

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»

*На правах рукописи*

УДК 621.396.6

КРИВЕЛЬ  
Дмитрий Викторович

**ЭЛЕКТРОМАГНТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ  
ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ**

АВТОРЕФЕРАТ

магистерской диссертации на соискание степени  
магистра техники и технологии

по специальности 1-39 81 01 «Компьютерные технологии  
проектирования электронных систем»

Научный руководитель  
канд. техн. наук, доцент  
Гонов А.Н.

Минск 2015

Работа выполнена на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель:

**Гонов Александр Николаевич,**  
кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник НИЛ 1.9 учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Рецензент:

**Полубок Владислав Анатольевич,**  
кандидат технических наук, заведующий кафедрой МПСС учреждения образования «Институт информационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники»

Защита диссертации состоится «23» января 2015 г. года в 9<sup>00</sup> часов на заседании Государственной комиссии по защите магистерских диссертаций в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П.Бровки, 6, 1 уч. корп., ауд. 415, тел.: 293-20-88, e-mail: [kafpiks@bsuir.by](mailto:kafpiks@bsuir.by).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

## **ВВЕДЕНИЕ**

Понятие электромагнитной совместимости возникло еще в начале развития радиотехники и имело узкое смысловое значение – выбор частотного диапазона. В настоящее время Международная электротехническая комиссия определяет электромагнитную совместимость, как способность оборудования или системы удовлетворительно работать в данной электромагнитной обстановке без внесения в нее какого-либо недопустимого электромагнитного возмущения. Электромагнитная совместимость нарушается, если уровень помех слишком высок, помехоустойчивость оборудования недостаточна.

Условно все помехи можно разделить на два класса: естественного и искусственного происхождения.

Помехи искусственного происхождения возникают в процессе человеческой деятельности. Помехи естественного происхождения не связаны с процессами жизнедеятельности человека и существуют, не зависимо от них.

Помехи искусственного происхождения, в свою очередь, делятся на непреднамеренные и организованные.

Непреднамеренные помехи возникают в процессе использования человеком различного рода устройств, генерация помех которыми является естественным следствием их функционирования.

Организованные помехи создаются искусственно с целью ухудшения функционирования или вывода из строя электронных систем. Организованные помехи в теории обеспечения требования электромагнитной совместимости электронных систем не рассматриваются. Тем не менее на практике они имеют место, и по характеру своего воздействия на элементы электронных систем во многом идентичны мощным не преднамеренным электромагнитным помехам, особенно с точки зрения влияния на нормальное функционирование элементы электронных систем предполагаемой неблагоприятной электромагнитной обстановки, в которой могут оказаться эти средства. Поэтому, чтобы выдержать основные, сложившиеся в практике обеспечения требований электромагнитной совместимости электронных систем аспекты, в классификации они объединены в единую группу с непреднамеренными помехами.

Основными источниками мощных электромагнитных помех являются: грозные разряды, радиоэлектронные средства (мощные радиопередающие средства и радиолокационные станции), высоковольтные линии передачи, контактная сеть железных дорог, а также высоковольтные установки для научных исследований и технологических целей.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

Проблема электромагнитной совместимости представляет существенную проблему для электронных средств, и относится к области защиты ра-

диоэлектронных средств (электронных систем) от воздействия электромагнитных помех.

Тенденции развития электронных систем непосредственно связаны с уменьшением минимальных топологических размеров проектируемых ИС, что приводит к большей чувствительности устройств по отношению к внешним факторам и, в частности, к электростатическому разряду. Природа электростатического разряда может быть различной, поэтому невозможно говорить о качестве продукции в электронике, не рассматривая вопросы электромагнитной совместимости.

Таким образом, моделирование электромагнитной совместимости электронных средств основывается на современных методах проведения испытаний на устойчивость к электромагнитным помехам с использованием аппаратно-программного моделирования.

Необходимость разработки модели воздействия импульсных помех на электронные средства делает представленную тему диссертации актуальной.

