Оригинальная статья / Original Paper

DOI 10.15826/urej.2022.6.1.003

УДК 621.372

Модифицированная методика измерения электрофизических параметров диэлектрических шайб соединителей методом четвертьволнового резонатора

А.В. Коренев^{1, 2} , Г.Г. Гошин¹

¹ Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40

² Иркутский релейный завод, Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Байкальская, 239

korenev_av@irzirk.ru

Аннотация

В статье приведены результаты работы по модификации соединителя СРГ-50-посредством замены материала опорной шайбы, которая выполнена с целью расширения рабочего температурного диапазона соединителя и улучшения его согласования. Для контроля параметров модифицированных шайб использовался адаптированный к задаче метод коаксиального четвертьволнового резонатора. Изменение метода позволило повысить точность измерения эффективной диэлектрической проницаемости шайб и проводить измерения шайб разной длины. В статье приводится усовершенствованная методика измерения тангенса угла диэлектрических потерь шайб.

Ключевые слова

коаксиальный соединитель, диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь, четвертьволновый коаксиальный резонатор

Для цитирования

Коренев А.В., Гошин Г.Г. Модифицированная методика измерения электрофизических параметров диэлектрических шайб соединителей методом четвертьволнового резонатора. *Ural Radio Engineering Journal*. 2022;6(1):67–81. DOI: 10.15826/urej.2022.6.1.003.

The modified quarter-wavelength resonator method for parameters control of the coaxial connector dielectric beads

A. V. Korenev^{1, 2} \bowtie , G. G. Goshin²

¹ Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40, prospect Lenin, 634050, Tomsk, Russia

² JSC "Irkutskiy Releyniy Zavod" 239, Bajkalskaya Str., 664074, Irkutsk, Russia korenev_av@irzirk.ru

Abstract

The paper describes the modification of the SRG-50-751 connector by means of the support bead material change. The modification is made in order to extend the operating temperature range of the connector,

© Коренев А.В., Гошин Г.Г., 2022

and may also reduce the VSWR of the connector. The modified coaxial quarter-wavelength resonator method is used for bead parameter control. The modification of the method increases the dielectric constant measurement accuracy and enables to measure specimens with different lengths. The method of dielectric loss tangent measurement of the beads is outlined in the article.

Keywords

coaxial connector, dielectric constant, dielectric loss tangent, quarter-wavelength resonator $% \left({\left({{{\left({{{\left({{\left({{\left({{{\left({{{}}}} \right)}}} \right.}$

For citation

Korenev A.V., Goshin G.G. The modified quarter-wavelength resonator method for parameters control of the coaxial connector dielectric beads. *Ural Radio Engineering Journal*. 2022;6(1):67–81. (In Russ.) DOI: 10.15826/urej.2022.6.1.003.

Введение

В конструкциях СВЧ-устройств различного назначения, особенно в герметичном исполнении, часто применяется соединитель СРГ-50-751 (рис. 1). Аналоги этого соединителя выпускаются различными предприятиями и обычно отличаются материалом покрытия.



Рис. 1. Внешний вид соединителя СРГ-50-751 **Fig. 1.** The outlook of the SRG-50-751 connector

Верхняя рабочая частота соединителя ограничена размерами металлостеклянного спая и равняется 18 ГГц. При этом некоторые образцы работоспособны до частот чуть более 20 ГГц, что объясняется малой длиной промежутка линии передачи заполненной стеклом и малым эксцентриситетом центрального проводника металлостеклянного спая.

Со стороны интерфейса типа IX вар. 1 (ГОСТ РВ 51914-2002) в качестве изолятора используется опорная шайба из материала Фторопласт-4 (Ф-4). В данной работе была проведена модификация соединителя путем замены материала опорной шайбы, что позволяет ему работать в условиях более высокой температуры окружающей среды.

Необходимость в модификации соединителя обусловлена тем, что в необходимом температурном диапазоне Ф-4 теряет свои механические свойства (табл. 1), что не позволяет зафиксировать изолятор в такой конструкции соединителя.

