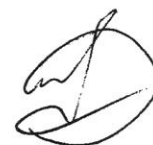


На правах рукописи



МЫЛОВ Геннадий Васильевич

**МОДЕЛИ, МЕТОДЫ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ
СРЕДСТВА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ТРЕХМЕРНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МЕЖСОЕДИНЕНИЙ
В СИСТЕМАХ АВИОНИКИ**

Специальность:

05.13.12 – Системы автоматизации проектирования
(технические системы)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Рязань - 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном
учреждении высшего образования
«Рязанский государственный радиотехнический университет»

Научный консультант:

Корячко Вячеслав Петрович

Заслуженный деятель науки и техники РФ,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Систем автоматизированного
проектирования вычислительных средств» ФГБОУ ВО
«Рязанский государственный радиотехнический
университет» (РГРТУ), г. Рязань

Официальные оппоненты:

Иванников Александр Дмитриевич

Доктор технических наук, профессор, заместитель
директора по научной работе Института проблем
проектирования в микроэлектронике РАН, г. Москва

Курейчик Виктор Михайлович

Заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Дискретная математика и
методы оптимизации» ФГАОУ ВО
«Южный Федеральный университет»
Институт компьютерных технологий и информационной
безопасности, г. Таганрог

Юрков Николай Кондратьевич

Заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук,
профессор, заведующий кафедрой «Конструирование и
производство радиоаппаратуры» ФГБОУ ВО «Пензенский
государственный университет», г. Пенза

Ведущая организация:

АО «РКЦ «Прогресс», г. Самара

Защита состоится «27» апреля 2017 г. в 12.00 на заседании диссертационного
совета Д 212.211.02 при ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический
университет» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Рязанский
государственный радиотехнический университет» и на сайте www.rsreu.ru.

Автореферат разослан _____ 2017 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

кандидат технических наук, доцент



Д.А. Перепелкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы и ее значимость. Электроника и, в частности, авионика – наиболее быстро развивающаяся область науки и техники, одно поколение технологий сменяет другое каждые три-пять лет. Можно сказать, что основная тенденция развития технологий производства авионики – увеличение плотности межсоединений вслед за увеличением интеграции и миниатюризации электронных компонентов. Технической базой реализации этих тенденций являются высокоинтегрированные монтажные основания для электронных компонентов, какими являются прецизионные печатные платы.

Актуальность проведенных исследований связана также с решением проблем постоянного роста плотности межсоединений по мере увеличения степени интеграции элементной базы в сочетании с необходимостью обеспечения их надежности в экстремальных условиях эксплуатации авионики. Решение этой проблемы потребовало создания научно обоснованных критериев оптимизации проектных решений, состоящих в разрешении противоречий между уменьшением размеров элементов межсоединений и потребностями в увеличении их надежности.

При этом уникальные технические и конструктивные характеристики ГЖПП 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. Необходима модернизация и адаптация возможностей существующих САПР ПП под постоянно совершенствующиеся конструкции и технологии производства ГЖПП на основе разработки новых моделей и методов синтеза и анализа проектных конструкторско-технологических решений в САПР и АСТПП гибких печатных плат.

Базовые конструкции авионики содержат многочисленные узлы и блоки, размещенные в трехмерном пространстве. Для их соединения в систему служат гибкие межсоединения. Количество проводников в гибких связях достигает до десятки тысяч. До недавнего времени их осуществляли проводным монтажом. Шаг присоединения проводов составлял 2,5 мм, что создавало затруднения для их пайки на периферии контура плат. Кроме того, при адресации присоединения проводов возникали многочисленные ошибки, исправление которых создавало дополнительную трудоемкость монтажа проводами. В результате, при наладке аппаратуры возвраты на исправление ошибок доходили до 5 – 6. Кроме предпосылок к потере надежности в этом процессе возникали временные издержки, что в ритмичном производстве создавало соответствующие сбои в производственном процессе.

Для устранения этих недостатков впервые в отечественной практике производства авионики в АО «Государственный Рязанский приборный завод» (АО «ГРПЗ») были спроектированы и освоены в производстве гибкие соединения на основе гибко-жестких печатных плат, встроенных в жесткие основания плат узлов и блоков базовых конструкций авионики. Использование гибко-жестких

печатных плат позволило увеличить надежность трехмерных межсоединений, уменьшить трудоемкость производства и осуществить производство жестких подложек и гибких межсоединений за один цикл.

Производство печатных плат – сложный многооперационный процесс, содержащий многообразные операции фотолитографии, химического травления, химической и электрохимической металлизации, механического и лазерного сверления и фрезерования, прессования полимерных композиционных материалов, совмещения элементов многослойных структур, электрического и оптического тестирования, современные методы физического и химического анализа. Технологический процесс содержит свыше 200 основных технологических операций. Управление таким сложным технологическим комплексом состоялось за счет привлечения научных и инженерных разработок.

Создание трехмерных печатных межсоединений потребовало разработки теоретических основ проектирования производства гибко-жестких печатных плат, позволивших осознанно подойти к комплектованию производства оборудованием и материалами, необходимым и достаточным для функционирования производственного комплекса на высоком техническом уровне. Впервые разработаны теоретические основы конструктивно-технологического обеспечения надежности межсоединений авионики, практическое применение которых значительно увеличило наработку на отказ авиационной электронной аппаратуры управления с 50 часов до десятки тысяч. Разработаны научные основы и используются на практике критерии функционального, параметрического и диагностического тестирования, позволяющие объективно оценить состояние качества печатных плат и узлов на их основе.

Высокий уровень состояния производства, выходящий за рамки отечественной стандартизации, обусловил разработку собственной нормативной базы проектирования гибко-жестких печатных плат с частичным использованием стандартов Международной Электротехнической Комиссии (ТК91) и стандартов IPC (США).

