

На правах рукописи

Мылов Геннадий Васильевич

**МЕТОДЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МЕЖСОЕДИНЕНИЙ В ЭЛЕКТРОННЫХ
УСТРОЙСТВАХ АВИОНИКИ**

Специальность 05.13.12 - Системы автоматизации проектирования
(технические системы)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань 2013

A handwritten signature in black ink, consisting of a stylized, cursive script that appears to be the author's name.

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет»

Научный руководитель: **Таганов Александр Иванович**,
доктор технических наук, профессор
кафедры САПР ВС ФГБОУ ВПО
«Рязанский государственный
радиотехнический университет»

Официальные оппоненты: **Саксонов Евгений Александрович**,
доктор технических наук, профессор
Московского института электроники и
математики Высшей школы экономики
(г.Москва)

Худыш Александр Ильич,
кандидат технических наук,
директор ООО «СОЛЭКС-Р» (г.Рязань)

Ведущая организация: **ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» -
«ОКБ «Спектр» (г. Рязань)**

Защита состоится « 16 » октября 2013 г. в 12.00 на заседании диссертационного совета Д212.211.02 при ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет»

Автореферат разослан " 30 " 07 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета канд. техн. наук



Перепелкин Д.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В создании современных высоконадежных и технологичных электронных устройств отрасли авиационного приборостроения (авионики) широко применяются перспективные устройства электронной коммутации в виде постоянно обновляющейся номенклатуры высокотехнологичных гибких многослойных печатных плат (ГМП), в проектировании и производстве которых используются средства автоматизации. При этом уникальные технические и конструктивные характеристики ГМП не позволяют типовым САПР печатных плат (ПП) решать в автоматизированном режиме полный комплекс задач на этапах конструкторско-технологического проектирования и технологической подготовки автоматизированного производства этих изделий. Необходимы модернизация и адаптация возможностей существующих САПР ПП под постоянно совершенствующиеся конструкции и технологии производства ГМП на основе разработки новых моделей и методов синтеза и анализа проектных конструкторско-технологических решений в САПР и АСТПП гибких печатных плат.

Другой важной наблюдаемой особенностью, присущей современному этапу развития отрасли авиационного приборостроения, является отраслевая специализация, согласно которой создаются предприятия с интегрированной распределенной (виртуальной) структурой, специализирующиеся на конструкторско-технологическом проектировании и производстве ГМП под заказ. Это позволяет сконцентрировать усилия и средства в рамках интегрированной структуры по созданию современного автоматизированного программно-технического комплекса, обеспечивающего информационную и инструментальную поддержку всех этапов жизненного цикла ГМП с гибкой настройкой технологий на новые конструктивно-технологические решения в автоматизированном производстве МПП.

В связи с указанными обстоятельствами тема диссертационной работы является весьма важной, в ней осуществляются постановка и решение задач разработки методов автоматизированного проектирования ГМП электронных устройств авионики. При этом решаемые задачи рассматриваются как на системном уровне в направлении разработки концепции построения интегрированной информационной среды для всех участников ЖЦ ГМП на основе принципов ИПИ (CALS)-методологии (с учетом методов PDM-технологии), так и на прикладном уровне, который рассматривает задачи моделирования и исследования конструкторско-технологических процессов ГМП с целью разработки методов и инструментальных средств для построения современной интегрированной САПР ГМП.

В процессе работы по теме диссертации на автора оказали влияние труды таких российских ученых: Галецкий Ф.П., Иевлев В.И., Корячко

В.П., Курейчик В.М., Медведев А.М., Норенков И.П., Петренко А.И., Таганов А.И., Тетельбаум А.Я., Шахнов В.А., Цветков Ю.Б., и др.; а также зарубежных ученых: Эдвард Рент (Edward Rent), Пауль Валднер (Paul Waldner), Ханке Х.-И., Фабиан Х. и др.

Актуальность настоящей работы определяется важностью и сложностью проблемы повышения результативности сквозных интегрированных САПР конструкторско-технологического проектирования и технологической подготовки производства ГМП в направлении повышения качества и надежности проектируемых изделий, отвечающих самым современным требованиям автоматизированного производства и создания конкурентоспособной электронной продукции для нужд авионики.

Цель работы

Целью диссертационной работы является разработка информационных и конструкторско-технологических моделей, методов и инструментальных средств САПР, обеспечивающих информационную поддержку конструкторско-технологических процессов автоматизированного проектирования и технологической подготовки автоматизированного производства устройств электрических межсоединений для электронной аппаратуры авионики.

Основные задачи

Цель диссертационного исследования предопределила постановку и необходимость решения следующих задач:

1. Провести анализ конструктивно-технологических особенностей перспективных гибких многослойных печатных плат (ГМП) для построения электронных изделий авионики и определить возможные пути решения проблемы обеспечения информационной поддержки всех стадий жизненного цикла ГМП с использованием современных информационных технологий.

