



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-3-97-104>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 537.874, 620.22

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭКРАНИРОВАНИЯ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ИМПУЛЬСОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ КОНСТРУКЦИЯМИ ЭКРАНОВ НА ОСНОВЕ ИГЛОПРОБИВНОГО МАТЕРИАЛА

МОРДАЧЕВ В.И., ЦИОНЕНКО Д.А., АБДУЛХАДИ Х.Д.А., ПУХИР Г.А., ПРУДНИК А.М.

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

Поступила в редакцию 10 апреля 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. Для защиты электронных систем от импульсного воздействия электромагнитных полей предлагается экранирование импульсов конструкциями экранов на основе иглопробивного и войлочного материалов, в том числе содержащих пропитывающие жидкости. Измерение экранирующих характеристик полученных экранов проводилось с помощью испытательного комплекса импульсных электромагнитных полей, работающего по принципу воспроизведения в пространстве сверхкоротких электромагнитных импульсов вертикальной (горизонтальной) поляризации с амплитудой импульсов в начале рабочей зоны не менее 5 и 50 кВ/м. Испытательный комплекс включал в себя генераторы импульсных напряжений, высоковольтные коаксиальные кабели, антенно-фидерное устройство, цифровой индикатор поля, кабель и выносную кнопку дистанционного пульта. Эффективная полоса частот импульса была от 130 МГц до 2,31 ГГц. Мощность импульса в начале рабочей зоны 5,34 МВт. При каждом испытании осуществлялось излучение 5 пачек импульсов и измерение амплитуд импульсов. Каждая пачка импульсов имела длительность 1 с. Частота импульсов в пачке составляла 1 кГц. Осуществляли расчет эффективности экранирования, усредненной по эффективной полосе частот, и определяли погрешность. Получены значения эффективности экранирования электромагнитного импульса, которые для иглопробивного материала с содержанием углеродных волокон составляют 9,4...15,5 дБ, в зависимости от пропитывающей жидкости, а для войлочной ткани со слоем полимерной металлизированной пленки – 9,7...12,4 дБ, в зависимости от пропитывающей жидкости, что позволяет использовать их для создания конструкций экранов для защиты электронных систем от деструктивного воздействия электромагнитного оружия.

Ключевые слова: электромагнитное поле, электромагнитный импульс, электромагнитное оружие, экранирующий материал, иглопробивное полотно, эффективность экранирования.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Мордачев В.И., Ционенко Д.А., Абдулхадиди Х.Д.А., Пухир Г.А., Прудник А.М. Эффективность экранирования широкополосных импульсов электромагнитного излучения конструкциями экранов на основе иглопробивного материала. Доклады БГУИР. 2020; 18(3): 97-104.

SHIELDING EFFICIENCY OF WIDE-BAND PULSES OF ELECTROMAGNETIC RADIATION BY SHIELDS BASED ON THE NEEDLE-PUNCHING MATERIAL

ULADZIMIR I. MORDACHEV, DMITRY A. TSYANENKA, HAITHAM D.A. ABDULHADI,
HALINA A. PUKHIR, ALEKSANDER M. PRUDNIK

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

Submitted 10 April 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. To protect electronic systems from the wide-band pulses of electromagnetic radiation, it is proposed to use the shields designed based on needle-punched and felt materials, including those with impregnating liquids. The shielding characteristics of the obtained shields were measured using a test complex of pulsed electromagnetic fields operating on the principle of reproducing ultrashort electromagnetic pulses of vertical (horizontal) polarization with the amplitude at the beginning of the working area of at least 5 and 50 kV/m. The test complex included voltage pulse generators, high-voltage coaxial cables, an antenna feeder, a digital field indicator, a cable and a remote control button. The effective frequency band of the pulse was from 130 MHz to 2.31 GHz. The pulse power at the beginning of the work was 5.34 MW. In each test, 5 packs of pulses were emitted and pulse amplitudes were measured. Each burst of pulses had a duration of 1 s. The pulse frequency in the packet was 1 kHz. The shielding efficiency averaged over the effective frequency band was calculated and the error was determined. The values of electromagnetic pulse shielding efficiency were obtained, which equaled 9.4...15.5 dB for a needle-punched material with a carbon additive, and 9.7...12.4 dB for felt fabric with a layer of polymer metallized film, which allows using them to design the shields to protect electronic systems from the destructive effects of electromagnetic weapons.

