СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

**«Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»
(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)**

Кафедра теоретических основ радиотехники

А. А. Данилин

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к выполнению лабораторной работы по дисциплине
“ Измерения на СВЧ”
(электронный вариант)

Измерение параметров ферритовых СВЧ устройств

Санкт-Петербург
2025 г.

6. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФЕРРИТОВЫХ СВЧ-УСТРОЙСТВ

В лабораторной работе студенты знакомятся с устройством и принципом действия аналогового измерителя КСВ и ослабления Р2-61. Изучаются методы его использования для исследования частотных характеристик ферритовых устройств СВЧ.

6.1. Ферритовые устройства СВЧ

Устройства СВЧ с ферритами могут быть разделены на две группы: невзаимные устройства (вентили, циркуляторы); взаимные управляющие устройства (фазовращатели, выключатели, коммутаторы, перестраиваемые фильтры и резонаторы). Изменение характеристик таких устройств осуществляется регулировкой внешнего магнитного поля подмагничивания.

Феррит – это магнитодиэлектрик с $\varepsilon = 5...20$, $\operatorname{tg}\delta = 10^{-2}...10^{-3}$. Различают поликристаллические ферриты и монокристаллы (например, железо-иттриевый гранат – ЖИГ). Основной параметр ферритов – это магнитная проницаемость μ, которая связывает напряженность магнитного поля H и индукцию B. У ферромагнетиков из-за доменной структуры $\mu >> 1$. Свойства феррита при одновременном воздействии на него постоянного и слабого СВЧ магнитного полей описываются тензором магнитной проницаемости

$$\vec{B} = \{\mu\}\vec{H} = \begin{vmatrix} \mu & -ik & 0 \\ ik & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu_0 \end{vmatrix} \vec{H},$$

где компоненты тензора равны

$$\mu = \mu_0\left(1 - \frac{\omega_s \cdot \omega_0}{\omega^2 - \omega_0^2}\right) = \mu' + i\mu'', \qquad k = \mu_0\left(\frac{\omega_s \cdot \omega}{\omega^2 - \omega_0^2}\right) = k' + ik''.$$

Здесь ω – частота СВЧ-сигнала; $\omega_s = \gamma\mu_0 M_s$ – параметр феррита, зависящий от гиромагнитной постоянной $\gamma = e/m = 1.76 \cdot 10^{11}$ Кл/кг и намагниченности насыщения феррита M_s; $\omega_0 = \mu_0\gamma H_0 \Rightarrow \omega_0 + i\mu_0\alpha$ – частота гиромагнитного резонанса (ларморова частота), которая определяется величиной внешнего постоянного поля подмагничивания H_0 (для феррита с потерями она комплексная); α – коэффициент затухания. На частоте гиромагнитного резонанса $\omega = \omega_0 = \mu_0\gamma H_0$ резко возрастают потери (возрастает мнимая часть μ'' –

резонансное поглощение – рис. 6.1). Ширина области резонанса примерно равна $\Delta H = 2\alpha H_0$.

Взаимодействие СВЧ-поля $H_{\text{СВЧ}}$ с ферритом, подмагниченного постоянным магнитным полем $\vec{H}_0 = H_0 \cdot \vec{e}_z$, можно разбить на несколько случаев:

1. Совпадение направлений СВЧ-поля и поля подмагничивания:

$$B = \begin{bmatrix} \mu & -ik & 0 \\ ik & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ H_{\text{СВЧ}} \end{bmatrix} = \mu_0 \cdot H_{\text{СВЧ}} \cdot \vec{e}_z.$$

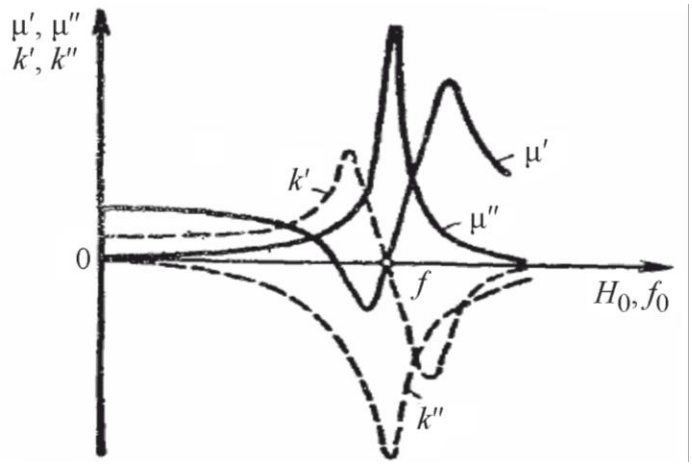


Рис. 6.1. Зависимости параметров тензора магнитной проницаемости феррита от подмагничивающего поля

Невзаимность отсутствует, структура поля не меняется.

2. Перпендикулярное расположение линейного СВЧ-поля (например, по оси *x*) и поля подмагничивания:

$$\vec{B} = \begin{bmatrix} \mu & -ik & 0 \\ ik & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_{\text{СВЧ}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \mu \cdot H_{\text{СВЧ}} \cdot \vec{e}_x + ik \cdot H_{\text{СВЧ}} \cdot \vec{e}_y.$$

Меняется структура поля, появляется эллиптическая поляризация вектора магнитной индукции.

3. СВЧ-поле имеет **правую** круговую поляризацию:

$$\vec{B} = \begin{bmatrix} \mu & -ik & 0 \\ ik & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_{\text{СВЧ}} \\ -iH_{\text{СВЧ}} \\ 0 \end{bmatrix} =$$

$$= \left[\mu \cdot H_{\text{СВЧ}} - k \cdot H_{\text{СВЧ}}\right] \cdot \vec{e}_x + i\left[k \cdot H_{\text{СВЧ}} - \mu \cdot H_{\text{СВЧ}}\right] \cdot \vec{e}_y.$$

Вектор индукции имеет также правую круговую поляризацию. Эффективная магнитная проницаемость для правого направления поляризации равна

$$\mu_+ = \mu - k = \mu_0 \cdot \left(1 - \frac{\omega_s}{\omega + \omega_0}\right).$$

4. СВЧ поле имеет **левую** круговую поляризацию:

$$\vec{B} = \begin{bmatrix} \mu & -ik & 0 \\ ik & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_{\text{СВЧ}} \\ -iH_{\text{СВЧ}} \\ 0 \end{bmatrix} =$$

$$= \left[\mu \cdot H_{\text{СВЧ}} + k \cdot H_{\text{СВЧ}}\right] \cdot \vec{e}_x + i\left[k \cdot H_{\text{СВЧ}} + \mu \cdot H_{\text{СВЧ}}\right] \cdot \vec{e}_y.$$

Вектор индукции имеет левую круговую поляризацию. Эффективная магнитная проницаемость равна

$$\mu_- = \mu + k = \mu_0 \left(1 + \frac{\omega_s}{\omega + \omega_0}\right).$$

Видно, что для СВЧ-поля с разным направлением поляризации феррит имеет отличающиеся свойства. Зависимости эффективных магнитных проницаемостей (вещественная и мнимая части) для разных направлений поляризации показаны на рис. 6.2.

