

ПРИКЛАДНАЯ РАДИОФИЗИКА

УДК 535.417.2:53.08

АППАРАТНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК НИЗКО- И ВЫСОКОДОБРОТНЫХ РЕЗОНАТОРОВ В ДИАПАЗОНЕ 26...37,5 ГГц

В. Н. Скресанов, В. В. Гламаздин, А. И. Шубный, З. Е. Ерёмченко

Институт радиофизики и электроники им А. Я. Усикова НАН Украины
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
E-mail: Skresanov@ire.kharkov.ua

Представлены результаты разработки аппаратно-вычислительного комплекса, предназначенного для измерения характеристик резонаторов с добротностями от десятков единиц до сотни тысяч в диапазоне частот от 26 до 37,5 ГГц. Измерения основаны на регистрации и обработке амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) резонаторов. Предложен способ вычисления нагруженной добротности, резонансной частоты, относительной амплитуды колебаний и уровня постоянной составляющей сигнала, а также сдвига фаз между ними по коэффициентам аппроксимации АЧХ резонатора дробно-рациональной функцией. Показано, каким образом по коэффициентам аппроксимации АЧХ коэффициента отражения от резонатора могут быть дополнительно рассчитаны собственная добротность и доля мощности источника сигнала, теряемая в элементе связи. Представлены результаты испытаний, иллюстрирующие возможности комплекса при исследованиях низко- и высокодобротных резонаторов. Ил. 12. Табл. 2. Библиогр.: 12 назв.

Ключевые слова: СВЧ-измерения, резонаторы, добротность, эффективность возбуждения, аппроксимация резонансной кривой.

При экспериментальных исследованиях и разработках с использованием резонаторов прежде всего регистрируются их спектры, т. е. распределение резонансных частот колебаний по частотному диапазону. После идентификации типов колебаний измеряют характеристики резонатора, возбуждаемого на выбранных модах. Чаще всего интересуются значениями нагруженной добротности и резонансной частоты. Для корректного вычисления абсолютных значений напряженности поля в резонаторе помимо коэффициента отражения необходимо также измерять долю энергии, теряемую при возбуждении резонатора. Возможности разработанного аппаратно-вычислительного комплекса (АВК) позволяют измерять все перечисленные характеристики.

Измерения добротностей и резонансных частот являются традиционными для СВЧ (см., например, [1–3]), при этом ряд методов основан на анализе амплитудно-частотных (АЧХ) и фазо-частотных характеристик (ФЧХ) резонаторов. На современном этапе в связи с развитием нового поколения измерительной техники (векторные анализаторы цепей) и доступностью персональных компьютеров, способных выполнять обработку больших массивов данных в реальном масштабе времени, традиционные методы обработки АЧХ и ФЧХ резонаторов, в результате которых рассчитываются величины добротностей и резонансных частот, получили дальнейшее развитие. Например, модифицирован известный метод импеданса для расчета характеристик резонатора по АЧХ и ФЧХ, которые могут быть измерены с помощью векторного анализатора цепей [4]. В данной работе, в отличие от [4], развит метод расчета характеристик резонатора, в том числе и

собственной добротности, основанный на обработке одной лишь АЧХ резонатора (ФЧХ резонатора для расчетов не требуется). Вычисление нагруженной добротности развитым методом возможно для различных схем включения резонатора:

- по схеме «на проход» (два элемента связи);
- по схеме «на отражение» (один элемент связи);
- при включении резонатора по схеме режекторного фильтра.

Основная техническая проблема при разработке аппаратуры, реализующей метод АЧХ в широком диапазоне частот, состоит в разработке широкодиапазонного источника КВЧ-сигнала с достаточно высокой стабильностью частоты. На современном этапе такие генераторы строятся на принципах синтеза частот в радиочастотном диапазоне с последующим переносом в КВЧ-диапазон. Стандартной аппаратурой, где использован этот принцип построения источника сигнала, являются современные скалярные или векторные анализаторы цепей. Часто анализаторы цепей не доступны исследователю по экономическим соображениям. Альтернативным решением является разработка аппаратуры, в которой используется широкодиапазонный генератор непосредственно в 8-мм диапазоне. В качестве источника сигнала возможно использование лампы обратной волны. Однако низкая кратковременная стабильность и паразитные девиации частоты не позволяют проводить измерения добротностей свыше 10 000 с желаемой точностью. В нашей работе приведены результаты разработки АВК, предназначенного для измерения характеристик резонаторов с добротностями от десятков единиц до сотни тысяч на частотах от 26 до 37 ГГц –

стандартном диапазоне частот одномодового прямоугольного волновода 8-мм диапазона. Широкодиапазонным источником КВЧ-сигнала комплекса является волноводно-коаксиальный генератор на диоде Ганна с механической перестройкой частоты, с использованием которого разработан генератор стандартных сигналов Г4-156.

1. Принцип действия и структурная схема АВК. Состав аппаратной части комплекса понятен из рис. 1: 1 – генератор стандартных сигналов Г4-156; 2 – модуль управления и 3-канального приемника; 3 – волноводный модулятор; 4 – синтезатор частот модуляции; 5 – направленный детектор падающей волны; 6 – направленный детектор отраженной волны; 7 – широкодиапазонный детектор прошедшей волны; 8 – исследуемый резонатор; 9 – персональный компьютер (ПК). Вычислительная часть комплекса включает программы управления генератором и 3-канальным приемником, записи и предварительной обработки данных измерений, а также программы вычисления характеристик резонатора по измеренной АЧХ.

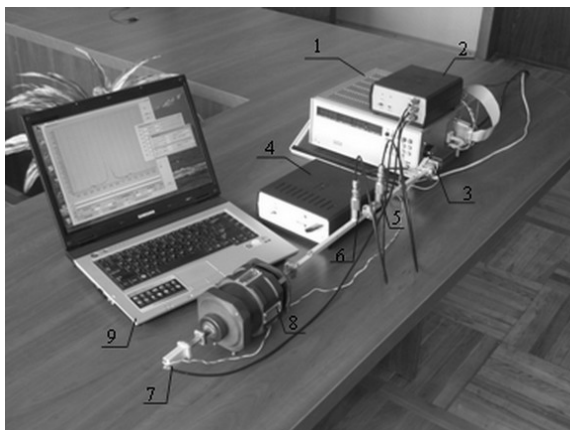


Рис. 1. Внешний вид АВК

На рис. 2 показана панель программы вывода данных измерений, а на рис. 3 – панель программы обработки АЧХ.

Используется штатный режим управления генератором Г4-156 по коду, подаваемому на разъем дистанционного управления (ДУ). Задействованы возможности прибора по электромеханической перестройке частоты (код частоты), снижения уровня выходного сигнала встроенным полупроводниковым аттенуатором (код мощности) и включение/выключение режима внутренней амплитудной модуляции с частотой 1кГц (код режима модуляции). Кодовое слово на разъем ДУ подается с портов ввода/вывода микроконтроллера модуля управления АВК (рис. 4).

С целью расширения функциональных возможностей Г4-156 при исследованиях резонаторов произведено три доработки прибора. Добавлен режим пониженной скорости вращения

двигателя, а также отведены с соответствующей развязкой сигнал генератора имитатора f_{im} и сигнал частоты амплитудной модуляции 1 кГц, который используется как опорный сигнал для работы синхронных детекторов (СД) в трех каналах приемника.