Таблица 1. Параметры используемых и перспективных материалов **Table 1.** The parameters of the used and the perspective materials

Материал	3	tgδ	T _{пл} , °C	σ _p , Мпа, 23°С	σ _p , MΠa, 200°C
Φ-4	2,06	2×10^{-4}	327	29	2 [3]
ПЭЭК	3,2	$3,1 imes 10^{-3}$	340	80	20 [3]
ПИ	3,23	$1,8 \times 10^{-3}$	>400	85	50 [3]

В качестве замены Ф-4 рассматривались два материала – полиимид (ПИ) и полиэфирэфиркетон (ПЭЭК), так как они обладают более высокой температурой плавления и в целом лучше выдерживают воздействия высоких температур окружающей среды.

Измеренные в [1] величины относительной диэлектрической проницаемости ПИ и ПЭЭК отличаются от Φ -4 в бо́льшую сторону (табл. 1), поэтому в шайбах из ПИ и ПЭЭК необходимо выполнить отверстия, что уменьшит их эффективную диэлектрическую проницаемость (ε).

Создание дополнительных отверстий в шайбе приводит к необходимости их контроля. Контроль шайб геометрическими методами существенно удорожает соединитель и создает вероятность отбраковки потенциально годных изделий, а измерение электрических параметров готовых соединителей проводится только на последнем этапе технологического процесса. В данной работе использовался резонаторный метод контроля эффективной диэлектрической проницаемости шайб [1].

Теория

В [1] была предложена методика измерения эффективной диэлектрической проницаемости опорных шайб соединителей. В данной работе эта методика была взята за основу, однако она должна быть дополнена для случая, когда длина шайбы отличается от длины центрального штыря резонатора так как такая ситуация обычно возникает из-за ненулевого производственного допуска на длину шайбы и наличия шайб разных исполнений, отличающихся длиной.

В данной работе методика измерения [1] развита на случай, когда длина опорной шайбы менее длины центрального штыря резонатора. Это соответствует неполному заполнению резонатора диэлектрической шайбой. На плоскости раздела «диэлектрик – воздух» должны выполняться граничные условия: равенство радиальных электрических компонент и равенство азимутальных магнитных компонент поля ТЕМ волны. Это также соответствует равенству сопротивлений, которые получаются трансформацией нулевого сопротивления токопроводящей стенки с одной стороны и бесконечного сопротивления открытого конца коаксиальной линии (рис. 2) – с другой.



Рис. 2. Схема четвертьволнового резонатора, с неполным заполнением **Fig.** 2. The diagram of the non-fully filled quarter-wavelength resonator

Данный подход имеет строгое математическое обоснование, вытекающее из граничных условий на плоскости раздела двух диэлектриков [2].

Входное сопротивление линии без потерь *Z* на расстоянии *l* от нагрузки может быть найдено по формуле:

$$Z = Z_0 \frac{Z_l + jZ_0 tg\left(\frac{2\pi}{\lambda}l\right)}{Z_0 + jZ_l tg\left(\frac{2\pi}{\lambda}l\right)},$$
(1)

где Z_0 – волновое сопротивление линии передачи, Z_l – сопротивление нагрузки, λ – длина волны сигнала.

Для случая, когда измеряемая диэлектрическая шайба находится вплотную к возбудителю сопротивление на границе раздела, будет:

$$Z_{\rm K3} = j Z_{0\rm K3} t g \left(\frac{2\pi}{\lambda}l\right) = j Z_{0\rm K3} t g \left(\frac{2\pi f_0 \sqrt{\epsilon}}{c}\right). \tag{2}$$

Оно же может быть найдено через отрезок заполненный воздухом:

$$Z_{xx} = -jZ_{0xx}ctg\left(\frac{2\pi}{\lambda}l\right) = -jZ_{0xx}ctg\left(\frac{2\pi f_0\sqrt{\varepsilon}}{c}\right),\tag{3}$$

Ural Radio Engineering Journal. 2022;6(1):67-81

где Z_{0xx} и $Z_{0\kappa_3}$ – волновые сопротивления линий со стороны короткозамкнутой стенки (КЗ) и открытого конца резонатора (XX), f_0 – резонансная частота, ε — эффективная диэлектрическая проницаемость материала заполняющего отрезок.

