

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра «Антенн и устройств СВЧ»

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРАВЛЕННЫХ ОТВЕТВИТЕЛЕЙ

Методические указания к лабораторной работе №1
по дисциплине «Антенны и устройства СВЧ»
для студентов специальности 39 01 01 «Радиотехника»
всех форм обучения

Минск 2005

УДК 621.396 67 (075.8)
ББК 32. 845 я 73
И 85

Составители:

И.Н. Кижлай, А.В. Кухарев, Н.А. Чмырев, О.А. Юрцев

Исследование направленных ответвителей: Метод. указ. к лаб. раб. №1 по дисц. “Антенны и устройства СВЧ” для студ. спец. 39 01 01 “Радиотехника” всех форм обуч./ Сост. И.Н. Кижлай, А.В. Кухарев, Н.А. Чмырев, О.А. Юрцев.– Мн.: БГУИР, 2005. - 16 с.

В методических указаниях содержатся сведения о принципах работы, конструкциях и разновидностях направленных ответвителей на различных типах линий передачи. Рассмотрены основные параметры направленных ответвителей, приведены методика их экспериментального определения и контрольные вопросы, которые помогают студентам самостоятельно овладеть данным разделом. Приведена методика выполнения лабораторной работы и оформления отчета.

Материал может быть рекомендован для студентов специальностей 39 01 02, 39 01 03 и 45 01 02 при изучении курсов, содержащих раздел “Устройства СВЧ”.

УДК 621.396 67 (075.8)
ББК 32. 845 я 73

© Коллектив авторов,
составление, 2005
© БГУИР, 2005

Содержание

1. Цель работы
 2. Общие сведения
 3. Измерение параметров НО
 4. Порядок выполнения работы
 5. Содержание отчета
 6. Контрольные вопросы
- Литература

1 Цель работы

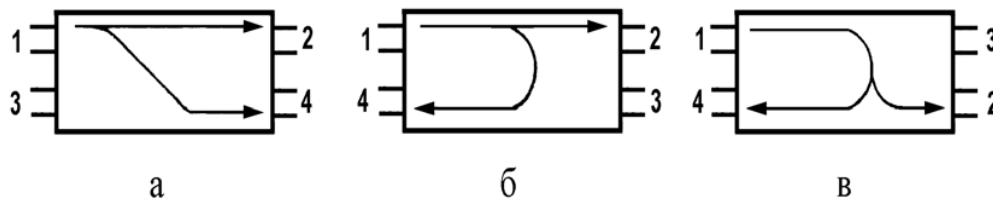
Ознакомление с устройством, конструкцией и принципом действия направленных ответвителей различных типов, экспериментальное исследование основных характеристик.

2 Общие сведения

Направленным ответвителем (НО) называется четырехплечное устройство (восьмиполюсник), состоящее из двух отрезков линий передачи, в котором часть энергии электромагнитной волны, распространяющейся в основной линии передачи (основном канале), посредством элементов связи ответвляется во вспомогательную линию передачи (вспомогательный канал) и передается в ней в определенном направлении.

Направление передачи энергии электромагнитной волны во вспомогательном канале зависит от направления передачи в основном канале. При изменении направления распространения волны в основном канале направление распространения ответвленной волны во вспомогательном канале также изменяется на обратное.

Виды НО показаны на рисунке 1.



а - сонаправленный, *б* - противонаправленный; *в* – противонаправленный с переходом энергии во вспомогательный канал

Рисунок 1 - Виды НО

Направленная передача энергии в НО возможна при полном согласовании всех его плеч. НО считается идеально направленным, если при возбуждении какого-либо из его плеч одно из трех оставшихся плеч остается не возбужденным. Такое плечо называется развязанным.

В двух других плечах, называемых рабочими, входная мощность распределяется в соответствии с выбранной величиной связи между основным и вспомогательным каналами. В реальных конструкциях НО идеальное согласование не достигается, а это приводит к тому, что в теоретически развязанное плечо частично попадает мощность, поступающая на входное плечо НО, т.е. наблюдается некоторое прохождение сигнала в “ненормальном” направлении.

Как правило, НО являются взаимными устройствами, хотя существуют и невзаимные НО, у которых связь между каналами осуществляется через намагниченный феррит.

НО являются наиболее распространенными устройствами техники СВЧ. Они используются в качестве элементов сложных устройств, например: фильтров, сумматоров и делителей мощности, смесителей, модуляторов, переключателей, фазовращателей и др. Кроме того, НО можно использовать как самостоятельные узлы при проведении различного рода измерений в СВЧ диапазоне: измерении больших и средних мощностей посредством измерителей малой мощности, измерении добротности резонаторов, контроле уровня проходящей и отраженной волн в линиях передачи, измерении коэффициента отражения в линии и т.д.

Основными характеристиками НО при условии подачи сигнала в плечо 1 и согласованных нагрузках в остальных плечах являются:

1 Переходное ослабление C_{14} - выраженное в децибелах отношение мощности на входе основного канала к выходной мощности рабочего плеча вспомогательного канала:

$$C_{14} = 10 \log P_1 / P_4 \text{ [дБ]}. \quad (1)$$

Величина переходного ослабления зависит от размеров и числа элементов связи между основным и вспомогательным каналами. В типовых НО $C_{14} = 3 \dots 20$ дБ. Величина $C_{14} = 10$ дБ принята за границу сильной и слабой связи. В зависимости от величины переходного ослабления НО подразделяются на НО с сильной связью ($C_{14} < 10$ дБ), НО со слабой связью ($C_{14} > 10$ дБ), гибридные НО ($C_{14} = 3,01$ дБ) с равными мощностями в рабочих плечах.

Для взаимных НО величина переходного ослабления не зависит от направления сигнала, т.е. $C_{14} = C_{23}$.

2 Направленность C_{43} - выраженное в децибелах отношение мощности на выходе рабочего плеча вспомогательного канала к мощности на выходе развязанного плеча.

$$C_{43} = 10 \log P_4 / P_3 \text{ [дБ]}. \quad (2)$$

Направленность характеризует просачивание мощности в развязанное плечо за счет неидеальности конструкций НО. У идеального НО $P_3 = 0$.

В реальных конструкциях НО $C_{43} = 15 \dots 40$ дБ и определяется типом НО, качеством согласования плеч с нагрузками, диапазоном частот.

3 Развязка C_{13} - выраженное в децибелах отношение мощности на входе основного канала к мощности на выходе развязанного плеча.

$$C_{13} = 10 \log P_1 / P_3 \text{ [дБ]}. \quad (3)$$

У идеального НО развязка должна быть бесконечно большой.

4 Рабочее затухание C_{12} - выраженное в децибелах отношение мощности на входе и выходе основного канала НО:

$$C_{12} = 10 \log P_1 / P_2 \text{ [дБ]}. \quad (4)$$

5 Коэффициент деления мощности C_{24} - выраженное в децибелах отношение мощностей на выходе рабочих плеч:

$$C_{24} = 10 \log P_2 / P_4 \text{ [дБ]}. \quad (5)$$

Коэффициент деления мощности НО зависит от его конструкции. Возможно равное деление мощностей, в одно из плеч может поступать большая или меньшая часть мощности. Если из одного канала в другой передается значительная часть мощности, то НО можно отнести к классу делителей мощности, а если небольшая - то к классу развязывающих устройств.

6 Коэффициент стоячей волны (КСВ) - характеризует отражения, вносимые НО в СВЧ тракт.

КСВ определяется со стороны входного плеча НО при наличии согласованных нагрузок в остальных плечах.

7 Фазовые соотношения НО - разность фаз волн в выходных плечах.

8 Рабочая полоса частот - полоса частот, в пределах которой неравномерность (отклонение от среднего значения) величин переходного ослабления, направленности и других параметров не превышает заданного значения.

По принципу действия НО подразделяются на следующие виды:

- ответвители, в которых направленность обеспечивается собственной направленностью элемента связи;

- интерференционные, у которых связь между основным и вспомогательным каналами образуется с помощью нескольких элементов связи. Направленность обеспечивается взаимной компенсацией электромагнитных волн, возбуждаемых каждым элементом связи во вспомогательном канале в обратном направлении;

- ответвители, в которых направленность образуется за счет использования двух предыдущих явлений;

- ответвители, в которых направленность обеспечивается за счет использования взаимодействия электромагнитных волн различных типов, распространяющихся одновременно на протяженном участке линии передачи, где возможно их совместное существование.

НО могут быть выполнены в различных конструктивных вариантах.

Применяемые в диапазоне СВЧ НО подразделяются на следующие типы:

- коаксиальные и волноводные с одиночными элементами связи, обладающими собственной направленностью (отверстия и петли связи);

- волноводные со щелевой связью (прямоугольные и крестообразные щели);
- волноводные многодырочные и многостержневые;
- коаксиальные и полосковые двух- и многошлейфовые;
- полосковые с использованием полей рассеяния.

Ниже будут рассмотрены исследуемые в данной работе некоторые наиболее широко применяемые в технике СВЧ НО, описаны принцип их действия и конструктивные особенности.

Волноводные НО

Простейшими волноводными НО являются ответвители с одним элементом связи. Такие НО обычно выполняются на основе волноводов прямоугольного сечения с волной Н₁₀ и со связью через малое отверстие.

В зависимости от расположения отверстия связь между волноводами может быть магнитной или смешанной - электромагнитной. На рисунке 2 показана связь через отверстие круглой формы между волноводами по общей узкой стенке, обусловленная продольной составляющей магнитного поля.

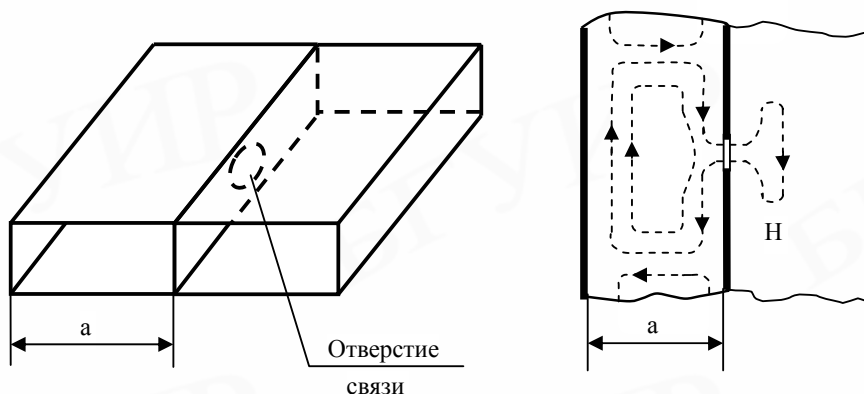


Рисунок 2 – Связь между волноводами по общей узкой стенке

На рисунке 3 отверстие связи изображено в середине общей широкой стенки волновода и связь осуществляется как по электрическому, так и по магнитному полю через поперечную составляющую.

Если отверстие связи смещено относительно центральной линии, то добавляется связь, обусловленная продольной составляющей магнитного поля. Такое отверстие является сложным возбудителем.

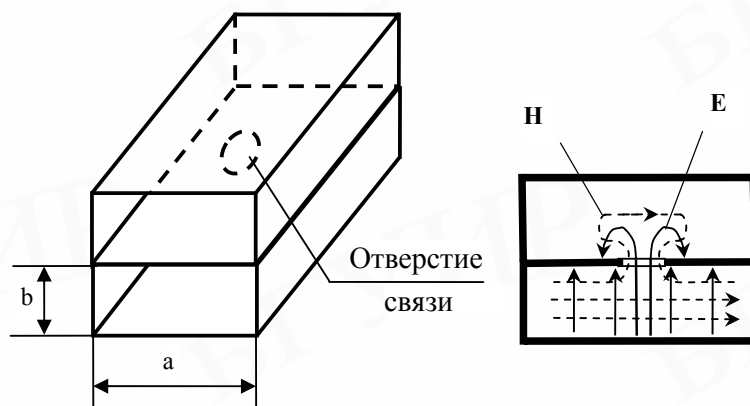


Рисунок 3 – Связь между волноводами по общей широкой стенке

Для НО, изображенных на рисунке 3, установлено, что в случае круглых отверстий электрическая и магнитная связи примерно равны; для вытянутых отверстий (в том числе и щелей) наибольшую роль играет связь, обусловленная магнитным полем, направленным параллельно большой оси; в крестообразном отверстии (щели) имеет место связь по обоим составляющим магнитного поля.

Наиболее распространенной конструкцией НО с одним элементом связи является ответвитель Бете, показанный на рисунке 4.

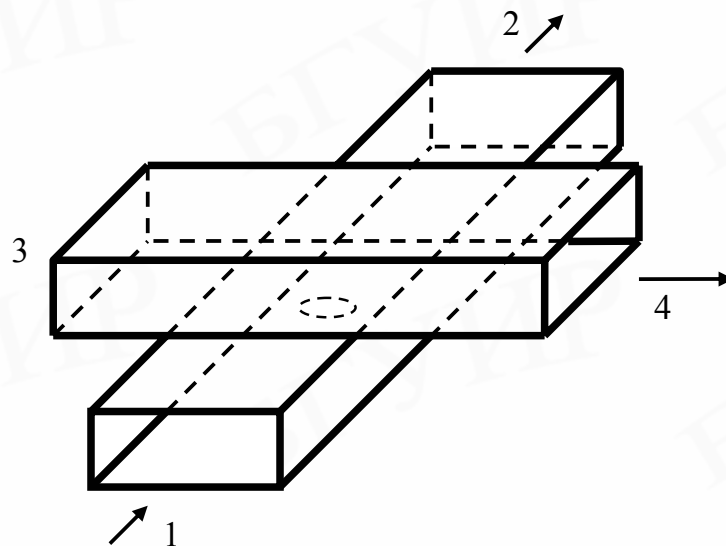


Рисунок 4 - Волноводный НО Бете

В качестве элемента связи здесь используется круглое отверстие в середине общей широкой стенки двух волноводов. Электрическое поле основного волновода (электрическая связь) возбуждает во вспомогательном волноводе две равные по амплитуде синфазные волны, направленные в разные стороны. Магнитное поле, "провисающее" в отверстие связи, в свою очередь возбуждает во

вспомогательном волноводе две волны, равные по амплитуде, но противофазные и также направленные в разные стороны.

Таким образом, волны, возбуждаемые во вспомогательном волноводе различными составляющими поля основного волновода, в одном направлении складываются, а в другом — вычитаются.

Поскольку величина магнитной связи зависит от взаимного расположения волноводов, то, поворачивая волноводы друг относительно друга (меняя угол между ними), можно уравнивать амплитуды волн. Устройство при этом начинает работать как НО. Отметим, что направление потока ответвленной энергии (плечо 4) противоположно направлению потока подводимой к НО энергии СВЧ, т.е. ответвитель Бете является противонаправленным. Это происходит потому, что магнитное поле в основном и вспомогательном каналах синфазно, а электрическое поле сдвинуто по фазе на 180° (как было показано ранее).

Ответвитель Бете имеет направленность до 20 дБ в полосе частот не более 20%. Переходное ослабление таких ответвителей не рекомендуется делать ниже 20 дБ из-за значительного увеличения размеров отверстия связи и, как следствие этого, возникновения существенных отражений в основном волноводе, что приводит к нарушению режима бегущих волн.

Для подстройки ответвителя Бете по направленности и переходному ослаблению вспомогательный волновод иногда делают подвижным, т.е. меняют угол между ними.

Основными недостатками ответвителя Бете являются значительное переходное ослабление и узкополосность.

Более просты в изготовлении НО с одним или двумя отверстиями связи круглой или крестообразной формы, расположенными на диагонали общей части широких стенок взаимно перпендикулярных волноводов (рисунки 5, 6).

Такие ответвители представляют собой разновидность ответвителей Бете. Образование направленной связи в таком ответвителе объясняется теорией Бете. Если волна в основном волноводе распространяется в направлении 1-2, то при расположении отверстия на диагонали общей части широкой стенки и при соответствующем выборе размеров отверстия можно добиться, что электромагнитные волны будут распространяться в направлении 3-4.

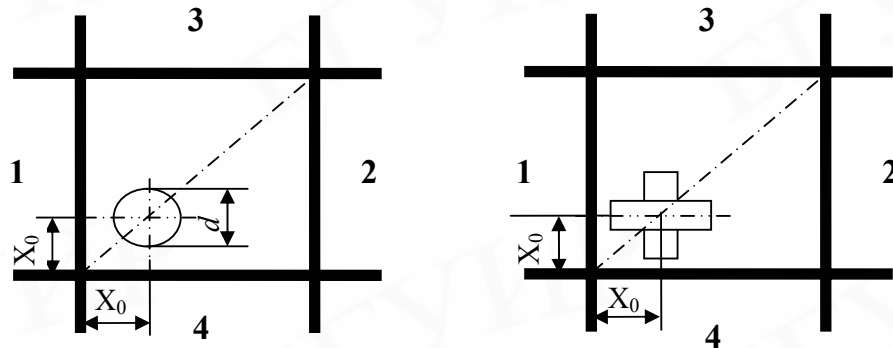


Рисунок 5 - НО со взаимно перпендикулярными волноводами с одним элементом связи

В случае использования одиночного круглого отверстия связи (рисунок 5) наибольшая направленность достигается при минимальном значении X_0 , т.е. когда отверстие располагается как можно ближе к узкой стенке. Такой НО сохраняет приблизительно постоянные значения характеристик направленности в диапазоне частот 20%. НО с одним крестообразным элементом связи имеет максимальную направленность при координатах отверстия $X_0 = a/4$.

НО с двумя отверстиями связи (рисунок 6), симметрично расположенными по диагонали общей стенки, более широкополосны. Для получения максимальной направленности расстояние между отверстиями связи по продольным осям волноводов должно быть равно $X = \lambda/4$. Для крестообразных отверстий связи том случае, когда длина полуплеча крестообразного отверстия превышает X_0 , отверстия можно повернуть на 45° . Такое расположение отверстия не влияет на характеристики НО, поскольку они не зависят от угла между плечами креста и осью волновода. Необходимо лишь соблюдать взаимную перпендикулярность и равенство плеч крестообразного отверстия, так как даже незначительное отклонение одного из плеч от заданного размера может привести к значительному ухудшению направленности ответвителя.

