

DOI: 10.32603/1993-8985-2018-21-5-33-38

УДК 621.3.083

А. Д. Григорьев

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)
ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия

НОВЫЙ ВОЛНОВОДНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Аннотация. Точное знание параметров диэлектрика необходимо при его применении в самых различных устройствах. Несмотря на наличие целого ряда известных методов измерения этих параметров, практическое их применение в микроволновом диапазоне частот наталкивается на ряд трудностей. В данной статье описан новый волноводный метод измерения диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь немагнитных диэлектриков в микроволновом диапазоне. Пластина диэлектрика помещается в короткозамкнутый отрезок волновода перпендикулярно его оси, заполняя все поперечное сечение на расстоянии примерно четверти длины волны от короткозамкнутого конца отрезка. С помощью векторного анализатора цепей измеряется коэффициент отражения от входа волновода. Для определения параметров диэлектрика по этим данным составлена программа вычисления и минимизации целевой функции, которая определяется как разность между вычисленными значениями модуля и фазы коэффициента отражения на входе волновода и измеренными значениями этого коэффициента. Минимизация этой функции при варьировании параметров диэлектрика позволяет определить указанные параметры. По сравнению с известными, представленный в настоящей статье метод не требует переноса плоскостей отсчета векторного анализатора цепей к поверхностям образца и менее чувствителен к шумовой составляющей измерительного сигнала. Это позволяет использовать при измерении некалиброванные коаксиально-волноводные переходы. По результатам тестирования метода погрешность измерения относительной диэлектрической проницаемости не превышает 0,2 %, а тангенса угла диэлектрических потерь – 1 %.

Ключевые слова: параметры диэлектриков, микроволны, волноводы, методы оптимизации

Для цитирования: Григорьев А. Д. Новый волноводный метод измерения параметров диэлектриков // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2018. № 5. С. 33–38. doi: 10.32603/1993-8985-2018-21-5-33-38

Andrey D. Grogoriev

Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"
5, Professor Popov Str., 197376, St. Petersburg, Russia

NEW WAVEGUIDE METHOD FOR DIELECTRIC PARAMETER MEASUREMENT

Abstract. Perfect knowledge of dielectric parameters is necessary for its application in various devices. In spite of the whole range of measurement techniques, their practical implementation in the microwave frequency band runs into some difficulties. This article describes a new method for nonmagnetic dielectrics permittivity and loss tangent measurement in the microwave frequency band. A dielectric specimen slab is placed in the short-circuited waveguide section normal to its axis and fills the whole cross-section of the waveguide at approximately quarter wavelength from its short-circuited endpoint. By means of the vector network analyzer the waveguide section reflection factor is measured. Objective function is determined as difference between calculated and measured module and phase of the reflection factor. Specific code for objective function calculation and its minimization is worked out. Minimization of this function by varying dielectric parameters makes it possible to find real values of these parameters. The method needs no de-embedding and can be used with non-calibrated waveguide-to-coax transitions. Also it is less sensitive to the noise component of reflected signal. The testing results show that new method's error does not exceed 0.2 % for relative permittivity and 1% for dielectric loss tangent.

Key words: dielectric parameters, microwaves, waveguides, optimization methods

For citation: Grogoriev A. D. New Waveguide Method for Dielectric Parameter Measurement. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2018, no. 5, pp. 33–38. doi: 10.32603/1993-8985-2018-21-5-33-38 (In Russian)

Введение. Измерение диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь в микроволновом диапазоне всегда составляло предмет внимания исследователей и разработчиков [1], [2]. Особое значение эти измерения приобрели в последнее время в связи с появлением и использованием в микроволновой технике новых материалов, таких как поглотители на основе карбида кремния, метаматериалы и т. п. Несмотря на наличие множества известных методов измерения, не все они подходят для решения данной конкретной проблемы. Так, резонаторные методы малопригодны для измерения в широком диапазоне частот, методы, использующие коаксиальную линию передачи, требуют использования образцов в виде дисков с отверстием, которые трудно изготовить из хрупких твердых материалов, методы, использующие открытые системы, часто не обеспечивают требуемую точность.