2. Разработать научно-методические основы построения современных средств САПР для синтеза и анализа проектных конструкторско-технологических решений и информационной поддержки изделий ГМП по стадиям их жизненного цикла.

3. Разработать научно-методические основы анализа конструкторско-технологических решений на этапе технологической подготовки ГМП с целью определения оптимальных параметров процессов и методик их достижения, которые необходимы для повышения качества и надежности ГМП в условиях высокотехнологичного автоматизированного производства.

4. Разработать инструментальные программные средства, реализующие разработанные модели и алгоритмы и предназначенные для автоматизации решения задач конструкторско-технологической подготовки производства ГМП в условиях автоматизированного многономенклатурного и серийного производства.

Объект исследования

Объектом диссертационного исследования является интегрированный процесс конструкторско-технологического проектирования и технологической подготовки автоматизированного производства коммутационных изделий в виде широкой номенклатуры гибких многослойных плат для электронных устройств авионики.

Предмет исследования

Предметом исследования являются модели, методы и инструментальные средства для построения специализированной интегрированной САПР, предназначенной для информационного и инструментального сопровождения всех этапов конструкторско-технологического цикла ГМП в условиях многономенклатурного автоматизированного производства.

Методы исследования

При аналитическом обзоре литературных источников использовались общепринятые методы сбора, систематизации, анализа и обобщения данных в отношении задач, связанных с информационной поддержкой процессов автоматизированного конструкторско-технологического проектирования электронных изделий авионики.

Теоретические исследования и поиск решения сформулированных в работе задач осуществлялись методами системного анализа и моделирования информационных и физико-технологических процессов с применением методов обобщения выявленных закономерностей средствами математической логики.

Апробация и проверка корректности теоретически найденных закономерностей и решений осуществлялась вычислительными экспериментами и практическими результатами исследований в условиях реальной автоматизированной проектно-производственной деятельности.

Научная новизна

В диссертационной работе предложены эффективные модели и методы решения сформулированных задач, научная новизна которых состоит в следующем:

1. Предложена современная концепция системы информационного сопровождения стадий конструкторско-технологического цикла ГМП, основанная на использовании принципов ИПИ (CALS)-методологии с учетом положений PDM-технологии, построенная на основе обоснованного применения типовых САПР конструкторско-технологического проектирования и технологической подготовки производства печатных плат и отличающаяся введением в структуру интегрированной САПР специально разработанного научно-методического и программного обеспечений для автоматизации решения задач конструкторско-технологической подготовки многономенклатурного автоматизированного производства ГМП.

2. Разработаны научно-методические основы построения современных средств для синтеза и анализа проектных конструкторско-

технологических решений в САПР и средства информационной поддержки изделий ГМП по стадиям их жизненного цикла, учитывающие конструктивные особенности и технологические сложности автоматизированного производства ГМП.

3. Разработаны научно-методические основы анализа конструкторско-технологических решений на этапе технологической подготовки ГМП, обобщающие конструкторско-технологические номенклатурные практики с целью определения оптимальных параметров технологических процессов и построения методик их достижения, которые необходимы для повышения качества и надежности ГМП в условиях высокотехнологичного автоматизированного производства.

4. Разработаны инструментальные программные средства, реализующие модели и алгоритмы и предназначенные для автоматизации решения задач конструкторско-технологической подготовки производства ГМП в условиях автоматизированного многономенклатурного и серийного производства.

Соответствие паспорту специальности

Проблематика, исследованная в диссертации, соответствует специальности – 05.13.12 «Системы автоматизации проектирования». Согласно формуле специальности 05.13.12 – это специальность, занимающаяся проблемами создания и повышения эффективности функционирования систем автоматизированного проектирования, управления качеством проектных работ на основе использования современных методов моделирования и инженерного анализа, перехода на безбумажные сетевые формы документооборота и интеграции САПР в общую архитектуру автоматизированной проектно-производственной среды. Проблематика диссертации соответствует областям исследований: п.1. Методология автоматизированного проектирования в технике, включая постановку, формализацию и типизацию проектных процедур и процессов проектирования, вопросы выбора методов и средств для применения в САПР; п.3. Разработка научных основ построения средств САПР, разработка и исследование моделей, алгоритмов и методов для синтеза и анализа проектных решений, включая конструкторские и технологические решения в САПР и АСТПП.

Теоретическая значимость

Теоретическая значимость работы заключается в разработке научных основ построения системы информационной поддержки всех стадий жизненного цикла ГМП и разработке методов синтеза и анализа проектных конструкторско-технологических решений в САПР для повышения качества и надежности ГМП в условиях автоматизированного проектирования и производства.

