

# ИЗМЕРЕНИЯ В ВОЛНОВОДНОМ ТРАКТЕ

## 1. ВВЕДЕНИЕ

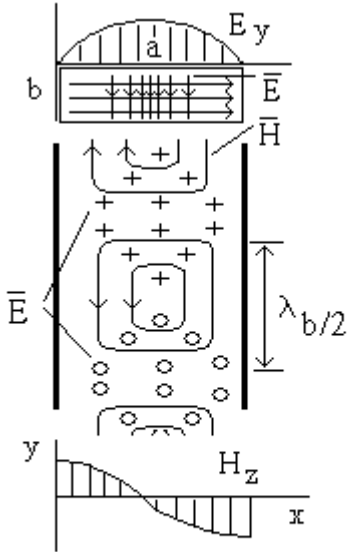


Рис.1 Структура поля  $H_{10}$  в прямоугольном волноводе.

Тип волны, т.е. та или иная конфигурация электрических и магнитных полей, устанавливающаяся в волноводе, определяется формой волновода, определяется формой волновода и соотношением его размеров с длиной волны, а также способом возбуждения (поляризацией излучателя). Иными словами, распространяться могут только такие волны, поля которых отвечают задаваемым волноводом граничным условиям. Характерным отличием волн в волноводах от волн в свободном пространстве или в коаксиальной линии является наличие продольной составляющей электрического или магнитного поля, а также наличие зависимости фазовой скорости от частоты. В общем случае в прямоугольном однородном

волноводе могут распространяться независимо друг от друга бесчисленное количество типов волн, различающихся критической длиной волны  $s$  и структурой электромагнитного поля. Волна, для которой  $\lambda_{кр}$  является наибольшей, а критическая частота - наименьшей, называется **низшей или основной волной**:

$$\lambda_{кр}^{mn} = \frac{2}{\sqrt{(m/a)^2 + (n/b)^2}}, \quad (1)$$

где  $m$  и  $n$  - число вариаций поля для волны  $H_{mn}$  (соответственно, по координатам  $x$  и  $y$ ). Низшей или основной волной для волновода прямоугольного сечения является волна  $H_{10}$  (рис.1). В этом случае  $\lambda_{кр}=2a$  ( $m=1, n=0$ ), т.е. не превышает удвоенного расстояния между узкими стенками волновода.

Фазовая скорость волны, распространяющейся вдоль волновода, больше скорости света, поэтому волна в волноводе характеризуется и большей длиной. Она определяется формулой:

$$\lambda_v = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - (\lambda_0/\lambda_{кр})^2}}, \quad (2)$$

где  $\lambda_B$  - длина волны в волноводе,  $\lambda_0$  - длина волны в свободном пространстве,  $\lambda_{кр}$  - критическая длина волны. Для более подробного изучения типов волн, распространяющихся в прямоугольных и круглых волноводах, необходимо воспользоваться литературой [2].

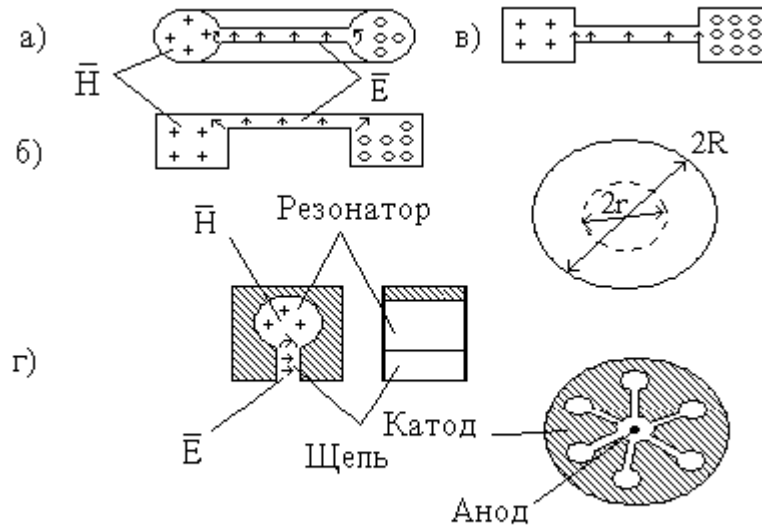


Рис.2 Структура поля в резонаторе клистрона (а), СВЧ-триода (б-в), магнетрона (г).

Для генерирования и усиления СВЧ колебаний используются СВЧ-резонаторы. Специфической особенностью таких резонаторов, работающих на основном типе колебаний, является наличие области с локализованной компонентой электрического поля. В этом случае удается осуществить эффективное взаимодействие электронных пучков с ВЧ полем. На рис.2 для примера приведены виды тороидальных резонаторов, используемых, например, в клистронах, СВЧ триодах (а-в) и магнетронах (г). Поскольку резонаторы используются как отдельные устройства или элементы схем, в их стенках должны быть отверстия для связи с другими устройствами, в частности, с передающими линиями. Наличие подобных связей, а также конечное значение проводимости стенок несколько изменяет распределение поля и резонансную частоту собственных видов колебаний. Однако эти изменения обычно бывают невелики и резонансные частоты резонаторов с элементами связи мало отличаются от частот собственных видов колебаний.

Наличие узких зазоров в СВЧ резонаторах приводит к резкому перераспределению компонент электромагнитного поля: в емкостной части (щели) сосредотачивается в основном электрическое поле. Значительная величина емкости зазора уменьшает резонансную частоту системы или, если последняя задана, приводит к соответствующему сокращению геометрических размеров.

