

УДК 621.371, 621.372

**ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
МАТЕРИАЛОВ РЕЗОНАТОРНЫМ МЕТОДОМ С ПОМОЩЬЮ
СКАЛЯРНЫХ АНАЛИЗАТОРОВ ЦЕПЕЙ**

О. А. Дьяконова, Ю. Н. Казанцев, Д. С. Каленов

**Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН,
141120, г. Фрязино Московской области, пл. Введенского, 1**

Статья поступила в редакцию 27 июня 2017 г.

Аннотация. В данной работе рассмотрен автоматизированный комплекс из нескольких измерительных установок для измерения диэлектрической и магнитной проницаемостей образцов малых размеров резонаторным методом в частотном интервале 2,6 ... 33 ГГц. В качестве базовых приборов использованы скалярные анализаторы цепей (измерители КСВН серии Р-2). При этом для определения мнимых частей диэлектрической и магнитной проницаемостей выбрана методика – по величине КСВН перед резонатором на резонансной частоте. Эта методика продемонстрирована на примере измерения характеристик реального материала.

Ключевые слова: скалярный анализатор цепей, коэффициент прохождения, диэлектрическая и магнитная проницаемости, резонансный метод.

Abstract. In this paper we consider an automated complex of several experimental setups for the measurement of dielectric permittivity and magnetic permeability of samples of small size in the frequency range 2.6 to 33 GHz. Measurements are performed at fixed frequencies. The main devices used scalar analyzers of circuits of the type R-2 modified digital output to a personal computer. The central measuring unit is a resonator of rectangular cross section associated with the supply line through the coupling element. The diaphragm connection is a thin metal plate with a slit or a round hole connection. The walls of the resonator are small holes through which the

resonator introduces samples of the test material. Hole for measuring the magnetic permeability is located on the narrow wall of the resonator near the short end of the reflector (the end surface). The second hole, designed to measure the dielectric constant, is made in the wide wall of the resonator at a distance of quarter wavelength from the end surface. The system operates at resonance method of measurement. The installation of the complex is assembled according to a scheme that operates "on reflection". The effectiveness is demonstrated by measuring the characteristics of real materials. A comparison of the obtained results with the data of independent studies. Conformity of results obtained by two different methods, using different measuring instruments is quite satisfactory.

Key words: scalar network analyzers, transmission coefficients, permittivity, permeability, resonance method.

Введение

В настоящее время существуют две следующие основные группы методов измерения комплексных диэлектрической ϵ^* и магнитной μ^* проницаемостей материалов на СВЧ:

1. по коэффициентам отражения и прохождения в условиях свободного пространства либо в линиях передачи;
2. резонаторные методы.

Целесообразность использования тех или иных методов измерения определяется комплексом причин связанных с электромагнитными и физико-механическими характеристиками материалов, а также с условиями их производства и применения. Сравнительный обзор этих методов представлен в монографии [1] и работе [2]. Например, метод измерения по коэффициентам отражения и прохождения в условиях свободного пространства незаменим для неразрушающего контроля листовых материалов большой площади. Наоборот, резонаторные методы удобны там, где количество ограничено, поскольку размеры измеряемых образцов малы.

Основным современным средством реализации методов измерения ε^* и μ^* в том числе резонаторного метода являются векторные анализаторы цепей. Так, например, фирма Agilent (США) рекомендует для измерения и резонаторный метод и соответствующие измерительные ячейки в виде волноводных резонаторов прямоугольного сечения [3]. Возможности резонаторного метода при использовании современных векторных анализаторов цепей рассмотрены в работе [4]. Высокая точность измерений здесь реализуется благодаря возможности устранения влияния паразитных отражений в измерительном тракте путем прямого и обратного Фурье-преобразования данных измерения комплексных коэффициентов отражения и прохождения, полученных на сетке частоты. В случае использования в резонаторном методе скалярного анализатора цепей такая возможность отсутствует. Вместе с тем надежность, долговечность и низкая цена (по сравнению с ценой векторных анализаторов цепей) до сих пор обеспечивают условия применения скалярных анализаторов цепей для широкого круга СВЧ - измерений.