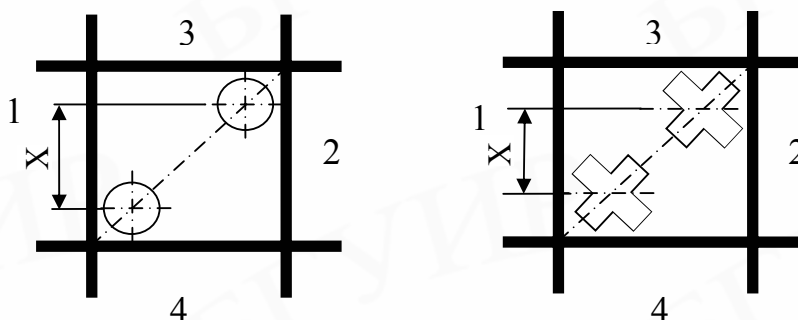


Рисунок 6 - НО со взаимно перпендикулярными волноводами с двумя элементами связи

Широкое применение на практике находят НО на базе ненаправленных элементов связи, какими являются, например, отверстия в узкой стенке прямоугольного волновода, связь через которые осуществляется за счет продольной составляющей магнитного поля (см. рисунок 2). Два таких отверстия, расположенные на расстоянии $L = \lambda/4$ друг от друга, обеспечивают направленную связь. Направленность достигается за счет интерференции электромагнитных волн, возбужденных во вторичном волноводе.

Принцип работы такого НО поясним на примере ответвителя с двумя одинаковыми отверстиями связи в общей части узкой стенки двух параллельных прямоугольных волноводов, схематичная конструкция которого приведена на рисунке 7.

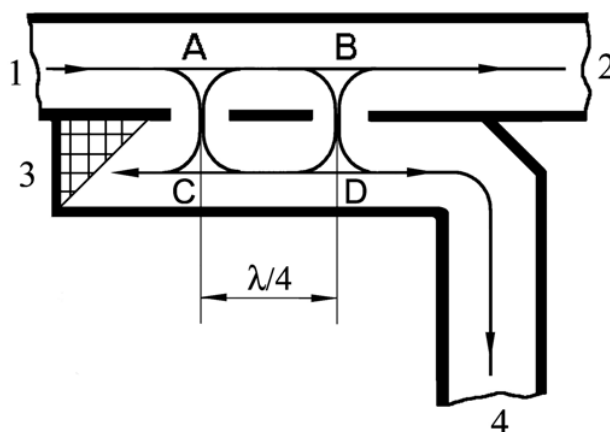


Рисунок 7 - Двухэлементный волноводный НО

Пусть волна H_{01} поступает в плечо 1. Каждое отверстие связи возбуждает по вспомогательному волноводу две волны, равные по амплитуде и противоположные по фазе.

Волны, возбужденные падающей волной и прошедшие из основного канала по путям ACD и ABD, складываются в точке D в фазе и поступают в рабочее плечо 4. Волны же, прошедшие по путям AC и ABDC, в точке C противофазны, взаимно уничтожаются и в плечо 3 не поступают.

Волны, возбужденные отраженной волной и прошедшие из основного канала по путям BD и BACD, сложатся в точке D в противофазе, и поэтому в плечо 4 отраженная волна отсутствует. Волны же, прошедшие по путям BAC и BDC, в точке C сложатся в фазе и пойдут в расположенную в плече 3 поглощающую нагрузку, от которой нет отражения.

Следовательно, индикатор, включенный в плечо 4, будет реагировать только на падающую волну основного канала.

Переходное ослабление таких сонаправленных НО велико и составляет величину не менее 20 дБ, направленность не превышает 25 дБ.

Основным недостатком такого двухдырочного НО является малая рабочая полоса частот, что связано с принципом его работы - при изменении длины волны расстояние между элементами связи уже не будет равно $\lambda/4$ и картина интерференции волн нарушится.

Для уменьшения переходного ослабления и расширения рабочей полосы частот число отверстий увеличивают. Значительного увеличения широкополосности НО можно достигнуть, используя такой выбор размеров элементов связи, при котором амплитуда возбуждаемой во вторичной линии волны меняется от отверстия к отверстию по законам биномиального или чебышевского распределения (за счет соответствующего выбора уменьшения диаметров отверстий по отношению к центральному).

Коаксиальные и полосковые НО

НО на основе коаксиальных линий передачи бывают петлевого и щелевого типа. Конструкция петлевого коаксиального НО схематически показана на рисунке 8.

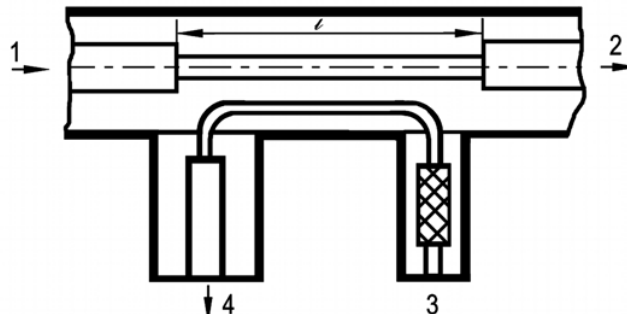


Рисунок 8 - Коаксиальный НО

Такой НО обычно используется для ответвления небольшой части мощности. Он работает по принципу взаимодействия волн разных типов на участке связи, длина которого, как правило, $L = \lambda/4$. Рассматриваемый ответвитель является противонаправленным.

На рисунке 9 представлена аналогичная конструкция ответвителя в микрополосковом исполнении.

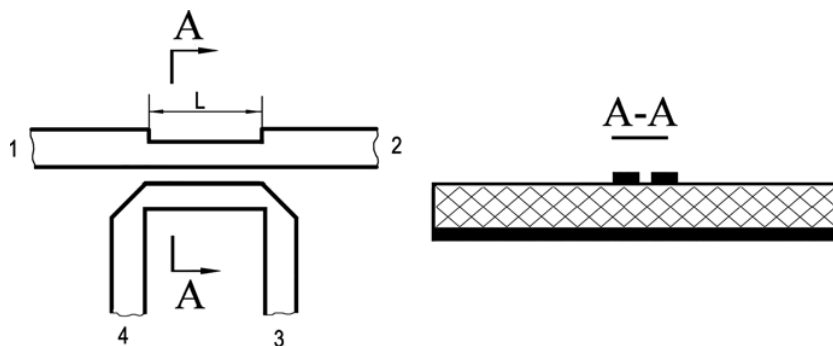


Рисунок 9 - Микрополосковый НО

В настоящее время созданы конструкции коаксиальных и микрополосковых НО, обеспечивающие направленность не менее 35 дБ. Переходное ослабление такого НО может быть изменено в некоторых пределах путем изменения расстояния между основной и вспомогательными линиями.

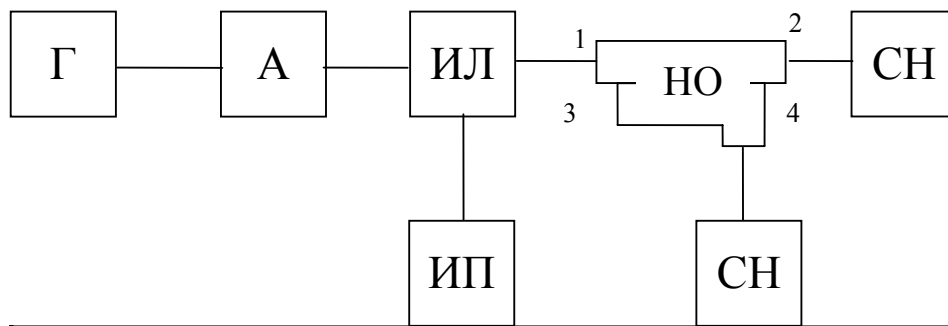
Для увеличения рабочего диапазона можно применить ответвитель, образованный несколькими последовательными секциями с различными коэффициентами связи.

3 Измерение параметров НО

Основными параметрами НО, измеряемыми в данной работе, являются коэффициент стоячей волны со стороны входа K_0 , переходное ослабление S_{14} и направленность S_{43} . Эти параметры в общем случае могут быть определены обычными методами измерения КСВ, затухания и коэффициентов передачи. Так, например, для измерения S_{14} и S_{43} наиболее широкое применение нашли метод замещения и метод непосредственного измерения мощности на выходе соответствующих плеч НО.

В данной работе численные значения K_0 , S_{14} и S_{43} в рабочем диапазоне частот НО измеряются на дискретных частотах, т.е. зависимости $K_0(f)$, $S_{14}(f)$ и $S_{43}(f)$ строятся по точкам.

1 Измерение K_0 производится по структурной схеме, представленной на рисунке 10.



Г - генератор СВЧ; А - прецизионный переменный аттенюатор;
ИЛ - измерительная линия; НО - направленный ответвитель;
СН - согласованная нагрузка; ИП - индикаторный прибор

Рисунок 10 - Структурная схема измерения K_0

Настроить генератор на заданную частоту, обеспечив максимальную мощность на его выходе. Регулируя ослабление аттенюатора, подать СВЧ колебания в СВЧ тракт и произвести настройку измерительной линии. Перемещая измерительную головку линии и изменяя ослабление аттенюатора, добиться значения тока детектора измерительной линии в максимуме поля в последней трети шкалы индикаторного прибора и зафиксировать величину максимума $I_{\max}$ в относительных единицах. Затем, перемещая измерительную головку вдоль измерительной линии, найти минимальное значение тока ее детектора и зафиксировать по индикаторному прибору величину минимума $I_{\min}$ в относительных единицах (на той же шкале индикаторного прибора).

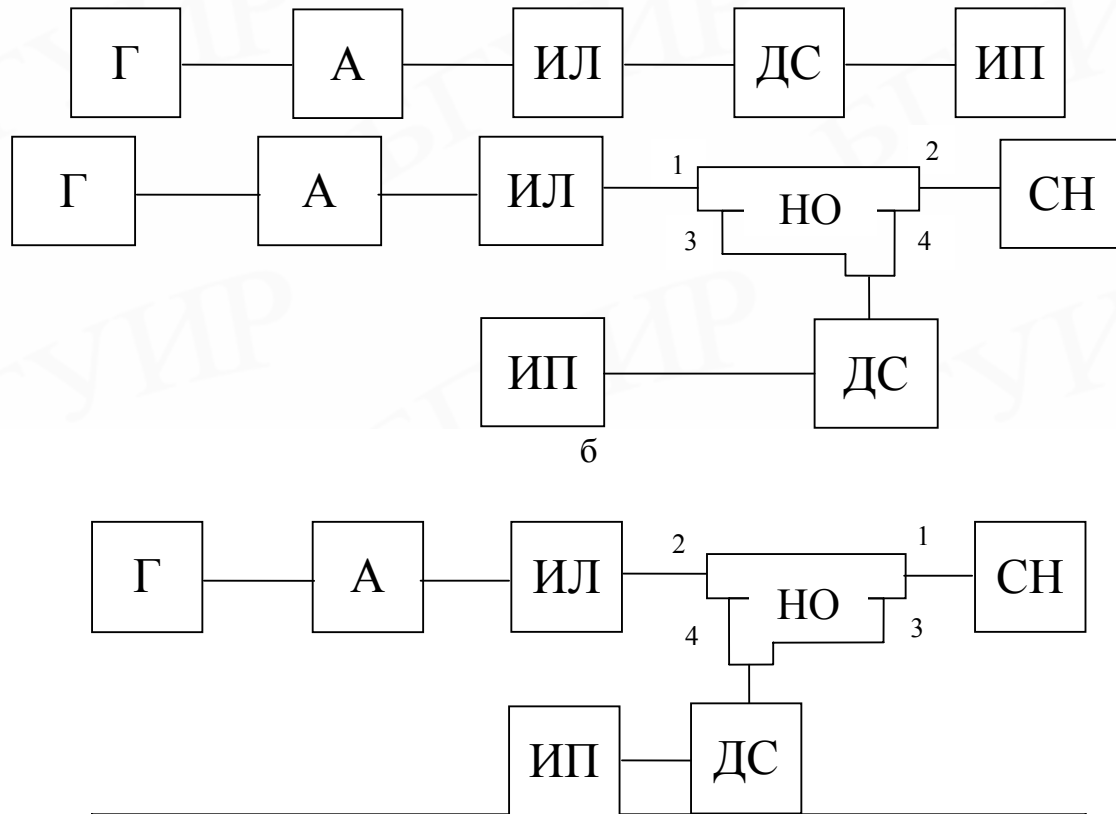
Учитывая квадратичность характеристики детектора измерительной линии, получим:

$$K = \sqrt{I_{\max}/I_{\min}} . \quad (6)$$

Тогда
$$K_0 = |K - K_{\text{сн}}| + 1, \quad (7)$$

где $K_{\text{сн}}$ - коэффициент стоячей волны согласованной нагрузки.

Численные значения $K_{\text{сн}}$ на каждой частоте рабочего диапазона определяются методом прямых измерений по рассмотренной выше методике, когда НО исключен из тракта.



Г - генератор СВЧ; А - прецизионный переменный аттенюатор;
НО - направленный ответвитель; СН - согласованная нагрузка;
С - детекторная секция; ИП - индикаторный прибор

Рисунок 11 - Структурная схема измерения переходного затухания и направленности НО

2 Измерение S_{14} и S_{43} производится методом замещения с помощью эталонного (прецизионного) переменного аттенюатора по структурной схеме, представленной на рисунке 11.

Методика измерения

1 Собрать схему (рисунок 11, а). Настроить генератор на заданную частоту, обеспечив максимальную мощность на его выходе. Подать СВЧ мощность в тракт и, регулируя ослабление аттенюатора, произвести настройку детекторной секции с согласованным входом.

Добиться, чтобы показания индикаторного прибора были при этом в последней трети его наиболее чувствительной шкалы. Отметить уровень выходного сигнала по индикаторному прибору и начальное ослабление A_0 , вносимое аттенюатором.

2 Собрать схему (рисунок 11,б) и, уменьшая ослабление аттенюатора, добиться первоначальных показаний индикатора. Отметить ослабление A_1 , вносимое аттенюатором.

Переходное ослабление определяется как разность показаний

$$C_{14} = A_0 - A_1[\text{дБ}]. \quad (8)$$

3 Собрать схему (рисунок 11, в) и, уменьшая ослабление аттенюатора, добиться первоначальных показаний индикатора. Отметить ослабление A_2 , вносимое аттенюатором.

Направленность определяется как разность показаний аттенюатора

$$C_{42} = A_1 - A_2[\text{дБ}]. \quad (9)$$

В том случае, если при измерении направленности C_{43} не удастся получить первоначальных показаний индикатора, следует повторить измерения (пп. 1-3) при меньших значениях показаний индикаторного прибора.

4 Порядок выполнения работы

1 Ознакомиться с аппаратурой, относящейся к данной работе.

2 Измерить значения K_0 , C_{14} и C_{43} волноводного НО в указанном преподавателем частотном диапазоне. Результаты измерений свести в таблицу (см ниже).

3 Произвести расчеты и оформить отчет.

Измеряемый параметр	Частота				
$I_{\min}$					
$I_{\max}$					
K_0					
A_0					
A_1					
A_2					
C_{14}					
C_{43}					

5 Содержание отчета

- 1 Краткая формулировка цели работы.
- 2 Структурные схемы измерений.
- 3 Таблицы экспериментальных данных.
- 4 Результаты расчета и графики зависимостей $K_0(f)$, $C_{14}(f)$ и $C_{43}(f)$ волноводных НО.
- 5 Краткие выводы.

6 Контрольные вопросы

- 1 Что такое НО?
- 2 Назовите виды направленности НО.
- 3 Какими параметрами характеризуются НО?
- 4 Как разделяются НО по принципу действия и по конструктивному исполнению?
- 5 Объясните, зачем необходима согласованная нагрузка в одном из плеч вспомогательного канала НО.
- 6 Объясните работу волноводного НО с одним элементом связи.
- 7 Объясните работу двухэлементного волноводного НО.
- 8 Объясните работу коаксиального НО.
- 9 В каких пределах находятся основные параметры реальных НО?
- 10 Назовите основные способы увеличения полосы пропускания НО.
- 11 Какие факторы влияют на величину переходного ослабления волноводных (коаксиальных) НО, исследуемых в данной работе?
- 12 Объясните методику измерения основных параметров НО, нарисуйте структурные схемы измерений.
- 13 Какие факторы влияют на точность измерений основных параметров НО рассмотренными в данной работе методами?
- 14 Назовите области применения НО.
- 15 Объясните методику определения коэффициента отражения при помощи НО.

Литература

1. Аверьянов В.Я. Антенны и устройства СВЧ. Разд. 2: Учеб. пособие. – Мн.: МРТИ, 1982. – 90 с.
2. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ. - М.: Высш. шк., 1970.Т.1. – 440 с.
3. Лавров А.С., Резников Г.Б. Антенно-фидерные устройства. – М.: Сов. радио, 1974. – 368 с.
4. Вольман В.И., Пименов Ю.В. Техническая электродинамика. – М.. Связь, 1971. – 487 с.
5. Милованов О.С., Собенин Н.П. Техника сверхвысоких частот. – М.: Атомиздат, 1960. – 464 с.
6. Конструкции СВЧ устройств и экранов / Под ред. А.М. Чернушенко. – М.: Радио и связь, 1983. – 400 с.

Учебное издание

Исследование направленных ответвителей

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к лабораторной работе №1
по дисциплине «Антенны и устройства СВЧ»
для студентов специальности 39 01 01 «Радиотехника»
всех форм обучения

Составители:
Кижлай Игорь Николаевич,
Кухарев Александр Васильевич,
Чмырев Николай Алексеевич,
Юрцев Олег Анатольевич

Редактор Н.А. Лейко
Корректор Е.Н. Батурчик
Компьютерная верстка М.В. Шишло

Подписано в печать 02.02.2005.	Формат 60х84 1/16.	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Печать ризографическая.	Усл. печ. л. 1,05.
Уч.-изд. л. 0,8.	Тираж 200 экз.	Заказ 254.

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
Лицензия на осуществление издательской деятельности №02330/0056964 от 01.04.2004.
Лицензия на осуществление полиграфической деятельности №02330/0133108 от 30.04.2004.
220013, Минск, П. Бровки, 6

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра «Антенн и устройств СВЧ»

ИССЛЕДОВАНИЕ МОСТОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Методические указания к лабораторной работе №2
по дисциплине АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА СВЧ
для студентов специальности 39 01 01 «Радиотехника»
всех форм обучения

Минск 2005

УДК 621.396.67 (075.8)
ББК 32. 845 я 73
И 85

С о с т а в и т е л и:
И.Н. Кижлай, А.В. Кухарев, Н.А. Чмырев, О.А. Юрцев

Исследование мостовых соединений: Метод. указ. к лаб. раб. №2
И 85 по дисц. “Антенны и устройства СВЧ” для студ. спец. 39 01 01 “Радиотехника” всех форм обуч./ Сост. И.Н. Кижлай, А.В. Кухарев, Н.А. Чмырев, О.А. Юрцев.– Мн.: БГУИР, 2005. - 19 с.: ил.