Keywords: electromagnetic field; electromagnetic pulse; electromagnetic weapon; shielding material; needle-punched fabric; aluminium foil, shielding efficiency.

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

For citation. Mordachev V.I., Tsyankenka D.A., Abdulhadi H.D.A., Pukhir H.A., Prudnik A.M. Shielding efficiency of wide-band pulses of electromagnetic radiation by shields based on the needle-punching material. Doklady BGUIR. 2020; 18(3): 97-104.

Введение

Актуальность работы обусловлена необходимостью защиты электронных систем от импульсного воздействия электромагнитных полей, которые могут создавать помехи их функционированию, приводить к деградации компонентов и в конечном итоге делать непригодными для дальнейшей эксплуатации. Практика применения средств защиты устройств и систем от воздействия электромагнитных полей обуславливает необходимость постоянного улучшения их технических и эксплуатационных характеристик. Это в первую очередь относится к методам и средствам защиты от воздействия электромагнитного оружия, которое при соответствующей мощности импульса способно поражать недостаточно защищенные электронные системы [1].

В настоящий момент разработаны и испытаны системы электромагнитного оружия, которые предназначены для поражения компонентов электронных систем различного назначения [2]. При воздействии сильных электромагнитных полей, в результате наведения электромагнитной индукции, образуются токи большой величины во всех проводящих и полупроводниковых материалах, что приводит к сбоям в функционировании электронных систем, а в ряде случаев переводит их в неремонтопригодное состояние [3].

Суть защиты от электромагнитного оружия заключается в разработке и конструировании экранирующих конструкций, предназначенных для уменьшения воздействующего на электронные системы электромагнитного импульса [4]. Экранирование позволяет

уменьшать опасные напряжения и токи, наводимые в аппаратуре и системах под действием импульсного излучения, а также уровни полей, проникающих в экранированные сооружения по линиям связи.

Методика проведения эксперимента

Значение эффективности экранирования по отношению к широкополосным электромагнитным импульсам, усредненное по диапазону частот в их спектре, определялось как отношение амплитуды электрического поля, измеренной в отсутствие защитных материалов $|E_0|$, к амплитуде, измеренной при их наличии $|E'|$:

$$S_E = 20 \log \left(\frac{|E_0|}{|E'|} \right). \quad (1)$$

Такой подход обеспечивает выполнение условий наихудшего случая при анализе эффективности экранирования (т. е. обеспечивает отсутствие переоценки эффективности экранирования), так как не учитывает изменение формы временной реализации импульса при его прохождении через защитный материал. Известно, что эффективность экранирования материалов изменяется с изменением частоты, что вызывает изменение формы импульса, причем при экранировании оно связано не только с уменьшением амплитуды, но и с увеличением длительности фронта импульса. Это приводит к уменьшению скорости нарастания электрической и магнитной компонент импульса и снижению вероятности выхода из строя аппаратуры под его воздействием. Таким образом, метод анализа, основанный на определении изменения только амплитуды импульсного поля, позволяет оценить эффективность использования материалов для защиты радиоэлектронного оборудования при его непосредственном применении (т. е. в полевых условиях) без внесения конструктивных изменений в защищаемое оборудование.

Для исследования эффективности экранирования электромагнитного импульса были изготовлены несколько групп образцов конструкций экранов. Образец № 1 представлял собой иглопробивной материал с содержанием углеродных волокон производства АО «ЦНИИЛКА» (г. Москва, Российская Федерация). Исследовались три разновидности образца № 1. Первая группа образцов представляла собой сухой материал массой 0,62 кг, а вторая группа образцов представляла собой образцы, пропитанные водопроводной водой массой 0,86 кг. Третья группа образцов представляла собой образцы, пропитанные насыщенным раствором NaCl массой 0,84 кг. Образец № 2 представлял собой вспененный полиэтилен с металлизированной пленкой с одной стороны. Образец № 3 представлял собой двухслойный материал производства БГУИР. Один слой материала – войлочная ткань, пропитанная CaCl₂, а второй слой – полимерная металлизированная пленка. Исследовались две разновидности образца № 3. Первая группа образцов представляла собой сухой материал массой 2,17 кг, а вторая группа образцов представляла собой образцы, пропитанные водопроводной водой массой 3,42 кг.

