

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

На правах рукописи

УДК 621.396.6

ИВЛИЕВ
Иван Александрович

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ С УЧЕТОМ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание степени
магистра техники и технологии

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

Минск 2019

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 кафедры проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Рецензент:

БОНДАРИК Василий Михайлович,
кандидат технических наук, доцент, декан факультета доуниверситетской подготовки и профессиональной ориентации БГУИР

Защита диссертации состоится «5» февраля 2019 года в 9⁰⁰ 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.: 293-20-80, e-mail: kafpiks@bsuir.by.

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

ВВЕДЕНИЕ

Разработка современных радиоэлектронных средств (РЭС), обладающих высокими техническими и эксплуатационными характеристиками, невозможна без применения САПР. Развитие САПР радиоэлектронных средств позволяет решать задачи, связанные с разработкой РЭС • с учетом электромагнитной совместимости (ЭМС), требования к которой постоянно ужесточаются. Оценка качества электромагнитной совместимости РЭС и обнаружение источников нежелательных возмущений на ранних этапах разработки изделия позволяет избежать повторного проектирования и обеспечивает повышение его качества в целом.

САПР РЭС, ориентированные на анализ целостности сигнала и ЭМС (подобные *EMC-Engineer, OmegaPlus, FIDELITY, ANSYS, EMSight, FDTD*) имеют ограниченные возможности в плане моделирования и оптимизации параметров сложных РЭС. Анализ трехмерных металлодиэлектрических структур со сложной геометрией и материальными свойствами с помощью вышеупомянутых САПР либо невозможен, либо требует неоправданно больших затрат машинного времени вследствие применения классических методов моделирования (как правило, метода граничных элементов, метода конечных элементов, метода конечных разностей и метода моментов).

Наиболее известные производители РЭС с большой номенклатурой проектных изделий имеют собственные вычислительные центры, оснащенные мощной вычислительной техникой, и приобретают специализированные дорогостоящие САПР (производителями которых являются такие компании, как *Mentor Graphics, Cadence и Zuken*). Для большого числа малых производственных фирм, специализирующихся в узкой области, автоматизированного проектирования РЭС, с малыми объемами проектных работ, экономически нецелесообразно приобретение мощного технического и программного обеспечения для решения своих задач, которое в большинстве своем не имеет подробной документации на русском языке, что тоже существенно ограничивает круг пользователей.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В большинстве современной электроники в основе устройства лежит печатная плата, на которую в дальнейшем монтируются различные компоненты. Актуальность темы определяется необходимостью решения вышеупомянутых задач при автоматизированном проектировании РЭС с учетом влияния ЭМС путем создания специализированной САПР, использующей простой численный метод и математические модели, отличающиеся «физичностью» и наглядностью с точки зрения протекающих в структуре электромагнитных процессов.

Степень разработанности проблемы

На сегодняшний день существует достаточно большое количество работ в области определения качества электромагнитной совместимости РЭС и обнаружение источников нежелательных возмущений на ранних этапах разработки изделия.

Наиболее значимые результаты были получены российскими и белорусскими учеными, которые проводили исследования в таких областях, как воздействие импульсных электромагнитных помех на электронные средства (С.Ф. Чермошенцев, З.М. Гизатуллин); влияние разрядов статического электричества на полупроводниковые изделия (М.И. Горлов, В.А. Емельянов, Л.П. Ануфриев); моделирование распределения температуры в токоведущих элементах интегральных микросхем в результате воздействия электростатических разрядов (Г.А. Пискун, В.Ф. Алексеев, В.Л. Ланин, В.Г. Левин); методы защиты устройств от электромагнитных помех (Л.Н. Кечиев). Среди зарубежных авторов особый интерес вызывают работы Ч. Джоввета, Э. Хабигера и А. Шваба, в которых представлено описание некоторых механизмов влияния и упрощенные аналитические подходы для решения задач, связанных с воздействием разрядов статического электричества на приборы.

Одним из недостатков в представленной литературе является недостаточно полная информация по компьютерному моделированию в области электростатического разряда с последующим выделением температуры в токопроводящих элементах. Предложенное исследование направлено на устранение данного недостатка на основе проведения моделирования в среде *COMSOLMyltphysics*.

Цель и задачи исследования

Целью работы является разработка нового подхода к созданию конструкторских САПР на основе метода частичных эквивалентных схем, проектирующих радиоэлектронные средства с учетом электромагнитной совместимости, позволяющих снизить трудовые и временные затраты, а также существенно повысить качество проектируемых изделий.