Как правило, ширина зазора  $d \ll \lambda$ , что дает основание рассматривать щель как плоский конденсатор, а примыкающий к ней объем - как индуктивность. Если при этом остальные размеры также оказываются значительно меньше

резонансной длины волны, то подобные резонаторы могут быть отнесены к системам с сосредоточенными параметрами.

СВЧ резонаторы составляют неотъемлемую часть генераторов, усилителей, фильтров, ускорителей заряженных частиц. Резонансные системы используются также и в измерительных устройствах - частотомерах и частотных дискриминаторах.

На сверхвысоких частотах передача энергии по волноводу не может быть охарактеризована значением токов и напряжений, как это имеет место, например, в случае двухпроводных линий. При прохождении волны по волноводу величины токов и напряжений зависят от точек измерений и не являются однозначными характеристиками. К тому же нет надежных способов, позволяющих измерить на таких частотах абсолютные значения напряжений и токов. Последнее относится и к измерению напряженностей магнитного и электрического полей, которые являются, вообще говоря, более адекватными характеристиками волн в волноводах, чем токи и напряжения. Поэтому основной характеристикой в различных видах измерений чаще выступает величина мощности, переносимой волной. Другой характеристикой передающего тракта является его волновое сопротивление (полное сопротивление или импеданс), которое определяется как отношение поперечных компонент электрического и магнитных полей:  $Z = E_{\text{поп}} / H_{\text{поп}}$ . Для однородного тракта сопротивление одинаково в любом поперечном сечении. Соотношение сопротивлений различных элементов тракта и включенных в него устройств определяет эффективность передачи энергии. Так, максимальная передача мощности имеет место только при равенстве волновых сопротивлений всех элементов; отличие в сопротивлениях приводит к возникновению отражений. Поскольку волновое сопротивление в общем случае зависит от частоты, отражение от различных элементов может также характеризоваться частотной зависимостью.

## 2. ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Из сказанного выше вытекают и основные виды измерений, которыми являются измерение мощности, длины волны или частоты, импеданса (степени согласования).

Наиболее распространенные методы измерения мощности основаны на преобразовании энергии волны в тепло. Так, например, измерение температуры воды, протекающей в трубке, проходящей через волновод, используется для определения мощности в так называемых калориметрических измерителях, которые применяются, как правило, на уровнях мощности порядка ватта и выше. Измерения сопротивления тонкой металлической проволоки (бареттера) или "бусинки" из полупроводникового материала (термистора) при их нагреве за счет поглощения СВЧ энергии используется в болометрических измерителях. Болометрические измерители, в которых применяются чувствительные мостовые схемы, рассчитаны обычно на измерения малых уровней мощности (микроватты, милливатты). Привлекательным качеством тепловых измерителей мощности является возможность их калибровки постоянным током или переменным током на низкой частоте, когда через бареттер (термистор) пропускают ток такой величины, чтобы измерение сопротивления этого элемента было равно

изменению его сопротивления при поглощении СВЧ сигнала. При этом рассеянная мощность постоянного тока, которую определить легко, практически равна поглощенной мощности СВЧ. Для измерения относительных уровней мощности могут также использоваться детекторы, но в этом случае необходимо знать характер зависимости величины отклика от величины падающей мощности, т.е. детекторную характеристику.

Методы измерения длины волны и частоты основаны либо на непосредственном определении пространственной периодичности стоячей волны, либо на использовании калиброванных резонаторов, либо на сравнении частоты измеряемого сигнала с частотой эталонированного источника. Если перекрыть волновод короткозамыкающей стенкой и создать тем самым в нем стоячую волну, а затем измерить с помощью перемещаемого вдоль волновода зонда распределение напряженности поля, то удвоенное расстояние между двумя соседними узлами или пучностями будет равно длине волны. Но при этом следует иметь в виду, что это длина волны в волноводе. Для определения частоты колебаний необходимо предварительно рассчитать по измеренному значению  $\lambda_B$  длину волны в свободном пространстве  $\lambda_0$  по формуле (2).

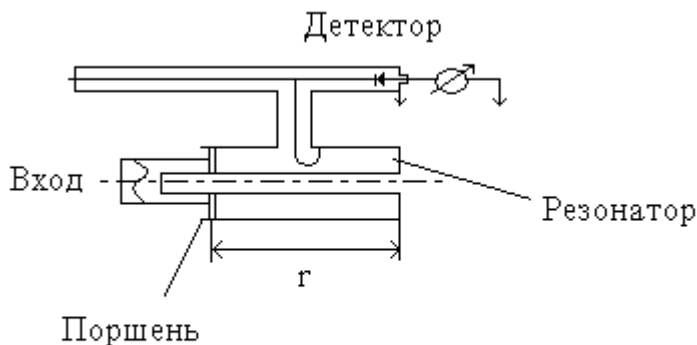


Рис.3 Волномер

Более точными и удобными инструментами для измерения частоты или длины волны являются прямоотсчетные волнометры, основанные на использовании коаксиальных или объемных резонаторов. Волномер представляет собой цилиндрический резонатор, который через небольшое отверстие (см. рис.3) связан с

волноводом. Резонанс наступает тогда, когда длина резонатора (она может изменяться передвижением одной из стенок) становится равной или кратной  $\lambda_0/2$ . Именно такой резонатор, например, используется в задаче "ЛОВ-генератор" в волномере.

Наличие резонанса индицируется по максимуму тока детектора, связанного с резонатором (см. рис.3). Значения частоты при резонансе отсчитываются по лимбу, сопряженному с устройством перестройки резонатора.

Чтобы получить большую точность измерений ( $\sim 10^{-6}$ ) используют электронно-счетные частотомеры (ЭСЧ), принцип действия которых основан на измерении частоты гетеродина, частота гармоники которого подстраивается под измеряемую частоту системой фазовой автоподстройки. Частота гетеродина измеряется встроенным в СВЧ счетным блоком, база времени которого расширяется в  $n$  раз, где  $n$  - номер используемой гармоники гетеродина.