Целью данной работы является демонстрация эффективности применения скалярных анализаторов цепей, модифицированных цифровым выходом на персональный компьютер, в резонаторном измерительном комплексе, обеспечивающем определение ε^* и μ^* на дискретных частотах в интервале 2.6...33.2ГГц.

1. Резонаторный измерительный комплекс

Структурная схема резонаторного измерительного комплекса представлена на рис.1. В комплекс входит семь установок (выделенных на рисунке штриховыми линиями), выполненных на основе скалярных анализаторов цепей (измерителей КСВН серии Р-2) по схеме “на отражение”.

СВЧ сигнал, модулированный по частоте, от свип-генератора 1 через направленные ответвители 2 и 3 поступает в измерительный резонатор, образованный отрезками волновода 4, диафрагмой связи 5 и коротко замыкающим отражателем 6. Сигнал, отраженный от резонатора, через

направленный ответвитель 3 поступает после детектирования на общий для всех измерительных установок индикаторный блок 7, где сравнивается с продетектированным сигналом прямой волны. На экране индикаторного блока воспроизводится резонансная кривая, представляющая зависимость коэффициента отражения от частоты. Индикаторный блок через аналого-цифровой преобразователь 8 подключен к компьютеру 9.

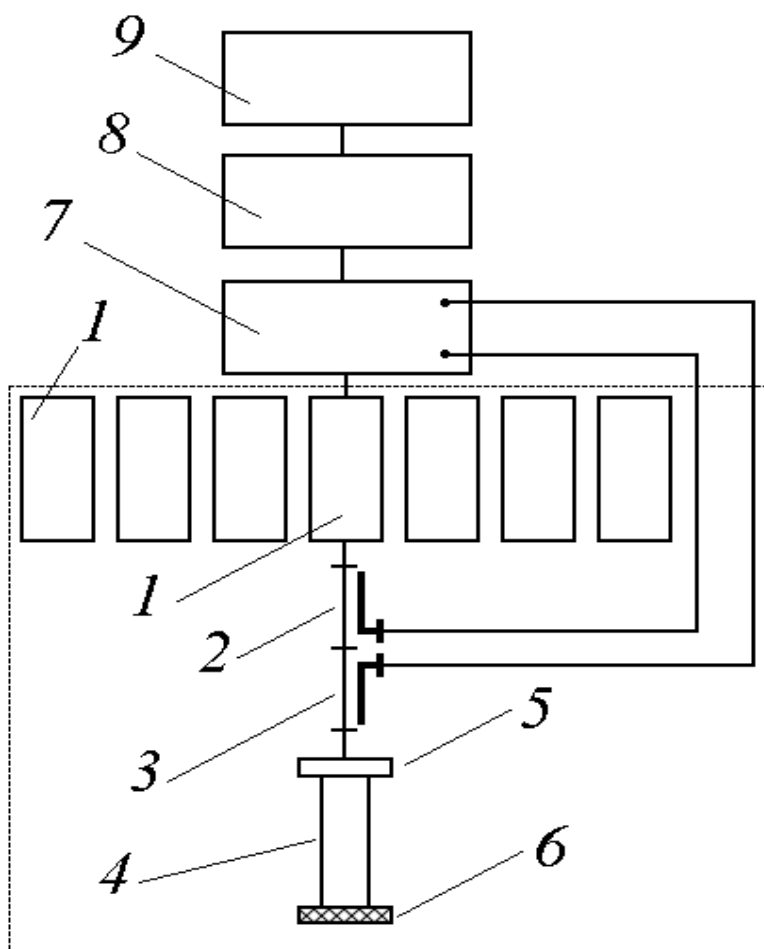


Рис. 1. Структурная схема измерительной установки.

Центральным узлом измерительной установки является резонатор прямоугольного сечения, связанный с питающей линией посредством элемента связи. В стенках резонатора имеются малые отверстия, через которые в резонатор вводятся образцы исследуемого материала. Отверстие для измерения магнитной проницаемости расположено на узкой стенке резонатора вблизи коротко замыкающего отражателя (торцевой поверхности), а второе отверстие, предназначенное для измерения диэлектрической проницаемости, сделано в

широкой стенке резонатора, на расстоянии четверти длины волны от торцевой поверхности.