Для достижения указанной цели поставлены следующие задачи:

1. Провести анализ современных систем и технологий автоматизированного проектирования РЭС и направления по совершенствованию процессов автоматизации проектирования РЭС с учетом ЭМС,
2. Рассмотреть методику проектирования РЭС с учетом влияния электромагнитных излучений на их функционирование проведена классификация паразитных эффектов и осуществлено исследование конструктивно-технологических решений, используемых при проектировании РЭС;
3. Рассмотреть моделирование и алгоритмизация проектных решений при разработке РЭС с учетом ЭМС.

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 белорусских ученых в области методов, алгоритмов и проектирования РЭС.

Для получения теоретических результатов была проведена классификация паразитных эффектов и типовых конструктивно-технологических решений, используемых при проектировании РЭС на основе перечня видов электромагнитных помех, установленный в международных стандартах по ЭМС серии МЭК 61000-2 и приведенный в законодательных актах в области ЭМС государств-членов Европейского Союза.

Научная новизна

Научная новизна и значимость полученных результатов работы заключается в разработке методики моделирования математической модели электромагнитных многослойных металлodieлектрических структур, явлений, которые отличаются простотой алгоритмизации и позволяющие изменять внешние компоненты в структуре и анализировать новую систему, не пересчитывая ее помех излучающие элементы, так как их величина определена только геометрией структуры и не зависит от электромагнитного контекста.

Теоретическая значимость диссертации заключается в предлагаемой методике обеспечения требований электромагнитной совместимости (ЭМС) и помехоустойчивости (ПУ) на печатной плате (ПП), формализуя и упорядочивая последовательность действий разработчика, позволяет своевременно определять потенциальные проблемы ПУ, находить возможные источники ЭМИ, пути наводок и паразитные антенны.

Практическая значимость работы является основой для создания математического обеспечения и подсистемы автоматизированного проектирования РЭС с учетом ЭМС, ориентированной на *IBM*-совместимые компьютеры с процессором *Pentium*, функционирующие в операционной среде *Windows*. Использование в САПР простого и эффективного метода частичных эквивалентных схем элементов, математических моделей и алгоритмов позволяет разрабатывать РЭС с учетом ЭМС в распределенной вычислительной среде.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Систематизация информации по видам и материалам печатных плат, методам изготовления, технической диагностике на устойчивость к воздействию электростатического разряда с обзором механизмов повре-

ждения, а также выбором программного комплекса для моделирования электростатического разряда.

2. Компьютерная модель распределения температуры в токопроводящих элементах печатной платы в результате воздействия статического электричества по методу контактного разряда на один из выводов исследуемой системы, основанная на системе уравнений теплопроводности и электропроводности, позволяющая выявить области максимального нагрева после воздействия контактного разряда напряжением от 2 до 25 кВ.

3. Анализ результатов моделирования воздействия электростатического разряда на один из выводов исследуемых систем, сбор данных об изменении температуры в моделируемых системах и заключении о формировании областей локального нагрева в данных системах.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Результаты исследований, вошедшие в диссертацию, докладывались и обсуждались на следующих республиканских и международных конференциях и семинарах: Всероссийская научно-техническая конференция « Новые информационные технологии в научных исследованиях» (НИТ), Рязань, Россия, 12-14 Декабря 2018г. / РГРУ – Рязань, 2018г; Международная научно-практическая молодёжная конференция в рамках Международного научно-практического инновационного форума «INMAX'18», Минск, 4-5 декабря 2018 г.

Публикации

Изложенные в диссертации основные положения и выводы опубликованы в 6 печатных работах: 5 статей в сборниках материалов научных конференций, 1 статья в международных научных журналах.

Общий объем публикаций по теме диссертации составляет 25 страницы.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, трех глав с краткими выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и приложений.

В первой главе рассмотрен подхода к созданию конструкторских САПР на основе метода частичных эквивалентных схем, проектирующих радиоэлектронные средства с учетом электромагнитной совместимости, позволяющих снизить трудовые и временные затраты, а также существенно повысить качество проектируемых изделий.

Во второй главе отражены результаты исследования методик проектирования радиоэлектронных средств с учетом влияния электромагнитных излучений на их функционирование.

