

## УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ НА БАЗЕ ПОЛОСКОВОЙ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ

*Д.С. Клыгач, klygachds@susu.ru*  
*М.Г. Вахитов, vakhitovmg@susu.ru*  
*Д.Г. Фомин, fomindg@susu.ru*  
*А.С. Королев, korolevas@susu.ru*

*Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия*

**Аннотация.** Измерение электродинамических параметров, таких как диэлектрическая и магнитная проницаемости в широком диапазоне частот для сложных композитных материалов, остаётся актуальной задачей на сегодняшний день. Несмотря на то, что известны способы измерения в виде пластин, параллелепипедов или цилиндров, измерение свойств в широком диапазоне частот композитных материалов остаётся слабо исследованной темой. **Цель исследования:** обоснование возможностей использования полосково-щелевого перехода для измерения электродинамических параметров сложных композитных материалов. **Материалы и методы.** В статье представлены результаты исследований электродинамических параметров композитных материалов на основе измерителя в виде объёмного полосково-щелевого перехода. Данный переход позволяет выполнить измерение электродинамических параметров в диапазоне частот от 10 до 1400 МГц. Преимущество применения полосково-щелевого перехода в том, что при измерении электродинамических параметров нет необходимости придавать специальную форму (параллелепипед, цилиндр) исследуемым образцам. Это приводит к дополнительным технологическим трудностям и затратам времени на подготовку исследуемых образцов композитного материала. Исследуемые образцы композитного материала могут быть в виде сыпучей смеси. За счет этого сыпучий материал полностью займет внутреннее пространство полосково-щелевого перехода. Исследуемый композитный материал применяется при проектировании строительных материалов для обеспечения электромагнитной совместимости и представляет собой сыпучую смесь. **Результаты.** В статье приведены частотные зависимости коэффициентов отражения и прохождения в диапазоне частот при различных концентрациях материалов в итоговой смеси. **Заключение.** Описана технология получения композитных материалов с учетом концентрации компонентов в смеси. Композитные материалы представляют собой гибридный материал – сухую смесь электромагнитных (графитных) и диэлектрических частиц (перлита), а также цементно-полимерного вяжущего, предназначенную для нанесения радиопоглощающего покрытия на ограждающие конструкции. Дисперсные составы частиц перлита и графита близки и находятся в диапазоне 0,1...1 мм. Образцы смеси отличаются по составу объемным соотношением SiO<sub>2</sub>/C.

**Ключевые слова:** СВЧ-измерения, метод Николсона – Росса – Вейера, S-параметры, порошковые материалы

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках государственного задания FENU-2020-0019 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

**Для цитирования:** Устройство для измерения диэлектрических свойств порошковых материалов на базе полосковой линии передачи / Д.С. Клыгач, М.Г. Вахитов, Д.Г. Фомин, А.С. Королев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 4. С. 159–166. DOI: 10.14529/ctcr220416

## A DEVICE FOR MEASURING THE DIELECTRIC PROPERTIES OF POWDER MATERIALS BASED ON A STRIPLINE TRANSMISSION

**D.S. Klygach**, *klygachds@susu.ru*

**M.G. Vakhitov**, *vakhitovmg@susu.ru*

**D.G. Fomin**, *fomindg@susu.ru*

**A.S. Korolev**, *korolevas@susu.ru*

*South Ural State University, Chelyabinsk, Russia*

**Abstract.** Measurement of electrodynamic parameters, such as dielectric and magnetic permeability in a wide frequency range for complex composite materials, remains an urgent task today. Despite the fact that measurement methods are known in the form of plates, parallelepipeds or cylinders, the measurement of properties in a wide range of frequencies of composite materials remains a poorly studied topic. **Purpose of the study:** substantiation of the possibilities of using a strip-slot transition for measuring the electrodynamic parameters of complex composite materials. **Materials and methods.** The article presents the results of studies of the electrodynamic parameters of composite materials based on a meter in the form of a volume strip-slot transition. This transition allows you to measure electrodynamic parameters in the frequency range from 10 MHz to 1400 MHz. The advantage of using a strip-slot transition is that when measuring electrodynamic parameters, there is no need to give a special shape (parallelepiped, cylinder) to the samples under study. This leads to additional technological difficulties and time-consuming preparation of the studied samples of the composite material. The investigated samples of the composite material can be in the form of a loose mixture. Due to this, bulk material completely occupies the internal space of the strip-slot transition. The investigated composite material is used in the design of building materials to ensure electromagnetic compatibility and is a loose mixture. **Results.** The article presents the frequency dependences of the reflection and transmission coefficients in the frequency range at different concentrations of materials in the final mixture. **Conclusion.** The technology for obtaining composite materials is described, taking into account the concentration of components in the mixture. Composite materials are a hybrid material – a dry mixture of electromagnetic (graphite) and dielectric particles (perlite), as well as a cement-polymer binder, intended for applying a radio-absorbing coating on building envelopes. The disperse compositions of perlite and graphite particles are close and are in the range of 0.1...1 mm. Samples of the mixture differ in composition by the SiO<sub>2</sub>/C volume ratio.

