



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-7-65-71>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.317.335.3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ S-ПАРАМЕТРОВ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ОБРАЗЦОВ КВАРЦЕВОЙ КЕРАМИКИ В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

Н.А. ПЕВНЕВА., Д.А. КОНДРАШОВ., А.Л. ГУРСКИЙ., А.В. ГУСИНСКИЙ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 21 июля 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. Для определения комплексных параметров и диэлектрической проницаемости керамических материалов в диапазоне 78,33–118,1 ГГц применен модифицированный метод Николсона – Росса – Вейра. Измерительная установка представляет собой измеритель комплексных коэффициентов отражения и передачи, волноводный измерительный тракт со специальной измерительной ячейкой, состоящей из двух нерегулярных волноводов и волноводной камеры между ними, обеспечивающей незначительное влияние мод высших порядков. Экспериментально получены зависимости амплитуды и фазы коэффициента отражения и передачи от частоты для фторопласта и трех керамических образцов в диапазоне частот 78,33–118,1 ГГц. Полученные S-параметры обрабатываются по алгоритму, включающему их усреднение на основе преобразования Фурье, с целью получения значений диэлектрической проницаемости. Фторопласт был использован в качестве эталонного материала с известной диэлектрической проницаемостью. Диэлектрическая проницаемость фторопласта имеет стабильное значение 2,1 в вышеуказанном диапазоне частот. Диэлектрическая проницаемость образца № 1 варьируется от 3,6 до 2,5 на границах диапазона, образца № 2 – от 3,7 до 2,1, образца № 3 – от 2,9 до 1,5. Данные эксперимента находятся в удовлетворительном согласии с литературными данными для других частот с учетом границ, заданных неопределенностью измерений.

Ключевые слова: векторный анализатор цепей, измерительная ячейка, диэлектрическая проницаемость, коэффициент отражения, коэффициент передачи, метод Николсона – Росса – Вейра.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Певнева Н.А., Кондрашов Д.А., Гурский А.Л., Гусинский А.В. Определение S-параметров и диэлектрической проницаемости образцов кварцевой керамики в миллиметровом диапазоне длин волн. Доклады БГУИР. 2021; 19(7): 65-71.

ESTIMATION OF S-PARAMETERS AND DIELECTRIC PERMITTIVITY OF QUARTZ CERAMICS SAMPLES IN MILLIMETER WAVEBAND

NATALIA A. PEVNEVA, DENIS A. KONDRASHOV, ALEXANDER L. GURSKII,
ALEXANDER V. GUSINSKY

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 21 July 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. A modified Nicholson – Ross – Weir method was used to determine complex parameters and dielectric permittivity of ceramic materials in the range 78.33–118.1 GHz. The measuring equipment is a meter of complex reflection and transmission coefficients, a waveguide measuring canal with a special measuring cell, consisting of two irregular waveguides and a waveguide chamber between them, which provides insignificant influence of higher-order modes. The dependences of the amplitude and phase of the reflection and transmission coefficients on frequency were obtained experimentally for fluoroplastic and three ceramic samples in the frequency range 78.33–118.1 GHz. The obtained *S*-parameters are processed according to an algorithm that includes their averaging based on the Fourier transform in order to obtain the values of the dielectric permittivity. Fluoroplastic was used as a reference material with a known dielectric constant. The dielectric constant of fluoroplastic has a stable value of 2.1 in the above mentioned frequency range. The dielectric constant of sample No. 1 varies from 3.6 to 2.5 at the boundaries of the range, sample No. 2 – from 3.7 to 2.1, sample No. 3 – from 2.9 to 1.5. The experimental data are in satisfactory agreement with the literature data for other frequencies taking into account the limits set by the measurement uncertainty.

Keywords: vector network analyzer, measuring cell, dielectric permittivity, reflection coefficient, transmission coefficient, Nicholson – Ross – Weir method.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Pevneva N.A., Kondrashov D.A., Gurskii A.L., Gusinsky A.V. Estimation of *S*-parameters and dielectric permittivity of quartz ceramics samples in millimeter waveband. *Doklady BGUIR*. 2021; 19(7): 65-71.

