

Комплексная защита электронных устройств космических аппаратов от электромагнитных помех

В.Н. Северцев, Г.Н. Гулякович

Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН

Аннотация: Условия работы космических аппаратов (КА) на орбите Земли постоянно меняются. Эти изменения связаны с движением КА по орбите, с нестабильностью потока солнечного излучения, с процессами в земной ионосфере. Многие из этих процессов предсказуемы и большинство диагностируется электронной и оптической аппаратурой. Диапазон изменения дестабилизирующих воздействий очень велик. Массогабаритные возможности КА не позволяют обеспечить абсолютную защиту электронных средств от дестабилизирующих воздействий космоса.

Ключевые слова: устройства защиты от электростатических разрядов, помехоустойчивость, электромагнитная совместимость, защита от электростатических разрядов, методы проектирования, иерархия средств защиты.

Введение

Проблема стойкости электронных систем КА к влиянию помех, возбуждаемых электростатическими разрядами (ЭСР), становится все более актуальной [1]. Стремление к повышению быстродействия и снижению энергопотребления приводит к применению микросхем с меньшими топологическими нормами, меньшими напряжениями питания, что вызывает их повышенную чувствительность к воздействию помех. Помехоустойчивость микросхем к воздействию импульсных помех может быть оценена по их характеристике динамической помехоустойчивости (рисунок 1) [2].

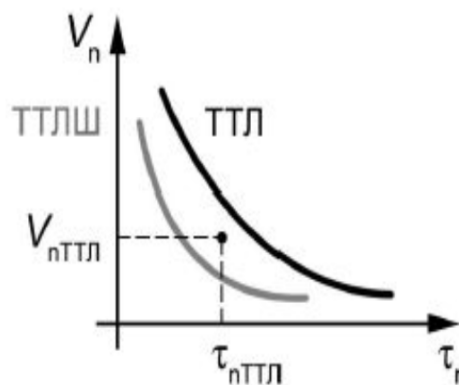


Рис. 1. – Характеристика импульсной помехоустойчивости ИМС

Характеристика построена в системе координат «длительность помехи (τ_n) – напряжение помехи (V_n)». Чем выше быстродействие микросхемы, тем ближе к началу координат расположена эта характеристика. Из рисунка 1 видно, что более быстрая ТТЛШ–схема, чем ТТЛ–схема, имеет характеристику ближе к началу координат, чем ТТЛ. Это говорит о том, что по мере совершенствования компонентной базы, ее чувствительность к воздействию наведенных от ЭСР импульсов возрастает.

Для достижения требуемого уровня надежности системы формируются с параллельным резервированием. К сожалению, избыточность не обязательно защищает систему от эффектов облучения электромагнитными полями, потому что все избыточные системные каналы могут быть подвержены этой угрозе одновременно и могут функционировать ошибочно, что приведет к сбоям. Современные методы обеспечения стойкости электронной аппаратуры к электромагнитным помехам используют иерархическую комплексную систему защиты [3].

Конструкторский уровень защиты КА от электромагнитных помех

Для разных видов излучений разработаны достаточно эффективные экраны. Проблема в том, что материалы и размеры этих экранов тоже разные. Использование трех и более вложенных экранов в конструкции КА практически невозможно. Поэтому, требуются новые композитные материалы и новые конструкции многофункциональных экранов. Приведем примеры комплексных решений.

Возможности экранирования не ограничиваются внешней поверхностью КА. Электромагнитные излучения проникают внутрь корпуса и возбуждаются электронными устройствами внутри корпуса. В непосредственной близости к чувствительным электронным приборам требования к допустимому уровню электромагнитных помех возрастают

множественно. Наиболее опасный источник электромагнитных помех внутри корпуса КА - это электростатические разряды. Наиболее опасные разряды возникают на печатных платах электронных устройств и воздействуют непосредственно на выводы микросхем. В этом случае элементы защиты на печатной плате и в составе функционального блока действуют с низкой эффективностью, так как отделены от места возникновения разряда паразитной индуктивностью проводников. В этом случае экраном должна стать печатная плата. Если в структуре многослойной печатной платы присутствуют слои шин питания и «общей», то объемные заряды стекают в эти шины. Размещение заземленных экранов на всех свободных местах верхнего слоя металлизации также снижает вероятность разряда на вывод микросхемы. Наиболее эффективным методом борьбы с электростатическими разрядами является использование печатных плат с контролируемой проводимостью. Если изолирующий материал печатной платы имеет удельное сопротивление не более $1 \text{ ГОм}\cdot\text{см}$, то заряды, накапливающиеся в изоляторе, стекут в шины питания [4]. К сожалению не все электронные системы позволяют использовать печатные платы с такой проводимостью.

