

## ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРАХ

УДК 537.868:621.382

### ПРОНИКНОВЕНИЕ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ В ПОЛУПРОВОДНИКОВУЮ ЭЛЕМЕНТНУЮ БАЗУ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ, НЕ ИМЕЮЩИХ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ПРИЕМНЫХ АНТЕНН

© 2020 г. В. Г. Усыченко<sup>а, \*</sup>, Л. Н. Сорокин<sup>а, \*\*</sup>, А. С. Усыченко<sup>б, \*\*\*</sup>

<sup>а</sup>Государственный научно-исследовательский институт прикладных проблем,  
наб. Обводного канала, 29, Санкт-Петербург, 191167 Российская Федерация

<sup>б</sup>Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН,  
14 лин. Васильевского острова, 39, Санкт-Петербург, 199178 Российская Федерация

\*E-mail: usychenko@rphf.spbstu.ru

\*\*E-mail: sorokinln@mail.ru

\*\*\*E-mail: yas0210@mail.ru

Поступила в редакцию 14.02.2020 г.

После доработки 16.03.2020 г.

Принята к публикации 04.04.2020 г.

Решена задача о рассеянии энергии электромагнитных излучений в полупроводниковых приборах технических средств, у которых поля улавливаются не направленными частотно-избирательными антеннами, а разнонаправленными рецепторами. Рассмотрено воздействие как узкополосных СВЧ-импульсов с различными несущими частотами, так и сверхкоротких электромагнитных импульсов, спектр которых простирается до частот, порядка нескольких гигагерц. Результаты расчетов согласуются с опубликованными экспериментальными данными.

DOI: 10.31857/S0033849420110170

#### ВВЕДЕНИЕ

С течением времени возрастает интерес к воздействию мощных электромагнитных излучений на полупроводниковую элементную базу, используемую в различных технических средствах (ТС). Так, в работах [1, 2] исследовали чувствительность компьютерных сетей и систем, микроконтроллеров, интегральных микросхем и др. к воздействию мощных электромагнитных импульсов различной длительности, узкополосных СВЧ-импульсов (СВЧИ) и сверхкоротких электромагнитных импульсов (СКЭМИ). Измерены пороговые уровни электрических полей, при которых начинаются обратимые отказы, требующие перезагрузки аппаратуры, и необратимые (катастрофические) отказы в работе устройств. Показано, что многие объекты испытаний наиболее чувствительны к воздействию СВЧИ и СКЭМИ.

В работе [3] персональные компьютеры (ПК) различных модификаций облучали СВЧИ одинаковой длительности, но с разными несущими частотами  $f_0$ . Установлено, что пороговые значения напряженности поля СВЧИ, вызывающего отказы в работе ПК, требующие его перезагрузки, растут

пропорционально частоте. Аналогичного вида отказы изучали и в работе [4], облучая ПК СВЧ-импульсами с несущей частотой  $f_0 \approx 2.8$  ГГц, длительность  $\tau$  которых меняли в диапазоне от 1 нс до 70 мкс. Отмечено, что при  $\tau > 10$  нс зависимость пороговой мощности отказов от  $\tau$  удовлетворительно описывается в рамках модели теплового поражения полупроводниковых приборов (ПП). (Модель будет рассмотрена ниже, см. рис. 4.)

В работе [5] изучали стойкость различных типов интегральных микросхем к воздействию СВЧ-импульсов с несущей частотой  $f_0 \approx 7.5$  ГГц, длительность которых меняли от 0.1 мкс до 10 мс. Измеряли пороговую плотность потока падающей на микросхему импульсной энергии, при которой происходит катастрофический отказ. Из приведенных данных следует, что при  $\tau > 5$  мкс пороговая мощность отказов  $P_{\text{пор}}(\tau)$  снижается слабо, а при  $\tau < 5$  мкс быстро растет с уменьшением  $\tau$ . Такое поведение зависимости  $P_{\text{пор}}(\tau)$  характерно для теплового разрушения ПП в результате нагрева энергией воздействующих импульсов до температуры плавления. Обобщая результаты работ [4, 5], можно сделать вывод, что обратимые отка-

зы в работе ПК, требующие перезагрузки, как и катастрофические отказы ПП, происходят в результате рассеяния в ПП определенных уровней энергии, поступающей от воздействующих импульсов.

В работах [1, 2, 6] изучали стойкость микроконтроллеров к воздействиям СКЭМИ. Обсуждены вероятные законы распределения пороговых уровней напряженности электрических полей СКЭМИ, превышение которых вызывает обратимые и необратимые отказы в их работе; предложены модели, интерпретирующие результаты измерений.

К настоящему времени уже разработаны [7] аналитические методы оценки стойкости СВЧ радиоприемных устройств к различным видам электромагнитных воздействий. Решение задачи облегчается наличием у таких устройств направленных частотно-избирательных приемных антенн, параметры которых известны. Воспринятая антенной энергия рассеивается в наиболее уязвимом ПП, находящемся на входе приемника. Но у цифровых микроэлектронных ПП технических средств нет специализированных приемных антенн, и чувствительность к электромагнитным полям оценивается экспериментальными методами. Например, в работе [8] изучали воздействие СКЭМИ на систему видеонаблюдения, оснащенную микропроцессорными устройствами и компьютером. При напряженности поля  $E \geq 10$  кВ/м произошел сбой всех устройств. По словам авторов, “электромагнитные поля проникают через щели в экранах и наводятся в цепях “жила–экран” кабелей, подсоединенных к входам аппаратуры”. В работе [9] воздействие СКЭМИ на беспилотный летательный аппарат (квадрокоптер) вызвало его падение на землю.

Примеров экспериментальных исследований много, труднее с аналитическими моделями, которые позволяли бы оценивать уровни мощности (энергии), рассеиваемой электромагнитными полями в ПП технических средств, у которых нет специализированных приемных антенн. В данной статье сделана попытка оценить эти уровни, исходя из общефизических представлений.

## 1. ИСХОДНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Согласно международной и отечественной практике [10, 11] при воздействии электромагнитных помех на ТС, содержащие полупроводниковые электронные приборы (диоды, транзисторы, микроконтроллеры, микросхемы и т.д.), обычно различают четыре степени влияния помех на их работоспособность:

“А” – незначительное влияние помех (функционирование в пределах установленных требований);

“В” – обратимые отказы, приводящие к временной потере работоспособности, которая восстанавливается после прекращения воздействия без вмешательства оператора;

“С” – обратимые отказы, приводящие к временной потере работоспособности, которая восстанавливается после прекращения воздействия, но только после перезагрузки аппаратуры, осуществляемой оператором (или специальной программой);

“D” – необратимые (катастрофические) отказы, приводящие к полной потере работоспособности, которая не восстанавливается после прекращения воздействия из-за необратимых повреждений ПП (выход из строя).

