

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.1.2>

УДК: 621.371.399

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КРИВОЛИНЕЙНЫХ ОБРАЗЦОВ МАТЕРИАЛОВ

**Н.Х. Гюльмагомедов, Д.А. Евсеев*, И.А. Громов,
Е.Л. Михеенко, А.А. Мещеряков, С.А. Сливко**

**Военно-промышленная корпорация «НПО машиностроения»
143966, г. Реутов, ул. Гагарина, д. 33**

Статья поступила в редакцию 09 февраля 2022 г.

Аннотация. В статье описан способ проведения измерений диэлектрических характеристик (ϵ , $tg \delta$) криволинейных образцов диэлектрического материала. Проведены экспериментальные исследования, подтверждающие потенциальную возможность осуществления измерений диэлектрических характеристик криволинейных образцов материала, с использованием объемного резонатора. Измерения проведены на криволинейных образцах (радиус кривизны $R = 100...200$ мм) следующих материалов: фторопласт и органическое стекло. Произведена оценка погрешности измерений. Предложенный способ проведения измерений диэлектрических характеристик криволинейных образцов диэлектрического материала может быть использован для оценки стабильности распределения диэлектрических характеристик по поверхности изготовленной конструкционной детали радиотехнического назначения (к примеру, радиопрозрачный обтекатель) в рамках проведения разрушающего контроля.

Ключевые слова: криволинейный образец, резонансный метод, диэлектрические характеристики, разрушающий контроль, радиотехническая деталь.

Abstract. The method of measuring the dielectric characteristics (ε , $tg \delta$) of curvilinear samples of a dielectric material using volume adjustable resonator is proposed in that paper. Experimental researches were carried out by using resonant cavity, which proof the reception of practical data about the dielectric characteristics of curvilinear material samples. Measurements were carried out on curvilinear samples (radius of curvature $R = 100...200$ mm) of following materials: fluoropolymer and perspex. Theoretical inaccuracy of measurements was estimated. The introduced method of measuring the dielectric characteristics of curvilinear samples of a dielectric material can be used for estimating of stability of the distribution of dielectric characteristics over surface of a manufactured structural component for radio-frequency engineering purpose (for example, radio transparent radome) as part of the destructive testing.

Key words: curvilinear sample, resonance method, dielectric characteristics, destructive testing, radio-frequency component.

Автор для переписки: Евсеев Дмитрий Алексеевич, 940@vpk.npomash.ru

Введение.

Конструкция современных летательных аппаратов (ЛА) содержит различные радиопрозрачные элементы, обеспечивающие нормальную работу бортовых систем. Проектирование элементов радиопрозрачного обтекателя (РПО) включает в себя решение вопросов электродинамического, аэродинамического и технологического характера.

РПО должен оказывать минимальное влияние на характеристики установленной внутри него антенной системы. Антенна-обтекатель является сложной электродинамической системой, поэтому при проектировании очень важно проводить предварительную оценку диэлектрических характеристик РПО для определения степени влияния на комплексные параметры антенной системы.

Одной из важнейших задач, решаемых при проектировании РПО ЛА, является выбор материалов. Связано это с рядом предъявляемых противоречивых требований к конструкционным материалам таких как:

- минимальная масса, которая так же должна обеспечивать достаточную надежность и прочность при действии тепловых и аэродинамических нагрузок;
- высокая радиопрозрачность, определяющая степень допустимых величин ослабления мощности и искажений радиоволн заданного спектра частот.

Радиопрозрачность конструкционных диэлектрических материалов в первую очередь зависит от диэлектрических характеристик материала (относительная диэлектрическая проницаемость ϵ и тангенс угла диэлектрических потерь $\tan \delta$), а также от формы РПО.

Контроль радиотехнических характеристик материалов проводится на всех этапах создания РПО. Важно, чтобы материалы имели высокую стабильность диэлектрических параметров и радиотехнических характеристик [1].

Существует несколько методов измерения диэлектрических параметров материалов радиопрозрачных обтекателей:

- резонансные методы;
- волноводные методы;
- оптические методы;
- метод свободного пространства и др.

Из перечисленных методов резонансные методы измерения диэлектрических параметров материалов находят все более широкое применение в самых различных диапазонах, обеспечивая сравнительно высокую точность получаемых результатов. Основная идея резонансных методов измерений изложена в [1-2]. ГОСТ Р 8.623-2015 «Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь твердых диэлектриков. Методики измерений в диапазоне сверхвысоких частот» (ГОСТ Р 8.623-2015) устанавливает проведение измерений образцов, имеющих форму плоских дисков и пластин диаметром D , толщиной t , $D > t$.

