

УДК 621.396:621.391.82

Д. В. КОМНАТНЫЙ, кандидат технических наук, Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА НА УЗЛЫ ЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ ПРИ ЕГО РЕМОНТЕ

Рассматривается воздействие электростатического разряда на сборочные узлы электронной железнодорожной автоматики при их ремонте. В этом случае импульс электростатического разряда попадает непосредственно на линию связи узла. Распространение импульсов напряжения по линии связи и импульсы напряжения в нагрузке могут быть рассчитаны по правилу Петерсона-Пффистера, так как линии связи электронных узлов являются линиями без потерь. На основании этого правила построена диаграмма распространения импульса разряда и выведены соотношения для расчета импульсов помех во входных сопротивлениях электронных компонент. Произведен расчет переходного процесса в этих сопротивлениях. Показано, что в нагрузке, не согласованной с линией связи, возникает пачка импульсов с убывающей амплитудой. Выведена формула для оценки воздействия этих импульсов на электронную элементную базу.

Паразитная электризация трением тела человека происходит в самых, казалось бы, неожиданных случаях [1]. Импульсные разряды возникающих при этом электрических зарядов могут повреждать микроэлектронные и микропроцессорные технические средства железнодорожной автоматики, телемеханики (ТС ЖАТ) и связи не только в процессе эксплуатации, но и при проведении ремонтов и технического обслуживания. В этом случае разряд происходит непосредственно на сборочный узел (печатную плату) технического средства, что обуславливает особую опасность этого вида электростатического разряда (ЭСР).

Но, несмотря на это, в литературных источниках [2–4] воздействие электростатических разрядов на узлы электронной техники во время ремонта не проанализировано. В научной периодике имеется немало количество работ, посвященных тому или иному аспекту проблемы ЭСР, но воздействию его на печатные платы посвящена только статья [5]. В ней основное внимание уделяется анализу возможности пробоя диэлектрика платы, а повреждения микросхем узла не рассматриваются, хотя основную опасность ЭСР представляет именно для элементной базы.

Автором данной статьи была поставлена задача разработать расчетную модель воздействия ЭСР на узлы электронных и микропроцессорных средств ЖАТ при их ремонте, а именно на электронные компоненты этих узлов.

При воздействии ЭСР на узел средства ЖАТ импульс разряда попадает на линию связи печатной платы. Как правило, принимается, что линии связи печатных плат являются линиями без потерь [2]. Следовательно, для анализа распространения импульсов ЭСР в этих линиях можно применить

известное правило Петерсона-Пффистера [7, 8]. В этом правиле импульсы напряжения в линии определяются волновым сопротивлением линии, сопротивлениями генератора и нагрузки линии, а импульсы в нагрузке – волновым сопротивлением линии и сопротивлением нагрузки. Энергия импульсов напряжения, рассеивающихся в нагрузке линии, вызывает повреждения элементной базы узла.

Для первоначальной модели будем рассматривать распространение импульса ЭСР только по одной линии связи узла аппаратуры ЖАТ. При ЭСР во время ремонта происходят, главным образом, воздушные разряды. Поэтому сопротивление генератора помех принимается численно равным нулю. Импульс ЭСР в этих условиях отличается от стандартного [3]. Путем анализа схемы замещения системы «человек – узел ТС» можно показать, что в этом случае импульс может быть аппроксимирован убывающей экспонентой. Согласно [9], для такого импульса влияние паразитной емкости входной цепи микросхем можно не учитывать при малом значении этой емкости. Таким образом, сопротивление нагрузки линии принимается чисто активным.

Будем рассматривать линию связи при отсутствии согласования с нагрузкой. Тогда в линии связи происходят многократные отражения импульса от начала и конца линии. Требуется определить, какое количество отражений нужно рассматривать при расчете напряжения в нагрузке. Очевидно, следует отбросить те импульсы, которые создают в нагрузке энергию, меньшую энергии повреждения микросхем. Импульс напряжения вида

$$u(t) = Ue^{-pt}, \quad (1)$$

где U – амплитуда импульса, В; p – постоянная времени $1/c$; t – время, с, по правилу Петерсона-Пффистера создает на нагрузке напряжение

$$u_n(t) = \frac{2R_n}{R_n + z} U e^{-pt}, \quad (2)$$

где R_n – сопротивление нагрузки, Ом; z – волновое сопротивление линии, Ом.