Введение

Быстрый прогресс систем мобильной и спутниковой связи предъявляет высокие требования к разработке диэлектрических материалов, обладающих высокими значениями коэффициента добротности, стабильными заданными значениями диэлектрической проницаемости в микроволновом диапазоне и температурным коэффициентом резонансной частоты, близким к нулю [1]. Точное знание диэлектрических свойств керамических материалов в миллиметровом диапазоне длин волн имеет решающее значение для эффективного проектирования различных микроволновых систем. Керамика широко используется в изготовлении термисторов, варисторов, нагревательных элементов, подложек для интегральных микросхем, изоляторов, сверхпроводников, резонаторов. Также некоторые виды керамики используют и в радиолокации для изготовления различных конструктивных элементов. Цель данной работы – определение *S*-параметров и диэлектрической проницаемости образцов кварцевой керамики с различным содержанием нитрида бора в диапазоне 78,33–118,1 ГГц для установления возможности изготовления конструктивных элементов из данных материалов.

Методика проведения расчетов и выполнения эксперимента

Для измерений был реализован метод Николсона – Росса – Вейра [2], для чего была собрана установка на основе векторного анализатора цепей «Измеритель комплексных

коэффициентов отражения и передачи Р4-МВМ-118» и измерительной ячейки для диапазона частот 78,33–118,10 ГГц. Схема установки, методика измерений и алгоритм расчета диэлектрической проницаемости детально описаны в [3]. В качестве исследуемых образцов выступили три образца из кварцевой керамики с различным содержанием нитрида бора (в образце № 1 – 30 %, в образце № 2 – 40 %, в образце № 3 – 20 %), а в качестве эталонного образца – фторопласт, чья диэлектрическая проницаемость составляет 2,1 в соответствии с ГОСТ 14906.

Измерения проводились при температуре 24,2 °С и влажности 41,4 %. Рабочие условия контролировались откалиброванным прибором Testo 605.

Результаты и их обсуждение

Основные параметры исследуемых образцов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Основные параметры исследуемых образцов
Table 1. Main parameters of the studied samples

Наименование исследуемого материала / Name of the test material	Плотность, г/см ³ / Density, g/cm ³	Размеры, мм / Dimensions, mm	Предел прочности при изгибе, МПа / Flexural strength, MPa	Предел прочности при сжатии, МПа / Compressive strength, MPa
Фторопласт	2,20	23 × 10 × 3,4	–	–
Образец №1	1,23	23 × 10 × 4	1,95	40,11
Образец №2	1,48	23 × 10 × 4,1	1,34	31,63
Образец №3	1,48	23 × 10 × 4	более 2	52,10

Измерения проводились с помощью векторного анализатора цепей Р4-МВМ-118 (рис. 1) и специальной измерительной ячейки, в которую помещался образец (рис. 2).

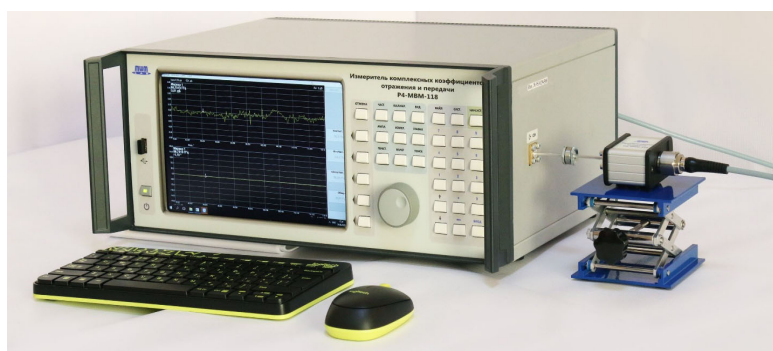


Рис. 1. Измеритель комплексных коэффициентов отражения и передачи Р4-МВМ-118
Fig. 1. Meter of complex reflection and transmission coefficients R4-MVM-118