Экраны в корпусе КА должны не только снижать уровень излучаемых электромагнитных полей, но не должны отражать электромагнитные поля за счет наведенных на экране токов. Это серьезная проблема обеспечения целостности экранирования. Металлические экраны могут внести свой вклад в коэффициент ослабления поля, если они должным образом объединены согласно концепции мультиэкрана. Оптимальное использование этих конструкций может быть сделано только в том случае, если каждый экран пространственно отделен от других и проникающие линии интерфейсов (шины данных, заземление, питание) входят в экраны в одной точке.

В неудачно спроектированном экране с многочисленными точками входа, индуктивные напряжения, вызванные токами, протекающими по экрану, могут попасть в защищенную зону и таким образом обойти защитные устройства. Многочисленные точки заземления в таком экране увеличивают амплитуду синфазной помехи, проникающей от области излучения к устройству. Поэтому, выгодно иметь единственную точку ввода для всех кабелей. Это означает, что все защитные меры против проникновения токов помех через кабели должны быть расположены на экране настолько близко друг к другу, насколько это возможно. Это также означает, что потенциал земли для всего оборудования в пределах защищенной зоны должен быть взят исключительно от единственной точки входа.

В пространственно распределенном устройстве КА могут быть определены области защиты различных уровней. Одним из критериев определения таких областей и степеней их защиты может быть деление системы на ответственные части аппаратуры, которые должны быть лучше защищены, или разделение частей по степени их восприимчивости. Эта процедура называется зонированием. Правильное зонирование подразумевает, что примененная защита от помех достаточна, чтобы сделать остаточную кондуктивную помеху сопоставимой с излученной помехой в пределах данной области, так, чтобы в пределах области не происходило доминирование наведенных помех над уровнем помех в цепи питания. Классификация зон может быть выполнена только путем сравнения чувствительности данного оборудования к каждому виду помехи.

Если используются экранированные кабели или каналы для прокладки экранированного кабеля, то все экраны должны быть связаны между собой при любой конфигурации топологии. Корпус оборудования должен также быть подключен к экранам кабелей. Понятие целостности экранирования включает применение соединителей хорошего качества для точек ввода

кабелей в оборудование и устранения из практики соединений оплеток кабелей в виде «косичек» и других подобных вариантов, которые неэффективны с точки зрения ЭМС (Технический регламент таможенного союза ТР ТС 020/2011. Электромагнитная совместимость технических средств).

Внутри корпуса КА эффективность использования отражающих экранов значительно снижается. Многократное отражение ЭМИ приводит к тому, что это излучение концентрируется в местах неоднородностей экранов и проникает в защищенные объемы. Поэтому, предпочтение должно отдаваться поглощающим экранам.

Поглощение электромагнитных излучений в материале экрана происходит при больших величинах электрической (ε) или магнитной (μ) проницаемостей. В этом случае наведенные токи создаются на атомарном уровне и электромагнитная энергия, в итоге, превращается в тепловую. Однако, материалы с большими величинами электрической или магнитной проницаемостей имеют высокий коэффициент отражения ЭМИ. Для увеличения коэффициента поглощения ЭМИ необходимо согласование волновых сопротивлений свободного пространства и материала экрана. условие согласования формулируется следующим образом:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = Z_{\text{экp}} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}$$

Условие согласования можно выполнить, используя композиты, содержащие ферромагнитные или сегнетоэлектрические наполнители. Основной недостаток таких экранов - это разные частотные зависимости проницаемостей для ферромагнетиков и сегнетоэлектриков. Диапазон эффективного поглощения таких экранов от 30 до 1000 МГц. На высоких частотах эффективность экранов снижается [5].

Высокой поглощающей способностью обладают градиентные экраны. В градиентном экране усредненное значение волнового сопротивления среды должно непрерывно и монотонно возрастать в направлении от внешней поверхности экрана к защищаемому объему.

