

УДК 621.391.82

ФУНКЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ УРОВНЕЙ СТОЙКОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ К ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ

А. А. Волков¹, П. А. Трифонов²

¹ — Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия
имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина»,

² — Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию 01.06.2017 г.

Аннотация. Установлено, что уровни стойкости отдельных полупроводниковых приборов, а также радиоэлектронных средств, имеющих один наиболее уязвимый элемент, формируются в результате произведения нескольких случайных величин. В предположении о независимости всех случайных величин и незначительности вклада каждой из них в общее произведение, распределение уровней стойкости принято логарифмически нормальным. Проведена аппроксимация полученных экспериментально функций распределения уровней стойкости некоторых полупроводниковых приборов теоретическими логнормальными кривыми. Показано соответствие теоретических кривых результатам эксперимента.

Ключевые слова: уровень стойкости, радиоэлектронное средство, электромагнитное поле.

THE DISTRIBUTION FUNCTION OF THE FIRMNESS LEVELS OF RADIO-ELECTRONIC MEANS OF ELECTROMAGNETIC RADIATION

A. A. Volkov, P. A. Trifonov

Abstract. It is set that levels of firmness of separate semiconductor items, and also the radio-electronic means having one most vulnerable element, are created as a result of the work of several random variables. In the assumption of independence of all random variables and insignificance of a contribution of each of them to the general work, distribution of levels of firmness it is accepted logarithmic normal. Approximation of the distribution functions of levels of firmness of some semiconductor devices gained experimentally by theoretical logarithmically normal curves is led. Compliance of theoretical curves to results of an experiment is shown.

Keywords: firmness level, radio-electronic means, electromagnetic field.

ВВЕДЕНИЕ

Характерной чертой развития современной радиоэлектронной аппаратуры является высокая степень миниатюризации элементной базы и интеграции микроэлектроники. Это вызвано

© Волков А. А., Трифонов П. А., 2017

необходимостью достижения максимальной эффективности функционирования радиоэлектронных средств (РЭС) и систем в различных условиях [1]. Уменьшение рабочих областей радиоэлементов, в особенности полупроводниковых структур, приводит к снижению их устойчивости к внешним электромагнитным воздействиям. В то же время, в процессе работы радиоэлектронная аппаратура может быть подвержена воздействию электромагнитных полей (ЭМП) различной природы. Поэтому вопросы оценки уровней устойчивости РЭС приобретают особый интерес при решении задач радиоэлектронного поражения РЭС мощным ЭМП, а также задач защиты различной радиоэлектронной аппаратуры от деструктивных электромагнитных воздействий. В связи с этим исследования закономерностей, определяющих уровни устойчивости РЭС к мощному ЭМП, актуальны.

Устойчивость РЭС к электромагнитным воздействиям принято оценивать по величине критического уровня поля в области его расположения — уровня устойчивости, представляющего собой минимальное значение плотности мощности внешнего ЭМП, при котором происходит временное или необратимое поражение РЭС. В качестве показателей устойчивости могут также использоваться величины плотности энергии, мощности или энергии ЭМП.

Решение об электромагнитном поражении РЭС принимается на основе критерия [1]:

$$P \geq P_{РЭС}, \quad (1)$$

где P — плотность мощности внешнего ЭМП в районе расположения РЭС; $P_{РЭС}$ — уровень устойчивости РЭС к ЭМП.

Результаты экспериментальных исследований воздействия импульсного ЭМП на полупроводниковые приборы [2–7] свидетельствуют о случайном характере процесса их поражения. Следовательно, уровни устойчивости полупроводниковых приборов и РЭС также будут случайными. О факте поражения РЭС следует говорить с некоторой вероятностью, которая должна быть определена как вероятность выполнения условия (1):

$$p_{ЭП РЭС} = p \{P \geq P_{РЭС}\} = F_{РЭС}(P), \quad (2)$$

где $p_{ЭП РЭС}$ — вероятность электромагнитного поражения РЭС; $p \{A\}$ — вероятность выполнения условия A ; $F_{РЭС}(P)$ — функция распределения случайной величины $P_{РЭС}$.