В методических указаниях содержатся сведения о применении, принципах работы, конструкциях и разновидностях мостовых соединений на различных типах линий передачи. Рассмотрены основные параметры мостовых соединений, приведены методика их экспериментального определения и контрольные вопросы, которые помогают студентам самостоятельно овладеть данным разделом. Приведена методика выполнения лабораторной работы и оформления отчета.

Материал может быть рекомендован для студентов специальностей 39 01 02, 39 01 03 и 45 01 02 при изучении курсов, содержащих раздел “Устройства СВЧ”.

УДК 621.396.67 (075.8)
ББК 32. 845 я 73

© Коллектив авторов,
составление, 2005
© БГУИР, 2005

Содержание

1. Цель работы
 2. Общие сведения
 3. Измерение параметров мостовых соединений СВЧ
 4. Порядок выполнения работы
 5. Содержание отчета
 6. Контрольные вопросы
- Литература

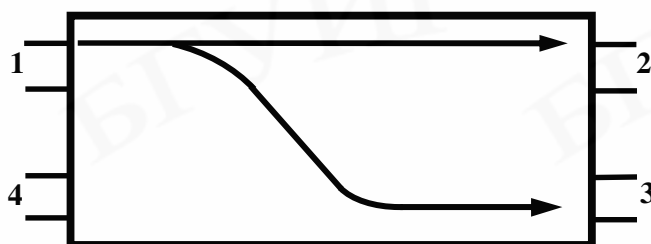
1 Цель работы

Ознакомление с устройством и принципом действия основных типов мостовых соединений СВЧ, исследование характеристик волноводного щелевого моста и двойного волноводного тройника.

2 Общие сведения

Мостовым соединением (или мостом) называется четырехплечное устройство (восьмиполусник), в котором при возбуждении любого из четырех плеч энергия электромагнитной волны в одно из выходных плеч не поступает, а делится поровну между двумя другими выходными плечами, в которых волны имеют постоянный фазовый сдвиг в рабочем диапазоне частот.

Схематическое изображение моста и распределение мощности в нем показано на рисунке 1.



1 – плечо, в которое поступает мощность от генератора;
2, 3 – выходные плечи; 4 – развязанное плечо

Рисунок 1 - Схематическое изображение моста

Мосты являются взаимными устройствами и представляют собой частный случай направленного ответвителя, у которого ответвленная мощность в выходных плечах 2 и 3 равна половине входной мощности в плече 1. Мосты находят широкое применение в технике СВЧ. Они используются главным образом в разнообразных измерительных схемах и коммутирующих устройствах. Так, например, с помощью моста могут быть измерены полное сопротивление и коэффициент отражения от нагрузки (рисунок 2).

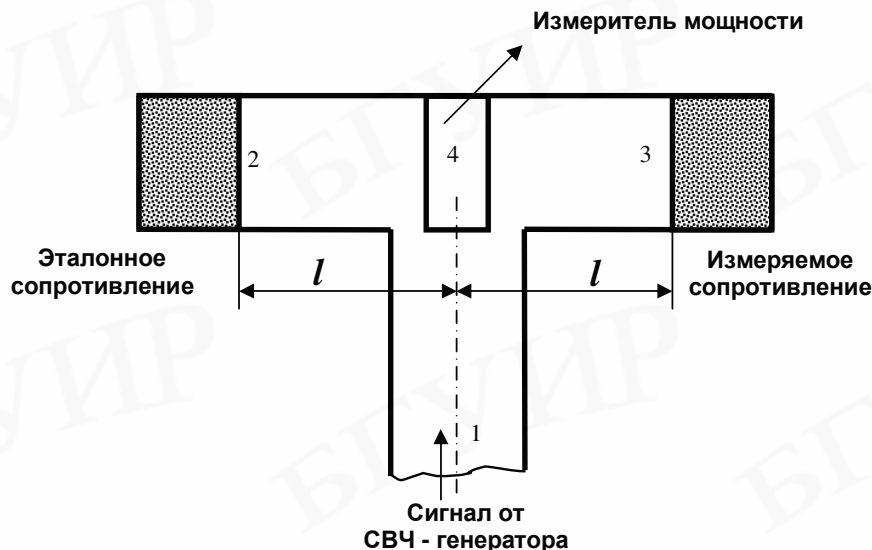


Рисунок 2 - Схема измерения полного сопротивления и отражений с применением моста

Методика измерения основана на сравнении неизвестного сопротивления, подключаемого к плечу 3, с градуированным эталонным сопротивлением в плече 2. Градуированное эталонное сопротивление обычно представляет собой практически идеально согласованную нагрузку, параллельно (или последовательно) которой подключается отрезок волновода с подвижным короткозамыкателем либо какая-нибудь другая неоднородность. Реактивное сопротивление этой неоднородности должно легко регулироваться в широких пределах и быть известно заранее с высокой степенью точности. Так как неизвестная и эталонная нагрузки находятся на равном расстоянии от входа (плечо 1) моста, то на вход обеих нагрузок волны поступают в фазе. Если полные сопротивления эталонной и измеряемой нагрузок отличаются друг от друга, то амплитуды и фазы отраженных от этих нагрузок волн различны. При этом часть энергии отраженных волн поступает в плечо 4, что и фиксируется с помощью измерителя мощности, подключенного к данному плечу. Энергия в плече 4 будет отсутствовать только в случае, когда полные сопротивления эталонной и измеряемой нагрузок равны. Путем регулировки величины полного сопротивления эталонной нагрузки добиваются нулевых показаний индикатора мощности в плече 4. Величина измеряемого сопротивления в этот момент равна величине эталонного.

Если вместо эталонного сопротивления в плечо 2 включить согласованную нагрузку, то половина энергии, отраженной от нагрузки в плече 3, поступит в плечо 4. В этом случае по показаниям индикатора мощности в плече 4 можно определить коэффициент отражения от нагрузки в плече 3.

Часто мост является составной частью антенных переключателей, смесителей, делителей мощности и др.

Одна из схем антенного волноводного переключателя, представленная на рисунке 3, состоит из двух щелевых мостов и двух разрядников между ними.

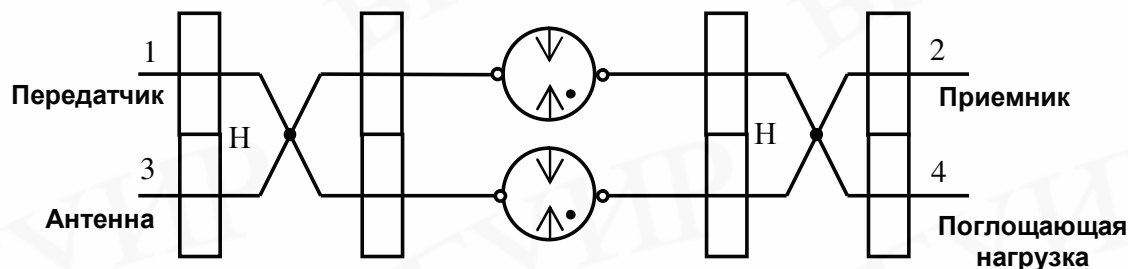


Рисунок 3 - Антенный переключатель с использованием мостов

При работе передатчика разрядники закорачивают выходные плечи левого моста и мощность из плеча 1 (из передатчика) проходит в плечо 3 к антенне. Мощность, просочившаяся в режиме передачи через разрядники, проходит из плеча 1 в плечо 4 и рассеивается в поглощающей нагрузке, но не попадает на вход приемника. В режиме приема разрядники не шунтируют волноводы, мощность из плеча 3 (из антенны) проходит в плечо 2 к приемнику и не попадает на вход передатчика и в поглощающую нагрузку. Попеременное подключение производится переключателем автоматически, и его частота может достигать нескольких тысяч раз в секунду.

Основными характеристиками мостовых соединений являются: коэффициент стоячей волны (КСВ) - K_m каждого из плеч при наличии согласованных нагрузок в остальных плечах и выраженные в децибелах переходное ослабление - C_{12} (C_{13}), коэффициент деления мощности - C_{23} , развязка - C_{14} , а также фазовые соотношения волн в выходных плечах.

1 Переходное ослабление C_{12} (C_{13}) - выраженное в децибелах отношение мощности на входе плеча 1 к выходной мощности рабочего плеча 2 (3):

$$C_{12} = 10 \log P_1 / P_2 \text{ [дБ]}. \quad (1)$$

2 Коэффициент деления мощности C_{23} - выраженное в децибелах отношение мощностей на выходе рабочих плеч 2 и 3:

$$C_{23} = 10 \log P_2 / P_3 \text{ [дБ]}. \quad (2)$$

3 Развязка C_{14} - выраженное в децибелах отношение мощности на входе плеча 1 к мощности на выходе развязанного плеча 4:

$$C_{14} = 10 \log P_1 / P_4 \text{ [дБ]}. \quad (3)$$

Если мощность, поступающая на вход моста (плечо 1), не делится поровну между выходными плечами 2, 3, то по величине отклонения переходного ослабления S_{12} (S_{13}) от 3 дБ можно судить о степени неидеальности данного моста. У идеального моста $S_{14} = \infty$.

Имеется большое число различных схем и конструкций мостов. Наиболее широкое распространение получили такие мостовые соединения, как волноводно-щелевые мосты, двойные волноводные тройники (двойной Т-мост), квадратурные мосты, кольцевые мосты и др.

В данной работе исследуются волноводно-щелевой мост и двойной Т-мост.

Волноводно-щелевой мост

Наиболее распространенным типом волноводно-щелевого моста является Н - плоскостной щелевой мост, схема которого представлена на рисунке 4 (переходы для подключения волноводов к плечам моста на рисунке не показаны).

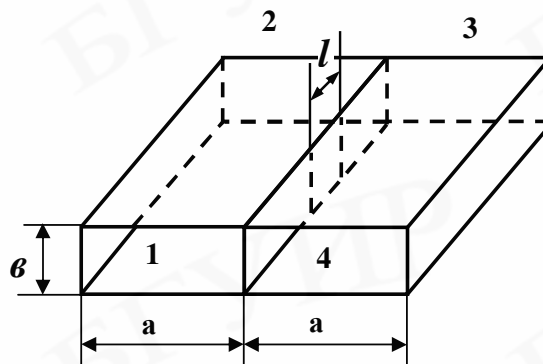


Рисунок 4 – Волноводно-щелевой мост

Как видно из рисунка, волноводно-щелевой мост состоит из двух одинаковых прямоугольных волноводов, по которым может распространяться только основной тип волны H_{10} . Эти волноводы имеют общую тонкую узкую стенку, часть которой вырезается на всю высоту, образуя щель (область связи).

Длина щели подбирается таким образом, чтобы в волноводно-щелевом мосте при возбуждении любого плеча происходило следующее:

- энергия, поступающая в любое его плечо, делилась поровну между двумя противолежащими плечами, а в смежное плечо энергия не поступала;
- сдвиг фаз между полями в плечах, противоположных входному, был равен $\pi/2$, причем опережала по фазе волна в том плече, продольная ось которого совпадает с продольной осью входного плеча.

Рассмотрим принцип действия волноводно-щелевого моста. Пусть к плечам 2, 3 и 4 моста подключены согласованные нагрузки, а в плече 1 возбуждается волна типа H_{10} с амплитудой E_m . Схема моста (вид сверху) и кривые распределения электрического поля, соответствующие этому случаю, показаны на рисунке 5.

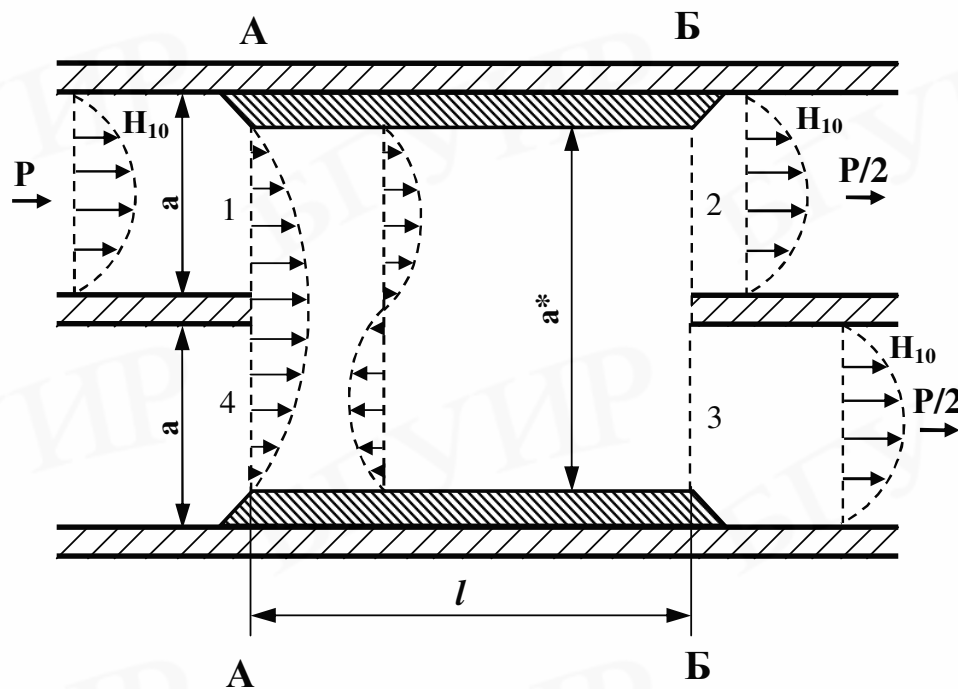


Рисунок 5 - Распространение электромагнитной волны в волноводно-щелевом мосте

Волна H_{10} , двигаясь через входное плечо, попадает в область связи (между сечениями А-А и Б-Б), где поперечный размер a^* становится примерно в два раза больше ширины волновода a плеча 1. В связи с нарушением однородности волновода здесь наряду с волной типа H_{10}^* возбуждаются также волны типа H_{20}^* , H_{30}^* и т.д. Так как a^* обычно выбирается из условия $\lambda < a^* < 3/2\lambda$, где λ - рабочая длина волны, то условие $\lambda < \lambda_{cr}$ выполняется только для волн H_{10}^* и H_{20}^* , а поля остальных типов волн оказываются чисто реактивными и дальше не распространяются. При этом, как видно из рисунка 5, поля волн H_{10}^* и H_{20}^* имеют в начале щели (сечение А-А) у плеча 1 одинаковую фазу, а у плеча 4 - противофазны. Это позволяет обозначить амплитуду напряженности поля каждой из волн H_{10}^* и H_{20}^* через $0,5 E_m$ и считать, что амплитуда напряженности результирующего поля в начале щели $E_{1m} = E_m$ и $E_{4m} = 0$, т.е. волна в плече 4 распространяться не будет.

Таким образом, волна, распространяющаяся вдоль щели, есть совокупность синфазной (в верхней половине) и противофазной (в нижней половине) волн с амплитудами полей, которые в два раза меньше, чем амплитуда волны на входе моста. Их фазовые скорости и длины волн в волноводе различны.

Так как для волны H_{10}^* критическая длина волны $\lambda_{кр} = 2a^*$, а для волны H_{20}^* - $\lambda_{кр} = a^*$, то для волн H_{10}^* и H_{20}^* соответственно имеем:

$$v_{\phi}^{10} = \frac{c}{\sqrt{1 - (\lambda / 2a^*)^2}}, \quad (4)$$

$$\Lambda^{10} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (\lambda / 2a^*)^2}}, \quad (5)$$

$$v_{\phi}^{20} = \frac{c}{\sqrt{1 - (\lambda / a^*)^2}}, \quad (6)$$

$$\Lambda^{20} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (\lambda / a^*)^2}}. \quad (7)$$

Так как фазовые скорости распространения волн H_{10}^* и H_{20}^* отличаются друг от друга, то при прохождении совместного участка волноводов между этими волнами возникают фазовые сдвиги, которые будут расти по мере удаления от сечения А-А.

$$\varphi^{10} = \frac{2 l \pi}{\Lambda^{10}}, \quad (8)$$

$$\varphi^{20} = \frac{2 l \pi}{\Lambda^{20}}. \quad (9)$$

Можно так подобрать длину щели l , чтобы на ней укладывались, например, $1/2\Lambda^{20}$ и $3/4\Lambda^{10}$. Тогда на входе в плечо 2 векторы $0,5 E_m$ будут отставать по фазе относительно вектора электрического поля на выходе плеча 1 на 180° для волны типа H_{20}^* и на 270° для волны типа H_{10}^* . Такие же фазовые сдвиги возникнут между векторами электрического поля на входе в плечо 3 (сечение В-В) по отношению к выходу плеча 4 (сечение А-А). Очевидно, что амплитуды результирующих электрических полей на входах плеч 2 и 3, где расширенный волновод снова переходит в два волновода обычного сечения, окажутся равными $E_{2m} = E_{3m} = E_m / \sqrt{2}$, поскольку мощности пропорциональны квадрату напряженности поля; мощность волны, входящей в мост через плечо 1, разделится поровну между плечами 2 и 3, т.е. этот мост трехдецибелный.

Таким образом, результирующее поле в плече 3 отстает по фазе от поля в плече 2 на $\pi/2$, т.е. $\varphi^{10} - \varphi^{20} = \pi/2$. Нетрудно показать, что длина щели при этом должна быть равна:

$$l = \frac{\Lambda^{10} \Lambda^{20}}{4(\Lambda^{20} - \Lambda^{10})}. \quad (10)$$

Для получения сдвига фаз на 90° длина щели обычно выбирается $l = 1,4a$, что соответствует также максимальной диапазонности.

Благодаря геометрической симметрии моста аналогичное деление мощности и то же соотношение фаз в выходных плечах будут иметь место при поступлении волны H_{10} в любое другое плечо.

Преобразование волн в начале области связи и обратное преобразование в конце этой области сопровождаются отражениями. В результате в развязанное плечо в действительности просачивается некоторая, хотя и незначительная (примерно 0,2 %) часть мощности. Для компенсации этих отражений в центре щели помещают согласующий элемент (как правило, подстроечный винт). Хорошо согласованный волноводно-щелевой мост позволяет получить развязку плеч более 20 дБ в полосе частот 15...20 %, при неравномерности распределения мощности, не превышающей 0,3...0,5 дБ и КСВ = 1,15...1,3.

