

УДК 656.25

**Д. В. Комнатный, канд. техн. наук**Кафедра «Автоматика и телемеханика»,  
Белорусский государственный университет транспорта

## **НАВЕДЕНИЕ ПОМЕХ В МЕЖСОЕДИНЕНИЯХ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ ИМПУЛЬСАМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ**

Рассматривается воздействие импульсных электромагнитных полей на паразитные антенны, образованные межблочными и внутриблочными соединениями электронной аппаратуры железнодорожной автоматики.

Импульсные электромагнитные поля могут иметь природное или техногенное происхождение. В числе техногенных могут быть импульсы преднамеренных помех. Проблема защиты от таких импульсов имеет большое значение. Такое воздействие при достаточной вольт-секундной площади импульса помехи может вызвать ложные срабатывания микросхем и нарушение функциональной безопасности устройства. Показано, что в анализируемых каналах проникновения помехи происходит дифференцирование исходного импульса электромагнитного поля. Если этот импульс имеет ярко выраженный максимум, то в нагрузке линии образуется пачка из двух импульсов.

В статье обоснованы способы расчета вольт-секундной площади импульсов в пачке и определение закона распределения плотности вероятности этой величины. Показано, что вольт-секундная площадь одного импульса в пачке определяется амплитудой исходного импульса электромагнитного поля, умноженного на постоянный коэффициент. Этот коэффициент характеризует электрические и геометрические параметры соединения. Плотность распределения вероятности необходимо знать, поскольку характеристики импульсов помех являются вероятностными величинами. Применение результатов анализа формирования импульсов помех в нагрузке позволяет избежать ошибок при обеспечении электромагнитной совместимости систем обеспечения безопасности движения поездов.

электромагнитная совместимость; межблочные соединения; импульсы помех в нагрузке; импульсы электромагнитного поля; вольт-секундная площадь; дифференцирование импульсов; плотность вероятности распределения

### **Введение**

Безопасное и алгоритмически верное функционирование изделий электронной техники зависит от их восприимчивости к внешним электромагнитным импульсным помехам. Это особенно важно для аппаратуры микропроцессорных и микроэлектронных систем железнодорожной автоматики, поскольку эти системы обеспечивают безопасность движения поездов и перевозочного процесса.

Электромагнитные помехи могут иметь как естественное, так и техногенное происхождение. К числу техногенных могут быть отнесены электростатические разряды, импульсные электромагнитные поля радиотехнических устройств, а также импульсы преднамеренных помех [1]. Обеспечение защиты устройств, выполняющих функции управления ответственными технологическими процессами, от преднамеренных помех в настоящее время весьма значимо.

Импульсные помехи и наводки могут вызывать как отказы электронных узлов, так и ложные срабатывания. Оценка последствий воздействия импульса на электронную элементную базу при анализе возможности ложных срабатываний дается на основании вольт-секундной площади импульса и динамической характеристики помехоустойчивости серии микросхем [1, 2]. Поэтому необходимы расчетные методики и математические модели формирования импульсов помех в различных каналах проникновения помех в электронную аппаратуру. Эти модели должны давать возможность расчета различных свойств и параметров импульсов напряжения помех во входных цепях электронных узлов, в том числе и вольт-секундной площади.

Однако в литературе по электромагнитной совместимости [3–5] тема расчета вольт-секундной площади импульсов помех подробно не освещена. Это объясняется тем, что общий подход к анализу функциональной безопасности управляющих электронных систем с учетом сбоев функционирования под воздействием импульсов помех разработан сравнительно недавно (описан в монографии [2]).

## 1 Постановка задачи

Для обеспечения электромагнитной совместимости большое значение имеет анализ распространения помех в межблочных и внутриблочных соединениях электронной аппаратуры. В современных системах управления такие соединения весьма многочисленны. Каждое из них образует паразитную антенну, воспринимающую импульсные электромагнитные помехи. Эти помехи формируются импульсными электромагнитными полями источников помех, расположенных вне и внутри корпуса электронного технического средства и распространяющихся по свободному пространству. Межсоединения подключаются к входам и выходам микросхем узлов; таким образом, наведенные импульсы могут привести к ложным срабатываниям этих узлов.

