

Семинар №6 по курсу «Электромагнитная совместимость РЭС».

Электростатический разряд.

к.т.н., доцент кафедры ЭИУ1-КФ Кузнецов В.В.

13 ноября 2015 г.

1 Введение

Целью данного семинара является ознакомление студентов с воздействием электростатического разряда (ЭСР) на РЭА и рассмотрение ЭСР как источника электромагнитных помех. Рассматриваются модели испытаний РЭА на воздействие ЭСР.

2 Классификация воздействия ЭСР на РЭА

Различают прямое и косвенное воздействие ЭСР на электронную аппаратуру. При прямом воздействии ЭСР возникают эффекты, связанные с инжекцией заряда в процессе электростатического разряда. Возникающий в результате ЭСР переходный процесс подаётся непосредственно на проводники или элементы конструкции системы. При косвенном воздействии ЭСР возникают эффекты, связанные с электрическими и магнитными полями, порождёнными токами заряда. В этом случае эффекты связаны с излучаемыми электромагнитными помехами.

Для защиты РЭА от косвенного воздействия ЭСР применяются принципы конструирования РЭС те же, что и при защите от электромагнитных помех иного происхождения. Важна правильная экранировка электронных узлов и правильная разводка цепей заземления. Косвенное воздействие ЭСР как правило не приводит к необратимым повреждениям аппаратуры.

Наиболее опасным для электронных компонентов является прямое воздействие ЭСР. Оно может проявляться как в процессе производства, так и в процессе эксплуатации. При этом часто происходят необратимые повреждения полупроводниковых электронных компонентов.

3 Методы испытаний и модели воздействия ЭСР на РЭА

3.1 Модель тела человека

В целях моделирования воздействия ЭСР на РЭА и определение реальных порогов чувствительности электронных компонентов практикуется использование моделей воздействия ЭСР на аппаратуру.

Исторически впервые была предложена модель тела человека (Human Body Model — НВМ). С XIX века эта модель использовалась для анализа воспламенения взрывчатых веществ под воздействием ЭСР. Позже эта модель была принята рядом стандартов.

Данная модель имитирует разряд от кончика пальца человека на устройство. Типовая электрическая схема имитатора, базирующегося на НВМ — модели показана на рис. 1.

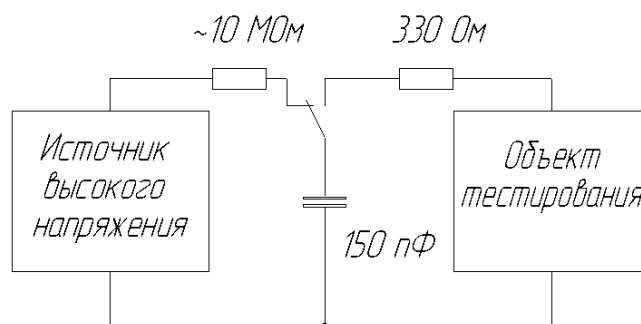


Рис. 1. Типовая электрическая схема имитатора ЭСР на базе НВМ - модели

Номиналы элементов схемы по разным стандартам могут отличаться. Так в некоторых источниках указывается значение ёмкости 200 пФ и сопротивления 1500 Ом. Физический смысл элементов схемы НВМ-модели иллюстрирует рисунок 2.