**Keywords:** microwave measurements, Nicholson–Ross–Weier method, S-parameters, powder materials

**Acknowledgments:** The work was carried out within the framework of the state task FENU-2020-0019 of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

**For citation:** Klygach D.S., Vakhitov M.G., Fomin D.G., Korolev A.S. A device for measuring the dielectric properties of powder materials based on a stripline transmission. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2022;22(4):159–166. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr220416

### Введение

Одним из направлений исследований на сегодняшний день является разработка новых материалов с заданными свойствами. Примером таких материалов являются материалы на основе ферритов с различными добавками. Такие материалы находят применение в различных отраслях науки и техники в качестве магнитотвердых материалов для постоянных магнитов и магнитных композитов, устройств хранения информации, магнитооптических устройств [1, 2]. В последние годы эти материалы все чаще находят применение в устройствах миллиметрового и субтерагерцового диапазонов частот. Такими устройствами являются, например, настраиваемые резонаторы [3], изоляторы [4] и радиопоглощающие покрытия, в которых ферриты применяют как в виде пленок, так и в виде объемных материалов. Перспективным направлением исследований является создание материалов с минимальной отражающей способностью электромагнитного излучения

для защиты крупных объектов [5, 6]. Основное требование к материалам – поглощение в широком диапазоне частот [7].

В СВЧ (ГГц) области наибольший интерес представляют ферриты, легируя которые, можно менять частоту ферромагнитного резонанса (ФМР). В то же время ферриты могут быть использованы в качестве излучателей в информационно-телекоммуникационных системах, где, с одной стороны, важен низкий уровень потерь, а с другой стороны, повышение частоты ФМР, что может быть достигнуто частичным замещением атомов железа в матрице гексаферритов легирующим элементом, расширяет возможности приборов и устройств на основе такого материала. В частности, переход к частотам до 100 ГГц и выше обеспечит повышение объемов передачи данных между спутниками. Это приведет к развитию телекоммуникационных услуг нового поколения на базе космических систем [8, 9]. В силу всего перечисленного изучение различных физических свойств этих материалов представляет как научный [10], так и практический интерес.

СВЧ-техника и технологии широко распространены в современных информационно-телекоммуникационных устройствах, в том числе в системах связи, в системах управления воздушным движением и т. д. С переходом радиоэлектронных систем в более высокочастотные диапазоны возникает необходимость точного определения параметров используемых диэлектрических материалов. Ярким примером СВЧ-устройств, электрические параметры которых сильно зависят от используемых материалов, являются: печатные излучающие элементы, сумматоры и делители мощности, согласующие топологии для активных элементов и многие другие элементы антенно-фидерного тракта. Основной проблемой, связанной с применением диэлектрических материалов в составе перечисленных СВЧ-устройств, является то, что отклонение значения их относительной диэлектрической проницаемости от расчетного значения ведет к увеличению коэффициента отражения и, как следствие, к потерям мощности, которая рассеивается в СВЧ-тракте в виде тепла. В результате повышается вероятность высокочастотного пробоя СВЧ-тракта, уменьшается время наработки СВЧ-устройства на отказ, увеличиваются тепловые потери, повышается коэффициент шума (для приемных устройств). Для предотвращения всех перечисленных проблем начиная с 1950-х годов возникло новое направление развития электроники – материаловедение в области высоких частот.