В [1, 6] представлены упрощенные модели восприимчивости электронных изделий к электромагнитным помеховым излучениям. С учетом изложенного во введении, в настоящей статье ставится задача анализа формирования помех в этих паразитных антеннах, с особым вниманием к расчету вольт-секундных площадей возникающих в нагрузках помеховых импульсов.

## 2 Расчет вольт-секундной площади импульсов

В [6] приведено соотношение для расчета напряжения на нагрузке межблочной линии, подверженной действию меняющегося во времени электрического поля. В спектральной области оно имеет вид

$$U_{12}(j\omega) = \left[ \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 lh}{\ln\left(\frac{2h}{r}\right)} \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right] j\omega E(j\omega), \quad (1)$$

где  $U_{12}(j\omega)$  – напряжение помехи в нагрузках линии, В;  $\omega$  – круговая частота, рад/с;  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды;  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная, Ф/м;  $l$  – длина линии, м;  $h$  – расстояние между проводами симметричной линии или между проводом и плоскостью заземления линии несимметричной, м;  $r$  – радиус провода монтажа, м;  $R_1, R_2$  – сопротивления нагрузок в начале и в конце линии, Ом;  $E(j\omega)$  – напряженность электрического поля, В/м.

В [1] предложена модель для расчета восприимчивости межсоединений печатных плат к помеховым излучениям.

Учитывая, что у многих типов электромагнитных волн напряженности магнитной и электрической составляющей поля связаны сопротивлением свободного пространства  $H_n(j\omega) = E_n(j\omega)/Z_0$  [7], расчетные соотношения этих моделей могут быть записаны в виде

$$U_s(j\omega) = j\omega E_n(j\omega) \left[ \frac{R_s}{R_s + R_1} \mu_0 l S \frac{1}{Z_0} - \frac{R_s R_1}{R_s + R_1} C l S \right]; \quad (2)$$

$$U_1(j\omega) = j\omega E_n(j\omega) \left[ \frac{R_1}{R_s + R_1} \mu_0 l S \frac{1}{Z_0} - \frac{R_s R_1}{R_s + R_1} C l S \right], \quad (3)$$

где  $U_1(j\omega)$  – напряжение помехи в нагрузке в конце линии, В;  $U_s(j\omega)$  – напряжение помехи в нагрузке в начале линии, В;  $E_n(j\omega)$  – напряженность электрического поля, нормальная к плоскости печатной платы, В/м;  $\mu_0$  – магнитная постоянная, Гн/м;  $R_1$  – сопротивление нагрузки в начале линии, Ом;  $R_s$  – сопротивление нагрузки в конце линии, Ом;  $S$  – площадь, охватываемая линией, м<sup>2</sup>;  $Z_0$  – сопротивление свободного пространства, Ом;  $C$  – погонная емкость линии, Ф/м.

Известна теорема о связи спектральной функции и вольт-секундной площади импульса: вольт-секундная площадь импульса равна спектральной функции импульса при  $\omega = 0$  [8]. Формальное применение ее к выражениям

(1)–(3) может привести к заключению, что в этом случае вольт-секундная площадь импульса равна нулю; таким образом, он не вызовет сбоев в работе электронного узла. Это заключение представляется сомнительным. Итак, требуется углубленный анализ формирования импульсов помех в приведенных расчетных моделях и каналах проникновения помех, которые эти модели описывают.

По известной теореме спектрального анализа умножение на  $j\omega$  означает дифференцирование импульса электрической составляющей электромагнитного поля по времени [8]. Значительное число импульсов помех имеют ярко выраженный максимум, а именно: биэкспоненциальный, гауссов, косинусный, косинусный колоколообразный, косинускубический импульсы. Оценить результат дифференцирования такого импульса в паразитной антенне достаточно просто. По известным теоремам дифференциального исчисления [9] при дифференцировании такого импульса образуется пачка из двух импульсов. До момента наступления максимума входного импульса образуется импульс наводки положительной полярности. В момент наступления максимума входного импульса напряжение помехи равняется нулю. Затем в нагрузках линии соединения формируется импульс напряжения отрицательной полярности.