Выполненная работа определила возможность впервые в России разрабатывать и серийно изготавливать принципиально новое поколение элементов авионики: гибко-жестких печатных плат, обладающих таким комплексом характеристик, которые позволили использовать их не только в авиационной технике, но и в атомной энергетике, медицинской технике и других отраслях народного хозяйства.

В целом организация интегрированного конструкторско-технологического комплекса серийного производства печатных плат для авионики и другой специальной техники нового поколения решает важные государственные задачи технологического обеспечения разработок военно-технического назначения радиоэлектронного комплекса. Реализация этой разработки обеспечила лидирующие позиции АО «ГРПЗ» в России и за рубежом, позволило создать современное с забегом на будущее рентабельное саморазвивающееся высокотехнологическое производство, обеспечивающее конкурентоспособность отечественных разработок на международном рынке вооружений.

В ряду проблем увеличения плотности межсоединений становится особенно актуальной задача поддержания надежности соединений, так как множество и миниатюрность элементов межсоединений ставят в зависимость от их надежности безотказность и эффективность эксплуатации электронных средств авионики.

Современное состояние исследований в данной области. Начало таких исследований положили Файзулаев Б.Н., Брехов О.М., Шахнов В.А., Цветков Ю.Б., Иевлев В.И., Кечиев Л.Н., Курейчик В.М., Бершадский А.М., Медведев А.М., Микитин В.М., Руфицкий М.В., Галецкий Ф.П., Юрков Н.К., Иванников А.Д., Корячко В.П. и ряд зарубежных ученых. За прошедшее с тех пор время сменилось несколько поколений элементной базы, технологий межсоединений, изменились принципы обеспечения надежности, в общем и целом, изменился предмет исследований а, следовательно, новое время потребовало новых исследований.

Кроме того, в ряду этих исследований полностью отсутствовали постулаты для проектирования трехмерных межсоединений, которые сегодня реализуются за счет использования гибко-жестких печатных плат.

Материалы диссертационной работы основываются на результатах исследований автора, проведенных им на АО «ГРПЗ» в процессе создания «Интегрированного конструкторско-технологического комплекса серийного производства печатных плат для авионики и другой специальной техники нового поколения», удостоены Национальной премии «Золотая идея» Российской Федерации 2008 года в области науки и техники I степени.

Цель диссертационной 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 гибко-жестких печатных плат (ГЖПП), технических средств авионики, ракетостроения и атомной энергетике, построенной на высоко интегрированной элементной базе.

Основные задачи. Достижение поставленной цели предопределило постановку и необходимость решения следующих задач:

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

2. Провести анализ конструктивно-технологических особенностей перспективных гибко-жестких печатных плат для построения электронных изделий авионики, других изделий техники специального назначения и определить возможные пути решения проблемы обеспечения информационной поддержки всех стадий жизненного цикла ГЖПП с использованием современных информационных технологий.

3. Разработать научно-методические основы анализа конструкторско-технологических решений на этапе технологической подготовки ГЖПП с целью

определения оптимальных параметров процессов и методик их достижения, которые необходимы для повышения качества и надежности ГЖПП в условиях высокотехнологичного автоматизированного производства. Разработать методы и технологии обработки соединений высокой плотности размещения и гальванического наращивания глухих отверстий.

4. Разработать методику принятия решений при возникновении противоречий технологического характера для обеспечения надежности аппаратуры.

5. Разработать и внедрить программные средства, реализующие разработанные модели и алгоритмы, предназначенные для создания аппаратно-программного комплекса производства ГЖПП в условиях автоматизированного многономенклатурного и серийного производства.

Объект исследований. Объектом диссертационного исследования является интегрированный процесс конструкторско-технологического проектирования и технологической подготовки автоматизированного производства ГЖПП применительно к экстремальным условиям эксплуатации авионики и ракетных комплексах.

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

Научная новизна. Научная новизна работы состоит в решении ряда научных задач проектирования трехмерных межсоединений с высокой плотностью компоновки в сочетании с решением проблем поддержания их надежности при увеличивающемся уровне миниатюризации и множества составляющих их элементов.

Раскрытие механизмов типичных отказов межсоединений и методов их предотвращения на этапах проектирования и контроля в процессе производства явилось научно-методологической основой работ автора.

В диссертации разработаны новые, развиты имеющиеся и интегрированы в единой концепции научные положения проектирования элементов электрических межсоединений электронного оборудования авионики:

1. Предложена современная концепция системы информационного сопровождения стадий конструкторско-технологического цикла ГЖПП, 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 обеспечения для автоматизации решения задач конструкторско-технологической подготовки многономенклатурного автоматизированного производства ГЖПП.

2. Разработаны научно-методические основы построения современных средств для синтеза и анализа проектных конструкторско-технологических решений в САПР и средства информационной поддержки изделий ГЖПП по стадиям их жизненного цикла, учитывающие конструктивные особенности и технологические сложности автоматизированного производства ГЖПП.

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

4. Разработан и внедрен в производство метод послойного наращивания печатных плат с заравниванием глухих отверстий.

5. Созданы инструментальные программные средства, реализующие модели и алгоритмы и предназначенные для автоматизации решения задач проектирования конструкторско-технологической подготовки производства ГЖПП в условиях автоматизированного многономенклатурного и серийного производства.

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

Практическая ценность работы состоит в том, что разработанные модели, методы и инструментальные средства позволяют в составе интегрированных САПР повысить эффективность и результативность процессов конструкторско-технологической подготовки автоматизированного производства ГЖПП технических средств авионики для систем БРЛС (бортовых радиолокационных систем).

Предложенные в работах автора концепции обеспечения надежности элементов межсоединений послужили основой для разработки критериев качества и обеспечения надежности печатного монтажа, диагностического контроля и испытаний элементов межсоединений в составе электронного оборудования авионики.

Методология и 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 и другой спец. техники.

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.

Апробация и проверка корректности теоретически найденных закономерностей и решений осуществлялась вычислительными, экспериментами и практическими результатами исследований в условиях реальной автоматизированной проектно-производственной деятельности с целью, разработки моделей физической надежности элементов конструкций межсоединений и исследование их адекватности к экстремальным условиям эксплуатации авионики.