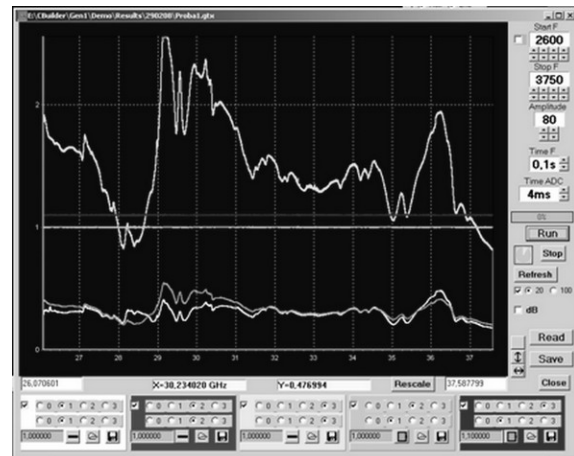


Рис. 2. Панель программы графического вывода данных измерений. Представлена характеристика «частота-мощность» генератора, измеренная детекторами трех каналов, а также АЧХ калибровочных коэффициентов

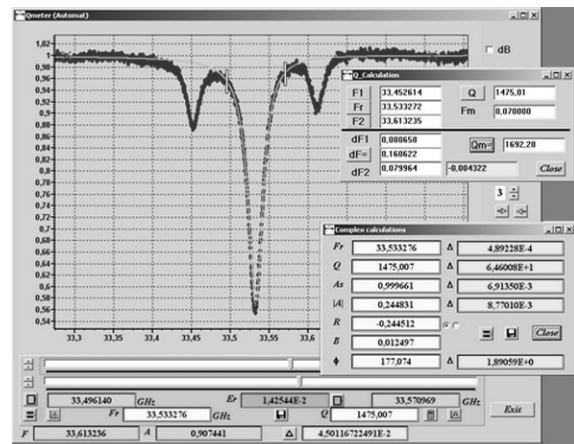


Рис. 3. Панель программы обработки АЧХ резонаторов. Показано окно и «метки» динамической калибровки частотной характеристики, а также окна расчета параметров резонатора

Регистрация АЧХ исследуемого резонатора производится в автоматическом режиме с записью данных измерений в оперативную память ПК. При этом осуществляется одновременная запись частотных зависимостей уровня падающего (U_{in}) и отраженного (U_r) сигналов, измеряемых с помощью направленных детекторов (рис. 1 и 4), а также уровня прошедшего (U_t) сигнала, измеряемого с помощью широкодиапазонного КВЧ-детектора на безкорпусном диоде с барьером Шоттки.

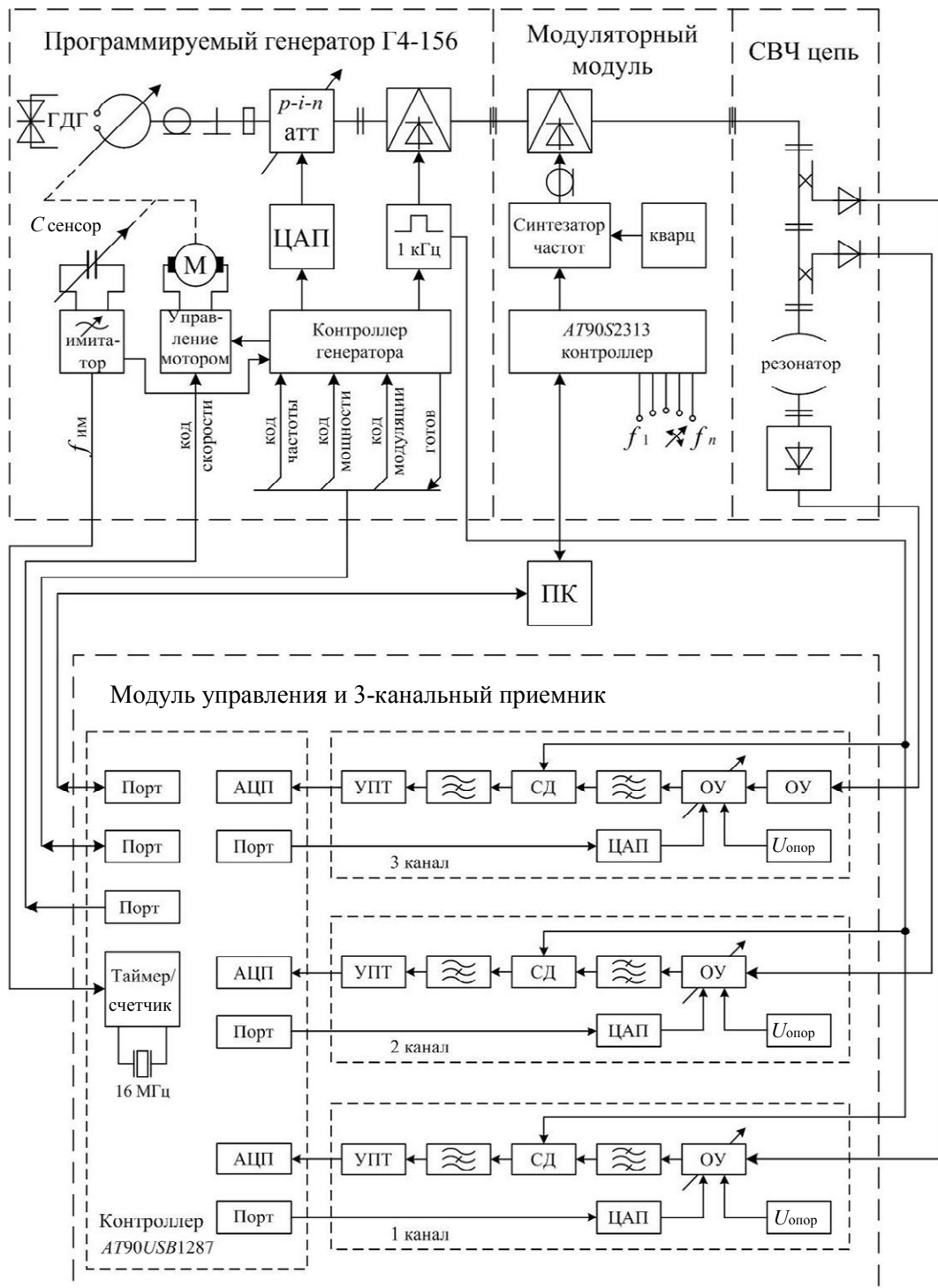


Рис. 4. Структурная схема АВК

Уровень выходной мощности генератора Ганна прибора Г4-156 в диапазоне механической перестройки частоты изменяется на величину порядка 10 дБ. В графическом окне панели вывода данных (рис. 2) представлены результаты измерений, дающие представление о характеристике «частота-мощность» комплекса.

Влияние на результат измерения АЧХ резонаторов неравномерности АЧХ тракта и характеристики «частота-мощность» генератора, а также непостоянства мощности за время измерений минимизируется следующим образом. Производится калибровка каналов отраженной и прошедшей мощности по отношению к падаю-

шей мощности в отсутствие исследуемого резонатора, т. е. после записи данных вычисляются отношения $k_r = U_r^c / U_{in}^c$ и $k_t = U_t^c / U_{in}^c$ напряжений в каналах (индекс c обозначает режим калибровки). После этого измеряется частотная зависимость уровня отраженной от резонатора или прошедшей через резонатор мощностей и вычисляются отношения $r = U_r^m / U_{in}^m$ или $t = U_t^m / U_{in}^m$ для КВЧ-тракта с резонатором (индекс m означает режим измерений). И, наконец, искомые коэффициенты отражения R или прохождения T вычисляются по формулам $R = R/k_r$ или $T = t/k_t$ соответственно.

Операции деления записанных массивов данных осуществляются непосредственно с панели графического вывода данных измерений с помощью пяти идентичных окон нормировки данных (рис. 2). В графическом окне (рис. 2) показаны частотные зависимости калибровочных коэффициентов (прямые линии) каналов отраженной и прошедшей мощностей.