При этом для резонатора с частичным заполнением диэлектриком, в случае, когда диэлектрик находится со стороны КЗ, между Z_{0xx} и Z_{0x3} будет выполняться соотношение:

$$Z_{0\kappa_3} = \frac{Z_{0xx}}{\sqrt{\varepsilon}}.$$
(4)

Таким образом, для нахождения эффективной диэлектрической проницаемости необходимо приравнять (2) и (3), взяв одно из них со знаком минус, и решить получившееся трансцендентное уравнение относительно ε .

Влияние просачивания поля в круглый волновод *l*_п в [1] было аппроксимировано формулой:

$$l_{\rm m} = \frac{l_{\rm m_0}}{\sqrt{\epsilon}}.$$
 (5)

Данная аппроксимация была сделана для резонатора, в котором длина центрального проводника совпадает с длиной диэлектрика. В ином случае величина є становится некоторой «эффективной».

Одним из подходов к решению этой проблемы может быть нахождение некоего «эффективного» среднего значения диэлектрической проницаемости резонатора с частичным заполнением. Для этого были найдены резонансные частоты четвертьволнового резонатора длиной 5,5 мм без возбудителя и без учета проникновения поля в круглый закритический волновод. Длина диэлектрика варьировалась от 5,5 до 0 мм. Относительная диэлектрическая проницаемость была выбрана равной проницаемости Φ -4 (табл. 1). Расчет проводился по формулам (2) и (3).

Затем по найденным резонансным частотам была вычислена диэлектрическая проницаемость ε_{cp} резонаторов того же размера с полным заполнением. Полученные значения ε_{cp} использовались для расчета l_{n} по формуле (5). Вычисление резонансной частоты резонатора с учетом l_{n} проводилось по формуле (6) из [1]:

$$f_0 = \frac{1}{4} \cdot \frac{c}{l_p \sqrt{\varepsilon_{cp}} + \frac{l_{\pi_0}}{\sqrt{\varepsilon_{cp}}}},\tag{6}$$

где $l_{\rm p}$ – длина центрального проводника резонатора, $l_{\rm n_0}$ – величина проникания поля в круглый волновод, полученная

численным моделированием пустого резонатора методом конечных элементов (МКЭ) [1].

При моделировании в этом и других случаях использовалась тетраэдрная сетка на ~300000 элементов с неравномерной гранулярностью. Погрешность вычислений составила не более $1 \cdot 10^{-6}$.

Полученный график зависимости резонансной частоты (относительно величины полученной моделированием резонатора без возбудителя при помощи МКЭ) от величины рецессии диэлектрика (l_2 , рис. 2) изображен оранжевой линией на рис. 3.



Рис. 3. Зависимость ошибки расчета резонансной частоты при разных методах аппроксимации. Оранжевая линия – *l*_п аппроксимирована через ε_{ср}, синяя линия – использован отрезок воздушной линии длиной *l*_{п0}

Fig. 3. The dependence of the resonant frequency calculation upon different approximation methods. The orange line $-l_{\pi}$ is approximated based on the average ε_{cp} value, the blue line $-l_{\pi_0}$ is taken as an air-filled line

В данной работе был использован способ аппроксимации, который заключается в расчете резонансной частоты по формулам (2) и (3) с использованием l_{n_0} в качестве отрезка резонатора с воздушным заполнением. В качестве волнового сопротивления этого отрезка предлагается использовать волновое сопротивление коаксиальной линии с диаметрами центрального и наружного проводников как у проводников резонатора и є-воздуха. Рассчитанная таким образом зависимость отклонения резонансной частоты от l_2 изображена на рис. З синей линией.

Как видно на графиках на рис. 3, на краях диапазона, где резонатор можно считать заполненным либо образцом диэлектрика, либо воздухом, точность обоих методов расчета практи-

Ural Radio Engineering Journal. 2022;6(1):67-81

чески одинакова. Однако второй метод гораздо лучше себя показывает в середине диапазона. При этом из синего графика видно, что точность аппроксимации резко падает при величине l_2 менее ~0,3 мм, следовательно, при изготовлении резонатора его длина должна быть больше чем длина шайбы.

Для проверки точности определения ε -образца был проведен ее расчет усовершенствованным способом на основании резонансной частоты резонатора без возбудителя, с разным значением l_2 . Значения резонансных частот были получены при помощи МКЭ. Результат представлен на графике (рис. 4).





