

УДК 621.316.97

К. А. БОЧКОВ, доктор технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель; Д. В. КОМНАТНЫЙ, кандидат технических наук, Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого

СТРУКТУРНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЧАСТНЫХ СЛУЧАЕВ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА

Рассмотрены вопросы разработки структурных электрических моделей для различных случаев электростатического разряда и анализа переходных процессов в них. Показано, что в научно-технических публикациях отсутствуют модели разряда на узел технического средства при его ремонте и разряда предварительно заряженного по индукции корпуса средства автоматизации и телемеханики («электростатический призрак»). Для первого случая разработана структурная модель на основе ММ-модели, учитывающей наличие металлического инструмента в руке ремонтника. Показано, что этот вариант разряда не является существенно важным для практики. Для второго случая структурная модель имеет вид последовательной RLC -цепи. Для анализа переходных процессов в ней рассчитаны емкости корпусов различных технических средств. Показано, что переходные процессы в рассматриваемой модели имеют вид слабозатухающих колебаний, которые представляют значительную опасность для электронных схем.

В научно-технической литературе, посвященной проблемам электромагнитной совместимости, неоднократно обсуждались вопросы анализа воздействия электростатического разряда (ЭСР) на микроэлектронные и микропроцессорные комплексы управления ответственными технологическими процессами транспорта и промышленности. Ускоренное внедрение микропроцессорных и релейно-процессорных систем автоматизации и телемеханики (АиТ) на Белорусской железной дороге делает указанную проблему актуальной и для всего транспортного комплекса нашей страны.

Основным методом изучения ЭСР является разработка структурных электрических моделей для различных случаев разряда:

- с тела оператора на корпус электронной аппаратуры [1, 2];
- с тела оператора на корпус электронной аппаратуры через металлический инструмент [1];
- электронного компонента, предварительно заряженного трением [1, 3, 4];
- в летательном аппарате [5].

Но в приведенном списке отсутствуют два важных для практики случая ЭСР: разряд с тела работника непосредственно на узел микроэлектронной аппаратуры при ее ремонте и так называемый «электростатический призрак» [6].

Первый из указанных случаев исследован в [7], где принята очень упрощенная модель тела человека в виде последовательной RC -цепочки, что, как показано в [1, 2], недостаточно для строгого анализа протекания ЭСР. Кроме того, авторы не обратили достаточного внимания на прогнозирование воздействия данного типа ЭСР на микросхемы узла.

Явление «электростатического призрака» или переноса заряда на корпус аппаратуры АиТ по электростатической индукции с последующим стеканием заряда в землю описывалось в [8], но подробное рассмотрение не было проведено, так как автор исследовал, главным образом, обычный

прямой разряд с тела оператора на корпус электронной аппаратуры. Поэтому целью данной статьи является разработка структурных электрических моделей указанных выше случаев ЭСР с последующим анализом переходных процессов в них, поскольку эти случаи имеют большое практическое значение [6].

В качестве основы для разработки принята уже известная модель ЭСР с тела оператора на корпус технического средства через металлический инструмент (ММ-модель) [1]. Это объясняется тем, что в ней обоснованно введен элемент, замещающий инструмент в руке оператора, а именно – индуктивность L . В отличие от разряда на корпус технического средства при разряде на отдельный узел следует учитывать параметры руки работника, находящейся в непосредственной близости к узлу. Этим параметром для ММ-модели является емкость C_p [1]. Тело человека будем моделировать стандартной последовательной RC -цепочкой сопротивления R_n и емкости C_n . Разряд при ремонте узлов электронной аппаратуры происходит на линии связи печатных плат, которые являются линиями без потерь. В любой точке линии без потерь ток и напряжение связаны волновым сопротивлением z [9]. Поэтому можно считать, что ЭСР происходит на волновое сопротивление линии связи печатной платы.

Тогда на основании известных структурных моделей ЭСР [1, 2] модель рассматриваемого случая имеет вид, показанный на рисунке 1.