Двойной Т-мост

Двойной Т-мост состоит из четырех одинаковых прямоугольных волноводов, по которым может распространяться только основной тип волны H_{10} , соединенных в единое устройство, показанное на рисунке 6.

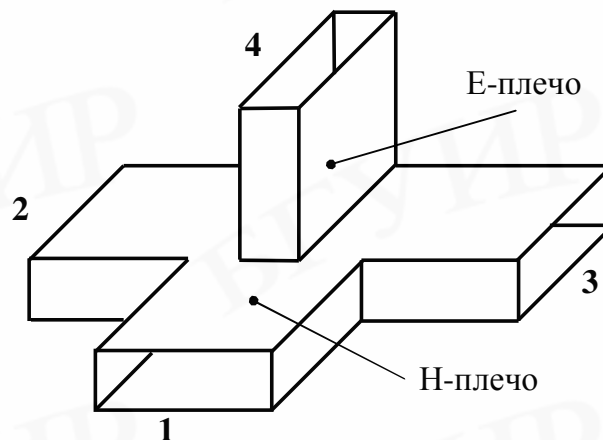
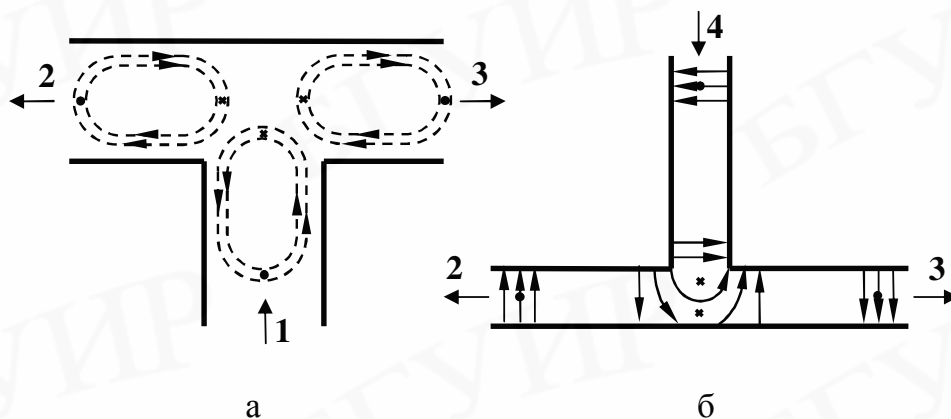


Рисунок 6 - Двойной Т-мост

Как видно из рисунка, он представляет собой комбинацию из двух Т-образных волноводных тройников, чем и объясняется его название “двойной волноводный тройник”. Один тройник, образованный плечами 1, 2 и 3, лежит в плоскости магнитных силовых линий и называется Н-тройником; другой, образованный плечами 3, 2 и 4, лежит в плоскости электрических силовых линий и называется Е-тройником. Характерные плечи этих тройников 1 и 4 называются соответственно плечом Н и Е. Плечи 2 и 3 носят название испытательных.

Рассмотрим принцип действия двойного Т-моста. Предположим, что в идеальном симметричном двойном Т-мосте вход плеча 1 возбуждается волной H_{10} , а к плечам 2, 3 и 4 подключены согласованные нагрузки. Так как вектор электрического поля волны H_{10} в Н-плече параллелен продольной оси волновода в Е-плече (рисунок 7, а), то в нем могут возникнуть лишь волны высшего типа, распространение которых невозможно, ибо волновод в Е-плече рассчитан на прохождение только волны H_{10} . Следовательно, энергия в Е-плечо не поступает и оно будет развязанным или изолированным. Мощность, подводимая к Н - плечу, делится поровну между плечами 2 и 3. При этом волны в плечах 2 и 3 на равных расстояниях от плоскости симметрии системы оказываются синфазными. В соответствии с принципом взаимности справедливо и обратное утверждение: при синфазном возбуждении плеч 2 и 3 двойного Т-моста волнами равной амплитуды энергия поступит только в Н-плечо.



а - подача энергии СВЧ в Н-плечо;
б - подача энергии СВЧ в Е-плечо

Рисунок 7 - Эпюры полей волны в двойном волноводном тройнике

Перенесем генератор в Е-плечо, а в Н-плечо введем согласованную нагрузку. Так как вектор электрического поля волны H_{10} в Е-плече перпендикулярен узким стенкам волновода в Н-плече (рисунок 7, б), то это делает невозможным возбуждение в нем волны H_{10} . Следовательно, энергия в Н-плечо не поступает и оно будет развязанным или изолированным. Волна, поступающая из

Е-плеча, также разделится на две равные части между плечами 2 и 3. При этом волны в плечах 2 и 3 на равных расстояниях от плоскости симметрии в отличие от предыдущего случая будут противофазными. В соответствии с принципом взаимности при противофазном возбуждении плеч 2 и 3 двойного Т-моста волнами равной амплитуды энергия поступит только в Е-плечо. Нетрудно убедиться, что при подаче мощности в плечо 2 или 3 мощность не пойдет в противоположное ему плечо (3 или 2), а разделится пополам между плечами Е и Н, причем фазы оказываются одинаковыми, а плоскости поляризации разными (взаимно перпендикулярными). Это можно объяснить следующим образом.

Если бы Е-плечо отсутствовало, то мощность, подаваемая в плечо 2, разделилась бы пополам между плечом 3 и Н-плечом, причем волны, возбуждаемые в этих плечах, будут синфазными. Если бы отсутствовало Н-плечо, то мощность разделилась бы между плечом 3 и Е-плечом, причем волна в плече 3 была бы в противофазе как с волной в Е-плече, так и с возбуждающей волной в плече 2. При наличии обоих плеч Е и Н волны, попадающие в плечо 3, будут равны по величине, но противоположны по фазе и взаимно уничтожаются, т.е. в плечо 3 мощность ответвляться не будет.

Таким образом, мы можем отметить, что в двойном Т-мосте между Е- и Н-плечами, так же как и между плечами 2 и 4, существует взаимная развязка, т.е. одной из характеристик его свойств является наличие одного плеча, свободного от мощности. Однако это возможно только при полном согласовании всех плеч двойного Т-моста.

В питающем же волноводе согласование не будет иметь места. Это можно объяснить при условии, если каждый волновод рассматривать как некоторую эквивалентную ему линию с характеристическим сопротивлением Z_c . Тогда линия, эквивалентная волноводу Н, оказывается нагруженной двумя согласованными линиями 2 и 3, включенными параллельно, и, следовательно, нагрузка на волновод Н равна $Z_c / 2$. Линия, эквивалентная волноводу Е, нагружена согласованными линиями 2 и 3, включенными последовательно. Следовательно, нагрузка на волновод Е равна $2Z_c$. В действительности конструктивное соединение волноводов в месте разветвления представляет собой некоторую неоднородность по отношению к волне в питающем волноводе Е или Н, которая будет создавать отражение и, как следствие, появится рассогласованность его плеч с сопротивлением подводящих линий. Поэтому для обеспечения нормальной работы двойного Т-моста его необходимо согласовывать с питающим волноводом путем включения соответствующих согласующих элементов в виде штырей, диафрагм и др.

Замечательным свойством двойного тройника является также то, что согласование, выполненное для плеч Н и Е, автоматически приводит к согласованию боковых плеч 2 и 3.

При нарушении согласования Н- и Е- тройников моста параметры моста существенно ухудшаются. В частности, энергия из плеча 1 начинает поступать в плечо 4, а при возбуждении плеча 2 часть энергии проходит в 3, т.е. идеальным мостом является только полностью согласованный двойной волноводный

тройник, называемый иногда в литературе “магическим Т”. Его рабочий диапазон ограничен полосой частот, в пределах которой сохраняется согласование Н- и Е-тройников. Реальные конструкции двойных Т-мостов имеют КСВ=1,2 в полосе частот 10-15%. Неизбежная асимметрия тройников не позволяет получить развязки плеч более чем 30-50 дБ.

Кольцевые мосты

Наиболее распространенная схема волноводного кольцевого моста представлена на рисунке 8. Мост образован четырьмя волноводными Е - плоскостными Т-тройниками, соединенными друг с другом свернутыми по дуге окружности отрезками прямоугольного волновода.

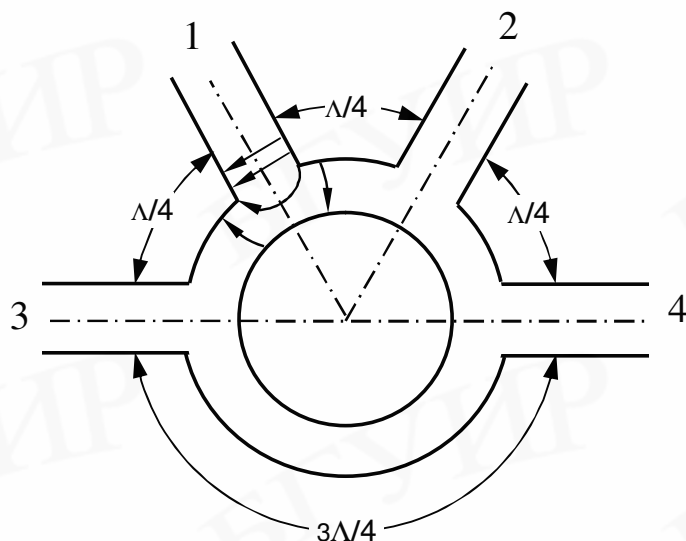


Рисунок 8 – Волноводный кольцевой мост

Пусть к плечам 2, 3 и 4 подключены согласованные нагрузки, а к плечу 1 подведена энергия от генератора. Так как Е-тройник возбуждает в боковых плечах противофазные волны равной амплитуды, то по кольцу навстречу друг другу будут распространяться две волны: одна обегает кольцо по часовой стрелке, а вторая – против. Таким образом, за счет разности хода на входе плеч 2 и 3 правая и левая волны противофазны, а на вход плеча 4 те же волны приходят в фазе. Энергия же в Е-тройник поступает только при противофазном возбуждении. Поэтому из плеча 1 кольцевого моста энергия поступает в плечи 2 и 3 и не проходит в плечо 4.

Определив аналогично фазы волн на входе соответствующих плеч при возбуждении плеч 2, 3 и 4, приходим к выводу: в кольцевом мосте энергия делится поровну между двумя рядом расположенными плечами, т.е. из 1 переходит в 2 и 3, из 2 – в 1 и 4, из 3 – в 1 и 4, из 4 – в 2 и 3.

В длинноволновой части СВЧ диапазона, где использование волноводов нецелесообразно, применяют кольцевые мосты на коаксиальных (рисунок 9) и полосковых (рисунок 10) линиях.

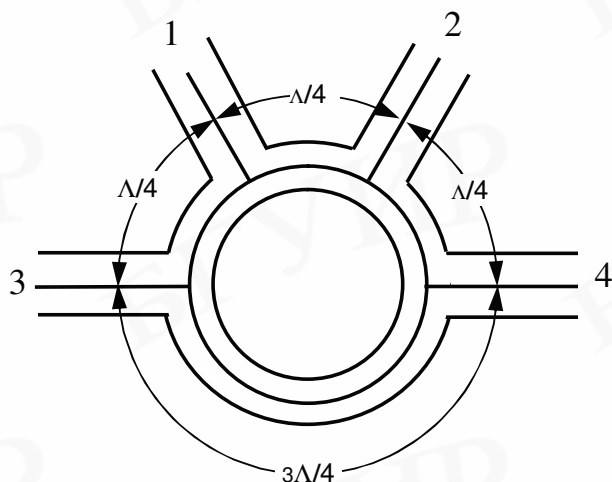


Рисунок 9 – Коаксиальный кольцевой мост

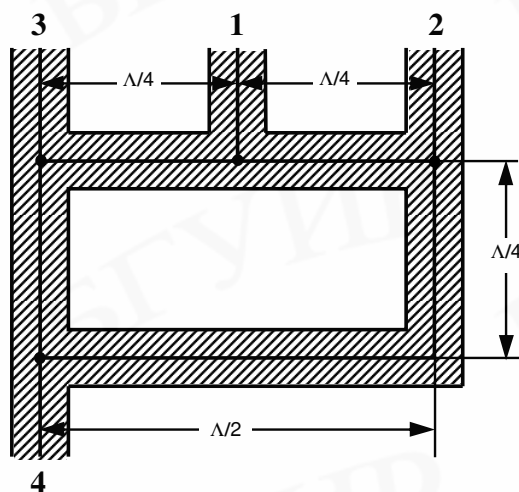


Рисунок 10 – Полосковый кольцевой мост

Мосты на рисунках 9 и 10 отличаются только конструкцией, длина отрезков между плечами в обоих случаях одинакова. Однако мост на рисунке 10 применяют чаще, так как компоновка устройств СВЧ с применением прямоугольных мостов оказывается несколько проще.

Основными недостатками кольцевых мостов являются:

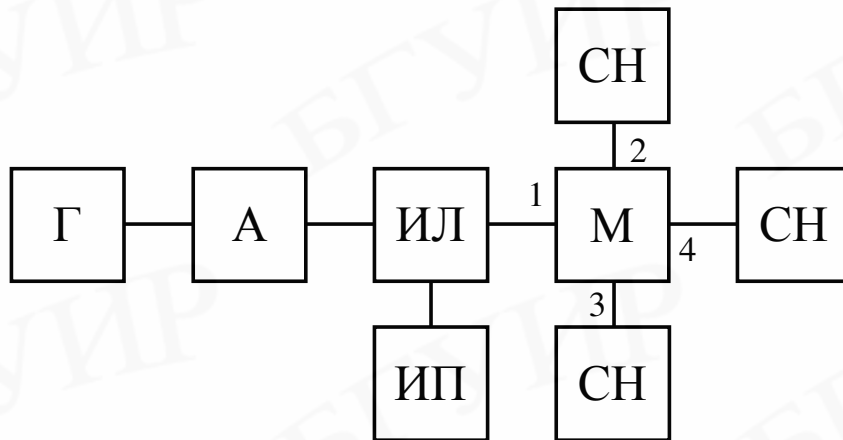
- небольшая ширина рабочей полосы частот, так как выбор длины всех отрезков линий в кольце жестко связан с центральной частотой рабочего диапазона;
- весьма значительные габариты.

3 Измерение параметров мостовых соединений СВЧ

Основными параметрами мостовых соединений СВЧ, измеряемыми в данной работе, являются коэффициенты стоячей волны (КСВ) K_m каждого из плеч при наличии согласованных нагрузок в остальных плечах, переходное ослабление S_{12} , коэффициент деления S_{23} и развязка S_{14} . Эти параметры в общем случае могут быть определены обычными методами измерения КСВ, затухания и коэффициентов передачи. Так, например, для измерения S_{12} , S_{23} и S_{14} наиболее широкое применение нашли метод замещения и метод непосредственного измерения мощности на выходе соответствующих плеч мостового соединения.

В данной работе численные значения K_m , S_{12} и S_{14} в рабочем диапазоне частот НО измеряются на дискретных частотах, т.е. зависимости $K_m(f)$, $S_{12}(f)$ и $S_{14}(f)$ строятся по точкам.

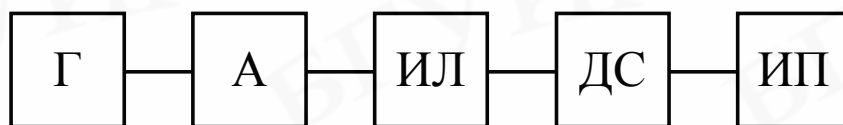
1 Измерение K_m производится по структурной схеме, представленной на рисунке 11.



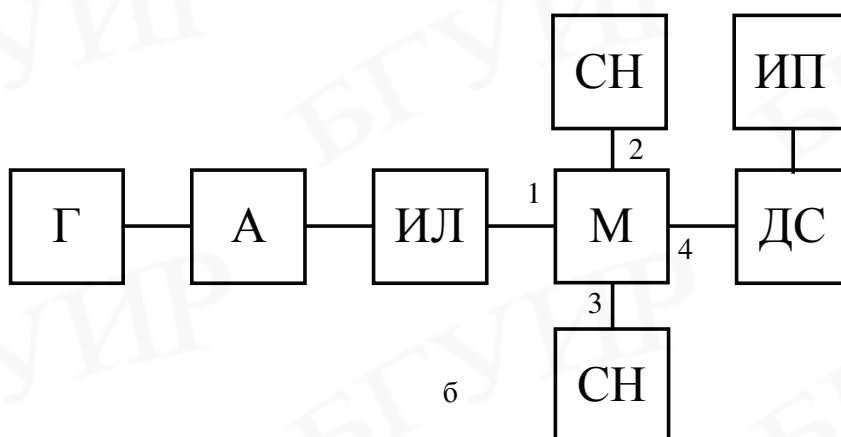
Г - генератор СВЧ, А - прецизионный переменный аттенюатор;
ИЛ - измерительная линия, М – Т-мост; СН - согласованная нагрузка;
ИП - индикаторный прибор

Рисунок 11 - Структурная схема измерения K_m

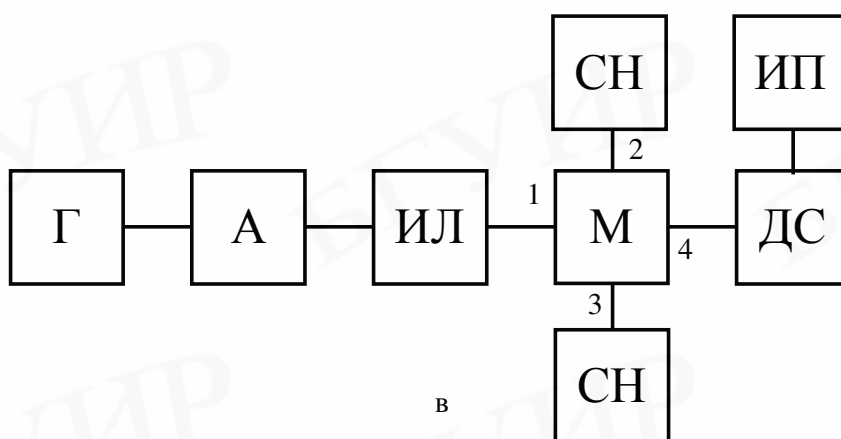
Следует настроить генератор на заданную частоту, обеспечив максимальную мощность на его выходе. Регулируя ослабление аттенюатора, подать СВЧ колебания в тракт и произвести настройку измерительной линии. Перемещая измерительную головку линии и варьируя ослаблением аттенюатора, добиться значения тока детектора измерительной линии в максимуме поля в последней трети шкалы индикаторного прибора и зафиксировать величину максимума $I_{\max}$ в относительных единицах. Затем, перемещая измерительную головку вдоль измерительной линии, найти минимальное значение тока ее детектора и зафиксировать по индикаторному прибору величину $I_{\min}$.