Перестройка частоты волноводно-коаксиального генератора на диоде Ганна (ГДГ) в диапазоне 26...37,5 ГГц осуществляется путем изменения длины коаксиального резонатора, в котором смонтирован диод Ганна. Ответственным элементом электропривода является ходовой винт, приводимый во вращение электродвигателем М постоянного тока (рис. 4). Ходовой винт жестко связан с коаксиальным поршнем резонатора. Выход на требуемую частоту генерации осуществляется сравнением заданного на ДУ кода частоты с кодом, формируемым из импульсов, которые вырабатываются генератором-имитатором. Генератор-имитатор перестраивается в диапазоне 2,5...3,8 МГц, а его частота зависит от положения подвижных пластин емкостного датчика (С датчик). В свою очередь подвижные пластины датчика жестко связаны с ходовым винтом. Таким образом, генератор-имитатор, по существу, является датчиком перемещения поршня коаксиального резонатора, и его показания однозначно связаны с частотой генератора Ганна.

Номинальный шаг позиционирования частоты генерации Г4-156 равен 10 МГц, причем разработчиком допускается ошибка позиционирования ± 1 шаг. Очевидно, что в режиме остановок двигателя проводить измерения АЧХ высокочастотных резонаторов не представляется возможным. Поэтому измерения с помощью разработанного АВК производятся в динамическом режиме (при постоянно включенном электродвигателе в заданном диапазоне сканирования частоты). При этом измеряется средняя за период счета частота генератора-имитатора f_{im} с помощью таймер-счетчика микроконтроллера AT90USB1287. Период счета импульсов ΔT вы-

бирается оператором в программе управления комплексом из ряда 10 мс, 100 мс, 1 с и определяется установками таймер-счетчика микроконтроллера, который в свою очередь тактируется кварцевым генератором на частоте 16,000 МГц.

Время измерения напряжений каналов прошедшей, отраженной и падающей мощностей на соответствующих входах 10-канальных аналого-цифровых преобразователей (АЦП) микроконтроллера существенно меньше и составляет приблизительно 0,2 мс. Период опроса показаний АЦП по программе микроконтроллера установлен равным 1 мс и контролируется прерываниями таймер-счетчика. Данные измерений передаются в ПК с минимальным периодом $\tau = 2$ мс. Этот период τ может быть увеличен оператором, т. е. выбран в программе управления комплексом из ряда 2, 4, 10, 20, 50 и 100 мс. Таким образом, измерения частоты и напряжений синхронизированы во времени, а на одно измеренное значение частоты приходится $\Delta T/\tau$ переданных значений напряжений. Считая, что за время ΔT частота имитатора изменяется линейно, нетрудно рассчитать массив данных $U(f_{im})$, где каждому напряжению АЦП будет сопоставлено текущее значение частоты.

Ввиду значительной долговременной нестабильности частоты генератора Ганна очевидная калибровка прибора по частоте, а именно, калибровка соответствия измеряемой частоты имитатора частоте сигнала генератора Ганна, не приводит к успеху. Также вследствие неконтролируемых перекосов поршня коаксиального резонатора относительно его оси в процессе вращения ходового винта наблюдаются значительные периодические отклонения частоты генерации относительно линейной зависимости (рис. 5).

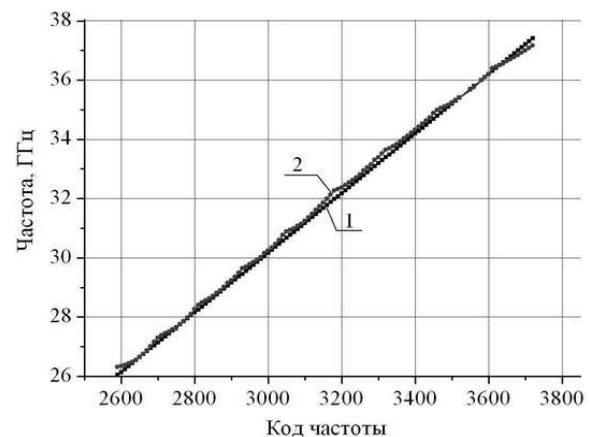


Рис. 5. Калибровка частотной характеристики АВК: 1 – частота имитатора; 2 – частота генератора Ганна

Период отклонений частоты коррелирует с шагом резьбы ходового винта, а амплитуда отклонений может случайным образом измениться при повторных перестройках генератора. Поэто-

му для измерения ширины резонансной кривой используется динамическая калибровка крутизны механической перестройки частоты в процессе измерения добротности резонатора.

Осуществляется внешняя амплитудная модуляция несущей Г4-156 сигналом известной частоты F_m . Модуль амплитудного модулятора состоит из секции широкодиапазонного $p-i-n$ -модулятора в волноводном исполнении и блока синтезатора стабильных частот модуляции. Относительная стабильность частот не хуже 10^{-6} в условиях эксплуатации и определяется примененным кварцевым генератором. Используется микросхема синтезатора AD9854. Частоту модуляции можно изменять с шагом 1 Гц в диапазоне от 10 кГц до 100 МГц с помощью микроконтроллера AT90S3213, который вырабатывает параллельный код управления синтезатором по кодовой последовательности, передаваемой в микроконтроллер из ПК. Если F_m больше ширины резонансной кривой, на записи АЧХ по обе стороны от кривой наблюдаются резонансные кривые меньшей амплитуды (метки) с известным разносом резонансных частот.

В качестве иллюстрации на рис. 3 представлена АЧХ цилиндрического резонатора и боковые метки. По частотной оси выведены значения измеренной частоты имитатора. Расстояние между метками, равное удвоенной частоте модуляции, задано и составляет 140,000 МГц. Резонансные частоты меток (F_1, F_2) измеряются при помощи курсора. Разность между ними оказалась равной 160,6 МГц. Добротность Q , рассчитанная без учета динамической калибровки, составила 1475, а добротность Q_m с учетом калибровки – 1692, т. е. систематическая погрешность достигла бы в данном случае 14 %.

Для абсолютных измерений резонансной частоты калибровочная зависимость «частота имитатора – частота генерации» (рис. 5) аппроксимирована кусочно-линейной зависимостью. Относительная погрешность аппроксимации не хуже нескольких тысячных долей процента, что ниже погрешностей позиционирования и дрейфов частоты Г4-156 при изменении внешних условий.

Измерение уровней КВЧ-сигналов выполняется квадратичными детекторами в режиме «переменного тока», для чего используется режим внутренней амплитудной модуляции несущей сигнала генератора Г4-156 частотой 1 кГц (рис. 4). Видеосигналы с выходов КВЧ-детекторов падающей, отраженной и прошедшей мощностей поступают, соответственно, на 1, 2 и 3-й каналы приемника, которые выполнены по идентичной схеме (рис. 4). Основное усиление осуществляется канальными маломощными операционными усилителями (ОУ) с регулируемым

коэффициентом усиления. Канальные усилители разработаны с применением микросхемы AD605. Изменение коэффициента усиления в пределах от 0 до 80 дБ осуществляется посредством цифро-аналогового преобразователя (ЦАП), управляемого кодом с портов микроконтроллера. С целью увеличения отношения сигнал-шум используется предварительная фильтрация сигнала на частоте модуляции и синхронное детектирование. Режекторные фильтры на выходе СД подавляют остаток сигнала с частотой 2 кГц, а назначение усилителей постоянного тока (УПТ) состоит в фильтрации низкочастотных шумов и компенсации постоянного напряжения на входах АЦП при отсутствии сигналов на входах канальных усилителей.

Мгновенный динамический диапазон АВК (при неизменном коэффициенте усиления каналов) определяется разрядностью примененных АЦП и составляет 30 дБ от уровня шумов квантования. Полный динамический диапазон канала прошедшей мощности АВК определяется уровнем шумов КВЧ-детектора и выходной мощностью генератора и составляет величину порядка 70...80 дБ на различных частотах диапазона.