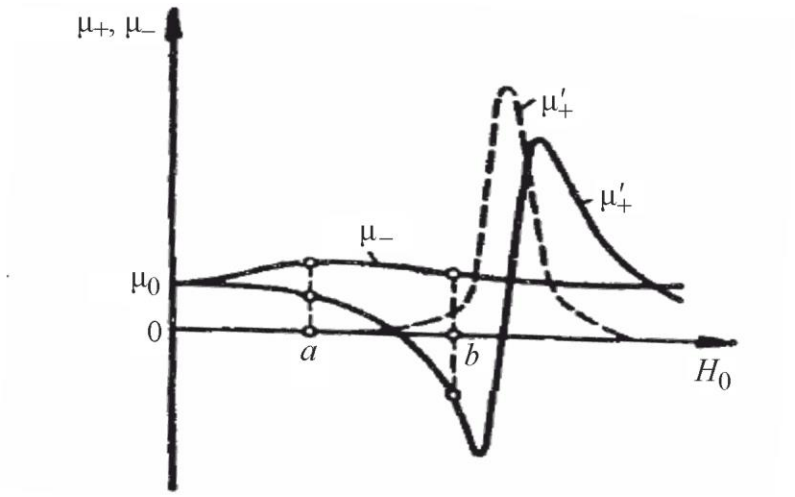


Рис. 6.2. Зависимости эффективных магнитных проницаемостей μ_+ и μ_- от напряженности поля подмагничивания H_0

На графиках можно выделить 4 области использования подмагниченного феррита для поля СВЧ круговой поляризации:

1. *Резонансная область*. Максимальное поле подмагничивания $H_0 = H_{\text{рез}}$. Эффективное поглощение поля *только правой* круговой поляризации (левая

поляризация поглощается слабо). Это свойство используется для создания невзаимных поглотителей (вентилей).

2. *Дорезонансная область.* Здесь μ_- больше μ_+ (сечение *a* на рис. 6.2). В этой области можно использовать разницу свойств феррита для создания невзаимных фазовращателей и циркуляторов.

3. *Дорезонансная область* – область, где $\mu_- > 0$, $\mu_+ < 0$ (сечение *b*) характерна выталкиванием поля СВЧ правой поляризации из феррита (поскольку магнитная проницаемость для этого поля отрицательна). Используется для разработки невзаимных устройств со смещением поля.

4. *Дорезонансная область с плавным регулированием* μ_+ путем изменения поля подмагничивания. Используется в ферритовых фазовращателях с плавным изменением фазы.

Возможные реализации ферритовых управляющих устройств СВЧ представлены на рис. 6.3. Наиболее важными невзаимными устройствами являются вентили и циркуляторы. Рассмотрим волноводные конструкции вентилей и циркуляторов, которые исследуются в лабораторной работе.

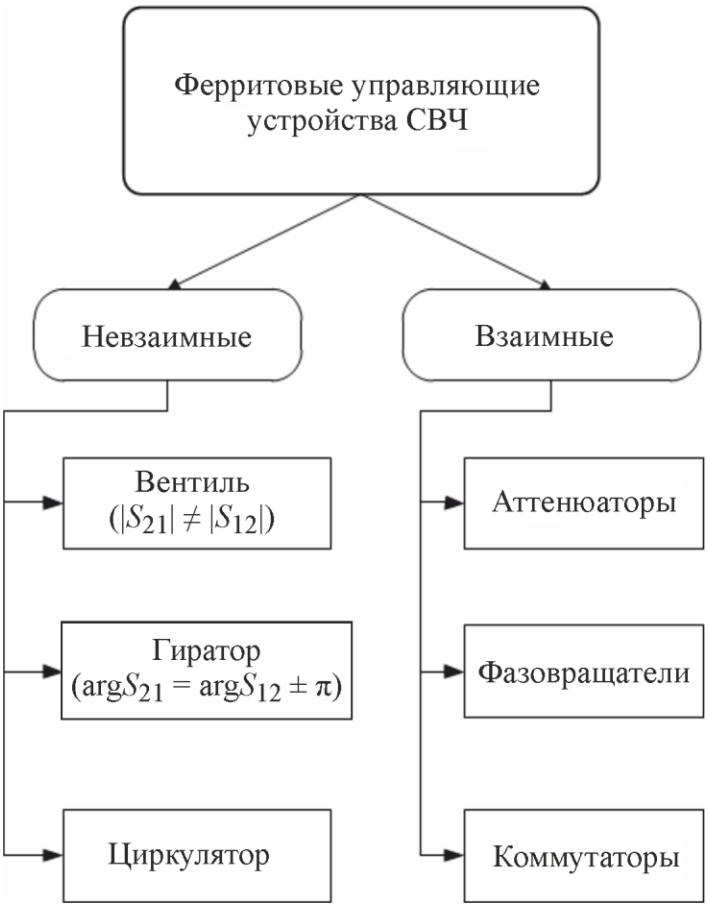


Рис. 6.3. Классификация ферритовых устройств СВЧ

Ферритовый вентиль – СВЧ-устройство с односторонним прохождением электромагнитной волны (малым затуханием волны, проходящей в одном направлении, и большим – для волны обратного направления). Нашли применение два типа волноводных вентилей:

1. *Резонансные вентили*. Принцип действия таких вентилей основан на явлении гиромагнитного резонанса. Ферритовая пластинка располагается в области круговой поляризации волны основного типа и подмагничивается до значения, соответствующего гиромагнитному резонансу на рабочей частоте (рис. 6.4). Потери энергии при резонансе оказываются малыми для одного направления распространения и большими для другого. Недостатком такого вентиля является большое значение напряженности поля подмагничивания (что ведет к увеличению размеров и массы магнита), а также плохой теплоотвод тепла от ферритовой пластины.