Самое новое направление в разработке поглощающих экранов - это полимерные композиты, в состав которых входят наполнители из порошков сегнетоэлектриков и металлических элементов в форме колец, дуг или спиралей. Размеры металлических элементов в наполнителе меньше длины волны поглощаемого ЭМИ. Элементы наполнителя могут размещаться послойно с увеличением концентрации в направлении от поверхности, что обеспечивает требуемый градиент волнового сопротивления. Композитная структура формируется на поверхности отражающего экрана, как в обычном градиентном поглощающем экране с пирамидками. Диапазон частот поглощаемого ЭМИ можно расширить за счет использования металлических элементов разных размеров.

Полимерные экраны с металлическими наполнителями технологичнее, легче и дешевле, чем экраны с ферромагнитными пирамидками. Характеристики композитных экранов можно менять, используя только форму и концентрацию металлических элементов.

Особо следует отметить экранирование оптоэлектронных приборов на внешней поверхности КА. Основная проблема эксплуатации этих приборов в космосе - это защита оптики от воздействия электростатических разрядов [6]. Для защиты оптоэлектронных приборов используются прозрачные стеклянные экраны с проводящей поверхностью. Проводящее покрытие на внешней стороне экрана состоит из прозрачной пленки проводящего оксида олова или оксида цинка. Поверх пленки формируется сетка проводников, создающих распределенный омический контакт к экрану. Экран обеспечивает стекание поверхностных зарядов с экрана на корпус КА и

значительное ослабление ЭМИ, проникающих внутрь корпуса прибора через объектив и покровное стекло.

Схемотехнический уровень защиты электронных систем КА

Схемотехнические средства защиты используются как отдельные устройства в составе аппаратуры и как блоки в составе интегральных микросхем[7].

Встроенные средства защиты микросхем от импульсных помех и электростатических разрядов

Специалисты выделяют три основных механизма деградации параметров наноразмерных КМОП транзисторов:

1. Времязависимый пробой диэлектрика.
2. Эффекты «горячих» носителей связаны с «разогревом» носителей в инверсном слое и их инжекцией в слой затворного диэлектрика. При этом возрастает величина порогового напряжения n-МОП транзисторов.
3. Эффект температурной нестабильности при отрицательном смещении на затворе p-МОП транзистора. Под действием этого эффекта в затворном окисле накапливается положительный заряд и снижается подвижность носителей в канале.

Срок службы КМОП микросхемы экспоненциально возрастает с ростом величины, обратной напряжению питания ($1/V_0$).

В номинальных условиях эксплуатации без перегрузок расчетный срок эксплуатации микросхем обычно составляет десятки лет.

КМОП транзисторы с минимальной длиной затвора менее 100 нм и напряжением питания не выше 1В плохо подходят для использования в элементах защиты от электростатических разрядов и перегрузок.

Повышение допустимых напряжений для КМОП транзисторов достигается конструктивно-технологическими средствами. [8]

Устройства защиты от электромагнитных помех и электростатических разрядов в функциональных блоках электронной аппаратуры КА

Основным требованием, предъявляемым к защитному элементу, является обеспечение его минимального влияния на работу защищаемой цепи (устройства, аппаратуры) при отсутствии помех. Можно выделить три основных требования, предъявляемых к средству защиты:

- обеспечение минимального влияния на работу защищаемой цепи при отсутствии помех;
- реакция на высокую скорость нарастания тока и напряжения;
- соответствующие статистические и динамические характеристики, а также достаточная токовая пропускная способность.

В таблице 1 приведены примеры электронных приборов, применяемых для защиты от помех в функциональных блоках и на печатных платах.

Основные устройства и компоненты защиты от кондуктивных помех

Принцип действия	Тип устройства или компонента
Пробойное снижение напряжения	Газоразрядные трубки Искровые разрядники Ограничители на основе нелинейного сопротивления
Ограничение напряжения	Металлооксидные варисторы Защитные лавинные диоды (полупроводниковый стабилитрон с лавинным пробоем)
Ограничение частотного спектра	Фильтры
Гальваническая развязка	Оптические устройства Развязывающие трансформаторы
Комбинированные методы	Защитные цепи Ограничители электробезопасности
Высокочастотные коаксиальные линии	Шлейфовые линии Резонаторы

В последнее время все больше внимания уделяется разработке быстродействующих датчиков, фиксирующих начало действия ЭМИ, сигнал с которых является командой для блокирования нежелательных эффектов, возникающих в защищаемом блоке, например, для обнуления цепей, в которых появились ложные сигналы; для форсирования процесса восстановления или в других целях.

