

Бочков К.А., Комнатный Д.В.

МЕХАНИЗМЫ И ВЕРОЯТНОСТИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СБОЕВ МИКРОЭЛЕКТРОННОЙ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ

В статье рассмотрены расчетно-экспериментальные методы определения вероятности функциональных сбоев электронной элементной базы под действием электромагнитных импульсных помех. Осуществлен анализ свойств случайного процесса импульсных помех и физических механизмов воздействия помех на электронные узлы. Разработаны способы вычисления вероятности сбоев на базе представления о вероятностной природе помех. Показано, что выполненный анализ помехового воздействия позволяет обосновать выбор условий эквивалентности импульсов, что является актуальной проблемой электромагнитной совместимости.

Ключевые слова: системы обеспечения безопасности, функциональный сбой, импульсные помехи, механизмы воздействия, вероятность сбоя, эквивалентность импульсов.

В настоящее время в энергетике, на транспорте, в химической и нефтехимической промышленности находят широкое применение микроэлектронные и микропроцессорные системы обеспечения безопасности. Задачей этих систем является минимизация или предотвращение последствий нарушения нормального функционирования технологического процесса, поэтому они являются критически важными информационными системами (КВИС) и к ним предъявляются особо высокие требования по функциональной безопасности.

Одной из причин снижения функциональной безопасности являются сбои функционального характера при воздействии импульсных электромагнитных помех на элементную базу. Искажения информации возникают на самом низком уровне в конструктивной иерархии – в интегральных микросхемах – и распространяются на более высокие уровни микроэлектронной и микропроцессорной системы. Анализ функциональной безопасности системы обеспечения безопасности в целом, соответственно, начинается с рассмотрения этого вопроса для устройств самого нижнего уровня конструктивной иерархии. Поэтому необходимы расчетно-экспериментальные методы определения вероятности функциональных сбоев элементной базы [1].

Для создания этих методов следует рассмотреть свойства импульсных помех. В общем случае помехи представляют собой случайный процесс вида [2, 3] (рис. 1)

$$s(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k s_k(t - kT - t_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 \dots), \quad (1)$$

где $s(t)$ – случайная функция, k – счетная переменная, a_k – случайная амплитуда импульса, В; s_k – функция формы импульса, t – время, с; T – наибольшее время по-

вторения импульсов, с; t_0 – случайное время появления импульса, с, $0 \leq t_0 \leq T$; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – параметры формы импульса, 1/с.

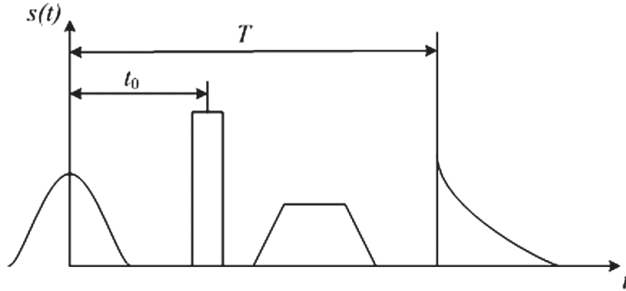


Рис. 1. Случайный поток импульсных помех

Так как каждый импульс в (1) может вызвать сбой элементной базы, то естественно перейти к рассмотрению отдельных реализаций процесса (1), т.е. отдельных импульсов.

Возможны два механизма воздействия импульсов на элементную базу. Импульсы, обладающие достаточной энергией, могут вызвать сбой элементной базы по причине перегрева p - n переходов, что приводит к снижению уровня полезного сигнала [4, 5]. Импульсы, не имеющие такой энергии, могут иметь достаточную для ложного переключения элементной базы вольт-секундную площадь [6, 7]. Следовательно, случайный процесс (1) должен характеризоваться законами распределения энергии, вольт-секундной площади и других параметров импульсов. Это подтверждается результатами [8], где потоки импульсных помех предлагается описывать распределениями интервала между импульсами и длительности импульсов, а также вероятностью появления импульсов, параметр которых превышает некоторый уровень, и средней частотой следования таких импульсов.

Известно [9, 10], что энергия, необходимая для сбоя конкретного типа элементной базы имеет малый разброс и, таким образом, может считаться постоянной. Устойчивость элементной базы к динамическим помехам описывается характеристикой динамической помехоустойчивости, которая имеет вид гиперболической кривой [6, 7] (рис. 2). В координатах U, τ уравнение этой кривой

$$U\tau = \text{const} = nS, \quad (2)$$

где U – амплитуда импульса, В; τ – длительность импульса, с; n – числовой коэффициент, S – вольт-секундная площадь импульса, В·с.