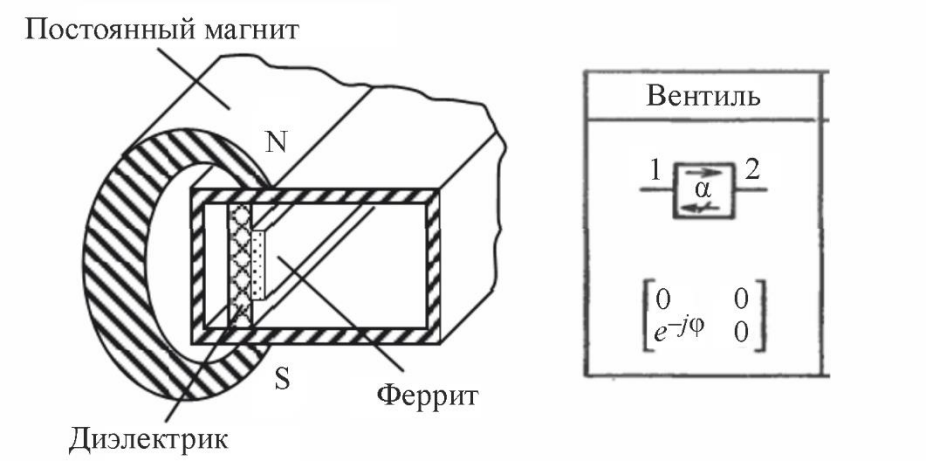


Рис. 6.4. Конструкция резонансного вентиля в прямоугольном волноводе

2. *Вентили со смещением поля.* Принцип действия основан на явлении смещения поля, существующем в линиях передачи, содержащих намагниченные ферритовые элементы. Значение подмагничивающего поля H_0 выбирают таким, чтобы для обратной волны правой поляризации эффективная проницаемость была бы $\mu_+ < 0$ и поле не проникало бы внутрь феррита. Для прямой волны $\mu_- \approx \mu_0$, и феррит можно рассматривать как обычный диэлектрик. Подбором толщины ферритовой пластины и намагничивающего поля можно обеспечить распределение поля, показанное на рис. 6.5.

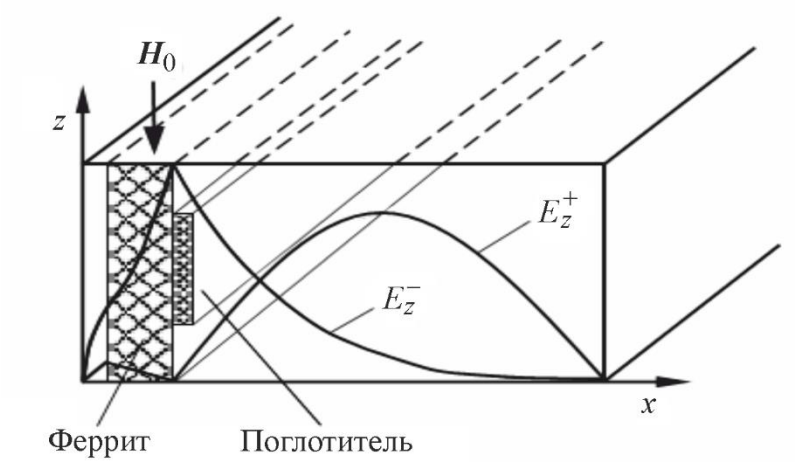


Рис. 6.5. Волноводный вентиль со смещением поля

Поле имеет минимальное значение в месте расположения пластинки. Обратная волна в этом месте имеет максимум. Если на поверхность феррита наклеить слой поглотителя, то прямая волна пройдет без ослабления, а обратная – затухнет. Такие вентили выгодно отличаются от резонансных меньшими габаритами и массой, поскольку намагничивающее поле в них в 1,5–2 раза меньше, чем в резонансных.

3. *Волноводный Y-циркулятор* представляет собой *H*-плоскостное Y-сочленение прямоугольных волноводов, в центре которого помещен ферритовый цилиндр (рис. 6.6).



Рис. 6.6. Волноводный Y-циркулятор

Все прямоугольные волноводы, образующие плечи тройника, рассчитаны на одноволновый режим работы. Принцип действия Y-циркулятора – использование разных значений эффективной магнитной проницаемости для волн левой μ_- и правой μ_+ поляризаций в дорезонансной области (см. рис. 6.2, сечение *а*). Предположим, что в плече 1 циркулятора возбуждена волна H_{10}, распространяющаяся внутрь циркулятора. Если в центре поместить ферритовый цилиндр и намагнитить его перпендикулярно плоскости сочленения, то волна из плеча 1, падая на цилиндр, возбудит в нем две волны с круговой по-

ляризацией, векторы которых вращаются в противоположных направлениях. В результате дифракции волны на цилиндре возникают две волны, одна из которых (левая) обегает ферритовый цилиндр по часовой стрелке, а другая (правая) – против часовой стрелки. Из-за разной эффективной проницаемости ферритового вкладыша скорости волн β^- и β^+ разные, поэтому в одном плече они складываются, в другом – вычитаются. Подбирая размеры цилиндра и значение подмагничивающего поля, можно добиться того, что результирующее магнитное поле будет иметь форму двух петель (рис. 6.7), одна из которых связана с возбуждающим плечом 1, а вторая – с плечом 2. Плечо 3 в этом случае будет развязано от плеч 1 и 2.

