

## СТРУКТУРНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА НА УЗЕЛ МИКРОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Д.В. Комнатный

Разработана структурная электрическая модель электростатического разряда с обслуживающего персонала на узел электронной аппаратуры. Описаны результаты расчета переходных процессов в схеме замещения модели. Показано, что импульсы напряжения на рецепторе в случае разряда непосредственно на узел электронной техники отличаются от импульсов при разряде на корпус этой техники.

Электростатический разряд (ЭСР) является одним из наиболее опасных видов электромагнитных помех при эксплуатации микроэлектронной и микропроцессорной техники. Поэтому исследование устойчивости электронного и микропроцессорного оборудования к ЭСР, разработка методов защиты указанного оборудования является актуальной проблемой, особенно для систем управления ответственными технологическими процессами в промышленности и на транспорте.

Для этих исследований применяются структурные электрические модели и схемы замещения на базе этих моделей. Разработаны модели для следующих вариантов ЭСР [1,2]:

- разряд с тела оператора на корпус электронной аппаратуры;
- разряд с тела оператора через металлический инструмент на корпус электронной аппаратуры;
- разряд электронного компонента, предварительно заряженного трением.

Мало исследованным остается вопрос о повреждениях узлов микроэлектронной и микропроцессорной техники от ЭСР в процессе ремонта и технического обслуживания. В этом случае разряд происходит напрямую на шины данных и управления узла. Электрические параметры узла-рецептора при этом резко отличаются от параметров рецептора – корпуса аппаратуры. Поэтому необходима разработка соответствующих этому случаю структурных электрических моделей ЭСР.

В работе [3], посвященной этому вопросу, источник ЭСР – человек – моделируется простейшей последовательной  $RC$ -цепочкой. Этого явно недостаточно даже для уже известных моделей [1], в которых отдельно учитываются емкость и омическое сопротивление тела человека, а также емкость и омическое сопротивление его руки. В случае же разряда на узел аппаратуры тем более неправомерно не учитывать отдельно указанные параметры. Это объясняется тем, что при ремонте ЭСР происходит именно с руки, поднесенной к узлу или коснувшейся узла.

При электростатическом разряде на узел электронной аппаратуры напряжение разряда попадает на линии связи узла – печатной платы и, распространяясь по ним, достигает микросхем. Там импульс напряжения, в общем случае, частично рассеивается во входных сопротивлениях микросхем. Выделившаяся энергия может повредить микросхемы и вызвать их отказ. С целью прогнозирования устойчивости узлов микроэлектронной техники к ЭСР во время ремонта, необходимо анализировать переходные процессы, возникающие в линиях связи узлов. Для этого нужно знать параметры входного помехового импульса ЭСР, которые рассчитываются по схеме замещения структурной электрической модели. Разработка этой модели и ее схемы замещения и является целью настоящей работы.

В качестве основы примем структурную модель разряда с тела оператора на корпус аппаратуры (НВМ-модель), так как в ней хорошо учтены электрические свойства тела и руки человека [1].

В разрабатываемой модели тело человека представим в виде последовательной  $RC$ -цепочки из омического сопротивления тела человека  $R_h$  и емкости тела  $C_h$ . Рука человека и в разрабаты-

ваемой, и в известных моделях характеризуется омическим сопротивлением  $R_a$  и емкостью  $C_a$ . Эти элементы схемы замещения соединяются так, как показано на рис. 1.

На практике обычно происходят воздушные электростатические разряды. При этом между источником ЭСР и подверженным воздействию помехи объектом возникает искровой канал. Будем считать, согласно [4, 5], что канал разряда обладает весьма малым сопротивлением. Тогда в схему замещения следует ввести идеальный ключ между элементами, моделирующими источник разряда, и элементами – моделью рецептора. Замыкание этого ключа соответствует началу разряда предварительно заряженного тела и руки человека.

В исходной структурной модели учитывается емкость между рукой оператора и корпусом аппаратуры. Поскольку в случае разряда на отдельный узел напряжение помехи попадает чаще всего на одну линию связи, следует оценить емкость между рукой оператора и этой линией. Для этого смоделируем систему «рука оператора и линия связи» двумя параллельными круговыми цилиндрами конечной длины, с основаниями, сдвинутыми друг от друга на расстояние  $m$ . Емкостями между рукой оператора и линиями, соседними с подверженной ЭСР линией, корпусом устройства, навесными элементами и тому подобным пренебрегаем. Емкость модельной системы, показанной на рис. 2, определяется по формуле [6]