Практическая ценность работы

Практическая ценность работы состоит в том, что разработанные модели, методы и инструментальные средства позволяют в составе интегри-

рованных САПР ГМП повысить эффективность и результативность процессов конструкторско-технологической подготовки автоматизированного производства ГМП для электронных устройств авионики.

Достоверность

Достоверность научных положений, теоретических выводов и практических результатов диссертационной работы подтверждается:

- апробацией предложенных моделей и методов на конкретных автоматизированных конструкторско-технологических процессах ГМП;
- разработкой действующих программных средств САПР ГМП, подтвержденных свидетельствами об официальной регистрации;
- наличием актов внедрения результатов диссертационной работы.

Реализация и внедрение результатов диссертационной работы

Исследования по тематике диссертационной работы проводились в рамках фундаментальных и прикладных исследований, проводимых в ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» совместно с отраслевыми организациями Открытое Акционерное общество «Государственный рязанский приборный завод».

НИР 15-09Г «Разработка и развитие нормативной базы, информационного обеспечения и регламентов открытой информационно-образовательной среды для дистанционной подготовки, переподготовки и повышения квалификации специалистов в области ИПИ (CALS)- и CASE-технологий» (2010-2011 гг.).

Результаты, полученные в работе, внедрены на следующих предприятиях и в организациях: ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» - «ОКБ «Спектр» (г. Рязань), Открытое Акционерное общество «Государственный рязанский приборный завод» (г. Рязань), ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» (г. Рязань).

Использование результатов диссертационной работы на практике подтверждено соответствующими актами о внедрении. Получены 3 свидетельства ФГУ «Федеральный институт промышленной собственности Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам» (ФГУ ФИПИ – РОСПАТЕНТ) об официальной регистрации программ для ЭВМ.

Основные положения, выносимые на защиту

На защиту выносятся следующие результаты диссертационной работы:

1. Концепция построения системы информационного сопровождения стадий жизненного цикла ГМП, основанная на использовании принципов ИПИ (CALS)-методологии/технологии с учетом положений PDM-технологии, построенная на основе обоснованного применения типовых САПР конструкторско-технологического проектирования и технологической подготовки производства печатных плат и отличающаяся введением в структуру САПР специально разработанного научно-методического и про-

граммного обеспечений для автоматизации решения задач технологической подготовки многономенклатурного автоматизированного производства ГМП.

2. Научно-методические основы построения современных средств САПР для синтеза и анализа проектных конструкторско-технологических решений и информационной поддержки изделий ГМП по стадиям их жизненного цикла, позволяющие повысить эффективность функционирования системы автоматизированного проектирования и управления качеством проектных работ.

3. Научно-методические основы анализа конструкторско - технологических решений на этапе технологической подготовки ГМП, обобщающие частные практики с целью определения оптимальных параметров процессов и методик их достижения, которые необходимы для повышения качества и надежности ГМП в условиях высокотехнологичного автоматизированного производства.

4. Инструментальные программные средства, реализующие разработанные модели и алгоритмы и предназначенные для автоматизации решения задач технологической подготовки производства ГМП в условиях автоматизированного многономенклатурного серийного производства.

Апробация результатов работы

Результаты научных и практических изысканий автора, изложенных в диссертационной работе, докладывались и обсуждались на отраслевых, всесоюзных и международных конференциях и семинарах: Всероссийская научно-техническая конференция «Производство печатных плат и монтаж компонентов», (г. Москва, 2011), 8-ая Международная выставка и конференция «Покрытия и обработка поверхности» (г. Москва, 2011), Всероссийская научно-техническая конференция «Последние достижения в технологиях и оборудовании» (г. Москва, 2011).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 19 печатных работ, в том числе: монография; 5 статей в изданиях, входящих в перечень ВАК для кандидатских и докторских диссертаций; 9 статей в научно-технических журналах и межвузовских сборниках научных трудов; 3 доклада на международных и всероссийских конференциях; 2 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ в ФГУ «Федеральный институт промышленной собственности Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам» (ФГУ ФИПИ – РОСПАТЕНТ); 2 полезные модели.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, заключения, изложенных на 194 страницах (включая 57 рисунков и 16 таблиц). Список литературы содержит 145 наименований.