Методы измерения полного сопротивления, по существу, являются методами определения степени согласования. Она базируется, в основном, на исследовании "профиля" волны вдоль волновода, т.е. на измерении амплитуды волны, как функции продольной координаты. Если сопротивление всех элементов тракта одинаково, то отражений в нем не возникает и амплитуда волны постоянна вдоль волновода (измеряться она должна, естественно, в одних и тех же точках поперечного сечения). При различии в значениях сопротивления одного из элементов и остального тракта возникает отраженная волна, которая интерферирует с волной падающей. Результирующая интерференционная картина характеризуется периодичностью изменения амплитуды суммарного поля вдоль волновода, а расшифровка этой картины стоячей волны позволяет определить значение волнового сопротивления того элемента, от которого возникает отражение. Коэффициент отражения в данном сечении тракта, определяемый как отношение мгновенных значений напряженностей полей отраженной ( $E_{отр}$ ) и падающей ( $E_{пад}$ ) волн, связаны с импедансом следующим образом:

$$\Gamma = \frac{E_{отр}}{E_{пад}} = \frac{Z - Z_{\text{в}}}{Z + Z_{\text{в}}}, \quad (3)$$

где  $Z_{\text{в}}$  - волновое сопротивление однородного волноводного тракта, в котором наблюдается "профиль" волны,  $Z$  - сопротивление элемента, вызывающего отражение. Поскольку отраженная волна может иметь различные фазы по отношению к фазе падающей волны, то коэффициент отражения, вообще говоря, является величиной комплексной. При измерениях чаще определяется не коэффициент отражения, а так называемый коэффициент стоячей волны (по напряженности поля) - КСВН. Он равен

$$K_{\text{cmv}} = \frac{E_{\text{макс}}}{E_{\text{мин}}}, \quad (4)$$

где  $E_{\text{макс}}$  и  $E_{\text{мин}}$  - амплитудные значения суммарного поля падающей и отраженной волн в максимуме и минимуме интерференционной картины (стоячей волны). КСВН связан с коэффициентом отражения следующим соотношением:

$$K_{\text{cmv}} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}. \quad (5)$$

Отсюда видно, что по измеренному значению КСВН можно определить только модуль коэффициента отражения. Определить его фазу, т.е. соотношение фаз падающей и отраженной волн, можно по расстоянию от первого минимума (максимума), стоячей волны до того участка, где возникает отражение. Значение комплексного коэффициента отражения и волнового сопротивления основного тракта позволяет определить импеданс любого элемента или устройства. Однако на практике чаще бывает нужно определять не значение волнового сопротивления, для чего необходимо знание как амплитуды, так и фазы коэффициента отражения, а просто степень согласования. В этом случае

достаточно информации содержится в знании КСВН (при идеальном согласовании - отражений нет:  $K_{cmv}=1$ , при полном рассогласовании - вся энергия отражается:  $K_{cmv} \rightarrow \infty$ ). Так, знание КСВН какого-либо устройства, являющегося "потребителем" СВЧ энергии, позволяет определить, какая часть мощности падающей (от генератора) волны ( $P_{пад}$ ) выделяется в этом устройстве ( $P_{выд}$ ):

$$P_{пад} = P_{выд} \frac{(K_{cmv} + 1)^2}{4K_{cmv}} \quad (6)$$



Рис.4 Измерительная линия

Для измерения КСВН используются так называемые измерительные линии. Волноводная измерительная линия, схематически показанная на рис.4, представляет собой отрезок волновода, внутрь которого через узкую щель в средней части широкой стенки введен зонд - штыревая

антенна, сигнал с которого поступает на детектор. Обычно в качестве детектора используется диод. Напряжение, возникающее на зонде, пропорционально напряженности поля в той области волновода, куда он помещен. Зонд может перемещаться вдоль волновода, причем его координата фиксируется точным отсчетным устройством. Сигнал, снимаемый с детектора, обычно пропорционален квадрату напряжения на зонде, если детектор квадратичный, и, следовательно, квадрату напряженности поля волны. Это необходимо учитывать при получении информации об относительной напряженности поля при измерении ее распределения вдоль волновода, т.е. ее КСВН должен определяться как

$$K_{cmv} = \sqrt{\frac{J_{дет. макс}}{J_{дет. мин}}}, \quad (7)$$

где  $J_{дет. макс}$ ,  $J_{дет. мин}$  - значения тока детектора (или пропорциональный току отсчет на каком-либо измерительном приборе, регистрирующем сигнал с детектора) в максимуме и минимуме стоячей волны. Измерительная линия включается в тракт между генератором и тем элементом или устройством, импеданс или КСВН которого необходимо определить.

Кроме измерительной линии для подобных измерений используются и другие устройства, например, панорамные измерители КСВН с направленными ответвителями, которые позволяют отдельно определить падающую и отраженную мощность.

Интересный метод определения импеданса методом сравнения основан на использовании так называемого "двойного тройника" или "двойного Т-моста".