Целью данного направления является исследование применяемых в СВЧ-устройствах материалов, позволяющее радиоинженерам заранее с высокой точностью определять конструктивные особенности проектируемых устройств. Так, появилось большое разнообразие методов и техник измерения диэлектрических параметров материалов в широком диапазоне частот. Одним из наиболее популярных способов является метод Николсона – Росса – Вейера, позволяющий оценивать диэлектрические свойства материалов при измерении S-параметров в комплексной форме. Авторами настоящей работы представлено новое компактное устройство на базе полосковой линии передачи, предназначенное для измерения диэлектрических свойств порошковых материалов методом Николсона – Росса – Вейера.

В данной статье исследуется возможность применения симметричной полосковой линии с воздушным заполнением для определения диэлектрических свойств порошкового материала ИКУР (ТУ 23.64.10-008-21491261-2021). Данный способ измерений позволяет использовать значительно меньше исследуемого материала, чем в аналогичных исследованиях с применением коаксиального измерителя. Кроме того, применение полоскового измерителя позволяет воплотить принцип модульности при его реализации.

## 1. Конструкция измерительного устройства

Конструкция предлагаемого устройства для измерения диэлектрических свойств порошковых материалов (рис. 1) представляет собой воздушную полосковую линию 1, расположенную в металлическом корпусе 2. Для подключения используются SMA разъемы 3 с волновым сопротивлением 50 Ом. Стоит отметить, что для обеспечения возможности размещения исследуемого порошкового материала в конструкции измерительного устройства используется крышка 4. Сечение полосковой линии –  $4 \times 2$  мм, что обеспечивает волновое сопротивление 50 Ом при воздушном заполнении корпуса. Размеры внутренней полости корпуса составляют  $25 \times 15 \times 6$  мм. Таким образом, исследуемое измерительное устройство обладает малым внутренним объемом, что позволяет проводить измерения с малым количеством исследуемого порошкового материала.

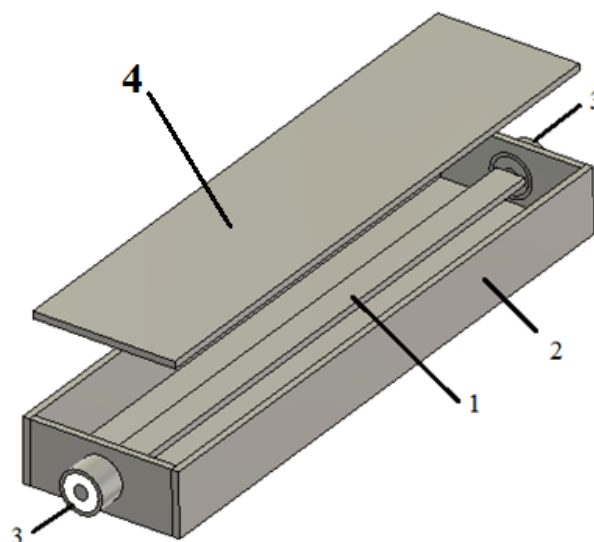


Рис. 1. Конструкция устройства для измерения диэлектрических свойств порошковых материалов на базе полосковой линии передачи  
Fig. 1. The design of a device for measuring the dielectric properties of powder materials based on a stripline transmission

## 2. Диэлектрические свойства материалов

Диэлектрические свойства материалов в математическом представлении – это комплексное число, описывающее взаимодействие материала с электрическим полем:

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''; \quad (1)$$

$$\varepsilon' = \varepsilon_r \varepsilon_0; \quad (2)$$

$$\varepsilon'' = \varepsilon' \operatorname{tg} \delta, \quad (3)$$

где  $\varepsilon'$  – реальная часть диэлектрической проницаемости;  $\varepsilon''$  – мнимая часть диэлектрической проницаемости (коэффициент диэлектрических потерь);  $\varepsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость;  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – электрическая постоянная;  $\delta$  – угол диэлектрических потерь.

Так, реальная часть диэлектрической проницаемости  $\varepsilon'$  определяет количество запасенной энергии внешнего электрического поля в материале. Мнимая часть диэлектрической проницаемости  $\varepsilon''$  определяет долю потерь относительно внешнего электрического поля. Тангенс угла диэлектрических потерь определяет отношение энергии потерь в материале к энергии, запасенной в материале:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{\text{Энергия потерь}}{\text{Энергия запасенная}}. \quad (4)$$

Приведенные в соотношениях (1)–(4) физические величины ( $\varepsilon'$ ,  $\varepsilon''$ ) являются функциями частоты. Основная идея представленных ниже методов – определение диэлектрической проницаемости материалов в широком диапазоне частот.