Существенное уменьшение влияния ЭМИ на работоспособность электронной системы может быть достигнуто известной заменой кабелей и проводных линий связи системами оптоэлектроники, т.е. уменьшением числа контуров тока и связей между отдельными узлами и блоками. Хотя микросхемы имеют встроенную защиту от электростатических разрядов, но в аппаратуре применяются и специальные микросхемы (ограничители помех), предназначенные для защиты выводов чувствительных микросхем от перенапряжений.

Разработка средств защиты электронных блоков и систем не ограничивается введением в их структуру дополнительных устройств. При разработке помехоустойчивых электронных систем следует пользоваться следующими правилами:

- при компактном расположении нескольких интерфейсов можно распределить мощность электростатического разряда между несколькими защитными устройствами и снизить максимальный уровень воздействия на внутренние элементы микросхем;
 - сужение полосы частот полезных сигналов и ограничение спектра входных сигналов (в пределах допуска нормативного функционирования) входными фильтрами;
 - гальваническая развязка высокочастотных сигналов (например, сигналов синхронизации);
-

- снижение индуктивности в шинах питания для уменьшения высокочастотного импеданса в цепи протекания разрядного тока;
- передача сигналов в парафазной форме по двум линиям связи на один канал передачи;
- неиспользуемые выводы микросхем обязательно заземлить;
- при выборе элементной базы не использовать микросхемы с динамической логикой;
- входной каскад цифровой микросхемы с повышенной помехоустойчивостью должен иметь передаточную характеристику с гистерезисом;
- общая шина электропитания должна быть соединена с корпусом КА;
- ширина и сопротивление сигнальных проводников выбираются с учетом их разогрева разрядным током;
- шины питания и общие размещаются как можно ближе друг к другу, не образуя замкнутых контуров;
- проводники многоуровневых соседних информационных шин должны регулярно пересекаться, так же как проводники парафазных сигналов.

Методология проектирования устройств защиты

Известно два основных подхода к построению устройств защиты: независимая защита каждого вывода микросхемы и комбинированная защита устройств, объединенных общей системой электропитания. Исторически первой развивалась система независимой защиты выводов. Эта система хорошо зарекомендовала себя в микросхемах на основе микронных технологий. Ключевым элементом этой системы является управляемый тиристор с латеральной p-p-n-p структурой, обеспечивающий высокую плотность разрядного тока и сравнительно небольшую паразитную емкость.

Точность воспроизводства напряжения фиксации у тиристора невысокая, но удовлетворительная для диапазона $3 \div 4$ В [2].

В условиях космического пространства ионизирующие излучения негативно влияют на параметры тиристорных структур и неуправляемо их включают. С уменьшением размеров элементов и напряжения питания микросхем возникли проблемы реализации воспроизводимых тиристорных структур с требуемыми параметрами. Поэтому, для изделий космического применения используются функционально более сложные транзисторные фиксаторы напряжений.

В непосредственной близости от контактной площадки остались незащищенными только коммутаторы тока (диоды) и ограничители (резисторы). Фиксаторы напряжения включены между шинами питания и равномерно распределены в пределах площади блока. Схема фиксатора включает детектор перепада напряжений, формирователь управляющего сигнала и мощный ключевой МОП транзистор. При любом направлении разрядного тока он переключается в одну из шин питания, детектор перепада определит полярность импульса и откроет мощный ключевой МОП транзистор при любой полярности [9].

Комплексная система защиты менее чувствительна к вариациям параметров физической структуры и легко переносится с одного технологического маршрута на другой. Недостатки комплексной системы проявляются при объединении шинами питания большого числа функциональных блоков и фиксаторов напряжения. Синхронное переключение большого числа логических элементов может создать импульсную помеху, вызывающую ложное срабатывание детекторов перепада и фиксаторов напряжения. Для снижения импульсных помех требуются драйверы с управляемой длительностью фронта [10]. Множество мощных транзисторов в цепи электропитания увеличивает ток утечки.

Комплексная система защиты не рассчитана на использование в микросхемах с управляемым электропитанием. Единственное требование к процессу изготовления микросхем - это наличие низкоомных диодов или вертикальных р-n-p транзисторов.

В современных микросхемах для обработки смешанных сигналов разработана модифицированная комплексная система. Каждый функциональный блок, имеющий отдельные цепи питания, защищается от ЭСР и перегрузок собственной локальной системой защиты. На глобальном уровне система защиты от ЭСР имеет свои глобальные шины питания. Локальные шины питания связаны с глобальными через разрядные диоды.