События “А” и отказы типа “В” возникают при воздействии слабых помех в результате искажения циркулирующих в аппаратуре ТС сигналов из-за наложения на них наведенного напряжения помехи. В цифровых системах такие отказы приводят к ошибкам, которые описываются в рамках теории вероятностей, см., например, [12]. На появление таких отказов влияют амплитуда, форма и частота следования импульсов помехи, энергия помехи практически не расходуется. Иное дело – отказы типа “С” и типа “D”.

Необратимые отказы типа “D” наступают при разрушении структуры ПП, на что затрачивается энергия воздействующего импульса, которая рассеивается в ПП, нагревая его [7]. Обратимые отказы типа “С” также возникают в результате рассеяния в ПП энергии помехи, но в меньших количествах. О решающей роли энергии в появлении этих отказов говорили выше при обобщении результатов работ [4, 5]. Дополнительным подтверждением сказанному является тот факт, что у некоторых типов микроконтроллеров построенные по экспериментальным данным зависимости функций распределения отказов типа “С” и типа “D” от напряженности поля воздействующих импульсов подобны друг другу [1, 2]. В результате отказов типа “D” и типа “С” изменяется физическое состояние ПП: в первом случае наступает катастрофический отказ, во втором случае меняется лишь форма функционирования ПП (например, “защелкивание” микроконтроллера). В этой статье учитываются только отказы типа “С” и “D”, требующие энергетических затрат.

Эффективная поглощающая площадь любой антенны [13] связана с ее коэффициентом усиления  $G$  формулой

$$A = \frac{\lambda^2}{4\pi} G, \quad (1)$$

где  $\lambda = c/f_0$  – длина волны воздействующего колебания,  $c$  – скорость света. У микросхемы рецепторами электромагнитного поля, наряду с внутренними дорожками разводки, соединяющими внешние выводы с кристаллом полупроводни-

ка, на котором изготовлена электронная схема [14], являются подключенные к входам–выходам полосковые линии печатных плат [14, 15], шлейфы, шины [6], интерфейсы, то есть проводники разных размеров, по-разному ориентированные, изогнутые, скрученные. Такие рецепторы воспринимают излучение, поступающее практически со всех сторон, поэтому значение коэффициента направленного действия, усредненного по всем возможным углам и ориентациям вектора поляризации, близко к 1. Соответственно, при малых потерях, и коэффициент усиления  $G$  рецепторов близок к 1. Сказанное подтверждается также тем (см. [16, табл. 9-1]), что у всех типов простейших антенн  $A \approx \lambda^2/4\pi$ . Например,

|  |                            |
|--|----------------------------|
| у ненаправленной антенны                           | $A = \lambda^2/4\pi$ ,     |
| у малой одновитковой рамки любой формы             | $A = 1.5\lambda^2/4\pi$ ,  |
| у короткого вибратора на идеально проводящей земле | $A = 3\lambda^2/4\pi$ ,    |
| у полуволнового вибратора                          | $A = 1.64\lambda^2/4\pi$ , |
| у диполя Герца                                     | $A = 1.5\lambda^2/4\pi$ .  |

Таким образом, в первом приближении можно считать, что у неэкранированных рецепторов, подключаемых к полупроводниковым кристаллам микропроцессоров, микроконтроллеров и других элементов, расположенных на печатных платах аппаратуры технических средств, эффективная поглощающая площадь описывается выражением (1), коэффициент усиления  $G$  в котором порядка единицы. К такому же мнению приходят и авторы статьи [15].

## 2. ПРОНИКНОВЕНИЕ ЭНЕРГИИ СВЧИ

В основу расчетов положим формулу идеальной радиопередачи [16, § 9.11]

$$P_{\text{пл}} = P_{\text{пр}} \frac{\lambda^2 r^2}{A_{\text{пл}} A_{\text{пр}}}, \quad (2)$$

где  $P_{\text{пл}}$  – мощность, излучаемая антенной передатчика;  $P_{\text{пр}}$  – мощность, подводимая антенной приемника к согласованной нагрузке;  $A_{\text{пл}}$  и  $A_{\text{пр}}$  – эффективные поглощающие площади (1) антенн передатчика и приемника;  $r$  – расстояние между антеннами. Из (2) с учетом (1) следует выражение для энергетического потенциала излучателя в дальней зоне:

$$P_{\text{пл}} G_{\text{пл}} = \left( \frac{4\pi r f_0}{c} \right)^2 \frac{P_{\text{пр}}}{G_{\text{пр}}} = 4\pi r^2 \frac{E_{\text{mr}}^2}{2Z_0}. \quad (3)$$

Здесь  $G_{\text{пл}}$  и  $G_{\text{пр}}$  – коэффициенты усиления антенн передатчика и приемника на частоте  $f_0$  колебания;  $E_{\text{mr}}^2/(2Z_0)$  – модуль вектора Пойнтинга в дальней зоне;  $E_{\text{mr}}$  – амплитуда напряженности электрического поля волны;  $Z_0 = 120\pi$  – волновое сопротивление свободного пространства. В дальнейшем полагаем, что в формуле (3) роль антенны приемника, направленной на антенну передатчика, исполняет рецептор, коэффициент усиления которого  $G_{\text{пр}} \approx 1$ .