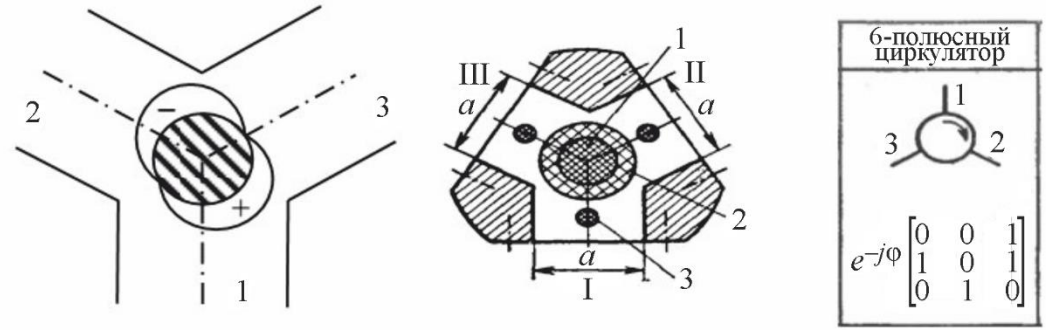


Рис. 6.7. Распределение поля в Y-циркуляторе и его матрица рассеяния

При подаче сигнала на порт 2 вся мощность будет передаваться в плечо 3, а плечо 1 будет развязано. Для улучшения согласования волноводов с ферритом на последний надевают диэлектрическое кольцо. Циркулятор часто используют как вентиль – на развязанное плечо ставят согласованную нагрузку. Преимущество такого устройства по сравнению с обычными вентилями – в хорошем теплоотводе у внешней СВЧ-нагрузки.

6.2. Ферритовые фильтры СВЧ-диапазона

Для фильтров СВЧ с электрической перестройкой по частоте (а также для генераторов, управляемых напряжением) часто используют ферродиэлектрические резонаторы. Ферритовый СВЧ-резонатор представляет собой сферу из железо-иттриевого граната (Yttrium-Iron-Garnet – YIG) диаметром 200…700 мкм. При размещении в поле электромагнита, создающего поле подмагничивания напряженностью $H = 20…40$ мТл, сфера имеет свойства колебательной системы (резонатора) на частотах от 2 до 50 ГГц с эквивалентной добротностью до $(2…3)10^3$. Резонансная частота пропорциональна значению поля подмагничивания (и, соответственно, току в катушке подмагничивания). ЖИГ-фильтры имеют линейные, хорошо воспроизводимые перестроечные характеристики

по частоте в пределах двух-трех октав. Однако для них характерна низкая скорость перестройки частоты, что объясняется высокой инерционностью схемы подмагничивания феррита.

На рис. 6.8 показан ферритовый фильтр, использующий коаксиальные порты. ЖИГ-сфера помещена в ортогональные петли связи и подмагничивается внешним полем H_0. Вдали от ферромагнитного резонанса входной и выходной порты «развязаны», так как переменное магнитное поле, создаваемое током входной рамки, вызывает в сфере малую намагниченность, линейно-поляризованную в направлении, перпендикулярном к выходной рамке. Вблизи ферромагнитного резонанса намагниченность образца велика и имеет поляризацию, близкую к круговой. Она наводит ток в выходной рамке, обеспечивая передачу энергии на выход фильтра.

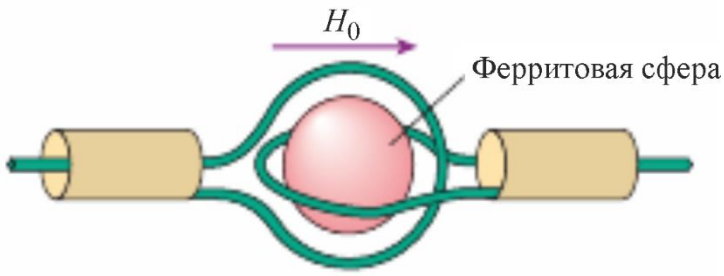


Рис. 6.8. Схема СВЧ-фильтра на ЖИГ-сфере

Такие фильтры имеют на резонансной частоте потери ~ 0,5…1 дБ и полосу пропускания порядка единиц или десятков мегагерц. Недостатком фильтра с одним ферритовым резонатором является малая крутизна спада АЧХ за пределами полосы пропускания (около –6 дБ на октаву). Для получения более избирательных фильтров в одной конструкции объединяют несколько ЖИГ-сфер. При этом потери, вносимые фильтром в полосе пропускания, несколько возрастают до 2…3 дБ.

6.3. Технические данные измерителя КСВН и ослабления Р2-61

Прибор Р2-61 предназначен для наблюдения на экране осциллографического индикатора частотных характеристик модулей параметров рассеяния волноводных двухполюсников и многополюсников СВЧ, для измерения КСВН и ослабления этих узлов.

Технические данные прибора:

1. Диапазон рабочих частот 8,24 …12,05 ГГц (волновод 23 × 10 мм).
2. Полоса качания частоты от 120 МГц до полного частотного диапазона.
3. Выходная мощность не менее 1 мВт.

4. Метрологические параметры прибора:

– диапазон измерения КСВ 1,05…5 с погрешностью ±(5 · КСВ), %;

– диапазон измерения ослабления *A* от 0 до 35 дБ с погрешностью ±(0,05 · А + 0,5), дБ;

– погрешность установки частоты не более 240 МГц.

Прибор состоит из блока генератора (ГКЧ 61) и измерителя-индикатора Я2Р-67. В состав прибора входит комплект направленных ответвителей с детекторами СВЧ (рис. 6.9).

