



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-8-67-74>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.37

ЭЛЕМЕНТ СОГЛАСОВАНИЯ ВОЛНОВОДНОЙ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ С ДИОДОМ

И. А. ЗАХАРОВ, О. А. КАРМАНОВА, А. В. ГУСИНСКИЙ, М. М. КАСПЕРОВИЧ,
Д. Г. БУЛАВКО, А. Н. КУЗЮКОВ, Д. А. ЛИСОВ, Ю. В. ШЕВАЛДИНА

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

Поступила в редакцию 30.09.2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

Аннотация. Рассмотрены вопросы согласования волноводной линии передачи с диодами миллиметрового диапазона длин волн. Описана реализация перехода с прямоугольного волновода на микрополосковую линию передачи в виде линии типа фин-лайн. Показаны результаты компьютерного моделирования модуля коэффициента передачи разработанного элемента и коэффициента стоячей волны по напряжению отдельно перехода с прямоугольного волновода на микрополосковую линию передачи и в составе амплитудного детектора. Представлена реализация совместного применения разработанного элемента с микрополосковым детектором на базе диода Шоттки в диапазоне частот от 118,1 до 178,4 ГГц. Приведены результаты измерения его параметров и определения чувствительности. При оценке полученных данных подтверждена возможность применения разработанного элемента согласования волноводной линии передачи с диодом в миллиметровом диапазоне длин волн.

Ключевые слова: элемент согласования, волноводная линия передачи с диодом, детектор миллиметрового диапазона длин волн, смеситель, фин-лайн.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Элемент согласования волноводной линии передачи с диодом / И. А. Захаров [и др.] // Доклады БГУИР. 2022. Т. 20, № 8. С. 67–74. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-8-67-74>.

ELEMENT FOR MATCHING A WAVEGUIDE TRANSMISSION LINE WITH A DIODE

IVAN A. ZAKHAROV, OLGA A. KARMANOVA, ALEKSANDER V. GUSINSKY,
MARINA M. KASPEROVICH, DMITRY G. BULAVKO, ANTON N. KUZYUKOV,
DMITRY A. LISOV, YULIYA V. SHEVALDINA

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

Submitted 30.09.2022

Abstract. The article deals with the issues of matching a waveguide transmission line with millimeter wave diodes. The implementation of the transition of a rectangular waveguide to a microstrip switching line in the form of a line of the fin-line type is described. The computer simulation results of the transmission coefficient module of the developed element and the standing wave coefficient by voltage separately for the transition from a rectangular waveguide to a microstrip transmission line and as part of an amplitude detector are shown. A joint application of the developed element with a microstrip detector based on a Schottky diode in the frequency range from 118.1 to 178.4 GHz is proposed. The results of measuring its parameters and the results of determining the sensitivity are given, as well as the evaluation of the results obtained is performed. The obtained results proved the possibility of using the matching element of a waveguide transmission line with a diode in the millimeter wavelength range.

Keywords: matching element, waveguide transmission line with a diode, millimeter wave detector, mixer, fin-line.

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

For citation. Zakharov I. A., Karmanova O. A., Gusinsky A. V., Kasperovich M. M., Bulavko D. G., Kuzyukov A. N., Lisov D. A., Shevaldina Y. V. (2022) Element for Matching a Waveguide Transmission Line with a Diode. *Doklady BGUIR*. 20 (8), 67–74. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-8-67-74> (in Russian).

Введение

Одним из важнейших вопросов при разработке волноводных устройств миллиметрового диапазона длин волн, таких как детекторы, смесители, умножители и т. п., является согласование волноводной линии передачи с диодами. При этом в данном диапазоне частот исследований довольно мало. Основные требования, которые учитываются при разработке элемента согласования волноводной линии передачи с диодом, – обеспечение концентрации сигнала на диоде, широкий частотный диапазон, минимизация массогабаритных параметров, минимизация потерь сигнала в переходе с прямоугольного волновода на микрополосковую линию передачи при обеспечении малого коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН).