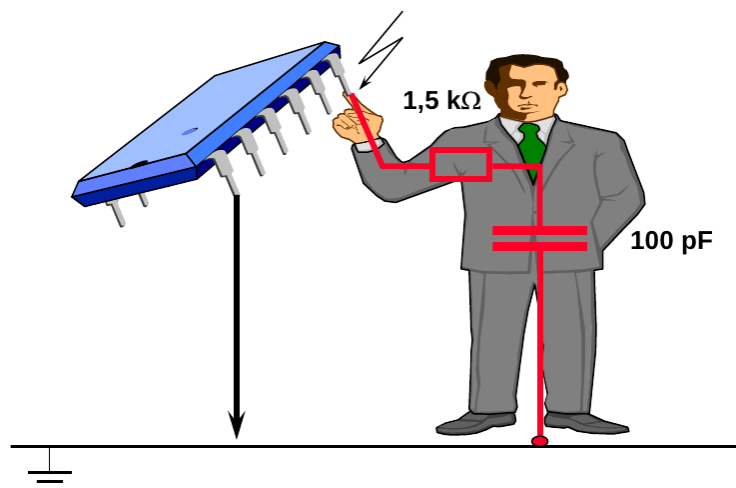


Рис. 2. Физический смысл модели НВМ

Как видно из рисунков 1 и 2 конденсатор на схеме имитирует ёмкость тела человека, которая имеет порядок 150 пФ. Резистор 330 Ом имитирует сопротивление цепи разряда. Конденсатор заряжается от источника высокого напряжения через высокоомное сопротивление порядка 10 МОм. Ключ имитирует прикосновение человека к компоненту. При его переключении происходит разряд.

В испытателях микросхем на воздействие ЭСР компонент помещается в специальную панель и для наблюдения процесса разряда используется осциллограф. Компонент фиксируется как отказавший если после тестирования он не более не выполняет соответствующих функций и не соответствует паспортным данным.

После завершения тестирования компоненты должны квалифицироваться по классу их устойчивости к ЭСР:

1. Класс 0 — любой компонент, который отказывает после ЭСР с амплитудой более 250 В;

2. Класс 1А — любой компонент, который выдерживает испытания ЭСР с амплитудой 250 В, но отказывает после разряда с амплитудой 500 В;
3. Класс 1В — любой компонент, который выдерживает испытания ЭСР с амплитудой 500 В, но отказывает после разряда с амплитудой 1000 В;
4. Класс 1С — любой компонент, который выдерживает испытания ЭСР с амплитудой 1000 В, но отказывает после разряда с амплитудой 2000 В;
5. Класс 2 — любой компонент, который выдерживает испытания ЭСР с амплитудой 2000 В, но отказывает после разряда с амплитудой 4000 В;
6. Класс 3А — любой компонент, который выдерживает испытания ЭСР с амплитудой 4000 В, но отказывает после разряда с амплитудой 8000 В;
7. Класс 3В — любой компонент, который выдерживает испытания ЭСР с амплитудой 8000 В;

3.2 Модель механизма

Разряд подобный разряду, описываемому НВМ-моделью, может происходить от заряженного проводящего объекта, например, металлического инструмента или элемента крепления. Такой разряд является самым худшим случаем разряда по НВМ-модели и описывается моделью механизма (Machine Model — ММ). Электрическая схема соответствующая этой модели показана на рис. 3

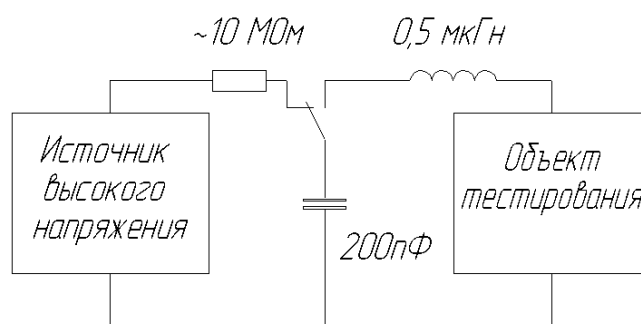


Рис. 3. Типовая электрическая схема имитатора ЭСР на базе ММ - модели

Как видно из схемы здесь отсутствует последовательный резистор 330 Ом, но имеется последовательная индуктивность 0,5 мкГн, которая формирует форму колебательного напряжения модели. Индуктивность косвенно определена через параметры формы сигнала напряжения.

После завершения испытаний компоненты должны классифицироваться по классу их устойчивости к воздействию ЭСР:

1. Класс А — любой компонент, который отказывает после ЭСР с амплитудой не более 200 В;
2. Класс В — любой компонент, который выдерживает ЭСР с амплитудой 200 В, но отказывает после разряда с амплитудой 400 В;
3. Класс С — любой компонент, который выдерживает ЭСР с амплитудой 400 В;

3.2.1 Модель заряженного компонента

В производстве РЭА особенно широко распространён ещё один вариант ЭСР. Компонент может зарядиться например при скольжении вниз по поверхности конвейера. Если затем он прикоснётся к какому-либо металлическому предмету, например к установочной головке, то произойдёт быстрый разряд. Соответствующая модель известна как CDM-модель или модель заряженного компонента. Разряд в этом случае может быть более разрушительным чем для HBM-модели. Хотя продолжительность разряда очень мала (часто менее 1 нс), пиковый ток может достигать десятков ампер.