Волноводные методы наиболее подходят для измерений в широком диапазоне частот. В частности, известный метод Николсона, Росса и Вейра (NRW-method) [3], [4] широко применяется для измерения параметров как немагнитных, так и магнитных диэлектриков. Метод основан на измерении параметров матрицы рассеяния (S -матрицы) волновода, в который помещен образец исследуемого материала в виде пластины, заполняющей поперечное сечение волновода. При этом для расчета параметров образца используются элементы матрицы рассеяния, измеренные в передней и задней плоскостях пластины.

Так как измерения с помощью векторного анализатора цепей проводятся относительно его плоскостей отсчета, метод требует переноса плоскостей отсчета входного и выходного портов на поверхности образца. Для этого вычисляется групповая скорость $d\omega/d\beta$, где ω – угловая частота; β – постоянная фазы в волноводе. На основе этого метода, в частности, сконструирована измерительная установка и составлено программное обеспечение для обработки результатов измерений [5]. Однако в процессе эксплуатации установки выяснилось, что шум в измерительном сигнале цифрового анализатора цепей Rohde&Shwarz ZVL-13 [6] приводит к разным знакам полученных на разных частотах значений групповой скорости, что дает неверные результаты измерений. Попытки сгладить измеренные зависимости S -параметров от частоты не привели к желаемому результату. В связи с этим в настоя-

щей статье предложен новый волноводный метод измерения параметров.

Описание метода. Метод основан на использовании в качестве измерительной камеры отрезка короткозамкнутого волновода, в который помещен образец диэлектрика в виде пластины толщиной l (рис. 1). Предполагается, что образец немагнитный (относительная магнитная проницаемость $\mu_r = 1$) и полностью заполняет поперечное сечение волновода.

Расстояние от короткозамкнутого конца волновода до образца обозначим l_1 , а от образца до входного порта l_2 . Предполагается также, что участки волновода, заполненные воздухом, работают в одномодовом режиме и в них распространяется волна типа H_{10} .

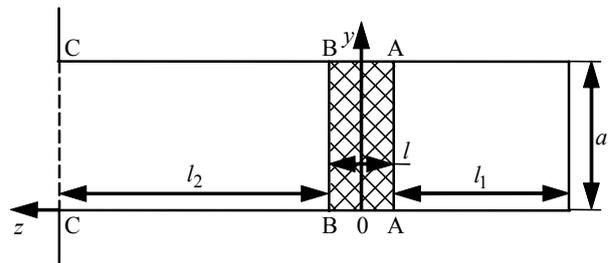


Рис. 1

Граничные условия на поверхности раздела "воздух–диэлектрик" требуют непрерывности касательных к ней составляющих напряженности электрического и магнитного полей. Отсюда следует, что в отрезке волновода с диэлектриком также распространяется волна типа H_{10} и высшие типы волн не возбуждаются, даже если в этом отрезке возможно их распространение.

Найдем входное сопротивление отрезка волновода. Входное сопротивление короткозамкнутого отрезка в плоскости А–А

$$Z_{AA} = iZ_{g0} \operatorname{tg}(\beta_0 l_1),$$

где $Z_{g0} = (2b/a)\eta_0 [1 - (\lambda/\lambda_c)^2]^{-1/2}$ – волновое сопротивление пустого волновода; $\beta_0 = 2\pi/\lambda_g$ – его фазовая постоянная, причем b , a – размеры узкой и широкой стенок волновода соответственно; $\eta_0 = 120\pi$ Ом – характеристическое сопротивление свободного пространства; λ – длина волны в свободном пространстве; $\lambda_c = 2a$ – критическая длина волны в пустом волноводе; $\lambda_g = \lambda / \sqrt{1 - (\lambda/\lambda_c)^2}$ – длина волны в пустом волноводе.

Входное сопротивление служит сопротивлением нагрузки для участка волновода, заполненного диэлектриком (заштрихован на рис. 1). Его входное сопротивление

$$Z_{BB} = Z_{g1} \frac{Z_{AA} + iZ_{g1} \operatorname{tg}(\gamma_1 l)}{Z_{g1} + iZ_{AA} \operatorname{tg}(\gamma_1 l)},$$

где

$$Z_{g1} = \frac{(2b/a)\dot{\epsilon}_r^{-1/2}}{\sqrt{1-(\lambda/\lambda_c)^2/\dot{\epsilon}_r}}; \quad \gamma_1 = \frac{2\pi\dot{\epsilon}_r^{1/2}}{\lambda} \sqrt{1-(\lambda/\lambda_c)^2/\dot{\epsilon}_r}$$

– волновое сопротивление и фазовая постоянная отрезка волновода с образцом соответственно, причем $\dot{\epsilon}_r = \epsilon_r(1 - i \operatorname{tg} \delta_\epsilon)$ – комплексная диэлектрическая проницаемость образца ($\operatorname{tg} \delta_\epsilon$ – тангенс угла диэлектрических потерь).