## 3. Методика определения диэлектрических характеристик материала

Основная идея способа заключается в измерении комплексного коэффициента пропускания (S21) и комплексного коэффициента отражения (S11), когда тестовый сигнал проходит через замкнутую линию передачи без образца тестируемого материала и с образцом. [8–13]. Для измерений используются векторные сетевые анализаторы (VNA). Математическая обработка результатов осуществляется по методу Николсона – Росса – Вейера [8].

Основные соотношения, используемые в математической модели Николсона – Росса – Вейера, для материала толщиной  $d$ , установленного в воздушно-диэлектрической коаксиальной линии, показаны на рис. 2.

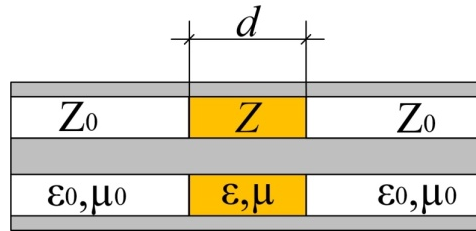


Рис. 2. Воздушно-диэлектрическая полосовая линия с образцом испытываемого материала  
Fig. 2. Air-dielectric stripline with test material sample

Радиопоглощающая смесь ИКУР представляет собой гибридный материал – сухую смесь электромагнитных (графитных) и диэлектрических частиц (перлита), а также цементно-полимерного вяжущего, предназначенную для нанесения радиопоглощающего покрытия на ограждающие конструкции. В покрытии формируется дисперсная система C–SiO<sub>2</sub> с развитой внутренней удельной поверхностью за счет поверхности раздела фаз и значительной внутренней пористости частиц вспученного перлита, способствующей максимальному переотражению электромагнитных волн в структуре между графитными частицами. Дисперсные составы частиц перлита и графита близки и находятся в диапазоне 0,1...1 мм. Образцы смеси отличаются по составу объемным соотношением SiO<sub>2</sub>/C, составы приведены в таблице.

Образцы смесей материала для измерения S-параметров  
Material mix samples for S-parameter measurements

Номер образца	Объемное соотношение SiO <sub>2</sub> /C
1	2/1
2	1/1
3	1/2
4	1/3

#### 4. Экспериментальное исследование измерителя порошковых материалов на базе полосковой линии передачи

Для экспериментального исследования измерителя порошковых материалов на базе полосковой линии передачи разработан макет (рис. 3). На рис. 4 приведена экспериментальная установка.