Имитаторы CDM ЭСР используются обычно для испытаний микросхем. Чувствительность компонентов к ЭСР согласно CDM-модели зависит от размеров их корпуса: с уменьшением размера корпуса микросхемы она существенно возрастает.

Электрическая схема разряда при испытаниях согласно CDM-модели показана на рис. 4.

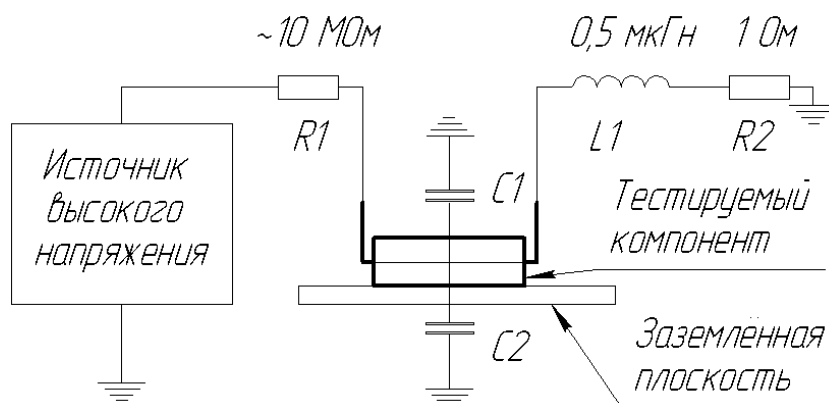


Рис. 4. Модель испытаний на основе CDM. C1 — паразитная ёмкость; C2 — распределённая ёмкость корпуса на землю; R1 — разрядный резистор; R2 — измерительный резистор; L1 — паразитная индуктивность

4 Моделирование ЭСР в Qucs

4.1 Моделирование HBM ЭСР

Исследуем форму тока при электростатическом разряде при помощи моделирования переходного процесса. Сначала смоделируем HBM ЭСР. Эквивалентная схема испытаний на воздействие HBM ЭСР показана на рис.5.

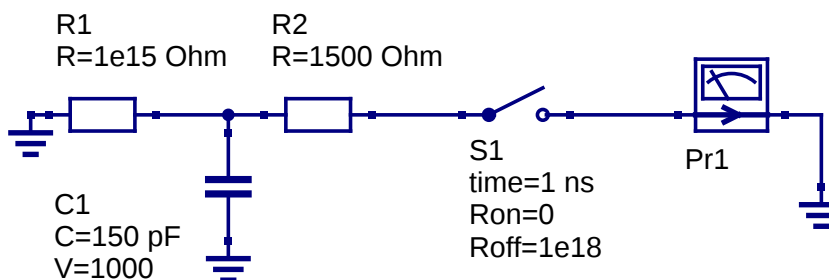


Рис. 5. Моделирование HBM ЭСР в программе Qucs.

Конденсатор C1 на схеме заряжен до напряжения тестирования. Ключ S1 имитирует контакт разрядного электрода с заземлением. Такой метод испытаний применяется для калибровки разрядных стендов. Вместо виртуального амперметра Pr1 в схеме включается безиндуктивный датчик тока, который соединяется с электронным осциллографом. Таким образом можно наблюдать форму тока разряда. Форма тока разряда, полученная в результате моделирования, показана на рис.6.