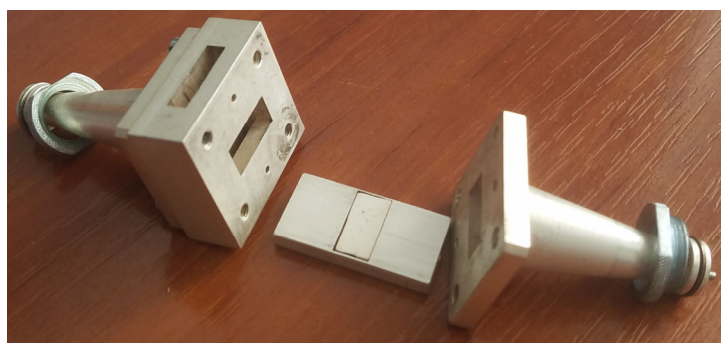


Рис. 2. Измерительная ячейка для диапазона частот от 78,33 до 118,10 ГГц в разобранном виде с помещенным в ее волноводную вставку исследуемым образцом
Fig. 2. Measuring cell for the frequency range from 78.33 to 118.10 GHz unassembled with its waveguide insertion in which test sample is installed

Использование в Р4-МВМ-118 кварцевого генератора и его охват многоконтурной обратной связью с применением полинома 3-го порядка для компенсации нелинейности балансного смесителя позволило снизить уровень погрешности измерения S -параметров до значения $\pm 0,5$ дБ в шумовом диапазоне от -40 до -60 дБ. Кроме того, это дало возможность обеспечить стабильный уровень и линейность измерения комплексных коэффициентов отражения и передачи во всем диапазоне. Применение дискретного фазовращателя дает малое значение флуктуаций их фазы при реализации перестройки в широком диапазоне частот и формировании напряжений, несущих информацию о квадратурных составляющих S -параметров без применения при калибровке эталонов (мер фазового сдвига) в диапазоне частот от 78,33 до 118,10 ГГц, на базе современных средств вычислительной техники и соответствующего программного обеспечения. Из-за повышенных требований к точности параметров измерения Р4-МВМ-118 выполнен с пределом погрешности установки частоты не более $\pm 2 \cdot 10^{-5}$, а кратковременная нестабильность колебаний составляет не более $\pm 1 \cdot 10^{-6}$ от значения частоты во всем диапазоне, что обеспечивает высокоточное проведение измерений в автоматизированном режиме.

Полученные с помощью Р4-МВМ-118 зависимости амплитуд и фаз коэффициентов передачи и отражения исследуемых образцов приведены на рис. 3–6. Рассчитанная по разработанной методике [3] зависимость диэлектрической проницаемости от частоты в диапазоне частот от 78,33 до 118,10 ГГц представлена на рис. 7.

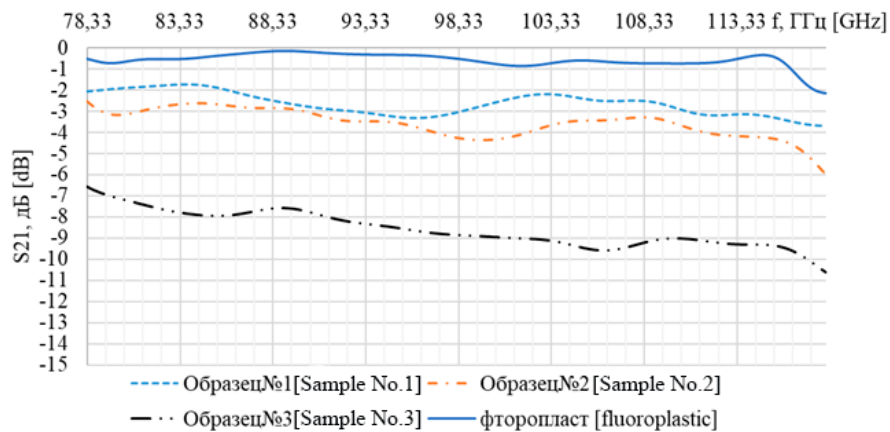


Рис. 3. Зависимость амплитуды коэффициента передачи исследуемых образцов от частоты в диапазоне частот от 78,33 до 118,1 ГГц

Fig. 3. The dependence of the transmission coefficient's amplitude of the samples under study on the frequency in the frequency range from 78.33 to 118.1 GHz