Основные положения, выносимые на защиту. На защиту выносятся следующие результаты диссертационной работы:

1. Концепция построения системы информационного сопровождения стадий жизненного цикла ГЖПП, 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 программного обеспечений для автоматизации решения задач технологической подготовки многономенклатурного автоматизированного производства ГЖПП.

2. Научно-методические основы построения современных средств САПР для синтеза и анализа проектных конструкторско-технологических решений и информационной поддержки изделий ГЖПП 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 ГЖПП, обобщающие частные практики с целью определения оптимальных параметров процессов и методик их достижения, которые необходимы для повышения качества и надежности ГЖПП в условиях высокотехнологичного автоматизированного производства.

4. Технологические решения САПР печатных плат с целью повышения плотности межсоединений гибко-жестких печатных плат.

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

Научная обоснованность разработанных положений подтверждена практикой проектирования, серийного производства и эксплуатации технических средств авионики в системах БРЛС (бортовых радиолокационных систем).

Степень достоверности. Достоверность научных положений, теоретических выводов и практических рекомендаций, изложенных в диссертационной работе, подтверждена:

- экспериментальными данными, практикой проектирования, испытаний и серийного производства электронных средств авионики, разработанных в АО «ГРПЗ» с привлечением результатов исследований и научных положений, разработанных автором;

- разработкой действующих программных средств САПР ГЖПП, подтвержденных свидетельствами об официальной регистрации;

- патентами на изобретения и полезные модели;

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 АО «Государственный Рязанский приборный завод».

Результаты, полученные в работе, внедрены на следующих предприятиях и в организациях: ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» (г.Рязань); ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ) (г.Москва); АО «Государственный Рязанский приборный завод» (г.Рязань); АО «Научно-производственная корпорация «КБМ» (г.Коломна); филиал АО «Ракетно-космический центр «Прогресс» - ОКБ «СПЕКТР» (г.Рязань); ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики имени Н.Л.Духова» (г.Москва); АО «НИИП имени В.В.Тихомирова» (г.Жуковский); ОКБ «Электроавтоматика» им. П.А.Ефимова (г. Санкт-Петербург); ООО «ТЕХНОТЕХ» (г.Йошкар-Ола); ООО «Остек–Сервис–Технология» (г.Москва); ООО «Радаравиасервис» (г.Рязань).

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

Результаты исследований автора использованы в комплексе НИОКР в рамках Федеральной целевой программы «Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники» на 2008-2015 гг.

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); Международная научно-техническая конференция (г. Тамбов, 2013); XVII Международная заочная конференция «Развитие науки в XXI веке» (г. Харьков 2016).

Полученные научные и практические результаты использованы в материалах лекций по направлениям 09.03.02 («Информационные системы и технологии» по профилю «Конструирование и производство средств информационной вычислительной техники») и 11.04.03 («Конструирование и технология электронных средств» по программе «Технология средств информационно-вычислительной техники») в курсах «Конструирование и технология производства информационной и вычислительной техники», «Микро- и нанотехнологии», «Современные материалы в микро- и нанотехнологиях» и «Автоматизация проектирования средств информационно-вычислительной техники» на кафедре 307 «Технологии приборостроения» ФГБОУ ВО «Московского авиационного института».

Материалы диссертационной работы используются в виде теоретических материалов и программных средств в лекционных курсах и лабораторном практикуме кафедры «Системы автоматизированного проектирования вычислительных средств» РГРТУ по дисциплинам «Управление качеством электронных средств», «Информационные технологии проектирования ЭВС» (бакалавры направления 11.03.03 «Конструирование и технология ЭС»), «Автоматизация конструкторского и технологического проектирования» (бакалавры направления 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника»), «Техническая подготовка производства РЭС» (магистранты направления 11.04.03 «Конструирование и технология ЭС»).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 55 печатных работ, в том числе: 6 монографии; 10 статей в изданиях, входящих в перечень ВАК для кандидатских и докторских диссертаций; 31 статья в научно-технических журналах и межвузовских сборниках научных трудов; 5 докладов на международных и всероссийских конференциях; 3 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; 3 изобретения.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, приложений, изложенных на 286 страницах (включая 117 рисунков и 40 таблиц). Список литературы содержит 157 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 решаемой проблемы, сформулированы её цель и задачи исследований, раскрыты научная новизна работы и ее практическая значимость, приведены результаты апробации и реализации, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе обоснованы тенденции развития технологий межсоединений на основе использования закона Мура и правила Рента. Показано, что вслед за увеличением степени интеграции и быстродействия электронной компонентной базы должна увеличиваться плотность межсоединений. Рассмотрены концепции проектирования элементов межсоединений в современных и перспективных электронных устройствах авионики. Показано, что при субнаносекундном быстродействии микросхем производительность электронных устройств можно улучшать преимущественно путем увеличения плотности компоновки элементов, чтобы уменьшить временные задержки сигналов в линиях связи между логическими элементами. Поэтому главным направлением развития и совершенствования техники межсоединений является повышение плотности монтажа до значений, позволяющих наиболее полно использовать преимущества высокоинтегрированной элементной базы.

В свою очередь увеличение степени интеграции используемых микросхем вызывает рост количества входных - выходных контактов (выводов корпуса) микросхем (правило Рента), требующих при консервативных решениях больших площадей для их размещения на поверхности монтажных подложек. Это противоречие между увеличивающейся степенью интеграции элементной базы и ростом количества выводов элементов разрешается путем увеличения плотности монтажа и соответствующего увеличения плотности межсоединений за счет использования трехмерных (многослойных) структур.

Количественно предопределено, что увеличение плотности монтажа неизбежно приводит к необходимости увеличения плотности межсоединений; $\Pi_C = qN^R L$, где Π_C - плотность соединений в монтажной подложке, N - степень интеграции микросхемы, R - показатель Рента, L - линейный размер монтажной

подложки, q - коэффициент, учитывающий связность элементов, эффективность использования площади подложек, совершенство системы проектирования топологии межсоединений.