Главный недостаток модифицированной системы - это большое число мощных транзисторов в фиксаторах питания. При большом числе выводов микросхемы (100 и более) размер кристалла будет определяться размерами мощных транзисторов.

Уменьшение площади мощных транзисторов достигается при использовании распределенной системы защиты. В распределенной системе детекторы перепада размещены вблизи контактных площадок, а их выходы объединены управляющей сигнальной шиной системы защиты. Формирователи управляющего сигнала и мощные транзисторы распределены равномерно по периметру кристалла. Главное отличие распределенной системы в том, что все фиксаторы включаются одновременно одним сигналом управляющей шины при появлении ЭСР на любом выводе. Суммарную площадь мощных транзисторов в распределенной системе можно сделать меньше в несколько раз. При этом особое внимание следует обратить на сопротивление разрядных шин и равномерное распределение разрядного тока на кристалле.

Дальнейшее уменьшение размеров мощных транзисторов достигается введением в систему защиты отдельной шины питания с повышенным

напряжением для формирователей в фиксаторах напряжения. Повышение управляющего напряжения на затворах мощных МОП транзисторов уменьшает их сопротивление на единицу ширины и позволяет дополнительно еще уменьшить их размеры. Повышение напряжения питания в устройстве формирования в фиксаторе должно проводиться в пределах технологических возможностей и ограничений на надежность МОП транзисторов [2].

Оптимизация системы защиты микросхем от электростатических разрядов и импульсных помех ограничивается минимизацией паразитной емкости выводов микросхемы. Задача уменьшения емкости системы защиты противоречит задаче обеспечения стойкости к ЭСР.

Для высокочастотных узкополосных радиосистем используются два сравнительно простых метода согласования импеданса устройств защиты от ЭСР и трактов передачи сигнала:

1. Метод изоляции входной емкости основан на включении между входной шиной и элементом защиты реактивного элемента с высоким импедансом на рабочей частоте и низким импедансом на низкой частоте.

Для широкополосных радиосигнальных микросхем требуется точное согласование импедансов выводов и сигнальных трактов. Для согласования трактов используются интегрированные волноводы. В микросхемах, как правило, используются копланарные волноводы. Для компенсации паразитной емкости элемент защиты необходимо выполнить в форме нескольких одинаковых секций. Между контактами этих секций включаются отрезки волноводов. Расчет этих отрезков ведется для условия равенства импеданса источника сигналов, тракта передачи и приемника сигналов:

$$Z = \sqrt{\frac{L_{\Sigma}}{C_{\Sigma}}}$$

Для равномерного распределения тока между секциями необходимо в каждой секции последовательно включить балластный резистор. Самый большой номинал резистора в секции рядом с площадкой. Далее сопротивления убывают и на противоположном конце волновода резистор можно не включать.

Эксперименты показали, что такая система защиты обеспечивает ширину полосы пропускания сигнала от 0 до 10 ГГц с ослаблением не более 0,02 дБ. Площадь, занимаемая этой структурой, составляет 1,4 x 0,35 мм, что ограничивает возможности применения множества таких структур на одном кристалле.

В цифровых микросхемах с относительно большим числом высокочастотных выводов используются цепи согласования импеданса на сосредоточенных элементах [11].

Эксперименты показали, что уровень потерь мощности входного сигнала не превышает -20 дБ в полосе до 10 ГГц. Уровень электростатической защиты соответствует уровню защиты вывода без подключения схемы согласования импеданса.

Функциональный уровень защиты КА

Функциональные методы защиты заключаются в изменении функциональных принципов построения технического устройства и структуры используемых сигналов для повышения устойчивости к воздействию электромагнитного излучения, которое, в том числе, зависит и от используемой системы модуляции или кодирования сигнала. Таким системам модуляции, как амплитудная, частотная и фазовая, присуще свойство помехозащищенности.

Защита от помех обеспечивается с помощью комплекса следующих технических методов:

- повышение отношения сигнал/шум;
-

- предотвращение перегрузки приемных устройств с помощью схем регулировки усиления; логарифмических усилителей [12];
- селекция сигналов (пространственная, поляризационная, частотная, временная, амплитудная, комбинированная);
- помехоустойчивое кодирование.