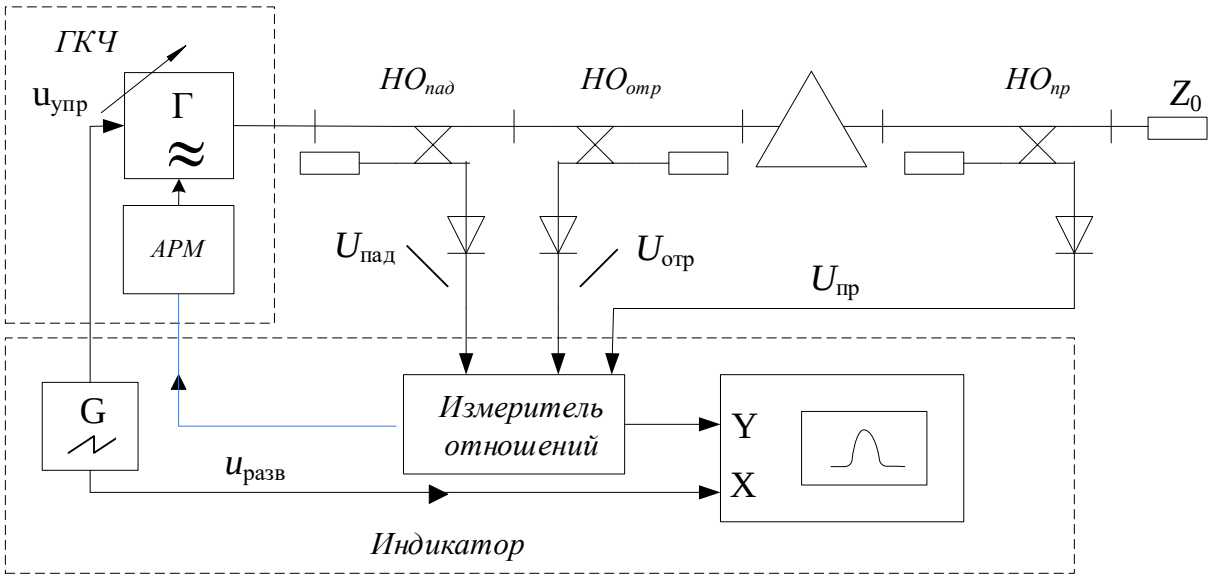


Рис. 6.9. Структурная схема панорамного измерителя Р2-61

Направленность ответвителей порядка 38 дБ, коэффициент преобразования детекторов 2 мВ/мВт (с учетом ослабления НО).

Генератор качающейся частоты обеспечивает ручную перестройку и автоматическое качание частоты в пределах установленных границ F1, F2. Главные требования к ГКЧ – широкий диапазон перестройки частоты при минимальной вариации амплитуды, отсутствие побочных колебаний и гармоник. ГКЧ построен на основе автогенератора с ЖИГ-сферой и управляется по частоте пилообразным напряжением развертки. Частота генерации жестко связана с управляющим напряжением, поэтому для оцифровки частоты такого генератора используют цифровой вольтметр, измеряющий управляющее напряжение в точках расположения частотных меток М1 и М2. Для стабилизации амплитуды используют систему автоматической регулировки мощности (АРМ) (рис. 6.10).

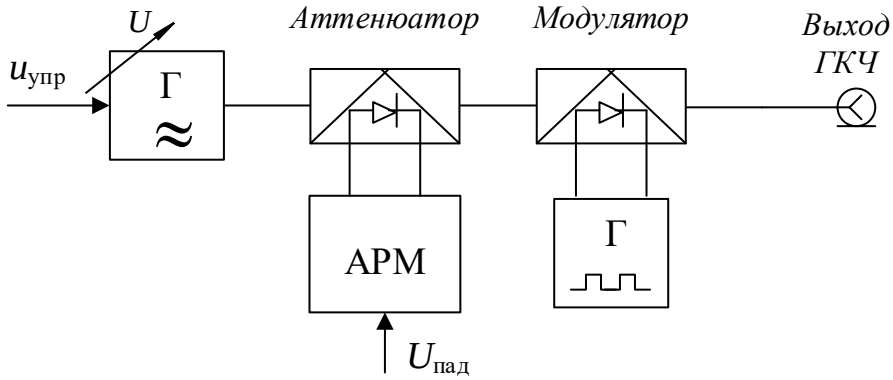


Рис. 6.10. Структурная схема генераторного блока измерителя КСВН и ослабления Р2-61

Сигнал ошибки для АРМ вырабатывается путем сравнения продетектированного сигнала падающей волны ($U_{пад}$) и опорного напряжения ($U_{оп}$). Регулирующим элементом АРМ является электрически управляемый полупроводниковый аттенюатор, устанавливаемый на выходе генераторного блока. Регулировкой опорного напряжения АРМ можно менять выходную мощность генератора.

Контроль работы системы АРМ проводят, подавая на индикатор сигнал падающей волны. В случае правильной работы АРМ на экране индикатора должна получиться горизонтальная линия. Однако надо помнить, что система АРМ получает информацию об амплитуде генерируемого сигнала с НО падающей волны. Поэтому при неравномерности АЧХ этого ответвителя появится частотная зависимость амплитуды выходного сигнала. Она будет соответствовать инвертированному виду АЧХ НО падающей волны. Вид этой зависимости называют *собственной АЧХ* прибора.

Для работы низкочастотного индикаторного блока (усилителей и измерителей отношений) используют амплитудную модуляцию (манипуляцию) СВЧ-сигнала. При этом проще усиливать выходные измерительные сигналы и фильтровать их от помех. Частоту модуляции выбирают порядка десятков килогерц, форма сигнала модуляции – прямоугольные импульсы (меандр). Модуляцию выполняют с помощью полупроводникового коммутатора, установленного в тракт выходного сигнала генератора.

Низкочастотная часть измерителя Р2-61 – это индикаторный блок (рис. 6.11). Он имеет общий измерительный канал для сигналов отраженной и проходящей волн (A), которые подают на его вход в зависимости от измеряемого параметра. Переключение режимов измерения (отраженная – проходя-

щая) проводят перестановкой НО в измерительном тракте. Дополнительный канал падающей волны (*C*) служит для работы системы АРМ и контроля равномерности собственной АЧХ генератора.