В известной литературе, к сожалению, отсутствуют обоснованные модели законов распределения уровней устойчивости РЭС. В некоторых источниках [8] для вероятностного описания уровней функционального поражения РЭС, т.е. уровней их устойчивости, используется нормальный закон распределения вероятностей с фиксированным отношением математического ожидания к среднему квадратичному отклонению. В этой модели область определения закона распределения (вся числовая ось) не соответствует области возможных значений уровней поражения (только неотрицательные значения), а фиксированное соотношение между математическим ожиданием и средним квадратичным отклонением не обосновывается. Кроме того, статистическое распределение экспериментальных данных по уровням устойчивости может заметно отличаться от нормального [2]. Нормальный закон может применяться для вероятностного описания уровней устойчивости РЭС только лишь в том случае, когда их среднее квадратичное отклонение существенно меньше математического ожидания, что выполняется далеко не всегда.

Цель работы — установление вида закона распределения случайных величин уровней устойчивости РЭС к ЭМП, область определения которых согласована с областью возможных критических значений плотности мощности поражающего излучения.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Для оценки уровней устойчивости полупроводниковых приборов к ЭМП наиболее широко используется полуэмпирическая тепловая модель Вунша-Белла-Таска [1–3], основанная на

решении уравнения теплопроводности для полупроводникового кристалла. Эта модель определяет аппроксимацию реальной зависимости энергии (мощности) поражения полупроводникового прибора от длительности импульса степенными функциями и развивается другими исследователями [9]. В частном случае, когда на полупроводниковый элемент воздействует импульс ЭМП прямоугольной формы, модель Вунша-Белла-Таска дает следующее выражение для энергии поражения W_x [3]:

$$W_x = \begin{cases} \rho V_T C \Delta T_{кр}, & \tau \leq \tau_{T1}, \\ S_T \Delta T_{кр} \sqrt{\rho C \kappa \tau}, & \tau_{T1} \leq \tau \leq \tau_{T2}, \\ r_T \kappa \Delta T_{кр} \tau, & \tau \geq \tau_{T2}, \end{cases} \quad (3)$$

где τ — длительность импульса ЭМП; ρ , C , κ — плотность, массовая теплоёмкость и теплопроводность полупроводника, соответственно; V_T , S_T , r_T — эквивалентные объём, площадь и радиус тепловыделения; $\Delta T_{кр} = T_{кр} - T_0$; $T_{кр}$ — критическая температура теплового пробоя; T_0 — начальная (рабочая) температура полупроводника; τ_{T1} , τ_{T2} — характеристические времена процесса нагрева полупроводникового кристалла.

Время τ_{T1} определяет верхнюю границу интервала длительностей импульсов ЭМП, при которых происходит адиабатический разогрев полупроводникового кристалла. Время τ_{T2} определяет нижнюю границу интервала длительностей импульсов ЭМП, при которых определяющим в процессе нагрева становится соотношение между плотностями потоков энергии ЭМП и отвода тепла от кристалла в течении одного импульса. Типовые значения характеристических времен составляют: $\tau_{T1} = 0,1$ мкс и $\tau_{T2} = 10$ мкс [3].

Уровень стойкости полупроводникового прибора по плотности мощности Π_x в общем виде связан с энергией поражения формулой [2]:

$$\Pi_x = \frac{W_x}{S_{эф пр} \tau}, \quad (4)$$

где $S_{эф пр}$ — эффективная площадь приема ЭМП полупроводниковым кристаллом.

Из (3) и (4) следует:

$$\Pi_x = \begin{cases} \frac{\rho V_T C \Delta T_{кр}}{S_{пр} \tau}, & \tau \leq \tau_{T1}, \\ \frac{S_T \Delta T_{кр} \sqrt{\rho C \kappa}}{S_{пр} \sqrt{\tau}}, & \tau_{T1} \leq \tau \leq \tau_{T2}, \\ \frac{r_T \kappa \Delta T_{кр}}{S_{пр}}, & \tau \geq \tau_{T2}. \end{cases} \quad (5)$$

На основе закономерности (5) можно получить приближённую оценку вида закона распределения уровней стойкости полупроводниковых приборов. Из выражения (5) видно, что плотность мощности поражения полупроводникового элемента в каждом из характерных диапазонов длительностей импульсов представляет собой произведение нескольких физических величин, характеризующих вещество и конструкцию кристалла (прибора). Эти величины случайны и имеют небольшой технологический разброс значений для каждого типа полупроводниковых приборов, обуславливая случайность уровней стойкости.