Согласно [10], один из импульсов из получающейся пачки в зависимости от состояния микросхемы может вызвать, во-первых, сбой сигнала, т. е. препятствовать переключению элемента; во-вторых, привести к ложным срабатываниям – вызывать не предусмотренный алгоритмом переход микросхемы в противоположное состояние. Поэтому необходим расчет вольт-секундной площади обоих импульсов, составляющих пачку. Это объясняется тем, что последствия воздействия импульса на микросхему, находящуюся в различных состояниях («0» или «1»), зависят от полярности импульса, а сама возможность данного импульса вызывать сбой – от его вольт-секундной площади.

Для выполнения расчета вычисляется спектральная функция первого импульса в пачке по практическому приему [8]:

$$S'(j\omega) = \int_0^{\tau} u'(t) e^{-j\omega t} dt, \quad (4)$$

где  $S'(j\omega)$  – спектральная функция, В·с;  $\tau$  – момент наступления максимума входного импульса, с;  $u'(t)$  – производная исходного импульса по времени, В.

Путем интегрирования по частям получается:

$$S'(j\omega) = u(\tau)e^{-j\omega\tau} - u(0) + j\omega S(j\omega), \quad (5)$$

где  $u(\tau)$  – напряжение исходного импульса в момент максимума (амплитуда), В;  $u(0)$  – напряжение исходного импульса в момент его начала, В;  $S(j\omega)$  – спектральная функция входного импульса, В·с.

Тогда, по известной теореме [8], вольт-секундная площадь импульса, В·с

$$Q = S'(j\omega) \Big|_{\omega=0} = u(\tau) - u(0). \quad (6)$$

Этот же результат можно получить и по формуле Ньютона – Лейбница, так как первообразная для производной данной функции есть сама данная функция. В свою очередь, вольт-секундная площадь есть определенный интеграл от импульса во времени [9].

Для большого числа импульсов помех, в том числе перечисленных выше, значение их напряжения в начале импульса равно нулю:  $u(0) = 0$ . Тогда их вольт-секундная площадь  $Q = u(\tau) = A$  (равна амплитуде импульса).

Аналогично вычисляется вольт-секундная площадь второго импульса в пачке:

$$S'(j\omega) = \int_{\tau}^{\infty} u'(t) e^{-j\omega t} dt; \quad (7)$$

$$S'(j\omega) = -u(\tau) e^{-j\omega\tau} + j\omega S(j\omega). \quad (8)$$

В формуле (8) учтено, что при  $t = +\infty$   $u(t) = 0$ ; импульсы являются конечными. Следовательно, вольт-секундная площадь импульса отрицательной полярности

$$Q = S'(j\omega) \Big|_{\omega=0} = -u(\tau). \quad (9)$$

Полученные соотношения показывают, что в данном случае воздействия конечных импульсов с явным максимумом на паразитные антенны межсоединений целесообразно осуществлять расчет вольт-секундных площадей наведенных в нагрузку импульсов во временной области. Фактически необходимо найти амплитудное значение импульса, который образован умножением исходного импульса электрического поля на коэффициент, отражающий геометрические и электрические параметры канала проникновения помех (в формулах (1)–(3) этот коэффициент находится в квадратных скобках). Затем следует воспользоваться приведенными выше утверждениями относительно

вольт-секундной площади импульсов в пачке, возникающей после дифференцирования, и приравнять эту величину к результату умножения. Особенно удобен такой способ расчета при анализе вероятностных свойств помех.