Для решения поставленных задач провели анализ существующих решений и выбрали реализацию с применением линии типа фин-лайн. В статье описаны результаты проведенного моделирования с последующей их реализацией в конструкции амплитудного детектора в диапазоне частот от 118,1 до 178,4 ГГц. В качестве критерия оценки качества реализации разработки выбрали чувствительность детектора и поставили задачу обеспечить чувствительность не менее 500 В/Вт при уровне входной мощности 20 мкВт. Представлены результаты испытаний после практической реализации.

Элемент согласования волноводной линии передачи с микрополосковой линией

Элемент согласования (переход с прямоугольного волновода на микрополосковую линию передачи в виде линии типа фин-лайн) представляет собой микрополосковую линию, размещенную в E -плоскости волновода, конструкция которой представлена на рис. 1 [1].

Как правило, пластины представляют собой металлические пленки на тонкой диэлектрической подложке, смонтированной в E -плоскости прямоугольного волновода. Для основной моды ток протекает в осевом (продольном) направлении, так что хороший электрический контакт между пластинами и волноводом не существует. По существу, фин-лайн является экранированной целевой линией и может быть согласована с прямоугольным волноводом посредством переходной

секции, используя один или несколько четвертьволновых трансформаторов импеданса. Фин-лайн годится для применения в СВЧ-цепях, которые содержат двухполюсные устройства, такие как диоды. Транзисторы не могут быть подключены к фин-лайн, поскольку являются трехполюсными устройствами [2].

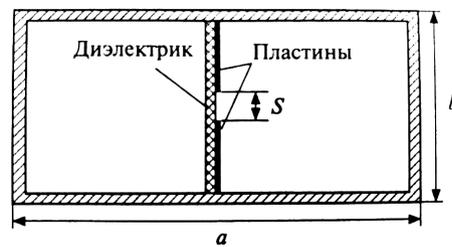


Рис. 1. Волноводная линия типа фин-лайн
Fig. 1. Fin-line waveguide line

Конструктивный элемент согласования микрополосковой линии передачи с диодами

Микрополосковая линия – один из наиболее распространенных типов планарных линий передачи, используемых в микроволновых и миллиметровых схемах, в первую очередь из-за возможности ее изготовления методами фотолитографии легкого интегрирования с другими пассивными и активными СВЧ-компонентами. На ее основе реализуется большой ряд пассивных устройств, таких как фильтры, резонаторы, диплексеры, распределительные схемы и согласующие компоненты [3].

Элемент согласования в своем составе имеет проводник шириной ω , нанесенный на тонкую, заземленную диэлектрическую подложку толщиной d и относительной проницаемостью ϵ_r . Если бы не было диэлектрика ($\epsilon_r = 1$), была бы линия передачи, представляющая собой двухпроводную линию, содержащую два плоских проводника шириной ω , разделенных расстоянием $2d$ (земляная пластина – основание, может быть устранено из рассмотрения в соответствии с теорией отображения) [4].

Наличие диэлектрика и факт, что диэлектрик не заменяет воздух в области выше полоски $y > d$, усложняют свойства и анализ микрополосковой линии. В отличие от полосковой линии, где все поля содержатся внутри однородной области диэлектрика, микрополосковая линия имеет в области диэлектрика часть (обычно большую) линий поля, сконцентрированных между полосковым проводником в основной (земляной) пластине (основании), и некоторую часть в воздушной области над подложкой.

Результаты моделирования

С целью определения необходимых параметров разработанного устройства до его практической реализации провели моделирование. Для этого составили модель перехода в виде линии фин-лайн, а также модель микрополосковой линии передачи детектора совместно с разработанным переходом. В качестве диэлектрика выбрали углеводородную керамическую подложку RO4350B, обладающую свойствами, необходимыми разработчикам радиочастотных микроволновых цепей и согласующих сетей, а также линий передачи с регулируемым импедансом. Низкие диэлектрические потери позволяют использовать материалы серии RO4000 во многих случаях, где более высокие рабочие частоты ограничивают применение обычных подложек для печатных плат. Температурный коэффициент диэлектрической проницаемости является одним из самых низких среди всех материалов печатных плат, а диэлектрическая проницаемость стабильна в широком диапазоне частот [5]. Это делает керамическую подложку RO4350B идеальной для применения в миллиметровом диапазоне длин волн. На рис. 2 представлена зависимость полученного по результатам моделирования коэффициента передачи разработанного перехода от частоты.