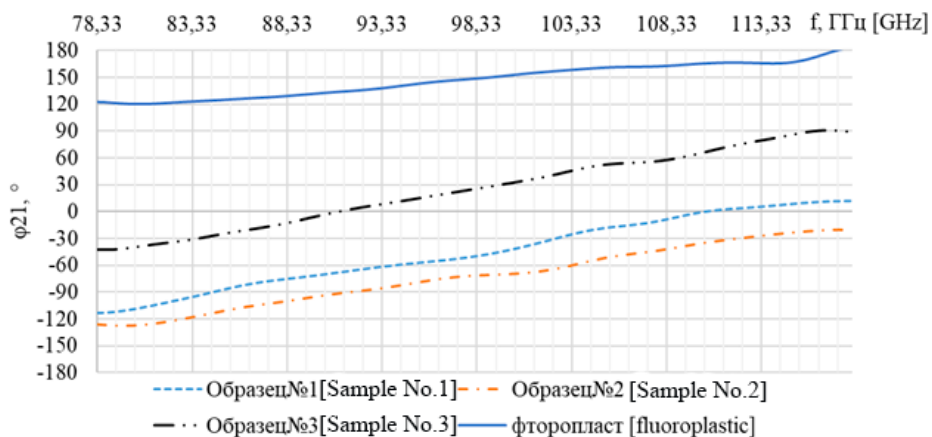


Рис. 4. Зависимость фазы коэффициента передачи исследуемых образцов от частоты в диапазоне частот от 78,33 до 118,1 ГГц

Fig. 4. The dependence of the transmission coefficient's phase of the samples under study on the frequency in the frequency range from 78.33 to 118.1 GHz

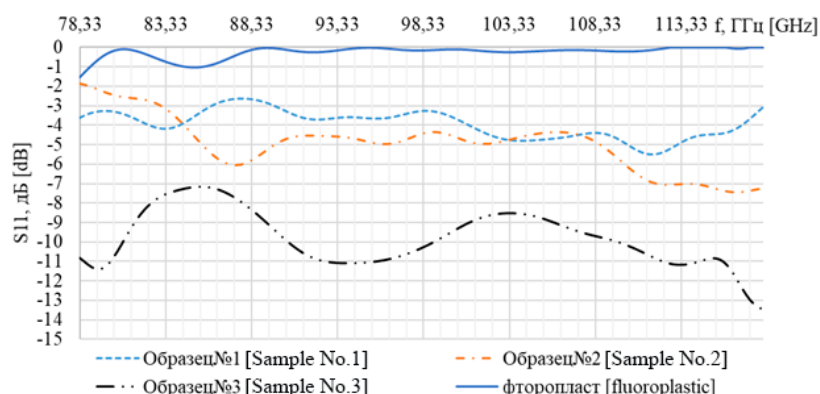


Рис. 5. Зависимость амплитуды коэффициента отражения исследуемых образцов от частоты в диапазоне частот от 78,33 до 118,1 ГГц

Fig. 5. The dependence of the reflection coefficient's amplitude of the samples under study on the frequency in the frequency range from 78.33 to 118.1 GHz

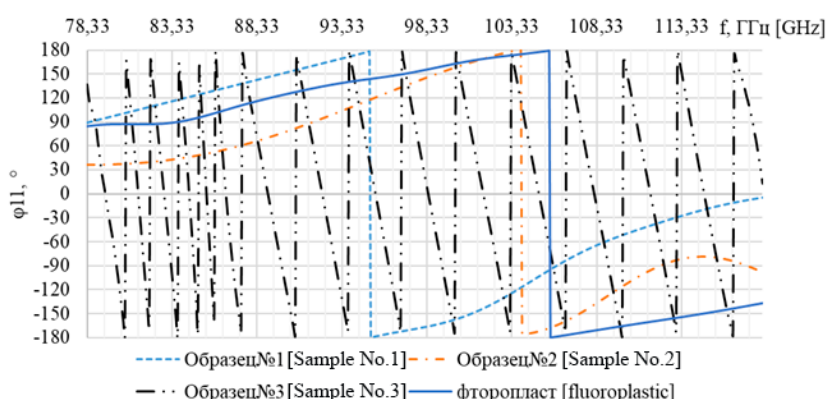


Рис. 6. Зависимость фазы коэффициента отражения исследуемых образцов от частоты в диапазоне частот от 78,33 до 118,1 ГГц

Fig. 6. The dependence of the reflection coefficient's phase (b) of the samples under study on the frequency in the frequency range from 78.33 to 118.1 GHz