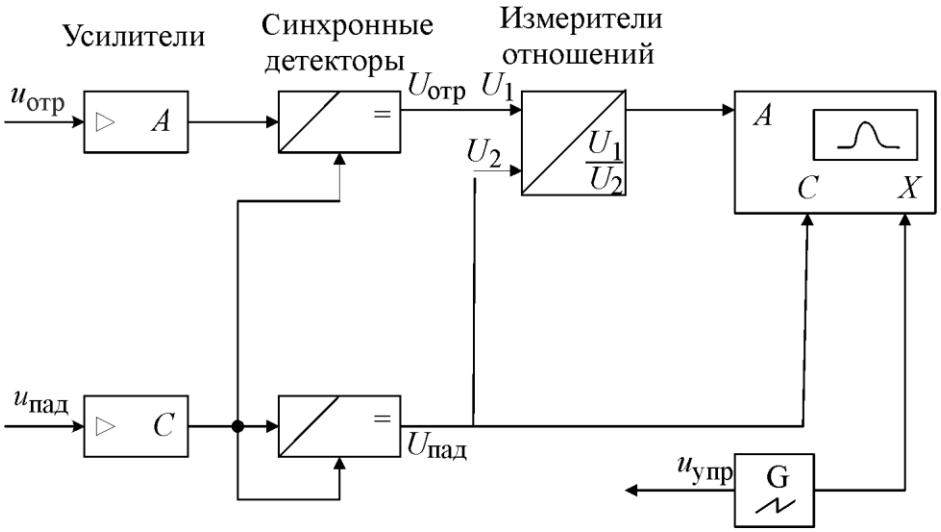


Рис. 6.11. Измерительный блок анализатора КСВН и ослабления Р2-61

На измерительный блок подают продетектированные НЧ-сигналы падающей, отраженной или проходящей волны. Эти сигналы поступают на узкополосные усилители и далее – на синхронные детекторы (СД). Последние позволяют получить постоянные напряжения, пропорциональные квадратам амплитуд (мощности) падающей $U_{пад} \sim P_{пад}$ и отраженной/проходящей волн ($U_{отр}$, $U_{пр}$). В качестве опорного сигнала детектора используют усиленный сигнал падающей волны. Преимущество СД – их хорошие фильтрующие свойства и помехозащищенность.

Выделенное напряжение сигнала отраженной или прошедшей волны подают на измеритель отношения и далее на канал *Y* осциллографического индикатора. На канал *X* подают сигнал от генератора пилообразного напряжения, который размещен также в индикаторном блоке. Длительность прямого хода пилообразного напряжения определяет время анализа частотной характеристики. В приборе используют стандартные значения 0,08, 1 и 10 с, предусмотрен режим работы от внешнего управляющего напряжения, а также ручная перестройка частоты. Последний режим превращает измеритель в одночастотный генератор со стабильной амплитудой и ручной перестройкой в диапазоне частот. Это дает возможность проводить особо точные измерения на фиксированных частотах с использованием внешних вольтметров и частотомеров.

На канал *Y* также поступают сигналы частотных меток с блока управления ГКЧ. При этом на осциллограмме создаются их изображения в виде коротких импульсов. Частота ГКЧ каждой метки индицируется на цифровом табло (М1 или М2). Совмещая метку с интересующей точкой исследуемой характеристики, по табло отсчитывают ее частоту.

Вертикальная шкала осциллографического индикатора имеет размерность квадрата модуля коэффициента отражения/передачи. Перед измерениями шкалу калибруют по двум уровням. Первая калибровка – по нулевому уровню сигнала – обычно делается при настройке прибора. Совмещают линию развертки в отсутствие измерительного сигнала. Калибровка единичного уровня коэффициента отражения делается с короткозамыкателем, установленным на конце НО отраженной волны. Регулировкой усиления измерительного канала совмещают кривую отраженной волны с линией единичного коэффициента отражения вертикальной шкалы индикатора (отметка КСВН = ∞). Для измерения ослабления калибровку делают по единичному коэффициенту передачи. Для этого соединяют НО падающей и проходящей волн напрямую и совмещают кривую проходящей волны с линией единичного коэффициента передачи (отметка A = 0 дБ).

Вертикальная шкала измерителя после калибровки соответствует значениям $|S_{11}|^2$ или $|S_{21}|^2$. Чтобы не пересчитывать вручную эти величины в рабочие параметры (КСВН и ослабление), используют *электронный визир*. В индикаторе предусматривают дополнительные шкалы КСВН и ослабления [дБ], связанные с линией электронного визира (горизонтальная линия на экране). Совмещая его с выбранными точками частотной характеристики, по шкалам отсчитывают результат измерения КСВН или ослабления.

6.4. Задание и указания к выполнению работы

6.4.1. Подготовка установки к работе

1. Соберите измерительный тракт прибора для исследования частотных характеристик ослабления, подключив НО проходящей волны к направленному ответвителю падающей волны согласно рис. 6.12.