Обосновано использование гибких и гибко-жестких плат в трехмерных системах межсоединений. Их применение обусловлено уменьшением габаритов и массы системы межсоединений, уменьшением трудоемкости электронных сборок, увеличением надежности элементов межсоединений и линий связи, улучшением условий теплоотвода, увеличением плотности компоновки электронных компонентов.

Удовлетворение всего комплекса требований к системе межсоединений высокопроизводительных электронных средств авионики связано с использованием гибко-жесткие печатных плат (ГЖПП), 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.

Обоснованы оптимальные пути увеличения плотности межсоединений.

Необходимость объективной оценки предельных возможностей технологии в удовлетворении постоянно растущих конструкторских требований в сочетании с необходимым уровнем надежности обусловило создание основ инженерных расчетов для выбора технических решений в процессе разработки базовых конструктивно-технологических решений по новым изделиям.

Производство технических средств бортовых цифровых технических средств авионики на единой конструктивно-технологической базе АО «ГРПЗ» позволило провести исследования путем обобщения статистических характеристик погрешностей производства ГЖПП и законов их распределения. На их основе, используя вероятностные закономерности, отраженные в прикладной математической модели факторного анализа, можно определить предельные возможности текущего производства ГЖПП, за которыми уровень надежности межсоединений резко падает. Эта же модель позволяет вести целенаправленную реконструкцию производства для расширения его возможностей в повышении технического уровня электронных изделий.

Созданная на этой основе обобщенная математическая модель расчета вероятности ослаблений соединений позволяет формировать стратегию проектирования высоконадежных межсоединений, соотнесенного с возможностями реального производства.

Используемый в настоящее время стандартный расчет элементов межсоединений печатный плат основан на методе полной взаимозаменяемости, заимствованный из инженерной практики машиностроения (метод «минимума-максимума»). Для технических средств, использующих высокую плотность монтажа с большим количеством элементов межсоединений, когда размеры элементов соединений соответствуют предельным возможностям производства, более достоверен вероятностный метод расчета плоских размерных цепей. Вместе

с тем этот метод создает основу для оценки конкретного производства в возможностях реализации проектов межсоединений и позволяет рассчитать их надежность в зависимости от сложности конструкций монтажных изделий в сопоставлении с техническим уровнем производства.

Одним из неперенных условий конструктивно-технологического обеспечения надежности соединений является правильно рассчитанные размеры элементов совмещения трехмерных структур межсоединений. Для гибко-жестких печатных плат это условие обеспечивается размером контактных площадок, исключающим выход за их пределы зоны сверлений сквозных отверстий. Основанные на этом критерии модели расчетов состоят в определении статистического распределения точек на плоскостях внутренних слоев, в которых могут находиться трансверсальные связи (металлизированные отверстия) с учетом погрешностей изготовления ГЖПП.

Результаты расчетов, проведенные с использованием созданных математических моделей, использованы для определения требований к производству в сопоставлении с современными и перспективными задачами проектирования межсоединений. Сопоставление характеристик производства с планируемыми проектами электронных изделий позволяют получить реальное представление о состоянии производства и целенаправленно планировать его модернизацию или реорганизацию применительно к конкретным задачам повышения технического уровня электронных изделий.

Проведенный обзор и анализ конструкций, методов и технологий автоматизации процессов жизненного цикла гибко-жестких печатных плат технических средств авионики позволяет сделать следующие выводы:

1. К конструкциям электрических межсоединений в устройствах авионики предъявляются повышенные требования по надежности к отказам межсоединений, по физической надежности электроизоляционных конструкций электронных узлов, по устойчивости конструкций линий связи к помехам, по способности к применению современных методов диагностического контроля и другие важные требования.

2. Конструктивные особенности и достоинства гибко-жестких плат делают их особенно привлекательными для электронных устройств авионики, а также позволяют их широкое применение в конструкциях самых различных электронных устройств массовой электроники для удовлетворения жестких требований по условиям эксплуатации.

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

4. Основными проблемами внедрения автоматизированных технологий проектирования ГЖПП является отсутствие необходимых методов проектирования, построения и функционирования 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 гибко-жестких плат, управления качеством проектных работ на основе использования современных методов моделирования и инженерного анализа и перехода на безбумажные технологии могут быть отнесены:

- 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 гибко-жестких 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.

Во второй главе изложены концепции создания инфраструктуры интегрированного информационного сопровождения жизненного цикла гибко-жестких печатных плат на основе принципов CALS-технологий.

Рассмотрены современные положения информационных технологий для поддержки распределенных интегрированных автоматизированных систем проектирования, технологической подготовки производства, производства и испытаний сложных технических изделий, к которым относятся гибко-жесткие многослойные печатные платы, которые широко применяются для производства технических средств авионики, проведен анализ основных требований, принципов и задач, имеющих место при системном проектировании таких сложных изделий, какими являются конструкции ГЖПП.

Наибольшая эффективность от внедрения средств автоматизации и вычислительной техники достигается путем внедрения интегрированных производственных комплексов, включающих автоматизированные системы управления (АСУ), автоматизированные системы научных исследований (АСНИ), системы автоматизированного проектирования, автоматизированные системы технологической подготовки производства испытаний (АСТПП), автоматизированные системы сбора и обработки информации (АСОИ), автоматизированные системы контроля (АСК). Такая направленность на осуществление интегральной автоматизации производства ГЖПП дает существенное (в два и более раз) по сравнению с внедрением отдельных

локальных систем автоматизации повышение эффективности использования вычислительной техники.

Главная задача автоматизации процессов создания ГЖПП и связанная с обеспечением функционирования систем автоматизации - это разработка их информационного, программного и аппаратного обеспечения, а также проведение системных исследований, определяющих принципы и методы их интеграции, общую стратегию внедрения систем автоматизации на предприятии и стратегию ликвидации узких мест, уровень автоматизации производственных процессов.