Третья глава посвящена моделированию и алгоритмизации проектных решений при разработке радиоэлектронных средств эквивалентных схем элементов.

В приложении представлены публикации автора и акт внедрения.

Общий объем диссертационной работы составляет 90 страницы. Из них 65 страниц основного текста, 40 иллюстраций на 10 страницах, 2 таблицы на 1 странице, библиографический список из 79 наименований на 7 страницах, список собственных публикаций соискателя из 6 наименований на 1 странице, 3 приложений на 10 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, дана ее краткая характеристика, сформулированы цель и задачи исследования, изложены основные научные положения и результаты, выносимые на защиту.

В **общей характеристике работы** показана актуальность проводимых исследований, степень разработанности проблемы, сформулированы цель и задачи диссертации, обозначена область исследований, научная (теоретическая и практическая) значимость исследований, а также апробация работы.

В **первой главе** диссертационной работы проведен сравнительный анализ и рассмотрены функциональные характеристики, модели и методы, существующих САПР, подсистем САПР, пакетов прикладных программ и отдельных программ, способных частично анализировать ЭМС радиоэлектронных средств.

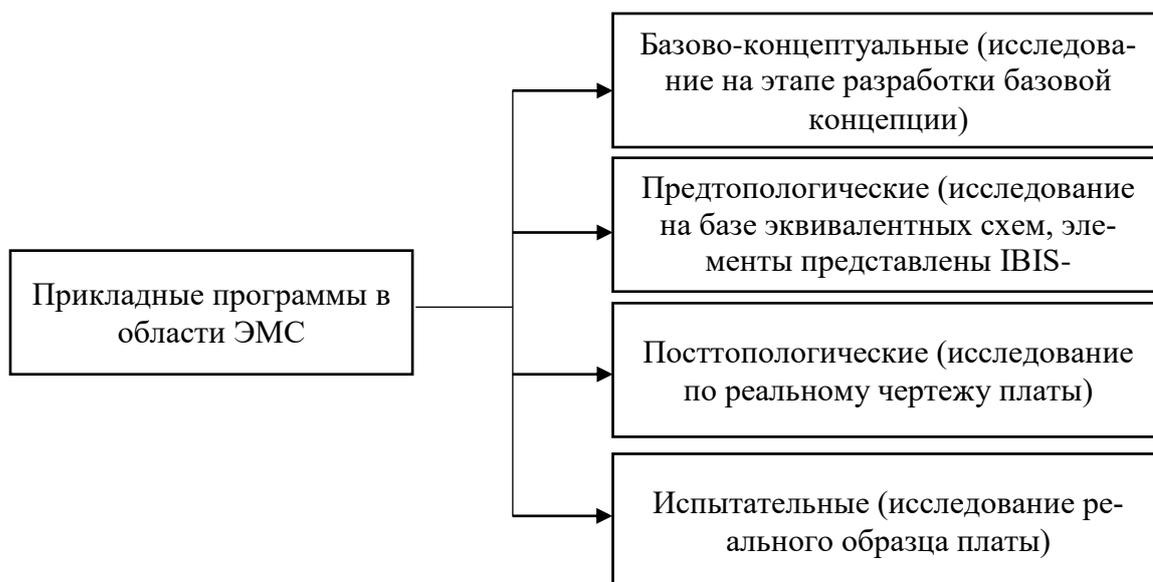


Рисунок 1 – Классификация прикладных программ в области ЭМС

Рассмотрены их возможности, особенности и недостатки. Выявлено исключительное значение учета требований ЭМС, рассмотрены способы решения проблемы ЭМС печатных плат цифровых РЭС и дана постановка за-

дачи по разработке и исследованию технологии автоматизированного проектирования печатных плат цифровых РЭС с учетом критерия ЭМС.

Рассмотрены технологии проектирования радиоэлектронных средств, направления по совершенствованию процессов автоматизации проектирования радиоэлектронных средств с учетом электромагнитной совместимости.

На основе проведенного анализа определены цель и задачи работы.

Во второй главе отражены результаты исследования методик проектирования радиоэлектронных средств с учетом влияния электромагнитных излучений на их функционирование. Проведена классификация паразитных эффектов и типовых конструктивно - технологических решений, используемых при проектировании радиоэлектронных средств. Разработана методика рационального размещения радиоэлектронных компонентов с учетом основных критериев и критерия ЭМС.