Личный вклад автора

Все результаты диссертационной работы, в том числе постановка задач, разработка и исследование защищаемых моделей и алгоритмов, основные научные результаты, выводы и рекомендации принадлежат лично автору. Программные средства, реализующие модели и алгоритмы, разработаны под руководством и при непосредственном участии автора. Работы, выполненные в соавторстве, посвящены общей постановке проблемы, концепции ее решения, предложенной автором, конкретизации разработанных методов, моделей и алгоритмов для ряда актуальных прикладных задач, разработке отдельных программных средств.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, сформулированы её цель, научная новизна, приведены сведения о практическом использовании полученных научных результатов и представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приводится анализ тенденций, методов и технологий автоматизации процессов жизненного цикла ГМП авионики. Показано, что удовлетворение всего комплекса требований к системе межсоединений высокопроизводительных электронных средств авионики связано, прежде всего, с использованием гибких многослойных печатных плат, позволяющих увеличить плотность компоновки интегральных микросхем за счет специализации слоев в трехмерной многослойной структуре, значительно сократить длины межэлементных связей, сформировать согласованные линии передачи и тем самым улучшить временные характеристики распространения сигналов в трассах межсоединений. При этом ГМП по своим тактико-техническим параметрам начинают вытеснять жесткие многослойные платы из современных конструкций электроники, эксплуатируемой в жестких условиях внешних воздействий, что характерно для изделий авиационной техники.

Широкая номенклатура электронных изделий отрасли приборостроения авионики обуславливает необходимость применения для проектирования гибких плат специализированных систем автоматизированного конструкторско-технологического проектирования. Показано, что по причине широкого спектра конструктивно-технологических особенностей гибких плат и повышенных требований к процессам конструкторской и технологической подготовки их производства требуется проведение исследований по доработке и адаптации методов проектирования в составе существующих САПР печатных плат под требования технологий проектирования гибких многослойных печатных плат.

Отмечены и рассмотрены основные проблемы внедрения автоматизированных технологий проектирования ГМП, к которым относится отсутствие необходимых методов проектирования, построения и функциониро-

вания интегрированных комплексов анализа и синтеза проектных решений для этапа конструкторско-технологической подготовки производства. При этом к важным направлениям создания и повышения эффективности функционирования систем автоматизированного конструкторско-технологического проектирования ГМП, управления качеством проектных работ на основе использования современных методов моделирования и инженерного анализа и перехода на безбумажные технологии отнесены следующие:

- разработка методов и алгоритмов для расчета устойчивости конструкций линий связи гибких плат к помехам;
- разработка методов и алгоритмов анализа и расчета надежности к отказам межсоединений гибких плат на этапе конструкторско-технологической подготовки производства;
- разработка методов и алгоритмов анализа и расчета физической надежности электроизоляционных конструкций электронных узлов;
- разработка методов автоматизированного диагностического контроля качества электрических межсоединений в устройствах авионики;
- разработка специального программного обеспечения для построения интегрированных САПР конструкторско-технологического проектирования гибких печатных плат в условиях многономенклатурного проектирования и производства.

На основе результатов системного анализа проблем информационной технологии и интегральной автоматизации конструкторско-технологических процессов проектирования и производства ГМП показаны актуальность, необходимость и важность проведения исследований по разработке современной концепции создания инфраструктуры интегрированного информационного сопровождения жизненного цикла ГМП электронных устройств авионики на основе принципов (ИПИ) CALS-технологий.

Вторая глава посвящена разработке современной концепции создания инфраструктуры интегрированного информационного сопровождения жизненного цикла ГМП на основе принципов (ИПИ) CALS- технологий с учетом возможностей PDM-технологий. Рассмотрены современные концепции применения принципов и средств ИПИ (CALS)-технологий для решения актуальной задачи информационного сопровождения всех стадий ЖЦ высокотехнологичных электронных изделий авионики, построенных на основе гибких печатных плат, и предложены решения по созданию единого информационного пространства для всех участников автоматизированных процессов ГМП, построенного на основе использования в составе интегрированной САПР ГМП современных PDM-технологий.

Для построения современной структуры интегрированной САПР ГМП проведен анализ характеристик современных САПР конструкторско-технологического проектирования (CAD) и САПР технологической подго-

товки производства (САМ) и показано, что автономные продукты рынка САПР на сегодняшний день не покрывают в полном объеме весь комплекс задач, которые приходится решать специалистам на этапе конструкторско-го проектирования и технологической подготовки производства ГМП. Для проектирования сложных изделий - ГМП необходима сквозная интегрированная САПР, которая содержит альтернативные алгоритмы реализации отдельных проектных процедур и позволяет гибкую настройку в условиях широкой номенклатуры ГМП на требования выбранной технологии реализации проекта ГМП. При этом под термином «Интегрированная САПР ГМП» подразумевается программный комплекс, который выполняет в совокупности функции CAD/CAM/CAE/PDM систем для задач автоматизированного проектирования, информационного сопровождения и технологической подготовки автоматизированного производства ГМП на предприятии с распределенной интегрированной структурой.