2. Метод вычисления характеристик резонаторов по АЧХ. Оценка сверху величины случайных погрешностей измерений. АЧХ и ФЧХ резонаторов для любой из схем включения могут быть описаны следующей комплексной функцией:

$$F(f) = A_s + \frac{A_\alpha(1 - 2jQ_\alpha\tau_\alpha)}{1 + 4Q_\alpha\tau_\alpha}, \quad (1)$$

где Q_α – нагруженная добротность резонатора, возбужденного на α -типе колебаний, а $\tau_\alpha = (f - f_\alpha)/f_\alpha$ – параметр расстройки текущей частоты f относительно резонансной частоты f_α , которую требуется определить. Очевидно, что исходный массив данных измерений может быть подготовлен только по параметру расстройки $t(f) = (f - f_0)/f_0$ относительно некоторой произвольной частоты f_0 вблизи резонанса. Очевидно также, что $\tau_\alpha = (f_0/f_\alpha)(t - t_\alpha)$, где $t_\alpha = t(f_\alpha)$. Комплексная амплитуда A_α α -типа колебания в резонаторе и амплитуда A_s постоянного уровня сдвинуты на угол φ_α относительно друг друга, причем фазу постоянного уровня можно положить равной нулю, т. е. A_s есть действительное число. В результате обработки АЧХ резонатора предложенным методом рассчитываются следующие пять параметров резонатора на α -типе колебаний: $Q_\alpha, f_\alpha, |A_s|, |A_\alpha|, \varphi_\alpha$.

Относительно выбора функции (1) заметим следующее. Во-первых, формула (1) справедлива для колебательного контура, если $A_s = 0$,

при этом комплексная амплитуда A_α описывает ток в контуре. В теории СВЧ-резонаторов часто используется аналогия резонансных процессов в объемных резонаторах и в колебательном контуре [1]. Во-вторых, непосредственным вычислением нетрудно показать, что (1) справедлива для резонаторов на отрезках линий передачи СВЧ, тогда A_α есть комплексная амплитуда прямой или отраженной волны в линии передачи. Связь параметров резонатора с матрицами рассеяния неоднородностей на концах отрезка и постоянной распространения в линии может быть записана аналитически, используя развитый аппарат теории СВЧ-цепей [5]. И наконец, в известных приближениях формула (1) может быть получена непосредственно из уравнений Максвелла при решении задачи возбуждения объемного резонатора сосредоточенными источниками [6]. В последнем случае комплексная амплитуда A_α есть коэффициент разложения поля по векторной функции α -типа колебаний резонатора.

Для резонаторов с одним элементом связи амплитуда A_s есть амплитуда волны, отраженной от расстроенного резонатора. Для резонаторов с двумя элементами связи обычно $A_s \approx 0$. Однако если имеется непосредственная связь между входными и выходными цепями резонатора, то $A_s \neq 0$. Такая ситуация типична при распределенном возбуждении диэлектрических резонаторов, в том числе с модами шепчущей галереи. Заметим также, что A_s будет отлична от нуля, если рядом с α -типом колебаний в резонаторе возбуждается другой β -тип колебаний. Тогда связь входа резонатора с его выходом осуществляется на «крыле» β -типа колебаний в резонаторе.

В разработанном АВК используется режим квадратичного детектирования, поэтому АЧХ резонатора пропорциональна квадрату функции (1)

$$y(f) = |F(f)|^2 = A_s^2 + \frac{|A_\alpha|^2 + 2A_s(R_\alpha + 2B_\alpha Q_\alpha \tau_\alpha)}{1 + 4Q_\alpha^2 \tau_\alpha^2}, \quad (2)$$

где $R_\alpha = |A_\alpha| \cos(\varphi_\alpha)$; $B_\alpha = |A_\alpha| \sin(\varphi_\alpha)$.

Функцию (2) будем называть резонансной кривой. В частном случае при $A_s = 0$ она совпадает с известной функцией Лоренца, описывающей, например, резонансную кривую колебательного контура.

Выражение (2) преобразуется к виду

$$y(t) = (b_0 + b_1 t + b_2 t^2) / (1 - a_1 t - a_2 t^2). \quad (3)$$

Неизвестные коэффициенты a_n и b_n вычисляются с использованием метода наименьших

квадратов (НМК). Если в результате измерения АЧХ резонатора имеем N значений амплитуды $Y_p = y(t_p)$ в точках $t_p = t(f_p)$, где f_p – частота, на которой измерены Y_p , то неизвестные коэффициенты a_n и b_n будут решением стандартной системы линейных уравнений (см., например, [7]).

Таким образом, в соответствии с идеологией метода НМК вычисляется кривая (3), которая имеет минимальное в среднеквадратичном смысле отклонение от экспериментальных точек. Значения рассчитанных коэффициентов a_n и b_n зависят от выбора конкретного массива экспериментальных данных. Если, например, в данных присутствуют «выбросы» или значительные систематические погрешности, искажающие форму кривой, то аппроксимирующая функция может сильно отклоняться от измеренной АЧХ. Поэтому в программе аппроксимации выбору исходного массива данных уделяется особое внимание. Предусмотрены как возможность органолептического контроля соответствия исходных данных и кривой аппроксимации, так и расчет и вывод на экран значения функции невязки.

Из теории метода НМК известно [8], что точки, измеренные с большими относительными погрешностями, дают больший вклад в погрешность расчета параметров кривой аппроксимации по сравнению с точками, известными с меньшей относительной погрешностью. Поэтому, в частности, рекомендуется производить взвешивание данных. При аппроксимации резонансной кривой точки на крыльях линии имеют большую относительную погрешность. С другой стороны, если учитывать точки лишь вблизи вершины, то кривая аппроксимации может не прописать крылья линии.

Мы поступили следующим образом. Оператор выделяет два массива данных с помощью бегунков в окне программы обработки данных. «Массив контроля невязки» захватывает крылья линии и используется для расчета невязки. «Массив расчета параметров», по которому рассчитываются коэффициенты аппроксимации, выбирается приблизительно на уровне -10 дБ от максимума. Таким образом, во-первых, реализуется простейшее взвешивание данных, и во-вторых, производится контроль прорисовки крыльев линии.

После выбора исходного массива данных и проведения аппроксимации резонансная частота f_α может быть вычислена по формуле

$$f_\alpha = f_0 (1 - a_1 / (2a_2)). \quad (4)$$

Формула (4), а также другие формулы, связывающие коэффициенты дробно-рациональной функции (3) с параметрами резонатора, получены тождественными преобразованиями после сопоставления выражений (2) и (3). Поми-

мо резонансной частоты, сразу же могут быть вычислены нагруженная добротность и уровень постоянной составляющей

$$Q_\alpha^2 = \frac{-(2a_2 - a_1)^2}{4(4a_2 + a_1^2)}, \quad A_s^2 = -b_2/a_2. \quad (5)$$

Комплексная амплитуда колебания $A_\alpha = R_\alpha + jB_\alpha$ может быть вычислена, если известны коэффициенты ${}^e a_n$ и ${}^e b_n$ дробно-линейной функции (3) для массива данных, представленных относительно резонансной частоты. После пересчета расстроек в исходном массиве данных к резонансной частоте (4), которая теперь известна, и расчета новых коэффициентов ${}^e a_n$ и ${}^e b_n$ можно вычислить недостающие параметры α -колебания по формулам

$$B_\alpha = {}^e b_1 / (4A_s Q_\alpha), \quad R_\alpha = \sqrt{{}^e b_0 - B_\alpha^2} - A_s. \quad (6)$$

Зная мнимую B_α и действительную R_α части комплексной амплитуды, легко рассчитать модуль и фазу α -колебания. Таким образом, оценки (средние значения) всех искомым параметров $Q_\alpha, f_\alpha, |A_s|, |A_\alpha|, \varphi_\alpha$ резонатора найдены.