Полученный график в целом повторяет зависимость из рис. 3. Заметно, что погрешность расчета є-образца падает с уменьшением толщины шайбы, что объясняется распределением электрической компоненты поля в резонаторе, минимум которой находится со стороны КЗ.

Таким образом, на основании полученных данных можно сделать следующие выводы:

1. При длине шайбы сопоставимой с длиной резонатора ее следует располагать вплотную к токопроводящей стенке. Длина шайбы должна быть меньше длины резонатора, что увеличит точность аппроксимации.

2. Короткие шайбы необходимо располагать со стороны XX. Таким образом может быть достигнута максимальная чувствительность и лучшая точность, несмотря на погрешность аппроксимации. Резонатор в этом случае будет состоять из трех отрезков с разной диэлектрической проницаемостью.

Учет влияния возбудителя, $l_{\rm B}$, проводился согласно соответствующей аппроксимации из [1] со значением ε , равным ε -образца т. к. образец устанавливался вплотную к возбудителю (КЗ стенке), а его влияние приводит к уменьшению эффективной длины резонатора.

Практическую значимость представляет измерение эффективного $tg\delta$ -образцов. К сожалению, построение четвертьволнового коаксиального резонатора с добротностью (*Q*) более нескольких сотен на практике очень сложно из-за высоких потерь в центральном проводнике резонатора, поэтому это необходимо учитывать при расчете $tg\delta$ -образца.

В рамках данной работы расчет эффективного tgδ-образца проводился по формуле (7) из [4]:

$$tg\delta = \frac{1}{K_{1E}} \cdot \left(\frac{1}{Q_{0\varepsilon}} - \frac{1}{Q_{\sigma\varepsilon}}\right).$$
⁽⁷⁾

где $Q_{0\varepsilon}$ — собственная добротность резонатора с образцом $Q\sigma_{\varepsilon}$ — собственная добротность резонатора с образцом без потерь, tg δ — эффективное значение тангенса угла диэлектрических потерь образца, $K_{1\rm E}$ — коэффициент заполнения резонатора по электрическому полю.

Необходимость в использовании $Q_{\sigma\varepsilon}$ вытекает из того факта, что в резонаторах с образцом и без образца будет разное распределение токов, а следовательно, и разная собственная добротность [4]. С другой стороны, получение образца материала с той же ε , но без потерь, часто невозможно.

Так как коаксиальный резонатор представляет собой отрезок коаксиальной линии, то можно предположить, что в нем будет наблюдаться такая же зависимость потерь от частоты – пропорциональная \sqrt{f} . В таком случае $Q_{\sigma\varepsilon}$ можно рассчитать по формуле:

$$Q_{\sigma\varepsilon} = \sqrt{\frac{f_0}{f_{0\varepsilon}}} \cdot Q_0, \qquad (8)$$

где f_0 и $f_{0\varepsilon}$ – резонансные частоты резонатора, соответственно, без образца и с образцом, Q_0 – собственная добротность резонатора без образца.

Данное предположение не учитывает частотную зависимость $l_{\rm n}$ и разницу в потерях на этом участке и в остальном резонаторе.

 K_{1E} может быть найден путем моделирования резонатора МКЭ и нахождения изменения резонансной частоты при малом изменении ε -шайбы по формуле (9) из [5]:

$$K_{1E} = -2\frac{\varepsilon_1}{\omega}\frac{\partial\omega}{\partial\varepsilon_1} = -2\frac{\varepsilon}{f}\frac{\partial f}{\partial\varepsilon}.$$
(9)

Значения собственной добротности резонаторов рассчитывались по формуле:

$$Q_c = \left(\frac{Z}{W}\right) \cdot Q_{\mu}.$$
 (10)

где Z – сопротивление резонатора на резонансной частоте, W – волновое сопротивление измерительной системы, в которую включен резонатор, $Q_{\rm H}$ – измеренное значение нагруженной добротности резонатора по S_{11} .