С учетом рассмотренных принципов ИПИ-технологий и предложенной концепции построения инфраструктуры интегрированного информационного сопровождения жизненного цикла ГМП разработан проект построения современной структуры интегрированной САПР ГМП (рисунок 1), который включает в себя выбранный перечень промышленных CAD/CAM-систем, в наибольшей степени отвечающих современным требованиям технологии проектирования и производства ГМП, а также содержит специальный программный комплекс (СПК), учитывающий на этапе автоматизированной конструкторско-технологической подготовки производства изделий ГМП их уникальную специфику.

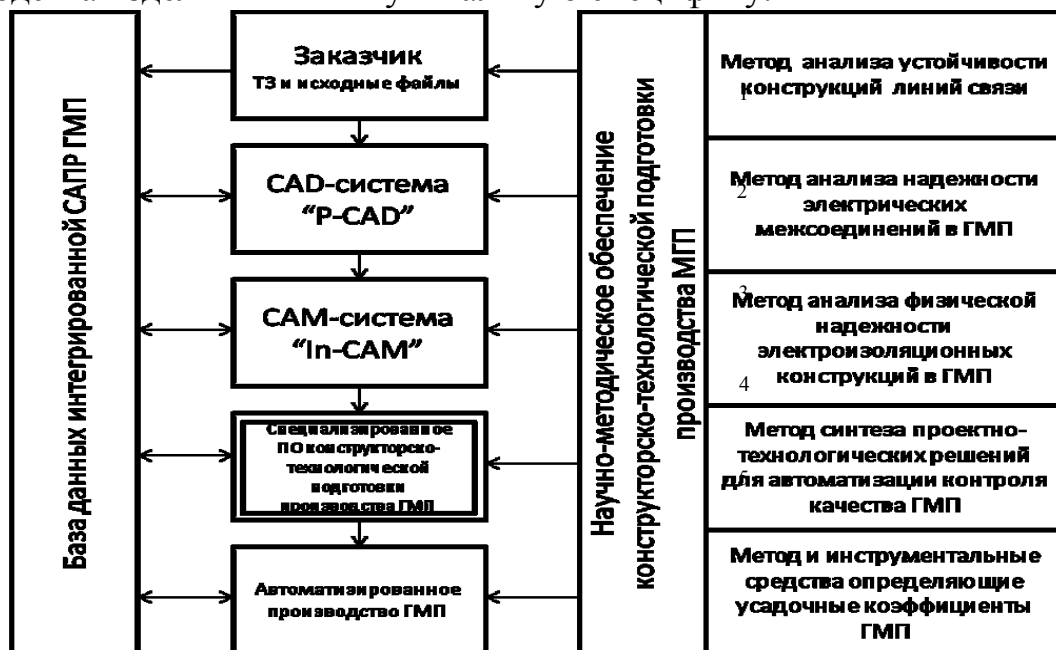


Рисунок 1 - Структура интегрированной САПР ГМП

Для построения СПК интегрированной САПР ГМП показаны необходимость исследования и разработки в последующих главах диссертации моделей конструкторско-технологических процессов ГМП и на основе моделирования и обобщения частных практик необходимость разработки и исследования соответствующих методов и алгоритмов.

Третья глава посвящена научно-методическим основам анализа конструкторско-технологических решений, реализуемых в программных средствах интегрированной САПР гибких многослойных плат. Здесь представлены результаты исследований и разработки моделей, методов и методик инженерного анализа и конструкторско-технологических расчетов для этапа технологического проектирования ГМП. В число предложенных и исследованных вошли следующие методы:

1) метод анализа помехоустойчивости конструкций линий связи в ГМП, основанный на процедурах анализа геометрических характеристик линий связи, на аналитическом расчете величины и дисперсии волнового сопротивления, на расчете дисперсии геометрических параметров линий связи в конструкциях ГМП;

2) метод анализа надежности электрических межсоединений в ГМП, включающий линейные модели термомеханических напряжений соединений, нелинейные модели анализа характеристик прочности электропроводящих элементов, нелинейную модель термомеханических напряжений, методику экспериментального исследования напряженного состояния элементов топологии, методику анализа пластичности металлизации, процедуру анализа устойчивости трансверсальных соединений к термоциклам;

3) метод анализа физической надежности электроизоляционных конструкций в ГМП, который основывается на разработанных и исследованных моделях: модели электропроводности композиционных диэлектриков; модели сопротивления диэлектриков; модели влияния параметра увлажнения монтажных подложек; модели сопротивления электрической изоляции печатных многослойных плат.

В методе анализа помехоустойчивости ГМП основным параметром является волновое сопротивление линий передачи, значение которого влияет на согласование линий и на уровень перекрестных помех в них. В работе выявлены и решены конструкторско-технологические проблемы проектирования и воспроизводимости заданных значений волнового сопротивления линий передач с учетом реальных погрешностей производства. Для этого проведены широкие статистические исследования ряда факторов, сказывающихся на характеристиках линий передач.