Однако плоские элементы конструкций РПО в современных ЛА используются крайне редко. В подавляющем большинстве конструкция РПО имеет обтекаемую форму с разной степенью кривизны. Кроме того, такие новые технологии, как формирование геометрии детали в пресс-форме с дальнейшей механической и термической обработкой, а также применение слоистых пластиков, не позволяют создавать изотропную структуру РПО. Поэтому диэлектрические параметры по поверхности (образующей) детали могут отличаться от полученных при исследовании плоских образцов [4]. Для получения более достоверных данных существует необходимость проведения измерений диэлектрических параметров образцов материалов, форма которых будет соответствовать реальной радиопрозрачной конструкции.

В статье описаны результаты, показывающие возможность экспериментальных исследований по возможности применения резонансных методов измерения диэлектрических параметров образцов криволинейной формы.

1. Измерение диэлектрических параметров криволинейных образцов.

Определение диэлектрической проницаемости ϵ и тангенса угла диэлектрических потерь $tg \delta$ сводится к решению уравнений электромагнитного поля для той или иной конфигурации резонатора и учету влияния на это поле исследуемого образца диэлектрика, установленного в резонаторе.

Измеряемыми величинами являются резонансная частота f_0 и добротность Q_0 пустого резонатора, частота колебаний f_l и добротность Q_l резонатора при введенном образце. Задачей теории того или иного резонансного метода является установление связи между указанными величинами при внесении в резонатор исследуемого образца диэлектрика [5].

2. Подготовка измерительного оборудования.

В экспериментальных исследованиях по возможности применения резонансных методов измерения диэлектрических параметров образцов

криволинейной формы использован объемный перестраиваемый резонатор ОБР № 02-2013. Общий вид объемного резонатора ОБР № 02-2013 представлен на рисунке 1. Он предназначен для работы в составе измерительной установки для измерений относительной диэлектрической проницаемости ϵ и тангенса угла диэлектрических потерь твердых диэлектриков $tg \delta$ в диапазоне частот 8-12 ГГц методом при фиксированной резонансной длине и методом при фиксированной резонансной частоте в соответствии с ГОСТ Р 8.623-2015.

В резонаторе возбуждается колебание типа H_{01p} , где $p = 3, 4, 5, 6$ в диапазоне частот 8-12 ГГц. Параметры объемного перестраиваемого резонатора ОБР № 02-2013 – спектр резонансных частот, собственные добротности, геометрические размеры – длина L_0 и диаметр D , определенные по спектру резонансных частот, приведены в таблице 1. Длина резонатора соответствует резонансной частоте 9,365 ГГц на типе колебаний H_{014} . Погрешность определения геометрических размеров резонатора по спектру частот составляет 0,002 мм.



Передняя панель



Задняя панель

Рис. 1. Общий вид объемного резонатора ОБР № 02-2013

Существенным достоинством резонатора, работающего на колебаниях типа H_{01p} , является возможность его перестройки при помощи подвижного поршня [5]. Возможность использования поршня в резонаторах этого типа связана с тем обстоятельством, что в данном случае отсутствуют токи, текущие с торцевых поверхностей резонатора и, следовательно, дефекты трущегося контакта поршня не будут сказываться на добротности резонатора.

Использование перестраиваемого резонатора дает возможность применять генератор, работающий на фиксированной частоте, что, в свою очередь, обеспечивает возможность частотной стабилизации генератора, и, следовательно, получение более высокой точности измерений [6-8].

Структурная схема проведения измерений диэлектрической проницаемости ϵ и тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$ образцов диэлектриков с использованием объемного перестраиваемого резонатора ОБР № 02-2013 представлена на рисунке 2.

Таблица 1. Параметры объемного перестраиваемого резонатора ОБР № 02-2013

Тип колебаний	Ослабление, вносимое резонатором, дБ	Резонансная частота, ГГц	Собственная добротность, не менее	Средние значения геометрических размеров резонатора
H_{012}	30	7,8473	30000	$D = 50,270 \text{ мм}$ $L_0 = 101,670 \text{ мм}$
H_{013}	30	8,5126	35000	
H_{014}	30	9,3650	40000	
H_{015}	30	10,3584	45000	
H_{016}	30	11,4562	50000	
H_{017}	30	12.6311	55000	