Модификация конструкции соединителя

Для замены Ф-4 на более высокотемпературный пластик были изготовлены шайбы из ПЭЭК ввиду отсутствия ПИ отечественного производства в виде прутка. Одним из условий проводимой замены было сохранение всех остальных деталей серийного соединителя. Так как существующая конструкция (рис. 5) обеспечивает необходимые требования по величине КСВН, дополнительные работы, связанные с улучшением этого параметра, не требовались. Тем не менее расчет волнового сопротивления линии с шайбой показал, что при использовании серийных деталей для получения 50 Ом необходима $\varepsilon_{эф\phi} = 1,9$, что говорит о том, что КСВН соединителя может быть улучшен.

Так как є ПЭЭК имеет существенно большее значение (табл. 1) было необходимо уменьшить $\varepsilon_{a\phi\phi}$ до величины $\varepsilon = 1,9$ путем создания аксиально направленных отверстий, с центрами, расположенными симметрично относительно внешнего радиуса шайбы (рис. 6).



Рис. 5. Внутреннее устройство соединителя СРГ-50-751. Синим цветом обозначен изолятор из Ф-4, голубым – стекло С-52, желтым – корпус, оранжевым – центральный проводник металлостеклянного спая, зеленым – центральный проводник с двумя цангами

Fig. 5. The construction of the SRG-50-751 connector. The plastic bead is marked blue, the C-52 glass – light blue, body – yellow, central conductor of the glass-metal seal – orange, central conductor with two collets – green



Рис. 6. Размеры отверстий в шайбе из ПЭЭК полученные в результате расчета при помощи МКЭ

Fig. 6. The dimensions of the holes in the PEEK beads that were acquired through FEM analysis

В качестве целевой технологии изготовления шайб было выбрано точение из прутка на токарных автоматах. Исходя из этого форма выбранных отверстий была выбрана круглой. Количество отверстий, их диаметры и расположение выбиралось исходя из расчета ε_{pqp} при помощи МКЭ при максимальной ширине стенок между отверстиями.

Результаты измерений

Было изготовлено несколько соединителей с изолятором из ПЭЭК с контролем эффективной диэлектрической проницаемости их шайб методом четвертьволнового коаксиального резонатора по описанной методике (табл. 2).

Диаметры центрального и наружного проводников резонатора составляют, соответственно, 1,24 и 4,12 мм. Длина центрального проводника резонатора – 5,50 мм. Наружный диаметр шайб и отверстий – 4,1 и 1,28 мм. Точность измерения линейных размеров составила $\pm 0,01$ мм, диаметров – $\pm 0,02$ мм.

S-параметры соединителей с шайбами из ПЭЭК и Φ -4 (рис. 7) были измерены путем их включения в 3,5 мм измерительный тракт векторного анализатора цепей (ВАЦ) при помощи измерительной оснастки. Оснастка была соединена между портом 1 ВАЦ и соединителем со стороны металлостеклянного спая и представляет собой центральный проводник диаметром 1,52 мм с установленной опорной шайбой и цангой, надевающейся на вывод соединителя и втулку с отверстием 3,5 мм.

ISSN 2588-0454

Ural Radio Engineering Journal. 2022;6(1):67-81

Table 2. The measured parameters of the PEEK and the PTFE beads											
N⁰	<i>f</i> ₀ , ГГц	<i>Z</i> ₀ , Ом	<i>l</i> ₁ , мм	L_{π_0} , мм	$oldsymbol{Q}_{ extsf{H}}$	<mark>е_{эфф}</mark>	$K_{1\mathrm{E}}$	$tg\delta_{\partial\varphi\varphi}\times 10^4$			
Bosdyx											
0	12,257	23,25	—	0,68	331	1,00	_	_			
ПЭЭК											
1	10,024	39,98	5,06	0,68	304,55	1,79	0.763	19,1			
2	10,025	40,98	5,06	0,68	303,55	1,78	0.763	19,2			
3	10,022	37,53	5,06	0,68	301,74	1,79	0.763	17,5			
4	10,023	41,07	5,06	0,68	304,88	1,78	0.763	19,1			
Φ-4											
5	9,542	17,55	5,09	0,68	232,70	1,97	0.782	17,23			
6	9,663	61,22	5,09	0,68	178,94	1,96	0.782	8,90			
7	9,629	45,87	5,09	0,68	204,87	1,96	0.782	9,20			
8	9,580	38,33	5,09	0,68	209,62	1,98	0.782	11,25			