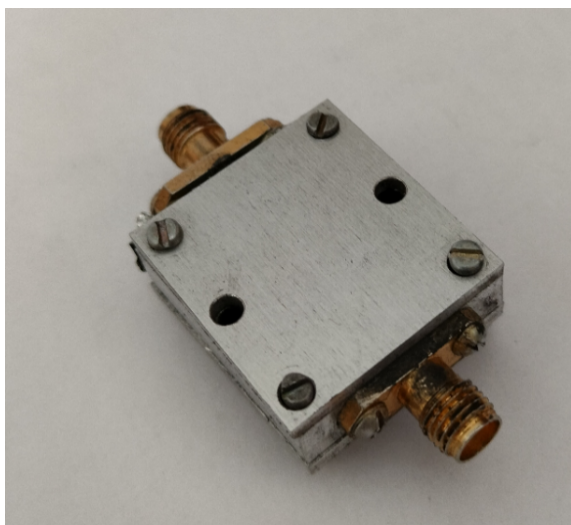


Рис. 3. Макет полосковой линии передачи  
Fig. 3. Stripline layout

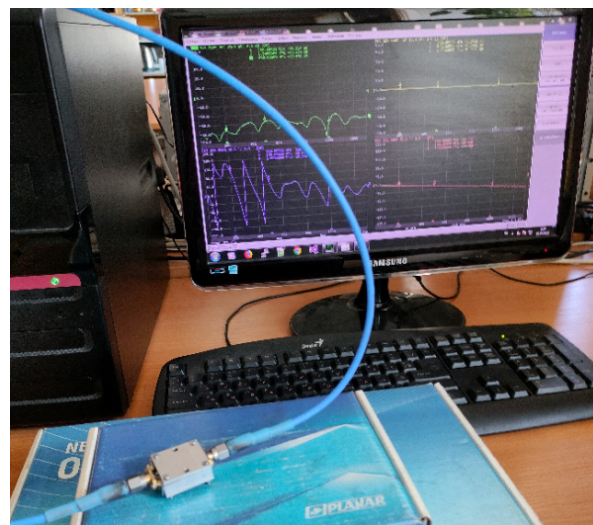


Рис. 4. Экспериментальная установка  
Fig. 4. Experimental setup

Макет реализован с использованием модульного принципа построения [14, 15].

### 5. Результат измерения

Результаты измерения S-параметров образцов материалов приведены на рис. 5–8.

Результаты измерения потерь в образцах приведены на рис. 9.

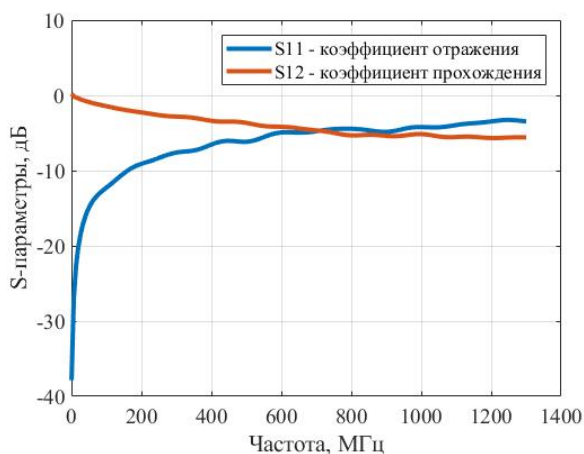


Рис. 5. Частотная зависимость S-параметров для образца № 1  
Fig. 5. Frequency dependence of S-parameters for sample No. 1

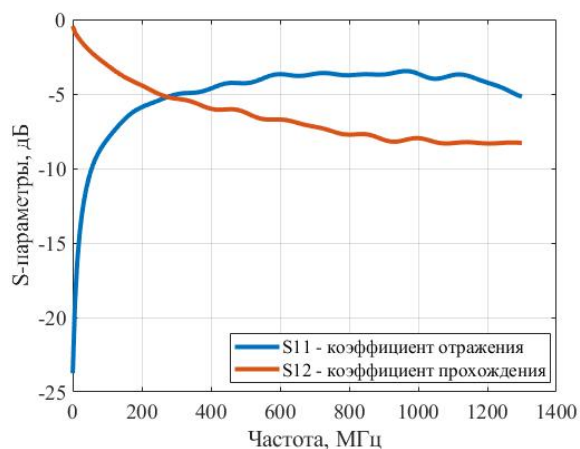


Рис. 6. Частотная зависимость S-параметров для образца № 2  
Fig. 6. Frequency dependence of S-parameters for sample No. 2

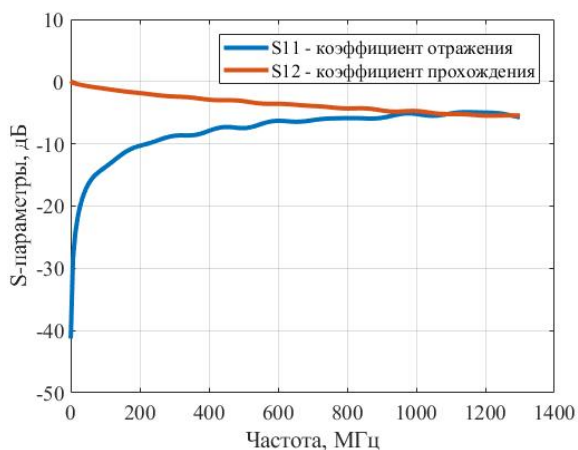


Рис. 7. Частотная зависимость S-параметров для образца № 3  
Fig. 7. Frequency dependence of S-parameters for sample No. 3