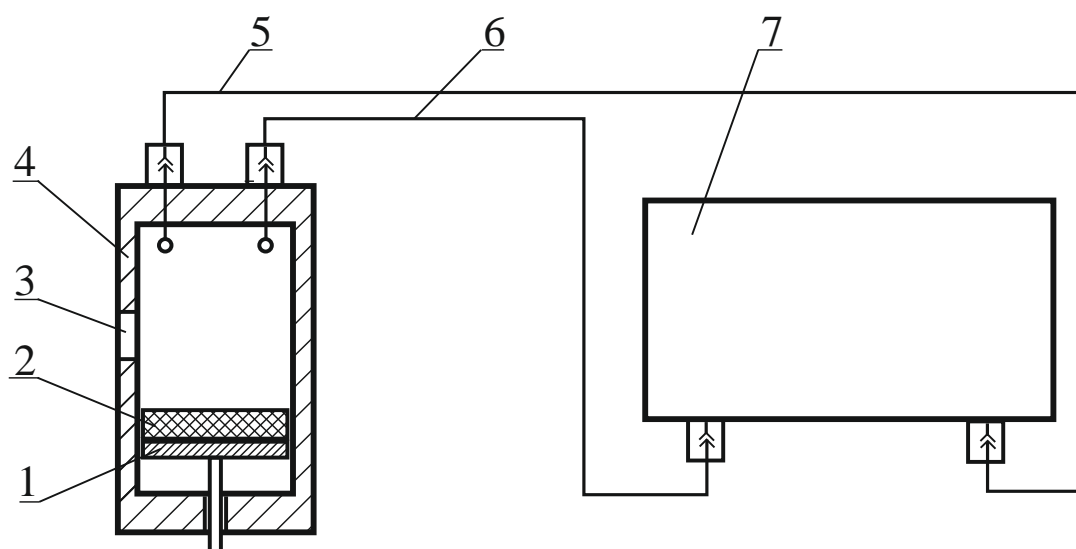


Рис. 2. Структурная схема стенда для измерения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь (1 – подвижный поршень, 2 – исследуемый материал, 3 – загрузочное окно, 4 – камера, 5,6 – фазостабильные кабели, 7 – векторный анализатор цепей)

3. Подготовка образцов для проведения исследований.

Для проведения экспериментальных исследований по определению диэлектрических параметров криволинейных образцов были изготовлены:

- плоский образец толщиной $(10,0 \pm 0,2)$ мм из материала фторопласт Ф-4 ТУ 6-05-810-88 в количестве 1 шт.;
- криволинейный образец из материала фторопласт Ф-4 ТУ 6-05-810-88 в количестве 6 шт.;
- плоский образец толщиной $(10,0 \pm 0,2)$ мм из материала стекло органическое листовое ТОСП 10 ГОСТ 17622-72 (бесцветное прозрачное) в количестве 1 шт.;
- криволинейный образец из материала стекло органическое листовое ТОСП 10 бесцветное прозрачное ГОСТ 17622-72 в количестве 6 шт.

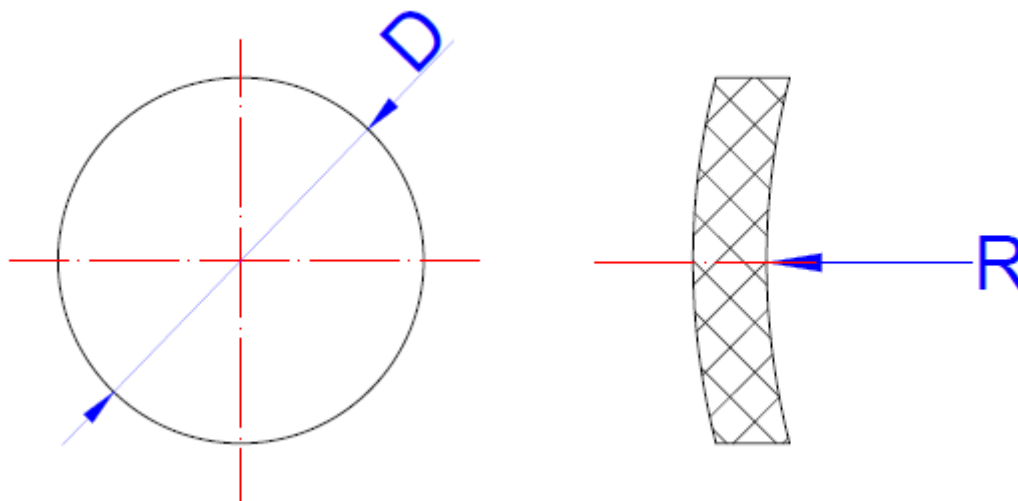


Рис. 3. Общий вид криволинейных образцов

Общий вид криволинейных образцов представлен на рисунке 3. Все образцы имеют диаметр $\varnothing(49.7 \pm 0.2)$ мм. Радиус кривизны криволинейных образцов R из материала Ф-4 и ТОСП 10 увеличивается с ростом порядкового номера образца. Радиус кривизны образцов меняется по линейному закону с 200 мм до 100 мм. Внешний и внутренний радиусы кривизны совпадают. Образец № 6 своей формой наиболее приближен к плоскому образцу и имеет радиус кривизны 200 мм. Образец № 1 имеет наиболее криволинейную поверхность – радиус кривизны 100 мм.