Погрешность определения параметров тем выше, чем больше случайные погрешности измерения АЧХ резонатора. Путем обработки исходного массива данных можно получить оценку сверху доверительного интервала измерений резонансной частоты и добротности, как и остальных параметров.

Среднеквадратичное отклонение $\Delta(y)$ N исходных точек (Y_i, f_i) от резонансной функции $y(f)$ рассчитывается после проведения процедуры аппроксимации по формуле

$$\Delta^2(y) = \frac{1}{N+1} \sum_{i=1}^N (Y_i - y(f_i))^2. \quad (7)$$

Представим себе, что добротность Q_α и параметр расстройки t_α измеряются независимо

друг от друга с абсолютными среднеквадратичными погрешностями $\Delta(Q_\alpha)$ и $\Delta(t_\alpha)$ соответственно. Тогда

$$\Delta^2(y) = K_Q^2 \Delta^2(Q_\alpha) + K_t^2 \Delta^2(t_\alpha) + \Delta_x^2 \quad (8)$$

где Δ_x – абсолютная погрешность, определяемая другими факторами, а

$$K_Q^2 = \frac{1}{N+1} \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial y}{\partial Q_\alpha} \Big|_{f=f_i} \right)^2, \quad (9)$$

$$K_t^2 = \frac{1}{N+1} \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial y}{\partial t_\alpha} \Big|_{f=f_i} \right)^2.$$

Вид частных производных в (9) легко получить дифференцированием функции (2). Из равенства (8) следуют следующие неравенства:

$$\frac{\Delta(f_\alpha)}{f_\alpha} \leq \frac{\Delta(y)}{K_t}, \quad \frac{\Delta(Q_\alpha)}{Q_\alpha} \leq \frac{\Delta(y)}{K_Q Q_\alpha}. \quad (10)$$

Знак равенства в оценках (10) означает, что погрешностью измерений других параметров, по сравнению с выделенным параметром, можно пренебречь. Например, если предположить, что частота известна с абсолютной точностью, а постоянный уровень A_s пренебрежимо мал, то погрешность измерения добротности будет в K_Q раз меньше среднеквадратичного отклонения резонансной функции от данных измерений.

Очевидно, что после расчета параметров резонансной функции оценка сверху погрешностей измерений (10) может быть сделана, и такая опция предусмотрена в программе обработки данных измерений.

С целью проверки корректности предложенной методики обработки АЧХ резонаторов, а также программы ПК был выполнен численный эксперимент. По формуле (2) рассчитывалась резонансная кривая, заданные параметры для которой представлены во 2-м столбце табл. 1.

Таблица 1

Результаты аппроксимации резонансной кривой, рассчитанной по формуле (1)

Параметры резонатора	Заданные параметры	Восстановленные параметры без шумов	Восстановленные параметры с шумами
1	2	3	4
Резонансная частота f_α , ГГц	33,630	33,630001±0,0000012	33,630035±0,0000563
Добротность Q_α	8000,0	7999,969±1,1	7810,6±269,3
Постоянный уровень A_s	0,440	0,440000±0,000056	0,43899±0,00449
Модуль амплитуды колебаний A_α	0,605	0,605201±0,000168	0,59196±0,00597
Разность фаз φ_α , град	75,0	75,006±0,0300	72,780±1,220

При этом было сделано два варианта расчета – резонансная функция с добавлением нор-

мальных шумов к амплитуде и без добавления шумов. Далее оба варианта данных обрабатыва-

лись с помощью предложенного метода. Результаты восстановления параметров резонансной функции представлены в табл. 1.

На рис. 6 в качестве иллюстрации для случая с шумами представлены исходная АЧХ (•••) и функция аппроксимации (—). Кроме того, показана восстановленная резонансная кривая, т. е. резонансная кривая с постоянной составляющей минус восстановленное значение постоянной составляющей с учетом разности фаз колебания и постоянного уровня. Данные табл. 1 и зависимости на рис. 6 с очевидностью демонстрируют эффективность предложенного метода обработки АЧХ резонаторов.

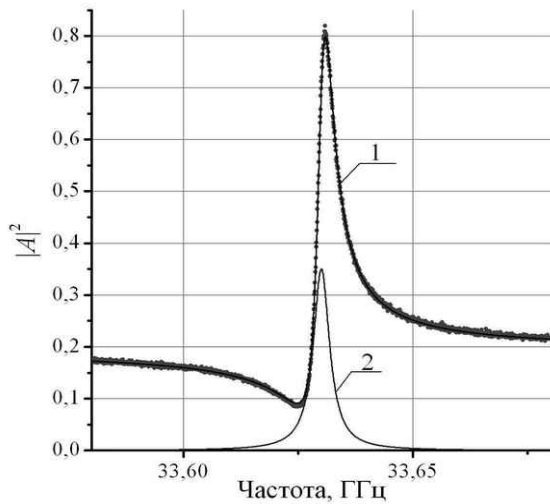


Рис. 6. Результаты обработки АЧХ коэффициента передачи резонатора при наличии постоянного уровня: ••• – исходный массив данных; 1 – функция аппроксимации (2); 2 – резонансная кривая после восстановления

Добротность, которая вычисляется из обработки АЧХ резонаторов при любой схеме включения, есть нагруженная добротность резонатора. Покажем, как по АЧХ коэффициента отражения от резонатора можно наряду с нагруженной добротностью рассчитать собственную добротность резонатора и потери мощности источника сигнала в элементе связи, не связанные с накоплением энергии в резонаторе.

Перепишем (1) в виде частотной зависимости коэффициента отражения

$$\Gamma(f) = \Gamma_s + \Gamma_e / (1 + 2jQ_\alpha t), \quad (11)$$

где Γ_s – модуль коэффициента отражения при «бесконечной» расстройке; Γ_e – некоторая комплексная функция.

Методика вычисления всех параметров нагруженного резонатора, присутствующих в формуле (11), была изложена выше. Для вычисления собственных параметров резонатора, т. е. того же резонатора, но без элемента связи, необходимо знать его импеданс. Частотная зависи-

мость импеданса нагруженного резонатора пересчитывается из частотной зависимости коэффициента отражения с помощью известного преобразования [1]:

$$Z = (1 + \Gamma e^{j\Phi}) / (1 - \Gamma e^{j\Phi}), \quad (12)$$

где Φ – фаза референсной плоскости представления эквивалентной цепи резонатора.