Входное сопротивление в плоскости С–С найдем аналогично:

$$Z_{CC} = Z_{g0} \frac{Z_{BB} + iZ_{g0} \operatorname{tg}(\beta_0 l_2)}{Z_{g0} + iZ_{BB} \operatorname{tg}(\beta_0 l_2)}.$$

Коэффициент отражения измерительной камеры:

$$\Gamma = \frac{Z_{CC} - Z_{g0}}{Z_{CC} + Z_{g0}}.$$

Очевидно, что при правильно выбранных значениях ϵ_r и $\operatorname{tg} \delta_\epsilon$ расчетный и измеренный коэффициенты отражения должны совпадать. Поэтому можно составить целевую функцию:

$$F = (|\Gamma| - |\Gamma_m|)^2 + \alpha(\varphi - \varphi_m)^2, \quad (1)$$

где $|\Gamma_m|$, φ_m – модуль и фаза измеренного коэффициента отражения; α – весовой коэффициент, подбиравшийся экспериментально. Минимизация этой функции при использовании в качестве варьируемых параметров ϵ_r и $\operatorname{tg} \delta_\epsilon$ позволяет найти параметры измеряемого материала.

Для расчета целевой функции и ее минимизации написана специальная программа EPS в среде MATLAB. Поскольку целевая функция не унимодальна, для поиска глобального минимума в программе использован генетический алгоритм [7].

Измерительная установка и результаты измерений. Измерительная установка (рис. 2) состоит из цифрового анализатора цепей Rohde&Shwarz ZVL-13 1, коаксиального кабеля 2, коаксиально-волноводного перехода (КВП) 3 и

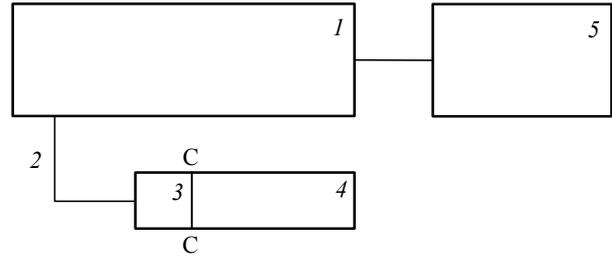


Рис. 2

измерительной камеры 4 с образцом. Результаты измерения с анализатора передаются в компьютер 5. Установка позволяет проводить измерения в диапазоне частот с заданным шагом по частоте.

Измерительная камера представляет собой отрезок стандартного прямоугольного волновода длиной 40 мм и сечением $23 \times 10 \text{ мм}^2$, в котором на расстоянии 19 мм от закороченного конца располагался образец толщиной 2 мм. Камера возбуждалась от векторного анализатора цепей Rohde&Shwarz ZVL-13 через КВП. Расстояние от плоскости короткого замыкания до образца соответствовало примерно четверти длины волны в волноводе. В этом случае напряженность электрического поля в области образца, а следовательно, и чувствительность метода максимальны.

Тестирование метода проводилось путем математического моделирования измерительной камеры с помощью программы RFS [8]. Зависимость электрического поля от координаты y , направленной вдоль широкой стенки волновода (рис. 1), в разных его сечениях показана на рис. 3. Входная мощность составляла 1 Вт. Сечение $x = 0$ расположено в середине образца, сечение $x = -18$ мм находится вблизи короткозамкнутого конца секции, а сечение $x = 18$ мм – вблизи входного порта (рис. 1). Во всех сечениях наблюдается распределение поля, соответствующее волне типа H_{10} без примеси волн высших типов.