Энергия этого импульса

$$W = \frac{1}{R_n} \int_0^{\infty} u_n^2(t) dt = \frac{1}{R_n} \int_0^{\infty} \left(\frac{2R_n}{R_n + z} U e^{-pt} \right)^2 dt = \frac{2R_n}{(R_n + z)^2 p} U^2. \quad (3)$$

Зная энергию повреждения микроселекционной элементной базы [10], можно найти из соотношения (3) амплитуду последнего импульса, учитываемого при расчетах. В [11] приведена формула, по которой можно найти число пробегов, требуемых для снижения амплитуды импульса в α раз по сравнению с первоначальным:

$$N = \frac{2 \lg \alpha}{\lg \left(\frac{R_n - z}{R_n + z} \right)}. \quad (4)$$

Если в формулу (4) подставить отношение амплитуд первоначального и последнего учитываемого импульсов, то получится число пробегов импульса, которые он должен совершить, прежде чем рассеянная во входном сопротивлении энергия станет меньше энергии повреждения элементной базы.

Процесс движения импульсов ЭСР по линии связи может быть описан диаграммой, построенной по правилу Петерсона-Пффистера [11]. При построении этой диаграммы на вертикальных осях откладываются времена поступления отраженных импульсов к нагрузке или к генератору с учетом времени задержки. Моменты поступления импульсов соединяются отрезками прямых, над которыми записано краткое соотношение для расчета каждого импульса-отражения. Импульсы, поступившие в нагрузку, получают порядковые номера, которые указываются у соответствующей оси диаграммы. Импульс, поступивший в нагрузку непосредственно после ЭСР, получает номер 0, что позволяет корректно записать расчетные соотношения.

На рисунке 1 представлена диаграмма движения импульсов ЭСР для пяти пробегов от начала к концу линии связи и обратно. Аналогично могут быть построены оставшиеся пробеги импульса по линии, однако полная диаграмма оказывается значительных размеров и не может быть размещена в ограниченном объеме статьи. Кроме того, для записи расчетных соотношений достаточно и сокращенная диаграмма.

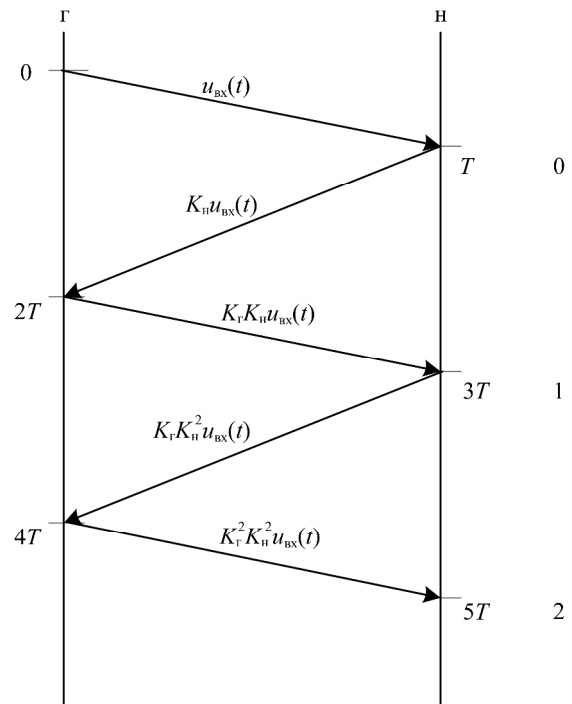


Рисунок 1 – Диаграмма распространения импульса ЭСР по линии связи

Пользуясь этой диаграммой и указанным правилом [12, 13], можно записать выражение для импульса в конце линии:

$$u_k(t) = \sum_{n=0}^N K_r^n K_n^n U e^{-p(t-(2n+1)T)} \times \times 1(t-(2n+1)T), \quad (5)$$

где K_r – коэффициент отражения от генератора, $K_r = -1$, так как полное сопротивление генератора принято равным нулю [7]; K_n – коэффициент отражения от нагрузки, $K_n = \frac{R_n - z}{R_n + z}$ [7]; T – время задержки импульса в линии, с.

Единичная функция в формуле (5) учитывает то обстоятельство, что до поступления к концу линии импульса номер n , его напряжение в конце линии равно нулю.