Для исследования эффективности экранирования использовался испытательный комплекс импульсных электромагнитных полей (рис. 1), работающий по принципу воспроизведения в пространстве сверхкоротких электромагнитных импульсов вертикальной (горизонтальной) поляризации с амплитудой импульсов в начале рабочей зоны не менее 50 кВ/м при использовании генератора импульсных напряжений ГИН 50-1000 и не менее 5 кВ/м при использовании генератора импульсных напряжений ГИН 5-1000 (рис. 2). В табл. 1 представлены характеристики воспроизводимых импульсов и их значения.

Возможность визуального контроля работоспособности излучателя комплекса и измерения амплитуды напряженности электрического поля реализуется с помощью электронного цифрового индикатора электрического поля в диапазоне от 2 до 20 кВ/м с относительной погрешностью $\pm 20\%$. Эффективная полоса частот импульса (на эффективную полосу частот приходится 90 % энергии импульса, 5 % приходится на частоты, меньшие нижней границы эффективной полосы, и 5% энергии – на частоты, большие верхней частоты) от 130 МГц до 2,31 ГГц. Мощность импульса в начале рабочей зоны составляет 5,34 МВт (рис. 3).



Рис. 1. Испытательный комплекс импульсных электромагнитных полей: 1 – ГИН 50–1000 (а) и ГИН 5-1000 (б); 2 – высоковольтные коаксиальные кабели; 3 – антенно-фидерное устройство; 4 – цифровой индикатор поля; 5 – сетевой кабель; 6 и 7 – кабель и выносная кнопка дистанционного пульта
Fig. 1. Test complex of pulsed electromagnetic radiation: 1 – GIN 50-1000 (a) and GIN 5-1000 (b); 2 – high-voltage coaxial cables; 3 – antenna feeder; 4 – digital field indicator; 5 – network cable; 6 and 7 – cables and remote controls

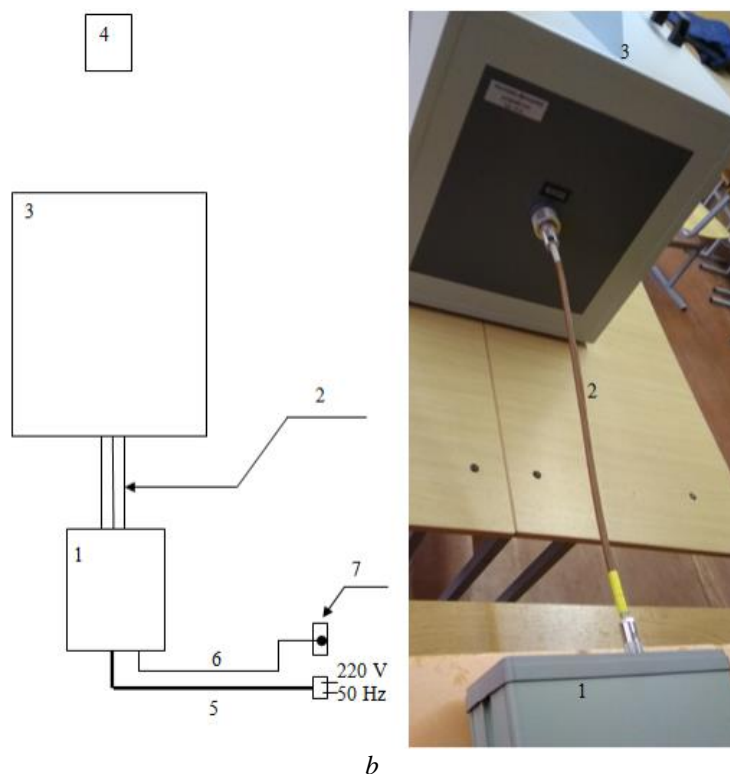
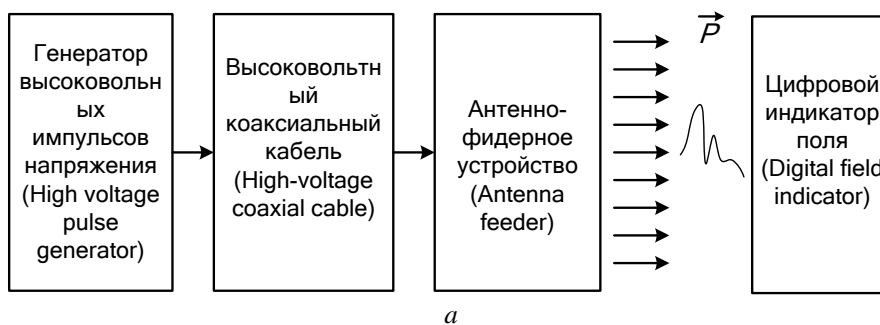