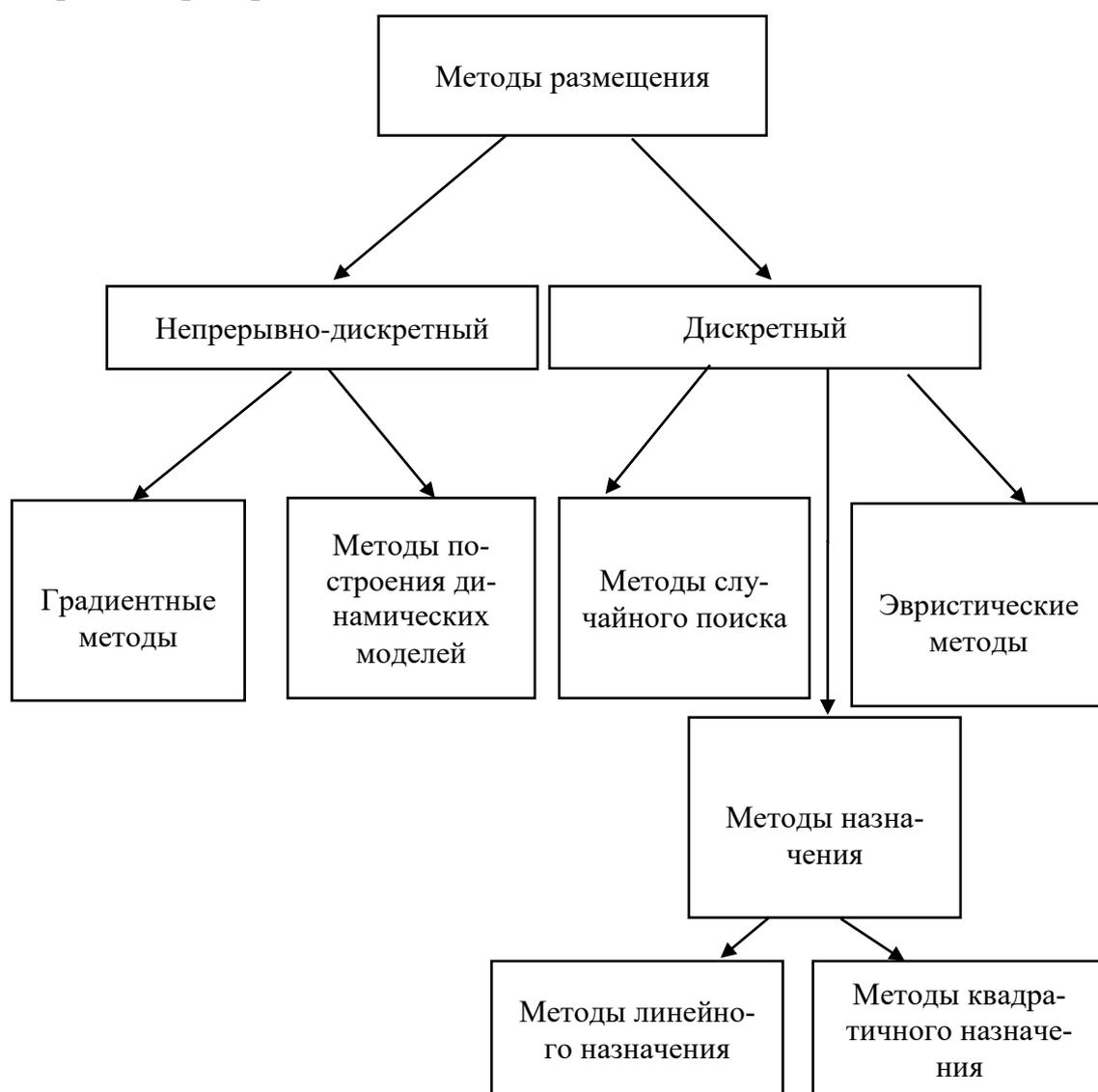


Рисунок 2 – Методы размещения радиоэлектронных компонентов

Выявлен ряд основных факторов, влияющих на ЭМС на уровне радиоэлектронных компонентов и возникающие в связи с этим задачи.

Третья глава посвящена моделированию и алгоритмизации проектных решений при разработке радиоэлектронных средств эквивалентных схем

элементов. Определена структура частичных элементов. Рассмотрены особенности дискретизации структуры в ячейках объема и площади. Рассмотрены эквивалентные паразитирующие элементы, которые моделируют электромагнитное поведение каждой ячейки площади и объема для преобразования в пассивную электрическую цепь, составленную из сопротивлений, мощностей, индуктивностей и генератора напряжений.



