_{1,\text{пот}}$ и $P_{2,\text{пот}}$) по отношению к мощности волны на входе вентиля.

2. По результатам пп. 6, 7 и 8 составить матрицу рассеяния для циркулятора. Отметить в матрице признаки того, что циркулятор является невзаимным устройством.

Определить прямые и внутренние потери энергии и развязку в циркуляторе по формулам (1.3), (1.9) и (1.10) при подаче сигнала в каждое плечо.

3. По результатам п.п. 6, 7 и по формуле (1.13) определить среднее (для трёх переходов) значение переходного ослабления для каждого включения циркуля-тора и проверить выполнение формулы (1.12).

3.4 Требования к оформлению отчёта

1. Отчёт должен быть оформлен в соответствии с общими требованиями и правилами оформления отчётов по лабораторным работам, принятыми в ТУСУРе.

2. В отчёте должна быть изложена цель работы, методика измерений и краткое описание экспериментальной установки.

3. Отчёт должен содержать таблицы с экспериментальными результатами и их обработкой, матрицы рассеяния вентиля и циркулятора. Анализ полученных матриц на их симметричность и унитарность.

4. В отчёте должны быть представлены выводы по существу проделанной работы

4 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какая среда является анизотропной? Почему феррит проявляет анизотропные свойства только в намагниченном состоянии?
2. Опишите электрические и магнитные характеристики феррита (ϵ_r , μ_r и σ). Какую роль играет низкая проводимость феррита?
3. Что представляет собой прецессия спина? Почему она оказывает влияние на распространение волны, которая быстро затухает?
4. Какие волны в феррите называются лево и право поляризованными? Зависит ли их название от направления H_0 ?
5. Какую поляризацию имеют электрическое и магнитное поля волны H_{10} в различных точках поперечного сечения волновода?
6. Как работают резонансные вентили и вентили на смещении поля?
7. Объясните смысл коэффициентов матриц рассеяния идеальных устройств: вентиля, гиратора и циркулятора (рис. 1.4).
8. Какие устройства называются мостами? Поясните на примере волноводно-щелевого моста.
9. Из каких соображений выбирается длина отверстия в волноводно-щелевом мосте? Как изменяются свойства моста при изменении частоты?
10. Опишите свойства идеального волноводно-щелевого моста по его матрице рассеяния (1.7).
11. Поясните принцип работы Y-циркулятора. Как изменятся его свойства, если изменить направление постоянного магнитного поля на противоположное?
12. Чему был бы равен КСВ в опыте с короткозамыкающими пластинами (п. 7), если бы прямые потери в циркуляторе отсутствовали?
13. Почему значение среднего значения переходного ослабления циркулятора следует вычислять по формуле (1.13), а не как среднее арифметическое из значений $[S_{21}]$, $[S_{32}]$ и $[S_{13}]$?
14. Составьте схему использования циркулятора для обеспечения развязки генератора и нагрузки.
15. Какие изменения произойдут в ферритовых элементах, если изменить направление постоянного подмагничивающего поля H_0 ?
16. Почему соотношение (1.12) является приближенным? Какие факторы в нем не учтены?
17. Какой вид будут иметь частотные зависимости $D(f)$, $L(f)$ и $KCB(f)$

5 СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антенны и устройства СВЧ: Учебник для вузов/ Д.И. Воскресенский и др. – М.: Радиотехника, 2006. – 375с.
2. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ. – М.: Высшая школа, 1988. – 432с.
3. Л.А. Боков, В.А. Замотринский, А.Е. Мандель Электродинамика и распространение радиоволн: Уч. пособие.. - Томск: ТУСУР, 2012. – 301с. – Режим доступа: <http://edu.tusur.ru/training/publications/738> (дата обращения 15.11.2023).
4. Замотринский В.А., Падусова Е.В., Соколова Ж.М., Шангина Л.И. Электромагнитные поля и волны [Электронный ресурс]: Учебное пособие. –Томск: Том. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2012. – 182с. Режим доступа: <http://edu.tusur.ru/training/publications/2800> (дата обращения 15.11.2023).
5. ОС ТУСУР 01-2013 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.tusur.ru/export/sites/ru.tusur.new/ru/education/documents/inside/tech_01-2013_new.pdf (дата обращения 15.11.2023).