Вклад случайных величин в критическую плотность мощности (5) в каждом из характерных диапазонов длительностей импульсов носит мультипликативный характер. При формировании случайной величины под воздействием большого числа независимых мультипликативных факторов, имеющих малый вклад в общий результат, её распределение описывается логарифмически нормальным законом [10,11]. Поэтому, полагая все случайные величины в (5) независимыми, а вклад каждой отдельной величины незначительным, распределение случайной величины уровня стойкости полупроводникового прибора можно приближённо

считать логарифмически нормальным. В рамках указанных допущений аппроксимация вероятности поражения полупроводникового прибора $p_{ЭП x}$ будет иметь вид [11]:

$$p_{ЭП x} = p \{ \Pi \geq \Pi_x \} = F_x(\Pi) = \Phi \left(\frac{\ln(\Pi/\Pi_{x\text{cp}}) + \ln(1 + \Upsilon_{\text{cp}}^2)}{\sqrt{\ln(1 + \Upsilon_{\text{cp}}^2)}} \right), \quad \Pi \geq 0, \quad (6)$$

где $F_x(\Pi)$ — функция распределения случайного уровня стойкости полупроводникового прибора; $\Pi_{x\text{cp}}$, $\Upsilon_x = \Pi_{x\text{СКО}}/\Pi_{x\text{cp}}$, $\Pi_{x\text{СКО}}$ — соответственно математическое ожидание, коэффициент вариации (относительный разброс) и среднее квадратичное отклонение (СКО) уровня стойкости Π_x ; $\Phi(z) = (1/\sqrt{2\pi}) \int_{-\infty}^z e^{-\chi^2/2} d\chi$ — интеграл вероятностей [12].

С использованием логнормального закона (6) проведена аппроксимация некоторых экспериментальных данных, полученных в работах [4,5].

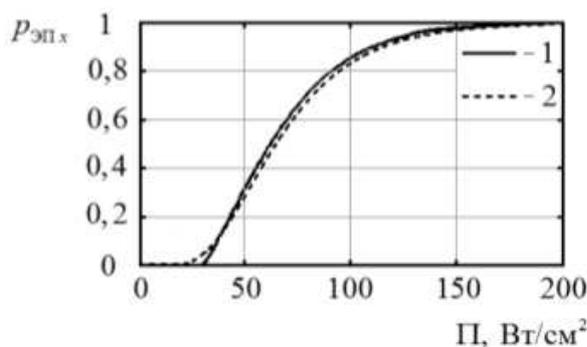


Рис. 1. Зависимость вероятности повреждения микросхем 133ЛДЗ от плотности мощности радиоимпульса: 1 — данные эксперимента [4]; 2 — аппроксимация логарифмически нормальным законом.

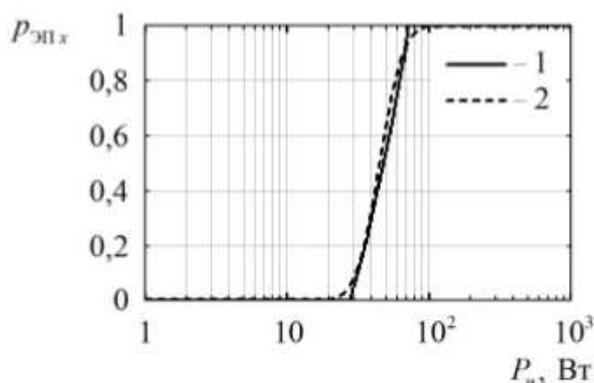


Рис. 2. Зависимость вероятности повреждения смесительных диодов Д405Б от мощности радиоимпульса: 1 — данные эксперимента [5]; 2 — аппроксимация логарифмически нормальным законом.

На рисунке 1 показан график экспериментальной зависимости вероятности повреждения цифровых микросхем 133ЛДЗ от плотности мощности импульсов радиоизлучения [4]. Измерения проводились для последовательности радиоимпульсов длительностью 5 мкс с частотой повторения 10 Гц и длиной волны излучения 3 см. График на рисунке 1 представляет собой интегральный закон распределения уровней стойкости микросхем 133ЛДЗ по плотности мощности $p_{ЭП x} = F_x(\Pi)$. Там же показана аппроксимация экспериментальной зависимости логарифмически нормальным распределением со средним значением $\Pi_{x\text{cp}} \simeq 72 \text{ Вт/см}^2$ и СКО $\Pi_{x\text{СКО}} \simeq 34 \text{ Вт/см}^2$.