Рисунок 3 – Алгоритм метода частичных эквивалентных схем элементов

Проведено моделирование эквивалентной схемы на основе резистивной, индуктивной и емкостной составляющих.

Сформулирован метод *MNA* (модифицированного центрального анализа) моделей метода частичных эквивалентных схем элементов. Рассмотрен

алгоритм *PRIMA* (*PassiveReduced-orderInterconnectMacromodelingAlgorithm*) который гарантирует стабильность и пассивность схемы и сочетает уменьшенный размер в объеме с высокой точностью расчета. Представлено преобразование формулировки *MNA*, которая выражает математическую модель системы сокращенного порядка, в эквивалентные схемы. Разработана схема решения модели, основанной на соединении алгоритма *PRIMA* в методе частичных эквивалентных схем элементов для анализируемой структуры, с помощью формулировки *MNA*, в математической модели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Проведен анализ современных систем автоматизированного проектирования радиоэлектронных средств, который установил основные факторы, определяющие требования к основным функциональным характеристикам, моделям и методам.

2. Разработана методика рационального размещения радиоэлектронных компонентов с учетом основных критериев и критерия ЭМС, основанная на применении конструкторско-технологических мер, включающих в себя выбор элементной базы, рациональную компоновку элементов, экранирование отдельных элементов схем и т. д.

3. Разработан алгоритм метода частичных эквивалентных схем элементов, который особенно подходит к моделированию металлических и диэлектрические регионов законченных размеров, характеризующих структуры со сложной и нерегулярной геометрией. Кроме того, он крайне гибок, так как опирается на типовое программное обеспечение *SPICE* и таким образом хорошо применим к изучению структурных сторон разнородных систем, то есть включающих сложные компоненты, пучки кабелей, и т.д.

Рекомендации по практическому использованию результатов

Полученные результаты внедрены в учебный процесс на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» в учебный курс «Физические основы проектирования радиоэлектронных средств».

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

Статьи в сборниках научных трудов

1. Ивлиев И.А., Калиновский Д.В. Анализ программных средств, используемых для моделирования воздействия электрического разряда / Ивлиев И.А., Калиновский Д.В. // Международная научно-практическая молодёжная кон-

ференция в рамках Международного научно-практического инновационного форума «INMAX'18», Минск, 4-5 декабря 2018 г./ МГТ – Минск, 2018. – С.121-123.

2. Ивлиев И.А., Калиновский Д.В. Систематизация механизмов повреждений полупроводниковых приборов, вызванных воздействием электростатического разряда / Ивлиев И.А., Калиновский Д.В. // Международная научно-практическая молодёжная конференция в рамках Международного научно-практического инновационного форума «INMAX'18», Минск, 4-5 декабря 2018 г./ МГТ – Минск, 2018. – С.124-127.

3. Алексеев В.Ф. Моделирование беспроводной передачи энергии в электронных средствах / В.Ф. Алексеев, Д.В. Калиновский, И.А. Ивлиев // Актуальные проблемы науки XXI века : сб. науч. ст. молодых ученых / Минский инновационный ун-т. – Минск, 2018. – Вып. 7. – С. 26–32.

4. Алексеев В.Ф.: Г.А. Пискун, Д.В. Калиновский, И.А.Ивлиев Моделирование джоулева нагрева в среде Comsolmultiphysics / XI Международная научно-техническая конференция «Медэлектроника– 2018», Минск, 5-6 декабря 2018 г./ БГУИР – Минск, 2018. С.Д.– 22.

5. Ивлиев И.А., Калиновский Д.В. Учет влияния паразитных эффектов и типовых конструктивно технических решений, используемых при проектировании РЭС / Ивлиев И.А., Калиновский Д.В. // Всероссийская научно-техническая конференция « Новые информационные технологии в научных исследованиях» (НИТ), Рязань, Россия, 12-14 Декабря 2018г. / РГРУ – Рязань, 2018. –С. 294 –295

6.Ивлиев И.А., Калиновский Д.В. Модель прогнозирования эксплуатационной интенсивности отказов интегральных схем / Ивлиев И.А., Калиновский Д.В. // Всероссийская научно-техническая конференция « Новые информационные технологии в научных исследованиях» (НИТ), Рязань, Россия, 12-14 Декабря 2018г. / РГРУ – Рязань, 2018г. – С. 291– 293

РЕЗЮМЕ

Ивлиев Иван Александрович

Методы, алгоритмы проектирование радиоэлектронных средств с учетом показателей электромагнитной совместимости

Ключевые слова: электромагнитное воздействие, микросхема, печатная плата.