Из (2) следует, что для точек, принадлежащих характеристике

$$S = \frac{U\tau}{n} = \text{const}. \quad (3)$$

По [7] усредненная характеристика динамической помехоустойчивости справедлива для всей серии микро-

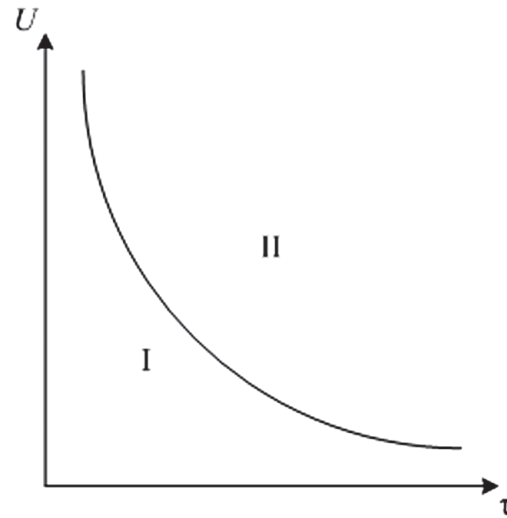


Рис. 2. Типовая характеристика динамической помехоустойчивости. I – область допустимых помех, II – зона недопустимых помех

электронных устройств. Следовательно, значение S в (3), превышение которого вызывает ложные переключения, также имеет пренебрежимо малый разброс и его также можно принимать постоянным.

Таким образом, энергия и вольт-секундная площадь одновременно характеризуют как уровни помех, так и уровень помехозащищенности элементной базы. Причем, если величина уровня помех по одному из параметров Y_i превысит уровень помехоустойчивости X_i ($Y_i - X_i > 0$), то произойдет событие сбоя устройства. Так как уровни помехоустойчивости X_i по вышеизложенному являются постоянными для данной элементной базы, то вероятность сбоя элементной базы $P_{сб}$ может быть определена как вероятность превышения уровня помех над уровнем помехоустойчивости [11, 12, 13] (рис. 3)

$$P_{сб} = \int_{X_i}^{\infty} f(Y_i) dY_i, \quad (4)$$

где $f(Y_i)$ – плотность распределения уровня помех.

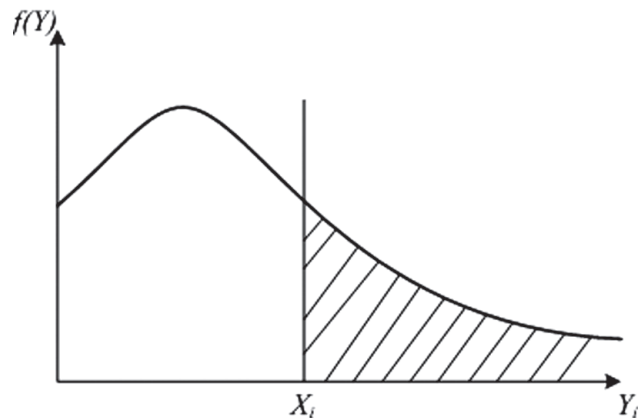


Рис. 3. Расчет вероятности сбоя электронного устройства

Тогда по (4) могут быть найдены вероятности сбоев элементной базы, происходящие по различным механизмам:

$$\begin{aligned} p_1 &= \int_{W_{\text{пор}}}^{\infty} f(W) dW, \\ p_{2 \text{ отп}} &= \int_0^{W_{\text{пор}}} f(W) dW \cdot \int_{S_{\text{пор,от}}}^{\infty} f(S) dS, \\ p_{2 \text{ зап}} &= \int_0^{W_{\text{пор}}} f(W) dW \cdot \int_{S_{\text{пор,зп}}}^{\infty} f(S) dS \end{aligned} \quad (5)$$

где p_1 – вероятность сбоя от импульса с высокой энергией; W – энергия помех, Дж; $f(W)$ – плотность распределения энергии помех; $W_{\text{пор}}$ – пороговое значение энергии помехи для данной элементной базы, Дж; $p_{2 \text{ отп}}$ – вероятность ложного отпираания; S – вольт-секундная площадь помехи, В·с; $f(S)$ – плотность распределения вольт-секундной площади помехи; $S_{\text{пор,от}}$ – пороговое значение вольт-секундной площади отпирающей помехи, В·с; $p_{2 \text{ зап}}$ – вероятность ложного запираания; $S_{\text{пор,зп}}$ – пороговое значение вольт-секундной площади запирающей помехи, В·с.