В свете решения поставленных задач рассмотрены современные концепции применения принципов и средств CALS-технологий для решения актуальной задачи информационного сопровождения всех стадий жизненного цикла высокотехнологичных технических средств авионики, построенных на основе ГЖПП, и предложены решения по созданию единого информационного пространства для всех участников автоматизированных процессов ГЖПП, построенного на основе использования в составе интегрированной САПР ГЖПП современных PDM-технологий (рисунок 1).

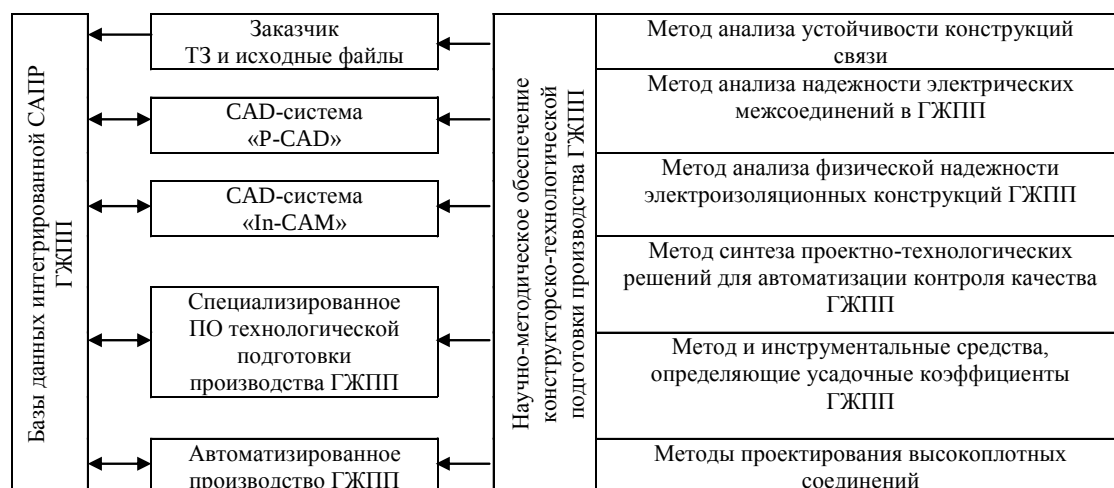


Рисунок 1– Структура интегрированной САПР ГЖПП

Проведен анализ характеристик современных САПР конструкторско-технологического проектирования (CAD) и САПР технологической подготовки производства (CAM) показал, что автономные продукты рынка САПР, на сегодняшний день, не покрывают в полном объеме весь комплекс задач, которые приходится решать специалистам на этапе проектирования и технологической подготовки производства ГЖПП. Для проектирования ГЖПП требуется сквозная интегрированная САПР, которая имеет альтернативные алгоритмы реализации отдельных проектных процедур и позволяет гибкую настройку, в условиях широкой номенклатуры ГЖПП, на требования выбранной технологии реализации проекта ГЖПП. При этом термин «Интегрированная САПР ГЖПП» подразумевает пакеты, которые в комплексе выполняют функции CAD/CAM/CAE/PDM систем автоматизированного проектирования и технологической подготовки производства (рисунок 2).

Разработана современная структура интегрированной САПР ГЖПП, которая включает в себя выбранный перечень CAD/ CAM-систем, в наибольшей степени отвечающих современным требованиям технологии проектирования и производства ГЖПП, а также содержит специальный программный комплекс (СПК), который учитывает уникальную специфику ГЖПП и является предметом диссертационных исследований и программной разработки.



Рисунок 2 – Система интеграции данных по стадиям жизненного цикла ГЖПП

В третьей главе рассмотрены научно-методические основы анализа конструкторско-технологических решений в интегрированной САПР ГЖПП.

Предложены методы анализа устойчивости воспроизведения параметров линий связи быстродействующих устройств авионики. Для расширения функциональных возможностей САПР конструкторско-технологического проектирования в направлении решения задач обеспечения помехоустойчивости и повышения быстродействия электронных устройств авионики предложены к использованию разработанный в работе метод анализа помехоустойчивости конструкций линий связи в ГЖПП, 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 ГЖПП. Задача согласования линий связи решается конструктивно-технологическим обеспечением воспроизведения заданного значения их волнового сопротивления, т.е. нормированием всех дестабилизирующих факторов, свойственных производству ГЖПП. По результатам анализа влияния этих факторов можно сделать заключение о приемлемости дисперсий волнового сопротивления печатных проводников, реализуемых в готовых ГЖПП.

Используя аналитические выражения волнового сопротивления Z_0 и продифференцировав их, получим уравнения для определения погрешностей Z_0 через коэффициенты влияния каждого из основных параметров, определяющих Z_0 :

$$dZ_0 = (\partial Z_0 / \partial \varepsilon) d\varepsilon + (\partial Z_0 / \partial H) dH + (\partial Z_0 / \partial D) dD,$$

где $D = 0,8B + t$ для несимметричной линии; $D = B$ для симметричной линии.

Дисперсию волнового сопротивления $\sigma_{Z_0}^2$ можно выразить через дисперсии исходных параметров следующим образом:

$$\sigma_{Z_0}^2 = A_\varepsilon^2 \sigma_\varepsilon^2 + A_H^2 \sigma_H^2 + A_D^2 \sigma_D^2 + 2rA_H A_\varepsilon,$$

где r - коэффициент корреляционной связи взаимозависимых параметров ε и σ_H .

В общем случае:

$$A_\varepsilon = -0,5; A_H = [\ln(6H/D)]^{-1}; A_D = -[\ln(6H/D)]^{-1}; \sigma_D^2 (B/D)^2 \sigma_B^2 + (A/D)^2 \sigma_A^2$$

Специально проведенные аналитические и экспериментальные исследования показали, что разброс значений диэлектрической проницаемости композиционных материалов (стеклоэпоксидные и полиимидные основания слоев и прокладочных тканей и акриловых склеивающих пленок ГЖПП) обусловлен в первую очередь неустойчивостью соотношений матрицы и армирующего наполнителя.