### **Степень разработанности проблемы**

Исследование влияния импульсных электромагнитных помех на электронные средства осуществлялось в работах R. Curry, J.M. Lehr, P. Champney, J. Nielsen и других авторов.

Авторами белорусских и российских работ, посвященных изучению электромагнитной совместимости при воздействии импульсных помех, являются Б.В. Кондратьев, С.Ф. Черноморцев, В.А. Туркин и другие.

Одним из недостатков теоретических моделей воздействия импульсных помех на электронные средства, представленных в современной литературе, является неполное рассмотрение возможных вариантов воздействия импульсных помех на электронику с различными последствиями. Предложенное исследование направлено на устранение этого недостатка.

### **Цель и задачи исследования**

Целью работы является разработка методов анализа и моделирование электромагнитной совместимости электронных средств при воздействии импульсных помех. Для выполнения поставленной цели в работе были сформулированы **следующие задачи:**

- систематизация методов и систем анализа электромагнитной совместимости электронных средств при воздействии импульсных помех;
- классификация механизмов и разработка моделей воздействия импульсных электромагнитных помех на электронные средства;
- моделирование воздействия импульсных электромагнитных помех на электронные средства;
- анализ полученных результатов моделирования воздействия импульсных помех на электронные средства.

Для выполнения поставленных задач необходимо:

- выявить факторы, которые оказывают влияние на полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы;
- произвести статистическую оценку параметров импульсных помех сетях электроснабжения;
- провести определение законов распределения амплитуд импульсных электромагнитных помех;
- разработать модель источника импульсных помех;
- произвести исследование электромагнитной обстановки в помещении;
- произвести сравнение полученных результатов.

**Объектом** исследования являются электронные средства.

**Предметом** работы выступают процессы возникновения, распространения и воздействия импульсных помех, методы и средства решения проблемы электромагнитной совместимости в электронных средствах.

**Область исследования.** Содержание диссертационной работы соответствует образовательному стандарту высшего образования второй ступени (магистратуры) специальности 1-39 81 01 «Компьютерные технологии проектирования электронных систем».

#### **Теоретическая и методологическая основа исследования**

В основу диссертации легли результаты известных исследований российских и зарубежных ученых в области устройств СВЧ и полупроводниковой техники.

Для получения теоретических результатов исследования применялись существующие математические модели импульсных помех и их воздействия на электронные устройства.

Имитационные расчеты по теоретической модели осуществлены в пакете MathLab и MSExcel.

**Информационная база** исследования сформирована на основе статистических данных.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в разработке методов анализа и моделирование электромагнитной совместимости электронных средств при воздействии импульсных помех.

#### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Систематизация методов и систем анализа электромагнитной совместимости электронных средств при воздействии импульсных помех. Обзор природы возникновения электромагнитных импульсных помех.

2. Классификация механизмов и разработка моделей воздействия импульсных электромагнитных помех на электронные средства. Классификация физических механизмов, протекающих в электронном средстве при воздействии ИЭМП.

3. Разработка модели источника сверхкоротких электромагнитных импульсов на основе TEM-рупорной антенны. Сравнение результатов

моделирования с экспериментальными результатами

**Теоретическая значимость** диссертации заключается в том, что в ней предложен подход к анализу воздействия электромагнитных импульсных помех на электронные средства и полупроводниковые приборы, позволяющий детально исследовать происходящие в устройствах процессы.

**Практическая значимость** диссертации состоит в том, что на основе предложенного метода оценки влияния импульсных электромагнитных помех на электронные средства, можно значительно уменьшить экономические затраты на проведение испытаний.

#### **Апробация и внедрение результатов исследования**

Результаты исследования были неоднократно представлены на 3 научных конференциях, среди которых можно отметить: 50-я НТК аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, Минск, 24-28 марта 2014 г.; международная научно-техническая конференция, приуроченная к 50-летию МРТИ-БГУИР, Минск, 18-19 марта 2014 г.; "Научные стремления" – 2013: материалы Международная научно-практическая конференция молодых ученых "Научные стремления" – 2013, Минск, Республика Беларусь, 3-6 декабря 2013 г. / Совет молодых ученых Национальной академии наук Беларуси.