а



б



в

Г - генератор СВЧ; А - прецизионный переменный аттенюатор;
 М – Т-мост; СН - согласованная нагрузка;
 ДС -детекторная секция; ИП - индикаторный прибор

Рисунок 12 - Структурная схема измерения переходного ослабления и развязки Т-моста

Учитывая квадратичность характеристики детектора измерительной линии, получим:

$$K = \sqrt{I_{\max}/I_{\min}} \quad (11)$$

Тогда

$$K_M = |K - K_{CH}| + 1, \quad (12)$$

где K_{CH} - коэффициент стоячей волны согласованной нагрузки. Численные значения K_{CH} на каждой частоте рабочего диапазона определяются методом прямых измерений по рассмотренной выше методике, когда мост исключен из тракта.

2 Измерение C_{12} и C_{14} производится методом замещения с помощью эталонного (прецизионного) переменного аттенюатора по структурной схеме, представленной на рисунке 12.

Методика измерений

1 Собрать схему, приведенную на рисунке 12, а. Настроить генератор на заданную частоту, обеспечив максимальную мощность на его выходе. Подать СВЧ мощность в тракт и, регулируя ослабление аттенюатора, произвести настройку детекторной секции с согласованным входом.

Добиться, чтобы показания индикаторного прибора были при этом в последней трети его наиболее чувствительной шкалы. Отметить уровень выходного сигнала по индикаторному прибору и начальное ослабление A_0 , вносимое аттенюатором.

2 Собрать схему, приведенную на рисунке 12, б, и, уменьшая ослабление аттенюатора, добиться первоначальных показаний индикатора. Отметить ослабление A_1 , вносимое аттенюатором.

Переходное ослабление определяется как разность показаний:

$$C_{12} = A_0 - A_1 \text{ [дБ]}. \quad (13)$$

3 Собрать схему представленную на рисунке 12, в, и, уменьшая ослабление аттенюатора, добиться первоначальных показаний индикатора. Отметить ослабление A_2 , вносимое аттенюатором.

Развязка определяется как разность показаний аттенюатора:

$$C_{14} = A_0 - A_2 \text{ [дБ]}. \quad (14)$$

В том случае, если при измерении развязки C_{14} не удастся получить первоначальных показаний индикатора, следует повторить измерения (пп.1-3) при меньших значениях показаний индикаторного прибора.

4 Порядок выполнения работы

- 1 Ознакомиться с аппаратурой, относящейся к данной работе.
- 2 Измерить значения K_m , C_{12} (C_{13}) и C_{14} волноводного Т-моста в указанном преподавателем частотном диапазоне. Результаты измерений свести в таблицу (см. ниже).

Измеряемый параметр	Частота				
$I_{\max}$					
$I_{\min}$					
K_m					
A_0					
A_1					
A_2					
$C_{12}(C_{13})$					
C_{14}					

- 3 Произвести расчеты и оформить отчет.

5 Содержание отчета

- 1 Краткая формулировка цели работы.
- 2 Структурные схемы измерений.
- 3 Таблицы экспериментальных данных.
- 4 Результаты расчета и графики зависимостей $K_m(f)$, $C_{12}(f)$ и $C_{14}(f)$ волноводного Т-моста.
- 5 Краткие выводы.

6 Контрольные вопросы

- 1 Что называется мостом СВЧ?
- 2 Какими параметрами характеризуются мосты?
- 3 Объясните принцип действия волноводно-щелевого моста.
- 4 Какие типы волн могут распространяться в области щели волноводно-щелевого моста?
- 5 Из каких соображений выбирается длина щели в волноводно-щелевом мосте?
- 6 Объясните принцип действия Т-моста.
- 7 Каков взаимный сдвиг фаз между полями в выходных плечах Т-моста при питании: а) со стороны Е-плеча; б) со стороны Н-плеча?
- 8 Объясните методику измерения параметров мостов.
- 9 Назовите области применения мостов СВЧ.

Литература

- 1 Аверьянов В.Я. Антенны и устройства СВЧ. Разд. 2: Учеб. пособие.- Мн.: МРТИ, 1982. – 90 с.
- 2 Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ. – М.: Высш. шк., 1970. Т.I. - 440 с.
- 3 Вольман В.И., Пименов Ю.В. Техническая электродинамика. -М.: Связь, 1971. - 487 с.
- 4 Фальковский О.И. Техническая электродинамика. - М.: Связь, 1976. – 432 с.
- 5 Милованов О.С., Собенин Н.П. Техника сверхвысоких частот. - М.: Атомиздат, 1960. - 464 с.

Учебное издание

Исследование мостовых соединений

Методические указания к лабораторной работе №2
по дисциплине АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА СВЧ
для студентов специальности 39 01 01 «Радиотехника»
всех форм обучения

Составители:

Кижлай Игорь Николаевич,
Кухарев Александр Васильевич,
Чмырев Николай Алексеевич,
Юрцев Олег Анатольевич

Редактор Т.А. Лейко
Корректор Е.Н. Батурчик

Подписано в печать 16.02.2005.
Гарнитура «Таймс».
Уч.-изд. л. 0,8.

Формат 60х84 1/16.
Печать ризографическая.
Тираж 200 экз.

Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 1,28.
Заказ 255.

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
Лицензия на осуществление издательской деятельности №02330/0056964 от 01.04.2004.
Лицензия на осуществление полиграфической деятельности №02330/0133108 от 30.04.2004.
220013, Минск, П. Бровки, 6

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра «Антенн и устройств СВЧ»

ИССЛЕДОВАНИЕ ФЕРРИТОВЫХ ВЕНТИЛЕЙ

Методические указания к лабораторной работе №3
по дисциплине АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА СВЧ
для студентов специальности 39 01 01 «Радиотехника»
всех форм обучения

Минск 2005

УДК 621.396. 67 (075.8)
ББК 32. 845 я 73
И 85

Составители:
И.Н. Кижлай, А.В. Кухарев, Н.А. Чмырев, О.А. Юрцев

Исследование ферритовых вентилях: Метод. указ. к лаб. раб. №3 по
И 85 дисц. «Антенны и устройства СВЧ» для студ. спец. 39 01 01 «Радиотех-
ника» всех форм обуч./ Сост. И.Н. Кижлай, А.В. Кухарев, Н.А. Чмырев,
О.А. Юрцев.– Мн.: БГУИР, 2005. - 16 с.: ил.

В методических указаниях содержатся сведения о применении, принципах работы, конструкциях и разновидностях ферритовых вентилях на различных типах линий передачи. Рассмотрены основные параметры ферритовых вентилях, приведены методика их экспериментального определения и контрольные вопросы, которые помогают студентам самостоятельно овладеть данным разделом. Приведена методика выполнения лабораторной работы и оформления отчета.

Материал может быть рекомендован для студентов специальностей 39 01 02, 39 01 03 и 45 01 02 при изучении курсов, содержащих раздел “Устройства СВЧ”.

УДК 621.396. 67 (075.8)
ББК 32. 845 я 73

Содержание

1. Цель работы
 2. Общие сведения
 3. Измерение параметров ферритовых вентилей
 4. Порядок выполнения работы
 5. Содержание отчета
 6. Контрольные вопросы
- Литература

1 Цель работы

Ознакомление с применением, устройством и принципом действия ферритовых вентилях, исследование основных характеристик волноводного и коаксиального резонансного ферритового вентиля.

2 Общие сведения

Ферритовый вентиль (ФВ) - это невзаимное двуплечее устройство (четырёхполюсник), не создающее существенного затухания для волны, двигающейся по линии передачи в одном (прямом) направлении, но вносящее большое затухание для другого (обратного) направления движения энергии.

ФВ нашли широкое практическое применение для развязки различных участков СВЧ тракта между собой, а также исключения вредного влияния отражений на передающие и приемные устройства РЛС.

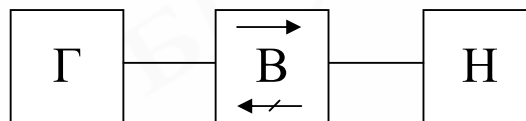


Рисунок 1 – Ферритовый вентиль в качестве развязывающего элемента

Применение ФВ резко улучшает работу генераторов СВЧ колебаний, способствует уменьшению затягивания частоты, улучшению спектра частот, устранению эффекта длинной линии и т.д. ФВ включается между генератором и нагрузкой (рисунок 1) таким образом, чтобы энергия падающей волны, распространяющейся от генератора к нагрузке, проходила ФВ в прямом направлении (оно указывается стрелкой на корпусе ФВ) с малыми потерями, а волна, отраженная от нагрузки и распространяющаяся в обратном направлении, поглощалась в вентиле.

Основными характеристиками ФВ являются: вносимые потери в прямом направлении $C_{пр}$, затухание в обратном направлении $C_{обр}$, диапазон и полоса рабочих частот, коэффициент стоячих волн (КСВ) K_v входа в полосе рабочих частот.

1 Прямые потери $C_{пр}$ - выраженное в децибелах отношение мощности на входе к выходной мощности в прямом направлении:

$$C_{пр} = 10 \log P_{вх} / P_{вых} \text{ [дБ]}. \quad (1)$$

2 Обратное затухание $C_{\text{обр}}$ - выраженное в децибелах отношение мощности на входе к выходной мощности в обратном направлении:

$$C_{\text{обр}} = 10 \log P_{\text{вх}} / P_{\text{вых}} [\text{дБ}]. \quad (2)$$

Эффективность вентиля (качество развязки) можно характеризовать вентильным отношением (добротностью) - отношением ослаблений обратной и прямой волн, выраженных в децибелах:

$$B = C_{\text{обр}} / C_{\text{пр}}. \quad (3)$$

В реальных конструкциях ФВ $C_{\text{пр}}$ обычно составляет величину от 0,1 до 1 дБ, а $C_{\text{обр}}$ - от 10 до 70 дБ. Коэффициент стоячей волны K_v при этом не превышает 1,1.

В зависимости от назначения и условий работы ФВ выбирают с такими характеристиками, чтобы они в полной мере удовлетворяли определенным требованиям, т.е. необязательно имели одновременно высокие показатели по всем характеристикам.

Основным “рабочим телом” ФВ является ферритовая пластина или ферритовый стержень. Ферриты представляют собой твердые тела или монокристаллы, образованные спеканием порошка окиси железа с окислами никеля, цинка, марганца, хрома, меди и др. Характерным свойством ферритов является сочетание электрических свойств хорошего диэлектрика ($\mu=10-70$ и $\sigma=0,0005-0,002$) с магнитными свойствами ферромагнетика. Начальная относительная магнитная проницаемость СВЧ ферритов в слабых низкочастотных полях $\mu=10-3000$. На СВЧ при отсутствии постоянного магнитного поля начальная μ ферритов лишь незначительно отличается от единицы.

Поведение ферритов на СВЧ в присутствии внешнего постоянного магнитного поля может быть рассмотрено с учетом собственных механического и магнитного моментов электрона.

Если электрон рассматривать как вращающуюся электрически заряженную массу, то во многих отношениях он напоминает механический гироскоп (волчок), обладающий собственным механическим моментом количества движения S и магнитным спиновым моментом M , возникающими благодаря вращению электрона и направленными в противоположные стороны. При наложении внешнего постоянного магнитного поля напряженностью H_0 , которое не совпадает с направлением M (рисунок 2), на электрон начнет действовать пара сил, т.е. момент вращения. Под действием этого момента вращения спины электрона стремятся ориентироваться по направлению приложенного поля, прецессируя подобно гироскопу вокруг оси, совпадающей по направлению с H_0 , образуя с ним правовинтовую систему.

Частота свободной прецессии, называемая частотой ферромагнитного резонанса, может быть определена из выражения

$$\omega_0 = \gamma H_0, \quad (4)$$

где H_0 - напряженность действующего постоянного магнитного поля в эрстедах;

$\gamma = 2,8$ МГц/эрстед - гиромагнитное отношение электрона, т.е. отношение его магнитного M и механического S моментов.

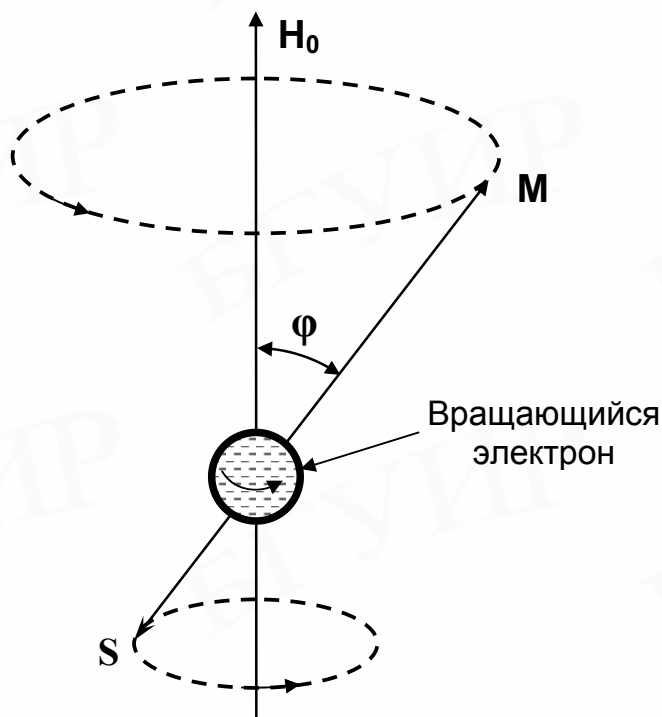


Рисунок 2 – Свободная прецессия магнитного момента электрона в постоянном магнитном поле

При отсутствии потерь свободная прецессия продолжалась бы при неизменном угле φ . В реальных же ферромагнитных средах всегда имеют место потери, поэтому угол φ начинает быстро уменьшаться (конец вектора M движется по свертывающейся спирали). Через время порядка 10^{-8} с свободная прецессия практически полностью исчезает, векторы магнитных спиновых моментов всех электронов устанавливается параллельно H_0 , феррит оказывается намагниченным до насыщения.

Если теперь воздействовать на такой феррит высокочастотным магнитным полем H , с круговой поляризацией и частотой ω в направлении, перпендикулярном H_0 (рисунок 3), то при совпадении направлений вращения M и H в

феррите наблюдается так называемая вынужденная прецессия, нарастание амплитуды которой (увеличение угла φ) ограничено магнитными потерями. В результате наступает такой режим ($\varphi = const$), при котором энергия высокочастотного магнитного поля рассеивается в виде тепла в кристаллической решетке феррита.

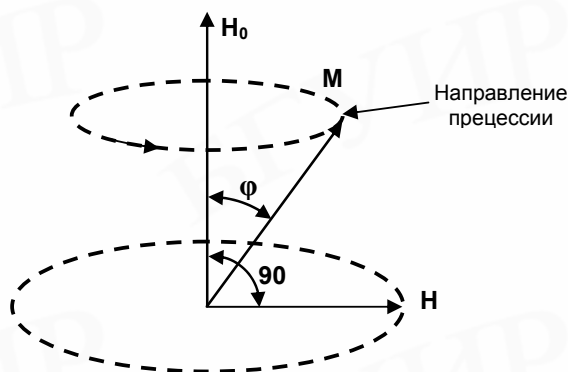


Рисунок 3 - Вынужденная прецессия магнитного момента электрона

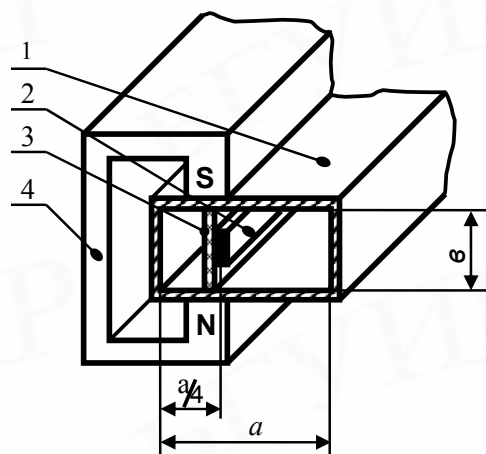
При $\omega \neq \omega_0$ эффект взаимодействия уменьшается и потери в феррите снижаются. В случае противоположных направлений вращения M и H поле СВЧ и вещество феррита практически не взаимодействуют. Феррит для такого поля является диэлектриком и поглощения энергии в феррите практически не происходит. Описанное явление называется явлением ферромагнитного резонанса и играет важную роль в теории и практике применения ферритов на СВЧ.

Рассмотренное явление невзаимного резонансного поглощения электромагнитных волн при ферромагнитном резонансе в поперечно намагниченном феррите используется в исследуемых в данной работе резонансных волноводных и коаксиальных ферритовых вентиллях.

Резонансный ФВ в прямоугольном волноводе

Конструкция резонансного ФВ, исследуемого в данной работе, приведена на рисунке 4.

Для получения невзаимного эффекта в соответствии с изложенной выше теорией при конструировании резонансного ФВ на базе прямоугольного волновода, работающего на волне H_{10} , желательно расположить феррит в том участке волновода, где высокочастотное магнитное поле имеет круговую поляризацию.



1 - прямоугольный волновод; 2 - тонкая ферритовая пластина;
3 - диэлектрическая пластина; 4 - постоянный магнит

Рисунок 4 - Волноводный ФВ на эффекте ферромагнитного резонанса

Хотя волна H_{10} в целом имеет линейную поляризацию, как видно из рисунка 5, существуют две продольные плоскости $x = const$, параллельные узкой стенке волновода, где высокочастотное магнитное поле имеет круговую поляризацию, причем направления вращения H в этих плоскостях взаимно противоположны и зависят от направления движения волны по волноводу. Эти плоскости расположены на расстоянии $x = \frac{a}{\pi} \arctg \frac{\lambda_B}{2a}$ (т.е. приблизительно $x = a/4$) от узких стенок волновода.