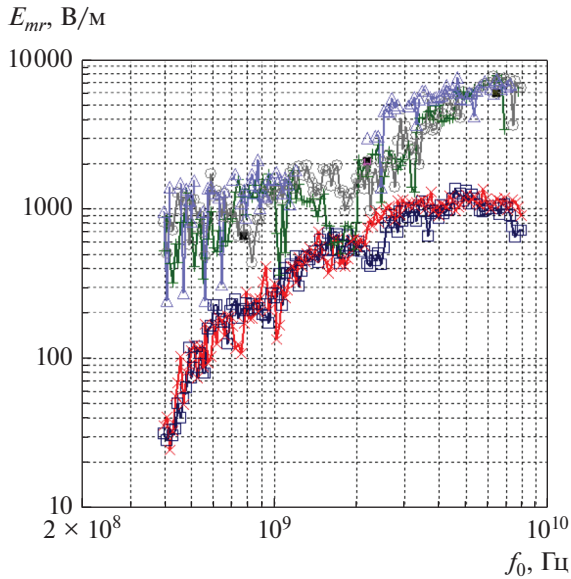
Пусть нагрузкой рецептора является микропроцессор, или какой-либо иной ПП. Известно [7], что при выгорании ПП (отказ типа “D”) в большинстве случаев происходит плавление кристаллической решетки, на что затрачивается энергия воздействующего импульса, намного превышающая энергию, потребляемую прибором в режиме “малого сигнала”. Полагаем, что подобное увеличение потребляемой энергии происходит и при отказах типа “C”. Пусть известно значение рассеиваемой в ПП пороговой мощности  $(P_{\text{пр}})_{\text{пор}}$ , превышение которой вызывает отказ типа “C” или “D”. Мощность поступает от импульса, цепь рецептор–нагрузка оказывается рассогласованной. В радиоприемных устройствах подобное рассогласование нагрузки с антенным трактом учитывается [7] коэффициентом  $K_{\text{ВАХ}}$  влияния вольтамперной характеристики ПП, значение которого не превышает несколько единиц. Полагаем, что в нашем случае порядок величин сохраняется. Подставив  $(P_{\text{пр}})_{\text{пор}}$  в (3), зная расстояние  $r$  и частоту излучаемого колебания, полагая  $G_{\text{пр}} \approx 1$ , можно оценить пороговые значения энергетического потенциала  $(P_{\text{пл}} G_{\text{пл}})_{\text{пор}}$  и напряженности электрического поля  $(E_{\text{mr}})_{\text{пор}}$  в зоне нахождения рецептора, превышение которых вызовет отказ в работе ПП.

В формуле (3) выразим квадрат напряженности поля через мощность  $P_{\text{пр}}$ , рассеиваемую в нагрузке рецептора:

$$E_{\text{mr}}^2 = \frac{64\pi^2}{G_{\text{пр}} \lambda^2} 15 P_{\text{пр}} = \frac{960\pi^2 f_0^2}{G_{\text{пр}} c^2} P_{\text{пр}}. \quad (4)$$

При  $G_{\text{пр}} = 1$  это выражение совпадает с возведенным в квадрат полем формулы (2) статьи [3], которую авторы получили, полагая, что приемная антенна “на 100% эффективна и идеально согласована”.

Из (3) видно, что для рассеяния в ПП одной и той же мощности  $P_{\text{пр}}$  энергетический потенциал излучателя, перестраиваемого по частоте, должен меняться по закону  $P_{\text{пл}} G_{\text{пл}} \propto f_0^2$ . Соответственно по такому же закону меняется и квадрат напряженности поля (4).



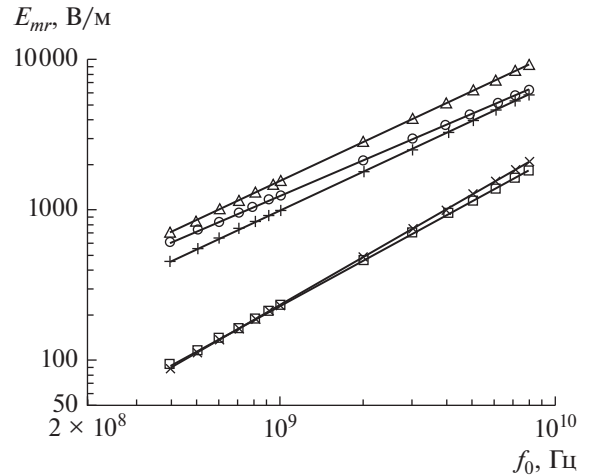
**Рис. 1.** Пороговая восприимчивость ПК к узкополосным СВЧ-импульсам различной несущей частоты [3]:  $\square$  – Brand C 486 66 MHz;  $\times$  – Brand D 486 100 MHz;  $+$  – Brand E PIII 667 MHz;  $\circ$  – Brand C PIV 1.4 GHz;  $\triangle$  – Brand I PIV 1.4 GHz.

Если рецептор экранирован, например, корпусом самого технического средства, или если ПП рассогласован с рецептором, то условие идеальной радиопередачи не выполняется, и вместо (3) получаем формулу

$$P_{\text{пд}} G_{\text{пд}} = 4\pi r^2 \frac{E_{mr}^2}{2Z_0} = \left( \frac{4\pi r f_0}{c} \right)^2 \beta^2(f_0) \frac{P_{\text{пр}}}{G_{\text{пр}}}, \quad (5)$$

где  $\beta(f_0)$  – коэффициент, учитывающий все виды ослабления электрического поля волны при ее распространении от внешних границ ТС до кристалла ПП.

Для проверки полученных соотношений обратимся к экспериментальным результатам работы [3]. В этой работе ПК помещали в реверберационную камеру, в которой посредством перемешивания мод создавали в среднем однородное изотропное поле с равновероятным распределением углов распространения и поляризации. Облучали ПК последовательностью “длинных” СВЧИ (у всех импульсов длительность  $\tau = 30$  мкс), но с разной несущей частотой  $f_0$ , которая дискретно (сто значений на декаду) перестраивалась в диапазоне 0.4...8 ГГц. На рис. 1, взятом из этой статьи, представлены в зависимости от несущей частоты пиковых значений напряженности  $E_{mr}$  электрического поля СВЧ-импульсов, превышение которых вызывало отказы типа “С”.



**Рис. 2.** Пороги сбоев пяти типов ПК [3] (только линии трендов):  $\square$  – Brand C 486 66 MHz;  $\times$  – Brand D 486 100 MHz;  $+$  – Brand E PIII 667 MHz;  $\circ$  – Brand C PIV 1.4 GHz;  $\triangle$  – Brand I PIV 1.4 GHz.

Результаты измерений, приведенные на рис. 1, были усреднены [3] методом наименьших квадратов относительно линейных трендов. Линии трендов для пяти обследованных типов ПК, построенные на базе микропроцессоров с различной тактовой частотой, представлены на рис. 2. Нижняя линия тренда характерна для маломощных ПК, микропроцессоры которых оказались наиболее восприимчивыми к электромагнитным воздействиям. Верхние линии относятся к более производительным ПК, микропроцессоры которых потребовали их усиленного экранирования. По сути, линия тренда характеризует усредненную по частотам восприимчивость рецептора к сверхширокополосным электромагнитным излучениям.

Видно, что все линии трендов меняются с частотой по закону пропорциональности  $E_{mr} \propto f_0$ , что согласуется с формулой (4). Разница лишь в том, что в (4) под  $E_{mr}$  понимается амплитудное значение напряженности поля в области нахождения рецептора, а в работе [3] измеряли усредненную за время экспозиции пиковую напряженность поля  $E_m$  в камере с ПК, микропроцессор которого был экранирован корпусом ПК.