Практические результаты использования установленных границ отклонений параметров конструкций линий связи в ГЖПП, используемых в процессорах бортовых ЭВМ авионики, показывают, что отклонения значений Z_0 в пределах одного слоя не превышают 8%, а полное поле допуска Z_0 для ГЖПП составляет $\pm 10\%$, что удовлетворяет требованиям к устойчивости функционирования линий связи.

Проблемой обеспечения надежности межсоединений в трехмерных системах создают различия в температурных коэффициентах диэлектрических оснований и медной металлизации отверстий. Определены условия устойчивости трансверсальных межсоединений в многослойных структурах ГЖПП. Для построения рабочих процедур инженерного анализа и решения задач надежности в САПР ГЖПП, разработан метод анализа надежности электрических межсоединений в ГЖПП, включающий линейные модели термомеханических напряжений трансверсальных 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.

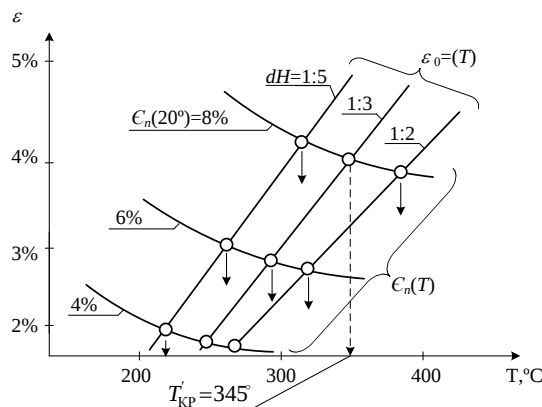


Рисунок 3 - Ужесточение требований к пластичности металлизации по мере уменьшения диаметра сквозного отверстия

Показано, что проблема устойчивости трансверсальных межсоединений усугубляется с ростом толщины плат и уменьшением диаметра металлизированных отверстий (рисунок 3).

Что бы установить закономерности и количественные соотношения между термомеханическими нагрузками и прочностными свойствами материалов, чтобы сформировать конкретные требования к надёжностно-ориентированной разработке технологии элементов соединений прецизионных ГЖПП к условиям испытаний, выявляющим ослабленные элементы межсоединений потребовало проведения дополнительных исследований, усовершенствования методов исследований напряженного состояния элементов межсоединений с целью повышения их достоверности. Для решения поставленных задач введена классификация отказов межслойных соединений по местоположению и механизму разрушения при термических нагрузках, анализируются линейные и нелинейные модели термических деформаций, нелинейности реологических характеристик материалов, предложена новая методика исследований напряженного состояния металлизации отверстия, проведены аналитические и экспериментальные исследования моделей деформации и разрушения элементов соединений с учетом обнаруженного явления термической нелинейности изменения пластичности медной металлизации отверстий ГЖПП. На базе проведенных исследований установлены закономерности отказов межслойных соединений ГЖПП, предложены меры по их предотвращению, получены данные для прочностных расчетов элементов конструкции ГЖПП, конкретизирована методология оценочных испытаний.

Предложена методика экспериментального исследования напряженного состояния металлизации отверстия, по которой само металлизированное отверстие используется в качестве тензодатчика.

Предложена и исследована модель усталостных разрушений металлизации отверстий в результате термоциклирования.

По результатам проведенных исследований предложены проектные нормы конструирования и технологии трансверсальных межсоединений, обеспечивающих их надежность в экстремальных условиях эксплуатации авионики.

Проведен анализ устойчивости электроизоляционных конструкций ГЖПП в условиях экстремальных воздействий внешних факторов. Показано, что основным фактором, ухудшающим свойства изоляции является влага и влагонасыщение электроизоляционных подложек ГЖПП. Это особенно актуально для полиимидных элементов конструкций, свойственных ГЖПП.

Предложена модель увлажнения композиционных материалов, какими являются ГЖПП. Учитывая, что при пайке идет интенсивное испарение влаги, разрушающее композитные основания плат, предложены условия предотвращения таких разрушений. Эти условия заложены в проектные нормы конструирования ГЖПП.

Предложены модели деградации электроизоляционных конструкций в ГЖПП, на основе которых проводится анализ их физической надежности: модели электропроводности композиционных диэлектриков, модели электро-

изоляционного сопротивления диэлектриков, модели процессов увлажнения монтажных подложек, модели изменения сопротивления электрической изоляции многослойных плат в экстремальных условиях эксплуатации авионики.

Предложена электрохимическая модель отказов изоляции в структурах ГЖПП, используемая на этапе технологического проектирования в САПР ГЖПП.

На основании предложенных моделей деградации изоляции сформулированы нормы проектирования электроизоляционных конструкций ГЖПП.

В четвертой главе изложены научно-методические основы синтеза проектных решений для автоматизации технологической подготовки производства ГЖПП.

Разработана методика создания проектно-технологических решений для автоматизации диагностического контроля качества ГЖПП. 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. Повышенная плотность компоновки элементов межсоединений, увеличение их абсолютного количества и уменьшение размеров усложняет задачу обеспечения надежности, требует дальнейшего совершенствования методов контроля на базе использования высокопроизводительных автоматических средств. Необходимость использования такого контроля диктуется и ростом числа неизбежных дефектов по мере увеличения плотности компоновки и уровня интеграции ИС, БИС. Тем более, что по мере увеличения количества компонентов на плате наблюдается увеличение числа дефектов, которые нужно обнаружить, локализовать и устранить известными приемами ремонта.

Физическую основу диагностических методов контроля составляют исследования физических характеристик объекта и обнаружения, таким образом, несовершенства его структура. Эти методы базируются на результатах исследований физических процессов, приводящих к отказам межсоединений. 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 предложены принципы диагностического неразрушающего контроля электрических соединений.