При моделировании получено, что выбранная структура вносит незначительное затухание сигнала, дальнейшее снижение ослабления за счет уменьшения размеров структуры приводит к повышению значения КСВН, что противоречит поставленной задаче. На рис. 3 представлен график КВСН разработанного перехода, полученного по результатам моделирования.

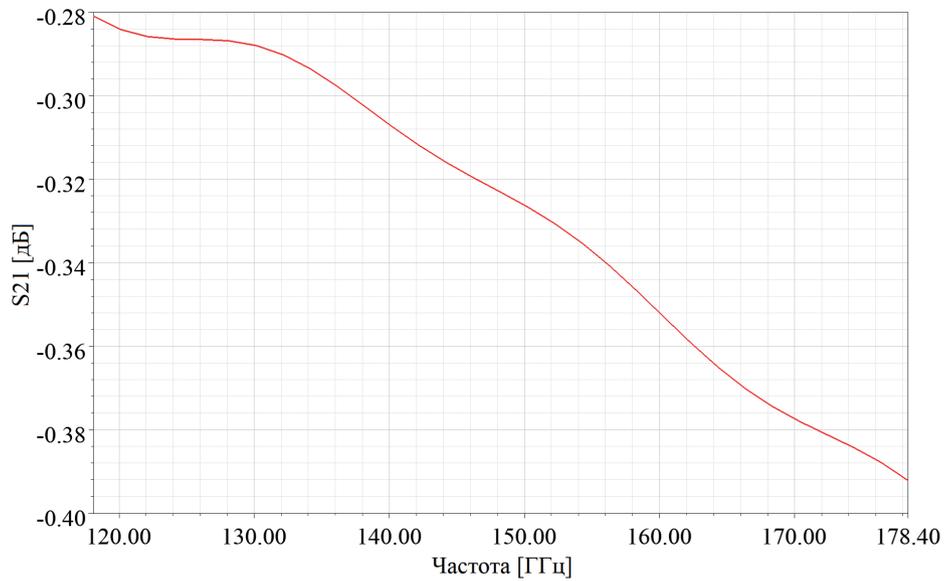


Рис. 2. Зависимость коэффициента передачи от частоты разработанного перехода
Fig. 2. The dependence of the transfer coefficient on the frequency of the developed transition

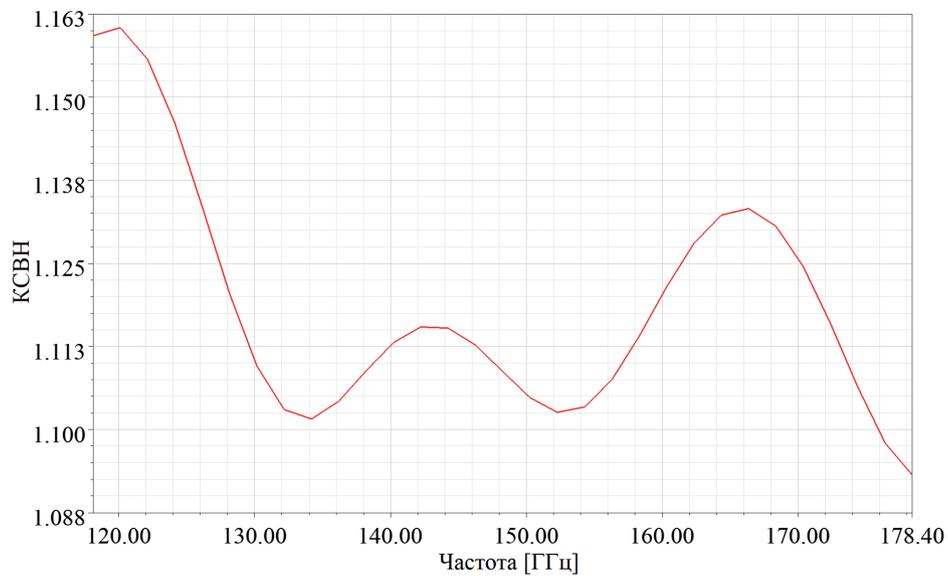


Рис. 3. Коэффициент стоячей волны по напряжению разработанного перехода
Fig. 3. Voltage standing wave ratio of the developed transition