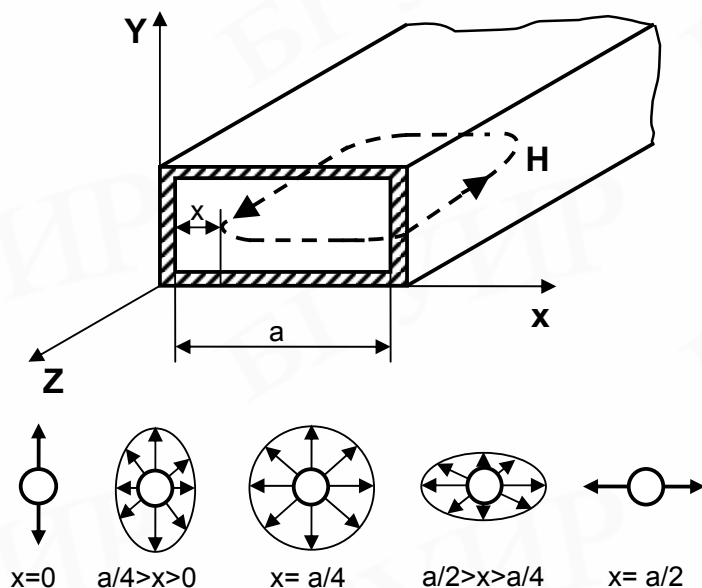
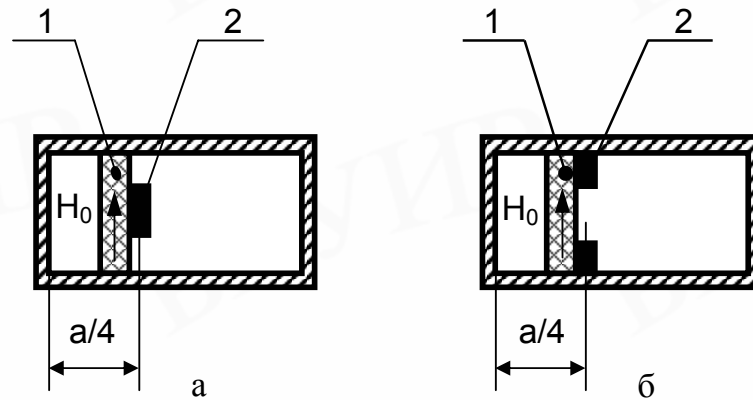


Рисунок 5 - К рассмотрению поляризации высокочастотного магнитного поля при волне типа H_0 в различных сечениях прямоугольного волновода

Поместив в одну из этих плоскостей ферритовую пластинку и обеспечив посредством постоянного магнита постоянное магнитное поле H_0 такой величины, чтобы выполнялось условие поперечного ферромагнитного резонанса, получим, что феррит поглотит мощность волны, создающей правополяризованное высокочастотное магнитное поле, пропуская по тому же отрезку волновода волну, распространяющуюся в противоположном направлении, практически без ослабления. Таким образом, данный волновод с ферритовой пластинкой является вентилем.

При изменении частоты электромагнитных колебаний меняется соотношение между продольными и поперечными составляющими высокочастотного магнитного поля. Сечение с круговой поляризацией при увеличении частоты смещается в сторону узкой стенки, а при уменьшении частоты - к центру волновода. Феррит оказывается не в оптимальном положении на всех частотах, кроме резонансной, что влечет за собой увеличение $C_{пр}$ и уменьшение $C_{обр}$ ФВ.

Чтобы ослабить зависимость структуры поля от частоты, т.е. расширить частотный диапазон ФВ, в волновод вводят пластину из диэлектрика с высокой диэлектрической проницаемостью и весьма малыми потерями, а тонкую ферритовую пластинку наклеивают либо непосредственно на диэлектрик (рисунок 6, а), либо на широкую стенку волновода рядом с диэлектриком (рисунок 6, б).



1 – диэлектрик; 2 – феррит

Рисунок 6 - Расположение диэлектрической и ферритовой пластин в прямоугольном волноводе

Диэлектрик концентрирует поле около феррита и позволяет получить в широкой полосе частот вентильное отношение, близкое к максимальному, при большом обратном затухании.

Вся СВЧ мощность обратной волны рассеивается в виде тепла в массе феррита, что ограничивает величину предельно допустимой средней мощности (единицы ватт). Для улучшения отвода тепла на стенки волновода предпочтительнее использовать вариант, приведенный на рисунке 6, б. Здесь ферритовые пластинки располагаются горизонтально в плоскости x . Этим уменьшается также опасность пробоя. Такие вентили с относительно громоздкой магнитной

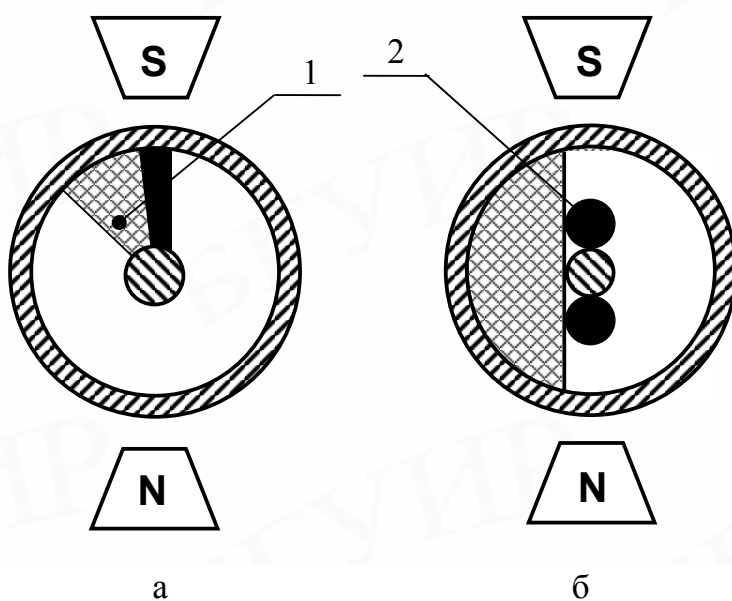
системой рекомендуется использовать в трактах с уровнем средней мощности до 100 Вт.

Для увеличения широкополосности ФВ можно также создавать неоднородное по длине ферритовой пластинки постоянное магнитное поле. Тогда каждой частоте рабочего диапазона будет соответствовать максимум резонансного поглощения в определенной части пластинки.

Коаксиальные ФВ

Особенностью конструкций коаксиальных ФВ является необходимость такого искажения поля Т-волны, чтобы в ней наряду с поперечной составляющей появилась продольная составляющая магнитного поля и результирующий вектор $\mathbf{H}$ был поляризован по кругу. Для этого коаксиальную линию передачи частично заполняют диэлектриком с большим значением ε (рисунок 7, а).

Подбором размеров и формы диэлектрического вкладыша при заданных ε и f удастся получить область круговой поляризации высокочастотного магнитного поля в феррите и тем самым снизить потери прямой волны и получить наибольшее вентильное отношение.



1 – диэлектрик; 2 – феррит

Рисунок 7 – Коаксиальные ФВ на эффекте поперечного резонанса

В конструкции коаксиального ФВ (рисунок 7, б) вместо ферритовой пластины использованы два ферритовых стержня.

Для коаксиальных ФВ $S_{пр} = 1 \dots 1,5$ дБ, $S_{обр} = 15 \dots 20$ дБ.

Ферритовый клапан на эффекте Фарадея

На рисунке 8 схематически изображен клапан, использующий эффект Фарадея – поворот плоскости поляризации линейно поляризованной волны в круглом волноводе. На входе клапана расположена ножевидная поглощающая пластина, подобная поглотителям в ослабителях низкого уровня мощности.

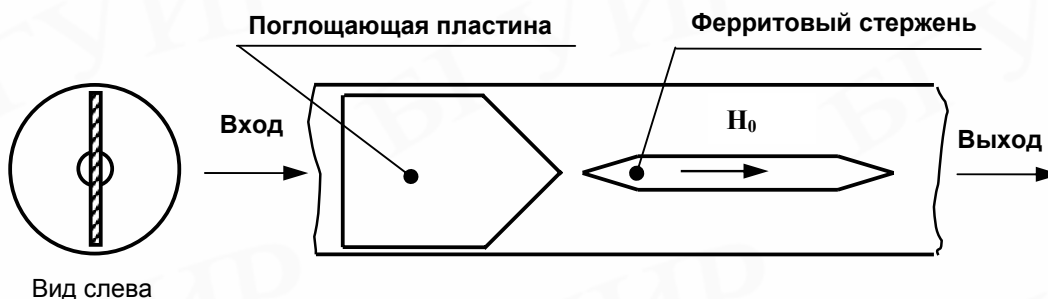


Рисунок 8 – Конструкция клапана на эффекте Фарадея

Тогда, если в волноводе возбуждена волна типа H_{11} с поляризацией, показанной на рисунке 9, а, поглощающая пластина не создает потерь для волны, поступающей со стороны входа. В результате существования эффекта Фарадея плоскость поляризации этой волны на выходе ферритового стержня поворачивается на угол θ . Длина ферритового стержня в данном случае подбирается такой, чтобы угол θ составлял $\pi/4$ (рисунок 9, б). Аналогично плоскость поляризации волны, отраженной от нагрузки, поворачивается в ту же сторону еще на $\pi/4$. В результате электрическое поле отраженной волны оказывается в плоскости поглощающей пластины, как показано на рисунке 9, в. Отраженная волна практически полностью поглощается в пластине и не проходит на вход клапана.

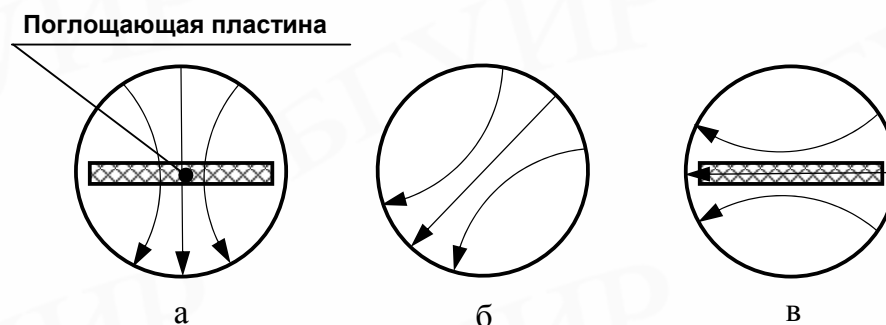


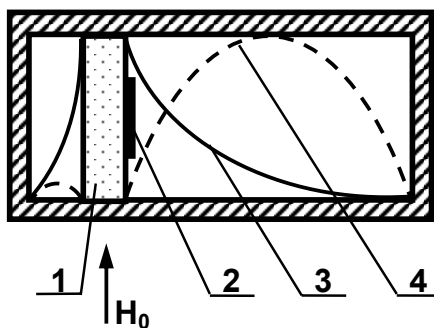
Рисунок 9 – Принцип действия клапана на эффекте Фарадея

Для удобства подключения в обычные волноводные тракты на обоих концах описанного клапана обычно располагают переходы с прямоугольного на

круглый волновод, а также секцию скрученного волновода прямоугольного сечения.

Ферритовый вентиль на явлении смещения поля

На рисунке 10 показан эскиз вентиль, основанного на явлении смещения поля. На этом же рисунке изображено распределение амплитуды напряженности электрического поля прямой и обратной вдоль широкой стенки волновода.



1 – ферритовая пластина; 2 – поглощающий слой; 3 – распределение поля обратной волны; 4 – распределение поля прямой волны

Рисунок 10 – Вентиль на явлении смещения поля

Напряженность внешнего магнитного поля H_0 выбирается так, чтобы выполнялось неравенство $\mu^+ < 0$. Как видно из рисунка, на главную грань ферритовой пластины нанесен поглощающий слой из графита.

Поскольку при отрицательных значениях магнитной проницаемости μ^+ волна с поляризацией H^+ вытесняется из феррита и распространяется вне его, то напряженность электрического поля волны с поляризацией H^+ в поглощающем слое будет весьма мала. Поэтому затухание энергии этой волны в вентиле незначительно. В то же время энергия волны с поляризацией H^- концентрируется в феррите, как в диэлектрике с высокой диэлектрической проницаемостью. Напряженность электрического поля этой волны у поверхности феррита велика, в поглощающем слое наводится ток проводимости и волна с поляризацией H^- интенсивно поглощается в слое графита.

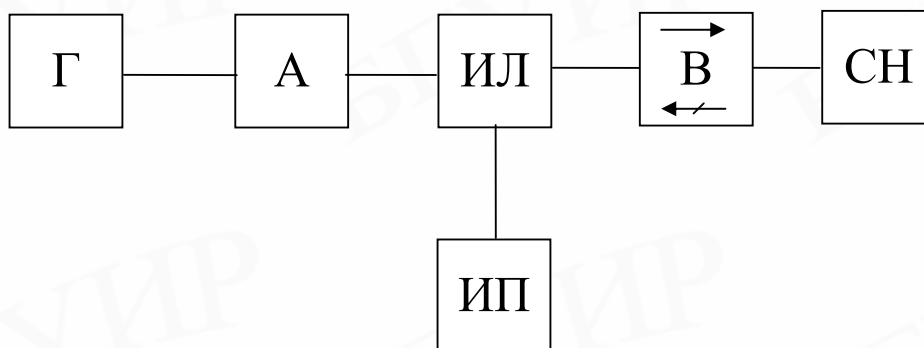
Вес и габариты вентиль определяются в значительной степени весом и габаритами постоянного магнита, который создает намагничивающее поле. Поскольку намагничивающее поле в вентиле, основанном на эффекте смещения поля, меньше резонансного, то вентиль, основанный на явлении смещения поля, меньше по весу и более компактен, чем аналогичный резонансный вентиль. Однако такой вентиль способен работать только с небольшими мощностями обратной волны.

3 Измерение параметров ферритовых вентилялей

Основными параметрами ферритовых вентилялей, измеряемыми в данной работе, являются коэффициент стоячей волны K_v при наличии согласованной нагрузки на выходе, прямые потери $C_{пр}$ и обратное затухание $C_{обр}$. Эти параметры в общем случае могут быть определены обычными методами измерения КСВ, затухания и коэффициентов передачи. Так, например, для измерения $C_{пр}$ и $C_{обр}$ наиболее широкое применение нашли метод замещения и метод непосредственного измерения мощности на выходе соответствующих плеч ферритового вентиля.

В данной работе численные значения K_v , $C_{пр}$ и $C_{обр}$ в рабочем диапазоне частот ФВ измеряются на дискретных частотах, т.е. зависимости $K_v(f)$, $C_{пр}(f)$ и $C_{обр}(f)$ строятся по точкам.

1 Измерение K_v производится по структурной схеме, представленной на рисунке 11.



Г – генератор СВЧ; А – прецизионный переменный аттенюатор;

ИЛ – измерительная линия; ФВ – ферритовый вентиль;

СН – согласованная нагрузка; ИП – индикаторный прибор

Рисунок 11 - Структурная схема измерения K_v

Настроить генератор на заданную частоту, обеспечив максимальную мощность на его выходе. Регулируя ослабление аттенюатора, подать СВЧ колебания в тракт и произвести настройку измерительной линии. Перемещая измерительную головку линии и варьируя ослабление аттенюатора, добиться значения тока детектора измерительной линии в максимуме поля в последней трети шкалы индикаторного прибора и зафиксировать величину максимума I_{max} в относительных единицах. Затем, перемещая измерительную головку вдоль измерительной линии, найти минимальное значение тока ее детектора и зафиксировать по индикаторному прибору величину I_{min} .

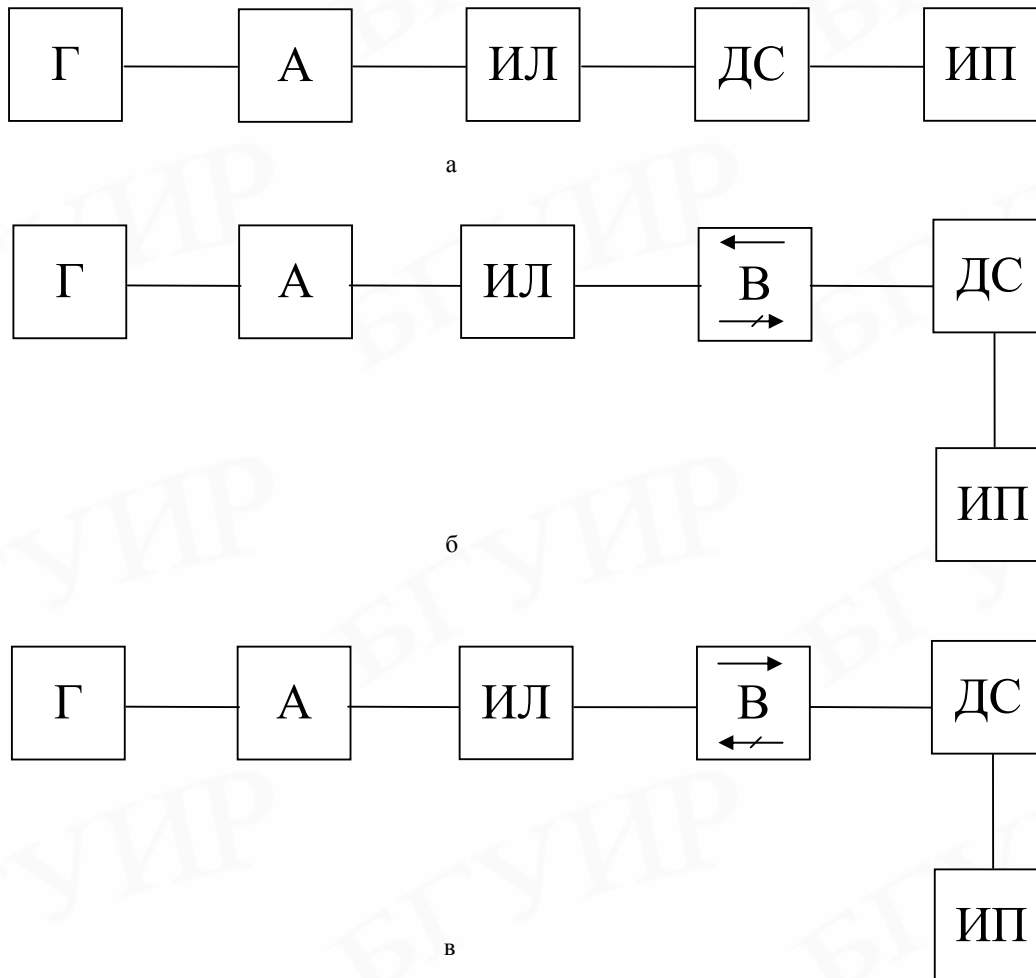
Учитывая квадратичность характеристики детектора измерительной линии, получим:

$$K = \sqrt{I_{\max}/I_{\min}} \quad (5)$$

$$\text{Тогда} \quad K_B = |K - K_{\text{сн}}| + 1, \quad (6)$$

где $K_{\text{сн}}$ - коэффициент стоячей волны согласованной нагрузки.