Аппроксимируем линии трендов зависимостью

$$E_{mr} \cong \frac{\bar{\beta} E_{mr1}}{f_{mr1}} f_0, \quad (6)$$

где  $E_{mr1}$  и  $f_{mr1}$  – связанные между собой значения напряженности поля и частоты, принадлежащие одной линии тренда;  $\bar{\beta} \geq 1$  – усредненный по диапазону частот коэффициент ослабления поля, ха-

рактически одинаков у всех линий; коэффициент  $\bar{\beta}$  определяет высоту этих линий по оси ординат. На линиях тренда значения коэффициентов  $\bar{G}_{\text{пр}} \approx 1$  и  $\bar{\beta} \geq 1$  являются постоянными, а относительно линий тренда значения  $E_{mr}$ , как видно из рис. 1, меняются с частотой. Отклонения  $\Delta E_{mr}$  могут быть вызваны тем, что или коэффициент усиления  $G_{\text{пр}}$  приемника, или коэффициент экранировки  $\beta$ , или обе эти величины зависят от частоты СВЧ колебания. В экспериментах работы [3] эти отклонения не выходят за пределы  $\Delta E_{mr} = \pm 5$  дБ.

$$E_{mr1}/f_{mr1} \approx 2 \times 10^{-7} \text{ (В/М)/Гц} \quad (7)$$

Запишем правые части формулы (5) в виде

$$P_{\text{пр}} \bar{\beta}^2 = \frac{G_{\text{пр}} c^2}{960 \pi^2 f_0^2} E_{mr}^2 \quad (8)$$

Полагаем, что при рассеянии в микропроцессоре мощности, превышающей значение  $P_{\text{пр}}$ , у ПК происходят отказы типа “С”. Тогда  $P_{\text{пр}} \bar{\beta}^2$  – это мощность, которую должно затратить поле  $E_{mr}$  воздействующего СВЧИ, чтобы вызвать отказы у микропроцессора, экранированного от этого поля. Положив  $G_{\text{пр}} = 1$ , с учетом формул (6) и (7) получим мощность  $P_{\text{пр}} \bar{\beta}^2 \approx 0.4$  Вт, превышение которой должно вызвать отказы типа “С” у ПК, относящихся к нижней линии тренда. На верхней линии тренда, как видно из рис. 2, значение  $\bar{\beta}$  в 9 раз больше, чем на нижней линии. Микропроцессоры более мощных ПК лучше экранированы, поэтому от поля потребуется мощность, превышающая  $P_{\text{пр}} \bar{\beta}^2 \approx 31$  Вт.

В работе [4] исследовали отказы типа “С” у компьютера РС386DX-40, лицевую панель которого облучали СВЧ-импульсами с несущей частотой  $f_0 = 2.8$  ГГц; длительность  $\tau$  импульсов варьировали в широких пределах. Из данных работы [4] следует, что при  $\tau > 3$  мкс отказы начинают возникать при амплитуде напряженности поля  $E_{mr} \approx 710$  В/м. Подстановка этих значений в (8) приводит к мощности  $P_{\text{пр}} \bar{\beta}^2 \approx 0.61$  Вт. Это близко к результату, полученному выше для ПК нижней линии тренда.

У нас нет экспериментальных данных о значениях рассеиваемой в микропроцессорах ПК мощности  $P_{\text{пр}}$ , превышение которой вызывает отказы типа “С” при воздействии “длинных” СВЧИ. Нет также данных о степени экранировки микропроцессоров. Поэтому комментировать полученные

результаты сложно. Вместе с тем известно [7], что у маломощных кремниевых и арсенидо-галлиевых транзисторов, используемых в радиоприемных устройствах СВЧ, отказы типа “D” при воздействии “длинных” СВЧИ происходят при рассеянии в них мощности близкой к 1 Вт. Микропроцессоры изготавливаются с использованием СВЧ-технологий, поэтому следует ожидать, что у них отказы типа “С” будут происходить при рассеянии меньшей мощности. Значение  $P_{\text{пр}} \bar{\beta}^2 \approx 0.4$ , полученное для ПК нижней линии тренда, удовлетворяет этому условию при  $\bar{\beta} = 1$ , и, тем более, при  $\bar{\beta} > 1$ .

### 3. ПРОНИКНОВЕНИЕ ЭНЕРГИИ СКЭМИ

Рассмотрим излучатель СКЭМИ, сверхширокополосная антенна которого возбуждается униполярным сверхкоротким электрическим импульсом (СКЭИ). Длительность переднего фронта СКЭИ может достигать значений порядка (<http://www.fidetechnology.com/products.html>) десятков сотен пикосекунд, длительность заднего фронта, как правило, значительно больше. Антенна характеризуется коэффициентом перекрытия по диапазону (band ratio)  $br = f_b/f_n$ , где  $f_b$  и  $f_n$  – верхняя и нижняя частоты полосы пропускания. У часто используемых в излучателях ТЕМ-рупоров коэффициент перекрытия может достигать значений  $br = 6 \dots 12$  и более.

Пусть  $U(t)$  – напряжение произвольного по форме СКЭИ, измеренное на сопротивлении нагрузки, которое равно волновому сопротивлению  $W_0$  тракта и выходному сопротивлению генератора СКЭИ. Найдем временные зависимости тока  $I(t) = U(t)/W_0$  и мощности

$$P(t) = U(t)I(t),$$

рассеиваемой в нагрузке. Определим энергию импульса

$$\Theta_U = \int_t P(t) dt = \frac{1}{W_0} \int_{-\infty}^{+\infty} U^2(t) dt \quad (9)$$

Рассчитаем фурье-спектр импульса

$$\dot{S}_U(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} U(t) \exp(-j\omega t) dt,$$

и найдем квадрат модуля этого спектра:

$$S_W(\omega) = \dot{S}_U(\omega) \dot{S}_U^*(\omega) = |\dot{S}_U(\omega)|^2 = S_U^2(\omega), \text{ В}^2/\text{Гц}^2.$$

Здесь  $\dot{S}_U^*(\omega)$  – спектральная функция, комплексно сопряженная функции  $\dot{S}_U(\omega)$ . Задание модуля

$S_U(\omega)$ , т.е. амплитудно-частотного спектра, однозначно определяет энергию сигнала, что следует из равенства Парсеваля, но ничего не говорит о форме сигнала. Поэтому все дальнейшие соотношения справедливы лишь в энергетическом смысле.