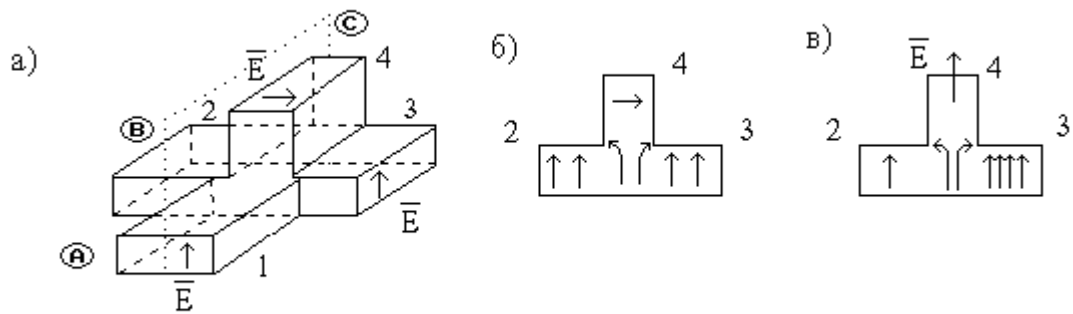


Рис.5 Двойной Т-мост

Устройство двойного тройника показано на рис.5а. Сигнал, поступающий через плечо 1, разветвляется в симметричные относительно плоскости ABC плечи 2 и 3, длина которых строго одинакова (в дальнейшем будем называть их "плечами сравнения"). При этом структура волны такова ( $H_{10}$ ), что напряженность электрического поля в области соединения плеч 1, 2 и 3 не имеет составляющей, которая могла бы возбудить волну в плече 4 (индикаторное плечо), отличающемся плоскостью поляризации (она повернута на  $\lambda/2$ ). Если к плечам сравнения подключены элементы, не согласованные с основным трактом, но равные по величине волновому сопротивлению, то отраженные от них волны придут в область подключения плеча 4 с равными амплитудами и в одинаковых фазах. Нетрудно убедиться, что при этом суммарный вектор электрического поля также не будет иметь компоненты, способной возбудить волну в индикаторном плече (см.рис.5б). Только в том случае, когда амплитуды или фазы (или то и другое) волн, отраженных в плечах сравнения, различны, результирующий вектор  $\vec{E}$  будет иметь компоненту, соответствующую поляризации волны в индикаторном плече (см.рис.5в).

Таким образом, отсутствие прохождения мощности в индикаторном плече является показателем равенства импедансов (и действительной, и мнимой частей) элементов, включенных в плечах сравнения. Для определения неизвестного импеданса в одно из плеч должна быть включена нагрузка с известным калиброванным импедансом, который настраивается так, чтобы мощность в индикаторном плече равнялась нулю.

Двойные тройники находят применение не только для измерения импедансов, но и в целом ряде других балансных измерительных схем.

Существуют различные методы улучшения согласования тех или иных элементов и устройств с волноводным трактом. Наиболее универсальным среди них является использование так называемых импеданс-трансформаторов или трансформаторов полных сопротивлений. Это название они получили потому, что формально их действие подобно действию обычных трансформаторов на низких частотах. Физический принцип действия трансформатора полных сопротивлений можно пояснить

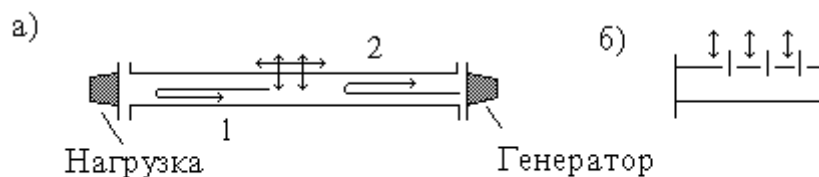


Рис.6 Трансформатор полных сопротивлений

на следующем примере. В волноводе, к которому подключена несогласованная нагрузка, возникает отраженная от нее волна, условно показанная на рис.6а стрелкой 1. Через широкую стенку волновода в него введен металлический штырь, глубина погружения которого может изменяться и который может перемещаться вдоль волновода. При этом возникает еще одна волна 2 (см.рис.6а), отраженная от штыря. Амплитуда этой волны зависит от глубины погружения штыря, а фаза - от его продольного перемещения. При этом можно подобрать такие условия, когда волны 1 и 2, т.е. отраженная от нагрузки и отраженная от штыря, будут обладать равными амплитудами и противоположными фазами. Интерферируя, они полностью гасят друг друга и в результате в тракте между генератором и штырем останется лишь одна бегущая волна; это соответствует максимальной передаче мощности генератора в нагрузку. Другими словами, в системе "нагрузка - штырь" возникает резонанс на данной частоте; при этом вся мощность рассеивается на эквивалентной активной проводимости такого контура. Рассмотренный здесь штырь и представляет собой трансформатор полных сопротивлений. Правда, на практике редко делают трансформаторы с перемещением штыря вдоль волновода. Чаще встречаются устройства с несколькими штырями, расположенными на фиксированных расстояниях друг от друга, но с регулируемой глубиной погружения (см., например, рис.6б, где схематически показан так называемый трехшлейфовый трансформатор полных сопротивлений). Однако принцип их действия остается, по существу, таким же, как и в рассмотренном выше примере. Следует отметить, что из-за наличия собственных потерь в реальном согласующем устройстве абсолютного согласования, т.е. передачи всей мощности в нагрузку, нельзя достичь даже в узком частот.

Кроме рассмотренных здесь электронно-счетного частотомера, измерительной линии, двойного тройника и трансформатора в полных сопротивлений, в установке, на которой выполняется данная задача, есть еще ряд элементов, принципиальное устройство которых мы опишем ниже.