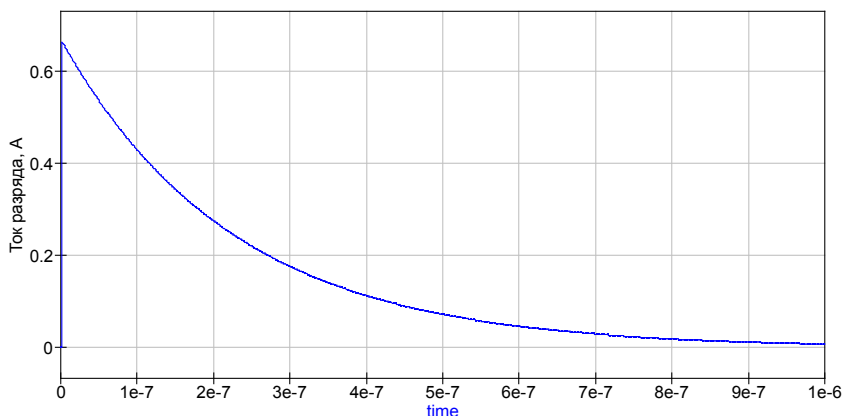


Рис. 6. Форма тока НВМ ЭСР.

Видно, что ток при данном виде ЭСР спадает по экспоненциальному закону от начального значения I_0 :

$$I_0 = \frac{U_{esd}}{R} \quad (1)$$

до нуля. Постоянная времени τ равна:

$$\tau = RC \quad (2)$$

4.2 Моделирование ММ ЭСР

Аналогично может быть промоделирован ММ ЭСР (схема рис.7).

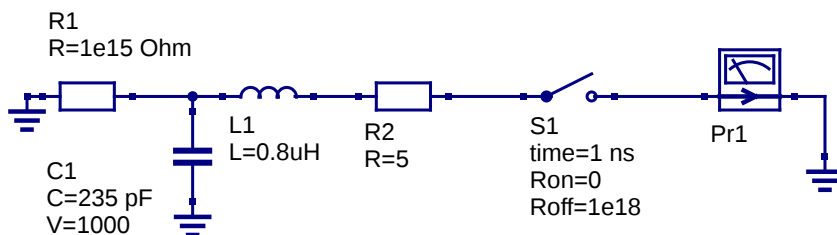


Рис. 7. Моделирование ММ ЭСР в программе Qucs.

Отличием здесь является то, что нужно учитывать сопротивление контактов и дуги, которая образуется при искрении при разряде. Эти сопротивления внося затухание в эквивалентный колебательный контур и определяют форму тока, которая имеет вид затухающих колебаний (рис.8).

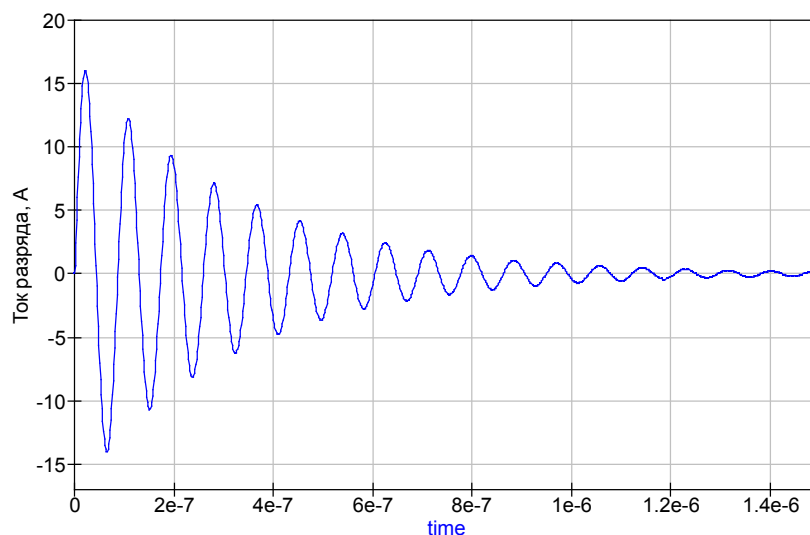


Рис. 8. Форма тока ММ ЭСР.

Видно, что индуктивность даёт выброс тока и амплитуда этих выбросов намного превышает ток при НВМ ЭСР. В реальной аппаратуре эти выбросы тока приводят к повышенным перегрузкам в электронном компоненте, подверженном ЭСР. Поэтому порог отказа компонента при ММ ЭСР как правило значительно ниже чем при НВМ ЭСР.