В формулах для вероятностей ложного отпираания и запираания учитывается, что при этом одновременно выполняются два условия, а именно: энергия помехового импульса меньше порогового уровня, а вольт-секундная площадь больше, чем пороговое значение.

Достоинство данного способа выбора параметров помех и помехоустойчивости в том, что выражения для расчета вероятностей сбоя существенно упрощаются по сравнению с другими параметрами, которые имеют ярко выраженный случайный характер и распределены по некоторому закону достаточно сложной математической формы.

Соотношение для вероятности сбоя может быть получено и на основании понятия запаса по помехозащищенности. Величиной запаса по помехозащищенности называется разность нормированных значений уровня помехозащищенности и уровня помех $u = X_i - Y_i$. Тогда вероятность сбоя может быть найдена по формуле [11]

$$P_{\text{сб}} = \int_{-\infty}^0 f(u) du.$$

Определение законов плотности распределения $f(Y)$, $f(u)$ производится либо путем сбора статистических данных о потоках импульсных помех в месте предполагаемой эксплуатации системы [11], либо экспериментальными методами теории вероятностей.

Импульсы с высокой энергией вызывают сбои вида $1 \rightarrow 0$ [4]. Импульсы переключающих помех вызывают сбои вида $1 \rightarrow 0$ и $0 \rightarrow 1$ [7]. Если считать поступление импульсов, воздействующих по различным физическим механизмам, независимыми и несовместными событиями,

то вероятности функциональных сбоев могут быть определены по формулам с учетом (5)

$$P_{1 \rightarrow 0} = p_1 + p_{2 \text{ зап}}, \quad P_{0 \rightarrow 1} = p_{2 \text{ отп}}.$$

Зная эти вероятности, анализ функциональной безопасности микроэлектронных и микропроцессорных КВИС может быть осуществлен методами, описанными в [1].

Следует отметить, что выполненный в статье анализ механизмов воздействия помех на микроэлектронную и микропроцессорную элементную базу дает подтверждение интегрального способа отыскания параметров эквивалентных импульсов помех, предложенного в [14, 15]. Эквивалентными импульсами называются такие, которые могут одинаковым образом повлиять на функциональную безопасность аппаратуры КВИС. Необходимость вывода условий эквивалентности импульсов объясняется тем, что на практике в составе потока (1) могут оказаться импульсы различной формы. Коммутационные помехи могут поступать в форме экспоненциальных, биэкспоненциальных импульсов, импульсов включения, импульсов в виде затухающей синусоиды. В случае коммутации с возникновением дуги появляются пачки импульсов в виде треугольника или экспоненты. Сверхширокополосные импульсы преднамеренного воздействия, возникновение которых не исключено в современных условиях, могут быть биэкспоненциальными, гауссовскими или косинусквадратными. Для испытаний предпочтительны прямоугольные импульсы, отличающиеся наиболее широким частотным спектром [11]. Такое разнообразие импульсных помех затрудняет осуществление расчетно-экспериментальных методов анализа функциональной безопасности КВИС и подтверждение результатов моделирования натурными испытаниями. Поэтому требуются методы, позволяющие сократить объем математического моделирования и натурных испытаний с целью снижения затрат времени и денежных расходов. Основным путем этого является выбор таких помеховых воздействий, стойкость к которым позволяла бы косвенно судить и о стойкости к другим типам помех. Реализовать этот подход удастся, только при условии эквивалентности импульсов [14, 16]. В интегральном способе условием эквивалентности импульсов является равенство энергий и вольт-секундных площадей двух импульсов

$$\begin{cases} W_1 = W_2 \\ S_1 = S_2 \end{cases} \quad (6)$$

Очевидно, что эквивалентные импульсы в этом способе имеют одинаковые параметры, определяющие последствия воздействия импульсов на элементную базу с точки зрения безошибочности информационных процессов в системе по основным физическим механизмам воздействия. В [14, 15] показано, что при подаче на вход цепей с сосредоточенными и распределенными параметрами прямоугольного импульса и эквивалентному ему

импульса, параметры которого рассчитаны по (6), сумма квадратов отклонений откликов является наименьшей, по сравнению с другими известными способами вывода условий эквивалентности импульсов. Также показано, что спектры обоих импульсов совпадают с достаточной для практики точностью. Таким образом, интегральный способ вывода условий эквивалентности импульсов является наиболее адекватным для анализа электромагнитной совместимости и функциональной безопасности КВИС.