Коэффициент отражения s_{11} измерительной камеры с образцом рассчитывался в программе RFS

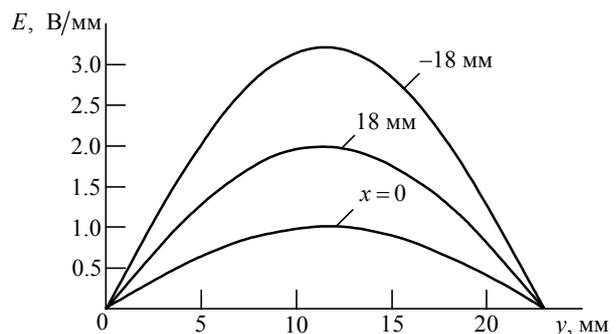


Рис. 3

Таблица 1

Частота, ГГц	Заданные параметры		Результаты тестирования		Относительная погрешность, %	
	ϵ_r	$\text{tg } \delta_\epsilon$	ϵ_r	$\text{tg } \delta_\epsilon$	ϵ_r	$\text{tg } \delta_\epsilon$
8	2	0.0003	2.000471	0.000303	0.023	1.0
	14	0.3	14.00618	0.300226	0.065	0.07
10	2	0.0003	2.000544	0.000301	0.0272	0.33
	14	0.3	14.02879	0.300171	0.205	0.057
12	2	0.0003	2.001372	0.000325	0.0686	0.83
	14	0.3	13.99038	0.299225	-0.068	-0.25

и вводился в программу EPS. Результаты расчета по программе сравнивались с заданными параметрами образца в RFS. Весовой коэффициент α в целевой функции (1) принимался равным единице.

В табл. 1 приведены данные для фторопласта (тефлона), отличающегося малой ϵ_r и малыми потерями, и для поглощающего материала на основе поликристаллического карбида кремния ($\epsilon_r = 14$; $\text{tg } \delta_\epsilon = 0.3$). Как видно, погрешность определения диэлектрической проницаемости не превышает 0.1 %, а тангенса угла потерь – 1 %. Как показали измерения, эти результаты не зависят от длины измерительной камеры и положения образца в ней, что является несомненным преимуществом предложенного метода. Подобные результаты получены и для образцов из других материалов и другой толщины. Отметим, что необходимость переноса плоскостей отсчета в данном методе отсутствует.

Оценка погрешности метода. Основными источниками погрешности метода являются: неточное задание толщины образца, неплотное его прилегание к стенкам волновода и неточность задания размеров l_1 и l_2 . Поскольку аналитический расчет погрешности в данном случае невозможен, для оценки влияния этих факторов было проведено математическое моделирование камеры с размерами образца и его положением, отклоняющимися от значений, заданных в программе обработки результатов.

Моделирование велось в среде RFS, размеры измерительной камеры задавались те же, что и при тестировании метода. В результате найдены коэффициенты чувствительности метода к по-

грешностям задания размеров для типичного образца толщиной 2 мм с $\epsilon_r = 10$ и $\text{tg } \delta_\epsilon = 0.3$. Моделирование проводилось на частоте 10 ГГц. Относительная чувствительность параметра q к изменению аргумента (размера) p рассчитывалась по формуле

$$\delta(q)_p = \left(\frac{q - q_0}{q_0} \right) / \left(\frac{p - p_0}{p_0} \right),$$

где q_0 , p_0 – номинальные значения функции и аргумента соответственно.

Полученные значения коэффициентов чувствительности приведены в табл. 2. Из таблицы видно, что при номинальных размерах предложенный метод обеспечивает погрешность определения диэлектрической проницаемости 0.08 % и тангенса угла потерь 0.07 %. Наибольшее влияние на результаты расчетов оказывает толщина образца. Ошибка в ее задании на 0.1 мм (при номинальном значении 2 мм) приводит к изменению ϵ_r и тангенса угла потерь на 6.6 %. Также существенно влияет на результат плотность прилегания образца к стенкам волновода. Зазор в 0.1 мм по широкой стенке дает погрешность в определении ϵ_r 6.48 % и тангенса угла потерь 5.63 %.

Перед измерениями анализатор цепей необходимо откалибровать в выбранном диапазоне частот относительно плоскости отсчета С–С, лежащей в месте соединения КВП с измерительной камерой (см. рис. 2). Для этого в анализаторе цепей предусмотрена специальная процедура. Как отмечено в инструкции к анализатору цепей [9], этот вид калибровки достаточно узкополосный, поэтому измерения проводились в сравнительно узкой полосе частот.