Можно показать, что в плоскости Φ , определяемой уравнением

$$(1 - \Gamma_s^2)R \sin(\Phi) + (1 + \Gamma_s^2)B \cos(\Phi) - 2B\Gamma_s = 0, \quad (13)$$

эквивалентная цепь есть параллельный колебательный контур с импедансом

$$Z(f) = Z_s + Z_r \equiv Z_s + Z_0 / (1 + Q_x t), \quad (14)$$

где Z_s – эквивалентный импеданс элемента связи; Z_r – импеданс контура, моделирующий резонатор без элемента связи; Z_0 – комплексный параметр, не представляющий интереса для вычисления собственной частоты и добротности. Связь комплексного параметра Q_x с нагруженной добротностью Q_α приведем без вывода:

$$Q_x = \frac{2jQ_\alpha(1 - \Gamma_s e^{j\Phi})}{1 - (\Gamma_e + \Gamma_s)e^{j\Phi}}. \quad (15)$$

И наконец, собственная добротность Q_z и собственная частота f_z резонатора вычисляется по найденному параметру Q_x :

$$Q_z = 1 / \text{Im}(-2/Q_x), \quad f_z = f_\alpha (1 + \text{Re}(-1/Q_x)). \quad (16)$$

В стационарном режиме мощность источника сигнала P_{in} , которая падает на резонатор, равна сумме отраженной от резонатора мощности P_{ref} , мощности P_r , рассеянной в резонаторе, и мощности, которая «теряется» в элементе связи ($P_{in} - P_{ref} - P_r$). В случае объемных резонаторов в элементе связи может рассеиваться существенная часть мощности на несовершенствах контактов. В открытых резонаторах часть мощности источника сигнала высвечивается элементом связи в свободное пространство, не участвуя в компенсации резонансных потерь. Долю этой мощности называют эффективностью возбуждения η_r открытого резонатора. В работах [9, 10] показано, что эффективность возбуждения может быть вычислена как отношение активного сопротивления резонатора без элемента связи и активного сопротивления резонатора с элементом связи:

$$\eta_r = P_r / (P_{in} - P_{ref}) = \text{Re}(Z_r) / \text{Re}(Z_r + Z_s). \quad (17)$$

3. Результаты испытаний АВК. С целью проверки достоверности измерения параметров резонаторов с помощью разработанного комплекса выполнены сравнительные измерения нагруженных добротностей и резонансных частот от-

крытого резонатора с помощью АВК и с помощью векторного анализатора N5230A. Фотографию этого резонатора можно видеть на рис. 1. Результаты измерений представлены в табл. 2, а также на рис. 7 для последовательности основных

TEM_{00q}-типов колебаний с различными продольными числами. Наряду со средними значениями приведены также оценки доверительных интервалов измерений, полученные по формулам (10) как для АВК, так и для N5230A.

Таблица 2

Сравнение данных измерений добротности и резонансной частоты ОР, полученных с помощью АВК и векторного анализатора N5230A

№	Частота, ГГц			Добротность		
	N5230A	АВК	Относительная разность, %	N5230A	АВК	Относительная разность, %
1	27,8244±0,00004	27,8063±0,00002	0,065	8104±183	8114±377	0,32
2	29,4096±0,00004	29,4131±0,00009	-0,012	9112±276	9278±2717	1,04
3	30,9945±0,00004	30,9850±0,00010	0,031	9992±240	9224±656	-7,68
4	32,5796±0,00004	32,5849±0,00010	-0,016	10949±396	10914±677	-0,28
5	34,1645±0,00005	34,1643±0,00006	0,001	11803±431	12021±1329	1,97

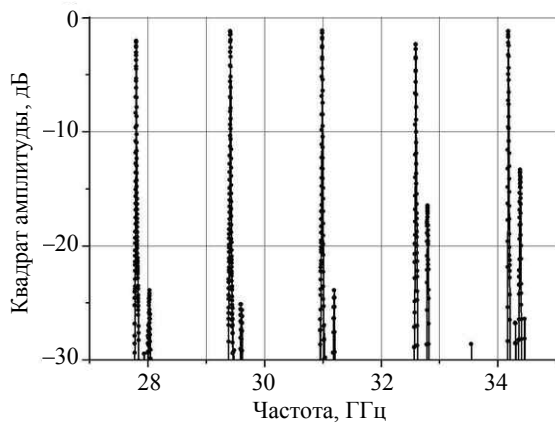


Рис. 7. Спектр колебаний исследуемого открытого резонатора, измеренный с помощью АВК. Диапазон представления данных ограничен уровнем -30 дБ

За исключением типа колебаний на частоте 29,4 ГГц случайные погрешности измерений частоты и добротности обоими приборами оказались соизмеримыми. Относительная разность отклонений резонансных частот, измеренная двумя приборами, составила величину около 10⁻² %, что приблизительно на порядок превышает случайные погрешности. Эту разность можно считать обусловленной долговременной (температурной) нестабильностью частоты генератора Ганна в приборе Г4-156, поскольку частота гетеродина в анализаторе N5230A контролируется кварцевым стандартом частоты.

Разность отклонений добротностей, измеренная двумя приборами, не превышает оценку сверху (10) величины доверительного интервала измерений, относительная величина которого лежит в пределах от 3 до 11 %. Однако на частоте 29,4 ГГц величина доверительного интервала составила 30 %. Это объясняется тем, что в оценку величины доверительного интервала (13) по-

мимо случайных погрешностей измерений входят погрешности измерений, связанные с искажением формы резонансной кривой. Можно назвать несколько причин таких искажений: нелинейности амплитудной и частотной характеристик приборов, а также присутствие мешающих типов колебаний вблизи исследуемого резонанса. Наличие высших типов колебаний рядом с основными типами присутствует (см. спектр на рис. 7) и несколько искажает идеальную форму резонансной кривой, характерную для уединенных типов колебаний, что, по-видимому, является причиной достаточно большого доверительного интервала измерения добротностей с помощью векторного анализатора.

В нашем же случае причиной искажения формы кривой на частоте 29,4 ГГц является нелинейность перестроенной характеристики генератора Г4-156, что было наглядно видно по несимметричному расположению меток по обе стороны от резонансной кривой.

Была также проведена серия из 15 измерений добротности и резонансной частоты для типа колебаний на частоте 30,93 ГГц. Каждая АЧХ обрабатывалась описанным выше способом, после чего по стандартной методике оценивались средние значения и доверительные интервалы параметров резонансной кривой. В результате нагруженная добротность составила 9324±340, а резонансная частота – (30,9277±0,0010) ГГц, т. е. случайные относительные погрешности составили ±3,6 и ±0,003 % соответственно. Для этого же типа колебаний из табл. 2 имеем значения добротности 9224±656 и резонансной частоты (30,9850±0,00010) ГГц. Следовательно, оценка сверху доверительного интервала измерений добротности по однократному измерению в данных условиях превышает доверительный интервал приблизительно в два раза.

Этот же тип колебаний открытого резонатора на частоте 30,95 ГГц исследовался в режиме «на отражение». Для связи с трактом использовался элемент связи на одном из зеркал, при этом элемент связи на другом зеркале был подсоединен к согласованной нагрузке. На рис. 8 представлен результат измерения АЧХ коэффициента отражения от резонатора (••••) и кривая аппроксимации. Прямая горизонтальная линия – результат измерения отражения от короткозамкнутой нагрузки в плоскости подключения открытого резонатора. Видим, что квадрат модуля коэффициента отражения от «бесконечно» расстроенного резонатора отличен от единицы и равен 0,92. Это означает, что часть мощности источника возбуждения расходуется на излучение в свободное пространство.

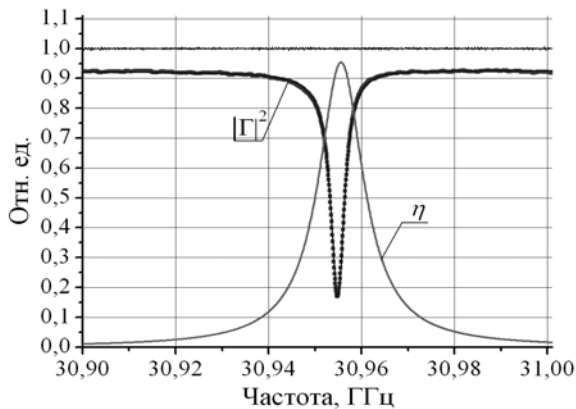


Рис. 8. Измеренная АЧХ коэффициента отражения открытого резонатора (нанесено точками) и кривая аппроксимации (2). Линия η – эффективность возбуждения резонатора

Расчитанные значения нагруженной добротности и резонансной частоты составили 8688 ± 181 и $(30,9549 \pm 0,0001)$ ГГц соответственно. Эти величины попадают в доверительные интервалы измерений тех же характеристик в режиме «на проход». Собственная частота и добротность резонатора, рассчитанные по формулам (16), составили 12276 и 30,9556 ГГц. Следовательно, коэффициент связи резонатора с волноводом равен $\rho = (Q_z / Q_\alpha - 1) = 0,412$.

