

УДК 621.391.82

УЧЁТ ВРЕМЕНИ ПОВТОРЕНИЯ И ЧИСЛА ИМПУЛЬСОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРИ ОЦЕНКЕ УРОВНЕЙ СТОЙКОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ В РАМКАХ ТЕПЛОВОЙ МОДЕЛИ

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 24.09.2015 г.

Аннотация. На основе законов теплообмена между полупроводником и окружающей средой получено выражение для оценки уровней стойкости радиоэлектронных средств, учитывающее время повторения и число импульсов электромагнитного поля. Оценена зависимость критического уровня плотности мощности, при котором происходит сбой работы компьютера, от параметров импульсной последовательности. Показано соответствие полученной закономерности экспериментальным результатам. Проведён расчёт зависимостей уровня стойкости от числа импульсов для заданных длительности и времени повторения импульсов электромагнитного поля. Дана характеристика процесса установления уровня стойкости.

Ключевые слова: уровень стойкости, тепловая модель, последовательность импульсов.

THE ACCOUNT OF TIME OF REPETITION AND NUMBER OF IMPULSES OF AN ELECTROMAGNETIC FIELD AT AN ESTIMATION OF LEVELS OF FIRMNESS OF RADIO-ELECTRONIC MEANS WITHIN THE LIMITS OF THERMAL MODEL

A. A. Volkov, P. A. Trifonov

Abstract. On the basis of heat exchange laws between the semiconductor and environment expression for an estimation of levels of firmness of the radio-electronic means, considering time of repetition and number of impulses of an electromagnetic field is received. Dependence of critical level of density of power at which there is a failure of work of the computer, from parameters of pulse sequence is estimated. Conformity of the received law to experimental results is shown. Calculation of dependences of level of firmness from number of impulses for the set duration and time of repetition of impulses of an electromagnetic field is lead. The characteristic of process of an establishment of level of firmness is given.

Keywords: firmness level, thermal model, sequence of impulses.

ВВЕДЕНИЕ

Характерной чертой развития современной радиоэлектронной аппаратуры является высокая степень миниатюризации элементной базы и интеграции микроэлектроники. Это вызвано необходимостью повышения эффективности функционирования радиоэлектронных средств (РЭС) и систем в различных условиях вплоть до максимально достижимого уровня [1]. Уменьшение рабочих областей радиоэлементов, в особенности полупроводниковых структур, приводит к снижению уровней их стойкости по отношению 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 стойкости, как полупроводниковых приборов, так и РЭС в целом, приобретают особый интерес при решении задач поражения РЭС мощными ЭМП, а также их защиты от деструктивных электромагнитных воздействий. В связи с этим исследования закономерностей, определяющих уровни поражения полупроводниковых приборов и РЭС при воздействии на них мощного ЭМП, актуальны.

Стойкость полупроводникового прибора к электромагнитным воздействиям принято оценивать по величине критического уровня поля в области его расположения — уровня стойкости, представляющего собой минимальное значение плотности мощности (плотности энергии, мощности или энергии) внешнего ЭМП, при котором происходит повреждение прибора. Для оценки критических уровней наиболее широко используется полуэмпирическая тепловая модель Вунша-Белла-Таска [2], [3], хорошо согласующаяся с экспериментом в том случае, когда механизм повреждения связан с тепловыми процессами в полупроводниковой структуре, и соответствующая длительностям поражающих импульсов в единицы наносекунд и более.

Полупроводниковые приборы среди прочих радиоэлементов наиболее чувствительны к внешним ЭМП [1], [2], поэтому их стойкость определяет стойкость РЭС в целом. В связи с этим модель Вунша-Белла-Таска применяют и для описания уровней поражения РЭС.

Модель Вунша-Белла-Таска отражает взаимосвязь величины критического уровня поля и длительности импульса ЭМП, однако не учитывает время повторения и число импульсов, которые могут существенно повлиять на уровни стойкости полупроводниковых приборов [3]–[5]. Поэтому цель работы заключается в получении эмпирического выражения уровней стойкости полупроводниковых приборов и РЭС, учитывающего время повторения и число поражающих импульсов ЭМП.