Рис. 2. Структурная схема (а) и блок-схема (б) подключения испытательного комплекса
Fig. 2. Functional block diagram (a) and block diagram (b) of the test complex connection

Таблица 1. Характеристики излучаемых электромагнитных импульсов и их значения
Таблица 1. Characteristics of radiated electromagnetic pulses and their values

Характеристика (characteristic)	Value
Частота повторения импульсов	1000 Гц
Длительность серии импульсов	1,0 с ± 10 %
Интервал времени между сериями импульсов	не менее 10 с
Амплитуда импульса в начале рабочей зоны на оси излучения при использовании ГИН 50-1000	не менее 50 кВ/м
Размер зоны облучения с номинальной амплитудой импульса с неоднородностью 3 дБ вблизи начала рабочей зоны при использовании ГИН 50-1000 (номинальная амплитуда импульса 50 кВ/м), не менее	1,20×0,58 м
Расстояние от центра раскрытия антенны до точки с номинальной амплитудой импульса на оси излучения антенны при использовании ГИН 50-1000 (номинальная амплитуда импульса 50 кВ/м)	1,65 м ± 20 %
Длительность фронта импульса между уровнями от 0,1 до 0,9 от амплитуды на оси излучения при использовании ГИН 50-1000	140 пс ± 10 %
Длительность импульса по уровню 0,5 от амплитуды на оси излучения при использовании ГИН 50-1000	250 пс ± 10 %

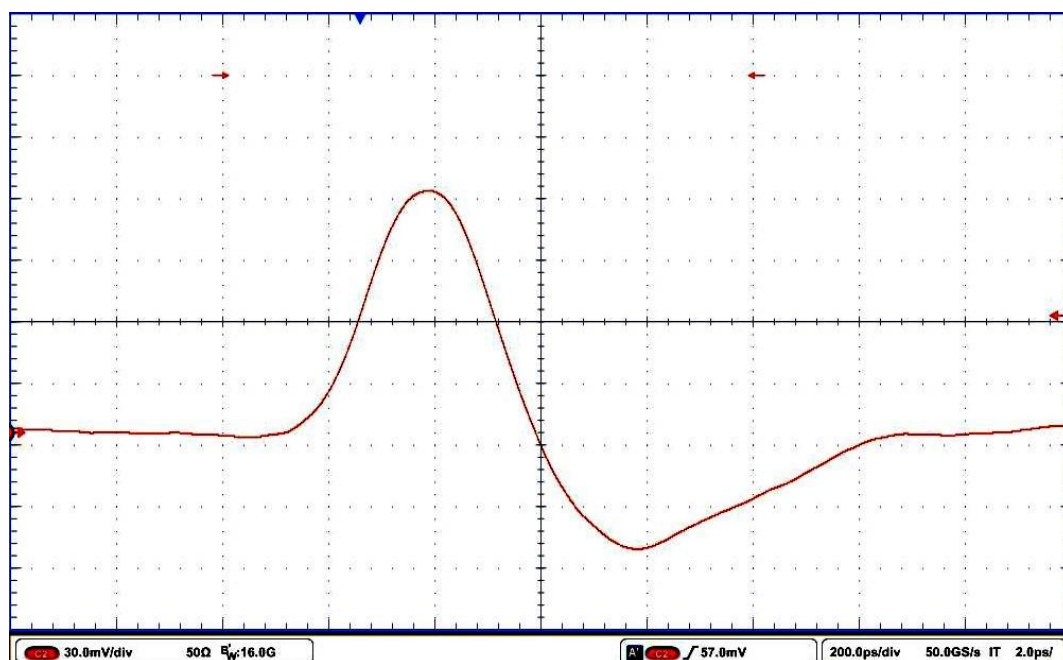


Рис. 3. Типовая осциллограмма воспроизводимого импульса напряженности электрического поля на расстоянии 4 м от раскрытия антенны на оси излучения. Генератор ГИН 50-1000