Согласно равенству Парсеваля [17, раздел 2.8], энергия (9) выражается через энергетический спектр импульса:

$$\Theta_U = \frac{1}{W_0} \int_{-\infty}^{+\infty} U^2(t) dt = \frac{2}{W_0} \int_0^{+\infty} S_U^2(f) df.$$

Здесь вместо “круговой” частоты  $\omega$  использована физическая частота  $f$ . Величина  $2S_U^2(f)/W_0$  имеет размерность Вт/Гц<sup>2</sup> = Дж/Гц и является спектральной плотностью энергии сигнала. Спектр  $S_U^2(f)$  короткого униполярного импульса качественно изображен в верхней части рис. 3.

Предположим, что генератор СКЭИ согласован с волновым сопротивлением тракта на всех частотах спектра  $S_U^2(f)$ , а вместо нагрузки используется передающая антенна, являющаяся частотно-избирательным фильтром. Пусть  $G_{\text{пд}}(f) = K(f)G(f_m)$  – амплитудно-частотная характеристика коэффициента усиления антенны в дальней зоне на оси излучения. Здесь  $K(f) = P_{\text{вых}}(f)/P_{\text{вх}}(f)$  – амплитудно-частотная характеристика антенны как фильтра, измеренная или рассчитанная в диапазоне частот,  $P_{\text{вх}}(f)$  и  $P_{\text{вых}}(f)$  – мощности гармонических сигналов на входе и выходе антенны;  $G(f_m)$  – коэффициент усиления антенны на частоте максимального значения  $K(f)$ . Тогда энергия излучателя СКЭМИ, поступающая в дальнюю зону, удовлетворяет пропорциональности

$$\Theta_{\text{пд}} \propto \frac{2}{W_0} \int_0^{+\infty} S_U^2(f) G_{\text{пд}}(f) df. \quad (10)$$

Антенна “вырезает” из спектра  $S_U^2(f)$  (см. рис. 3) составляющие, которые попадают в полосу ее пропускания, и излучает их в свободное пространство. Энергетический спектр СКЭМИ

$$\frac{2}{W_0} S_U^2(f) G_{\text{пд}}(f),$$

изображен в нижней части рис. 3 с точностью до постоянного множителя  $2/W_0$ .

Энергетический потенциал (5) излучателя, передающего в нагрузку рецептора мощность  $P_{\text{пр}}$ , получен для достаточно длинных (узкополосных) СВЧИ, характеризуемых мощностью колебания и несущей частотой  $f_0$ . Предположим теперь, что излучается СВЧИ, амплитуда которого меняется в течение его длительности таким образом, что

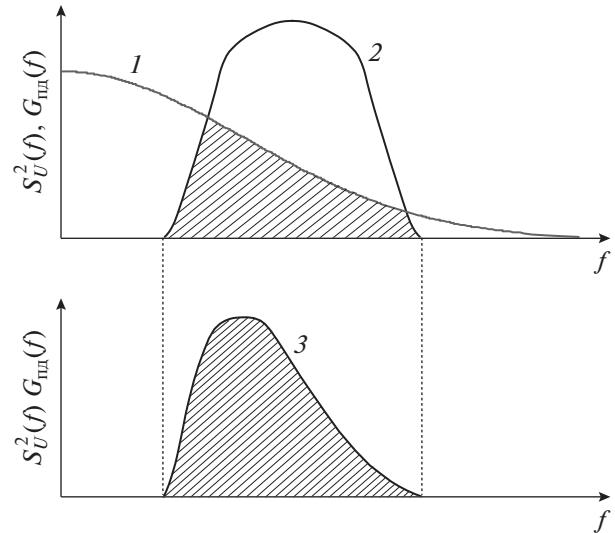


Рис. 3. Спектр  $S_U^2(f)$  униполярного СКЭИ (кривая 1) и коэффициент усиления  $G_{\text{пд}}(f)$  передающей антенны (кривая 2) –вверху; спектр излучаемого СКЭМИ (кривая 3) – внизу.

спектр импульса можно считать по-прежнему узкополосным. В этом случае формула (5) может быть записана в виде

$$P_{\text{пр}}(t) = \left( \frac{c}{4\pi r f \beta} \right)^2 P_{\text{пд}}(t) G_{\text{пд}} G_{\text{пр}} = \frac{c^2 G_{\text{пр}}}{4\pi Z_0 \beta^2 f^2} E_r^2(t). \quad (11)$$

Здесь  $P_{\text{пр}}(t)$  – временная форма мощности импульса на нагрузке, согласованной с рецептором;  $G_{\text{пр}} \approx 1, f \approx f_0$ ;  $E_r(t)$  – временная зависимость напряженности электрического поля импульса в области нахождения технического средства. Поскольку спектр импульса узок, то параметры  $G_{\text{пд}}$  и  $\beta$  имеют практически такие же значения, как на несущей частоте.

Устремим длительность импульса к настолько малому значению, что понятие несущей частоты начинает утрачивать свой смысл, а сам импульс трансформируется в СКЭМИ со сверхширокополосным спектром. Воздействие столь короткого импульса удобнее характеризовать не мощностью, а энергией, для чего преобразуем выражение (11) с помощью равенства Парсеваля. С учетом (10) получим

$$\Theta_{\text{пр}} = \int_{-\infty}^{+\infty} P_{\text{пр}}(t) dt = \left( \frac{c}{4\pi r \beta} \right)^2 \frac{2G_{\text{пр}}}{W_0} \times \int_0^{+\infty} \frac{1}{f^2} S_U^2(f) G_{\text{пд}}(f) df = \frac{c^2 G_{\text{пр}}}{2\pi Z_0 \beta^2} \int_0^{+\infty} \frac{1}{f^2} S_U^2(f) df. \quad (12)$$

Здесь  $G_{\text{пр}} \approx 1$  и  $\bar{\beta}$  – усредненные по всему спектральному диапазону частот коэффициент усиления рецептора и коэффициент ослабления поля волны, которые обладают такими же свойствами, как и в формуле (6). Эти коэффициенты определяют ординаты линий трендов, изображенных на рис. 2. Но в реальности коэффициенты  $G_{\text{пр}}$  и  $\bar{\beta}$  при изменении частоты могут отклоняться от своих средних значений в большую или меньшую сторону, как и на рис. 1. Множитель  $1/f^2$  учитывает весовой вклад различных спектральных составляющих в полную энергию, передаваемую рецептором в нагрузку. Левая часть формулы (12)

$$\Theta_{\text{пр}} = \left( \frac{c}{4\pi r \bar{\beta}} \right)^2 \frac{2G_{\text{пр}}}{W_0} \int_0^{\infty} \frac{1}{f^2} S_U^2(f) G_{\text{пл}}(f) df, \quad (13)$$