ОЦЕНКА УРОВНЕЙ СТОЙКОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ИМПУЛЬСОВ ЭМП

В соответствии с моделью Вунша-Белла-Таска критический уровень плотности мощности ЭМП, при котором происходит повреждение полупроводникового элемента $P_{кр}$, оценивается по формуле [1]–[3]:

$$P_{кр} = A\tau_{и}^{-1} + B\tau_{и}^{-1/2} + C, \quad (1)$$

где A , B , C , — параметры аппроксимации, определяемые, как правило, экспериментально; $\tau_{и}$ — длительность импульса ЭМП. В диапазоне длительностей $\tau_{и} < 0,1$ мкс наибольший вклад вносит слагаемое, содержащее степень $\tau_{и}^{-1}$; при $\tau_{и} = 0, 1, \dots, 10$ мкс — слагаемое, содержащее степень $\tau_{и}^{-1/2}$; а при $\tau_{и} > 10$ мкс — слагаемое с нулевой степенью $\tau_{и}$ [3].

Многие исследователи отмечают снижение уровней стойкости полупроводниковых элементов при воздействии импульсных последовательностей по сравнению с уровнем стойкости для одиночного импульса [1], [3]–[8]. Из экспериментов [5]–[8] следует, что при увеличении числа

импульсов и частоты их повторения уровень стойкости снижается, стремясь к некоторому пределу. Зависимость уровней стойкости от указанных параметров проявляется для коротких импульсов (сотни наносекунд и менее), а при увеличении длительности импульсов она ослабевает.

Оценить влияние времени повторения и числа импульсов на критические уровни ЭМП в рамках тепловой модели можно, учитывая отвод тепла из полупроводниковой структуры в двух предельных ситуациях, одна из которых соответствует импульсной передаче тепла за сверхкороткий промежуток времени, а вторая – непрерывному нагреву.

В модели (1) слагаемое, содержащее степень $\tau_{и}^{-1}$, отражает закономерность при очень коротких воздействиях по сравнению с постоянной времени тепловой релаксации в полупроводниковом теле. В этом случае распространение тепла в полупроводнике и теплообмен с окружающей средой протекают очень медленно относительно длительности импульса ЭМП и не успевают оказать влияние на процесс поражения. Слагаемое, содержащее степень $\tau_{и}^{-1/2}$ соответствует воздействиям, длительности которых сравнимы с постоянной времени тепловой релаксации. Модель поражения Вунша-Белла-Таска в этом диапазоне длительностей учитывает отток тепла от области нагрева внутри полупроводникового тела. Теплообмен с окружающей средой всё ещё не оказывает существенного влияния на процесс поражения. Таким образом, слагаемые в (1), содержащие степени $\tau_{и}^{-1}$ и $\tau_{и}^{-1/2}$, соответствуют адиабатическому нагреву полупроводникового тела по отношению к теплообмену с окружающей средой [3], т.е. когда время теплообмена значительно больше длительности импульса.

Прирост температуры полупроводника в результате действия одного импульса ЭМП $\Delta T_{од}$ при адиабатическом нагреве пропорционален его мощности [2], а значит и его плотности мощности:

$$\Delta T_{од} = b \Pi, \quad (2)$$

где Π – плотность мощности ЭМП; b – размерный коэффициент, зависящий от типа прибора и длительности импульса. Полупроводниковый прибор выйдет из строя, если $T_0 + \Delta T_{од} = T_{кр}$, где T_0 – температура окружающей среды (начальная температура полупроводника); $T_{кр}$ – критическая температура повреждения прибора. Для одиночного импульса критический уровень плотности мощности ЭМП равен: $\Pi_{кр} = (T_{кр} - T_0)/b$.

В отсутствии поля между нагретым полупроводником и окружающей средой протекает теплообмен, который подчиняется законам Био-Фурье и теплоотдачи Ньютона [9]. Считая температуру окружающей среды вблизи полупроводника постоянной, закон Био-Фурье можно представить в виде [9]:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = qS, \quad (3)$$

где Q – количество теплоты, запасённой в полупроводниковом теле:

$$Q = C_M \rho V T, \quad (4)$$

C_M , ρ , V , T – массовая теплоёмкость, плотность, объём и температура полупроводника, соответственно; q – плотность потока тепла; S – площадь поверхности, ограничивающей полупроводник.