На рисунке 2 показан график экспериментальной зависимости вероятности повреждения $p_{ЭП x}$ смесительных диодов Д405Б от мощности радиоимпульса P [5]. Критерием повреждения считалось увеличение потерь преобразования диода на величину не менее чем 3 дБ. Измерения проводились для последовательности радиоимпульсов длительностью 37 нс с частотой повторения 100 Гц и длиной волны излучения 3,2 см. График на рисунке 2 показывает интегральный закон распределения уровней стойкости диодов Д405Б по мощности $p_{ЭП x} = F_x(P)$. Там же показана аппроксимация экспериментальной зависимости логарифмически нормальным распределением с математическим ожиданием $P_{x\text{cp}} \simeq 47 \text{ Вт}$ и СКО $P_{x\text{СКО}} \simeq 15 \text{ Вт}$.

Общей взаимосвязи между средним значением и СКО распределения уровней поражения в известных работах установлено не было. Рассчитанные параметры аппроксимирующих распределений по результатам экспериментов [4,5] показывают, что коэффициент вариации для распределения на рисунке 1 составляет $\Upsilon_x = 0,47$, а для распределения на рисунке 2 — $\Upsilon_x = 0,32$, т. е. наблюдается различие. В связи с этим оба параметра аппроксимации (математическое ожидание и СКО) для каждого типа полупроводниковых приборов необходимо определять из эксперимента.

Уровни стойкости РЭС определяются восприимчивостью их элементов к ЭМП [1]. Для значительной части РЭС характерно наличие в их составе одного полупроводникового элемента, который среди прочих наиболее уязвим к деструктивному электромагнитному воздействию. К этому классу в первую очередь относятся РЭС, имеющие в своем составе штатный приемный тракт. Уровень стойкости РЭС к ЭМП $\Pi_{РЭС}$, определенный по одному наиболее уязвимому элементу, можно представить как [1]:

$$\Pi_{РЭС}(\theta, \varphi) = \Pi_x / k_{\Pi}(\theta, \varphi), \quad (7)$$

где $k_{\Pi}(\theta, \varphi)$ — коэффициент передачи электромагнитной энергии (мощности) из окружающей среды к самому уязвимому полупроводниковому элементу РЭС; θ, φ — зенитный и азимутальный углы прихода ЭМП относительно РЭС. В [1] величина $k_{\Pi}(\theta, \varphi)$ называется коэффициентом использования ЭМП. Явный вид коэффициента $k_{\Pi}(\theta, \varphi)$ определяется типом и конструкцией РЭС.

При поражении РЭС со штатной антенной деструктивное воздействие ЭМП, как правило, происходит по антенному входу. Величина Π_x в данном случае представляет собой уровень стойкости входного полупроводникового прибора. Коэффициент $k_{\Pi}(\theta, \varphi)$ при этом должен учитывать потери в антенно-фидерном тракте: возможные потери в антенне из-за несогласованности поражающего ЭМП по пространству (по направлению прихода) и по поляризации с полезным сигналом РЭС, потери в селективных цепях из-за несогласованности их спектров, потери от действия защитных устройств (при наличии таковых). Вместе с этим коэффициент передачи должен также учитывать и эффект усиления сигнала приемной антенной. В рассматриваемом случае коэффициент передачи энергии можно представить в виде:

$$k_{\Pi}(\theta, \varphi) = k_{\Pi a}(\theta, \varphi) \prod_{i=1}^N k_{\Pi i}, \quad (8)$$

где $k_{\Pi a}(\theta, \varphi)$ — коэффициент передачи приемной антенны РЭС; $k_{\Pi i}$ — коэффициент передачи i -го элемента приемного тракта на пути от антенны до входного полупроводникового прибора (например дуплексера, входного фильтра, защитного устройства и т. п.); N — число элементов приемного тракта.

При поражении РЭС, не имеющего в своём составе штатной антенны, деструктивное воздействие ЭМП происходит через отверстия в корпусах аппаратуры или непосредственно через сами корпуса, а также через соединительные элементы. Здесь величина Π_x представляет собой уровень поражения наименее стойкого полупроводникового прибора, отказ которого приводит к выходу из строя РЭС в целом. Коэффициент $k_{\Pi}(\theta, \varphi)$ для в данном случае должен учитывать потери за счёт ослабления (экранировки) ЭМП в корпусах аппаратуры РЭС:

$$k_{\Pi}(\theta, \varphi) = k_{\Pi k}(\theta, \varphi) \prod_{i=1}^M k_{\Pi i} \quad (9)$$

где $k_{\Pi k}(\theta, \varphi)$ — коэффициент передачи корпуса РЭС; $k_{\Pi i}$ — коэффициент передачи i -го экранирующего элемента внутри корпуса РЭС; M — число экранирующих элементов.