4.3 Моделирование CDM ЭСР

Для испытаний ИМС на воздействие CDM ЭСР обычно применяется метод FCDM, при котором микросхема заряжается в результате электростатической индукции. Схема установки для FCDM-испытаний показана на рис.9. Методика испытаний регламентирована стандартом JEDEC JESD22-C101E. В процессе испытаний вместо тестируемой микросхемы может устанавливаться калибровочный модуль, имеющий вид диска, размеры которого регламентируются стандартом.

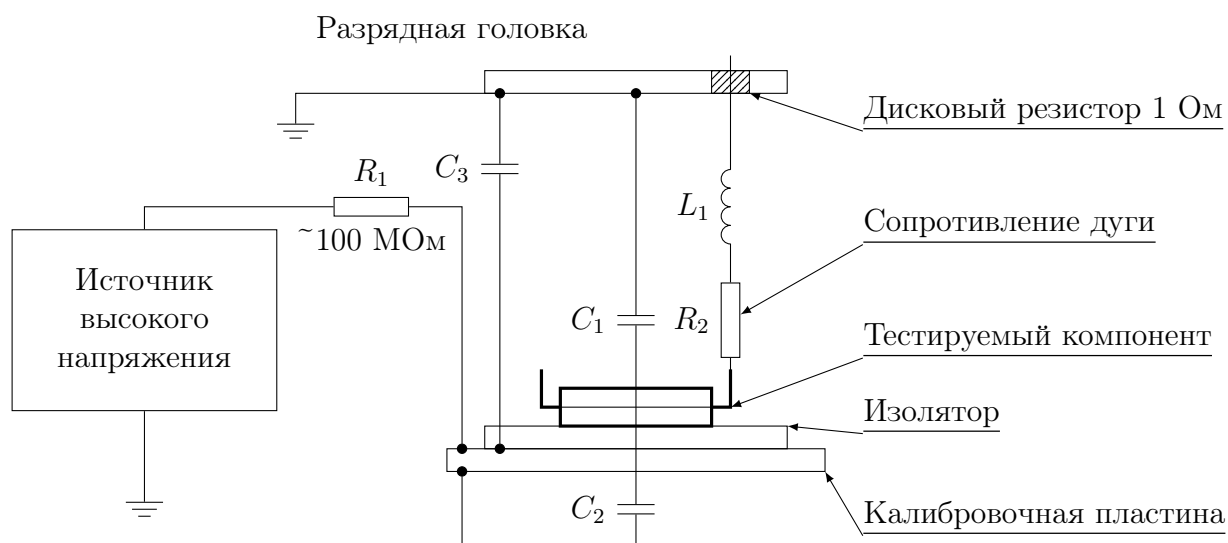


Рис. 9. Схема установки для FCDM-испытаний.

Ёмкость C_2 на рис.9 в основном определяется ёмкостью выводной рамки и сильно зависит от конструкции корпуса микросхемы. Схема представленная на рис.9 является упрощённой, так как на самом деле ёмкость C_2 между корпусом микросхемы и пластиной является распределённой и складывается из ёмкостей отдельных выводов на пластину C_{pin} . Ёмкость C_2 заряжена до напряжения равного:

$$U_{имс} = \frac{U_0 C_1}{C_1 + C_2} \quad (3)$$

Теперь промоделируем эту схему в Qucs и получим форму тока ЭСР. Эквивалентная схема CDM ЭСР показана на рис. 10.