На рис. 9 представлен результат расчета годографа импеданса открытого резонатора в референсной плоскости Φ , определяемой уравнением (13). Параметр годографа – частота вынужденных колебаний в резонаторе. Активная составляющая импеданса резонатора при «бесконечной» расстройке Z_s не равна нулю, что равносильно потерям энергии в элементе связи. На частоте собственного резонанса реактивная составляющая импеданса ($Z_s + R_r$) отлична от нуля, что обусловлено реактивным сопротивлением

элемента связи. На частоте нагруженного резонанса импеданс равен $(Z_s + Z_r)$. Как известно, для построения частотной зависимости импеданса резонатора требуются его АЧХ и ФЧХ [1, 9–11].

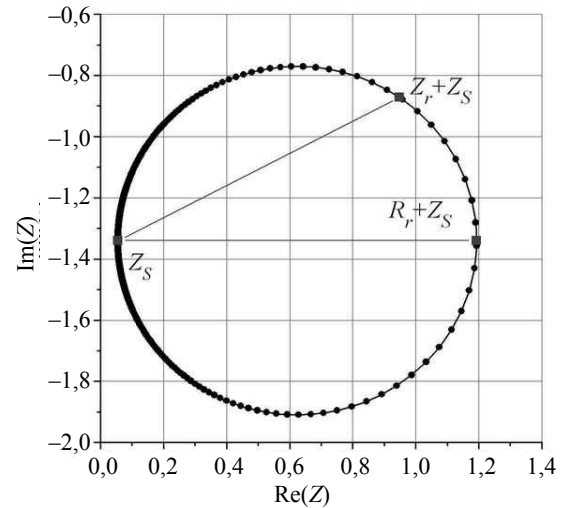


Рис. 9. Годограф импеданса открытого резонатора, восстановленный по измеренной АЧХ, которая приведена на рис. 8

Особо отметим, что восстановление частотной зависимости импеданса резонатора, т. е. зависимостей его активной и реактивной составляющих, сделано в данной работе без измерения ФЧХ резонатора, а только с использованием его АЧХ. Это обусловлено возможностью предложенного алгоритма восстанавливать все константы комплексной зависимости (1) по АЧХ резонатора. Эти же константы полностью описывают ФЧХ резонатора.

На рис. 8 показана также частотная зависимость эффективности возбуждения резонатора, рассчитанная по формуле (17). Зависимость имеет резонансный вид, но ее максимум смещен по отношению к резонансной кривой нагруженного резонатора и расположен на частоте собственных колебаний резонатора. Максимальная эффективность составила 95,4 % на частоте собственного резонанса. Особенности частотных зависимостей эффективности возбуждения открытого резонатора обсуждались ранее [9, 10].

В заключение раздела покажем возможности АВК при исследовании характеристик низко- и высокодобротных резонаторов. Первый из них использовался для измерений комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) сухих вин [12] и назван нами радиально-слоистым цилиндрическим резонатором (РСЦР). РСЦР представляет собой заполненный тефлоном цилиндрический резонатор из латуни. На торцевых поверхностях расположены два элемента связи в виде тонких металлических диафрагм. В боковой поверхности корпуса резонатора выполнена ра-

диальная полость, предназначенная для заполнения сильно поглощающей жидкостью. Полость расположена в плоскости симметрии резонатора. В боковой поверхности радиальной полости выполнены два отверстия для заполнения и слива жидкости соответственно.

На рис. 10 представлен спектр РСЦР, в котором полость не заполнена жидкостью. В резонаторе возбуждаются H_{11q} -типы колебаний цилиндрического резонатора. Нечетные типы колебаний на частотах 30,23 и 35,20 ГГц ($q=5$ и $q=7$) используются для измерений. Нагруженные добротности этих типов колебаний составили 1409 ± 57 и 942 ± 30 соответственно. Резонансная частота РСЦР на четных типах колебаний сильно зависит от диаметра радиальной полости. Наличие сливных отверстий существенно нарушает симметрию резонатора, вследствие чего снимается поляризационное вырождение четных типов колебаний. Эта особенность спектра хорошо видна на рис. 10.

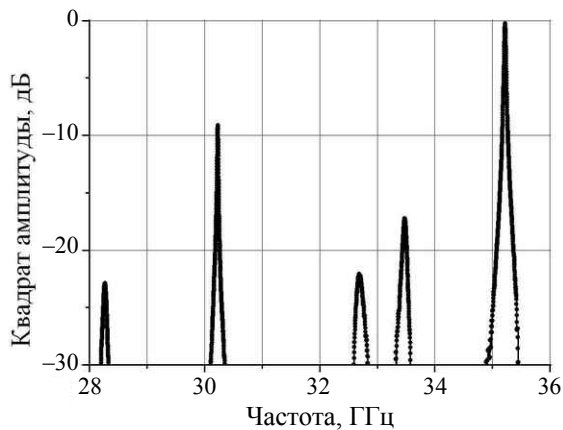


Рис. 10. Спектр РСЦР. Радиальная полость не заполнялась жидкостью. Диапазон представления данных ограничен уровнем -30 дБ

На рис. 11 представлена запись резонансной кривой РСЦР для $H_{1,1,7}$ -типа колебаний при заполнении радиальной полости дистиллированной водой. На левом крыле кривой наблюдается искажение формы линии, также, по-видимому, связанное со снятием поляризационного вырождения.

Запись АЧХ, представленная на рис. 12, получена для высокодобротного полусферического открытого резонатора с медными зеркалами. Сферическое зеркало: радиус кривизны 185 мм, диаметр 131 мм. Плоское зеркало: диаметр 98 мм. Длина резонатора 120 мм. На сферическом зеркале выполнены два элемента связи в виде тонких диафрагм диаметром 1,6 мм. Измеренная добротность открытого резонатора составила $Q = 73500 \pm 3500$.

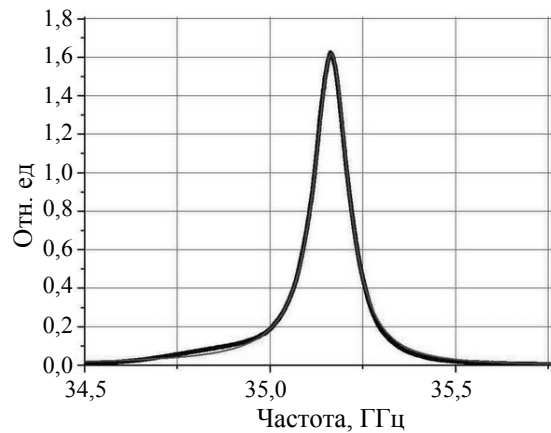


Рис. 11. АЧХ РСЦР с $H_{1,1,7}$ -типом колебаний. Радиальная полость заполнялась водой. Показаны экспериментальные точки и линия аппроксимации функцией (2)

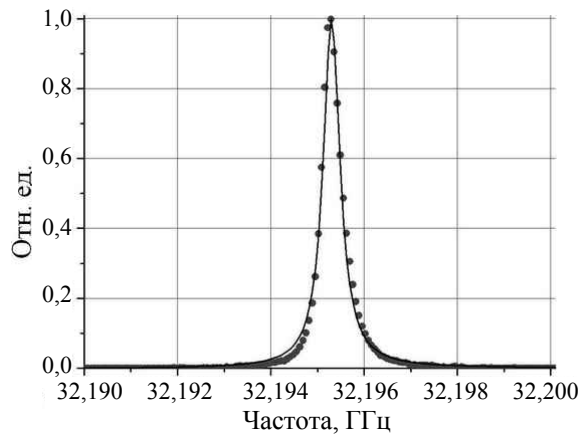


Рис. 12. Резонансная кривая высокодобротного открытого резонатора: точки – данные измерений; линия – аппроксимация функцией (2)

Видно, что с помощью разработанного АВК можно проводить исследования резонаторов с добротностями до сотни тысяч. Ограничением при измерениях более высоких добротностей становится малое количество измеренных точек на резонансную кривую. Причина – ограниченная скорость передачи данных из микроконтроллера в ПК. Кратковременная нестабильность частоты и частотные шумы источника сигнала АВК – генератора Ганна – не является ограничивающим фактором при измерениях добротностей как минимум до единиц миллионов.