4. Расчет аппаратной погрешности измерения диэлектрических характеристик при использовании объемного резонатора.

В соответствии с технической документацией на объемный перестраиваемый резонатор ОБР № 02-2013 ошибка измерения диэлектрической проницаемости при использовании объемного резонатора для измеряемых значений диэлектрической проницаемости ϵ от 1,2 до 10 составляет $\pm 0,5\%$.

Ошибка измерения тангенса угла диэлектрических потерь $tg \delta$ рассчитывается по формуле:

$$\pm (5 + 3 \times 10^{-3} / tg \delta) \%,$$

где $tg \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь измеряемого объекта.

Для материала с тангенсом угла диэлектрических потерь $tg \delta = 0,01$ ошибка измерения составляет 5,5%. При уменьшении потерь в материале ошибка измерения растет:

- при $tg \delta = 0,0025$ ошибка измерения составляет 6,2%;
- при $tg \delta = 0,0005$ ошибка измерения составляет 11,0%;
- при $tg \delta = 0,0002$ ошибка измерения составляет 20%.

5. Методология проведения измерений криволинейных образцов диэлектрического материала.

Для повышения достоверности полученных результатов измерение диэлектрических параметров проведено двумя методами в соответствии с ГОСТ Р 8.623-2015:

а) Метод объемного резонатора при фиксированной резонансной частоте (п. 7 ГОСТ Р 8.623-2015).

б) Метод объемного резонатора при фиксированной резонансной длине (п. 8 ГОСТ Р 8.623-2015).

Измерение криволинейного диэлектрического образца осуществляется следующим образом: криволинейный образец помещается на подвижный поршень объемного резонатора «выпуклой» частью вверх. После чего проводится измерение диэлектрических характеристик методами а) и б). Далее осуществляется поворот криволинейного образца на 90° относительно оси и повторно проводятся измерения методами а) и б).

По завершении измерений образец материала следует извлечь из объемного резонатора повернуть и разместить в резонаторе «выпуклой» частью вниз. Измерения повторить методами а) и б) с поворотом образца вокруг оси на 90° .

Полученные в результате измерений криволинейного образца данные усредняются и сравниваются с измерением плоского образца, изготовленного из того же материала (образец-свидетель). По результатам сравнения определяются погрешности определения ϵ и $tg \delta$ при разных радиусах кривизны образцов.

Различные положения криволинейного образца в объемном резонаторе имитируют падение электромагнитной волны на образец под разными углами. Это позволяет за счет последующего статистического усреднения свести погрешности измерения, вызванные геометрией образца, к минимуму. Допускается увеличение числа измерений за счет уменьшения угла поворота образца вокруг оси.

Следует обратить внимание, что при проведении измерений криволинейных образцов, вырезанных из детали радиотехнического назначения заданной геометрии, каждый из них должен проходить испытания совместно с образцом-свидетелем, изготовленным из «эталонных» материалов с тем же радиусом кривизны. В качестве «эталонных» материалов рекомендуется использовать изотропные по структуре материалы, которые легко поддаются точной механической обработке (оргстекло или фторопласт) [9].

6. Результаты измерений.

Для получения достоверных результатов измерения диэлектрической проницаемости ε и тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$ каждого из предоставленных диэлектрических образцов проводилось 4 раза для каждого метода измерения.

Измерения проведены на резонансной частоте 9,365 ГГц на типе колебаний H_{014} двумя методами:

- метод объемного резонатора при фиксированной резонансной частоте;
- метод объемного резонатора при фиксированной резонансной длине.

По результатам измерений определено среднее значение диэлектрических параметров диэлектрического образца. В таблице 2 сведены результаты измерения диэлектрической проницаемости ε и тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$ образцов материала фторопласт Ф-4.