На следующем этапе проводили моделирование перехода с прямоугольного волновода на микрополосковую линию передачи совместно с амплитудным детектором на базе диода Шоттки. Структура детектора совместно с переходом показана на рис. 4.

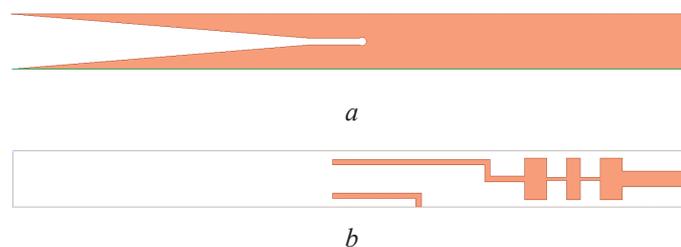


Рис. 4. Плата детектора: *a* – вид сверху; *b* – вид снизу
Fig. 4. Detector PCB: *a* – top view; *b* – bottom view

На рис. 5 изображен график КСВН, полученный по результатам моделирования перехода совместно с детектором. Необходимо отметить, что на значение КСВН огромное влияние оказывают особенности применяемого диода.

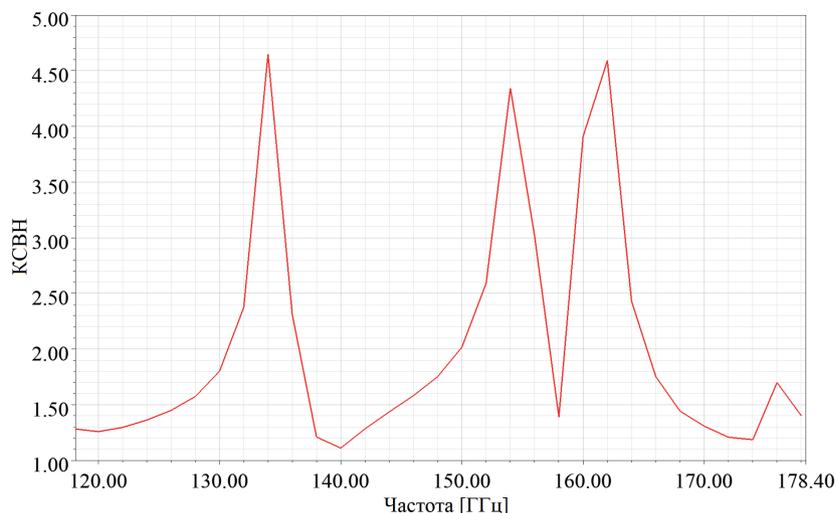


Рис. 5. Коэффициент стоячей волны по напряжению, полученный по результатам моделирования перехода совместно с детектором
Fig. 5. Voltage standing wave ratio of the transition together with the detector

Полученные результаты моделирования позволили перейти к практической реализации устройства и определению его характеристик на практике.

Практическая реализация

Критерием успешной практической реализации является законченное изделие, которое подтверждает результаты моделирования. Внешний вид полученного детектора показан на рис. 6.



Рис. 6. Внешний вид детектора
Fig. 6. Received detector

Технические характеристики изготовленного детектора приведены в табл. 1, а характеристики показателей при измерении его чувствительности – в табл. 2.