Диафрагма связи представляет собой тонкую металлическую пластину с щелью, либо круглым отверстием связи. Фото диафрагм связи и резонатора с образцами дано на рис. 2, где образец имеет форму тонкого стержня. Диафрагмы связи характеризуются коэффициентом передачи, который определяется путем предварительной калибровки аппаратуры.



Рис. 2. Диафрагмы связи и резонатор прямоугольного сечения с образцами.

Для каждого типа панорамного измерителя КСВН разработаны и изготовлены резонаторы со своей собственной резонансной частотой f_0 . Параметры резонаторов приведены в таблице 1.

Фото измерительных резонаторов для различных частот представлены на рис. 3.

Таблица 1.

Тип панорамного измерителя КСВН	Параметры резонатора			
	Сечение волновода $a \times b$ [мм ²]	Длина резонатора L [мм ³]	Число полуволн по длине резонатора n	Резонансная частота f_0 [ГГц]
P2-56	72x34	96	1	2,6
		74	1	2,9
		46	1	3,9
P2-58	48x24	120	2	4
		82	2	4,8
		66	2	5,5
P2-59	35x15	72	2	6
		54	2	7
		44	2	8
P2-61	23x10	54	3	8,5
		40	2	9,9
		32	2	11,4
P2-67	16x8	34	2	12,8
		26	2	14,9
		22	2	16,6
P2-66	11x5,5	30	3	20,3
		30	4	24,2
P2-65	7,2x3,4	24	4	27,5
		30	5	33,2

