

ИЗМЕРИТЕЛЬ АЧХ ЭЛЕМЕНТОВ СВЧ ТРАКТА ММ ДИАПАЗОНА

Введение

При разработке и настройке измерительных и экспериментальных устройств и систем микроволнового диапазона довольно часто возникает необходимость в определении амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) элементов и узлов, которые используются при их построении. Обычно такие измерения производятся с помощью СВЧ панорамных измерителей к.с.в. и АЧХ [1, 2] или приборами типа сетевых векторных анализаторов [3]. Однако, такие приборы, во-первых, достаточно громоздки, во-вторых, требуют дополнительных настроек для согласования элементов измерительной схемы, и, наконец, в-третьих, не всегда доступны в настоящее время. Кроме того, в большинстве практических случаев нет необходимости в высокоточном определении АЧХ тестируемых элементов и создании для этого стационарных экспериментальных установок.

Целью данной работы является разработка компактного устройства для измерения АЧХ элементов и узлов СВЧ тракта, в том числе резонаторного типа, позволяющего производить указанные измерения с достаточной для практических нужд точностью.

Основная часть

При разработке измерительного устройства ставилась задача удовлетворения следующим требованиям: диапазон рабочих частот 35...37 ГГц, мощность измерительного генератора не менее 5 мВт, точность определения значения измеряемой частоты не хуже 2 МГц, возможность ручного и полуавтоматического режимов измерений.

Для реализации измерительного устройства использовалась типовая схема измерения амплитудно-частотных характеристик с проходным включением исследуемого объекта (рис.1). В состав измерительного устройства входят: измерительный СВЧ генератор 1 с блоком питания генератора БПГ 2, регулируемый аттенюатор 3, ферритовые вентили 4, резонаторный частотомер на основе перестраиваемого высокочастотного объемного резонатора 5, исследуемый объект ИО 6, СВЧ детектор 7, измерительный прибор ИП 8, генератор сигналов управления ГСУ 9.

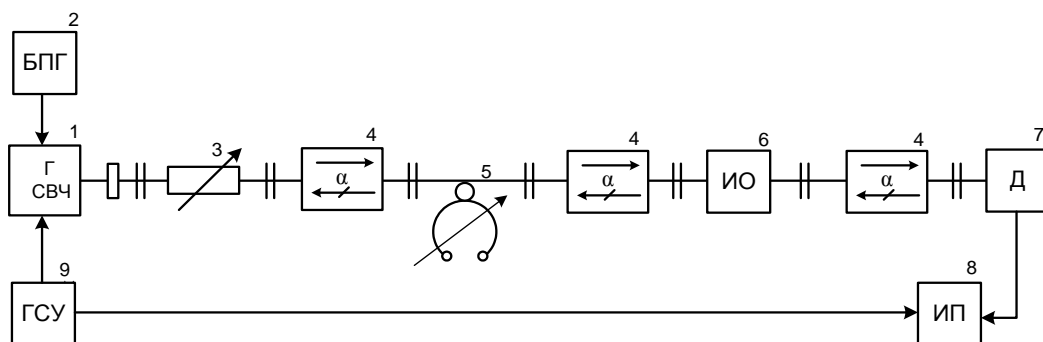


Рис.1 Структурная схема устройства измерения АЧХ элементов СВЧ тракта 8 мм диапазона длин волн

Основным элементом, определяющим возможности устройства измерения АЧХ, является измерительный СВЧ генератор. В качестве измерительного генератора использовался генератор на диоде Ганна с электрической перестройкой частоты разработки НПФ "ЛЕКИС" (г. Киев). Генератор перестраивался в пределах 3,15 ГГц (34,35...37,5 ГГц), выходная мощность изменяется при этом в пределах от 5 до 20 мВт. Графики измеренных

зависимостей генерируемой частоты и мощности выходного сигнала генератора от управляющего напряжения приведены на рис.2 и 3, соответственно.