Таким образом, случайная величина уровня стойкости РЭС $\Pi_{РЭС}(\theta, \varphi)$, как и величина уровня стойкости отдельного полупроводникового прибора Π_x , формируется в результате произведения нескольких случайных величин. Мультипликативный вклад в уровень стойкости РЭС вносят те же факторы, которые определяют уровень стойкости уязвимого полупроводникового прибора, а также величина, обратная коэффициенту передачи энергии $k_{\Pi}(\theta, \varphi)$, представляющего собой произведение нескольких коэффициентов передачи отдельных устройств или элементов тракта. В связи с этим, так же полагая все случайные факторы независимыми, а вклад каждого из них в общее произведение незначительным, распределение случайного уровня стойкости РЭС можно приближённо считать логарифмически нормальным. Это распределение является условным для заданного направления прихода ЭМП и имеет вид:

$$F_{РЭС \text{ усл}}(\Pi | \theta, \varphi) = \Phi \left(\frac{\ln(\Pi / \Pi_{РЭС \text{ ср}}(\theta, \varphi)) + \ln(1 + \Upsilon_{РЭС}^2(\theta, \varphi))}{\sqrt{\ln(1 + \Upsilon_{РЭС}^2(\theta, \varphi))}} \right), \quad (10)$$

где $\Pi_{РЭС \text{ ср}}$, $\Upsilon_{РЭС} = \Pi_{РЭС \text{ СКО}} / \Pi_{РЭС \text{ ср}}$, $\Pi_{РЭС \text{ СКО}}$ — соответственно математическое ожидание, коэффициент вариации (относительный разброс) и среднее квадратичное отклонение (СКО) уровня стойкости $\Pi_{РЭС}$.

В практических задачах направление прихода поражающего ЭМП, как правило, заведомо не известно, а углы θ и φ представляют собой случайные величины. Для вероятностного описания уровня стойкости РЭС в данном случае следует использовать безусловную функцию распределения:

$$F_{РЭС}(\Pi) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} F_{РЭС \text{ усл}}(\Pi | \theta, \varphi) \omega(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi, \quad (11)$$

где $\omega(\theta, \varphi)$ — совместная плотность вероятности зенитного и азимутального углов прихода поражающего ЭМП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом установлено, что уровни стойкости полупроводниковых приборов формируются в результате произведения нескольких случайных величин, характеризующих вещество и конструкцию полупроводникового кристалла. Формирование уровней стойкости РЭС, имеющих один наиболее уязвимый элемент, происходит аналогичным образом. Мультипликативный вклад в уровень стойкости РЭС вносят те же факторы, которые определяют уровень стойкости наиболее уязвимого полупроводникового прибора, а также величина, обратная коэффициенту передачи электромагнитной энергии из окружающей среды к самому уязвимому полупроводниковому элементу РЭС, тоже представляющая собой произведение нескольких случайных величин. В предположении о независимости всех случайных величин и незначительности вклада каждой из них в общее произведение распределение уровней стойкости принято логарифмически нормальным. Применение логарифмически нормального закона для описания распределения уровней стойкости РЭС более обосновано, чем для описания уровней стойкости полупроводниковых приборов, поскольку в этом случае мультипликативный вклад в конечный результат вносит большее количество случайных величин. С использованием логарифмически нормального закона проведена аппроксимация экспериментальных зависимостей вероятности повреждения импульсным электромагнитным полем цифровых микросхем 133ЛДЗ и СВЧ смесительных диодов Д405Б, соответственно, от плотности мощности и мощности импульса. В результате получено хорошее соответствие теоретических кривых результатам эксперимента. Коэффициенты вариации для каждого из типов полупроводниковых приборов имеют заметные отличия, в связи с чем для задания теоретической функции