Преимущества систем кодирования и модуляции относительно друг друга проявляются в каждом конкретном случае. Кроме того, при выборе структуры сигнала необходимо учитывать, что вероятность ошибок, вызываемых ЭСР, в системе связи с фазовой модуляцией в 2 раза меньше, чем при когерентном приеме сигналов с амплитудной и частотной модуляциями при одинаковой мощности полезного сигнала.

Помехоустойчивое кодирование позволяет получить не только улучшение параметров по защите от помех, но также и энергетический выигрыш кодирования, который характеризует степень возможного снижения энергетики передачи данных при используемом способе кодирования по сравнению с отсутствием кодирования. Этот выигрыш можно использовать для увеличения скорости передачи данных, снижения мощности передатчика и т.п.

Одним из направлений повышения стойкости технического устройства является использование алгоритмических методов защиты от сбоев в процессе функционирования на базе использования специального кодирования. В этом случае используются корректирующие коды, сохраняющие свои свойства при выполнении некоторых арифметических операций [13, 14, 15]. Отличительной чертой корректирующих кодов является возможность исправлять последствия сбоев независимо от места и характера неисправности, т.е. коды данного типа успешно обнаруживают и исправляют последствия сбоев не только в устройствах передачи и хранения информации, но и в устройствах обработки информации. Наибольшую

эффективность показали модулярные избыточные коды, способные обнаруживать и исправлять как одиночные, так и многократные ошибки [13, 15].

Заключение

Повышение быстродействия вычислительной техники, миниатюризация элементной базы привели к появлению электрических устройств, уровни сигналов в которых измеряются в микроамперах и микровольтах и ниже, а частоты сигналов могут достигать гигагерц. При таких частотах резко возросли излучения электромагнитных полей проводников во внешнее пространство и, как результат, наведение помех в соседних электрических элементах, соизмеримых с полезными сигналами. Отсюда возникает необходимость защиты цифровых микросхем от ЭСР. Причем защита от такого рода помех рассматривается на всех уровнях: от микросхемы до полноценного устройства.

Литература

1. Д. В. Тельпухов, В. С. Рухлов, И. С. Рухлов Исследование и разработка методов оценки сбоеустойчивости комбинационных схем, реализованных в базисе ПЛИС // Инженерный вестник Дона, 2016, №1 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2016/3504.
2. Кечиев Л.Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры. – М.: – М.: ООО «Группа ИДТ», 2007. – 616 с.
3. Chun J.-H. ESD protection circuits for advanced CMOS technologies. Stanford university. Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy. 2006. pp. 21-33.
4. Белик Г.А. «Метод повышения устойчивости печатных узлов БРЭА космических аппаратов к возникновению ЭСР». Диссертация на

- соискание ученой степени к.т.н. по специальности 05.12.04. МИЭТ НИУ ВШЭ, 2014 г. Патент РФ №2497319С1 от 29.10.2013.
5. Островский О.С., Одаренко Е.Н., Шматько А.А., защитные экраны и поглотители электромагнитных волн. Харьков. ФИП. 2003 г. том 1, №2, С. 161-173.
 6. The Space Environment Information System. ESA Technical Officer URL: spenvis.oma.be.
 7. Патент РФ №2527478. Энергоэффективные передатчик и приемник сигналов в проводной линии связи с устройством переключения режимов.
 8. Вонг Б.Л., Миттал А., Цао Ю., Старр Г. Нано-КМОП схемы и проектирование на физическом уровне. Техносфера. М. – 2014. С. 188-190.
 9. Патент РФ №2308146. Устройство защиты выводов интегральных схем со структурой мдп от электростатических разрядов.
 10. Патент РФ №2483437. Формирователь импульсов напряжения с устройством защиты от отрицательных выбросов при подключении индуктивной нагрузки.
 11. Чаплыгин Ю.А., Тимошенко В.П., Шевяков В.И., Адамов Ю.Ф. Электростатическая защита БИКМОП микросхем // VI Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2014»: сб. трудов / под общ. ред. ак. РАН Стемпковского А.Л. М.: ИППМ РАН, 2014. Часть III. С. 99-104.
 12. Балака Е.С., Михмель А.С., Северцев В.Н., Гулякович Г.Н. Система синхронизации в микросхемах с высокой степенью интеграции // Инженерный вестник Дона, 2017, №2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4115.
-