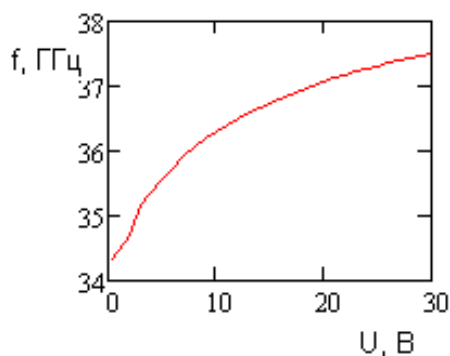


Рис.2 Зависимость $f_r (U_{упр})$

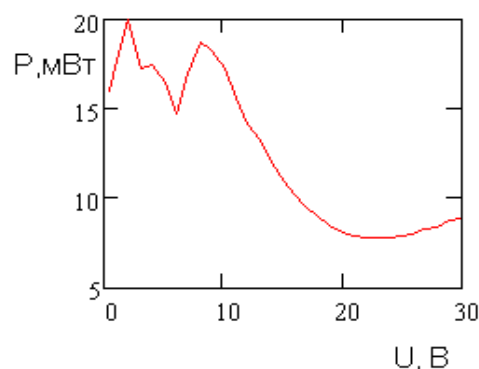


Рис.3 Зависимость $P_r (U_{упр})$

Из графиков видно, что зависимость $f_r (U_{упр})$ носит сильно выраженный нелинейный характер, а выходная мощность P_r также сильно меняется в пределах рабочего диапазона частот. Естественно, такой вид зависимостей будет приводить к искажению формы отображаемой АЧХ и приводить к увеличению погрешностей измерений.

Для устранения нелинейности частотной перестройки генератора было разработано специализированное устройство – генератор импульсов специальной формы, который формирует сигналы управления перестроечным диодом генератора, позволяющие компенсировать нелинейность его частотной развертки. Функциональная схема генератора приведена на рис.4. В состав схемы входят: генератор импульсов прямоугольной формы G со скважностью близкой к 1, источник опорного напряжения ИОН, аналоговые интеграторы И, электронные ключи К, усилитель мощности УМ и блок питания (на рисунке не показан).

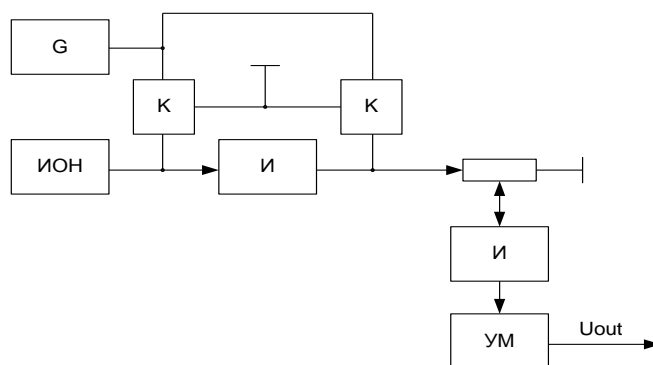


Рис.4 Функциональная схема генератора импульсов специальной формы

Генератор импульсов специальной формы формирует последовательность импульсов с частотой равной частоте генератора G, огибающая которых описывается функцией, близкой к $1/x^2$. Формирование импульсов происходит методом последовательного двойного интегрирования постоянного напряжения ИОН. Затем полученный сигнал усиливается в усилителе мощности. Величина выходного напряжения может быть подстроена с помощью регулировочного элемента. Перепад значений выходного сигнала по амплитуде соответствует паспортным данным управляющего напряжения перестраиваемого СВЧ генератора (0...30 В).

Использование генератора импульсов специальной формы в качестве ГСУ (см. рис.1) позволило линеаризовать зависимость $f_r (U_{упр})$ измерительного СВЧ генератора

(рис.5). Зависимость мощности сигнала генератора от частоты, полученная при этом, приведена на рис.6.