Для импульса в нагрузке справедлива формула [7]

$$u_n(t) = u_k(t) \frac{2R_n}{R_n + z}. \quad (6)$$

По соотношениям (4)–(6) был осуществлен расчет переходного процесса в нагрузке линии с волновым сопротивлением $z = 100$ Ом и временем задержки $T = 6,71 \cdot 10^{-10}$ при действии импульса вида (1) с амплитудой $U = -2000$ В и постоянной времени $p = 1,196 \cdot 10^7$ 1/с. Результат расчета приведен на рисунке 2.

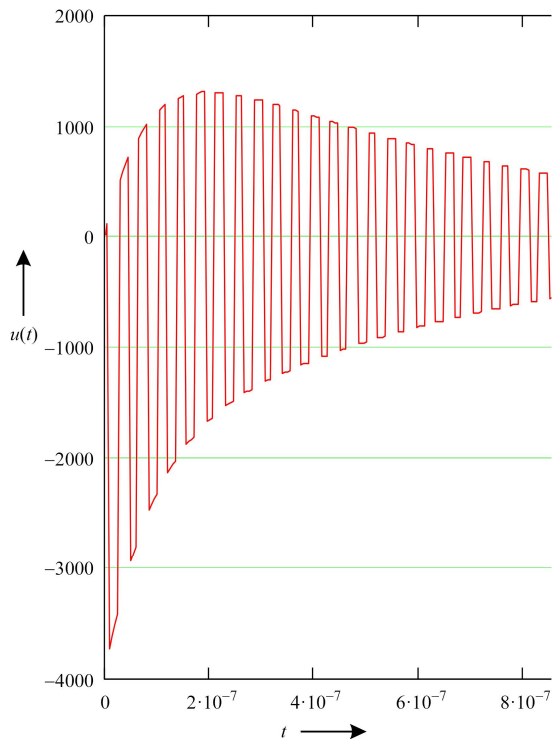


Рисунок 2 – Переходный процесс в нагрузке линии связи печатной платы при ЭСР

Полученное решение представляет собой пачку импульсов трапецеидальной формы с убывающей амплитудой и переменной полярностью. Необходимо вывести соотношение для оценки опасности этой пачки для микроэлектронных ТС ЖАТ. Для этого предположим, что наиболее опасным является импульс наибольшей амплитуды. Если энергия этого импульса не превышает энергии повреждения микросхем, то остальные импульсы также не нанесут вреда аппаратуре ЖАТ. Иными словами, пренебрежем эффектом накопления воздействий. Чтобы вычислить энергию первого импульса, запишем уравнение его верхней части, как известное уравнение прямой по двум точкам [14] (рисунок 3).

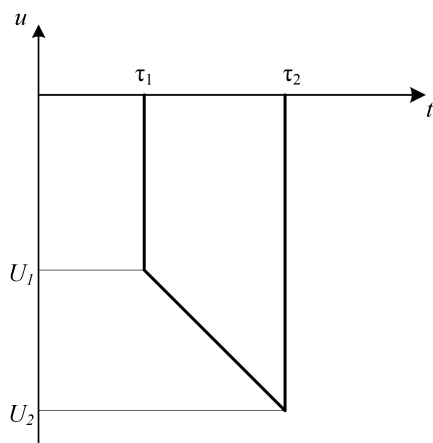


Рисунок 3 – Модель первого импульса в пачке импульсов ЭСР

$$\frac{t - \tau_1}{\tau_2 - \tau_1} = \frac{u - U_1}{U_2 - U_1}, \quad (7)$$

тогда

$$u(t) = U_1 + \frac{(t - \tau_1)(U_2 - U_1)}{\tau_2 - \tau_1}. \quad (8)$$

Энергия данного импульса

$$\begin{aligned} W &= \frac{1}{R_H} \int_{\tau_1}^{\tau_2} \left(U_1 + \frac{(t - \tau_1)(U_2 - U_1)}{\tau_2 - \tau_1} \right)^2 dt = \\ &= \left(\frac{1}{R_H} (U_1^2 (\tau_2 - \tau_1) + U_1 (U_2 - U_1) (\tau_2 - \tau_1)) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{R_H} \frac{(U_2 - U_1)^2 (\tau_2 - \tau_1)}{3} \right). \quad (9) \end{aligned}$$

По формуле (9) можно вычислить энергию первого импульса в пачке и, сравнив ее с энергией повреждения элементной базы аппаратуры ЖАТ, определить опасность ЭСР при ремонте рассматриваемой аппаратуры.