Численные значения $K_{\text{сн}}$ на каждой частоте рабочего диапазона определяются методом прямых измерений по рассмотренной выше методике, когда вентиль исключен из тракта.



Г - генератор СВЧ; А - прецизионный переменный аттенюатор;
 ФВ – ферритовый вентиль; СН - согласованная нагрузка;
 ДС - детекторная секция; ИП - индикаторный прибор

Рисунок 12 – Структурная схема измерения прямых потерь и обратного затухания ферритового вентиля

2 Измерение $C_{\text{пр}}$ и $C_{\text{обр}}$ производится методом замещения с помощью эталонного (прецизионного) переменного аттенюатора по структурной схеме, представленной на рисунке 12.

Методика измерения

1 Собрать схему, приведенную на рисунке 12, а. Настроить генератор на заданную частоту, обеспечив максимальную мощность на его выходе. Подать СВЧ мощность в тракт и, регулируя ослабление аттенюатора, произвести настройку детекторной секции с согласованным входом.

Добиться, чтобы показания индикаторного прибора были при этом в последней трети его наиболее чувствительной шкалы. Отметить уровень выходного сигнала по индикаторному прибору и начальное ослабление A_0 , вносимое аттенюатором.

2 Собрать схему, приведенную на рисунке 12, б, и, уменьшая ослабление аттенюатора, добиться первоначальных показаний индикатора. Отметить ослабление A_1 , вносимое аттенюатором.

Прямые потери определяются как разность показаний

$$C_{\text{пр}} = A_0 - A_1 [\text{дБ}]. \quad (7)$$

3 Собрать схему, приведенную на рисунке 12, в, и, уменьшая ослабление аттенюатора, добиться первоначальных показаний индикатора. Отметить ослабление A_2 , вносимое аттенюатором.

Обратное затухание определяется как разность показаний аттенюатора:

$$C_{\text{обр}} = A_0 - A_2 [\text{дБ}]. \quad (8)$$

В том случае, если при измерении обратного затухания $C_{\text{обр}}$ не удастся получить первоначальных показаний индикатора, следует повторить измерения (пп. 1-3) при меньших значениях показаний шкалы индикаторного прибора.

4 Порядок выполнения работы

1 Ознакомиться с аппаратурой, относящейся к данной работе.

2 Измерить значения K_v , $C_{\text{пр}}$ и $C_{\text{обр}}$ в указанном преподавателем частотном диапазоне. Результаты измерений свести в таблицу (см. ниже).

3 Произвести расчеты и оформить отчет.

Измеряемый параметр	Частота				
$I_{\max}$					
$I_{\min}$					
$K_{\text{в}}$					
A_0					
A_1					
A_2					
$C_{\text{пр}}$					
$C_{\text{обр}}$					

5 Содержание отчета

- 1 Краткая формулировка цели работы.
- 2 Структурные схемы измерений.
- 3 Таблицы экспериментальных данных.
- 4 Результаты расчета и графики зависимостей $K_{\text{в}}(f)$, $C_{\text{пр}}(f)$ и $C_{\text{обр}}(f)$ волноводного ферритового вентиля.
- 5 Краткие выводы.

6 Контрольные вопросы

- 1 Какими параметрами характеризуется качество ФВ?
- 2 Что представляют собой ферриты и какими свойствами они обладают?
- 3 Что такое прецессия?
- 4 От чего зависит частота и направление свободной прецессии?
- 5 Как возникает вынужденная прецессия?
- 6 Что такое ферромагнитный резонанс?
- 7 Почему отсутствует явление ферромагнитного резонанса у обратной волны?
- 8 Что такое ФВ?
- 9 Где имеет место круговая поляризация магнитного поля волны H_{10} в прямоугольном волноводе?
- 10 Как изменяется положение сечения с круговой поляризацией магнитного поля волны H_{10} относительно узкой стенки прямоугольного волновода с изменением частоты?
- 11 Объясните принцип работы резонансного ФВ на базе волновода прямоугольного сечения и коаксиального ФВ.
- 12 Почему введение диэлектрической пластинки делает вентиль широкополосным? Какие другие методы расширения частотного диапазона ФВ вам известны?

13 Объясните методику измерения основных параметров ФВ, нарисуйте структурные схемы измерений.

14 Назовите области применения ферритовых вентилях СВЧ.

Литература

1 Аверьянов В.Я. Антенны и устройства СВЧ. Разд. 2: Учеб. пособие. – Мн.: МРТИ, 1982. – 90 с.

2 Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ. – М.: Высш. шк., 1970. Т.1. - 440 с.

3 Вольман В.И., Пименов Ю.В. Техническая электродинамика. – М.: Связь, 1971. - 487 с.

4 Фальковский О.И. Техническая электродинамика. – М.: Связь, 1976. – 432 с.

5 Милованов О.С., Собенин Н.П. Техника сверхвысоких частот. – М.: Атомиздат, 1960. – 464 с.

Учебное издание

Исследование ферритовых вентиляей

Методические указания к лабораторной работе №3
по дисциплине АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА СВЧ
для студентов специальности 39 01 01 «Радиотехника»
всех форм обучения

Составители:

Кижлай Игорь Николаевич,
Кухарев Александр Васильевич,
Чмырев Николай Алексеевич,
Юрцев Олег Анатольевич

Редактор Т.А. Лейко
Корректор Е.Н. Батурчик

Подписано в печать 16.02.2005.
Гарнитура «Таймс».
Уч.-изд. л. 0,6.

Формат 60x84 1/16.
Печать ризографическая.
Тираж 200 экз.

Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 1,4.
Заказ 256.

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
Лицензия на осуществление издательской деятельности №02330/0056964 от 01.04.2004.
Лицензия на осуществление полиграфической деятельности №02330/0133108 от 30.04.2004.
220013, Минск, П. Бровки, 6

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра «Антенн и устройств СВЧ»

ИССЛЕДОВАНИЕ ФЕРРИТОВЫХ ЦИРКУЛЯТОРОВ

Методические указания к лабораторной работе №4
по дисциплине «Антенны и устройства СВЧ»
для студентов специальности 39 01 01 «Радиотехника»
всех форм обучения

Минск 2005

УДК 621.396 67 (075.8)
ББК 32. 845 я 73
И 85

Составители:

И.Н. Кижлай, А.В. Кухарев, Н.А. Чмырев, О.А. Юрцев

Исследование ферритовых циркуляторов: Метод. указ. к лаб. раб. №4 по дисц. “Антенны и устройства СВЧ” для студ. спец. 39 01 01 “Радиотехника” всех форм обуч./ Сост. И.Н. Кижлай, А.В. Кухарев, Н.А. Чмырев, О.А. Юрцев.– Мн.: БГУИР, 2005. - 14 с.:ил.

В методических указаниях содержатся сведения о применении, принципах работы, конструкциях и разновидностях ферритовых циркуляторов. Рассмотрены основные параметры ферритовых циркуляторов, приведены методика их экспериментального определения и контрольные вопросы, которые помогают студентам самостоятельно овладеть данным разделом. Приведена методика выполнения лабораторной работы и оформления отчета.

Материал может быть рекомендован для студентов специальностей 39 01 02, 39 01 03 и 45 01 02 при изучении курсов, содержащих раздел “Устройства СВЧ”.

УДК 621.396 67 (075.8)
ББК 32. 845 я 73

© Коллектив авторов,
составление, 2005
© БГУИР, 2005

Содержание

1. Цель работы
 2. Общие сведения
 3. Измерение параметров Y-циркулятора
 4. Порядок выполнения работы
 5. Содержание отчета
 6. Контрольные вопросы
- Литература

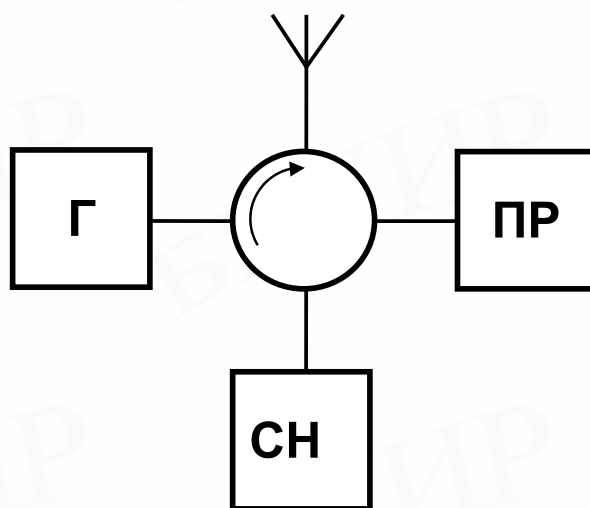
1 Цель работы

Ознакомление с устройством, принципом действия волноводных циркуляторов, экспериментальное исследование основных характеристик ферритового Y- циркулятора.

2 Общие сведения

Ферритовый циркулятор - это многополюсное устройство, содержащее несколько плеч, в котором передача энергии из одного плеча в другое происходит в строго определенной последовательности, зависящей от ориентации внешнего постоянного магнитного поля H , намагничивающего феррит.

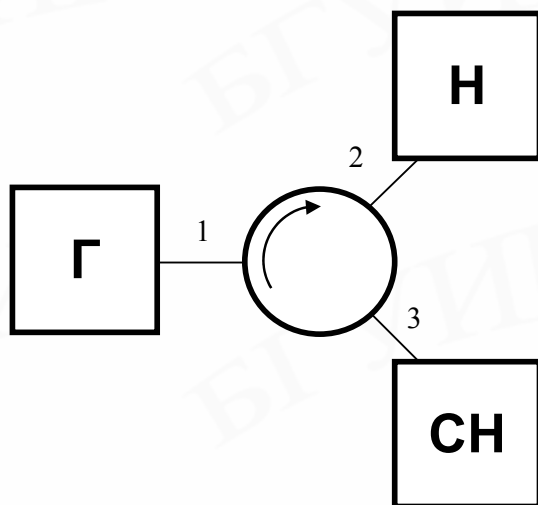
Циркуляторы находят широкое применение в разнообразных устройствах СВЧ. С помощью циркулятора можно обеспечить одновременную работу передатчика и приемника на одну антенну (рисунок 1), циркуляторы незаменимы в параметрических и твердотельных усилителях на полупроводниковых диодах (диодах Ганна и ЛПД), так как позволяют упростить их конструкцию и снизить шумовую температуру усилителей.



Г — СВЧ генератор; ПР – приемник; СН — согласованная нагрузка

Рисунок 1

Во многих случаях циркуляторы используются в качестве вентиля для устранения волны, отраженной от нагрузки. Схема трехплечего циркулятора в роли согласующего вентиля изображена на рисунке 2.



Г — СВЧ генератор; Н – нагрузка; СН — согласованная нагрузка

Рисунок 2

Подаваемая от СВЧ генератора мощность поступает в плечо 1 циркулятора и проходит в плечо 2, к которому подключена рабочая нагрузка (например антенна). Отраженная от нагрузки волна подходит к плечу 2 циркулятора и проходит в плечо 3, к которому подключена согласованная нагрузка. Если в согласованной нагрузке обеспечена достаточно высокая степень согласования, то отраженная от неё волна, которая может попасть через циркулятор на генератор СВЧ, оказывается значительно ослабленной.

Преимуществом использования циркулятора по сравнению с вентилем является возможность уменьшения веса и габаритов. Кроме того, энергия отраженной волны здесь поглощается не ферритом, а во внешней согласованной нагрузке, что позволяет работать с большими мощностями и упрощает систему охлаждения.

Использование циркуляторов совместно с частотными фильтрами СВЧ позволяет создать разделительные фильтры значительно меньших габаритов и массы, чем в случае использования мостов. Несколько высокочастотных сигналов, которые поступают одновременно в тракт СВЧ, например, из антенны, разделяются между различными каналами с помощью циркулятора и включенных в его плечи полосовых фильтров, отражающих волны вне своей полосы пропускания (рисунок 3).

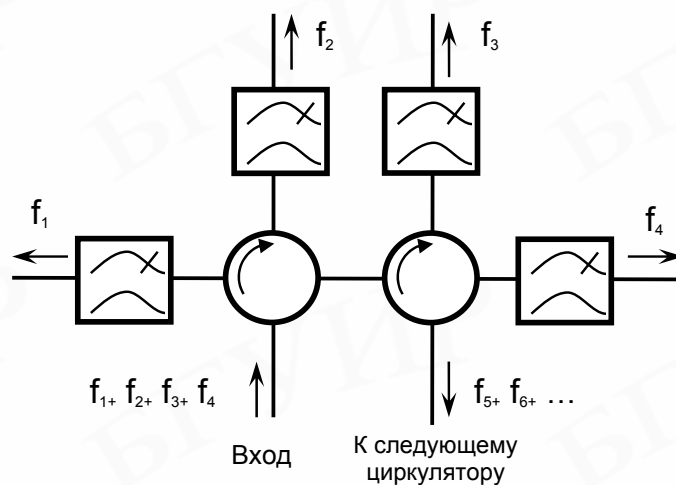


Рисунок 3

Очевидно, что это же устройство может объединить в одном тракте сигналы от нескольких передатчиков, работающих на различных частотах.

В настоящее время широкое применение нашли: циркулятор на эффекте Фарадея, фазовый циркулятор и Y- циркулятор.

В четырехплечем устройстве, показанном на рисунке 4, используется эффект Фарадея - поворот плоскости поляризации линейно поляризованной волны в продольно-намагниченном феррите. Ферритовый стержень, находящийся в продольном постоянном магнитном поле, располагается вдоль оси круглого волновода, возбуждаемого на волне типа H_{11} . К этому волноводу под углами 45° подключаются четыре входа, выполненных на базе стандартных прямоугольных волноводов.

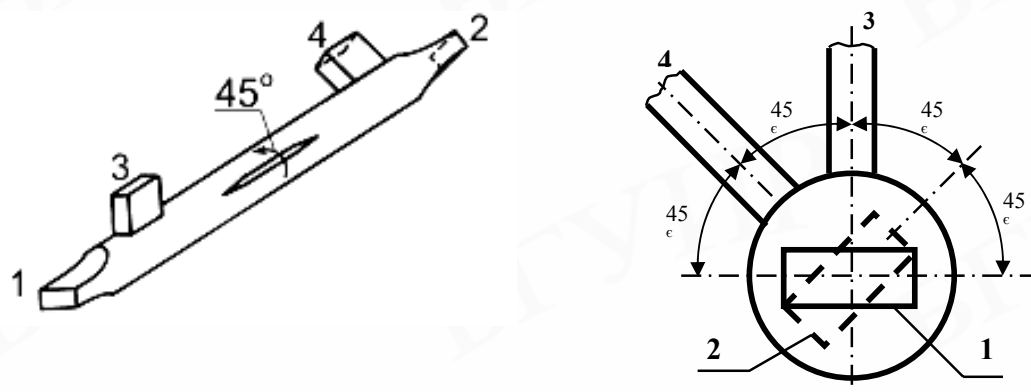


Рисунок 4

Развязка между соответствующими плечами достигается за счет поляризационных явлений. Так, при подаче энергии со стороны плеча 4 волна не может поступать в плечо 2 вследствие взаимно перпендикулярного расположения плоскостей поляризации в соответствующих прямоугольных волноводах. Далее, волна не может ответвляться из круглого волновода в плечо 3, так как по-

сле прохождения секции с ферритом электрическое поле в круглом волноводе параллельно широкой стенке плеча 3. Единственно возможным направлением движения энергии из плеча 4 является плечо 1, что и требуется от циркулятора.

По аналогии можно проследить движение энергии между остальными плечами данного циркулятора.

Одна из возможных схем построения фазового циркулятора на двух щелевых мостах представлена на рисунке 5. На рисунке не изображен постоянный магнит, намагничивающий ферритовую пластину невзаимного фазовращателя.

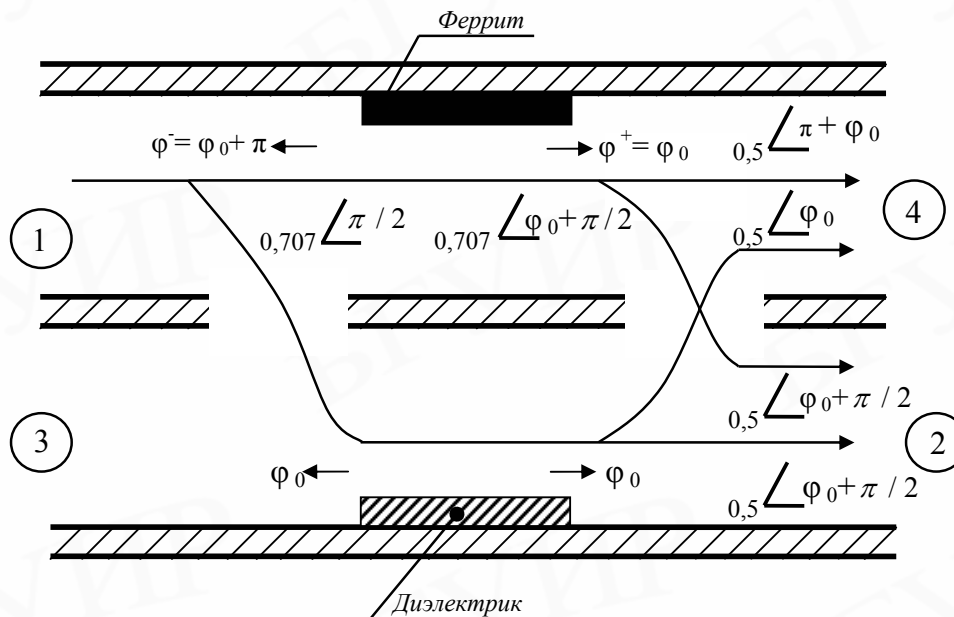


Рисунок 5

При возбуждении плеча 1 энергия электромагнитной волны первым щелевым мостом делится пополам. Волны с равной амплитудой поступают на вход волновода с намагниченной ферритовой пластиной и на вход волновода с диэлектрической пластиной. Сдвиг фаз между этими полями равен $\pi/2$. Параметры ферритового фазовращателя подбираются таким образом, чтобы величина невзаимного фазового сдвига была равна π , т.е.

$$\varphi^- = \pi + \varphi^+.$$

Размеры диэлектрической пластины, ее параметры и расположение в волноводе выбираются из условия, чтобы фазовый сдвиг, получаемый волной в отрезке волновода с диэлектриком, был равен

$$\varphi_0 = \varphi^+.$$

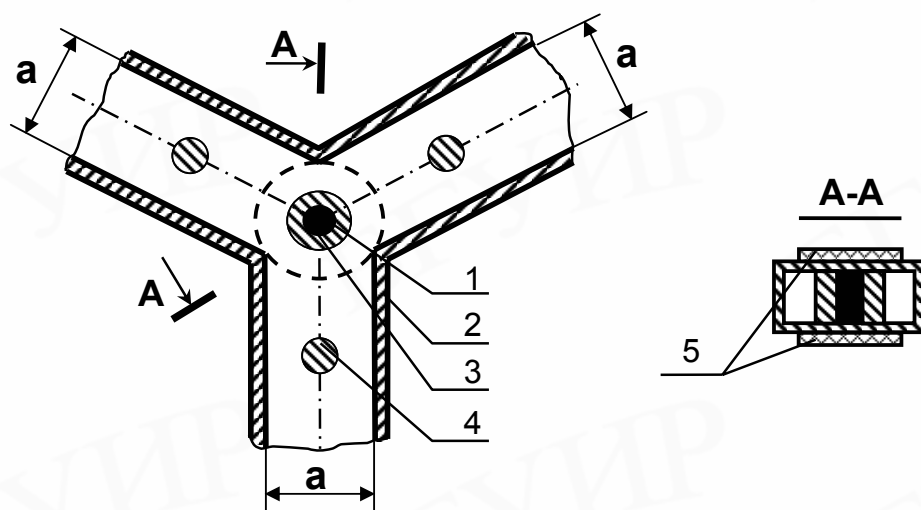
При этом на вход второго щелевого моста поступают две волны со сдви-

гом фазы 90° и равной амплитуды. В результате вся энергия проходит в плечо 2, так как сдвиг фаз между полями, возбуждаемыми в плече 4, получается равным 180° .