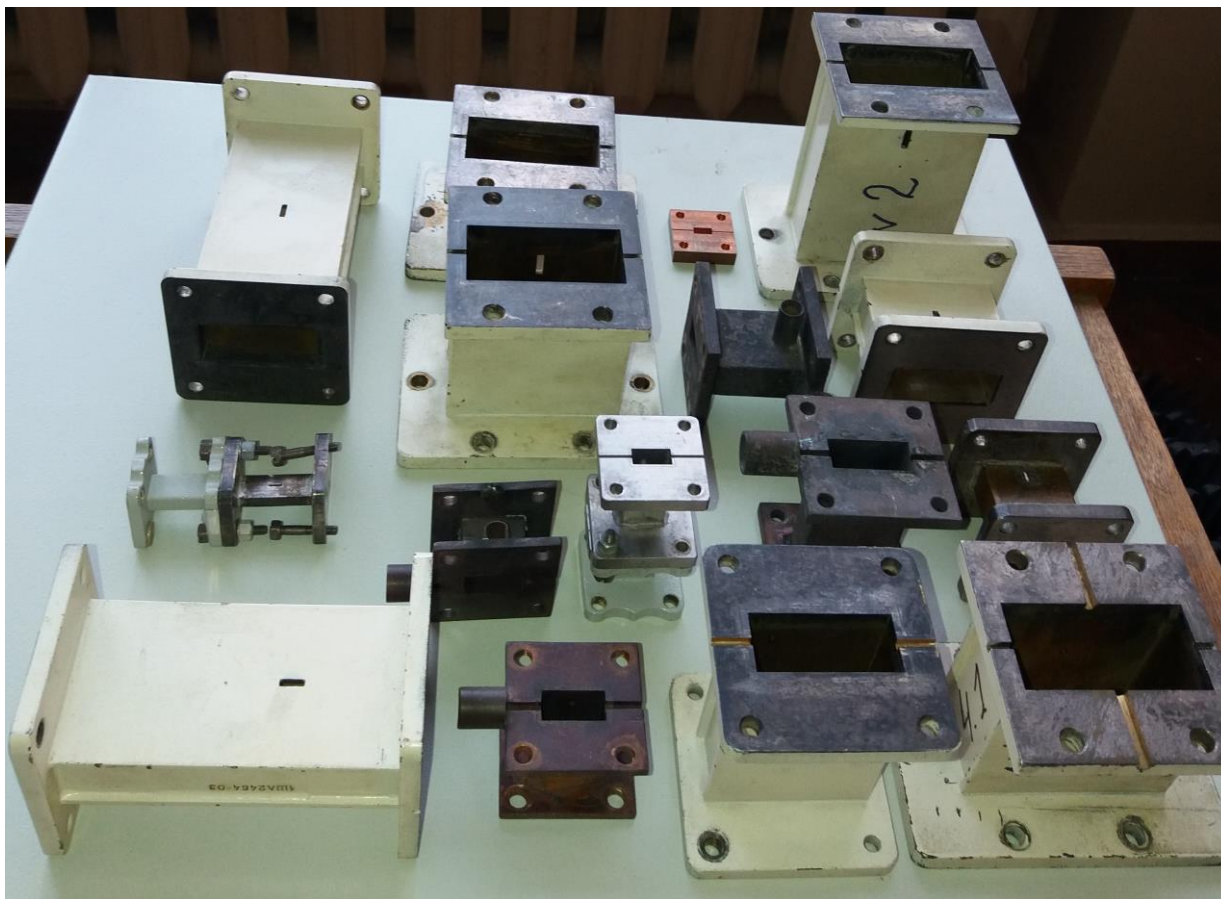


Рис. 3. Измерительные резонаторы.

2. Расчетные формулы и измеряемые параметры

Для упрощения и ускорения процесса измерения индикаторный блок измерительного комплекса модифицирован цифровым выходом на персональный компьютер через модуль аналого-цифрового преобразователя АЦП L-Card E14-140. Обработка, хранение и отображение сигнала на мониторе компьютера производится с помощью специальной программы, написанной в среде *Lab View*.

Программное обеспечение работает под управлением операционной системы *Windows XP*. Вычислительные программы для определения комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей написаны на языке *MathCad*.

Параметры коэффициента отражения в окрестности резонансной частоты связаны с ε^* , μ^* и объёмом образца (в рамках теории возмущений) следующими формулами:

$$\varepsilon' = 1 + \frac{f_0 - f_1}{f_1} \frac{V}{2\Delta V} \quad (1)$$

$$\mu' = 1 + \frac{f_0 - f_2}{f_2} \frac{V}{\Delta V} \left(\frac{\lambda_g}{\lambda_0} \right)^2 \quad (2)$$

$$\varepsilon'' = \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_g} \right)^2 \frac{\eta [(KCB)_1 - (KCB)_0]}{2\pi n} \frac{V}{4\Delta V} \quad (3)$$

$$\mu'' = \frac{\eta [(KCB)_2 - (KCB)_0]}{2\pi n} \frac{V}{2\Delta V}, \quad (4)$$

$$\varepsilon'' = \left(\frac{1}{Q_1} - \frac{1}{Q_0} \right) \frac{V}{4\Delta V} \quad (5)$$

$$\mu'' = \left(\frac{1}{Q_2} - \frac{1}{Q_0} \right) \left(\frac{\lambda_g}{\lambda_0} \right)^2 \frac{V}{2\Delta V} \quad (6)$$

где f_0 и $f_{1,2}$ – резонансные частоты резонатора без образца и с образцом соответственно; λ_0 , λ_g – резонансные длины волны в свободном пространстве и волноводе соответственно; V и ΔV – объёмы резонатора и образца соответственно; η – коэффициент связи через диафрагму (по мощности); n – число полуволн, укладываемых по длине резонатора; $(KCB)_0$, $(KCB)_{1,2}$ – коэффициенты стоячей волны на резонансных частотах без образца и с образцом соответственно; Q_0 и $Q_{1,2}$ – добротности резонатора без образца и с образцом соответственно.

При определении ε' и μ' измеряемыми параметрами являются резонансные частоты f_0 и $f_{1,2}$ (формулы 1, 2), а при определении ε'' и μ'' – коэффициенты стоячей волны в волноводе перед резонатором $(KCB)_0$ и $(KCB)_{1,2}$ (формулы 3,4) либо добротности резонансов Q_0 и $Q_{1,2}$ (формулы 5, 6).