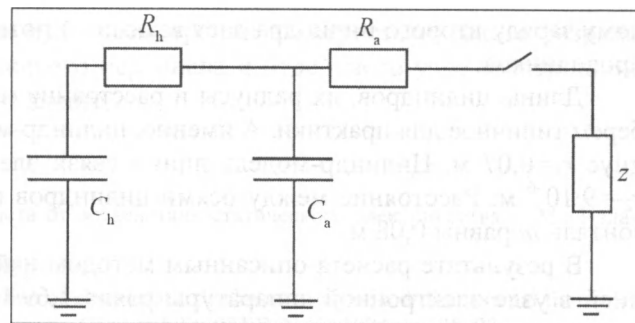


Рис. 1. Схема замещения структурной электрической модели ЭСР на узел электронной аппаратуры

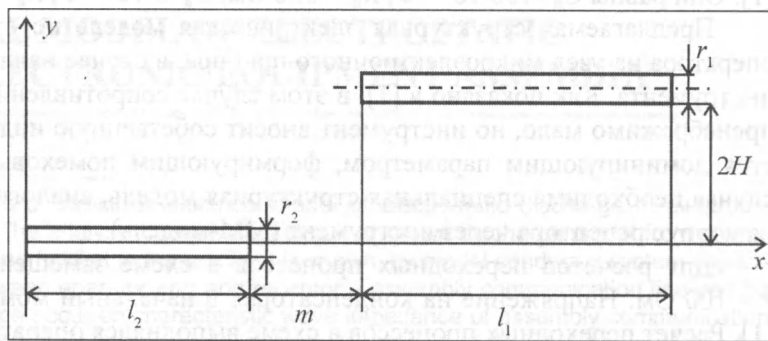


Рис. 2. Модель системы «рука человека – линия связи»

$$C = \frac{1}{\alpha_{11} + \alpha_{22} - 2\alpha_{12}}; \quad (1)$$

где  $C$  – емкость системы, Ф;  $\alpha_{11}$  – собственный потенциальный коэффициент первого цилиндра,  $\Phi^{-1}$ ;  $\alpha_{22}$  – собственный потенциальный коэффициент второго цилиндра,  $\Phi^{-1}$ ;  $\alpha_{12}$  – взаимный потенциальный коэффициент,  $\Phi^{-1}$ .

Собственные и взаимные коэффициенты проводников системы были вычислены методом средних потенциалов (Хоу) [6]. Формулы для собственных коэффициентов известны:

$$\alpha_{11} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0 l_1} \left\{ \operatorname{Arsh} \frac{l_1 + r_1}{r_1} - \sqrt{\left(\frac{r_1}{l_1}\right)^2 + 1} \right\}, \quad \alpha_{22} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0 l_2} \left( \ln \frac{l_2}{r_2} - 0,307 \right). \quad (2)$$

Входящие в формулы (2) размеры показаны на рис. 2.

Для расчета взаимного потенциального коэффициента методом Хоу вначале вычисляется потенциал в произвольной точке на геометрической оси первого цилиндра, созданный зарядом второго цилиндра. При расчете принимается, что заряд второго цилиндра сосредоточен на его геометрической оси и распределен по этой оси равномерно с постоянной линейной плотностью. Так как радиус линии связи электронного узла, моделируемой этим цилиндром, мал по сравнению с радиусом модели руки человека, то такое предположение не вносит значительной погрешности.

После чего рассчитывается средний по длине потенциал поля заряда второго цилиндра на геометрической оси первого цилиндра. Отношение среднего потенциала первого цилиндра к пол-

ному заряду второго цилиндра дает взаимный потенциальный коэффициент для рассматриваемых проводников.

Длины цилиндров, их радиусы и расстояние между ними для численного анализа емкости выберем типичное для практики. А именно, цилиндр-модель руки оператора имеет длину  $l_1=0,37$  м, радиус  $r_1=0,07$  м. Цилиндр-модель линии связи электронного узла имеет длину  $l_2=0,15$  м, радиус  $r_2=9 \cdot 10^{-6}$  м. Расстояние между осями цилиндров по вертикали  $H$  и сдвиг их оснований по горизонтали  $m$  равны 0,08 м.

В результате расчета описанным методом найдено, что емкость между рукой человека и линией в узле электронной аппаратуры равна  $1,69 \cdot 10^{-12}$  Ф. Поэтому можно пренебречь этой емкостью при построении структурной модели.

Линии шин связи узлов микроэлектронной аппаратуры представляют собой цепи с распределенными параметрами без потерь. Для любой точки линии без потерь и для любого момента времени ток и напряжение в линии связаны волновым сопротивлением, которое для линий без потерь является активным и не зависящим от частоты [7]. Поэтому принимаем, что емкости, соответствующие телу и руке человека, разряжаются на волновое сопротивление линии связи узла  $z$ .

На рис. 1 показана схема замещения для ЭСР с тела человека-оператора на узел микроэлектронной аппаратуры. Значения емкостей и сопротивлений, моделирующих оператора, известны [1]. Они равны  $C_h=150 \cdot 10^{-12}$  Ф,  $R_h=330$  Ом,  $C_a=5 \cdot 10^{-12}$  Ф,  $R_a=200$  Ом.