Fig. 3. A typical oscillogram of the electric field pulse at a distance of 4 m from the antenna aperture on the radiation axis reproduced by voltage pulse generator GIN 50-1000

Исследования эффективности экранирования электромагнитных импульсов проводились в экспериментальном зале, представляющем собой полубезэховую камеру, в которой предотвращено влияние волн, отраженных от металлических элементов зала, на результаты испытаний посредством использования панелей радиопоглощающего материала «Тора-39». Цифровой индикатор поля помещается в рабочей области, где минимизировано наличие отраженных волн. Конструкция цифрового индикатора на основе полосковой линии обеспечивает повышение точности измерения, поскольку регистрируются волны, направленные вдоль оси полосковой линии индикатора. Регистрация импульса осуществляется в пределах временного окна, равного 1 нс, что обеспечивает отсутствие приема волн, отраженных от объектов, расположенных на расстоянии более 0,5 м от индикатора.

Выбирается расстояние между маркерными точками антенны и индикатора поля, которое обеспечивает значение амплитуды напряженности электрического поля импульса,

равное 19 ± 1 кВ/м. Индикатор ориентируется вдоль оси излучения антенно-фидерного устройства (АФУ). Определяется значение поля в отсутствие защитного материала (калибровка испытательной установки).

Между АФУ и цифровым индикатором поля, в непосредственной близости от маркерной точки индикатора (расстояние не более $2,0 \pm 0,5$ см), помещается образец исследуемого материала. Размеры образца не менее $0,7 \times 0,7$ м, он расположен симметрично по отношению к цифровому индикатору в плоскости, перпендикулярной оси излучения АФУ. Определяется амплитуда напряженности электрического поля импульса в области непосредственно за защитным материалом посредством цифрового индикатора.

При каждом испытании осуществляется излучение 5 пачек импульсов и измерение амплитуд импульсов. Каждая пачка импульсов имеет длительность 1 с. Частота импульсов в пачке равна 1 кГц.

Используя (1), осуществляется расчет эффективности экранирования электромагнитного импульса исследуемым образцом, усредненной по эффективной полосе частот, и определялась погрешность (табл. 2).

Таблица 2. Характеристики излучаемых электромагнитных импульсов и их значения
Table 2. The characteristics of radiated electromagnetic pulses and their values

Образец, № (Sample, number)	Пропитывающая жидкость (Impregnating liquid)	Количество слоев (Number of layers)	Значение амплитуды импульса, усредненное по 5 пачкам импульсов, кВ/м (Value of the pulse amplitude averaged over 5 bursts of pulses, kV/m)	Средняя эффективность экранирования электромагнитного импульса, дБ (Average shielding efficiency of the electromagnetic pulses, dB)
Тора-39			7,7	7,9
1	–	1	15,5	1,8
		2	11,5	4,4
		3	8,9	6,6
		4	7,9	7,7
		8	4,7	12,2
1	Вода	1	5,9	10,1
		2	4,4	12,7
		3	3,3	15,4
		4	3,1	15,5
		4	3,2	15,5
1	Раствор NaCl	1	4,8	12,0
		2	4,5	12,5
		3	3,3	15,2
2	–	1	6,5	9,4
		2	5,6	10,7
		4	4,7	12,1
3 (фольга наружу)	–	1	5,5	10,8
3 (фольга внутрь)		1	6,3	9,7
3		2	4,6	12,4
3	Вода	1	4,9	11,9
		2	3,8	13,9

Заключение

Получены значения средней эффективности экранирования электромагнитного импульса. Показано, что эффективность экранирования электромагнитного импульса для сухого иглопробивного материала с содержанием углеродных волокон составляет 9,4...12,1 дБ, для пропитанного водой иглопробивного материала с содержанием углеродных волокон 10,1...15,5 дБ и для иглопробивного материала, пропитанного насыщенным

раствором NaCl составляет 12,0...15,2 дБ. В то же время, средняя эффективность экранирования электромагнитного импульса для сухой войлочной ткани, предварительно пропитанной CaCl₂, со слоем полимерной металлизированной пленки составила 9,7...12,4 дБ, а для пропитанной водой войлочной ткани, предварительно пропитанной CaCl₂, со слоем полимерной металлизированной пленки составила 11,9...13,9 дБ.