Разработана методика синтеза проектно-технологических решений для автоматизации диагностического контроля качества электроизоляционных конструкций ГЖПП. Их использование в системах тестирования обусловлено потенциальной возможностью появления дефектов материалов диэлектрических

оснований ГЖПП, недоступных для обнаружения традиционными средствами контроля. Основными их источниками являются локальные расслоения, вкрапления пыли, волокон целлюлозы и т.п. Такие дефекты приводят к образованию микрополостей, наполненных ионогенными продуктами химической обработки печатных плат. Такие микрополости не поддаются очистке. Металлизация отверстий создает дополнительные загрязнения и запечатывает их в объеме диэлектрического основания. Диффузия атмосферной влаги создает в загрязненных микрополостях осмотическое давление, расклинивающее их вплоть до образования сплошного канала утечки тока между металлизированными отверстиями.

Большая часть таких дефектов обнаруживается при параметрическом контроле по сопротивлению изоляции, предусмотренном стандартами. Остающаяся не обнаруженной незначительная часть дефектов никак не проявляет себя при измерении сопротивления изоляции. Такой локальный дефект выявляется только при определенном уровне испытательного напряжения, при котором возникает тепловой пробой вдоль канала проводимости.

В работе разработаны методика и инструментальные средства вычисления усадочных коэффициентов материалом ГЖПП, необходимых для проектирования элементов пространственного совмещения трехмерных структур межсоединений ГЖПП.

В процессе изготовления ГЖПП происходит усадка материала диэлектрического основания отдельных слоев сборочного пакета ГЖПП, что приводит к смещению элементов проводящего рисунка и как следствие нарушению целостности электрических цепей после выполнения операций межслойной металлизации.

Для устранения этого существенного недостатка технологии ГЖПП предложен способ коррекции исходных размеров привязки элементов топологии слоев ГЖПП с целью компенсации эффекта усадки плат. Согласно предложенному способу разработана специальная программа, которая позволяет получив информацию о типе материала, размере заготовки и площади металлизации получить значения усадки и усадочного коэффициента для коррекции размеров фотошаблонов или топологии управляющих файлов (в случае безшаблонного производства).

Вычисление усадочных коэффициентов технологии производства ГЖПП можно осуществлять двумя различными способами:

1. С разбиением заготовки на участки 10 x 10мм, вычислением усадочного коэффициента для каждого из участков и после вычислением среднего значения усадки для всей заготовки (рисунок 4).

X			
K_{11}	K_{12}		K_{1m}
K_{21}	K_{22}		K_{2m}
Y			
K_{n1}	K_{n2}		K_{nm}

Рисунок 4. - Разбиение заготовки слоя ГЖПП на участки

2. Вычислением коэффициента усадки для всей заготовки без деления на участки (применимо в случае одномерно заполненной заготовки или заготовки, для которой проведена балансировка медью) (рисунок 5).

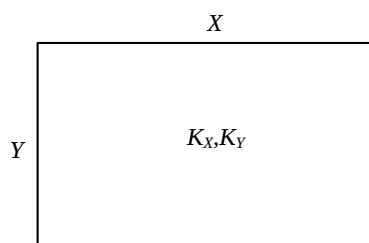


Рисунок 5 - Вычисление коэффициента усадки для всей заготовки

Зависимость значения усадки от площади металлизации можно приближенно описать следующим графиком (рисунок 6):

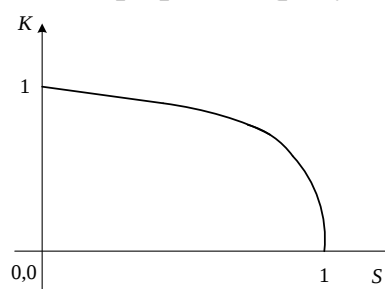


Рисунок 6 - зависимость значения усадки от площади металлизации

Значение усадки U (мм) можно описать следующей формулой:

$$U = \gamma T^2 \sqrt[\mu]{1 - S},$$

где γ - размерность разбиения заготовки на части (при первом варианте вычисления коэффициентов значение данной переменной равно 10, при втором - длине или ширине всей заготовки); T - технологический коэффициент для коррекции значения усадки по решению технологов (по умолчанию $T = 1$); μ - коэффициент усадки материала (зависит от типа материала и его свойств, по умолчанию $\mu = 1$); S - площадь металлизации участка (измеряется в долях единицы).

Переходя к первому случаю значение усадки по длине можно получить, просуммировав все значения для каждой конкретной строки и вычислив среднее по строкам и, наоборот, для значения усадки по ширине.

Пусть: x – длина заготовки; y – ширина заготовки; m – число участков по оси X ; n – число участков по оси Y . Тогда значение усадки по X :

$$U_X = \frac{1}{n} \sum_n \sum_m U_{nm} ,$$

где $U_{nm} = 10T^2 \sqrt[n]{1 - S_{nm}}$ - значение усадки для конкретного участка.

Аналогично для Y :

$$U_Y = \frac{1}{m} \sum_n \sum_m U_{nm}$$

В случае применения балансировки медью формулы принимают следующий вид:

$$U_X = xT^2 \sqrt[n]{1 - S} ,$$

$$U_Y = yT^2 \sqrt[n]{1 - S} .$$

Корректирующие коэффициенты вычисляются по следующим формулам:

$$K_X = \frac{x + U_X}{x} ,$$

$$K_Y = \frac{y + U_Y}{y} .$$

На этапе конструкторско-технологической подготовки производства ГЖПП решается важная задача, связанная с вычислением коэффициентов усадки диэлектрических материалов конструкций ГЖПП. Для автоматизации проектных работ были разработаны специальные программные средства, эффективность применения которых на практике расчетов можно проиллюстрировать на примере. Данное ПО зарегистрировано в системе Роспатент и имеет свидетельство регистрации программы для ЭВМ №2013617335.