В упрощённой форме закон теплоотдачи Ньютона имеет вид [9]:

$$q = -\frac{\kappa_0}{\delta} (T - T_0), \quad (5)$$

где κ_0 – коэффициент теплопроводности окружающего пространства; δ – толщина теплового пограничного слоя.

Подстановка (4) и (5) в (3) приводит к дифференциальному уравнению:

$$\frac{d}{dt} \Delta T = -\frac{1}{\tau_x} \Delta T, \quad (6)$$

где $\Delta T = T - T_0$ — перепад температур между полупроводниковым телом и окружающей средой; $\tau_x = C_M \rho V \delta / \kappa_0 S$ — характеристическое время теплообмена для данной полупроводниковой структуры. Решением уравнения (6) с начальным условием $\Delta T(0) = \Delta T_{\text{нач}}$ является функция:

$$\Delta T(t) = \Delta T_{\text{нач}} e^{-t/\tau_x}. \quad (7)$$

Если на полупроводниковую структуру действует N импульсов ЭМП длительностью τ_n и периодом повторения τ_n , то по окончании N -го импульса, согласно (7) и (3), температура полупроводника будет равна:

$$\Delta T_N = \Delta T_{N-1} e^{-\frac{\tau_n - \tau_n}{\tau_x}} + \Delta T_{\text{од}}. \quad (8)$$

Выражение (8) представляет собой линейное неоднородное разностное уравнение первого порядка [10] относительно функции дискретного переменного ΔT_N . Решение этого уравнения с начальным условием $\Delta T_1 = \Delta T_{\text{од}}$ имеет вид:

$$\Delta T_N = \Delta T_{\text{од}} \frac{1 - e^{-N \frac{\tau_n - \tau_n}{\tau_x}}}{1 - e^{-\frac{\tau_n - \tau_n}{\tau_x}}}. \quad (9)$$

Полагая в (9) $\Delta T_N = T_{\text{кр}} - T_0$ и используя (2) можно показать, что при адиабатическом разогреве полупроводниковой структуры последовательностью импульсов ЭМП, критический уровень будет пропорционален отношению $(1 - e^{-(\tau_n - \tau_n)/\tau_x}) / (1 - e^{-N(\tau_n - \tau_n)/\tau_x})$.

Для относительно длинных импульсов ЭМП, соответствующих слагаемому с нулевой степенью τ_n в модели Вунша-Белла-Таска, теплообмен протекает одновременно с нагревом полупроводника. В данном случае определяющим в процессе нагрева становится соотношение между плотностями потоков энергии ЭМП и отвода тепла в течение одного импульса, как при непрерывном разогреве. Уровень стойкости от параметров импульсной последовательности здесь практически не зависит и остаётся в рамках модели (1).

Таким образом, оценку уровня стойкости в случае воздействия на полупроводниковый прибор последовательности импульсов ЭМП следует проводить по формуле:

$$P_{\text{кр}} = \frac{1 - e^{-\frac{\tau_n - \tau_n}{\tau_x}}}{1 - e^{-N \frac{\tau_n - \tau_n}{\tau_x}}} \left(A \tau_n^{-1} + B \tau_n^{-1/2} \right) + C. \quad (10)$$

В модели (10) экспериментальному определению вместе с коэффициентами A , B и C подлежит величина τ_x , поскольку её теоретический расчёт, как правило, представляет существенные трудности.

Уровень стойкости РЭС $P_{\text{РЭС кр}}$ можно представить как:

$$P_{\text{РЭС кр}} = P_{\text{кр}} / k_n, \quad (11)$$

где k_n — коэффициент передачи электромагнитной энергии. При воздействии ЭМП на РЭС со штатной антенной величина $P_{\text{кр}}$ есть уровень стойкости входного полупроводникового прибора. Коэффициент k_n в этом случае должен учитывать потери во входном тракте: возможные потери в антенне из-за несогласованности поражающего ЭМП по пространству (по направлению прихода) и по поляризации с полезным сигналом РЭС, потери от действия защитных устройств (при наличии таковых), а также потери в селективных цепях из-за несогласованности их спектров. При воздействии на РЭС, не имеющего в своём составе штатной антенны, величина $P_{\text{кр}}$ представляет собой критический уровень ЭМП для наименее стойкого полупроводникового прибора, отказ которого приводит к выходу из строя РЭС в целом. Для такого типа воздействия коэффициент k_n должен учитывать потери за счёт экранировки корпусом РЭС.