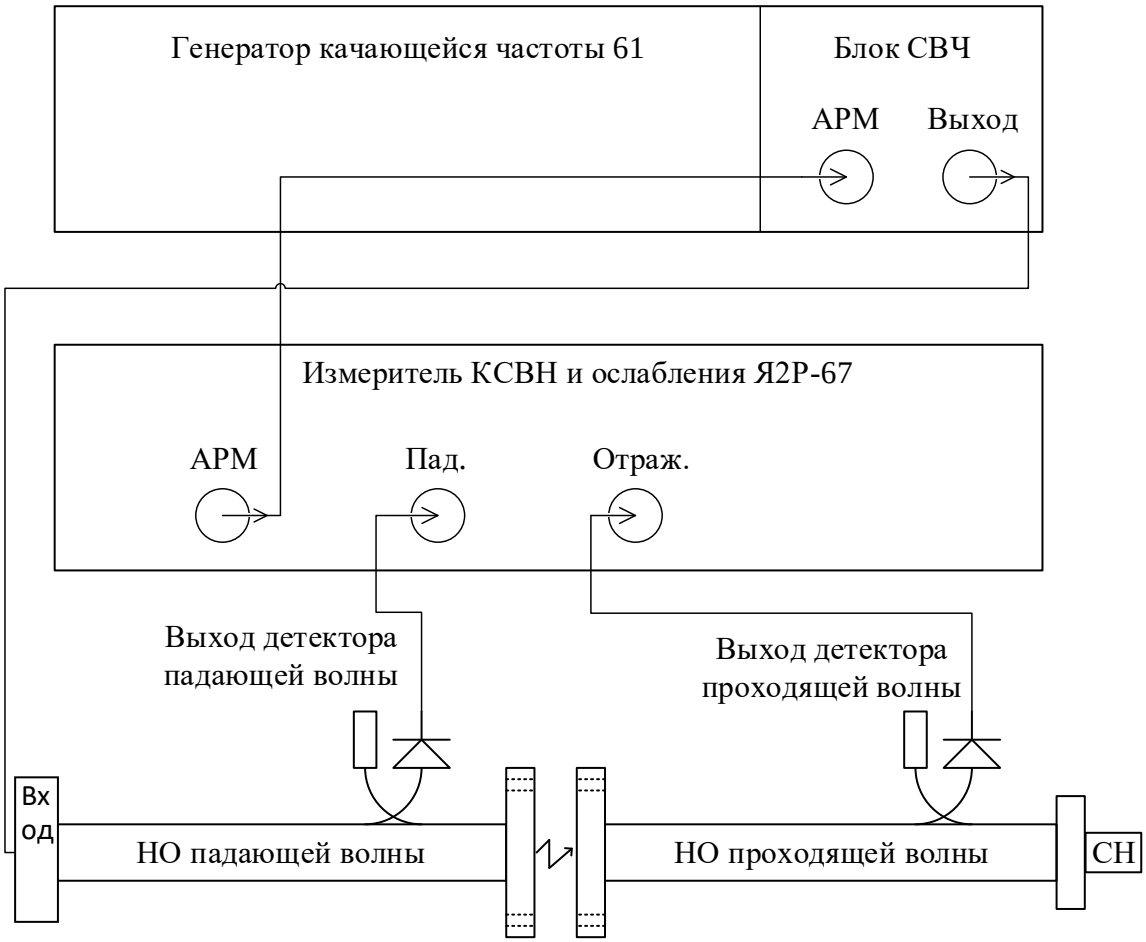


Рис. 6.12. Схема измерительной установки с измерителем КСВН и ослабления Р2-61

2. Установите исходное положение органов управления ГКЧ 61:

– **АМ** – **ВНУТР.**;

– **ВР. ПЕРЕСТРОЙКИ** – 0,08;

– **РЕЖИМ ПЕРЕСТРОЙКИ** – **F1 F2**;

– режим отображения частоты – $\mathbf{F_1}$.

На блоке СВЧ:

– **ВНЕШ. – АМ**;

– тумблер **СВЧ** – включен (положение вверх).

На индикаторном блоке:

– переключатель **ПРЕДЕЛЫ** – в положении **ПАД.**;

– **КОРРЕК.**, **–10dB**, **ЛОГ.** – отжаты;

– кнопки выбора полосы индикатора – широкая полоса .

Включите тумблеры – **СЕТЬ ВКЛ** и дайте прибору прогреться.

3. Установите максимальную полосу качания частоты ручками $\mathbf{F_1F_0}$ и $\mathbf{F_{2,\Delta}F}$. При этом ручка $\mathbf{F_1F_0}$ задает начальную частоту качания, а ручка $\mathbf{F_{2,\Delta}F}$ – конечную. Поставьте регулятор **УРОВЕНЬ** (на блоке СВЧ) в крайнее левое положение. Переключатель **ПРЕДЕЛЫ** (на индикаторном блоке) – в положение **ПАД.**. При этом система АРМ не работает (слабый сигнал). Затем отрегулируйте этими ручками режим работы АРМ так, чтобы получить более-менее равномерный сигнал от направленного ответвителя падающей волны.

6.4.2. Калибровка измерителя

1. Калибровку прибора в режиме измерения ослабления осуществляют при непосредственном соединении НО падающей и проходящей волн. Для соединения НО используются быстросъемные струбцины либо винты с М4 с накатом. Согласованная нагрузка на выходе НО проходящей волны остается подключенной на протяжении всех измерений.

2. Включите режим перестройки **F1 F2** и установите максимальную полосу качания частоты ручками $\mathbf{F_1F_0}$ и $\mathbf{F_{2,\Delta}F}$.

3. Поставьте переключатель **ПРЕДЕЛЫ** в положение 0 дБ. На экране будет воспроизводиться собственная АЧХ прибора в режиме измерения ослабления. Установите визир (ручкой **ОТСЧЕТ** на индикаторном блоке) на отметку 0 дБ и ручкой **КАЛИБР.** по возможности совместите АЧХ с линией визира.

4. Измерьте неравномерность собственной АЧХ с помощью электронного визира по шкале **дБ**. Истинное значение ослабления необходимо вычислять путем вычитания из значения по шкале **дБ** значения переключателя **ПРЕДЕЛЫ**, о чем свидетельствует надпись **–dB**. Для уточнения частоты отсчета можно применить режим ручной перестройки частоты. Цифровой индикатор частоты в зависимости от текущего режима отображения и перестройки может отображать одну из следующих частот $\mathbf{F_0}$, $\mathbf{F_1}$, $\mathbf{M_1}$, $\mathbf{M_2}$, $\mathbf{F_{2,\Delta}F}$. Активный режим отображения подсвечивается при помощи светодиодов над кнопками выбора режима отображения. Зарисуйте или сфотографируйте вид собствен-

ной АЧХ. В дальнейшем для сохранения калибровки прибора ручки **ПАД.**, **КАЛИБР.**, **УРОВЕНЬ** трогать нельзя.

6.4.3. Измерение частотных характеристик ослабления вентиля и циркулятора

1. Установите в измерительный тракт волноводный вентиль в *обратном* направлении включения (стрелка на вентиле направлена в сторону генератора). Обратите внимание на взаимную ориентацию волноводов, она должна быть одинакова для всех устройств (скрещивание волноводов не допускается).

2. Включите режим перестройки **F1F2** и установите максимальную полосу качания частоты ручками $\mathbf{F_1F_0}$ и $\mathbf{F_{2,\Delta}F}$. Выберите масштаб АЧХ по уровню ручкой **ПРЕДЕЛЫ** так, чтобы можно было наблюдать область максимального ослабления. Зарисуйте или сфотографируйте вид графика. Найдите частоту f_0 и максимальное ослабление вентиля A_{max}. Запишите их значения. Определите ширину рабочего диапазона частот вентиля по уровню АЧХ –10 и –20 дБ. Измерьте АЧХ вентиля в обратном направлении передачи по точкам (10–12 точек), для чего используйте метки генераторного блока и электронный визир индикатора. Для отображения на индикаторе частоты первой метки нужно включить режим отображения **М1**.

3. Затем измерьте АЧХ вентиля в прямом направлении передачи. Определите потери вентиля A_{min} на центральной частоте f_0 и рассчитайте вентильное отношение $A_{max} - A_{min}$. Результаты измерений сведите в таблицу, по данным которой постройте графики исследуемых АЧХ.

4. Аналогичным образом повторите измерения для циркулятора, включенного как вентиль между портами 1 и 2, а также в обратном направлении – между портами 2 и 1. При этом согласованная нагрузка остается подключенной к порту 3.