Свойства импульсов электромагнитного поля, излучаемых различными источниками помех, изменяются случайным образом [11]. Поэтому вольт-секундная площадь импульсов помех в нагрузке соединения также является величиной случайной, даже если пренебрегать случайными отклонениями геометрических и электрических свойств канала проникновения помех от элементов среднего уровня. Тогда воздействие импульса помехи на работу узла характеризуется вероятностью превышения вольт-секундной площадью импульса некоторого порогового значения. Эта вероятность рассчитывается по плотности распределения вероятности вольт-секундной площади импульса. При этом следует учесть, что энергия импульса наведенного напряжения должна быть меньше некоторого порогового значения, при превышении которого наступает отказ электронных схем [6]. В случае, когда импульс помехи вызывает отказ, не имеет смысла анализировать возможность алгоритмического сбоя или ложного срабатывания. Тогда вероятность алгоритмического сбоя равна вероятности того, что импульс имеет вольт-секундную площадь, большую пороговой, вызывающей сбой, при условии непревышения энергией импульса порогового значения для возникновения отказа. Учет этих двух одновременных условий осуществляется по известной теореме об умножении вероятностей. Расчетное выражение для вероятности алгоритмического сбоя имеет вид

$$P = \int_0^{W_{\text{пор}}} f(W) dW \cdot \int_{Q_{\text{пор}}}^{\infty} f(Q) dQ, \quad (10)$$

где  $P$  – вероятность алгоритмического сбоя;  $W$  – энергия помех, Дж;  $W_{\text{пор}}$  – пороговое значение энергии помех, превышение которого приводит к отказу, Дж;  $Q_{\text{пор}}$  – пороговое значение вольт-секундной площади, вызывающее сбой, В·с.

Определение плотности распределения энергии импульса основано на известной теореме Рэлея. В полученное по этой теореме расчетное выражение модуль спектральной функции импульса помехи входит в квадрате, поэтому не содержит каких либо неясностей по сравнению с расчетом вольт-секундной площади импульса [8].

Согласно вышеизложенному, плотность распределения вероятности вольт-секундной площади импульса в нагрузке межсоединения с точностью до постоянного множителя повторяет плотность распределения амплитуды импульса помехи, генерируемой источником, в связи с чем получение расчетных соотношений по (10) значительно упрощается. Плотность распределения амплитуды импульсов может быть достаточно просто получена путем измерений в реальной электромагнитной обстановке [11]. Поскольку

современная микроэлектронная и микропроцессорная аппаратура содержит значительное количество межсоединений и каждое из них может оказаться каналом для проникновения помех, то учет установленных свойств вольт-секундной площади импульсов помех действительно позволяет сократить затраты времени на анализ помехоустойчивости, а следовательно, и затраты средств на данную процедуру.

## Заключение

По результатам анализа преобразования импульсов помех, исходящих от источника помех, в канале проникновения помех в виде образованной межсоединением паразитной антенны можно сделать следующие выводы.

В рассматриваемом канале осуществляется дифференцирование исходного импульса, иными словами, рецептор помех имеет свойства дифференцирующей цепи.

Импульсы с явно выраженным максимумом преобразуются в пачку из двух импульсов противоположной полярности. Воздействие этой пачки на функционирование микросхем определяется сочетанием состояния микросхемы и полярности импульса. Возможность сбоя при воздействии этого импульса зависит от значения вольт-секундной площади импульса: попадает ли это значение в область неустойчивой работы микросхемы на ее характеристике динамической помехоустойчивости или нет.

Рассчитывать вольт-секундные площади импульсов в такой пачке следует путем рассмотрения во временной области, поскольку в этом случае методика расчета существенно упрощается.

Представленные в статье зависимости также позволяют упростить вероятностный анализ воздействия импульсов помех в межсоединениях на рецепторы. Поскольку параметры импульсов помех, исходящих от приемника, имеют случайный характер, анализ устойчивости технических средств автоматики и телемеханики требует применения вероятностных методов. Эти методы основаны на использовании закона плотности распределения параметров импульсов, что в общем случае является сложной задачей. Поэтому практически полезным является вывод о возможности получить плотность распределения вольт-секундной площади по плотности распределения амплитуды исходного импульса, которую можно, в свою очередь, получить путем измерений.

Учет наличия в составе помехи на входе рецептора, подключенного к каналу распространения, помех рассматриваемого в статье вида двух импульсов разной полярности позволяет избежать неверных заключений при анализе электромагнитной совместимости и функциональной безопасности микроэлектронных и микропроцессорных систем обеспечения безопасности движения поездов.