13. Торгашев В.А. Система остаточных классов и надежность ЦВМ. – М.: Сов. Радио, 1973. – 118 с.
14. Стемповский А.Л., Корнилов А.И., Семенов М.Ю., Ласточкин О.В., Калашников В.С. Построение систем повышенной надежности на основе аппарата модулярной арифметики с применением современных методов и средств проектирования // Проблемы разработки перспективных микроэлектронных систем - 2006. Сборник научных трудов / под общ. ред. А.Л. Стемповского. М.:ИППИМ РАН, 2006. С. 253-258.
15. Амербаев В.М., Балака Е.С., Соловьев Р.А., Тельпухов Д.В. Построение обратных преобразователей модулярной арифметики с коррекцией ошибок на базе полиадического кода // Нейрокомпьютеры: разработка и применение. 2014. № 9. С. 30-36.

References

1. D. V. Tel'puhov, V. S. Ruhlov, I. S. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2016, №1 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2016/3504.
2. Kechiev L.N. Proektirovanie pechatnyh plat dlja cifrovoj bystrodejstvujushhej apparatury. [Design of PCBs for digital high-speed hardware]. M.: M.: ООО «Gruppa IDT», 2007. 616 p.
3. Chun J.H. ESD protection circuits for advanced CMOS technologies. Stanford university. Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy. 2006. pp. 21-33.
4. Belik G.A. Metod povysheniya ustojchivosti pechatnyh uzlov BRJeA kosmicheskikh apparatov k vzniknoveniju JeSR (RUS) [The method of increasing the stability of printed units of the on-board radioelectronic apparatus of space vehicles to the occurrence of electrostatic discharges. (ENG)]. Dissertacija na soiskanie uchenoj stepeni k.t.n. po special'nosti

- 05.12.04. MIJeT NIU VShJe, 2014 g. Patent RF №2497319S1 ot 29.10.2013.
5. Ostrovskij O.S., Odarenko E.N., Shmat'ko A.A., zashhitnye jekrany i poglotiteli jelektromagnitnyh voln. Har'kov. FIP. 2003 g. tom 1, №2, pp. 161-173.
6. The Space Environment Information System. ESA Technical Officer URL: spenvis.oma.be.
7. Patent RF №2527478. Jenergojefektivnye peredatchik i priemnik signalov v provodnoj linii svjazi s ustrojstvom perekljuchenija rezhimov [Energy-efficient signal transmitter and receiver in wire link with mode switching device].
8. Vong B.L., Mittal A., Cao Ju., Starr G. Nano-KMOP shemy i proektirovanie na fizicheskom urovne. Tehnosfera. [Nano-KMOP circuits and physical design. The technosphere]. M. 2014. pp. 188-190.
9. Patent RF №2308146. Ustrojstvo zashhity vyvodov integral'nyh shem so strukturoj mdp ot jelektrostaticheskih razrjadov [Device for protecting contacts of integration circuits with metaldielectric-semiconductor structure from electrostatic discharges].
10. Patent RF №2483437. Formirovatel' impul'sov naprjazhenija s ustrojstvom zashhity ot otricateľnyh vybrosov pri podkljuchenii induktivnoj nagruzki [Shaper of voltage pulses with device of protection against negative emissions at connection of inductive load].
11. Chaplygin Ju.A., Timoshenkov V.P., Shevjakov V.I., Adamov Ju.F. VI Vserossijskaja nauchno-tehnicheskaja konferencija «Problemy razrabotki perspektivnyh mikro- i nanojelektronnyh sistem 2014»: sb. trudov pod obshh. red. ak. RAN Stempkovskogo A.L. M.: IPPM RAN, 2014. Chast' III. pp. 99-104.
-



12. Balaka E.S., Mihmel' A.S., Severcev V.N., Guljakovich G.N. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2017, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4115.
13. Torgashev V.A. Sistema ostatochnyh klassov i nadezhnost' CVM.(RUS) [Residue number system and reliability of digital computing machines (ENG)] M.: Sov. Radio, 1973. 118 p.
14. Stempkovskij A.L., Kornilov A.I., Semenov M.Ju., Lastochkin O.V., Kalashnikov V.S. Problemy razrabotki perspektivnyh mikroelektronnyh sistem 2006. Sbornik nauchnyh trudov pod obshh. red. A.L. Stempkovskogo. M.: IPPM RAN, 2006. pp. 253-258.
15. Amerbaev V.M., Balaka E.S., Solov'ev R.A., Tel'puhov D.V. Nejrokomp'yutery: razrabotka i primeneniye. 2014. № 9. pp. 30-36.