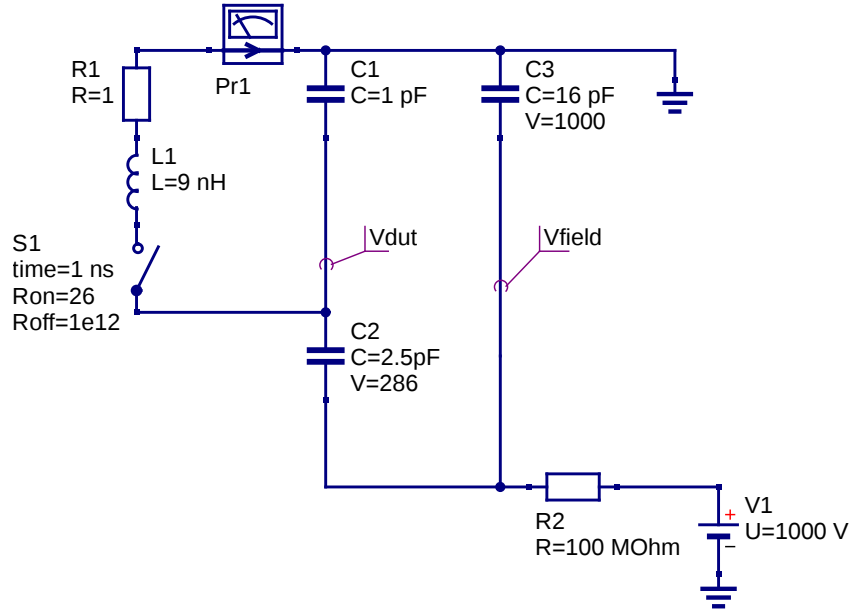


Рис. 10. Моделирование FCDM ЭСР в программе Qucs.

Начальное напряжение на конденсаторе C_2 рассчитано из выражения (3). Напряжение ЭСР равно $1 \text{ кВ} = 1000 \text{ В}$. Форма тока ЭСР и форма напряжения на ИМС $U_{имс}$, полученные в результате моделирования показаны на рис.11.

Из рисунка видно, что длительность переходного процесса при CDM ЭСР очень мала и составляет порядка нескольких наносекунд. Амплитуда тока достигает 10 А . Таким образом скорость срабатывания схем защиты при CDM ЭСР может оказаться недостаточной и микросхема всё равно выйдет из строя даже при наличии защиты.

4.4 Задание для самостоятельной работы

1. Промоделировать схемы НВМ и ММ ЭСР (рис.5, 8, построить осциллограммы тока. Подобрать отрезок моделирования, чтобы обеспечить наиболее наглядный вид осциллограмм. Выполнить подписи по осям на русском языке.
2. Для НВМ ЭСР вычислить длительность переходного процесса τ — время, за которое амплитуда тока спадает в e раз и начальное значение тока I_0 .

$$I_0 = \frac{U_{esd}}{R_{HBM}} \quad (4)$$

$$\tau = R_{HBM} C_{HBM} \quad (5)$$

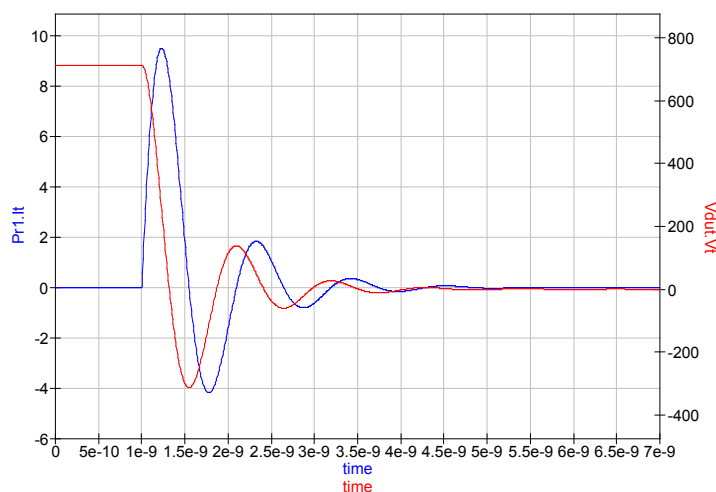


Рис. 11. Форма тока FCDM ЭСР.

Сравнить вычисленные значения и найденные в результате моделирования.

3. Промоделировать схему рис. 10. Моделирование выполнить для напряжения тестирования 2500 В и емкости $C2 = 5$ пФ. Предварительно рассчитать начальное напряжение на конденсаторе $C2$ по формуле (3). Построить осциллограммы тока ЭСР и напряжения на компоненте. Выполнить подписи по осям на русском языке.

5 Заключение

В результате выполнения семинара студенты ознакомились с электростатическим разрядом и его воздействием на РЭА. Рассмотрены три модели воздействия ЭСР: НВМ, ММ и СДМ. Выполнено моделирование переходного процесса при ЭСР.