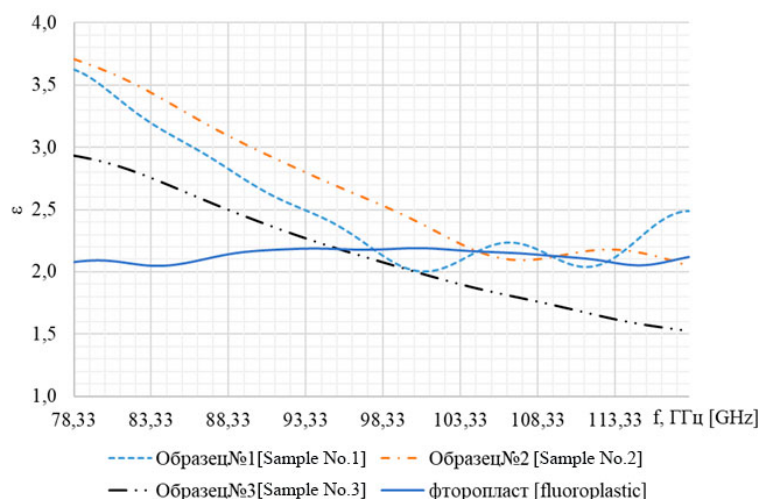


Рис. 7. Зависимость диэлектрической проницаемости исследуемых образцов от частоты в диапазоне частот от 78,33 до 118,1 ГГц

Fig. 7. The dependence of the dielectric permittivity of the samples under study on the frequency in the frequency range from 78.33 to 118.1 GHz

Из рис. 6 видно, что образец № 3 сильно отличается характером изменения фазы коэффициента отражения от остальных образцов. Это связано с тем, что данный образец имеет ярко выраженную отражающую способность (значение коэффициента отражения по амплитуде около -11 дБ, рис. 5), что вызывает фазовые «скачки» коэффициента отражения.

Зависимость диэлектрической проницаемости от частоты для фторопласта представляет собой практически прямую линию, численно эквивалентную значению 2,1, заявленному в ГОСТ 14906, диэлектрическая проницаемость керамических образцов в целом согласуется с данными, приведенными в литературе [1, 4] для значений частот вблизи 10 ГГц. Расширенная неопределенность полученных результатов составляет $\pm 3\%$. Из рис. 7 видно, что для всех трех образцов наблюдается монотонное уменьшение значения ϵ до частот порядка 100 ГГц. Для частот выше 100 ГГц значения ϵ образцов № 1 и № 2 стабилизируются и близки к величине ϵ фторопласта, для образца № 3 наблюдается дальнейшее снижение величины ϵ с ростом частоты, но с меньшей скоростью. Можно предположить, что наблюдаемое отличие свойств образца № 3 от образцов № 1 и № 2 вызвано различным процентным содержанием нитрида бора. Как видно из [5], с ростом этого показателя диэлектрическая проницаемость увеличивается. Очевидно, в образце № 3 преобладают свойства, обусловленные наличием кремния, а вклад нитрида бора проявляется слабее из-за его малого содержания. Таким образом, для создания конструктивных элементов в радиолокации наиболее подходит материал образца № 1, так как его S -параметры и диэлектрическая проницаемость в наибольшей степени удовлетворяют техническим требованиям, предъявляемым к данным элементам.

Заключение

С помощью измерительной установки, состоящей из измерителя комплексных коэффициентов отражения и передачи, волноводного измерительного тракта со специальной измерительной ячейкой, обеспечивающей незначительное влияние мод высших порядков, измерены комплексные значения коэффициентов передачи и отражения, а также диэлектрическая проницаемость керамических образцов с различным содержанием нитрида бора и эталонного образца (фторопласта) в диапазоне частот от 78,33 до 118,1 ГГц. Полученные экспериментальные данные для исследованных материалов находятся в согласии с результатами, приводимыми в литературе для других частот, и позволяют определить материал, свойства которого наиболее приемлемы для изготовления радиолокационных конструктивных элементов.