определяет воспринятую рецептором энергию СКЭМИ, выраженную через энергетический спектр СКЭИ, возбуждающего антенну излучателя, коэффициент усиления  $G_{\text{пл}}(f)$  которой является функцией частоты. Правая же часть формулы (12) определяет воспринятую рецептором энергию, выраженную через энергетический спектр напряженности поля СКЭМИ:

$$\Theta_{\text{пр}} = \frac{c^2 G_{\text{пр}}}{2\pi Z_0 \bar{\beta}^2} \int_0^{\infty} \frac{1}{f^2} S_E^2(f) df. \quad (14)$$

Здесь  $S_E^2(f)$  – квадрат модуля спектра  $\dot{S}_E(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} E(t) \exp(-j\omega t) dt$  напряженности электрического поля СКЭМИ в области нахождения технического средства. Из формул (13) и (14) видно, что чем ниже частота спектральных составляющих СКЭИ и СКЭМИ, тем больше их весовой вклад в энергию, потребляемую нагрузкой рецептора.

Для инженерных оценок желательны более простые формулы. С этой целью упростим интегралы, стоящие в правых частях (13), (14), введя нижнюю  $f_n$  и верхнюю  $f_b$  граничные частоты, между которыми находится подавляющая часть энергии СКЭМИ и где энергетические спектры  $S_U^2(f)G_{\text{пл}}(f)$  и  $S_E^2(f)$  не снижаются, положим, ниже 10% от максимума. На примере формулы (14) получим приближенный интеграл

$$\int_{f_n}^{f_b} \frac{1}{f^2} S_E^2(f) df.$$

Каждая из подынтегральных функций  $1/f^2$  и  $S_E^2(f)$  интегрируема в промежутке  $\Delta f = f_b - f_n$  и во всем промежутке не меняет знак. В этом случае

действует обобщенная теорема о среднем, используя которую получаем:

$$\int_{f_n}^{f_b} \frac{1}{f^2} S_E^2(f) df = \frac{f_b - f_n}{f_b f_n} \langle S_E^2(f) \rangle, \quad (15)$$

где  $\langle S_E^2(f) \rangle$  – усредненное на интервале  $\Delta f$  значение функции  $S_E^2(f)$ . Если  $f_b \gg f_n$ , то можно использовать приближенную формулу

$$\int_{f_n}^{f_b} \frac{1}{f^2} S_E^2(f) df \approx \frac{1}{f_n} \langle S_E^2(f) \rangle.$$

#### 4. СОПОСТАВЛЕНИЕ РАСЧЕТОВ С ЭКСПЕРИМЕНТОМ

Пороговые значения мощности, рассеиваемой в полупроводниковом приборе одиночным прямоугольным электрическим импульсом, вызывающим выгорание ПП (необратимый отказ типа “D”), зависят от длительности  $\tau$  импульса и в рамках тепловой модели описываются формулой Ванша–Белла–Таска [18, 7]

$$P_{\text{выг}} = A/\tau + B/\sqrt{\tau} + C,$$

где постоянные  $A, B, C$  зависят от вида и типа ПП. У многих транзисторов и диодов СВЧ-диапазона [7], а также у различных типов цифровых микросхем [5], постоянная  $B$  близка к нулю, и в пределе  $B = 0$  нормированная зависимость  $P_{\text{выг}}(\tau)$  принимает вид, изображенный на рис. 4.

При относительном значении длительности импульса  $\tau/\tau_{\text{выг}} \gg 1$  пороговая мощность выгорания постоянна (в среднестатистическом смысле) и равна мощности  $P_{\text{выг}}(\infty)$  квазистатического нагрева. При  $\tau/\tau_{\text{выг}} \ll 1$  происходит адиабатический нагрев активной области ПП, когда тепло не успевает покинуть эту область за время длительности импульса, и энергия выгорания  $\Theta_{\text{выг}} = \tau P_{\text{выг}}(\tau)$  не зависит от  $\tau$ . На рис. 4 эти асимптотические зависимости проведены пунктирными линиями, которые пересекаются при значении абсциссы  $\tau/\tau_{\text{выг}} = 1$ , где  $\tau_{\text{выг}}$  – постоянная времени выгорания, характерная для приборов данного типа. Из сказанного следует, что сравнение теоретических оценок с экспериментом будет корректным, если длительности СКЭМИ и СВЧИ удовлетворяют условию  $\tau < \tau_{\text{выг}}$ . У различных типов цифровых микросхем, обследованных в [5], значение  $\tau_{\text{выг}}$  меняется от нескольких микросекунд до 10 мкс, как и у ряда СВЧ-приборов, используемых в приемных устройствах сантиметрового диапазона [7]. Если энергия, рассеянная импульсом и накопившаяся в микросхеме (или в любом другом ПП), превысит пороговое значение

$\Theta_{\text{выг}} = \tau P_{\text{выг}}(\tau)$ , то произойдет выгорание – необратимый отказ типа “D”. При энергии в несколько раз меньше могут наблюдаться отказы типа “C”.

Умножив формулу (8) на длительность СВЧИ, удовлетворяющую условию  $\tau < \tau_{\text{выг}}$ , получим энергию, поступающую в нагрузку рецептора:

$$\Theta_{\text{пр}} = P_{\text{пр}} \tau = \frac{E_{\text{mr}}^2 G_{\text{пр}} c^2 \tau}{960 \pi^2 f_0^2 \beta^2}. \quad (16)$$

Считаем, что именно количество накопившейся в ПП энергии определяет вид его отказа – “C” или “D”. При этом не важно, какой импульс передал свою энергию – СВЧИ, видеоимпульс или СКЭМИ. От вида воздействия зависят лишь пути проникновения различных спектральных составляющих внутрь ПП, в то время как основную роль играет количество энергии, накопившейся в тех активных частях ПП, которые ответственны за отказы того или иного типа. Именно такие количества накопленной энергии, поступающей от СКЭМИ и СВЧИ длительностью  $\tau < \tau_{\text{выг}}$ , и отображают формулы (13), (14), (16).

Для проверки адекватности рассмотренных моделей идеальным был бы эксперимент, в котором одинаковые технические средства облучали бы короткими  $\tau < \tau_{\text{выг}}$  СВЧ-импульсами и СКЭМИ с последующим сопоставлением полученных результатов. Но в литературе такие эксперименты не описаны, поэтому воспользуемся косвенными методами доказательства.