Таким образом, в настоящей статье выявлены свойства импульсов помех в нагрузке межблочных и внутриблочных соединений аппаратуры железнодорожной автоматики и телемеханики, которые необходимы для глубокого и точного понимания процессов воздействия этих помех на микроэлектронную и микропроцессорную элементную базу. Эти свойства не акцентируются в литературных источниках по электромагнитной совместимости и руководствах для конструкторов и проектировщиков электронной техники, хотя учет описанных в статье свойств представляется необходимым при обеспечении безопасности и электромагнитной совместимости устройств железнодорожной автоматики и телемеханики.

Следовательно, результаты данной работы позволяют существенно повысить адекватность математических моделей распространения помех в межблочных и внутриблочных соединениях электронной аппаратуры. Поскольку в настоящее время необходимость математического моделирования электромагнитной совместимости функциональной безопасности не подлежит сомнению [1, 12], то данная работа приобретает большое практическое значение, является актуальной для разработчиков систем железнодорожной автоматики и телемеханики.

## Библиографический список

1. Кечиев Л. Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры / Л. Н. Кечиев. – М. : ООО «Группа ИДТ», 2007. – 616 с.
2. Шубинский И. Б. Функциональная надежность информационных систем. Методы анализа / И. Б. Шубинский. – Ульяновск : Типография «Печатный двор», 2012. – 296 с.
3. Хабигер Э. Электромагнитная совместимость. Основы ее применения в технике / Э. Хабигер. – М. : Энергоатомиздат, 1995. – 332 с.
4. Уильямс Т. ЭМС для разработчиков продукции / Т. Уильямс. – М. : Издательский дом «Технологии», 2004. – 540 с.
5. Гизатуллин З. М. Помехоустойчивость средств вычислительной техники внутри зданий при широкополосных импульсных воздействиях / З. М. Гизатуллин. – Казань : Изд-во Казанского гос. тех. ун-та, 2012. – 254 с.
6. Кравченко В. И. Грозозащита радиоэлектронных средств / В. И. Кравченко. – М. : Радио и связь, 1991. – 264 с.
7. Ерофеев В. Т. Аналитическое моделирование в электродинамике / В. Т. Ерофеев, И. С. Козловская. – М. : Книжный дом «Либроком», 2014. – 304 с.
8. Иванов М. Т. Радиотехнические цепи и сигналы / М. Т. Иванов, А. Б. Сергеев, В. Н. Ушаков. – СПб. : Питер, 2014. – 366 с.
9. Герасимович А. И. Математический анализ. Ч. 1 / А. И. Герасимович, Н. А. Рысюк. – Минск : Вышэйшая школа, 1989. – 287 с.
10. Лазер И. М. Устойчивость цифровых микроэлектронных устройств / И. М. Лазер, В. А. Шубарев. – М. : Радио и связь, 1983. – 216 с.



11. Певницкий В. П. Статистические характеристики промышленных радиопомех / В. П. Певницкий, Ю. В. Полозок. – М. : Радио и связь, 1988. – 246 с.
12. Гайнутдинов Р. Р. Методика прогнозирования помехоустойчивости средств вычислительной техники при преднамеренном воздействии кратковременных электромагнитных импульсов / Р. Р. Гайнутдинов // Технологии ЭМС. – 2014. – № 1. – С. 53–62.

*Dmitry V. Komnatniy,*  
«Automatics and telemechanics» department  
Byelorussian state transport university

**Interference induction in interconnections  
of electronic installations of railway automatics by means  
of electromagnetic field momentum**