Таблица 1. Технические характеристики изготовленного детектора
Table 1. Specifications of the manufactured detector

Наименование параметра / Parameter name	Техническая характеристика / Technical specification
Диапазон рабочих частот, ГГц	118,1–178,4
Сечение волновода, мм	1,6×0,8
Порт входа	Прямоугольный фланец согласно ГОСТ 13317–89
Порт выхода	Коаксиальный тип IX, вариант 1
Допустимая входная мощность, мВт	10
Чувствительность на уровне 20 мкВт, В/Вт	Не менее 500

Таблица 2. Характеристики показателей при измерении чувствительности детектора
Table 2. Detector sensitivity

Частота, ГГц / Frequency, GHz	Мощность, мВт / Power level, mW	Напряжение, мВ / Voltage, mV	Чувствительность по напряжению β , В/Вт / Voltage sensitivity β , V/W	Неопределенность измерений β , % / Uncertainty of measurements β , %
129	1,00	367,0	367	10
	0,10	86,3	863	17
	0,02	32,2	1610	26
135	1,00	346,2	346	10
	0,10	80,2	802	17
	0,02	30,2	1510	27
140	1,00	363,0	363	10
	0,10	82,0	820	17
	0,02	30,5	1525	27

В процессе экспериментальных исследований определена чувствительность разработанного детектора, проведены обработка результатов и оценка полученной неопределенности измерений. Для оценки параметров детектора использовали оборудование: генератор Г4-161, ваттметр МЗ-75, цифровой мультиметр VM867S, блок питания Mastech NY3005B, измеритель комплексных коэффициентов отражения и передачи P4-MBM-178.

Для определения чувствительности детектора β , В/Вт, составили модель измерения без учета рассогласования, описываемую формулой

$$\beta = \frac{U}{P_{\text{вх}}} + \delta_U + \delta_{\text{ген}} + \delta_P, \quad (1)$$

где U – измеренное значение разностного напряжения, В; $P_{\text{вх}}$ – измеренное значение входной мощности, Вт; δ_U – неопределенность измерений напряжения, В/Вт; $\delta_{\text{ген}}$ – неопределенность измерений мощности, подаваемой на детектор, В/Вт; δ_P – неопределенность измерений ваттметра, В/Вт.

Полученная характеристика КСВН представлена на рис. 7.

Несовпадение экстремумов на графиках, полученных по результатам моделирования и измерений, обусловлено индивидуальными характеристиками применяемого диода.

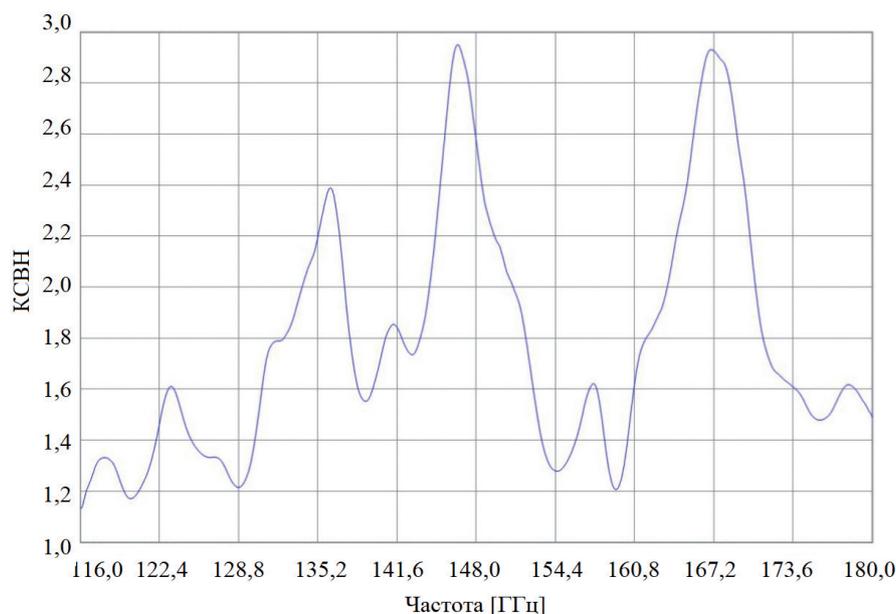


Рис. 7. Коэффициент стоячей волны по напряжению изготовленного детектора
Fig. 7. Voltage standing wave ratio of the fabricated detector

Заключение

1. Представлен полученный в результате моделирования элемент согласования в диапазоне частот от 118,1 до 178,4 ГГц, позволяющий выполнить переход с прямоугольного волновода на микрополосковую линию передачи. Элемент имеет малые собственные потери и коэффициент стоячей волны по напряжению, что позволяет применить полученную структуру на практике.