Для регулировки уровня мощности, а также для развязки, т.е. для уменьшения взаимной связи генератора и не вполне согласованной нагрузки, в тракт включаются так называемые аттенюаторы (ослабители). Аттенюаторы бывают фиксированные, вносящие в тракт определенное затухание, и переменные. Затухание (потери)  $L$  в децибеллах определяется выражением

$$L = 10 \lg \frac{P_{\text{вх}}}{P_{\text{вых}}} = 20 \lg \frac{|E_{\text{вх}}|}{|E_{\text{вых}}|} \text{ дБ} , \quad (7)$$



Конструкция переменного аттенюатора схематически показана на рис.7. На тонком диэлектрическом стержне, введенном в волновод через отверстие в узкой стенке, укреплена диэлектрическая пластинка, ориентированная так, чтобы ее поверхность была параллельна вектору  $E$  волны, бегущей по

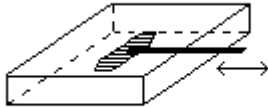


Рис.7 Аттенюатор

волноводу (т.е. параллельно узким стенкам волновода). Пластика покрыта тонким слоем поглощающего материала, например, графита или платины. При прохождении волны в поглощающем слое наводятся токи и энергия волны рассеивается за счет омических потерь. Если пластинка помещена в центре волновода, где для волны  $H_{10}$  электрическое поле максимально, то она вносит наибольшие потери. Смещение пластинки к узкой стенке уменьшает затухание и если она достаточно тонкая и плотно прижата к стенке, где электрическое поле волны равно нулю, потери вообще могут практически отсутствовать. Концы пластинки, как это показано на рис.7, делаются скошенными для уменьшения отражений.

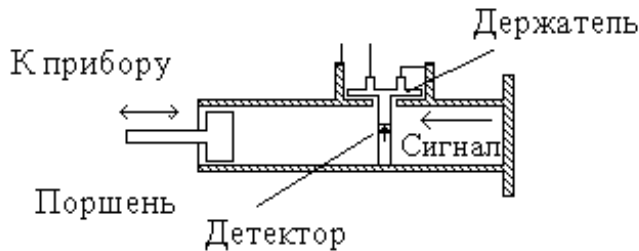


Рис.8 Детекторная секция

схематический вид которой для волноводного тракта показан на рис.8. Детектор укреплен на специальном

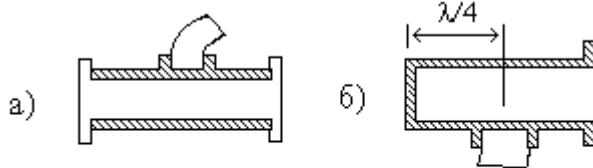


Рис.9 Волноводно-коаксиальные переходы

подвижным короткозамыкающим поршнем, положение которого выбирается таким образом, чтобы детектор оказался в пучности электрического поля стоячей волны. Держатель детектора отделен от корпуса детекторной головки тонкой диэлектрической прокладкой (см.рис.8). Этот элемент конструкции образует емкость, шунтирующую по СВЧ цепь, идущую к индикаторному прибору. Подключение к волноводному тракту контрольного детектора и измерителя

Для индикации сигнала, определения относительного уровня его мощности или для выделения низкочастотной огибающей модулированного сигнала в СВЧ диапазоне применяются кристаллические детекторы (полупроводниковые диоды). Детектор помещают в специальную секцию,

держателе и помещен в волновд так, чтобы его выводы, между которыми включен выпрямляющий контакт, были коллинеарны вектору  $E$  волны. Настройка детекторной секции осуществляется

мощности в нашем случае осуществляется с помощью так называемых адаптеров проходного (рис.9а) и оконечного (рис.9б) типов. Связь с волноводом обеспечивается в этих адаптерах штыревой антенной, ориентированной коллинеарно вектору  $\mathbf{E}$  волны и введенной в волновод через широкую стенку или индуктивной петлей, введенной через узкую стенку волновода.

### 3. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ.

Блок схема экспериментальной установки представлена на рис.10.

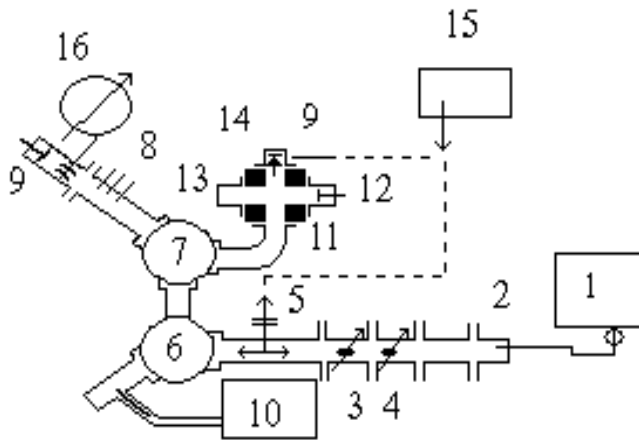


Рис. 10 Блок-схема установки

различными видами модуляции. При выполнении упражнений используются два режима работы генератора: непрерывный и модулированный по амплитуде симметричными прямоугольными импульсами. Атенюаторы (3) и (4) используются в упражнении по измерению затухания методом замещения и для изменения уровня мощности в упражнении по определению характеристик детектора. Кроме того, с их помощью уменьшается уровень поступающей в измерительный тракт мощности и при выполнении других упражнений с целью предотвращения перегрузки детекторов и уменьшения влияния отраженной волны на работу генератора.

2. Измерительная линия (5) используется для определения длины волны в волноводе и для измерения коэффициента стоячей волны (КСВН), характеризующего степень согласования того или иного устройства с основным трактом. Поскольку сигнал, снимаемый с зонда, мал, измерения КСВ проводятся только в режиме амплитудной модуляции генератора СВЧ, что позволяет для определения величины продетектированного сигнала, идущего от измерительной линии, пользоваться измерителем отношения напряжений (15), который предназначен для измерения отношения напряжений переменного тока, последовательно поступающих на его вход (например, при работе с измерительными линиями), а также для усиления малых напряжений переменного тока с возможностью цифровой индикации выходных сигналов в относительных единицах. При работе с измерительной линией он должен быть настроен на

1. Генератор СВЧ (1), используемый в данной задаче, работает в трехсантиметровом диапазоне длин волн. Источником излучения в нем служит отражательный клистрон. Значение частоты генерации во всем интервале перестройки отражательного клистрона определяется по встроенному в генератор цифровому индикатору. В генераторе предусмотрена возможность работы как в режиме непрерывных колебаний, так и с

частоту модуляции СВЧ сигнала ( $\sim 1$  кГц). Отсчет величины сигнала, поступающего на вход, производится по вольтметру измерителя отношения напряжений.