#### **Публикации**

Основные положения работы и результаты диссертации изложены в пяти опубликованных работах общим объемом 10,0 стр., в том числе на международных конференциях авторским объемом 9,0 стр.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, трех глав, кратких выводов к главам, заключения, библиографического списка и приложения. Полный объем диссертации содержит 62 страницы, в том числе 44 страниц текста, 3 страниц иллюстраций (количество иллюстраций 18), 1 страницы таблиц (количество таблиц 6), 5 страниц библиографического списка из 54 наименований, включая собственные публикации соискателя (5 наименований) и 9 страниц приложения.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** рассмотрено современное состояние проблемы электромагнитной совместимости электронных средств при воздействии импульсных помех, определены основные направления исследований, а также дается обоснование актуальности темы диссертационной работы.

В **общей характеристике работы** сформулированы ее цель и задачи, показана связь с научными программами и проектами, даны сведения об объекте исследования и обоснован его выбор, представлены положения, выносимые на защиту, приведены сведения о личном вкладе соискателя, апробации результатов диссертации и их опубликованность, а также, структура и объем диссертации.

**В первой главе** рассматриваются методы и системы анализа электромагнитной совместимости электронных средств при воздействии импульсных помех. Рассмотрены основные источники электромагнитных помех.

Электромагнитной помехой называют нежелательное воздействие электромагнитной энергии, которое ухудшает или может ухудшать качество функционирования электронных систем. Электромагнитные помехи делятся на естественные и искусственные.

Естественные помехи вызваны электромагнитными процессами, объективно существующими в природе и не связанными с деятельностью человека. Рассмотрим основные виды, источники и причины их возникновения. Разветвленная структура электромагнитных помех представлена на рисунке 1.

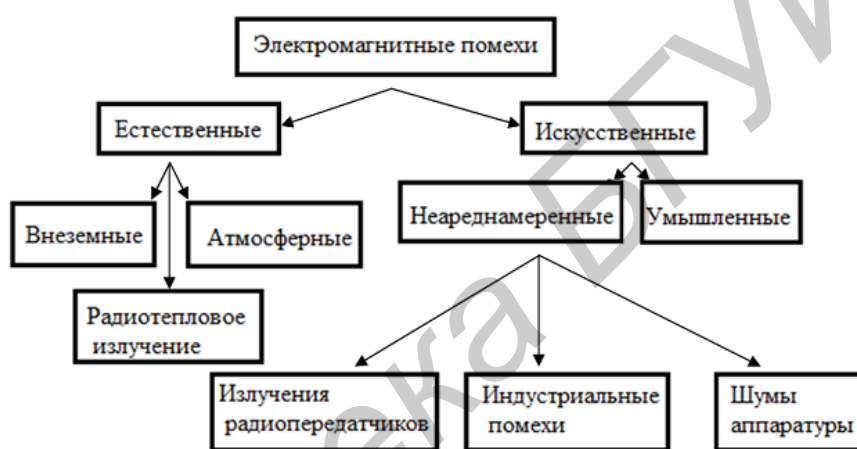


Рисунок 1 – Виды электромагнитных помех

Кроме названных механизмов, в образование атмосферных помех могут внести вклад и некоторые другие процессы.

Тип кондуктивной помехи, когда наведённый в проводниках ток имеет знак, т.е. с одинаковой амплитудой протекает как в прямом, так и в обратном направлении, называется симметричной, или дифференциальной, помехой. Если ток помехи замыкается на землю или протекает по проводнику в одном направлении, то такая помеха называется асимметричной, или синфазной.