Выводы. Показано, что с помощью разработанного аппаратного комплекса можно исследовать характеристики резонаторов с добротностями от десятков единиц до сотни тысяч в диапазоне частот 26...37,5 ГГц и в динамическом диапазоне 70...80 дБ. При этом источником сигнала в измерительном комплексе является механически перестраиваемый генератор Ганна с коаксиально-волноводным резонатором.

Разработан метод обработки АЧХ резонаторов, основанный на аппроксимации резо-

нансной кривой дробно-рациональной функцией, с последующим вычислением параметров резонансной кривой по коэффициентам аппроксимации. Резонансная частота, нагруженная добротность, уровень постоянной составляющей сигнала, амплитуда колебания и сдвиг фазы между ними могут быть вычислены по АЧХ резонатора, измеренной при любой схеме включения резонатора в тракт. Получены формулы для оценки сверху доверительного интервала измерения параметров.

Впервые показано, что по АЧХ коэффициента отражения резонатора без проведения дополнительных фазовых измерений могут быть рассчитаны собственная частота и собственная добротность, а также доля мощности, теряемая при возбуждении резонатора.

Показано, что погрешности измерения параметров резонатора с помощью разработанного АВК не превышают нескольких процентов.

Работа выполнена при частичной поддержке проекта УНТЦ № 3870. Авторы признательны В. И. Семанчуку и Б. С. Чернику за поставку широкодиапазонного $p-i-n$ -модулятора, А. В. Зоренко за поставку КВЧ-детектора и С. В. Недуху за проведение записей АЧХ открытого резонатора на векторном анализаторе цепей N5230A.

1. Гинзтон Э. Л. Измерения на сантиметровых волнах / Пер. с англ. под ред. Г. А. Ремеза. – М.: Иностран. лит., 1960. – 620 с.
2. Валитов Р. А., Скрасанов В. Н., Фисун А. И. Измерение добротности // Измерения на миллиметровых и субмиллиметровых волнах: Методы и техника / Под ред. Р. А. Валитова, Б. М. Макаренко. – М.: Радио и связь, 1984. – 296 с.
3. Менде Ф. Ф., Бондаренко И. Н., Трубицин А. В. Сверхпроводящие и охлаждаемые резонансные системы. – Киев: Наук. думка, 1976. – 272 с.
4. Kajfez D. Linear Fractional Curve Fitting for Measurement of High Q Factors // IEEE Trans. – 1994. – MTT-42, No. 7. – P. 1149–1153.
5. Алтман Дж. Устройства СВЧ / Пер. с англ. под ред. И. В. Лебедева. – М.: Мир, 1968. – 488 с.
6. Штейнштейгер В. Б. Явления взаимодействия волн в электромагнитных резонаторах. – М.: Оборонпром, 1955. – 114 с.
7. Маркин Н. С. Основы теории обработки результатов измерений. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 176 с.
8. Крынев А. В., Лукин Г. В. Математические методы обработки неопределенных данных. – М.: Физматлит, 2003. – 214 с.
9. Скрасанов В. М., Гламаздин В. В., Натаров М. П. та ін. Нові пристрої зв'язку високодобротних НДВЧ резонаторів з хвилеводами: теорія, проектування, експеримент // Пріоритети наукової співпраці ДФФД і БРФФД: Матеріали спільних конкурсних проєктів Державного фонду фундаментальних досліджень і Білоруського фонду фундаментальних досліджень. – Київ: ДІА, 2007. – С. 177–190.
10. Мирошниченко В. С., Сенкевич Е. Б. Экспериментальное определение параметров эквивалентной цепи открытого резонатора, связанного с линиями передачи // Радиофизика и электроника. – Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – 2002. – 7, № 2. – С. 301–311.
11. Гламаздин В. В., Скрасанов В. Н., Шубный А. И. Метод импеданса в исследовании характеристик открытых резонаторов при возбуждении гибридных типов колебаний //

- Радиофизика и электроника. – Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – 2008. – 13, № 1. – С. 9–19.
12. Еременко З. Е., Ганопольский Е. М., Скрасанов В. Н. и др. Цилиндрический объемный резонатор с кольцевой полостью для определения комплексной диэлектрической проницаемости столовых вин // Радиофизика и электроника. – Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – 2009. – 14, № 2. – С. 239–249.

THE HARDWARE-CALCULATED SYSTEM FOR MEASUREMENT LOW AND HIGH QUALITY RESONATORS CHARACTERISTICS AT THE FREQUENCY RANGE FROM 26 GHZ TO 37,5 GHZ

V. N. Skresanov, V. V. Glamazdin, A. I. Shubny, Z. E. Eremenko

The results of hardware - calculated system (HCS) design for measurement of resonators characteristics with quality-factor from hundred units up to hundred thousand at the frequency range from 26 GHz to 37,5 GHz are presented. The measurements are based on the registration and processing of amplitude vs. frequency characteristics (AFC) of resonators. The calculation methods of loaded quality, resonant frequency, relative amplitude of fluctuations and the level of constant component of the signal, and also the shift of phases between them on factors of approximation of the resonator's AFC by fractional-rational function are proposed. It is shown, how using the factors of approximation of AFC of the reflection coefficient from the resonator the eigen quality-factor and the part of signal scattering power in a coupling element can be calculated. The results of tests are presented at study of resonators with low- and high-quality factors.

Key words: microwave measurements, resonators, quality-factor, efficiency of excitation, approximation of a resonant curve.

АПАРАТНО-ОБЧИСЛЮВАЛЬНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК НИЗЬКО- ТА ВИСОКОДОБРОТНИХ РЕЗОНАТОРІВ У ДІАПАЗОНІ 26...37,5 ГГц

В. М. Скрасанов, В. В. Гламаздин, О. І. Шубний, З. Є. Єременко

Подано результати розробки апаратно-обчислювального комплексу, призначеного для вимірювання характеристик резонаторів з добротностями від десятків одиниць до сотні тисяч у діапазоні частот від 26 до 37,5 ГГц. Виміри ґрунтуються на реєстрації й обробці амплітудно-частотних характеристик (АЧХ) резонаторів. Запропоновано спосіб обчислення навантаженої добротності, резонансної частоти, відносної амплітуди коливань і рівня постійної складової сигналу, а також зсуву фаз між ними за коефіцієнтами апроксимації АЧХ резонатора дрібно-раціональною функцією. Показано, яким чином за коефіцієнтами апроксимації АЧХ коефіцієнта відбиття від резонатора можуть бути додатково розраховані власна добротність і частка потужності джерела сигналу, що втрачається в елементі зв'язку. Подано результати випробувань, що ілюструють можливості комплексу при дослідженнях низько- і високодобротних резонаторів.

Ключові слова: НВЧ-вимірювання, резонатори, добротність, ефективність збудження, апроксимація резонансної кривої.

Рукопись поступила 3 июня 2009 г.