Задача согласования линий связи решается на этапе конструкторско-технологической подготовки производства и основывается на конструктивно-технологическом обеспечении воспроизведения заданного значения их волнового сопротивления, т.е. учетом всех дестабилизирующих факторов, свойственных производству ГМП. На основе использования

предложенной методики по результатам анализа влияния основных факторов формируется заключение о приемлемости дисперсий волнового сопротивления печатных проводников, реализуемых в готовых ГМП, или принимается решение о необходимости дополнительного контроля всех или отдельных конструктивных параметров ГМП, оказывающих наибольшее влияние на разброс волнового сопротивления, если отклонения больше приемлемых значений.

Результаты исследований технологических процессов формирования токопроводящего рисунка и диэлектрической среды позволили установить статистические характеристики точности воспроизведения геометрии печатных проводников внутренних слоев ГМП, на которые можно ориентироваться для реализации в серийном автоматизированном производстве. Полученные результаты аналитических и статистических исследований свидетельствуют о реальной возможности получения требуемой стабильности характеристик элементов конструкций электрических соединений в ГМП и тем самым обеспечивают гарантированную надежность функционирования линий связи в системе межсоединений высокопроизводительных электронных устройств авионики.

В методе анализа надежности электрических межсоединений в ГМП учитываются факторы воздействия термических нагрузок на элементы конструкции ГМП в процессе изготовления, монтажа и циклических изменений температур при эксплуатации аппаратуры в составе авиационных комплексов. Различия в температурных коэффициентах линейного расширения (КЛР) металлических элементов структур и диэлектрического основания плат вызывают в элементах электрических соединений термомеханические напряжения различной интенсивности. В продольных направлениях, армированных стеклотканью, различия в КЛР незначительны и они не сказываются на прочности соединений продольной структуры, если выполнены условия проектирования. При этом создание физической модели разрушения трансверсальных соединений потребовало проведения дополнительных изысканий, обобщений и усовершенствования методов анализа напряженного состояния элементов межсоединений с целью повышения достоверности их оценки. На базе проведенных исследований установлены новые закономерности отказов межслойных соединений ГМП, предложены меры по их предотвращению, получены данные для прочностных расчетов элементов конструкции ГМП и конкретизирована методика оценочных испытаний. Обоснованы и проведены изменения в отраслевом стандарте ОСТ 107.460092.028 на ужесточение требований к пластичности медных покрытий отверстий печатных плат, что предотвращает их разрушение в экстремальных условиях эксплуатации.

Для экспериментальных исследований деформации металлизации отверстий предложена оригинальная методика, по которой металлизация гибкой платы используется в качестве тензодатчика. За счет этого преодо-

лены трудности автоматизации процесса испытаний надежности, связанные с малостью объекта исследований: диаметр отверстия – меньше 1 мм, толщина диэлектрического композиционного основания – порядка 1,5 мм.

Сопоставление температурных зависимостей деформаций металлизации отверстий с результатами исследований изменения пластичности тонких медных пленок стандартной толщины демонстрирует температурные ограничения для нагрева ГМП, чтобы предотвратить возможности отказов межсоединений из-за нарушения температурных режимов пайки элементов на плате. Обнаружены пороговые значения температур разрушения межсоединений, которые учитываются при проектировании элементов ГМП.

В методе анализа физической надежности электроизоляционных конструкций в ГМП используется несколько предложенных моделей анализа и синтеза конструкторско-технологических решений. Установлено, что низкий уровень рабочих напряжений в современной электронной аппаратуре в корне изменил механизмы отказов изоляции и потребовал разработки соответствующих методов обеспечения надежности. Установлено, что для современной слаботочной электронной аппаратуры характерны именно электрохимические процессы отказов. При этом предложенная в работе электрохимическая модель отказов изоляции слаботочной аппаратуры оправдала себя в технологическом проектировании элементов конструкции ГМП и получила дальнейшее развитие в подробных исследованиях тонких процессов деградации изоляции электронной аппаратуры, построенной на высоко интегрированной элементной базе. Проектно-производственные мероприятия, выполняемые в соответствии с предложенными методами предотвращения отказов изоляции, существенно снизили долю потока отказов ГМП, приходящуюся на изоляцию.

Созданная модель отказов позволила также разработать и реализовать на практике критерии контроля и испытаний изоляции монтажных изделий на печатных платах. Проведенные исследования выявили большую значимость утечек вдоль волокон стеклоткани между металлизированными стенками сквозных отверстий и внутренними поверхностями перфораций экранов (слоев питания), что потребовало учета этого фактора на этапе конструкторско-технологического проектирования ГМП. Отсутствие нормы на оценку токов утечки вдоль композиционных материалов послужило основанием для проведения специальных исследований и разработки соответствующих методов, в результате которых были установлены удельные значения и методика расчета внутреннего сопротивления материалов многослойной печатной платы (МПП).