Анализ переходных процессов в описанной модели рационально выполнять операторным методом. Расчеты показывают, что характер переходного процесса напряжения на z определяется корнями кубического характеристического уравнения

$$A_1 p^3 + A_2 p^2 + A_3 p + A_4 = 0. \quad (1)$$

Коэффициенты уравнения (1) выражаются через параметры структурной электрической модели следующим образом:

$$\begin{aligned}
A_1 &= LC_p^2 R_{ii} C_{ii}, \\
A_2 &= [L(C_{ii} + C_p)C_p + zC_p^2 R_{ii} C_{ii}], \\
A_3 &= [R_{ii} C_{ii} C_p + (C_{ii} + C_p)zC_p + C_{ii} C_p], \\
A_4 &= C_{ii} + C_p.
\end{aligned} \quad (2)$$

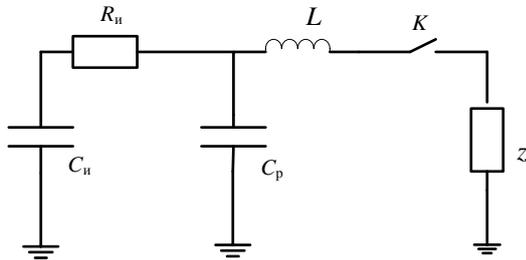


Рисунок 1 – Структурная электрическая модель разряда на узел микроэлектронной аппаратуры

Параметры элементов схемы замещения приняты по [1]: $L = 0,5 \cdot 10^{-6}$ Гн; $C_{ii} = 150 \cdot 10^{-12}$ Ф; $R_{ii} = 330$ Ом; $C_p = 5 \cdot 10^{-12}$ Ф; $z = 100$ Ом.

Расчеты показывают, что два корня уравнения (1) – комплексно-сопряженные вида $p_k = -\delta \pm j\omega$ и один – действительный. Тогда напряжение $u_z(t)$ изменяется по колебательному закону вида [9]

$$u_z(t) = B_1 e^{-p_1 t} + 2B_2 e^{-\delta t} \cos(\omega t + \alpha), \quad (3)$$

где p_1 – действительный корень уравнения (1); B_1, B_2, α – константы.

Полученное решение позволяет сделать некоторые выводы.

1 ЭСР с тела оператора на узел электронного технического средства через инструмент имеет колебательный характер, в отличие от прямого разряда на корпус, который является аperiodическим и более опасным [10].

2 Колебания в схеме на рисунке 1 имеют амплитуду, меньшую на три порядка, чем амплитуда аperiodических разрядов и длительность порядка 10^{-8} с.

3 Амплитуда разряда убывает с ростом волнового сопротивления линии.

Следует учесть, что избежать разрядов с тела ремонтника через инструмент на практике весьма просто: достаточно применять для ремонта оборудования специализированные наборы инструмента с рукоятками из высококачественного диэлектрика. Это обстоятельство и результаты анализа переходных процессов позволяют заключить, что для практики важнее изучить разряды при приближении руки работника к электронному узлу. Это можно считать своего рода парадоксом, так как обычно принимается, что разряд через инструмент опаснее, чем ЭСР с руки оператора [11].

В случае ЭСР в форме стекания заряда с корпуса технического средства, заряженного по индукции от тела оператора, принимаем, что емкость корпуса, получившая некоторый потенциал, разряжается через сопротивление корпуса, индуктивность и омическое сопротивление системы заземления.

Поэтому в данном случае структурная электрическая модель сводится к хорошо изученной последовательной RLC-цепи, приведенной на рисунке 2. Характер переходных процессов определяется видом корней характеристического уравнения [12]

$$p^2 + \frac{R_k + R_3}{L_3} p + \frac{1}{L_3 C_k} = 0, \quad (4)$$

$$p_{1,2} = -\frac{R_k + R_3}{2L_3} \pm \sqrt{\frac{(R_k + R_3)^2}{4L_3^2} - \frac{1}{L_3 C_k}}, \quad (5)$$

где p – корень характеристического уравнения; R_k – сопротивление корпуса технического средства, Ом; R_3 – сопротивление заземления, Ом; L_3 – индуктивность системы заземления, Гн; C_k – емкость корпуса технического средства, Ф.