Таблица 2

l_1 , мм	l_2 , мм	t , мм	b_1 , мм	ϵ_r	$\text{tg } \delta_\epsilon$	$\delta(\epsilon_r)$	$\delta(\text{tg } \delta_\epsilon)$
10.0	20.0	2.0	10.0	10.0082	0.3002	–	–
9,9	20.0	2.0	10.0	9.9325	0.3089	0.13	-0.58
10.0	19.9	2.0	10.0	9.2793	0.2881	0.4	-0.37
10.0	20.0	1.9	10.0	9.3523	0.2831	13.2	-3.2
10.0	20.0	2.0	9.9	8.7949	0.2623	6.48	5.63

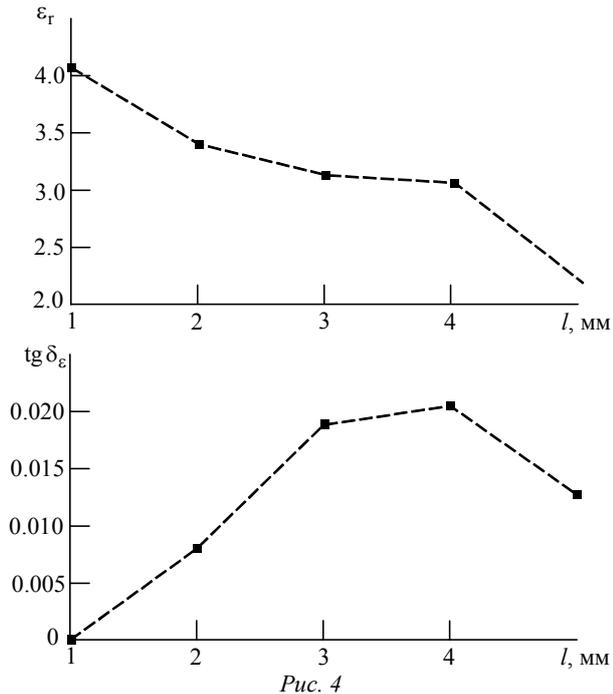


Рис. 4

На рис. 4 представлены результаты измерений зависимостей ε_r и $\operatorname{tg} \delta_\varepsilon$ капролона типа А от толщины образца. Они находятся в пределах интервала справочных значений [10] соответствующих величин для этого материала.

Результаты измерений параметров некоторых диэлектриков на частоте 10 ГГц приведены в табл. 3. Сравнение со справочными параметрами [8] показывает, что измеренные значения параметров находятся в пределах или близко к справочным. Сравнительно большое отличие тангенса угла потерь керамики 22ХС от справочных данных может быть обусловлено неидеально согласованной нагрузкой, использованной при калибровке установки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гинзтон Э. Л. Измерения на сантиметровых волнах / под ред. Г. А. Ремеза. М.: Изд-во иностр. лит., 1960. 620 с.
2. Брандт А. А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. М.: Физматлит, 1963. 403 с.
3. Microwave electronics. Measurement and materials characterization / L. F. Chen, C. K. Ong, C. P. Neo, V. V. Varadan, V. K. Varadan. New York: John Wiley & Sons, 2004. 549 p.
4. NIST technical notes 1536, Dec. 2006. URL: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/TN/nbstechnicalnote1536.pdf> (дата обращения 09.10.2018)
5. Григорьев А. Д. Измерение электрических параметров карбид-кремниевых поглотителей в микроволновом диапазоне // Материалы Всерос. конф.

Статья поступила в редакцию 07 мая 2018 г.

Таблица 3

Материал	t , мм	Справочные параметры [9]		Измеренные параметры	
		ε_r	$\operatorname{tg} \delta_\varepsilon$	ε_r	$\operatorname{tg} \delta_\varepsilon$
Капролон А	2	3...4	0.025	3.38	0.027
Капролон В	2	–	–	2.28	0.11
Абразив SiC	2	–	–	16.17	0.08
Керамика 22ХС	1	9.3	0.0015	9.48	0.0063

Следует отметить важное значение правильной калибровки анализатора цепей относительно плоскости волноводного фланца КВП. Калибровка заключается в подключении к КВП последовательно короткозамыкающей пластины, отрезка короткозамкнутого волновода заданной длины и согласованной нагрузки. При этом очень важно обеспечить надежное соединение и соосность КВП и калибровочных деталей. Коэффициент стоячей волны по напряжению согласованной нагрузки в рабочем диапазоне частот должен быть не более 1.05. Несоблюдение этих требований приводит к большой погрешности измерений.