Из (10) и (11) следует, что уровень стойкости РЭС может быть оценён по формуле:

$$P_{РЭС\text{ кр}} = \frac{1 - e^{-\frac{\tau_n - \tau_{и}}{\tau_{РЭС}}}}{1 - e^{-N \frac{\tau_n - \tau_{и}}{\tau_{РЭС}}}} \left(A_{РЭС} \tau^{-1} + B_{РЭС} \tau^{-1/2} \right) + C_{РЭС}, \quad (12)$$

где $A_{РЭС}$, $B_{РЭС}$, $C_{РЭС}$, $\tau_{РЭС}$ – коэффициенты модели для РЭС, также определяемые экспериментально.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТА ЗАВИСИМОСТИ КРИТИЧЕСКОГО УРОВНЯ ПОЛЯ ОТ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ НА ПРИМЕРЕ КОМПЬЮТЕРА

По формуле (12) проведена оценка уровней плотности мощности сверхвысокочастотного электромагнитного излучения 10-сантиметрового диапазона длин волн, при которых фиксируются сбои в работе компьютера типа РС386DX-40 в экспериментах [5]. На рисунке 1 показаны графики зависимостей критического уровня ЭМП от длительности импульса при одиночном воздействии и при воздействии последовательностей из тысячи импульсов ($N = 1000$) с различными временами их повторения. Эмпирические коэффициенты выбраны равными: $A_{РЭС} = 1,5 \cdot 10^{-7}$ Дж/см²; $B_{РЭС} = 0$ Вт·с^{1/2}/см²; $C_{РЭС} = 0,11$ Вт/см²; $\tau_{РЭС} = 0,07$ с. На графиках также отмечены данные экспериментов [5]. На рисунке 2 показаны графики зависимостей критического уровня ЭМП от числа импульсов для последовательностей импульсов с $\tau_{и} = 100$ нс и различными временами их повторения.

Показанные на рисунке 1 графики отражают основные закономерности поражения полупроводниковых приборов и РЭС, полученные в экспериментах. Эмпирическая зависимость

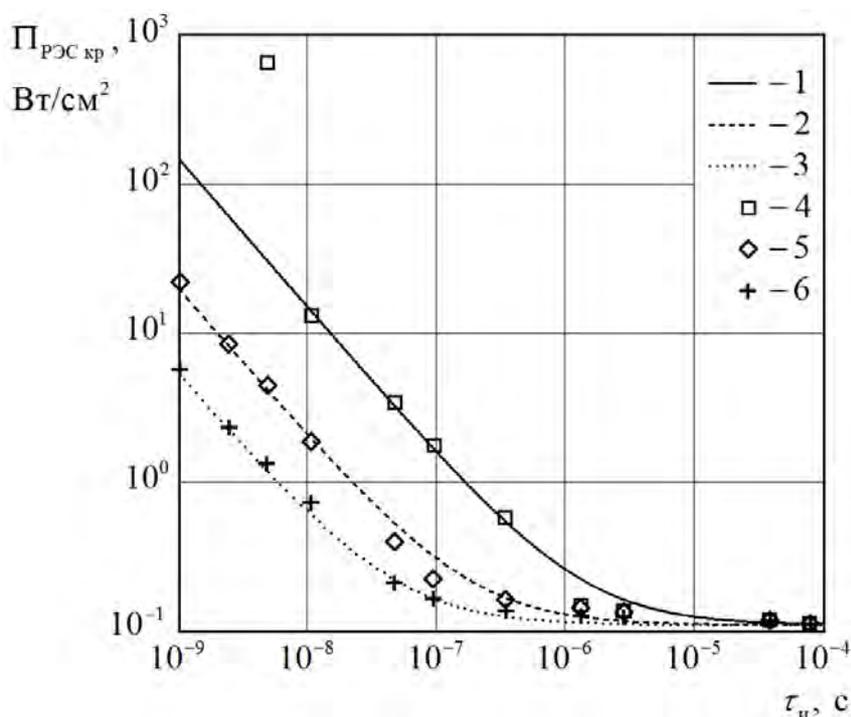


Рис. 1. Зависимости критического уровня ЭМП, необходимого для программного сбоя компьютера РС386DX-40, от длительности импульса: 1, 2, 3 – эмпирические зависимости, построенные по формуле (12); 4, 5, 6 – экспериментальные результаты [5]. 1, 4 – одиночный импульс; 2, 5 – $\tau_n = 10$ мс; 3, 6 – $\tau_n = 2,5$ мс.