Установлено также, что одной из распространенных причин возникновения дефектов и отказов ГМП является повышенное влагосодержание на этапах автоматизированного производства. Концентрация влаги в диэлектрическом основании печатных плат может быть такой значи-

тельной, что в условиях ее интенсивного испарения при пайке волной припоя могут возникать большие поверхностные или объемные взрывные расслоения, многочисленные дефекты паяных соединений. Для прогнозирования этого явления получены соответствующие уравнения, позволяющие определить распределения концентрации влаги по толщине платы во время технологического процесса.

Характерной причиной отказов изоляции слаботочной аппаратуры являются также процессы прорастания изоляционных зазоров металлическими мостиками электрохимического происхождения. Предложен метод имитации условий отказа изоляции, с помощью которого можно сказать условия развития отказа. Специально проведенные исследования позволили создать классификацию металлов по способности к образованию мостиков электрохимического происхождения. Эти результаты экспериментальных исследований позволили определить эмпирическую зависимость кинетики роста токопроводящих мостиков от времени и прогнозировать связанные с этим характеристики надежности ГМП на этапе технологического проектирования ГМП.

В четвертой главе приведены результаты исследований по разработке научно-методических основ синтеза проектных решений для автоматизации конструкторско-технологической подготовки производства ГМП. В перечень вопросов вошли задачи синтеза проектно-технологических решений для автоматизации диагностического контроля качества ГМП. Рассмотрены особенности процесса диагностического контроля, критерии и глубина контроля межсоединений, критерии автоматического контроля и диагностики качества изоляции. В число важных вопросов вошли также результаты исследования и применения современных принципов диагностического контроля межсоединений в многослойных печатных платах. Они обусловлены повышенной плотностью элементов межсоединений, увеличением их абсолютного количества и уменьшением размеров, что усложняет задачу обеспечения надежности, требует дальнейшего совершенствования методов контроля на базе использования высокопроизводительных автоматизированных средств. Необходимость такого контроля диктуется и ростом числа неизбежных дефектов по мере увеличения плотности компоновки и уровня интеграции ИС, БИС. Использование диагностического принципа контроля позволяет прогнозировать стойкость межсоединений к экстремальным воздействиям или к условиям длительной эксплуатации, сопровождающейся во времени глубокими процессами старения материалов, протекающими наиболее быстро по местам неоднородностей и дефектов.

Физическую основу диагностических методов контроля составляют исследования физических характеристик объекта и обнаружение несовершенства его структуры. При этом показано, что среди исследованных методов неразрушающего контроля наиболее эффективным является метод

теплового возбуждения цепей межсоединений электрическим током. Условием неразрушающего контроля соединений является ограничение температуры нагрева до значений, не вызывающих необратимых процессов разрушения композиции проводник - диэлектрик. Разработанная на этих принципах технология автоматизированного неразрушающего диагностического контроля соединений позволяет выявлять без разрушений дефектные элементы соединений, за счет чего увеличиваются достоверность контроля и надежность межсоединений.

Для решения задач диагностического контроля разработана математическая модель кинетики нагрева проводников проходящим током и на ее основе предложен оригинальный метод неразрушающего автоматизированного контроля качества токопроводящих элементов ГМП. Предложены также критерии для диагностического контроля изоляции и предложена математическая модель кинетики процесса контроля качества изоляции в конструкциях ГМП.

Предложена методика вычисления усадочных коэффициентов диэлектрических материалов конструкции ГМП, которая на этапе технологического проектирования, с использованием разработанной подсистемы САПР позволяет скорректировать топологию слоев ГМП и повысить качество изделий ГМП.

В заключении сформулированы основные научные результаты, полученные в рамках решения поставленной научно-технической проблемы, связанной с развитием и совершенствованием современных автоматизированных технологий информационной поддержки всех стадий жизненного цикла ГМП и разработкой методов автоматизированного проектирования электрических межсоединений в электронных устройствах авионики.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ОТРАЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ

Издания, рекомендованные ВАК РФ

1. Медведев А.М., **Мылов Г.В.** Концепции обеспечения надежности входного контроля материалов и комплектующих, поступающих в производство // Надежность. – 2013. - № 1. – С. 28-36.
2. Медведев А.М., **Мылов Г.В.**, Кечиев Л.Н. Проблемы технологического обеспечения параметров линий передач в МПП // Технологии ЭМС. – 2012. - № 3. – С. 73-78.
3. Медведев А.М., **Мылов Г.В.** Пластичность медного покрытия в отверстиях печатных плат. Результаты последних исследований // Гальванотехника и обработка поверхностей. – 2012. - № 3. – С. 60-65.
4. Медведев А.М., **Мылов Г.В.** Эволюция технологии электрических межсоединений в электронном приборостроении // Издательство

«Машиностроение». Сборки машиностроения, приборостроения.- 2013. – № 2, С.35-40.