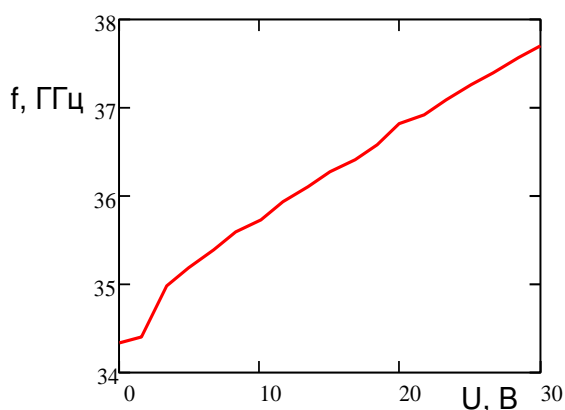


Рис.5 Зависимость f_r ($U_{упр}$) после линейризации

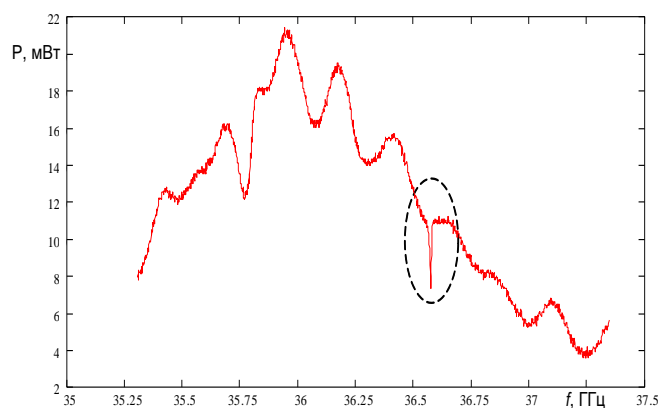


Рис.6 Зависимость P_r (f_r) с меткой от резонансного частотомера

Процесс измерения АЧХ в ручном режиме осуществляется следующим образом (рис.1): с помощью ГСУ производится периодическая перестройка частоты измерительного СВЧ генератора в диапазоне его рабочих частот и одновременная синхронизация развертки ИП, в качестве которого может быть использован осциллограф. В результате на экране осциллографа формируется изображение АЧХ исследуемого объекта. Привязка АЧХ к частотной оси осуществляется с помощью перемещаемой частотной метки от перестраиваемого резонатора частотомера.

Ручной режим измерения может быть реализован только при исследовании узкополосных СВЧ устройств типа резонаторов и фильтров, у которых ширина АЧХ не превышает нескольких десятков МГц, поскольку неравномерность выходной характеристики измерительного СВЧ генератора (рис.6) будет приводить к значительному росту погрешности измерений при увеличении полосы частот анализа.

Возможности рассматриваемого устройства измерения АЧХ элементов СВЧ тракта могут быть существенно расширены и погрешности измерений снижены при использовании в качестве ИП цифрового осциллографа, сопрягаемого с компьютером (ПК).

При измерениях использовался цифровой осциллограф марки DS5152MA фирмы Rigol [4].

Применение в измерительной схеме цифрового осциллографа совместно с компьютером и соответствующим программным обеспечением позволяет:

- проводить калибровку развертки в значениях частоты;
- выделять и изменять масштаб отдельных участков частотной развертки;
- проводить нормировку отображаемой амплитудной характеристики с учетом неравномерности выходной характеристики измерительного СВЧ генератора;
- с использованием дополнительной обработки первичных сигналов при исследовании резонансных элементов получать информацию непосредственно о значениях резонансной частоты и добротности (при необходимости – их изменениях);
- сохранять результаты измерений в цифровой форме для последующей обработки и сравнения.

В функции осциллографа при его сопряжении с ПК входит: оцифровка сигнала, привязка его к временной шкале, усиление, масштабирование для повышения разрешения осциллограммы, обеспечение интерфейса для связи с ПК (в нашем случае – интерфейс USB).

Обобщенная блок-схема работы программного обеспечения (ПО) по определению основных параметров приведена на рис.7.

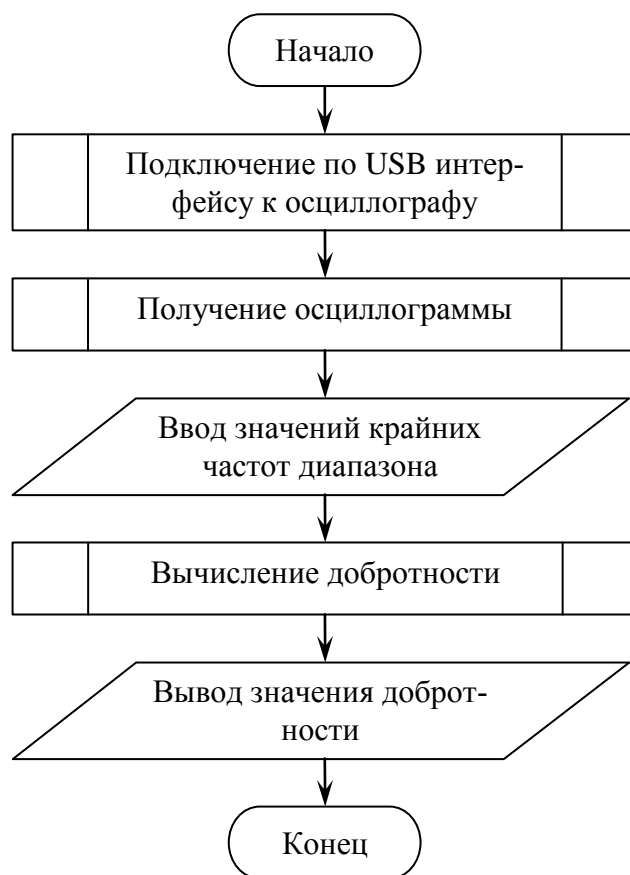


Рис. 7 Алгоритм определения основных параметров

На первом этапе производится процедура установления связи ПК с осциллографом. Она выполняется при запуске программы, либо принудительно нажатием на кнопку «Connect» интерфейса ПО. Далее вызывается процедура получения осциллограммы с осциллографа. В рамках этой процедуры производится отправка на осциллограф команды-запроса и принятия ответа в формате последовательности символов в кодировке ASCII, а также конвертирование полученных данных к виду массива числовых значений, соответствующих осциллограмме. После этого производится вывод осциллограммы на дисплей ПК.