The influence of pulsed electromagnetic fields on parasite antennas is considered, the latter is formed by inter-bay and intra-bay wirings of electronic apparatus of railway automatics. Pulsed electromagnetic fields may have natural or anthropogenic origin. Intentional interference pulses are among those of anthropogenic origin. The issue of protection from such pulses is of vital importance. Such an impact, in case of sufficient voltage-time area of an interference pulse, may cause false operations of a microcircuit and functional safety violation of equipment. It is shown, that the differentiation of the original electromagnetic field momentum occurs in analyzed channels of interference penetration. If such pulse has a clear-cut peak, than a packet with two pulses is formed in line load. Calculation methods for a voltage-time area of pulses in a packet, as well as the determination of the probability density function distribution law of the value in question are established in the article. It is shown, that a voltage-time area of one pulse in a packet is defined by a pulse height of the original electromagnetic field momentum multiplied by a constant coefficient. The coefficient in question characterizes electrical and geometrical parameters of interconnection wiring. It is essential to be aware of the density of probability distribution as interference pulses characteristics are probabilistic observations. It was observed, how the results of formation of load interference pulses analysis allow one to avoid errors when providing electromagnetic compatibility of train control systems.

electromagnetic compatibility; inter-bay wiring; load interference pulse; electromagnetic field momentum; voltage-time area; impulse signal differentiation; probability density function

## References

1. Kechiev L. N. (2007). Engineering of printed boards for digital high-speed equipment [Proektirovanie pechatnyh plat dlya cifrovoj bystrodejstvuyushchej apparatury]. Moscow, Ltd «Group IDT». – 616 p.
2. Shubinsky I. B. (2012). Functional reliability of information systems. Methods of analysis [Funkcional'naya nadezhnost' informacionnyh sistem. Metody analiza]. Ulyanovsk, Printing house «Pечатny Dvor». – 296 p.
3. Habiger E. (1995). Electromagnetic compatibility. Bases of its application in techniques [Elektromagnitnaya sovmestimost'. Osnovy ee primeneniya v tekhnike]. Moscow, Energoatomizdat. – 332 p.
4. Williams T. (2004). EMC for production developers [EMS dlya razrabotchikov produkcii]. Moscow, Publishing house «Technologies». – 540 p.
5. Gizatullin Z. M. (2012). Noise immunity of inside bulding computer facilities with wideband impulse exposure [Pomekhoustojchivost' sredstv vychislitel'noj tekhniki vnutri zdaniy pri shirokopolosnyh impul'snyh vozdeystviyah]. Kazan, Publishing house of Kazan State Technical University. – 254 p.
6. Kravchenko V. I. (1991). Lightning protection of radioelectronic equipment [Analiticheskoe modelirovanie v ehlektrodinamike]. Moscow, Radio and communication. – 264 p.
7. Erofeenko V. T., Kozlovskaya I. S. (2014). Analitical simulation in electodynamics. Moscow, Book firm «Librocom». – 304 p.
8. Ivanov M. T., Sergeenko A. B., Ushakov B. N. (2014). Radio circuits and signals [Radiotekhnicheskie cepi i signaly]. St. Petersburg, Piter. – 366 p.
9. Gerasimovich A. I., Rysjuk N. A. (1989). Mathematical analysis . Part 1. [Matematicheskij analiz. Chast' 1]. Minsk, High school. – 287 p.
10. Lazer I. M., Shubarev B. A. (1983). Immunity of digital microelectronic devices [Ustojchivost' cifrovyyh mikroelektronnyh ustrojstv]. Moscow, Radio and communication. – 216 p.
11. Pevnitsky V. P., Polozok Y. V. (1988). Statistics of man-made interferences [Statisticheskie harakteristiki industrial'nyh radiopomekh]. Moscow, Radio and communication. – 246 p.
12. Gainutdinov R. R. (2014). Methods of computer facilities noise immunity prediction with short-term electromagnetic impulses premeditated exposure [Metodika prognozirovaniya pomekhoustojchivosti sredstv vychislitel'noj tekhniki pri prednamerennom vozdeystvii kratkovremennyh ehlektromagnitnyh impul'sov]. EMC Technologies, issue 1. – Pp. 53–62.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии К. А. Бочковым  
Поступила в редакцию 15.03.2017, принята к публикации 29.03.2017*

*КОМНАТНЫЙ Дмитрий Викторович* – кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры «Автоматика и телемеханика» Белорусского государственного университета транспорта.  
e-mail: toe4031@gstu.by

© Комнатный Д. В., 2017