Электромагнитная связь между источником и приёмником помех может возникать в результате:

- гальванической связи, которая создаёт симметричные помехи;
- ёмкостной связи, возникающей в результате воздействия переменного электрического поля на паразитные конструктивные ёмкости;
- индуктивной связи, вызванной нахождением проводника, по которому течёт ток, в переменном магнитного поле;
- электромагнитной связи, которая может иметь кондуктивной характер (возникает как наводка на проводники в кабельных жгутах или на проводящие дорожки печатной платы) либо распространяется путём излучения

(если ширина зазора между источником и приёмником помехи превышает  $0,1$  длины волны излучения  $\lambda$ ).

**Во второй главе** приведена классификация физических механизмов, протекающих в электронном средстве при воздействии ИЭМП.

Повреждения электронных систем, вызванные воздействием мощного электромагнитного излучения, подразделяются на функциональные и физические повреждения. При физическом повреждении происходит повреждение радиокомпонента, при функциональном повреждении устройство перестает выполнять свои функции (сброс, очистка памяти).

Электромагнитный импульс может непосредственно воздействовать на радиоэлементы и электронные микроструктуры (рисунки), но основное влияние оказывают переходные процессы, происходящие в аппаратуре при воздействии излучения.

Полупроводниковые приборы относятся к классу электронных элементов, наиболее чувствительных к высоким уровням переходных процессов. Ниже представлены наиболее характерные виды повреждений полупроводниковых элементов:

- поверхностный пробой;
- объемный пробой;
- пробой диэлектрика;
- сквозной пробой;
- тепловой вторичный пробой;
- перегорание;
- помеха, возмущение (режима);
- изменение состояния, погрешность или выпадение разряда;
- выход параметров за допустимые пределы;
- сбой (ложное срабатывание).

Механизм нарушения при поверхностном пробое обычно состоит в образовании в обход  $p-n$ -перехода пути с малым сопротивлением, в этом случае полупроводниковый переход перестает функционировать, но он не обязательно нарушен.

Импульсное напряжение является одним из показателей качества электроэнергии в соответствии со стандартом ГОСТ 13109-97.

Устанавливаемые в стандарте ГОСТ 13109-97 нормы качества электроэнергии по нормируемым показателям качества электроэнергии (в том числе импульсам напряжения) являются уровнями ЭМС для кондуктивных ЭМП в системах энергоснабжения общего назначения.

**В третьей главе** была произведена разработка модели источника сверхкоротких электромагнитных импульсов на основе ТЕМ-рупорной антенны. Произведено численное моделирование воздействия электромагнитного импульса в виде импульса Гаусса.

Импульсные помехи – это помехи, сосредоточенные по времени. Они представляют собой случайную последовательность импульсов, имеющих



случайные амплитуды и следующих друг за другом через случайные интервалы времени, причем вызванные ими переходные процессы не перекрываются во времени.

Данные помехи можно представить в следующем виде:

$$U_n(X_t) = \sum_{i=1}^m A_i h_i(t - \tau_i), \quad (3.1)$$

где  $A_i$  – случайные амплитуды импульсов;

$h_i$  – огибающие импульсов;

$\tau_i$  – случайные моменты появления импульсов;

$t$  – время импульса;

$m$  – количество импульсов.

В большинстве случаев огибающую импульсной помехи можно описать выражением:

$$h_i(t - \tau_i) = \begin{cases} 1, & \tau_i \leq t \leq \tau_i + t_{ui}; \\ 0, & t < \tau_i, \quad t > \tau_i + t_{ui}, \end{cases} \quad (3.2)$$

где  $t_{ui}$  – случайные длительности импульсов.

При проведении исследований будем использовать несколько упрощенных моделей импульсных помех: одиночная импульсная помеха, периодическая последовательность импульсов и случайная импульсная последовательность.

Одиночная импульсная помеха описывается выражением:

$$U_n(t) = \begin{cases} A, & \tau \leq t \leq \tau + t_{ui}; \\ 0, & t < \tau, \quad t > \tau + t_{ui}. \end{cases} \quad (3.3)$$

Для исследования задач электромагнитной совместимости в настоящее время наибольшее распространение получили численные методы. Численные методы нацелены на непосредственное решение уравнений поля с граничными условиями, обусловленными геометрией задачи и самой задачей. Хотя они требуют большего объема вычислений, чем аналитические методы или экспертные системы, численные методы являются крайне мощным инструментом анализа электромагнитного излучения.