Таблица 2. Измеренные параметры шайб из ПЭЭК и Ф-4







Fig. 7. Parameters of the connectors with the PEEK and the PTFE beads: a - VSWR; σ - insertion loss. The PTFE connectors are drawn in the shades of orange, the PEEK ones - with the shades of blue

Для иллюстрации получения более низкого КСВН соединителей из ПЭЭК рис. 8 представлены рефлектограммы волнового сопротивления двух соединителей с разными шайбами. Данные диаграммы были получены из измеренных зависимостей S₂₂ от частоты при помощи дискретного преобразования Фурье со ступенчатой функцией с окном Ханнинга [6].



Fig. 8. Time domain diagram of the Z of connectors with a PEEK bead (blue) and a PTFE bead (orange)

Измерения параметров резонаторов и соединителей проводились на ВАЦ Keysight E5071C, калиброванном при помощи модуля автоматической калибровки N4691B. В тех случаях, когда для проведения измерений после калибровки подключались дополнительные переходы, их влияние исключалось из результатов измерений при помощи встроенной функции deembedding [7]. S-параметры адаптеров измерялись на этом же приборе с той же калибровкой. Опорная плоскость со стороны порта 1 ВАЦ находилась у измерительной оснастки, а со стороны порта 2 – у интерфейса SMA соединителя.

Обсуждение результатов

Результаты измерения ε_{ijp} шайб (табл. 2) по описанной методике получились стабильно меньше ожидаемых (1,9 для ПЭЭК и 2,06 для Ф-4). Одна из причин этого в том, что диаметр центрального проводника в резонаторе меньше чем в соединителе. Это было сделано намеренно – для облегчения установки шайб в резонатор (в соединитель шайбы прессуются). При расчете МКЭ волнового сопротивления линии с шайбой с $\varepsilon = 2,06$ и разницей в диаметре центрального проводника в 0,03мм дает $\varepsilon_{ijp} = 1,96$, что примерно соответствует наблюдаемому результату. Низкое значение $\varepsilon_{a\phi\phi}$ изолятора из ПЭЭК объясняется также дефектами при производстве. При изготовлении использовалось встречное сверление с перехватом заготовки из-за чего оси отверстий не совпадают и в середине шайбы возникают области с диаметром больше необходимого. В некоторых случаях возникали отверстия в стенках внутри шайбы. Другим дефектом была деформация материала при сверлении из-за перегрева сверла, что также приводило к увеличению диаметра отверстия.

Фаска на шайбе, если находится со стороны КЗ, на результат измерения не влияла. Результаты изменения были в пределах повторяемости установки.

В результатах измерения $tg\delta_{\partial\phi\phi}$ обращает внимание его зависимость от Z_0 , неправдоподобно большая величина $tg\delta$ -образца $N \le 5$ и большая разница в результате между ним и образцами $N \ge 6$, $N \ge 7$, $N \ge 8$, которые были изготовлены из материала одной партии. Причины получения такого результата установить пока не удалось. Тем не менее при таком методе расчета полученные данные возможно использовать для качественной оценки уровня потерь в шайбах, а также для оценки их изменения при различных внешних воздействиях.

Результаты измерения S-параметров соединителей (рис. 7) свидетельствуют о более низком уровне КСВН-соединителей с ПЭЭК. Это объясняется отсутствием в них емкостной неоднородности, вызванной пониженным волновым сопротивлением линии с опорной шайбой (рис. 8).

Уровень потерь соединителей с Φ -4 ниже из-за более низкого $tg\delta_{a\phi\phi}$, что в целом согласуется с результатами измерения параметров шайб. Разница находится в пределах 0,03 дБ ... 0,1 дБ на верхней границе рабочего диапазона.

Вывод

В результате проведенных работ была модифицирована методика измерения параметров шайб соединителей методом четвертьволнового резонатора. Модифицированная методика позволяет проводить измерения параметров шайб разной длины и повысить точность измерения ε-шайб. Данная методика является эффективной альтернативой другим методам, использующимся в производственном процессе для контроля качества выпускаемых изделий.