(12) хорошо согласуется с экспериментальными результатами, за исключением интервала длительностей менее 10 нс для одиночного воздействия. В этой области, как показано в экспериментах [5], для одиночных и квазиодиночных (с частотой следования до 50 Гц) воздействий при уменьшении длительности импульса критический уровень нарастает значительно быстрее, чем в других областях. Такое поведение объясняется преобладанием нетепловых механизмов повреждения полупроводниковых структур.

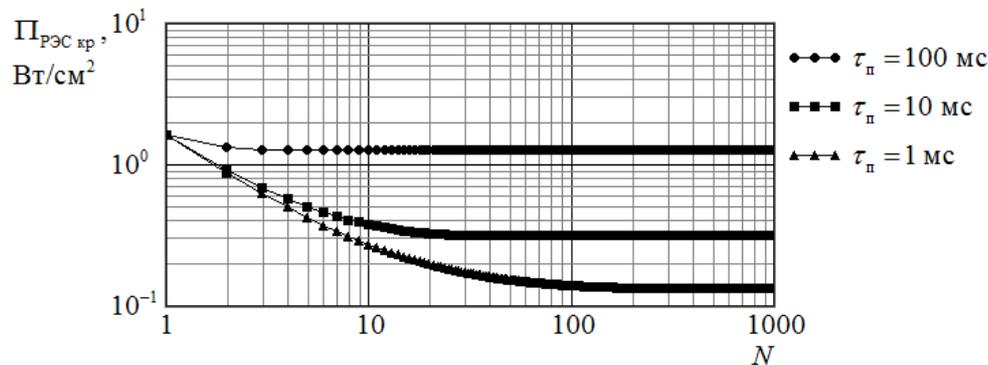


Рис. 2. Зависимости критического уровня ЭМП, необходимого для программного сбоя компьютера PC386DX-40, от числа импульсов при $\tau_n = 100$ нс.

Из графиков на рисунке 2 видно, что уровень стойкости снижается с ростом числа импульсов. Начиная с некоторого значения числа импульсов, уровень стойкости перестаёт изменяться. Т.е. зависимости на рисунке 2 иллюстрируют переходной процесс установления критического уровня для заданных длительности и времени повторения импульсов ЭМП. При уменьшении времени повторения установившийся критический уровень снижается, стремясь к значению уровня стойкости в непрерывном режиме облучения. При увеличении времени повторения зависимость $P_{РЭС\text{ кр}}$ от N ослабевает.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, на основе законов теплообмена между полупроводником и окружающей средой получено выражение для оценки уровней стойкости полупроводниковых приборов и РЭС, учитывающее время повторения и число импульсов ЭМП. Полученная закономерность позволяет предсказывать поведение уровней стойкости полупроводниковых приборов и РЭС при воздействии на них последовательностей импульсов. Проведён расчёт зависимостей критического уровня ЭМП, при котором происходит программный сбой компьютера, от длительности импульсов для различных времён их повторения и фиксированного числа импульсов. Результат расчёта показал хорошее соответствие полуэмпирических кривых данным эксперимента, за исключением интервала длительностей менее 10 нс для одиночных и квазиодиночных воздействий, где преобладают нетепловые механизмы повреждения полупроводниковых элементов. Проведён расчёт зависимостей критического уровня ЭМП от числа импульсов, характеризующих процесс его установления при воздействии импульсной последовательности для заданных длительности и времени повторения импульсов. Наименьший критический уровень может быть получен в установившемся режиме. Необходимое для установления минимального уровня стойкости число импульсов снижается при увеличении длительности импульсов и уменьшении времени их повторения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радиоэлектронная борьба. Силовое поражение радиоэлектронных систем [Текст] /

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 [Текст] / 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 [Текст] / В. В. Антипин, В. А. Годовицин, Д. В. Громов и др. // Зарубежная радиоэлектроника. — 1995. — № 1. — С. 37–53.