С помощью волноводных переключателей (6) и (7) тракт, идущий от генератора, может либо замыкаться накоротко (для осуществления в основном тракте режима чисто стоячей волны), либо соединяться с различными элементами установки.

Для измерения мощности, проходящей по основному тракту, используется измеритель мощности термисторного типа (10). Мощность измеряется в режиме непрерывной генерации.

3. *Детекторная секция* (9) используется для определения относительного уровня мощности при калибровке аттенюатора, а также в упражнении по определению характеристик детектора. Трехшлейфовый трансформатор полных сопротивлений (8), включенный в тракт перед детекторной секцией, служит для ее согласования с трактом.

4. *Двойной T-мост* (11) используется в данной задаче для измерений с реактивными нагрузками в плечах сравнения. Одна из них представляет собой отрезок волновода с перемещающимся короткозамыкающим поршнем (12), другая - короткозамкнутый отрезок волновода фиксированной длины (13).

#### 4. УПРАЖНЕНИЯ

Руководствуясь блок-схемой, определите назначение каждого элемента и устройства.

Установите волноводные переключатели в положение, соединяющее основной тракт с детекторной секцией (9).

Проведите настройку аппаратуры и узлов волноводного тракта согласно приложению.

**УПРАЖНЕНИЕ 1. ИЗМЕРЕНИЕ ДЛИНЫ ВОЛНЫ В ВОЛНОВОДЕ** (Проводится в режиме модулированных колебаний).

Для измерения длины волны в волноводе используется измерительная линия. Поставьте волноводный переключатель (6) в положение, промежуточное между положениями, соединяющими основной тракт с переключателем (7) и измерителем мощности (10). при этом волновод оказывается короткозамкнутым и в нем устанавливается чисто стоячая волна. Перемещая каретку измерительной линии вдоль волновода и отсчитывая показания по измерителю отношения напряжений, постройте график зависимости "напряжение, снимаемое с детектора измерительной линии (в относительных единицах) - координата вдоль оси волновода". Объясните эту зависимость. Определите длину волны. При вычислении критической длины волны  $\lambda_{кр}$  необходимо учесть, что размер поперечного сечения волновода в данной установке равен  $10 \times 23$  мм. Частота генерации указана в соответствующем окошке генератора.

**УПРАЖНЕНИЕ 2. КАЛИБРОВКА ПЕРЕМЕННОГО АТТЕНЬЮАТОРА.** (Определение затухания методом замещения). Калибровка производится в режиме непрерывной генерации.

Суть измерений затухания (ослабления) методом замещения сводится к тому, что в тракт, соединяющий генератор с детектором, включается попеременно объект с неизвестным затуханием и калиброванный аттенюатор, с помощью которого проходящая мощность ослабляется до того же значения тока детектора, что и в случае включения измеряемого объекта. В данном упражнении измеряемым объектом является некалиброванный аттенюатор (3) (он белого цвета).

Поставьте волноводные переключатели (6) и (7) в положения, соединяющие основной тракт с детекторной секцией (9). Включите выход детектора на микроамперметр (16). Регулируя уровень падающей мощности калиброванным аттенюатором (3), установите достаточную для надежной индикации величину тока детектора. Зафиксируйте ослабление, вносимое калиброванным аттенюатором, воспользовавшись его градуировочным графиком. Выведя калиброванный аттенюатор на ноль, установите детекторный ток равным первоначальному с помощью некалиброванного аттенюатора. При этом затухания на обоих аттенюаторах одинаковы. Повторите эти измерения для 6-7 значений тока. Постройте график калибровки аттенюатора (3).

### УПРАЖНЕНИЕ 3. ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕТЕКТОРА.

Для измерения характеристики детектора, т.е. зависимости тока детектора от поступающей на него мощности СВЧ, необходимо точно определить уровень этой мощности, воспользовавшись формулой (2). Для измерения характеристики детектора необходимо проделать следующие операции.

1) Установите переключатели (6) и (7) (рис.10) в положение, соединяющее основной тракт с детекторной секцией (9). В режиме модулированных колебаний генератора с помощью короткозамкнутого поршня и трехшлейфового трансформатора полных сопротивлений (8) добейтесь максимального тока детектора (при максимальной амплитуде сигнала на экране осциллографа (17)). Измерительной линией определите КСВН в тракте, рассчитав его по формуле (3). При хорошем согласовании  $K_{дет\ смв}$  не превышает 2.

2) Переключателем (6) соедините основной тракт генератора с измерителем мощности (10) и аналогично п.1 определите  $K_{смв}$ .

3) Переключите генератор (1) в режим немодулированных колебаний и снова соедините основной тракт с детекторной секцией (9). Аттенюатором (3) или (4) установите такое значение падающей мощности, чтобы отклонение стрелки прибора, фиксирующего ток детектора, составляло 100 мкА.

4) Выполните калибровку измерителя мощности согласно приложению. Переключив основной тракт на измеритель мощности переключателем (6), проведите измерения мощности, соответствующей току детектора 100 мкА. Уменьшить ток детектора до 90 мкА, проведите измерение мощности. Повторяя эти измерения через 10 мкА, снимите зависимость  $I=I(P_{изм})$ .