В работе [5] при воздействии СВЧИ с несущей частотой  $f_0 = 7.5$  ГГц измеряли пороговые уровни полей, характеризующие стойкость широкой номенклатуры интегральных микросхем, в том числе транзисторно-транзисторной логики. Обследовали как отдельные микросхемы, так и находящиеся в составе печатных плат. (В таких экспериментах коэффициент экранировки  $\bar{\beta}$  равен коэффициенту рассогласования рецептора с нагрузкой, значение которого порядка нескольких единиц.) При длительности СВЧИ  $\tau = 1$  мкс, удовлетворяющей условию  $\tau < \tau_{\text{выг}}$ , катастрофические отказы у различных типов микросхем происходили при напряженностях поля, укладываемых в диапазон  $8.7 \leq E_{\text{mr}} \leq 47.5$  кВ/м. Выберем из этого ряда значение  $E_{\text{mr}} = 10$  кВ/м, подставим его в (16) и найдем мощность  $P_{\text{пр}} \approx 17$  Вт, рассеиваемую в микросхеме при воздействии такого СВЧИ.

В литературе не обнаружены пороговые зависимости мощности выгорания  $P_{\text{выг}}(\tau)$ , измеренные у тех или иных типов микросхем, в том числе микроконтроллеров. Вместе с тем, известно [7], что у некоторых видов маломощных кремниевых и

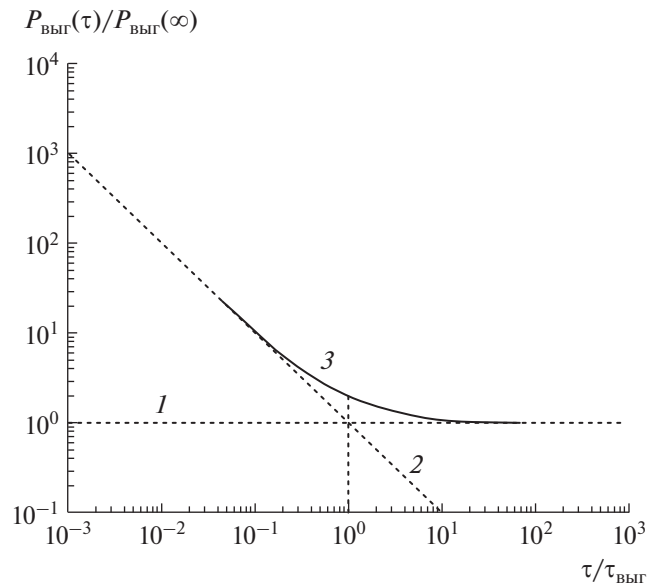


Рис. 4. Типичная нормированная зависимость пороговой мощности выгорания ПП  $P_{\text{выг}}(\tau)$  от длительности  $\tau/\tau_{\text{выг}}$  одиночного импульса: линия 1 – квазистатический нагрев  $P_{\text{выг}}(\infty) \propto \text{const}(\tau)$ ; линия 2 – адиабатический нагрев  $P_{\text{выг}}(\tau) \propto 1/\tau$ ; кривая 3 – зависимость  $P_{\text{выг}}(\tau)/P_{\text{выг}}(\infty)$ .

арсенидо-галлиевых биполярных и полевых транзисторов, используемых в приемниках СВЧ-диапазона, время тепловой релаксации  $\tau_{\text{выг}}$  может быть в несколько раз больше 1 мкс, т.е. примерно такое же, как у микросхем (судя по рис. 3 работы [5]). Например, у кремниевых СВЧ-транзисторов 2Т3132 и 2Т3120 измеренная при  $\tau = 1$  мкс мощность выгорания  $P_{\text{выг}}$  равна, соответственно, 3.5 и 10 Вт, что в 4.8 и 1.7 раза меньше расчетного значения  $P_{\text{пр}} \approx 17$  Вт у микросхемы. Такое расхождение вполне возможно, например, из-за различия значений  $\tau_{\text{выг}}$  и/или  $\bar{\beta}$ .

Из-за отсутствия данных об энергии выгорания микроконтроллеров предположим, что у приборов этого типа значение  $\tau_{\text{выг}}$  такое же, как у микросхем работы [5], и мощность выгорания при  $\tau = 1$  мкс равна 17 Вт. Определим теперь параметры СКЭМИ, воздействие которого может вызвать его катастрофический отказ. Подставив энергию  $\Theta_{\text{пр}} = P_{\text{пр}} \tau \approx 1.7 \times 10^{-5}$  Дж в формулу (14), найдем с учетом (15)

$$\begin{aligned} \langle S_E^2(f) \rangle &= \frac{f_{\text{в}} f_{\text{н}}}{f_{\text{в}} - f_{\text{н}}} \frac{2\pi Z_0 \Theta_{\text{пр}}}{c^2 G_{\text{пр}}} \approx \\ &\approx 4.5 \times 10^{-19} \bar{\beta}^2 \frac{f_{\text{в}} f_{\text{н}}}{f_{\text{в}} - f_{\text{н}}}. \end{aligned}$$



Согласно стандарту международной электротехнической комиссии [19] энергетический спектр СКЭМИ может занимать диапазон частот от  $f_n = 200$  МГц до  $f_b = 5$  ГГц. Примерно такой же стандарт действует и в России [20]. Подставив приведенные значения в формулу, найдем среднее по диапазону значение квадрата спектральной плотности электрического поля СКЭМИ в зоне нахождения технического средства:

$$\langle S_E^2(f) \rangle \approx 0.9 \times 10^{-10} \bar{\beta}^2 (B^2/m^2) / \Gamma_{\text{ц}}^2. \quad (17)$$

На практике об интенсивности СКЭМИ чаще судят по пиковой напряженности его поля  $E_{pr}$  в области нахождения объекта воздействия. Оценим значение  $E_{pr}$ , которое обеспечивает спектральную плотность (17). Для этого заменим СКЭМИ эквивалентным ему по энергии прямоугольным импульсом, амплитуда которого  $E_{mr} = E_{pr}$  равна пиковой напряженности поля СКЭМИ, а эквивалентная длительность описывается выражением

$$\tau_e = \frac{1}{E_{mr}^2} \int_0^{\infty} E_r^2(t) dt.$$

Спектр прямоугольного импульса в области положительных частот известен:

$$S_{\perp}(f) = 2E_{mr}\tau_e \left[ \frac{\sin(\pi f \tau_e)}{\pi f \tau_e} \right].$$