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие **выводы**:

- при воздействии импульса ЭСР на узел микроэлектронной и микропроцессорной аппаратуры ЖАТ во входном сопротивлении микросхем, в общем случае, возникает пачка импульсов, длящаяся достаточно долго и имеющая значительную амплитуду;

- расчет этой пачки может быть осуществлен по правилу Петерсона-Пффистера, физический смысл и математическая формулировка которого достаточно просты, хорошо отработаны в инженерной практике и имеют наглядное графическое представление, что существенно облегчает вычислительную работу;

- разработанная модель позволяет находить энергию импульсов ЭСР в нагрузке и определять последствия воздействия ЭСР на узлы электронного оборудования ЖАТ при их ремонте с помощью формулы (9).

Тогда допустимо заключить, что поставленная автором статьи задача разработки расчетной модели воздействия ЭСР при ремонте ТС микроэлектронных и микропроцессорных систем ЖАТ в общих чертах решена.

Список литературы

- 1 **Dash, G. R.** Designing to avoid static-ESD testing of digital devices / G. R. Dash // 1985 International Symposium on Electromagnetic Compatibility / IEEE. – N. Y. : IEEE Publishing services, 1985. – P. 262–267.
- 2 **Горлов, М. И.** Электростатические заряды в электронике / М. И. Горлов, А. В. Емельянов, В. И. Плебанович. – Минск : Бел. наука, 2006. – 295 с.
- 3 **Кечиев, Л. Н.** Защита электронных средств от воздействия статического электричества / Л. Н. Кечиев, И. Д. Пожидаев. – М. : Издательский дом «Технологии», 2005. – 352 с.
- 4 **Гурвич, И. С.** Защита ЭВМ от внешних помех / И. С. Гурвич. – М. : Энергоатомиздат, 1981. – 224 с.
- 5 **Brown, V. S.** Finite-element time domain simulation of electrostatic discharge using mixed-dimensional finite elements / V. S. Brown, L. L. Routh / 1994 IEEE International symposium on Electromagnetic Compatibility / IEEE. – N. Y. : IEEE, 1994. – P. 95–98.
- 6 **Кечиев, Л. Н.** Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры / Л. Н. Кечиев. – М. : ООО «Группа ИДТ», 2007. – 614 с.
- 7 **Бессонов, Л. А.** Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л. А. Бессонов – 9-е изд., перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 1996. – 631 с.
- 8 **Чурин, Ю. А.** Переходные процессы в линиях связи быстродействующих ЭВМ / Ю. А. Чурин. – М. : Сов. радио, 1975. – 207 с.
- 9 **Кравченко, В. И.** Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи / В. И. Кравченко, Е. А. Болотов, Н. И. Летунова. – М. : Радио и связь, 1987. – 255 с.
- 10 **Кравченко, В. И.** Грозозащита радиоэлектронных средств / В. И. Кравченко. – М. : Радио и связь, 1991. – 264 с.
- 11 **Преснухин, Л. И.** Конструирование электронных вычислительных машин и систем / Л. И. Преснухин, В. А. Шахнов. – М. : Высшая школа, 1986. – 512 с.
- 12 **Князев, А. Д.** Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной техники с учетом электромагнитной совместимости / А. Д. Князев, Л. Н. Кечиев, Б. В. Петров. – М. : Радио и связь, 1989. – 224 с.
- 13 **Коновалов, Г. В.** Импульсные случайные процессы в электросвязи / Г. В. Коновалов, И. М. Тарасенко. – М. : Связь, 1973. – 304 с.
- 14 **Гусак, А. А.** Линии и поверхности / А. А. Гусак, Г. М. Гусак. – Мн. : Высшая школа, 1985. – 220 с.

Получено 06.10.2010

D. V. Komnatny. The calculation model of electrostatic discharge exposure to electronic railway automation assemblies during the repair.

The electrostatic discharge exposure on electronic railway automation assemblies during the repair is considered in this article. The electrostatic discharge impulse in this case hit to the transmission line directly. The voltage impulse propagation in transmission line and voltage impulses in the load can be calculated by Peterson-Pfifister rule, because transmission lines are loss-free lines. The diagram of ESD impulse propagation is constructed in the article, and expressions for noise impulse calculation in electronic components input resistance are deduced. The calculation of transient process in these resistances is fulfilled. It is shown, that pulse burst with decreasing amplitude arise in non-matched load of transmission line. The formula for these pulse burst exposure estimation on electronic element base is deduced too.