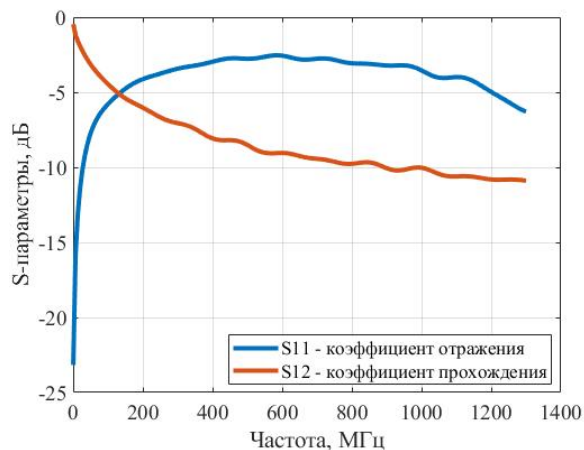


Рис. 8. Частотная зависимость S-параметров для образца № 4  
Fig. 8. Frequency dependence of S-parameters for sample No. 4

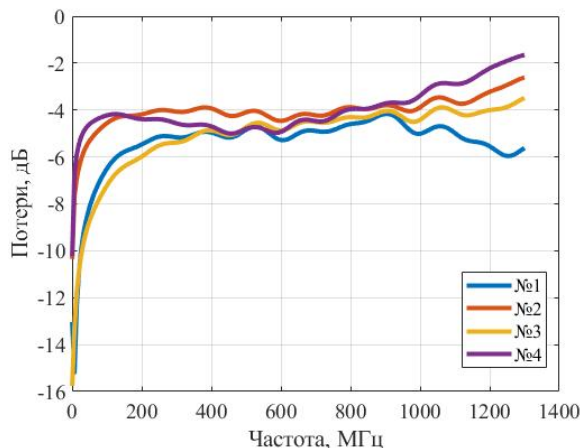


Рис. 9. Частотная зависимость потерь в исследованных образцах  
Fig. 9. Frequency dependence of losses in the studied samples

Исследуемые материалы были засыпаны в пространство между полоском и стенками корпуса. Из полученных графиков видно, что в диапазоне частот не наблюдаются шумы и скачкообразные изменения S-параметров, как это наблюдалось при измерении параметров материала с помощью коаксиальной линии передачи [16].

Из полученных результатов измерения видно, что в области от 10 до 700 МГц материалы практически не поглощают электромагнитную энергию. В диапазоне частот от 700 до 1300 МГц начинается уменьшение амплитуды электромагнитной волны. Коэффициент отражения S11 уменьшается, т. е. волна проходит в материал, поскольку коэффициент практически не изменяется, это показывает, что амплитуда волны уменьшается и электромагнитная волна затухает при прохождении через материал (см. рис. 9).

Применение предложенной методики позволяет выявить разницу в поглощающей способности материалов разного состава. Наглядно (см. рис. 9) различие на высоких частотах уровня поглощения электромагнитных волн, с повышением содержания электромагнитных частиц отражающая способность растет, а поглощающая падает.

### Заключение

В работе представлены результаты теоретического исследования устройства для измерения диэлектрических свойств порошковых материалов на базе полосковой линии передачи. Представлена конструкция устройства измерения. Достоинством представленной конструкции является малый объем его внутренней полости, что позволяет проводить измерения порошковых материалов, используя небольшое их количество. Исследование электрических характеристик предлагаемого устройства показало отсутствие резонансных зависимостей, а также плавное изменение амплитудно-фазовых зависимостей коэффициентов передачи и отражения в диапазоне частот. Таким образом, на основании проведенного теоретического исследования можно сделать выводы о высоком потенциале применения предлагаемого устройства для измерения диэлектрических свойств порошковых материалов методом Николсона – Росса – Вейера.