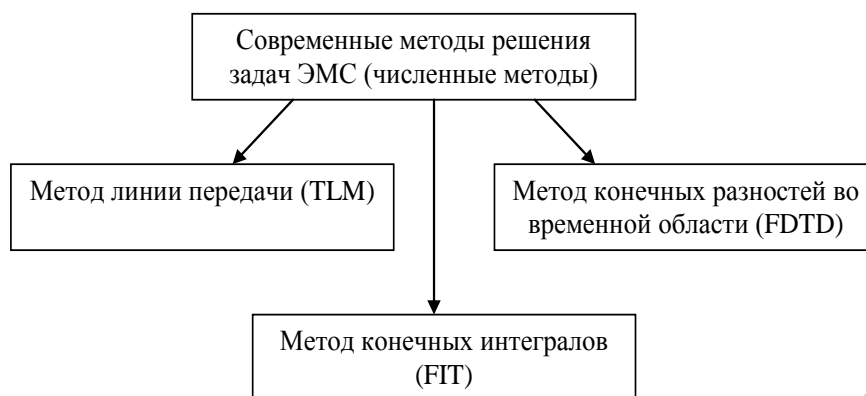


Рисунок 2 – Современные методы решения задач ЭМС

В свою очередь из численных методов наибольшее распространение получили три метода анализа ЭМИ во временной области: метод матрицы линии передачи (*TLM*), метод конечных интегралов (*FIT*) и метод конечных разностей во временной области (*FDTD*).

Метод матрицы линии передачи появился примерно в 1976 году и считается универсальным методом для решения задачи анализа распределения электромагнитного поля. Данный метод основан на моделировании распространения электромагнитных волн с помощью ячеек линии передачи с периодом  $\Delta b$  (пространственной решетки). Гибридная TLM-ячейка определяет 6 компонент поля, представленных на рисунке 3.

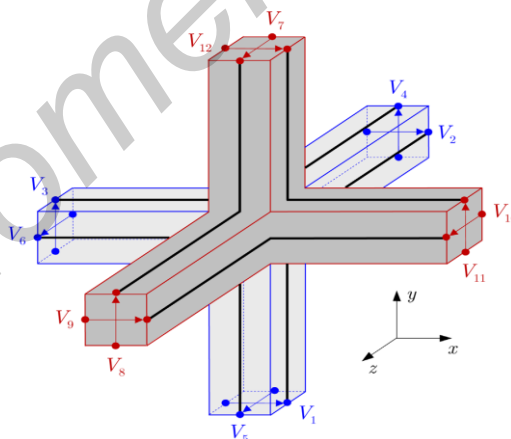


Рисунок 3 – Гибридная TLM-ячейка

Границы, соответствующие электрическим и магнитным стенкам, представляются короткозамкнутыми и разомкнутыми шунтирующими узлами на соответствующих границах. Наличие магнитных и диэлектрических материалов может быть смоделировано за счет подключения короткозамкнутых шлейфов длиной  $\Delta b/2$  на последовательных узлах и разомкнутых шлейфов на параллельных узлах. Электрические и магнитные поля заменяются эквивалентными генераторами в линиях.

В работе моделирование электромагнитной обстановки в помещении при воздействии электромагнитных импульсов на электронное средство проводится путем численных экспериментов на основе имитационных моделей.

Таблица 1– Результаты моделирования воздействия электромагнитного импульсного излучения на межсоединение на печатной плате

Напряжение, подаваемое на вход антенны, кВ	Результаты моделирования (размах, В)	Экспериментальные результаты (размах, В)	Расхождение результатов не более, %
1	0,3	0,25	10
2	0,6	0,7	9
3	0,9	0,96	9
4	1,2	1,3	9
5	2,3	2,1	11

Результаты моделирования показывают, что максимальный уровень электромагнитной помехи в межсоединении на печатной плате при воздействии электромагнитного импульсного излучения наблюдается при 5 кВ и может достигать 1,15 В. Это значение по эксперименту составляет примерно 1,05 В.