2. Выполнены исследования совместного применения разработанного элемента с микрополосковым детектором на базе диода Шоттки в диапазоне частот от 118,1 до 178,4 ГГц. Коэффициент стоячей волны по напряжению разработанного устройства не превышает 3, а чувствительность его при 20 мкВт – не менее 500 В/Вт.

Список литературы

1. Шаров, Г. А. Основы теории сверхвысокочастотных линий передачи, цепей и устройств / Г. А. Шаров. М.: Горячая линия – Телеком, 2016. 472 с.
2. Вайнштейн, Л. А. Электромагнитные волны / Л. А. Вайнштейн. М.: Советское радио, 1957.
3. Jeruchim, M. Simulation of Communication Systems: Modeling, Methodology and Techniques / M. Jeruchim, P. Balaban. US: Springer, 2005. P. 654–670.
4. Rade, L. Beta, Mathematics Handbook for Science and Engineering / L. Rade, B. Westergren. Sweden: Artech House, 2011. P. 145–151.
5. Rogers Corporation [Electronic Resource]. Mode of access: <https://rogerscorp.com/>.

References

1. Sharov G. A. (2016) *Fundamentals of the Theory of Microwave Transmission Lines, Circuits and Devices*. Moscow, Hotline – Telecom. 472 (in Russian).
2. Weinstein L. A. (1957) *Electromagnetic Waves*. Moscow, Soviet Radio Publ. (in Russian).
3. Jeruchim M., Balaban P. (2005) *Simulation of Communication Systems: Modeling, Methodology and Techniques*. US, Springer. 654–670.
4. Rade L., Westergren B. (2011) *Beta, Mathematics Handbook for Science and Engineering*. Sweden, Artech House Publ. 145–151.
5. Rogers Corporation [Electronic Resource]. Available: <https://rogerscorp.com/>.

Вклад авторов / Authors' contribution

Все авторы внесли равный вклад в написание статьи / All authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Захаров И. А., аспирант кафедры защиты информации, младший научный сотрудник Центра 1.9 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Карманова О. А., аспирант кафедры микро- и нанoeлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, инженер-программист цеха радиационной безопасности ГП «Белорусская АЭС».

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

Касперович М. М., научный сотрудник Центра 1.9 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Zakharov I. A., Postgraduate at the Information Security Department, Junior Researcher at the Center 1.9 of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Karmanova O. A., Postgraduate at the Department of Micro- and Nanoelectronics of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Software Engineer of the Repair Group of the Radiation Safety Department of SE “Belarusian NPP”.

Gusinsky A. V., Cand. of Sci., Director of the Center 1.9 of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Kasperovich M. M., Researcher at the Center 1.9 of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Булавко Д. Г., аспирант кафедры защиты информации, младший научный сотрудник Центра 1.9 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Кузюков А. Н., аспирант кафедры защиты информации, младший научный сотрудник Центра 1.9 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Лисов Д. А., аспирант кафедры защиты информации, младший научный сотрудник Центра 1.9 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Шевалдина Ю. В., аспирант кафедры защиты информации, консультант управления метрологии Государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел. +375 29 262-09-88
E-mail: iv.andr.zakharov@gmail.com
Захаров Иван Андреевич

Bulavko D. G., Postgraduate at the Information Security Department, Junior Researcher at the Center 1.9 of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Kuzyukov A. N., Postgraduate at the Information Security Department, Junior Researcher at the Center 1.9 of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Lisov D. A., Postgraduate at the Information Security Department, Junior Researcher at the Center 1.9 of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Shevaldina Y. V., Postgraduate at the Information Security Department, Consultant at the Metrology Department of the State Committee for Standardization of the Republic of Belarus.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel. +375 29 262-09-88
E-mail: iv.andr.zakharov@gmail.com
Zakharov Ivan Andreevich