В завершение статьи можно сделать некоторые выводы.

Определение вероятности сбоев микропроцессорной и микроэлектронной элементной базы вида $1 \rightarrow 0$ и $0 \rightarrow 1$ может быть осуществлено путем анализа свойств электромагнитных помех, как потока случайных событий, и механизмов воздействия помех на элементную базу.

Среди параметров импульсов помех могут быть выделены такие, которые одновременно описывают помехоустойчивость элементной базы и позволяют записать более простые соотношения для расчета вероятности сбоя.

Для адекватного моделирования функциональной безопасности аппаратуры КВИС необходим анализ электромагнитной обстановки в предполагаемом месте ее эксплуатации, с целью найти распределение вероятностных параметров импульсных помех и временных характеристик этих помех. Это объясняется значительным влиянием электромагнитной обстановки на функциональную безопасность КВИС.

Рассмотренный в статье подход к анализу воздействия импульсных помех на микроэлектронную и микропроцессорную элементные базы может найти широкое применение при разработке современных систем, критичных к безопасности, в области транспорта, энергетики и промышленности.

Литература

1. Шубинский И.Б. Функциональная надежность информационных систем. Методы анализа. – Ульяновск, типография «Печатный двор», 2012. – 296 с.
2. Коновалов Г.В., Тарасенко. И.М. Импульсные случайные процессы в электросвязи. – М. : Связь, 1973. – 304 с.
3. Иванов М.Т., Сергиенко А. Б., Ушаков В.Н. Радиотехнические цепи и сигналы. – СПб. : Питер, 2014. – 336 с.
4. Пирогов Ю.А., Солодов А.В. Повреждения интегральных схем в полях радиоизлучения. Журнал

радиоэлектроники. – 2013. – № 6. – С. 10-15.

5. Добыкин В.Д., Куприянов А.И., Пономарев В.Г., Шустов Л.Н. Радиоэлектронная борьба: Силовое поражение радиоэлектронных систем. – М.: Вузовская книга, 2007. – 468 с.

6. Наумов Ю.Е., Аваев Н.А., Бедрековский М.А. Помехоустойчивость устройств на интегральных логических схемах. – М. : Советское радио, 1975. – 216 с.

7. Кечиев Л.Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры. – М : ООО Группа «ИДТ», 2007. – 616 с.

8. Певницкий В.П., Полозок Ю.В. Статистические характеристики промышленных радиопомех. – М. : Радио и связь, 1988. – 246 с.

9. Кравченко В.И. Грозозащита радиоэлектронных средств. – М. : Радио и связь, 1991. – 264 с.

10. Аполлонский С.М., Горский А.Н. Расчеты электромагнитных полей. – М.: Маршрут, 2006. – 992 с.

11. Бочков К.А. Теория и методы контроля электромагнитной совместимости микроэлектронных систем обеспечения безопасности движения поездов : дис. ... д-ра техн. наук. 05.22.08 / Московский ин-т. инженеров трансп. – М, 1993. – 379 с. : ил.

12. Bochkov K.A. Principles of Achieving EMC of Microelectronic systems controlling major sequences of operations / K. A. Bochkov // Proceedings of 1994 International Symposium on Electromagnetic Compatibility / IEICE. – Tokyo : IEICE, 1994. – P. 610–613.

13. Bochkov K.A. Determination of EMC degree based on probability models of microelectronic systems ensuring railway traffic safety / K. A. Bochkov, I. E. Zakharov, N. V. Ryazantseva // Proceedings of International Symposium EMC'98, Rome, Italy, 1998 / University "La Sapienza". – Roma : University "La Sapienza", 1998. – P. 707–709.

14. Бочков К.А., Березняцкий Ю.Ф., Рязанцева Н.В. Импульсы помех в эквивалентном представлении. Проблемы и перспективы развития устройств автоматики, связи и вычислительной техники на железнодорожном транспорте : сб. науч. тр. / РГУ ПС. – Ростов на Дону : РГУ ПС, 1999. – С. 103–107.

15. Березняцкий Ю.Ф. Методы испытаний на помехозащищенность микроэлектронных систем обеспечения безопасности движения поездов : автореф. дис. канд. техн. наук / Белорус. гос. ун-т транспорта. – Гомель, 2003. – 24 с.

16. Комягин С.И., Еряшев Д.И., Лафишев М.А. Необходимость и пути совершенствования электромагнитных испытаний. Технологии ЭМС. – 2010. – № 4. – С. 22-26.