Предлагаемая структурная электрическая модель не отражает особенности разряда с тела оператора на узел микроэлектронного прибора, в случае наличия в руке оператора металлического инструмента. Как показано в [1], в этом случае сопротивление цепи «рука оператора-инструмент» пренебрежимо мало, но инструмент вносит собственную индуктивность. Эта индуктивность является доминирующим параметром, формирующим помеховый импульс ЭСР. Для анализа этого случая необходима специальная структурная модель, аналогично модели разряда с тела оператора на корпус рецептора через инструмент (ММ-модель).

Для расчетов переходных процессов в схеме замещения было принято, что  $z=300$  Ом и  $z=100$  Ом. Напряжение на конденсаторах в начальный момент времени принято равным 6000 В [1]. Расчет переходных процессов в схеме выполнялся операторным методом.

Расчеты показали, что напряжение на сопротивлении  $z$  имеет форму биэкспоненциального импульса. Однако фронт этого импульса очень мал, поэтому для практических расчетов это напряжение удобно аппроксимировать экспоненциальным импульсом вида

$$u(t) = U_0 e^{-pt}, \quad (3)$$

где  $U_0$  – амплитуда импульса, В;  $p$  – постоянная времени,  $c^{-1}$ .

Параметры аппроксимирующего импульса подбираются так, чтобы амплитуда и длительность исходного и аппроксимирующего импульсов были одинаковые, при незначительном отклонении формы.

Кроме того, расчеты показывают, что длительность помехового импульса при разряде на отдельный узел на три порядка больше длительности импульса ЭСР на корпус рецептора. Это означает, что при одинаковом начальном напряжении на индукторе, результаты воздействия ЭСР на микроэлектронное устройство в целом и на его отдельные узлы будут существенно разными. Соответственно, помехоустойчивость электронной аппаратуры к различным видам ЭСР требует отдельного исследования.

По результатам расчетов переходных процессов можно также заключить, что при уменьшении волнового сопротивления линии амплитуда импульса помехового напряжения снижается. Поэтому для одного и того же микроэлектронного технического средства результаты воздействия ЭСР персонала на разные узлы будут различными. Анализ переходных процессов в схеме замещения позволяет ранжировать узлы по чувствительности и устанавливать приоритет исследования узлов электронных технических средств.

- Итак, результаты расчетов переходных процессов в структурной электрической модели ЭСР на узел электронного оборудования выявляют, что импульс ЭСР в этой модели имеет существенные отличия, по сравнению с импульсом ЭСР на корпус аппаратуры [1]. Учет этого

обстоятельства является исходным пунктом при рассмотрении электростатического разряда при непосредственном контакте обслуживающего персонала и отдельного узла электронной управляющей техники и проектировании мер защиты.

## Литература

1. *Кечиев Л.Н., Пожидаяев Е.Д.* Защита технических средств от воздействия статического электричества. – М.: Издательский Дом «Технологии», 2005.
2. *Kodali P.* Handbook on EMC/ P. Kodali. – N.Y.: IEEE Press, 1996.
3. *Brown B.S., Routh L.L.* Finite element time domain simulation of electrostatic discharge using mixed-dimensional finite elements. – 1994 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility/IEEE, N.Y., 1994, pp. 95–98.
4. *Гурвич И. С.* Защита ЭВМ от внешних помех. – М.: Энергоатомиздат, 1984.
5. *Болдырев В.Г.* и др. Электротехническая совместимость электрооборудования подвижных технических систем / Под ред. *В.П. Булекова.* – М.: Энергоатомиздат, 1995.
6. *Говорков В.А.* Электрические и магнитные поля. – М.: Энергия, 1968.
7. *Бессонов Л.А.* Теоретические основы электротехники. Электрические цепи // 7-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. школа, 1978.

Поступила 16 июля 2008 г.

## STRUCTURAL ELECTRICAL MODEL OF ELECTROSTATIC DISCHARGE ON MICROELECTRONIC EQUIPMENT ASSEMBLY

D.V. Komnatny

The aim of this article is development of structural electrical model of electrostatic discharge to electronic equipment assembly during the repair. The analysis of equivalent circuit of known discharge model from operator body to electronic device package was fulfilled in the article. It is shown, by model conductor system capacitance calculation, that capacitance between operator arm and receptor – assembly communication line can be excluded. Also it is shown, that discharge occur on characteristic wave impedance of assembly communication line in investigated case. Calculation of transient processes in equivalent circuit of the obtained model is fulfilled. Results from calculation, that disturbance voltage impulses in equivalent circuit of electrostatic discharge on electronic equipment assembly is differ from discharges impulses on electronic hardware components package, which usually being considered.