На частоте  $f_b = 1/\tau_e$  функция  $S_{\perp}(f)$  обращается в ноль, причем в диапазоне частот  $0 < f \leq 1/\tau_e$  содержится около 90% энергии импульса. Распределив эту энергию равномерно в диапазоне частот  $0 < f \leq 1/\tau_e$ , получим средний уровень

$$\begin{aligned} \langle S_{\perp}(f) \rangle &= 2E_{mr}\tau_e \left\langle \frac{\sin \pi f \tau_e}{\pi f \tau_e} \right\rangle \approx \\ &\approx 2E_{mr}\tau_e \sqrt{0.9} \approx 2E_{mr}\tau_e. \end{aligned}$$

Из равенства  $\langle S_{\perp}(f) \rangle = \sqrt{\langle S_E^2(f) \rangle}$ , где  $\langle S_E^2(f) \rangle$  определено в (15), полагая  $\tau_e = 1/f_b$ , найдем  $E_{mr} \approx 0.5 f_b \sqrt{\langle S_E^2(f) \rangle}$ . Подставив сюда значение  $S_E^2(f)$  из (17) и  $f_b = 5 \times 10^9$  Гц, получим оценку  $E_{mr} \approx 25\bar{\beta}$  кВ/м порогового значения поля СКЭМИ, вызывающего выгорание ПП.

В работе [1] при испытании неэкранированных микросхем транзисторно-транзисторной логики на стойкость к воздействиям СКЭМИ катастрофические отказы наблюдали в диапазоне значений напряженности поля (60...150) кВ/м, среднее значение примерно 100 кВ/м. Полученная нами оценка совпадает с этим значением при  $\bar{\beta} = 4$ , что можно считать неплохим результатом

при тех грубых допущениях, которые сделаны по причине отсутствия необходимых данных.

Возможны и другие причины несоответствия. Например, на биполярных СВЧ-транзисторах [7] и на ПК [4] экспериментально установлено, что при длительности воздействующих импульсов  $\tau < 10^{-8}$  с пороговые значения мощности выгорания  $P_{\text{выг}}(\tau)$  возрастают гораздо круче, чем это следует из тепловой модели и рис. 4. Иными словами, на разрушение ПП сверхкороткими импульсами требуется больше энергии, чем при импульсах длительностью  $\tau > 10^{-8}$  с.

В целом же можно сказать, что результаты теоретических оценок не вступают в противоречие с имеющимися экспериментальными данными.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена аналитическая модель проникновения энергии электромагнитных полей в полупроводниковую элементную базу технических средств, у которых нет специализированных частотно-избирательных приемных антенн, подобных антеннам сверхвысокочастотных радиоприемных устройств. Получены оценки значений напряженности электромагнитных полей СВЧИ и СКЭМИ, приводящие к сбоям и отказам в работе микроконтроллеров и ПК. Сопоставление теоретических оценок с опубликованными экспериментальными данными показало их качественное и, в доступной на сегодняшний день мере, количественное соответствие. Для повышения точности полученных оценок и определения границ практического применения модели желательны провести целенаправленные эксперименты.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 19-29-06010.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nitsch D., Camp M., Sabath F. et al. // IEEE Trans. 2004. V. EMC-46. № 3. P. 380.
2. Camp M., Gerth H., Garbe H., Haas H. // IEEE Trans. 2004. V. EMC-46. № 3. P. 368.
3. Hoad R., Carter N., Herke D., Watkins S. // IEEE Trans. 2004. V. EMC-46. № 3. P. 390.
4. Юшков Ю.Г., Чумерин П.Ю., Артеменко С.Н. и др. // РЭ. 2001. Т. 46. № 8. С. 1020.
5. Ключник А.В., Пирогов Ю.А., Солодов А.В. // РЭ. 2011. Т. 56. № 3. С. 1.
6. Camp M., Garbe H., Sabath F. // Proc. IEEE Int. Symp. in Electromagnetic Compatibility. Chicago. 8–12 Aug. N.Y.: IEEE, 2005. V. 2. P. 483.

7. *Усыченко В.Г., Сорокин Л.Н.* Стойкость сверхвысокочастотных радиоприемных устройств к электромагнитным воздействиям. М.: Радиотехника, 2017.
8. *Акбашев Б.Б., Алешко А.И., Галич Ю.В. и др.* // Технологии ЭМС. 2012. № 1(24). С. 22.
9. *Sakharov K.Yu., Sukhov A.V., Ugolev V.L., Gurevich Yu.M.* // Proc. 2018 Int. Symp. on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe). Amsterdam. 27–30 Aug. N.Y.: IEEE, 2018. P. 40.
10. Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics 9 / Eds. by F. Sabath, D.V. Giri, F. Rachidi, A.F. Kaelin. N.Y.: Springer, 2010. P. 325.
11. ГОСТ Р 51317.2.5-2000. Совместимость технических средств электромагнитная. Электромагнитная обстановка. Классификация электромагнитных помех в местах размещения технических средств. М.: Госстандарт России, 2001. <https://meganorm.ru/Data2/1/4294813/4294813400.pdf>
12. *Здухов Л.Н., Парфенов Ю.В., Тарасов О.А., Ченелев В.М.* // Технологии ЭМС. 2018. № 2(65). С. 22.
13. *Фрадин А.З.* Антенны сверхвысоких частот. М.: Сов. радио, 1957.
14. *Степовик А.П., Шамаев Е.Ю., Арманов М.М.* // РЭ. 2017. Т. 62. № 8. С. 812.
15. *Авдеев В.Б., Бердышев А.В., Григорьев И.А., Шеренков В.В.* // Антенны. 2007. Вып. 4(119). С. 23.
16. *Мейнке Х., Гундлах Ф.* Радиотехнический справочник. М.–Л.: Госэнергоиздат, 1960. Т. 1.
17. *Гоноровский И.С.* Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Сов. Радио, 1977.
18. *Dwyer V.M., Franklin A.J., Campbell D.S.* // Solid-State Electronics. 1990. V. 33. № 5. P. 553.
19. IEC 61000-2-13. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2-13: Environment – High-power electromagnetic (HPEM) environments – Radiated and conducted. [https://www.techstreet.com/standards/iec-61000-2-13-ed-1-0-en-2005?product\\_id=1210737](https://www.techstreet.com/standards/iec-61000-2-13-ed-1-0-en-2005?product_id=1210737).
20. ГОСТ Р 52863-2007. Защита информации. Автоматизированные системы в защищенном исполнении. Испытания на устойчивость к преднамеренным силовым электромагнитным воздействиям. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2008. <https://meganorm.ru/Data/474/47480.pdf>.