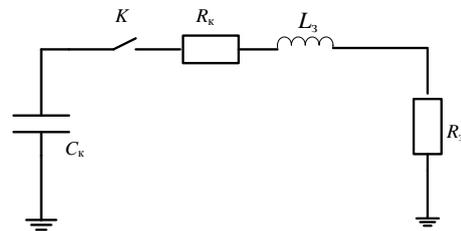


Рисунок 2 – Структурная электрическая модель разряда предварительно заряженного по индукции корпуса микроэлектронного технического средства

Согласно [13] можно принять $R_k = 33$ Ом, $R_3 = 4$ Ом, $L_3 = 1,5 \cdot 10^{-6}$ Гн. Но для различных технических средств емкость корпуса существенно различна и определяется, главным образом, размерами корпуса. Чтобы исследовать влияние емкости корпуса на ход процесса разряда, были выбраны несколько технических средств автоматики, телемеханики и вычислительной техники, размеры корпусов которых указаны в литературных источниках. Эти технические средства с указанием размеров корпуса перечислены в таблице 1.

Емкости корпусов вычислялись по известной формуле для емкости прямоугольного параллелепипеда [14]:

$$C = 3\pi\epsilon_0 S^2 \left[\sum_{i=1}^3 \left(\sum_{i=j} L_{ij} + M_i - N_i - P_i \right) + Q \right]^{-1}, \quad (6)$$

где

$$Q = 4 \left[\left(d^2 - \frac{S}{2} \right) (a_1 + a_2 + a_3) + 3V \right] - 2Sd;$$

$$L_{ij} = \frac{V^2}{a_i^2 a_j} \left(3 + \frac{V^2}{a_i a_j^2} \right) \ln \frac{\sqrt{d^2 - a_i^2} + a_j}{\sqrt{d^2 - a_i^2} - a_j};$$

$$M_i = \left[\left(d^2 - \frac{S}{2} - \frac{3V}{a_i} \right) (a_1 + a_2 + a_3) - a_i^3 \right] \ln \frac{d - a_i}{d + a_i};$$

$$N_i = 2 \left(d^2 - a_i^2 - \frac{2V}{a_i} \right) \sqrt{d^2 - a_i^2};$$

$$P_i = 2a_i(a_i^2 + 3S) \arctg \frac{V}{a_i d};$$

$$V = a_1 a_2 a_3; \quad S = 2(a_1 a_2 + a_2 a_3 + a_1 a_3);$$

$$d = \sqrt{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2};$$

C – емкость параллелепипеда, Ф; a_1, a_2, a_3 – длины сторон параллелепипеда, м; ϵ_0 – электрическая постоянная, Ф/м.

Вычисленные по формуле (6) значения емкости корпусов технических средств приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Размеры и емкости корпусов некоторых технических средств

Наименование технического средства	Размеры корпуса, мм	Емкость корпуса, Ф
Ноутбук	290×227×45	$3,13 \cdot 10^{-12}$
Тонкий клиент вычислительной сети	115×35×115	$9,05 \cdot 10^{-12}$
МикроЭВМ	144,5×160×360	$26,77 \cdot 10^{-12}$
Шкаф микропроцессорной централизации	2250×600×600	$12,62 \cdot 10^{-12}$
Персональный компьютер	440×180×335	$14,2 \cdot 10^{-12}$
Устройство сопряжения УС-2	214×599×267	$9,93 \cdot 10^{-12}$

Расчет корней характеристического уравнения (4) по формуле (5) показал, что при всех значениях емкости в таблице 1 корни уравнения оказываются комплексно-сопряженными. Следовательно, переходные процессы имеют колебательный характер. Декремент затухания (действительная часть корня) меньше 0,5, таким образом, процессы затухают медленно [12]. Поэтому «электростатические призраки» приводят к существенным сбоям в работе электронной аппаратуры при незначительном заряде, наведенном на корпус. Из этого следует, что необходимо разрабатывать модели снижения воздействия «электростатического призрака» на микроэлектронные и микропроцессорные системы управления движением поездов, поскольку сбой может быть вызван прохождением заряженного человека у аппаратурной стойки.

Также следует отметить, что характер процессов ЭСР в рассмотренных случаях значительно отличается от прямого ЭСР на корпус аппаратуры, формы разрядных кривых которого, указанные в [15], являются аперiodическими и описываются суммой экспоненциальных функций [2]. Поэтому испытания, выполненные по методике [15], не гарантируют устойчивости микроэлектронных и микропроцессорных технических средств ко всем случаям ЭСР.