Список литературы

1. Hu C., Liu P. Preparation and microwave dielectric properties of SiO₂ ceramics by aqueous Sol-Gel technique. *Journal of Alloys and Compounds*. 2013;559:129-133. DOI: 10.1016/j.jallcom.2012.11.168.
2. Luukkonen O., Maslovski S. I., Tretyakov S. A. 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.
3. Певнева Н. А., Гурский А. Л., Кострикин А. М. Метод свободного пространства с использованием векторного анализатора цепей для определения диэлектрической проницаемости материалов на СВЧ. *Доклады БГУИР*. 2019;4(122):32-39.
4. Braun H. P., Mehmood A., Hovhannisyan M., Zhang H., Heidary D.S.B., Randall C., Lanagan M. T., Jakoby R., Reaney I. M., Letz M., Elmers H. J. Microwave properties and structure of La-Ti-Si-B-O glass-ceramics for applications in GHz electronics. *Journal of the European Ceramic Society*. 2017;37:2137-2142. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2016.11.048.
5. Li Q., Yang Z., Miao Y., Liang B., Cai D., Wang S., Duan X., Jia D., Zhou Y. Effect of the BN content on the thermal shock resistance and properties of BN/SiO₂ composites fabricated from mechanically alloyed SiBON powders. *The Royal Society of Chemistry*. 2017;7:48994-49003. DOI: 10.1039/C7RA09905C.

References

1. Hu C., Liu P. Preparation and microwave dielectric properties of SiO₂ ceramics by aqueous Sol-Gel technique. *Journal of Alloys and Compounds*. 2013;559:129-133. DOI: 10.1016/j.jallcom.2012.11.168.
2. Luukkonen O., Maslovski S. I., Tretyakov S. A. 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.

3. Pevneva N. A., Gurskii A. L., Kostrikin A. M. [The free space method using a vector network analyzer for determining the permittivity of materials at microwave frequencies]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2019;4(122):32-39. (In Russ.)
4. Braun H. P., Mehmood A., Hovhannisyan M., Zhange H., Heidary D.S.B., Randall C., Lanagan M. T., Jakoby R., Reaney I. M., Letz M., Elmers H. J. Microwave properties and structure of La–Ti–Si–B–O glass-ceramics for applications in GHz electronics. *Journal of the European Ceramic Society*. 2017;37:2137-2142. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2016.11.048.
5. Li Q., Yang Z., Miao Y., Liang B., Cai D., Wang S., Duan X., Jia D., Zhou Y. Effect of the BN content on the thermal shock resistance and properties of BN/SiO₂ composites fabricated from mechanically alloyed SiBON powders. *The Royal Society of Chemistry*. 2017;7:48994-49003. DOI: 10.1039/C7RA09905C.

Вклад авторов

Певнева Н.А. представила замысел и дизайн исследования, провела исследования, подготовила статью к публикации, обработала данные, отредактировала и оформила статью для публикации.

Кондрашов Д.А. подготовил экспериментальную установку и исследуемые образцы, проанализировал и интерпретировал данные.

Гурский А.Л. отредактировал и окончательно утвердил рукопись для публикации, произвел ее критический пересмотр в части значимого интеллектуального содержания.

Гусинский А.В. осуществил постановку задачи и выработку технических требований к экспериментальной установке.

Authors' contribution

Pevneva N.A. presented the research concept and design, performed research, prepared an article for publication, processed the data, edited and designed the article for publication.

Kondrashov D.A. prepared the experimental equipment and test samples, analyzed and interpreted the data.

Gurskii A.L. edited and finally approved the manuscript for publication, made its critical revision in terms of significant intellectual content.

Gusinsky A.V. carried out the formulation of the problem and the development of technical requirements for the experimental equipment.

Сведения об авторах

Певнева Н.А., к.т.н., старший научный сотрудник Центра 1.9 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Кондрашов Д.А., старший научный сотрудник Центра 1.9 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Гурский А.Л., д.ф.-м.н., профессор кафедры защиты информации Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Гусинский А.В., к.т.н., доцент, начальник Центра 1.9 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Pevneva N.A., Ph.D., Senior Researcher at the Center 1.9 of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Kondrashov D.A., Senior Researcher at the Center 1.9 of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Gurskii A.L, PhD, Professor at the Information Protection Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Gusinsky A.V., PhD, Associate Professor, Head at the Center 1.9 of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники;
тел. +375-17-293-20-92;
e-mail: peuneva@bsuir.by;
Певнева Наталья Алексеевна

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka Str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics;
tel. +375-17-293-20-92;
e-mail: peuneva@bsuir.by;
Pevneva Natalia Alekseevna