Использование формул (3), (4) либо (5), (6) соответствует двум разным методикам определения ε'' и μ'' : в первом случае по амплитуде коэффициента отражения $|R| = \frac{KCB - 1}{KCB + 1}$ на резонансной частоте, и во втором случае – по ширине резонансной кривой $\frac{2\Delta f}{f_0} = \frac{1}{Q}$. Критерием выбора одной из двух методик является меньшая погрешность измерения соответствующих параметров частотной зависимости коэффициентов отражения. Погрешность измерения этих параметров связана как с искажением частотной зависимости коэффициента отражения из-за паразитных отражений и переотражений в волноводном тракте, так и от аппаратурной погрешности измерения частот и амплитуд. В случае применения в резонаторном методе измерителей КСВН серии Р-2 основной проблемой является ограниченное разрешение по частоте, которое имеет порядок 0,001 от сравниваемых частот либо немного лучше (например, 4,000 ГГц и 4,002 ГГц). Очевидно, что при реальной добротности 500, что соответствует относительной ширине полосы частот 0,002, погрешность определения добротности становится недопустимой. Поэтому величины ε'' и μ'' определялись по измеренным значениям $(KCB)_0$, и $(KCB)_{1,2}$, поскольку точность измерения модулей коэффициентов отражения была достаточной.

3. Калибровка измерительного комплекса

Калибровка комплекса заключается в измерении коэффициентов связи η волноводов с резонаторами. Этот коэффициент определяется как коэффициент прохождения T через диафрагму, помещенную в волновод, соответствующего сечения:

$$\eta = 10^{\frac{T(f_0) \text{ дБ}}{10}} \quad (7)$$

На рис. 4 для примера приведена частотная зависимость коэффициента прохождения $T(f)$ через диафрагму с круглым отверстием диаметром $d = 5,4$ мм

в волноводе сечением $23 \times 10 \text{ мм}^2$. На этом рисунке отмечена резонансная частота резонатора $f_0 = 11,4 \text{ ГГц}$ и коэффициент прохождения $T(f_0) = -11,4 \text{ дБ}$ на этой частоте.

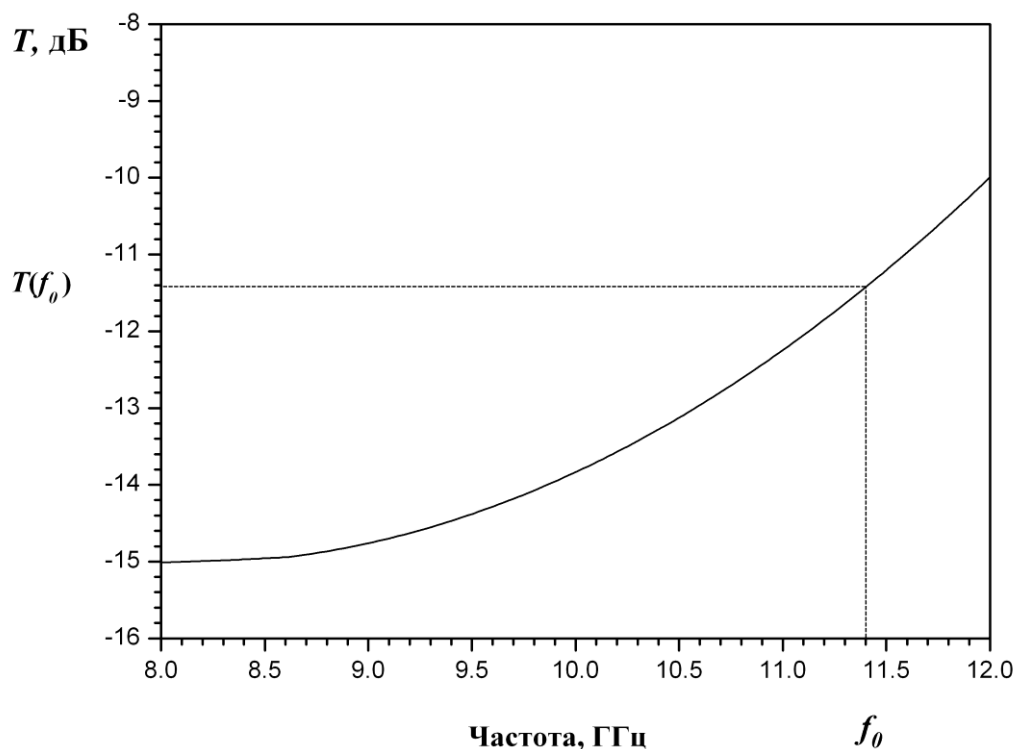


Рис. 4. Частотная зависимость коэффициента прохождения через диафрагму.