Соединитель, модифицированный с применением данной методики, обладает более низким КСВН и потенциально работоспособен при более высоких температурах окружающей среды. В дальнейшем планируется исследовать параметры шайб по описанной методике и электрические характеристики получившихся соединителей при воздействии высоких температур окружающей среды.

Ŕ

Список литературы

1. Коренев А.В., Гошин Г.Г. Учет паразитных эффектов при измерении эффективной диэлектрической проницаемости методом четвертьволнового резонатора. *Ural Radio Engineering Journal*. 2021;5(3):272–283. DOI: 10.15826/urej.2021.5.3.005.

2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. 8-е изд. М.: Высшая школа; 1986. 263 с.

3. McKeen L. W. The effect of temperature and other factors on plastics and elastomers. 2^{nd} ed. William Andrew; 2008. 824 p. Available at: http://dl.iran-mavad.com/pdf95/Effect% 20of% 20Temperature% 20 on% 20Plastics_iran-mavad.com.pdf

4. Егоров В.Н., Кащенко М.В. Измерение малых диэлектрических потерь в объемном резонаторе. Измерительная техника. 2002;(1):61-65.

5. Егоров В.Н. Резонансные методы исследования диэлектриков на СВЧ. Приборы и техника эксперимента. 2007;(2):5-38.

6. Southwest Microwave. Utilizing Time Domain Test Methods for Maximizing Microwave Board Performance. Available at: https:/ mpd.southwestmicrowave.com/wp-content/uploads/2018/07/Utilizing-Time-Domain-TDR-Test-Methods-For-Maximizing-Microwave-Board-Performance.pdf

7. Дансмор Д.П. Измерение параметров СВЧ-устройств с использованием передовых методик векторного анализа цепей. М.: Техносфера; 2018. 736 с.

References

1. Korenev A.V., Goshin G.G. Accounting of the parasitic effects during measurement of the effective permittivity using the quarterwavelength resonator method. *Ural Radio Engineering Journal*. 2021;5(3):272-283. (In Russ.) DOI: 10.15826/urej.2021.5.3.005.

2. Bessonov L.A. *Theoretical basics of electrotechnics. Electromagnetic field.* 8th ed. Moscow: Vysshaya shkola; 1986. 263 p. (In Russ.)

3. McKeen L. W. The effect of temperature and other factors on plastics and elastomers. 2nd ed. William Andrew; 2008. 824 p. Available at: http://dl.iran-mavad.com/pdf95/Effect% 20of% 20Temperature% 20 on% 20Plastics_iran-mavad.com.pdf

4. Egorov V.N., Kaschenko M.V. Measurements of small dielectric loss in a volume resonator. *Measurement Techniques*. 2002;(1):61-65. (In Russ.)

5. Egorov V.N. Resonance methods for microwave studies of dielectrics (review). *Instruments and Experimental Techniques*. 2007;50(2):143–175. DOI: 10.1134/S0020441207020017

6. Southwest Microwave. Utilizing Time Domain Test Methods for Maximizing Microwave Board Performance. Available at: https:/ mpd.southwestmicrowave.com/wp-content/uploads/2018/07/Utilizing-Time-Domain-TDR-Test-Methods-For-Maximizing-Microwave-Board-Performance.pdf Ural Radio Engineering Journal. 2022;6(1):67-81

7. Dunsmore J.P. Handbook of microwave measurements: with advanced VNA techniques. John Wiley & Sons; 2012. 611 p. Available at: http://kepstr.eltech.ru/tor/mt/Literatura/Joel% 20P% 20Dunsmore% 20 HANDBOOK.pdf

Информация об авторах

Коренев Андрей Викторович – аспирант, Томский университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Российская Федерация; инженер-электроник, АО «Иркутский релейный завод», Иркутск, Российская Федерация

Гошин Геннадий Георгиевич – доктор физико-математических наук, профессор, Томский университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Российская Федерация

Information about the authors

Andrey V. Korenev – Post Graduate Student, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia; Electronics Engineer, JSC "Irkutskiy Releyniy Zavod", Irkutsk, Russia.

Gennadiy G. Goshin – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia

Поступила / Received: 22.02.2022 Принята в печать / Accepted: 10.03.2022