Таблица 2. Диэлектрические параметры образцов материала фторопласт Ф-4

Материал	№ образца		Измеренные значения диэлектрических параметров	
			ε	$tg \delta$
Образцы из материала фторопласт Ф-4 ТУ 6-05-810-88 зав. №1901	Плоский образец		2,04	0,0002
	Криволинейные образцы	1	2,14	0,001
		2	2,08	0,0003
		3	2,07	0,0005
		4	2,12	0,0003
		5	2,13	0,00025
		6	2,16	0,0006
		Ср. значение	2.11	0.0005

В таблицу 3 сведены результаты измерения диэлектрической проницаемости ε и тангенс угла диэлектрических потерь $tg \delta$ образцов материала стекло органическое листовое ТОСП 10.

Таблица 3. Диэлектрические параметры образцов материала стекло органическое ТОСП 10

Материал	№ образца		Измеренные значения диэлектрических параметров	
			ε	$tg \delta$
Образцы из материала: стекло органическое листовое ТОСП 10 ГОСТ 17622-72 зав. № 1901	Плоский образец		2,63	0,0057
	Криволинейные образцы	1	2,55	0,0051
		2	2,62	0,02
		3	2,61	0,008
		4	2,67	0,0087
		5	2,67	0,01
		6	2,61	0,0057
		Ср. значение	2,62	0,0095

7. Выводы.

Проведены экспериментальные исследования по возможности применения резонансных методов измерения диэлектрических параметров образцов криволинейной формы с использованием объемного перестраиваемого

резонатора ОБР № 02-2013. Анализ полученных результатов показал, что значение диэлектрической проницаемости ε криволинейного образца материала фторопласт Ф-4 отличается от плоского на 3,7%. Тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$ криволинейного образца материала фторопласт Ф-4 отличается от плоского на 59%.

Для образцов материала стекло органическое листовое ТОСП 10 отличие составляет: по диэлектрической проницаемости ε – 3,1%; по тангенсу угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$ – 40%.

Закономерностей изменения диэлектрических параметров от величины радиуса кривизны не выявлено.

Полученные значения погрешности измерения диэлектрической проницаемости ε на всех исследованных криволинейных образцах не превышают 5%.

Полученные значения погрешности измерения тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$ криволинейных образцов превышают величину погрешности измерения: при $\operatorname{tg} \delta = 0,0025$ ошибка измерения составляет 6,2%, а на криволинейных образцах фторопласта Ф-4 и стекла органического ТОСП 10 получено 59% и 40% соответственно.

Заключение.

Проведены экспериментальные исследования по возможности применения резонансных методов для измерения диэлектрических параметров образцов криволинейной формы. Методология измерения криволинейных образцов материалов с использованием резонансных методов пригодна только для измерения диэлектрической проницаемости. Измерение тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$ криволинейных образцов не рекомендуется проводить с использованием резонансных методов, т.к. величина погрешности превышает величину погрешности измерения плоских образцов.

Автор для переписки: Евсеев Дмитрий Алексеевич, 940@vpk.npomash.ru

Литература

1. Егоров В.Н., Токарева Е.Ю.. Повышение точности измерений резонансных характеристик. *Измерительная техника*. 2017. №7. С.20-25.
<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2017-7-20-25>
2. Гуртовник И.Г., Соколов В.И., Трофимов Н.Н. и др. *Радиопрозрачные изделия из стеклопластиков*. Москва, Мир. 2003. 368 с.
3. Крылов В.П., Никишов С.С., Ромашин В.Г., Егоров В.Н., Вторушин Б.А. Определение диэлектрической проницаемости криволинейных оболочек при одностороннем доступе. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2009. Т.75. №3. С.33-38.
4. Егоров В.Н., Костромин В.В., Романов Б.С. Метод объемного цилиндрического резонатора H_{01p} для исследования диэлектриков на СВЧ. *Кабель-News*. 2010. №6. С.90-95.
5. Черепанов В.И. Резонансные методы исследования вещества. *Соросовский образовательный журнал*. 1997. №9. С.86-90.
6. Лебедев И.В. *Техника и приборы СВЧ*. Москва, Высшая школа. 1972. 816 с.
7. Анищук В.В. Простой способ измерения диэлектрической проницаемости материалов в СВЧ диапазоне. *Радиотехника*. 1989. №9. С.99-102.
8. Казарновский Д.М., Яманов С.А. *Радиотехнические материалы*. Москва, Высшая школа. 1972. 312 с.

Для цитирования:

Гюльмагомедов Н.Х., Евсеев Д.А., Громов И.А., Михеенко Е.Л., Мещеряков А.А., Сливко С.А. Экспериментальное исследование диэлектрических характеристик криволинейных образцов материалов. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2022. №1.
<https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.1.2>