4. Результаты измерения

На рис. 5 показаны частотные зависимости коэффициентов отражения от резонатора сечением $23 \times 10 \text{ мм}^2$ и длиной 32 мм без образца (черная линия) и с образцом (красная линия). Образец представлял собой полосу из углеродосодержащей бумаги шириной 0.6 мм и толщиной 0.06 мм. Удельная

проводимость бумаги на постоянном токе составляла около $2 \cdot 10^{-3} \frac{\text{С М}}{\text{М}}$.

Значения ϵ' и ϵ'' на резонансной частоте $f_0 = 11,4 \text{ ГГц}$, рассчитанные по формулам (1) и (3), составляли 21 и 68 соответственно.

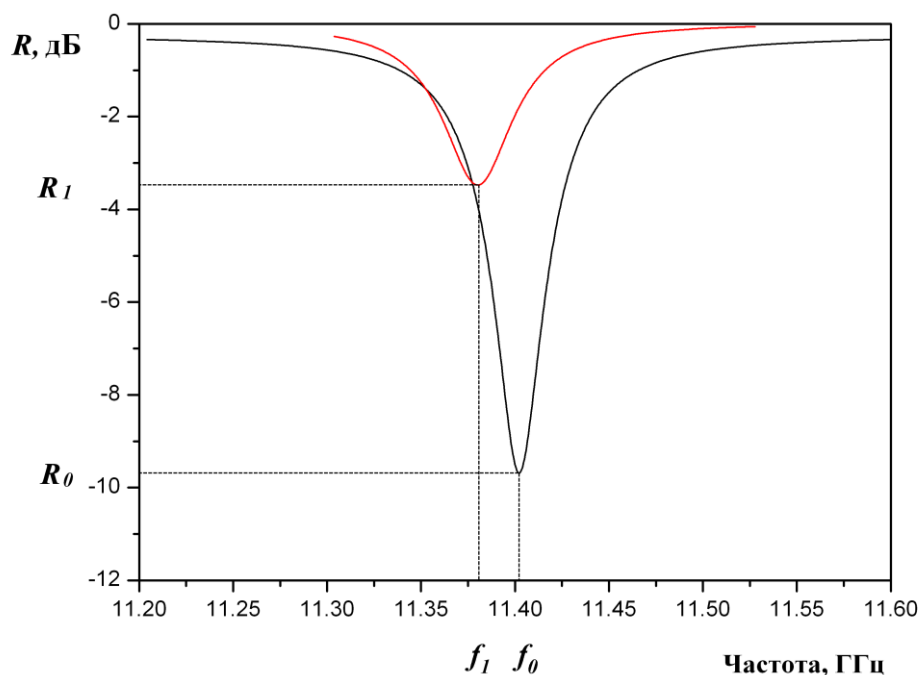


Рис. 5. Частотные зависимости коэффициентов отражения от резонатора без образца и с образцом.

Аналогичные измерения были проведены еще на нескольких частотах.