4. Панов, В. В. Некоторые аспекты проблемы создания СВЧ средств функционального поражения [Текст] / В. В. Панов, А. П. Саркисян // Зарубежная радиоэлектроника. — 1993. — № 10, 11, 12. — С. 3–10.

5. Экспериментальное исследование воздействия сверхвысокочастотных импульсов на работу персонального компьютера [Текст] / Ю. Г. Юшков, П. Ю. Чумерин, С. Н. Артёменко и др. // Радиотехника и электроника. — 2001. — Т. 46, № 8. — С. 1020–1024.

6. Ключник, А. В. Статистическая модель повреждения цифровых интегральных микросхем импульсным радиоизлучением [Текст] / А. В. Ключник, А. В. Солодов // Радиотехника. — 2010. — № 2. — С. 37–42.

7. 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 3.07.2015).

8. Ключник, А. В. Исследование стойкости интегральных микросхем в электромагнитных полях радиоизлучения [Текст] / А. В. Ключник, Ю. А. Пирогов, А. В. Солодов // Радиотехника и электроника. — 2011. — Т. 56, № 3. — С. 370–374.

9. Теплотехника [Текст] / Под ред. В. Н. Луканина. — М.: Высшая школа, 1999. — 671 с.

10. Романко, В. К. Разностные уравнения [Текст] / В. К. Романко. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. — 112 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., Godovicin V. A., Gromov D. V., Kozhevnicov A. S., Ravaev A. A. Influence of powerful pulse microwave hindrances on semi-conductor devices and integrated microcircuits. [Antipin V. V., Godovicin V. A., Gromov D. V., Kozhevnicov A. S., Ravaev A. A. Vliyanie moshnykh impulsnykh mikrovolnovykh pomekh na poluprovodnikovye pribory i integral'nye mikroskhemy]. *Zarubezhnaya radioe'lektronika — Foreign radio electronics*, 1995, no. 1, pp. 37–53.

4. Panov V. V., Sarkis'yan A. P. Some aspects of a problem of creation of microwave means of functional defeat. [Panov V. V., Sarkis'yan A. P. Nekotorye aspekty problemy sozdaniya SVCh sredstv funktsional'nogo porazheniya]. *Zarubezhnaya radioe'lektronika — Foreign radio electronics*, 1993, no. 10, 11, 12, pp. 3–10.

5. Ushkov U. G., Chumerin P. U., Artemenko S. N., Novikov S. D., Zelencov D. V. Experimental research of influence of superhigh-frequency impulses for work of the personal computer. [Ushkov U. G., Chumerin P. U., Artemenko S. N., Novikov S. D., Zelencov D. V. E'ksperimental'noe issledovanie vozdeystviya sverkhvysokochastotnykh impulsov na rabotu personalnogo kompyutera].

Radiotekhnika i e'lektronika — Journal of Communications Technology and Electronics, 2001, vol. 46, no. 8, pp. 1020–1024.

6. 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.

7. 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 radioe'lektroniki: 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 3.07.2015).

8. Klyuchnik A. V., Pirogov U. A., Solodov A. V. Research of firmness of integrated microcircuits in electromagnetic fields of a radio emission. [Klyuchnik A. V., Pirogov U. A., Solodov A. V. Issledovanie stoikosti integral'nykh mikroskhem v e'lektromagnitnykh polyakh radioizlucheniya]. *Radiotekhnika i e'lektronika — Journal of Communications Technology and Electronics*, 2011, vol. 56, no. 3, pp. 370–374.

9. The heating engineer. Editor V. N. Lukanin. [Teplotekhnika. Pod red. V. N. Lukanina]. Moscow: Vysshaya shkola, 1999, 671 p.

10. V. K. Romanko. Difference equations. [V. K. Romanko. Raznochnye uravneniya]. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2006, 112 p.

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

Volkov Aleksey Anatolevich, chief of the laboratory from the Military Educational-Research Centre of Air Force “Air Force Academy named after professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin”, 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, Воронеж, Россия
E-mail: bk_123@bk.ru
Тел.: 8-951-545-61-69

Trifonov Pavel Andreevich, Dr.Sci. (Eng.), Professor of Voronezh State University, Voronezh, Russia
E-mail: bk_123@bk.ru
Tel.: 8-951-545-61-69