5) При обработке результатов измерений необходимо учесть, что вследствие рассогласования в трактах, содержащих детекторную секцию и измеритель мощности, следует ввести поправку при определении мощности, выделяемой на детекторной секции. Используя формулу (2), эта поправка принимает вид:

$$\gamma = \frac{K_{\text{дет}}}{K_{\text{изм}}} \left( \frac{K_{\text{дет}} + 1}{K_{\text{изм}} + 1} \right)^2 ; \quad P_{\text{дет}} = \gamma P_{\text{изм}} . \quad (8)$$

Построить график  $I=I(P_{\text{дет}})$  с учетом поправки на рассогласование. При построении этого графика поправкой можно пренебречь при коэффициентах стоячей волны менее 1.5, достаточно оценить допускаемую при этом погрешность.

Определите максимальную токовую чувствительность (отношение тока детектора к мощности вызвавшего этот ток СВЧ сигнала) в амперах на ватт (А/Вт).

#### УПРАЖНЕНИЕ 4. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ РЕАКТИВНОГО ЭЛЕМЕНТА С ПОМОЩЬЮ ДВОЙНОГО Т-МОСТА.

Балансная схема на двойном Т-мосте позволяет определять сопротивление некоторого элемента путем сравнения его с известным, эталонным. В качестве эталонного в данном упражнении используется сопротивление короткозамкнутого отрезка стандартного волновода. Известно, что реактивное сопротивление короткозамкнутой линии длиной  $l$  равно:

$$jX = jZ_{\text{в}} \operatorname{tg} 2\pi \frac{l}{\lambda_{\text{в}}} , \quad (9)$$

где  $\lambda_{\text{в}}$  - длина волны в волноводе,  $Z_{\text{в}}$  - волновое сопротивление волновода. Последнее связано с волновым сопротивлением свободного пространства  $Z_0$  (для волноводов, возбуждаемых на волнах типа Н, в нашем случае Н<sub>10</sub>) следующим образом:

$$Z_{\text{в}} = \frac{l}{l_0} Z_0 , \quad (10)$$

( $\lambda_0$  - длина волны в свободном пространстве, волновое сопротивление свободного пространства в системе СИ равно  $Z_0 = 377 \text{ Ом}$ ).

Из приведенной выше формулы видно, что перемещая короткозамыкающий поршень (меняя  $l$ ), можно получить любое значение  $X$ , причем величина  $X$  однозначно определяется величиной  $l$ , которая считывается непосредственно со шкалы подвижки поршня (отсчет идет от плоскости входного фланца волноводной секции с поршнем, в миллиметрах).

1) Приступая к измерениям, переключите генератор в режим модулированных колебаний. С помощью переключателей (6) и (7) соедините основной тракт с трактом, идущим к двойному Т-мосту. Подключите детектор секции (14) ко входу измерителя отношения напряжений. Настройте по прибору измерителя отношения напряжений детекторную секцию (14) на максимум сигнала.

2) Перемещая поршень (12), найдите положение, соответствующее минимуму сигнала детектора. По мере уменьшения сигнала переходите на более чувствительные пределы измерителя отношения напряжений и увеличивайте усиление (можно также уменьшать ослабление, введенное в тракт аттенуатором

(4)). Для более точного определения координаты, постройте зависимость сигнала детектора (в относительных единицах) от положения поршня - в пределах  $\pm 0.5$  мм от первоначального. Зафиксируйте значение  $I_{\text{мин}}$ , соответствующее минимуму сигнала на выходе двойного Т-моста.

3) Найденная величина  $I_{\text{мин}}$  соответствует равенству реактивных сопротивлений в плечах сравнения.

Определите величину сопротивления короткозамкнутого отрезка волновода (13), воспользовавшись приведенными выше формулами для расчета сопротивления эталонной нагрузки (используйте также значения  $\lambda_{\text{в}}$  и  $\lambda_0$ , полученные в первом упражнении). По вычисленному значению сопротивления определите, какой характер имеет исследованная реактивная нагрузка - емкостной или индуктивный.

При сдаче задачи должны быть представлены следующие результаты:

1. График зависимости тока детектора измерительной линии от координаты (вдоль волноводного тракта), включающего по крайней мере два максимума (или минимума) при коротком замыкании тракта.

2. Измеренное значение длины волны в волноводе и измеренное значение частоты и длины волны в свободном пространстве, сопоставленное с расчетным значением длины волны в волноводе.

3. График калибровки переменного аттенюатора: зависимость ослабления (в дБ) от положения указателя ручки регулировки (в делениях лимба).

4. Значение полной мощности генератора с учетом КСВН тракта.

5. Характеристика детектора - график зависимости тока детектора от величины выделяющейся на нем мощности с учетом КСВН трактов измерителя мощности и детекторной секции. Оценка погрешности этих измерений.

6. Значение максимальной токовой чувствительности детектора. 7. График зависимости детекторного сигнала на выходе двойного Т-моста (в относительных единицах) от длины перестраиваемого короткозамкнутого отрезка волновода и значение  $I_{\text{мин}}$ . Значение сопротивления  $X$ , соответствующее балансу моста.

**ПРИЛОЖЕНИЕ:** НАСТРОЙКА УЗЛОВ ВОЛНОВОДНОГО ТРАКТА И АППАРАТУРЫ (рис.10)

1. Настройка СВЧ генератора (Г4-83) (1) и калибровка измерителя отношения напряжений (В8-7) (15).

Перед включением генератора (Г4-83) ручку установки нуля "БАЛАНС МОСТА" поставьте в среднее положение, ручку аттенюатора "ВЫХОД" установите на ослабление -40 дБ. В задаче мощность с этого выхода подается на электронно-счетный частотомер.