Если возбудить волну H_{10} на входе плеча 2, то вся энергия поступит в плечо 3, поскольку, проходя отрезок волновода с ферритом, волна приобретает фазовый сдвиг, на 180° больший, чем в отрезке волновода с диэлектриком. Рассуждая таким же образом, можно убедиться, что сигнал проходит через циркулятор в последовательности 1-2-3-4-1. На аналогичном принципе строятся фазовые циркуляторы, в которых вместо щелевых мостов используются двойные волноводные тройники, кольцевые мосты и др.

Важным достоинством фазовых циркуляторов является их широкополосность и способность работы на высоком уровне мощности. Последнее объясняется тем, что ферритовые пластины невзаимного фазовращателя можно наклеить на широкую стенку волновода и тем самым обеспечить хороший отвод тепла от ферритов. Основными недостатками фазовых циркуляторов описанного типа являются сравнительно большие габариты и вес.

В данной работе исследуется нашедший наиболее широкое применение в технике СВЧ симметричный Y-циркулятор на прямоугольном волноводе, принципиальная конструкция которого представлена на рисунке 6.



- 1 - феррит; 2 - волноводное разветвление в Н-плоскости;
- 3 - диэлектрическая втулка; 4 - диэлектрические стержни;
- 5 - дисковые постоянные магниты

Рисунок 6

Y-циркулятор представляет собой три прямоугольных волновода, соединенных между собой под углом 120° в Н-плоскости, в которых распространяется волна типа H_{10} . В центре сочленения волноводов размещается ферритовый цилиндрический стержень или диск, намагниченный вдоль оси перпендикуляр-

но широким стенкам волновода внешними дисковыми постоянными магнитами. Высота стержня равна высоте волновода или меньше ее. Стержень обычно помещается в диэлектрическую втулку, которая заметно улучшает работу циркулятора и упрощает его настройку, расширяя полосу пропускания. Диэлектрические стержни обеспечивают широкополосное согласование входов.

Принцип действия Y-циркулятора основан на использовании явления не взаимных свойств намагниченного феррита, помещенного в трехплечее волновое разветвление (рисунок 7).

Предположим, что в плече 1 Y-циркулятора возбуждена электромагнитная волна H_{10} , распространяющаяся в направлении к ферритовому стержню. На участке волновода с ферритом распространяющаяся волна распадается на две волны, одна из которых (левая) H^- обегает ферритовый цилиндр по часовой стрелке, а другая (правая) H^+ - против часовой стрелки. Так как направление вращения вектора магнитного поля волны относительно центра в правой и левой половине волновода противоположно, то магнитная проницаемость ферритового цилиндра для волн, обтекающих его слева и справа, различна. Это обуславливает различие в коэффициентах распространения β^+ и β^- .

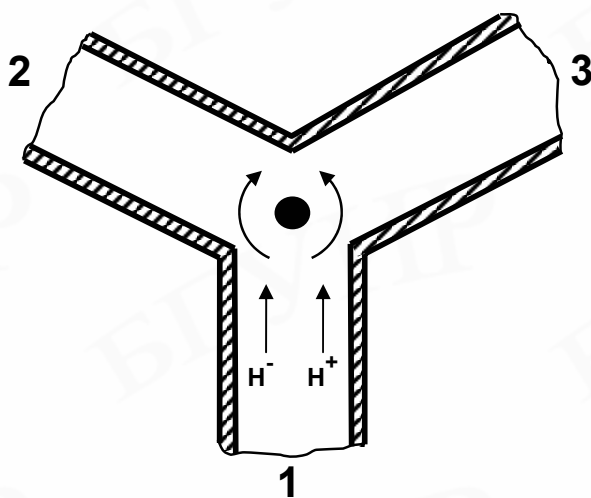


Рисунок 7

Если периметр ферритового цилиндра равен $3l$, то при своем движении от плеча 1 до плеч 2 и 3 эти волны будут иметь фазовые сдвиги $l\beta^+$ и $l\beta^-$.

Обеспечив за счет выбора величины постоянного магнитного поля H_0 при заданных диаметре и параметрах феррита (или за счет выбора диаметра и параметров феррита при заданной величине H_0) выполнение соотношений

$$l\beta^+ = 2l\beta^-, \quad (1)$$

$$2l\beta^+ = \pi + l\beta^-, \quad (2)$$

получим, что разность фаз этих волн в плече 2 равна 0, а в плече 3 равна 180° . Следовательно, при подаче энергии СВЧ в плечо 1 она передается только в

плечо 2. Так как Y-циркулятор обладает поворотной симметрией, то можно утверждать, что будет иметь место передача энергии со входа 2 на вход 3 и со входа 3 на вход 1, т.е. будет реализована последовательность передачи: 1-2-3-1.

При изменении направления внешнего магнитного поля, приложенного к ферритовому цилиндру, на противоположное последовательность передачи также изменится на обратную: 1-3-2-1.

Следует отметить, что в Y-циркуляторах не вся энергия, поступающая в плечо 1, передается в плечо 2, так как часть энергии при неполном согласовании плеч циркулятора передается в плечо 3, а часть теряется в феррите.

Для количественной оценки свойств циркуляторов используются два параметра, выраженные в децибелах:

- величина прямых потерь L ;
- величина развязки между плечами C .

Например, для устройства, изображенного на рисунке 2, эти величины будут равны:

$$L = 10 \log P_1 / P_2 \text{ [дБ]}, \quad (3)$$

$$C = 10 \log P_1 / P_3 \text{ [дБ]}, \quad (4)$$

где P_1 - мощность в плече 1; P_3 - мощность, просачиваемая из плеча 1 в плечо 3; P_2 - мощность, передаваемая из плеча 1 в плечо 2.

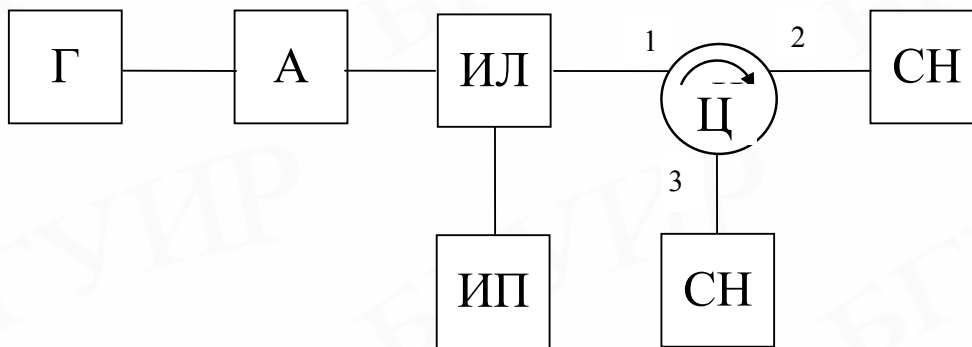
Численные значения развязки между плечами и прямых потерь для данной конструкции циркулятора определяются величиной напряженности постоянного магнитного поля H_0 и значением частоты СВЧ генератора. Для Y-циркулятора удастся получить развязку между плечами на фиксированной частоте до 30 дБ при прямых потерях до 0,2 дБ. При этом коэффициент стоячих волн (КСВ) со стороны входного плеча не превышает 1,05. Эти цифры быстро ухудшаются с изменением частоты СВЧ генератора, так как нарушаются оптимальные соотношения по амплитуде и фазе между электромагнитными полями в плечах циркулятора.

3 Измерение параметров Y-циркулятора

Основными параметрами циркулятора, измеряемыми в данной работе, являются коэффициент стоячей волны со стороны входа $K_{\text{ц}}$, прямые потери L и развязка между плечами C . Эти параметры в общем случае могут быть определены обычными методами измерения КСВ, затухания и коэффициентов передачи. Так, например, для измерения L и C наиболее широкое применение нашли метод замещения и метод непосредственного измерения мощности на выходе соответствующих плеч циркулятора.

В данной работе численные значения $K_{\text{ц}}$, L и C в рабочем диапазоне измеряются на дискретных частотах, т.е. зависимости $K_{\text{ц}}(f)$, $L(f)$ и $C(f)$ строятся по точкам.

1 Измерение КСВ производится по структурной схеме, представленной на рисунке 8.



Г - генератор СВЧ; А - прецизионный переменный аттенюатор;
ИЛ - измерительная линия; СН - согласованная нагрузка;
Ц – циркулятор; ИП - индикаторный прибор

Рисунок 8

Настроить генератор на заданную частоту, обеспечив максимальную мощность на его выходе. Регулируя ослабление аттенюатора, подать СВЧ колебания в СВЧ тракт и произвести настройку измерительной линии. Перемещая измерительную головку линии и изменяя ослабление аттенюатора, добиться значения тока детектора измерительной линии в максимуме поля в последней трети шкалы индикаторного прибора и зафиксировать величину максимума $I_{\max}$ в относительных единицах. Затем, перемещая измерительную головку вдоль измерительной линии, найти минимальное значение тока ее детектора и зафиксировать по индикаторному прибору величину минимума $I_{\min}$ в относительных единицах (на той же шкале индикаторного прибора).

Учитывая квадратичность характеристики детектора измерительной линии, получим:

$$K = \sqrt{I_{\max} / I_{\min}} . \quad (5)$$

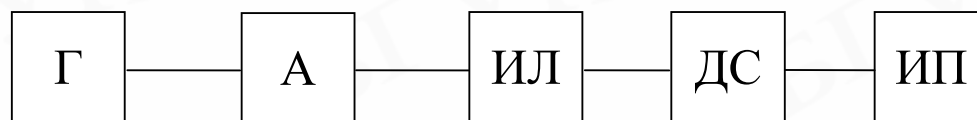
Тогда

$$K_{\text{ц}} = | K - K_{\text{сн}} | + 1 , \quad (6)$$

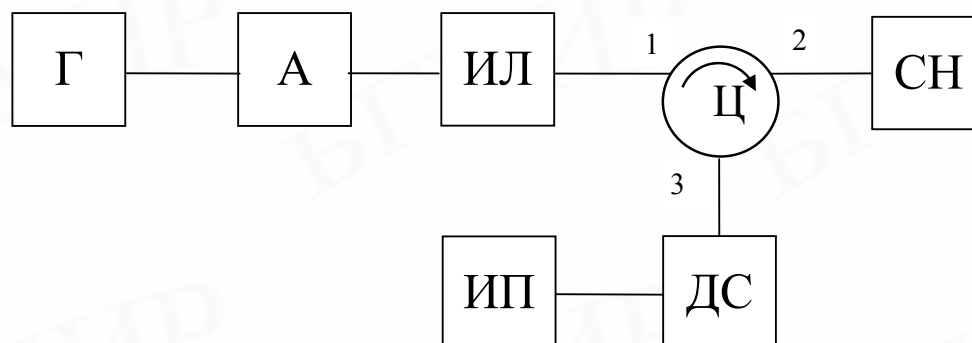
где $K_{\text{сн}}$ - коэффициент стоячей волны согласованной нагрузки.

Численные значения $K_{\text{сн}}$ на каждой частоте рабочего диапазона определяются методом прямых измерений по рассмотренной выше методике, когда циркулятор исключен из тракта.

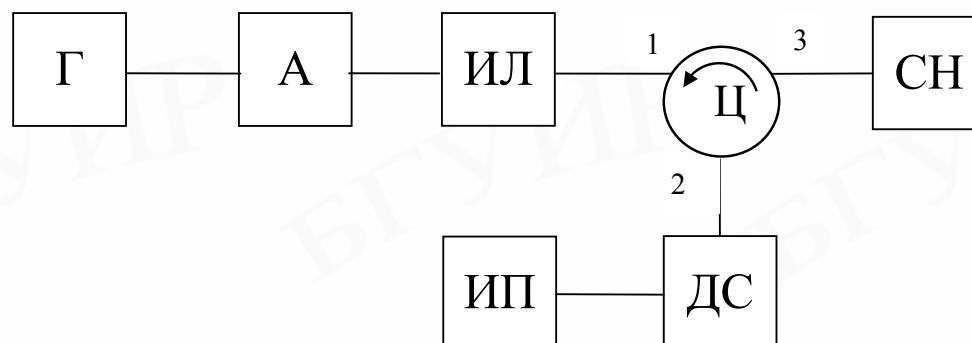
2 Измерение L и С производится методом замещения с помощью эталонного (прецизионного) переменного аттенюатора по структурной схеме, представленной на рисунке 9.



а



б



в

Г - генератор СВЧ; А - прецизионный переменный аттенюатор;
Ц – циркулятор; СН - согласованная нагрузка, ДС - детекторная секция,
ИП - индикаторный прибор

Рисунок 9

Методика измерения

1 Собрать схему, приведенную на рисунке 9, а. Настроить генератор на заданную частоту, обеспечив максимальную мощность на его выходе. Подать СВЧ-мощность в тракт и, регулируя ослабление аттенюатора, произвести на-

стройку детекторной секции с согласованным входом.

Добиться, чтобы показания индикаторного прибора были при этом в последней трети его наиболее чувствительной шкалы. Отметить уровень выходного сигнала по индикаторному прибору и начальное ослабление A_0 , вносимое аттенюатором.

2 Собрать схему, приведенную на рисунке 9, б, и, уменьшая ослабление аттенюатора, добиться первоначальных показаний индикатора. Отметить ослабление A_1 , вносимое аттенюатором.

Прямые потери L определяются как разность показаний:

$$L = A_0 - A_1[\text{дБ}]. \quad (7)$$

3 Собрать схему, представленную на рисунке 9, в, и, уменьшая ослабление аттенюатора, добиться первоначальных показаний индикатора. Отметить ослабление A_2 , вносимое аттенюатором.

Развязка между плечами C определяется как разность показаний аттенюатора:

$$C = A_0 - A_2[\text{дБ}]. \quad (8)$$

В том случае, если при измерении развязки C не удастся получить первоначальных показаний индикатора, следует повторить измерения (пп. 1-3) при меньших значениях показаний индикаторного прибора.

4 Порядок выполнения работы

- 1 Ознакомиться с аппаратурой, относящейся к данной работе.
- 2 Измерить значения K_d , L и C волноводного Y - циркулятора в указанном преподавателем частотном диапазоне. Результаты измерений свести в таблицу.
- 3 Произвести расчеты и оформить отчет.

5 Содержание отчета

- 1 Краткая формулировка цели работы.
 - 2 Структурные схемы измерений.
 - 3 Таблицы экспериментальных данных.
 - 4 Результаты расчета и графики зависимостей величин развязок и прямого ослабления между плечами.
 - 5 По снятым характеристикам определить полосу пропускания циркулятора и частоту наилучшей развязки.
- Результаты измерений свести в таблицу (см. ниже).

Измеряемый параметр	Частота				
$I_{\max}$					
$I_{\min}$					
$K_{\text{ц}}$					
A_0					
A_1					
A_2					
L					
C					

6 Контрольные вопросы

- 1 Что такое ферритовый циркулятор?
- 2 Какими основными свойствами обладают ферритовые циркуляторы?
- 3 Какими параметрами принято характеризовать работу циркуляторов?
- 4 Объясните принцип использования трехплечего ферритового циркулятора в роли согласующего вентиля.
- 5 Объясните принцип действия ферритового Y-циркулятора.
- 6 В каких пределах находятся основные параметры Y-циркуляторов?
- 7 Объясните методику измерения основных параметров Y-циркулятора, используемую в данной работе.

Литература

- 1 Аверьянов В. Я. Антенны и устройства СВЧ. Разд. 2: Учеб. пособие. - Мн.: МРТИ, 1992. - 90 с.
- 2 Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ. - М.: Высш. шк., 1988. – 432 с.
- 3 Белоцерковский Г.Б. Основы радиотехники и антенны. Ч. 2. Антенны. - М.: Радио и связь, 1983. - 290 с.
- 4 Вольман В.И., Пименов Ю.В. Техническая электродинамика. - М.: Связь, 1971. - 467 с.
- 5 Ветракин А.А. Антенны и волноводы РРЛ. - М.: Связь, 1977. - 184 с.

Учебное издание

Исследование ферритовых циркуляторов

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к лабораторной работе №4
по дисциплине «Антенны и устройства СВЧ»
для студентов специальности 39 01 01 «Радиотехника»
всех форм обучения

Составители:

Кижлай Игорь Николаевич,
Кухарев Александр Васильевич,
Чмырев Николай Алексеевич,
Юрцев Олег Анатольевич

Редактор Т.А. Лейко
Корректор Е.Н. Батурчик
Компьютерная верстка М.В. Шишло

Подписано в печать 02.02.2005.
Гарнитура «Таймс».
Уч.-изд. л. 0,6.

Формат 60x84 1/16.
Печать ризографическая.
Тираж 200 экз.

Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 1,05.
Заказ 257.

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
Лицензия на осуществление издательской деятельности №02330/0056964 от 01.04.2004.
Лицензия на осуществление полиграфической деятельности №02330/0133108 от 30.04.2004.
220013, Минск, П. Бровки, 6