6.4.4. Исследование электрически управляемого ферритового фильтра СВЧ

1. Установите в измерительный тракт через коаксиально-волноводные переходы и кабели исследуемый ЖИГ-фильтр. Подайте от источника постоянного напряжения ток подмагничивания порядка 600 мА. Включите режим перестройки **F1F2** и максимальную полосу качания частоты. Увеличьте чувствительность индикатора (**ПРЕДЕЛЫ**) до +15…+20 дБ и получите на экране АЧХ фильтра. Увеличьте время перестройки частоты до 1 с (для исключения

динамических искажений) и подберите ток подмагничивания так, чтобы АЧХ фильтра находилась в центре экрана. С помощью метки **M1** измерьте и запишите частоту настройки фильтра f_0 при данном токе подмагничивания.

2. Оцените полосу пропускания фильтра. Для этого растяните АЧХ, регулируя начальную **F1** и конечную **F2** частоты перестройки прибора ручками $\mathbf{F}_1\mathbf{F}_0$ и $\mathbf{F}_{2,\Delta}\mathbf{F}$. С помощью меток **M1** и **M2** примерно оцените полосу фильтра по уровню –3 дБ от максимума АЧХ.

3. Установите максимальную полосу качания частоты и измерьте перестроечную характеристику – зависимость частоты настройки ЖИГ-фильтра от тока управления. Изменяя ток подмагничивания с шагом 10 мА в одну и другую сторону от 600 мА, с помощью метки фиксируйте частоту максимума АЧХ. Измерения проведите в пределах всей рабочей полосы прибора. Результаты измерения сведите в таблицу, по данным которой постройте перестроечную характеристику ЖИГ-фильтра.

6.5. Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

– протокол измерений;

– структурную схему лабораторной установки;

– таблицы с результатами измерений: неравномерность собственной АЧХ прибора, полоса пропускания ЖИГ-фильтра, АЧХ циркулятора в 2 направлениях, АЧХ вентиля в 2 направлениях, зависимость частоты настройки ЖИГ-фильтра от тока управления;

– графики измеренных зависимостей: АЧХ циркулятора в 2 направлениях на одном графике, АЧХ вентиля в 2 направлениях на одном графике, зависимость частоты настройки ЖИГ-фильтра от тока управления;

– выводы.

6.6. Контрольные вопросы

1. Укажите назначение панорамных измерителей параметров цепей СВЧ типа Р2. Чем они отличаются от измерителей коэффициента передачи СВЧ типа Р4?
2. В чем главное отличие панорамных измерителей СВЧ параметров от амплифазометров - приборов типа ФК2-18 для измерения АЧХ «по точкам»?
3. Какие элементы входят в измерительный тракт СВЧ прибора Р2-61? Какие требования предъявляют к их характеристикам?
4. Как модифицировать измерительный тракт для определения КСВН?
5. Для какой цели сигнал ГКЧ модулируют по амплитуде НЧ сигналом? Какова форма сигнала модуляции? В каких случаях используют режим непрерывной генерации (НГ)?
6. Укажите назначение системы АРМ прибора Р2-61. Что такое динамический диапазон АРМ?
7. Что такое собственная АЧХ панорамного измерителя Р2-61? От чего зависит ее неравномерность?
8. Какие функции выполняет измерительный блок прибора Р2-61? Как он позволяет улучшить точность измерения АЧХ?
9. Для чего в измерительном блоке используют синхронные детекторы?
10. Для чего нужна калибровка прибора Р2-61? Как ее производят для измерения ослабления? Для измерения КСВ?
11. Как производят оцифровку шкалы частот прибора Р2-61? Как устроен блок частотных меток?
12. В каком масштабе по вертикали выводится на экран график АЧХ? Как производят отсчет измеренных значений ослабления и КСВ?
13. Для чего в ферритовых вентилях используют постоянные магниты?
14. Чем резонансные вентили отличаются от вентилей на смещении поля?
15. В чем преимущество циркулятора с согласованной нагрузкой над ферритовым вентилем?
16. Для чего в измерительной технике СВЧ используют ферритовые ЖИГ-резонаторы?
17. Что такое волноводная линия передачи? Какими свойствами и диапазоном рабочих частот она обладает.
18. Волноводные соединительные элементы (фланцы). Согласованные нагрузки.
19. Поясните устройство волноводного направленного ответвителя. Какими свойствами обладает такое устройство?

Литература

1. Данилин А.А. Измерения в радиоэлектронике сверхвысоких частот: Учеб. пособие для вузов.- СПб: Лань, 2025.-348с.
2. Данилин А.А. Измерения в технике СВЧ: Учеб.пособие для вузов.- М.: Радиотехника, 2008.-184с.
3. Воскресенский Д.,М., Данилин А.А., Сосновский В.А. Измерения на СВЧ: лаб. Практикум/Под. ред. А.А. Данилина. - Спб.: Изд. СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2021.- 112с.
4. Данилин А.А. , Лавренко Н.С. Измерения в радиоэлектронике: Учебное пособие /Под. ред. А.А. Данилина - Спб.: Изд-во «Лань», 2017. -408с
5. Хелзайн Дж. Пассивные и активные цепи СВЧ.
6. Сазонов Д.М., Гридин А.Н., Мишустин Б.А. Устройства СВЧ. – М.: Высшая школа, 1981 -295с.
7. Микроэлектронные устройства СВЧ. Под ред. Г.И. Веселова , 1988-280с.
8. Вамберский М.В., Абрамов В.П., Казанцев В.И. Конструирование ферритовых развязывающих приборов СВЧ – МЖ, Радио и связь, 1982.-136с.
9. Лавренко Ю.Е., Грачев С.В. Устройства СВЧ: конспект лекций. Спб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. -92с

Оглавление

6. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФЕРРИТОВЫХ СВЧ-УСТРОЙСТВ 2

6.1. Ферритовые устройства СВЧ 2

6.2. Ферритовые фильтры СВЧ-диапазона 8

6.3. Технические данные измерителя КСВН и ослабления Р2-61 9

6.4. Задание и указания к выполнению работы 14

6.4.1. Подготовка установки к работе 14

6.4.2. Калибровка измерителя 15

6.4.3. Измерение частотных характеристик ослабления вентиля и циркулятора 16

6.4.4. Исследование электрически управляемого ферритового фильтра СВЧ. 16

6.5. Содержание отчета 17

6.6. Контрольные вопросы 18

Литература 20