Таким образом, исследование переходных процессов ЭСР в разработанных структурных элек-

трических моделях позволило оценить опасность тех или иных случаев ЭСР. Это может послужить основанием для разработки моделей устойчивости технического средства автоматики и телемеханики к различным видам ЭСР. Моделирование описанных в статье вариантов ЭСР может оказаться существенным дополнением к испытаниям аппаратуры систем управления движением поездов по ГОСТ Р 516317.4.2-2001.

Список литературы

- 1 Кечиев, Л. Н. Защита электронных средств от воздействия статического электричества / Л. Н. Кечиев, Е. Д. Пожидав. – М. : Издательский дом «Технологии», 2005. – 352 с.
- 2 Kodali, P. Handbook on EMC / P. Kodali. – N. Y. : IEEE Press, 1996. – 370 p.
- 3 Горлов, М. И. Электростатические разряды в электронике / М. И. Горлов, А. В. Емельянов, В. И. Плебанович. – Минск : Бел. наука, 2006. – 295 с.
- 4 Литвинский, И. Е. Обеспечение безотказности персональных ЭВМ / И. Е. Литвинский, В. А. Прохоренко. – М. : Радио и связь, 1993. – 208 с.
- 5 Комягин, С. И. Требования по стойкости радиоэлектронной аппаратуры летательного аппарата в условиях воздействия электростатических разрядов / С. И. Комягин, А. Б. Соколов // Технологии ЭМС. – 2008. – № 2. – С. 3–8.
- 6 Справочник по помехам : справочник (на яп. яз.) / Нойдзу кэнкюсё. – Токио : Нойдзу кэнкюсё, 1980. – 214 с.
- 7 Brown, B. S. Finite element time domain simulation of electrostatic discharge using mixed-dimensional finite elements / B. S. Brown, L. L. Routh // 1994 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility / IEEE. – N. Y. : IEEE, 1994. – P. 95–98.
- 8 Byrne, W. W. The meaning of electrostatic discharge (ESD) in relation to human body characteristics and electronic equipment / W. W. Byrne // 1983 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility / IEEE. – N. Y. : IEEE, 1983. – P. 369–380.
- 9 Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л. А. Бессонов. – М. : Высш. школа, 1978. – 528 с.
- 10 Хабигер, Э. Электромагнитная совместимость. Основы ее применения в технике / Э. Хабигер. – М. : Энергоатомиздат, 1995. – 304 с.
- 11 Daout, B. The reproducibility of the rising slope in ESD testing / B. Daout, H. Ryser // 1986 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility / IEEE. – N. Y. : IEEE, 1986. – P. 467–474.
- 12 Основы теории цепей / Зевеке В. Т. [и др.] – 5-е изд., перераб. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 572 с.
- 13 Файзулаев, Б. Н. Исследование нечувствительности электронного оборудования при моделировании непрямого электростатического разряда (на англ. яз.) / Б. Н. Файзулаев, В. В. Логачев, В. В. Оршевский // Fifteenth International Wrocław Symposium and Exhibition on Electromagnetic Compatibility / Wrocław Polytechnic Institute. – Wrocław : Wrocław Polytechnic Institute, 2000. – P. 469–473.
- 14 Иосель, Ю. Я. Расчет электрической емкости / Ю. Я. Иосель, И. С. Кочанов, М. Г. Струнский. – М. : Энергия, 1969. – 240 с.
- 15 ГОСТ Р 51317.4.2 Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электростатическим разрядам. – Взамен ГОСТ 23.191-91; введ. 2001-12-24. – М. : ИПК Изд-во стандартов, 2001. – 26 с.

Получено 29.09.2009

K. A. Bochkov, D. V. Komnatny. Structural electrical models of the electrostatic discharge particular cases.

The questions of structural electrical models development for the different cases of electrostatic discharge and analysis of transient processes in them are discussed in this article. It is shown, that models of discharge on hardware component assembly during the repair and discharge of preliminary charged by electric induction automatic and teleautomatic hardware component package (“electrostatic ghost”) arc absent in scientific-technical publications. For the first case, structural model is developed based on MM-model, taking into account presence of metallic tool in the worker’s hand. The transient processes in this model were investigated. It is shown, that this variant of electrostatic discharge is not especially important for practice. For the second case, the structural model has a form of series RLC-current. The capacity of different hardware component packages was calculated for the analysis of transient processes in this model. It is shown, that processes in the considering model is damped oscillations, which are significantly dangerous for electronic circuits.