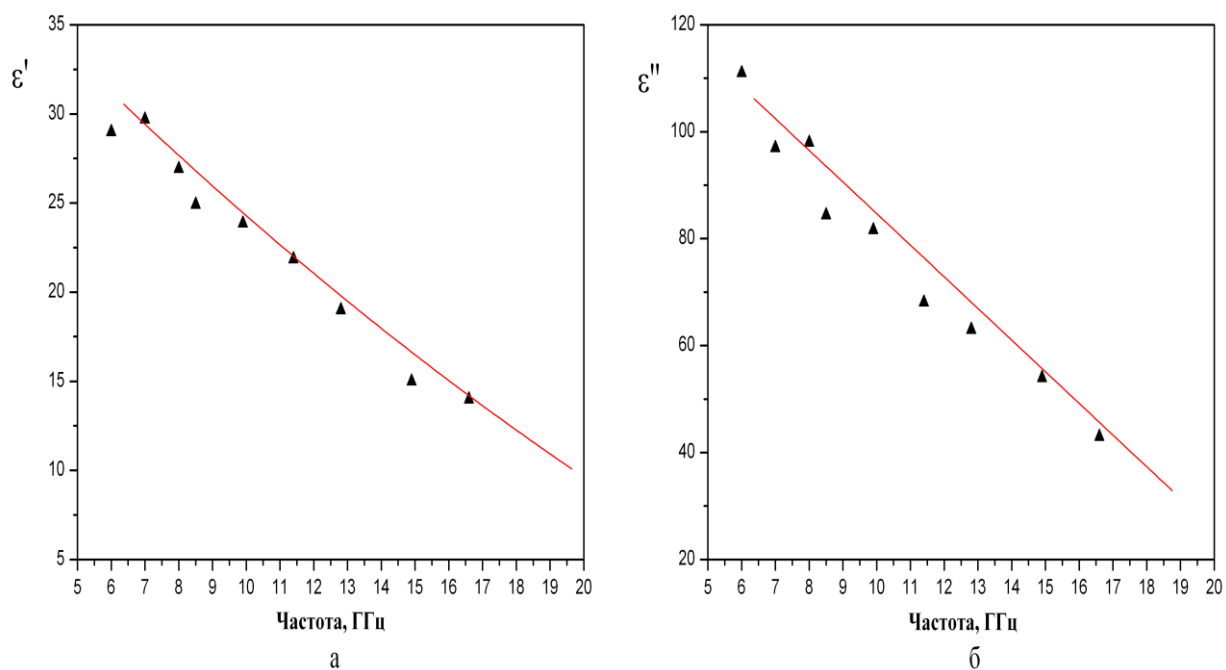


Рис. 6. Частотные зависимости ϵ' (а) и ϵ'' (б) углеродосодержащей бумаги.

На рис. 6 результаты этих измерений даны треугольниками. Для сравнения на этом же рисунке сплошными линиями представлены частотные зависимости $\varepsilon'(f)$ и $\varepsilon''(f)$ для такой же углеродосодержащей бумаги, измеренные по коэффициентам отражения и прохождения в условиях свободного пространства с помощью векторного анализатора цепей PNA-L N5230A фирмы Agilent Technologies.

Заключение

Из семи комплектов скалярных анализаторов цепей серии P-2 и девятнадцати резонаторов прямоугольного сечения создан автоматизированный измерительный комплекс для определения электромагнитных характеристик материалов на фиксированных частотах, лежащих в интервале 2,6 ... 33,2 ГГц. Комплекс предназначен для измерения образцов материалов малых размеров.

Продемонстрирована работа комплекса по выбранной резонаторной методике на примере измерения характеристик реального материала. Проведено сравнение полученных результатов с независимыми измерениями. Соответствие результатов, полученных двумя разными методами, с использованием различных измерительных приборов представляется вполне удовлетворительным.

Литература

1. L. F. Chen, C. K. Ong, C. P. Neo, V. V. Varadan and V. K. Varadan. Microwave Electronics: Measurement and Materials Characterisation, John Wiley and Sons, Ltd. 2004. 552 p.
2. Ю.Н. Казанцев. Методы и средства измерения электродинамических характеристик радиопоглощающих и радиопрозрачных материалов. // Proceedings of XIVth International Conference on Gyromagnetic Electronics and Electrodynamics. Moscow (Firsanovka), Russia. 1998. N. 13-1. V.2. P. 205-227.

3. Agilent, Basics of measuring the dielectric properties of materials, Application note, Agilent Technologies Inc., USA. April 2. 2005. P. 25.
4. В. Н. Аплеталин, Ю. Н. Казанцев, А.Н. Козырьков, В. С. Солосин. Измерение электромагнитных характеристик материалов резонаторным методом с помощью векторного анализатора цепей. //Электромагнитные волны и электронные системы. 2009. Т.14. №11. С. 39-43.

Ссылка на статью:

О. А. Дьяконова, Ю. Н. Казанцев, Д. С. Каленов. Измерительный комплекс для определения электромагнитных характеристик материалов резонаторным методом с помощью скалярных анализаторов цепей. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. №7. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jul17/7/text.pdf>