Заключение. Описанный метод позволяет измерять диэлектрическую проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь немагнитных твердых диэлектриков в широком диапазоне частот с достаточной для практики точностью. Образец должен иметь форму пластины с размерами, соответствующими размерам поперечного сечения волновода. Метод требует точного задания толщины образца, длины измерительного волновода и положения образца в нем. Образец должен быть установлен без зазоров между ним и стенками волновода, а анализатор цепей с КВП тщательно откалиброван. Для обработки результатов измерений используется специальная программа, написанная в среде MATLAB.

- "Электроника и микроэлектроника СВЧ", Санкт-Петербург, 30 мая – 02 июня 2016 г. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2016. С. 54–58.
- R&S@ZVL Vector Network Analyzer Operating Manual. URL: https://www.rohde-schwarz.com/ru/home_48230.html (дата обращения 02.10.2018)
- Mitchell M. An Introduction to Genetic Algorithms. Cambridge: MIT Press, 1998. 226 p.
- Григорьев А. Д. Методы вычислительной электродинамики. М.: Физматлит, 2012. 430 с.
- URL: <https://manualzz.com/doc/9311034/rands@zvl-vector-network-analyzer> (дата обращения 02.10.2018)
- Таблицы физических величин / под ред. акад. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.

Григорьев Андрей Дмитриевич – доктор технических наук (1985), профессор (1989) кафедры радиотехнической электроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 150 научных работ, в том числе трех учебников и четырех монографий. Сфера научных интересов – электроника и техника СВЧ; вычислительная электродинамика.
E-mail: adgrigoriev@etu.ru

REFERENCES

1. E. L. Ginzton. Microwave measurements. N. Y., McGraw-Hill, 1957, 515 p.
2. Brandt A. A. *Issledovanie dielektrikov na sverkhvysokikh chastotakh* [Investigation of Dielectrics at Microwave Frequencies]. Moscow, *Fizmatlit*, 1963, 403 p. (In Russian)
3. Chen L. F., Ong C. K., Neo C. P., Varadan V. V., Varadan V. K. Microwave Electronics. Measurement and Materials Characterization. N. Y., John Wiley & Sons, 2004, 549 p.
4. NIST technical notes 1536, Dec. 2006. Available at: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/TN/nbstechnicalnote1536.pdf> (accessed 02.10.2018)
5. Grigor'ev A. D. *Izmerenie elektricheskikh parametrov karbid-kremnievykh poglotitelei v mikrovolnovom diapazone* [Measurement of Electrical Parameters of Silicon-Carbide Absorbers in the Microwave Range]. Materials of the All-Russian Conference "Electronics and Microelectronics Microwave", 30 may – 02 june 2016, Saint Petersburg. SPb., *Izd-vo SPbGETU "LETI"*, 2016, pp. 54–58. (In Russian)
6. R&S@ZVL Vector Network Analyzer Operating Manual. Available at: https://www.rohde-schwarz.com/ru/home_48230.html (accessed 02.10.2018)
7. Mitchell M. An Introduction to Genetic Algorithms. Cambridge, MIT Press, 1998, 226 p.
8. Grigor'ev A. D. *Metody vychislitel'noi elektrodinamiki* [Methods of Computational Electrodynamics]. Moscow, *Fizmatlit*, 2012, 430 p. (In Russian)
9. Available at: <https://manualzz.com/doc/9311034/rands@zvl-vector-network-analyzer> (accessed 02.10.2018)
10. *Tablitsy fizicheskikh velichin* [Tables of Physical Values]. Ed. by I. K. Kikoin. Moscow, *Atomizdat*, 1976, 1008 p. (In Russian)

Received May, 07, 2018

Andrey D. Grigoriev – D.Sc. in Engineering (1985), Professor (1989) of the Department of Radio Engineering Electronics of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of more than 150 scientific publications. Area of expertise: microwave electronics and microwave technique; computational electrodynamics.
E-mail: adgrigoriev@etu.ru