Цель работы: Целью работы является разработка нового подхода к созданию конструкторских САПР на основе метода частичных эквивалентных схем, проектирующих радиоэлектронные средства с учетом электромагнитной совместимости, позволяющих снизить трудовые и временные затраты, а также существенно повысить качество проектируемых изделий.

Полученные результаты и их новизна: Проведен анализ современных систем и технологий автоматизированного проектирования РЭС и направления по совершенствованию процессов автоматизации проектирования РЭС с учетом ЭМС.

Рассмотрена методика проектирования РЭС с учетом влияния электромагнитных излучений на их функционирование проведена классификация паразитных эффектов и осуществлено исследование конструктивно-технологических решений, используемых при проектировании РЭС.

Рассмотрены моделирование и алгоритмизация проектных решений при разработке РЭС с учетом ЭМС.

Степень использования: результаты внедрены в учебный процесс Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники в лекционные курсы «Физические основы проектирования радиоэлектронных средств».

Область применения: полупроводниковая промышленность, микропроцессорные системы.

РЭЗІЮМЭ

Іўліеў Іван Аляксандравіч

Метады, алгарытмы і праектаванне радыёэлектронных сродкаў з улікам паказчыкаў электрамагнітнай сумяшчальнасці

Ключавыя словы: электрамагнітнае ўздзеянне, мікрасхема, друкаваная плата.

Мэта працы: Мэтай працы з'яўляецца распрацоўка новага падыходу да стварэння канструктарскіх САПР на аснове метаду частковых эквівалентных схем, праектуе радыёэлектронныя сродкі з улікам электрамагнітнай сумяшчальнасці, якія дазваляюць знізіць працоўныя і часоўныя выдаткі, а таксама істотна павысіць якасць праектаваных вырабаў.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: Праведзены аналіз сучасных сістэм і тэхналогій аўтаматызаванага праектавання РЭС і напрамкі па ўдасканаленні працэсаў аўтаматызацыі праектавання РЭС з улікам ЭМС.

Разгледжана метадыка праектавання РЭС з улікам уплыву электрамагнітных выпраменьванняў на іх функцыянаванне праведзена класіфікацыя паразітных эфектаў і ажыццёўлена даследаванне канструктыўна-тэхналагічных рашэнняў, якія выкарыстоўваюцца пры праектаванні РЭС.

Разгледжаны мадэляванне і алгарытмізацыі праектных рашэнняў пры распрацоўцы РЭС з улікам ЭМС.

Ступень выкарыстання: вынікі ўкаранёны ў навучальны працэс Беларускага дзяржаўнага ўніверсітэта інфарматыкі і радыоэлек-троники ў лекцыйныя курсы «Фізічныя асновы праектавання радыёэлектронных сродкаў».

Вобласць ужывання: паўправадніковая прамысловасць, мікрапрацэсарныя сістэмы.

SUMMARY

Ivliev Ivan Aleksandrovich

Methods, algorithms and design of radioelectronic means, taking into account the indicators of electromagnetic compatibility

Keywords: electromagnetic effect, microcircuit, printed circuit board.

The object of study: the purpose of the work is to develop a new approach to creating design CAD systems based on the method of partial equivalent circuits that design radioelectronic facilities with regard to electromagnetic compatibility, allowing to reduce labor and time costs, and also significantly improve the quality of designed products.

The results and novelty: the analysis of modern systems and technologies of computer-aided RES, and directions for improving the processes of computer-aided design of RES, taking into account EMC.

A methodology for designing radio electronic devices is considered, taking into account the influence of electromagnetic radiation on their operation, the classification of parasitic effects is carried out and the study of structural and technological solutions used in the design of electronic networks is carried out.

Modeling and algorithmization of design solutions for the development of radio electronic devices with regard to EMC are considered.

Degree of use: the results are introduced into the educational process of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics in the lecture courses “Physical Basics of Designing Radio-Electronic Means”.

Sphere of application: semiconductor industry, microprocessor systems.