распределения уровней стойкости необходимо на основе эксперимента определять два параметра: математическое ожидание и СКО (коэффициент вариации).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радиоэлектронная борьба. Силовое поражение радиоэлектронных систем / В. Д. Добыкин, А. И. Куприянов, В. Г. Пономарёв, Л. Н. Шустов. — М. : Вузовская книга, 2007. — 468 с.
2. Рикетс, Л. У. Электромагнитный импульс и методы защиты / Л. У. Рикетс, Дж. Э. Бриджес, Дж. Майлетта. — М. : Атомиздат, 1979. — 328 с.
3. Влияние мощных импульсных микроволновых помех на полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы / В. В. Антипин и др. // Зарубежная радиоэлектроника. — 1995. — № 1. — С. 37–53.
4. Ключник, А. В. Статистическая модель повреждения цифровых интегральных микросхем импульсным радиоизлучением / А. В. Ключник, А. В. Солодов // Радиотехника. — 2010. — № 2. — С. 37–42.
5. Ключник, А. В. Статистика повреждения СВЧ диодов импульсным радиоизлучением [Электронный ресурс] / А. В. Ключник, Ю. А. Пирогов, А. В. Солодов // Журнал радиоэлектроники : электронный журнал. — 2010. — № 12. Режим доступа : <http://jre.cplire.ru/jre/dec10/1/text.pdf>. (дата обращения : 07.12.2016).
6. Ключник, А. В. Обратимые отказы интегральных микросхем в полях радиоизлучения [Электронный ресурс] / А. В. Ключник, Ю. А. Пирогов, А. В. Солодов // Журнал радиоэлектроники : электронный журнал. — 2013. — № 1. — Режим доступа : <http://jre.cplire.ru/jre/jan13/18/text.pdf> (дата обращения : 07.12.2016).
7. Пирогов, Ю. А. Повреждения интегральных микросхем в полях радиоизлучения [Электронный ресурс] / Ю. А. Пирогов, А. В. Солодов // Журнал радиоэлектроники : электронный журнал. — 2013. — № 6. — Режим доступа : <http://jre.cplire.ru/jre/jun13/15/text.pdf> (дата обращения : 07.12.2016).
8. Статистические модели критериальных уровней электромагнитного поражения полупроводниковых приборов / Г. Н. Овчинников и др. // Телекоммуникации. — № 6. — 2009. — С. 29–32.
9. Мещеряков, С. А. Моделирование теплового поражения диодных полупроводниковых структур полиимпульсным сверхвысокочастотным радиоизлучением [Электронный ресурс] / С. А. Мещеряков // Журнал радиоэлектроники : электронный журнал. — 2013. — № 7. — Режим доступа : <http://jre.cplire.ru/jre/jul13/4/text.pdf> (дата обращения : 07.12.2016).
10. Айвазян, С. А. Прикладная статистика : Основы моделирования и первичная обработка данных / С. А. Айвазян, И. С. Енюков, Л. Д. Мешалкин. — М. : Финансы и статистика, 1983. — 471 с.
11. Вадзинский, Р. Н. Справочник по вероятностным распределениям / Р. Н. Вадзинский — СПб. : Наука, 2001. — 295 с.
12. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. — М. : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1969. — 576 с.

REFERENCES

1. Dobykin V.D., Kupriyanov A.I., Ponomarev V.G., Shustov L.N. Radio- electronic fight. Power defeat of radio-electronic systems. [Dobykin V.D., Kupriyanov A.I., Ponomarev V.G., Shustov L.N. Radioe'lektronnaya bor'ba. Silovoe porazhenie radioe'lektronnykh sistem]. Moscow: Vuzovskaya kniga, 2007, 468 p.
2. Ricketts L.W., Bridges J.E., Miletta J. EMP Radiation and protective techniques. [Rikets L.U., Bridjes J.E., Mayletta J. E'lectromagnitnyi impul's i metody zhashity]. Moscow:

Atomizdat, 1979, 328 p.

3. Antipin V.V. et. al. Influence of powerful pulse microwave hindrances on semi-conductor devices and integrated microcircuits. [Antipin V.V., i dr. Vliyanie moshnykh impulsnykh mikrovolnovykh pomekh na poluprovodnikovye pribory i integral'nye mikroskhemy]. *Zarubezhnaya radioelektronika — Foreign radio electronics*, 1995, no. 1, pp. 37–53.

4. Klyuchnik A.V., Solodov A.V. Statistical model of damage of digital integrated microcircuits a pulse radio emission. [Klyuchnik A.V., Solodov A.V. Statisticheskaya model' povrezhdehiya cifrovyykh integral'nykh mikroskhem impul'snym radioizlucheniem]. *Radiotekhnika — Radio engineering*, 2010, no. 2, pp. 37–42.