5. Бурмакин А.А., **Мылов Г.В.**, Кузнецов С.Б. Проектирование и производство печатных плат – проблемы и решения// САПР и Графика.- Март, 2000.С.44 – 51.

Патентное ведомство РФ. Государственный реестр полезных моделей

6. Мылов Г.В., Волковский К.С., Глушков Н.К. и др. Полезная модель. Устройство контроля соединений многослойных печатных плат. Регистрационный №12470 от 10.01.2000г. Присвоено патентное ведомство РФ, Федеральный институт промышленной собственности, Москва. Государственный реестр полезных моделей.

7. Мылов Г.В., Кабанов В.Д., Грибков М.А. и др. Полезная модель. Преобразование напряжений планарный. Регистрационный №91499 от 10.02.2010г. Присвоено патентное ведомство РФ, Федеральный институт промышленной собственности, Москва. Составная часть Роспатента.

Монография

8. Под общ. ред. А.М. Медведева и **Г.В. Мылова**. Технологии в производстве электроники. Гибкие печатные платы / – М.: Группа ИДТ, 2008. – 488 с.

Статьи в изданиях, зарегистрированных в Роскомнадзоре.

9. Медведев А.М., **Мылов Г.В.** Тенденции развития технологий элементов межсоединений // ЭЛЕКТРОНИКА. Наука. Технология. Бизнес. – 2012. - № 5. – С. 102- 106.

10. Медведев А.М., Можаров В.В., **Мылов Г.В.** Печатные платы. Современное состояние базовых материалов. //ЭЛЕКТРОНИКА. Наука. Технология. Бизнес, 2011.- № 5.- С. 98-104.

11. **Мылов Г.В.**, Люлина В.И. и др. Заключение (отчет) о проведении работ по изготовлению печатных плат из отечественных диэлектриков.// Государственный Рязанский приборный завод. Инв. № 32/181-07, г. Рязань, 2007.

12. Медведев А.М., **Мылов Г.В.**, Набатов Ю.А., Люлина В.И. Гибкие платы. Преимущества и применение.//Компоненты и технологии. – 2007. - № 9. – С. 202 – 208.

13. Грибков М., Медведев А.М., **Мылов Г.В.**, Сержантов А. Рентгеноспектральный флуоресцентный анализ в производстве электроники //ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕКТРОНИКИ. Технология, оборудование, материалы. - 2007. - № 8 – С. 31- 35.

14. Медведев А.М., **Мылов Г.В.** Развитие технологий элементов электрических межсоединений в электронных системах // ЭЛЕКТРОНИКА. Наука. Технология. Бизнес. – 2012. - № 1. – С. 196 – 207.

15. Тематический выпуск: ПЕЧАТНЫЕ ПЛАТЫ И ПОКРЫТИЯ. **Мылов Г.В.** и др. Базовые материалы // Информационный бюллетень, -

№ 3. - Июнь 2012. - Корпоративное издание ЗАО «Предприятие Остек». – 2012.- 72 с.

16. Люлина В.И., Медведев А.М., Мылов Г.В. Производство гибких и гибко-жестких плат. Часть 6. Специальные средства контроля и испытаний печатных плат. // Технологии в электронной промышленности, 2009. - № 1. С. 11-21.

17. Описание работы на соискание национальной премии РФ «Золотая идея» за достижение в области продукции военного назначения за 2008 год «РАЗРАБОТКА ИНТЕГРИРОВАННОГО КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ ДЛЯ АВИОНИКИ И ДРУГОЙ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕХНИКИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ». Федеральное государственное унитарное предприятие «Государственный Рязанский приборный Звод». – Авторский коллектив, возглавляемый Мыловым Г.В. – начальник ПТК «Печатные платы» ФГУП ГРПЗ, – 2007. Рязань. – 77 с.

Регистрация программ для ЭВМ в ФГУП (ФИПИ - Роспатент)

18. **Мылов Г.В.** Программа модификации управляющих файлов для сверловочного и фрезеровочного станков при конструкторско-технологической подготовке производства печатных плат на базе САПР «InCAM FRONTLINE» №2013615159.

19. **Мылов Г.В.** Программа модификации диаметров отверстий в диаметр сверел при конструкторско-технологической подготовке производства печатных плат на базе САПР «InCAM FRONTLINE» №2013615158.

Мылов Геннадий Васильевич

МЕТОДЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МЕЖСОЕДИНЕНИЙ В ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВАХ АВИОНИКИ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 15.07.13. Формат бумаги 60x84 1/16.

Бумага газетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.

Тираж 100 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.