Поставьте ручку "ВЫХОД мV" на минимум и включите прибор тумблером "СЕТЬ" и прогрейте его в течение 10 мин. Установите режим модулированных колебаний (кнопка П). Для работы в режиме немодулированных колебаний должна быть нажата кнопка "НГ". По шкале генератора установите требуемую частоту  $\sim 8720$  МГц ( $\sim 3.4$  см). В дальнейшем измерение частоты генерации производится непосредственно по шкале прибора.

Тумблером "СЕТЬ" включите питание измерителя отношения напряжений (В8-7), прогрейте приборы в течение 15 мин.

Для калибровки измерителя отношения напряжений (В8-7) (если необходимо): -

- установите переключатель "ЧАСТОТА кГц" в положение "0.13-20 кГц";
- установите переключатель декадного делителя в положение " 1";
- установите тумблер "СИНХРОНИЗАЦИЯ" в положение "ВНУТР.";
- установите переключатель "КОНТР. СМЕЩ. (V)" и "УСРЕДН." в выключенное положение;
- подайте на вход прибора сигнал калибровки, подключив входной кабель к разъему "ВЫХ. КАЛИБР. ИЗМЕРИТЕЛЯ ОТНОШЕНИЯ 100 mV";
- ручками грубой и плавной регулировки усиления установите показания индикатора 1,000 - 0,002;
- установите переключатель декадного делителя в положение " 10";
- потенциометром "КАЛИБРОВКА 0,100" установите показания индикатора 0,100 - 0,001;
- нажмите кнопку декадного делителя " 1", если показания прибора отличаются от 1,000 более, чем на - 1 знак, произведите регулировку прибора, несколько раз повторяя операции установки показаний индикатора 1.000 и 0.100.

Для проведения измерений измерителем отношения напряжения (В8-7):

установите переключателем "ЧАСТОТА кГц" 1;

подключите вход прибора к детекторной головке измерительной линии.

Если при этом показания прибора будут больше 3,160, переключателем декадного делителя установите их в пределах 0,100-3,160;

- наблюдайте форму огибающей СВЧ сигнала, подавая сигнал с контрольного детектора через измеритель отношения напряжений на осциллограф;
- ручкой "ВЫХОД mW" генератора установите максимальную амплитуду сигнала по экрану осциллографа;
- настройте генератор на максимум отдаваемой мощности, ориентируясь при этом по току детектора (на индикаторном приборе). Мощность генерируемого сигнала при этом модулируется напряжением звуковой частоты (~ 1 кГц) в форме симметричных прямоугольных импульсов.

2. Настройка детекторной секции (9) производится в режиме модулированных колебаний. Соедините с помощью переключателей (6) и (7) тракт детекторной секции (9) с основным трактом, идущим от СВЧ генератора; настраивающим поршнем детекторной головки, а затем ерестройкой трехштырей трансформатора полных сопротивлений (8) добейтесь максимальной величины сигнала на микроамперметре.

3. Настройка измерительной линии. (Режим модулированных колебаний). Подключите детектор измерительной линии ко входу измерителя отношения напряжений (15). Поставьте волноводный переключатель (6) в положение, соединяющее основной тракт с измерителем мощности (10).

Проверив установку нуля измерителя отношения напряжений, регулировками делителя входного напряжения и усиления установите удобную для наблюдения величину измеряемого сигнала на приборе. Пользуясь регуляторами настройки детекторной секции измерительной линии, добейтесь максимальной величины сигнала, снимаемого с измерительной линии.

4. Включение и настройка измерителя мощности (МЗ-21а) (10) проводится после выполнения упр.2. При эксплуатации ваттметра МЗ-21а необходимо помнить, что термоэлектрический преобразователь чувствителен к перегрузкам, которые могут привести к выходу его из строя. При установке калибровочного напряжения и калибровке ваттметра измеряемую мощность на вход преобразователя **НЕ ПОДАВАТЬ**.

Для подготовки к проведению измерений:

- ручку плавной регулировки напряжения калибровки установите в крайнее левое положение;
- включите тумблер "СЕТЬ" и прогрейте прибор в течение 15 мин.;
- установите нуль шкалы отсчетного прибора с помощью ручек "УСТАНОВКА НУЛЯ", а переключатель поставьте в положение "НАПРЯЖ. КАЛИБР.";
- переключатель "ПРЕДЕЛЫ ИЗМЕРЕНИЙ mW" поставьте в положение "ЗК";
- ручкой установки "НАПРЯЖ. КАЛИБР." стрелку отсчетного прибора установить на конечную отметку шкалы;
- переключатель отсчетного прибора установите в положение "КАЛИБРОВКА" и ручкой "КАЛИБРОВКА" произведите калибровку ваттметра под реальную чувствительность преобразователя, установив стрелку отсчетного прибора на конечную отметку шкалы;
- переключатель отсчетного прибора поставить в положение "ИЗМЕРЕНИЕ";
- переключатель "ПРЕДЕЛЫ ИЗМЕРЕНИЙ mW" перевести на требуемый предел измерений (3 mW или 10 mW) и установив нуль шкалы отсчетного прибора ручками "УСТАНОВКА НУЛЯ".

При переходе с одного предела измерений на другой необходимо отключать измеряемую мощность, проконтролировать нуль отсчетного прибора и при необходимости установить его ручками "УСТАНОВКА НУЛЯ".

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гинзтон Э.Л. - Измерения на сантиметровых волнах. М.: ИЛ, 1960.
2. Лебедев И.В. - Техника и приборы СВЧ, т.1. М.: Высшая школа, 1970.
3. Клиндер Г. - Сверхвысокие частоты. М.: Наука, 1969.