5. Klyuchnik A.V., Pirogov U.A., Solodov A.V. Statistics of damage of microwave diodes a pulse radio emission. [Klyuchnik A.V., Pirogov U.A., Solodov A.V. Statistika povrezhdehiya SVCh diodov impul'snym radioizlucheniem]. *Zhurnal radioelektroniki: e'lektronnyi zhurnal — Journal of radio electronics: www journal*, 2010, no. 12. Access mode: <http://jre.cplire.ru/jre/dec10/1/text.pdf>. (reference date 7.12.2016).

6. Klyuchnik A.V., Pirogov U.A., Solodov A.V. Reversible failures of integrated microcircuits in radio-frequency radiation fields. [Klyuchnik A.V., Pirogov U.A., Solodov A.V. Obratimye otkazy integral'nykh mikroskhem v polyakh radioizlycheniya]. *Zhurnal radioelektroniki: e'lektronnyi zhurnal — Journal of radio electronics: www journal*, 2013, no. 1. Access mode: <http://jre.cplire.ru/jre/jan13/18/text.pdf> (reference date 7.12.2016).

7. Pirogov U.A., Solodov A.V. Damages of integrated microcircuits to radio-frequency radiation fields. [Pirogov U.A., Solodov A.V. Povrezhdeniya integral'nykh mikroskhem v polyakh radioizlycheniya]. *Zhurnal radioelektroniki: e'lektronnyi zhurnal — Journal of radio electronics: www journal*, 2013, no. 6. Access mode: <http://jre.cplire.ru/jre/jun13/15/text.pdf> (reference date 7.12.2016).

8. Ovchinnicov G.N. et. al. Statistical models of criteria levels of electromagnetic defeat of semiconductor devices. [Ovchinnicov G.N. i dr. Statisticheskie modeli kriterial'nykh urovnei e'lektromagnitnogo porazheniya poluprovodnikovyykh priborov]. *Telekommunikacii — Telecommunication*, 2009, no. 6, pp. 29–32.

9. Mesh'eryakov S.A. Modelling of thermal defeat of the diode semiconductor structures by a polypulsing microwave radio-frequency radiation. [Mesh'eryakov S.A. Modelirovanie teplovogo porazheniya diodnykh poluprovodnikovyykh struktur poliimpulsnym sverkhvysokochastotnym radioizlucheniem]. *Zhurnal radioelektroniki: e'lektronnyi zhurnal — Journal of radio electronics: www journal*, 2013, no. 7. Access mode: <http://jre.cplire.ru/jre/jul13/4/text.pdf> (reference date 7.12.2016).

10. Aivazyan S.A., Enyukov L.D., Meshalkin L.D. Application-oriented statistics: Bottoms of modelling and preprocessing of data. [Aivazyan S.A., Enyukov L.D., Meshalkin L.D. Prikladnaya statistika: Osnovy modelirovaniya i pervichna obrabotka dannykh]. Moscow: Finansy i statistika, 1983, 471 p.

11. Vadzinskii R.N. The reference manual on probability allocations. [Vadzinskii R.N. Spravochnik po veroyatnostnym raspredeleniyam]. Saint Petersburg: Nauka, 2001, 295 p.

12. Vencel' E.S. Probability theory. [Vencel' E.S. Teoriya veroyatnostey]. Moscow: Nauka. Glavnaya redakciya fiziko-matematicheskoy literatury, 1969, 576 p.

*Волков Алексей Анатольевич, преподаватель Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил “Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина”, кандидат технических наук, г. Воронеж, Россия
E-mail: volkov_aa@autorambler.ru
Тел.: 8-906-673-67-92*

*Volkov Aleksey Anatolevich, lecturer of Military Educational-Research Centre of Air Force “Air Force Academy named after professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin”, candidate of engineering sciences, Voronezh, Russia
E-mail: volkov_aa@autorambler.ru
Tel.: 8-906-673-67-92*

*Трифонов Павел Андреевич, профессор Воронежского государственного университета, доктор технических наук, доцент, г. Воронеж, Россия
E-mail: bk_123@bk.ru
Тел.: 8-951-545-61-69*

*Trifonov Pavel Andreevich, professor of Voronezh State University, doctor of engineering sciences, docent, Voronezh, Russia
E-mail: bk_123@bk.ru
Tel.: 8-951-545-61-69*