В **приложении** приведены слайды презентации для защиты магистерской диссертации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе магистерской диссертации были рассмотрены проблемы обеспечения электромагнитной совместимости.

Проведен анализ кондуктивных ИЭМП, возникающих в СЭС 0,4 кВ в результате внешних и внутренних источников помех, а именно коммутационных и грозовых, применительно к вопросу обеспечения ЭМС ЭИТ. Установлены и систематизированы наиболее вероятные причины возникновения опасных для ЭИТ ИЭМП в СЭС 0,22 - 0,4 кВ.

Изучение параметров импульсных помех в СЭС проведено на основе математических расчетов, физического моделирования и измерений российских и зарубежных ученых. Установлено, что для СЭС 0,4 кВ наиболее вероятно появление ограниченных (импульсной прочностью кабельных линий и электропроводок) грозовых импульсных помех, амплитуда которых с вероятностью 0,9 не превысит 6 кВ.

На основе обработки статистических данных измерения ИЭМП методами математической статистики получены вероятностные модели параметров ИЭМП в СЭС 0,22 - 0,4 кВ и в электрических сетях коммунально-бытовых потребителей, а также их суммарный закон распределения для точки общего присоединения потребителей электроэнергии.

На основе анализа суммарного закона распределения установлено, что с вероятностью 0,05 величина амплитуды ИЭМП в СЭС 0,4 кВ общего назначения, в точке общего присоединения потребителей не превысит 1140 В, а с вероятностью 0,02 - 1400 В. Указанные величины амплитуд ИЭМП рекомендуются в качестве нормально допустимой  $U_{\text{имп}} = 1140$  В и предельно допустимой  $U_{\text{имп}} = 1400$  В нормы ПКЭ – импульсного напряжения для СЭС 0,4 кВ общего назначения.

На основании полученных данных, была разработана модель воздействия электромагнитного импульса в виде импульса Гаусса в частотном диапазоне от 0 до 550 МГц.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. Брылева, О.А. Методы повышения защиты электронных систем от воздействия импульсных помех / О.А. Брылева, Д.В. Кривель, А.Д. Бужинский // Научные стремления – 2013 : материалы Междунар. науч.-практич. конф. молодых ученых, Минск, Республика Беларусь, 3-6 декабря 2013 г. / Совет молодых ученых Национальной академии наук Беларуси. – Минск: «ЭНЦИКЛОПЕДИКС», 2013. – С.287-290.

2. Кривель, Д.В. Методы повышения защищенности сигналов при воздействии импульсных помех / Д.В. Кривель, И.С. Масловский // Научные стремления – 2013: материалы Междунар. науч.-практич. конф. молодых ученых, Минск, Республика Беларусь, 3-6 декабря 2013 г. / Совет молодых ученых Национальной академии наук Беларуси. – Минск: «ЭНЦИКЛОПЕДИКС», 2013. – С.320-322.

3. Романович, А.С. Разогрев полупроводниковых приборов и ИМС импульсными помехами / А.С. Романович, Д.В. Кривель // 10-я Международная молодёжная научно-техническая конференция «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2014». – 12 - 17 мая 2014 г., Севастополь. – С.264.

4. Кривель, Д.В. Анализ характеристик импульсных помех, оказывающих влияние на работоспособность полупроводниковых приборов и интегральных микросхем / Д.В. Кривель, А.С. Романович // 10-я международная молодёжная научно-техническая конференция «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2014». – 12 - 17 мая 2014 г., Севастополь. – С.281.

5. Кривель, Д.В. Электромагнитная совместимость электронных средств при воздействии импульсных помех / Д.В. Кривель, А.Н. Гонов // сб. материалов 50-ой науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», – 2014г., Минск. – С.72.