С помощью резонансного частотомера определяются и затем вводятся в программу значения крайних частот развертки для данной осциллограммы. Это необходимо для сопоставления временной шкалы развертки осциллографа с частотной шкалой. Далее иницируется процедура нахождения центральной частоты резонансной кривой и ее добротности по осциллограмме. Добротность определяется по формуле $Q = f_0 / \Delta f$, где f_0 – центральная частота резонансной кривой, $\Delta f = (f_2 - f_1)$ – ширина резонансной кривой в значениях частоты при заданном уровне сигнала (0,5 или 0,707 в зависимости от условий детектирования сигнала). Полученные в результате обработки значения центральной частоты и добротности выводятся на экран, а также при необходимости сохраняются в памяти устройства.

Основным фактором, ограничивающим метрологические возможности разработанного устройства, является изменение мощности генерируемого сигнала в диапазоне рабочих частот (рис.6). Однако влияние указанного фактора может быть в значительной степени ослаблено с помощью нормировки информационного сигнала сигналом, отображающим соответствующую выходную характеристику генератора (типа приведенной на рис.6) в выбранном диапазоне рабочих частот. Для этого в схеме (рис.1) включением тройника или направленного ответвителя перед исследуемым объектом (ИО) формируется

дополнительный канал для получения сигнала выходной характеристики генератора. Продетектированный сигнал этого дополнительного канала подается на вход второго канала измерительного осциллографа, который переводится в режим работы отображения отношения информационного сигнала к нормирующему. Процедура обработки полученной при этом осциллограммы аналогична описанной выше.

Для оценки возможностей разработанного устройства по визуализации АЧХ и определению добротности резонаторов были проведены сравнительные измерения характеристик нескольких резонаторов с его помощью и с помощью векторного сетевого анализатора NA 5230A фирмы Agilent.

Формы полученных АЧХ тестовых резонаторов практически не отличались, а по добротности наше устройство давало заниженные примерно на 15-20 % показания, что, по-видимому, связано с какой-то систематической ошибкой при определении уровня отсчета полосы пропускания резонатора (возможно с недостаточной степенью линеаризации характеристики $f_r (U_{\text{упр}})$ измерительного генератора, а также неидентичностью характеристик преобразования использовавшихся СВЧ детекторов). Поскольку выявленная погрешность носит систематический характер она может быть учтена при измерениях путем введения соответствующей поправки.

Минимальные значения измеряемых значений добротности составляют величину порядка нескольких десятков и определяются возможностью выявления резонансных кривых на фоне собственной АЧХ измерительного тракта. Максимальные значения измеряемых добротностей составляют величину порядка нескольких тысяч и определяются возможностью фиксации метки от резонансного частотомера при проведении операции сопоставления временной шкалы развертки осциллографа с частотной шкалой.

Выводы

Таким образом, в результате проведенных исследований разработан измеритель АЧХ элементов и узлов СВЧ тракта, а также добротностей и резонансных частот резонаторных структур 8-ми миллиметрового диапазона. В измерителе реализованы два варианта измерений: ручной – с визуальным определением искомых параметров по осциллограмме, и полуавтоматический – с оцифровкой информационного сигнала и последующей его программной обработкой и запоминанием с помощью цифрового осциллографа, сопрягаемого с компьютером.

Разработанный измеритель позволяет оперативно и эффективно производить измерения характеристик резонаторных структур с достаточной для практических нужд точностью.

Структурная и функциональная схемы измерителя могут быть успешно использованы и в других диапазонах длин волн при наличии соответствующего измерительного генератора.

Список литературы: 1. Милованов О.С. Техника сверхвысоких частот / О.С. Милованов, Н.П. Собенин – М.: Атомиздат, 1980. – 464с. 2. Абубакиров Б.А. Измерение параметров радиотехнических цепей / Б.А. Абубакиров, К.Г. Гудков, Э.В. Нечаев – М.: Радио и связь, 1984. – 248с. 3. <http://www.home.agilent.com> – сайт фирмы Agilent. 4. RIGOL. Осциллограф запоминающий цифровой серии: DS5000CA, DS5000C, DS5000MA, DS5000M. Руководство по эксплуатации. Харьков-Прибор, 2005.