### Список литературы/References

1. Zhang W., Peng B., Zhang W., Zhou S., Schmidt H. Ultra large coercivity in barium ferrite thin films prepared by magnetron sputtering. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2010;322:1859–1862.
2. Xu H., Zhang W., Peng B., Zhang W. Properties of barium hexa-ferrite thin films dependent on sputtering pressure. *Applied Surface Science*. 2011;257:2689–2693.
3. Song Y.-Y., Ordóñez-Romero C.L., Wu M. Millimeter wave notch filters based on ferromagnetic resonance in hexagonal barium ferrites. *Appl. Phys. Lett.* 2009;95:142506.
4. Harris V.G. Modern microwave ferrites. *IEEE Trans. Mag.* 2012;48:1075–1104.
5. Cho H.S., Kim S.S. M-Hexaferrites with planar magnetic anisotropy and their application to high-frequency microwave absorbers. *IEEE Transact. Magn.* 1999;35:3151–3153. DOI: 10.1109/20.801111
6. Matsumoto M., Miyata Y.A. Gigahertz-range electromagnetic wave absorber with wide bandwidth of hexagonal ferrite. *J. Appl. Phys.* 1996;79:5486–5488.
7. Ghasemi A., Hossienpour A., Morisako A., Liu X., Ashrafizadeh A. Investigation of the microwave absorptive behavior of doped barium ferrites. *Mater. Design*. 2008;29:112–117.
8. Nicolson A.M., Ross G.F. Measurement of the intrinsic properties of materials by time domain techniques. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 1970;19(4):377–382. DOI: 10.1109/TIM.1970.4313932
9. Sahin S., Nahar N.K., Sertel K. Simplified Nicolson-Ross-Weir Method for Material Characterization Using Single-Port Measurements. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. 2020;10(4):404–410. DOI: 10.1109/TTHZ.2020.2980442
10. Luukkonen O., Maslovski S.I., Tretyakov S.A. Stepwise Nicolson-Ross-Weir-Based Material Parameter Extraction Method. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2011;10:1295–1298. DOI: 10.1109/LAWP.2011.2175897
11. Rothwell E.J., Frasc J.L., Ellison S.M., Chahal P., Ouedraogo R.O. Analysis of the Nicolson-Ross-Weir Method for Characterizing the Electromagnetic Properties of Engineered Materials. *Progress in Electromagnetics Research*. 2016;157:31–47. DOI: 10.2528/PIER16071706

12. Severo S.L.S., de Salles A.A.A., Nervis B., Zanini B.K. Non-resonant Permittivity Measurement Methods. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*. 2017;16(1):297–311. DOI: 10.1590/2179-10742017v16i1890

13. Weir W.B. Automatic Measurement of Complex Dielectric Constant and Permeability at Microwave Frequencies. *Proceedings of the IEEE*. 1974;62(1):33–36. DOI: 10.1109/PROC.1974.9382

14. Dudarev N.V., Fomin D.G., Darovskikh S.N. Scattering matrix simulation of broadband band-pass filter based on a multilayer technology. In: *2021 International Conference Engineering and Telecommunication (En&T)*. Dolgoprudny, Russia; 2021. DOI: 10.1109/EnT50460.2021.9681721

15. Dudarev N.V., Fomin D.G., Darovskikh S.N., Klygach D.S., Vakhitov M.G. The Volume-Modular Technology in the Design of Passive Microwave Devices. In: *Proceedings – 2021 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology, USBEREIT 2021*; 2021. P. 225–227. DOI: 10.1109/USBEREIT51232.2021.9455051

16. Klygach D., Vakhitov M., Khashimov A., Zhivulin V., Vinnik D., Sherstyuk D. Determination of the Optimal Sample Size for Measurement in a Coaxial Transmission Line. In: *Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT)*; 2020. P. 322–325. DOI: 10.1109/USBEREIT48449.2020.9117619

### ***Информация об авторах***

**Клыгач Денис Сергеевич**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, доц. кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; klygachds@susu.ru.

**Вахитов Максим Григорьевич**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, доц. кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; vakhitovmg@susu.ru.

**Фомин Дмитрий Геннадьевич**, младший научный сотрудник кафедры инфокоммуникационных технологий, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; fomindg@susu.ru.

**Королев Александр Сергеевич**, канд. техн. наук, доц. кафедры строительных конструкций и сооружений, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; korolevas@susu.ru.

### ***Information about the authors***

**Denis S. Klygach**, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Ass. Prof. of the Department of Design and Manufacture of Radio Equipment, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; klygachds@susu.ru.

**Maksim G. Vakhitov**, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Ass. Prof. of the Department of Design and Manufacture of Radio Equipment, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; vakhitovmg@susu.ru.

**Dmitriy G. Fomin**, Junior Researcher of the Department of Infocommunication Technologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; fomindg@susu.ru.

**Aleksandr S. Korolev**, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Department of Building Structures and Constructions, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; korolevas@susu.ru.

***Статья поступила в редакцию 20.09.2022***

***The article was submitted 20.09.2022***