На основе проведенных измерений показано, что, варьируя толщину материалов, содержание углерода и пропитывающую жидкость, можно задать электромагнитные характеристики материалов для экранирования широкополосных импульсов электромагнитного излучения, а также значительно снизить их стоимость. Простота технологического процесса изготовления и доступность материалов позволяет создавать не только экранирующие конструкции, но также и создавать выделенные помещения, поскольку позволяют использовать данные материалы при отделке внутренних стен.

Список литературы / References

1. Radasky W.A., Baum C.E., Wik M.W. Introduction to the special issue on high-power electromagnetics (HPEM) and intentional electromagnetic interference (IEMI). *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2004; Vol. 46, 3:314-321.
2. Hayashi Y., Homma N., Mizuki T., Aoki T., Sone H. Precisely timed IEMI fault injection synchronized with EM information leakage. 2014 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Raleigh, NC. 2014: 738-742.
3. Månsson D., Bäckström M., Thottappillil R. Intentional EMI against critical infrastructures, a discussion on mitigation philosophy. 2010 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Beijing. 2010: 134-137.
4. Sabath F., Garbe H. Assessing the likelihood of various intentional electromagnetic environments the initial step of an IEMI risk analysis. 2015 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Dresden. 2015:1083-1088.
5. Prudnik A., Beloglazov A., Kudryavtseva T., Lynkou L. Production technology and shielding properties of the needle-punched non-woven fabrics with carbon additives. (20–22 September 2017). *Electromagnetic disturbances EMD 2017: Proceedings of the 24th International conference, Poland, Białystok, Białystok*. 2017:108-111.

Вклад авторов

Мордачев В.И. разработал методику исследования эффективности экранирования широкополосных импульсов электромагнитного излучения.

Ционенко Д.А. выполнил измерения эффективности экранирования широкополосных импульсов электромагнитного излучения.

Абдулхади Х.Д. осуществил подготовку образцов конструкций экранов, сбор и обработку экспериментальных данных, принял участие в анализе и интерпретации результатов исследования.

Пухир Г.А. выполнила анализ и интерпретацию результатов исследования.

Прудник А.М. принял участие в интерпретации результатов исследования, выполнил оформление рукописи статьи и подготовку ее для опубликования.

Authors' contribution

Mordachev V.I. has developed the research methodology of shielding efficiency of wide-band pulses of electromagnetic radiation.

Tsyenenka D.A. has measured shielding efficiency of wide-band pulses of electromagnetic radiation.

Abdulhadi H.D.A. prepared the samples of the shields' designs, collected and processed the experimental findings, took part in analysis and interpretation of the research results.

Pukhir H.A. has analyzed and interpreted the research results.

Prudnik A.M. took part in the analysis and interpretation of the research results, prepared the manuscript for publication.

Сведения об авторах

Мордачев В.И., к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Ционенко Д.А., к.ф.-м.н., доцент, с.н.с. Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Абдулхади Х.Д.А., аспирант Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Пухир Г.А., старший преподаватель кафедры защиты информации Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Прудник А.М., к.т.н., доцент, доцент кафедры инженерной психологии и эргономики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293-88-24;
e-mail: aleksander.prudnik@bsuir.by
Прудник Александр Михайлович

Information about the authors

Mordachev V.I., PhD, Associate Professor, Leader Researcher of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Tsyankenka D.A., PhD, Associate Professor, Senior Researcher of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Abdulhadi H.D.A., PG student of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Pukhir H.A., Senior Lecturer of Information Security Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Prudnik A.M., Associate Professor of Engineering Psychology and Ergonomics Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Address for correspondence

220013, Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-17-293-88-24;
e-mail: aleksander.prudnik@bsuir.by
Aleksander M. Prudnik