Пусть для примера возьмем заготовку $x=305$ мм, $y=260$ мм. Средняя площадь металлизации 40 %. Тогда выполнение программы дает следующие результаты (рисунок 7):

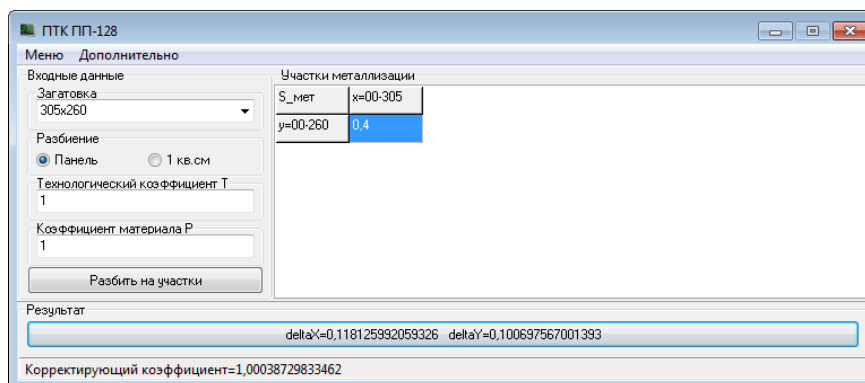


Рисунок 7 - Результат выполнения программы расчета усадочных коэффициентов

После выравнивания площади металлизации и балансировки заготовки медью средняя площадь металлизации - 82% (рисунок 8).

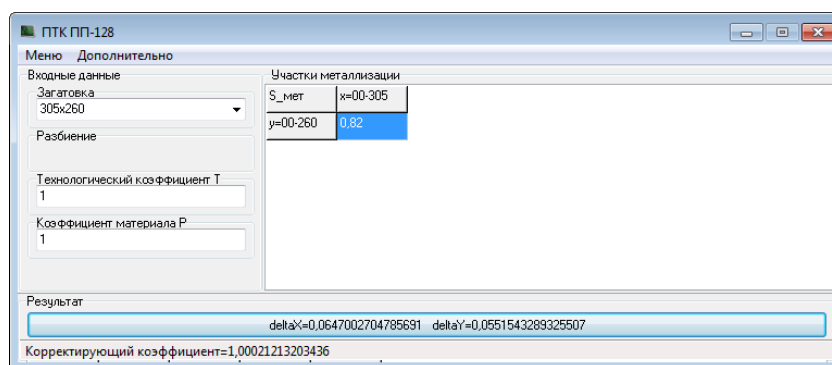


Рисунок 8 - Результат выполнения программы

Усадка уменьшилась почти на 0,5 мм. Результат подтверждает необходимость выполнения операции балансировки медью, которая позволяет существенно снизить ошибки, связанные с усадкой материала. При этом рассмотрим еще один пример (таблица 1, рисунок 9) более подробно.

Таблица 1 - зависимость усадки заготовки от площади металлизации

Заготовка (580x450)	S мет	Усадка X, мкм	Усадка Y, мкм
Полиимид без меди	0 %	1160	900
Реальная площадь металлизации	21%	773,27	599,95
Балансировка медью (тех. поле)	62%	446,92	346,475
Балансировка медью (тех поле+плата)	84%	232	180

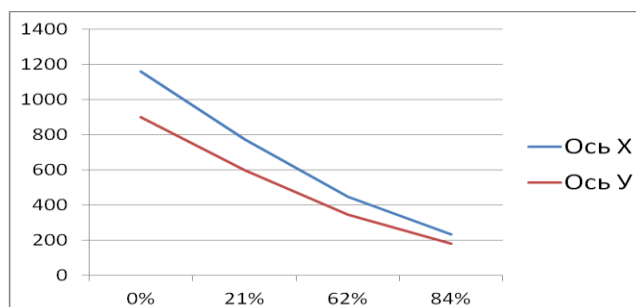


Рисунок 9 - зависимость усадки от площади металлизации по осям X и Y.

Для заготовки 580x450 мм усадка материала составляет 1160 мкм по оси X и 900 мкм по оси Y. В случае если металлизация платы составляет 21 % от площади всей заготовки - значение усадки составит 773 мкм и 599 мкм соответственно. Для компенсации усадки материала вводится балансировка заготовки медью в технологическое поле. При площади металлизации 62 % - усадка составит 447 мкм и 346 мкм. Для большего снижения значения усадки вводится металлизация в свободные участки платы. Это позволяет получить общую металлизацию в 84 %. При этом мы добиваемся усадки материала на 232 мкм по оси X и 180 мкм по оси Y, что практически в 3 раза меньше усадки заготовки без балансировки медью.

При вычислении корректирующего коэффициента для фотоплоттера и установки прямого нанесения рисунка имеем:

$$K = (x + U_x) / x = (y + U_y) / y = 1.0004$$

Конструктив ГЖПП в виде шлейфа не позволяет производить балансировку медью участков гибких шлейфов. Для компенсации усадки в этих участках платы

необходимо вычислить значение усадки на каждом из них, рассчитать корректирующие коэффициенты и произвести масштабирование соответствующих элементов топологии проводящего рисунка на этапе технологического проектирования при подготовке производства печатных плат в САМ-системе.

Таким образом, на основании проведенных исследований разработаны необходимые эффективные модели и способы диагностики и расчета корректирующих коэффициентов для размеров топологии рисунка ГЖПП, обеспечивающие решение задачи автоматизации этапа конструкторско-технологической подготовки производства ГЖПП и повышение качества выпускаемой продукции.

Пятая глава посвящена решению проблем повышения плотности межсоединений гибко-жестких печатных плат в устройствах авионики:

1. В настоящее время наблюдается тенденция непрекращающегося совершенствования печатных плат в сторону уменьшения ширины проводников и электроизоляционных зазоров между ними. И если удовлетворение этой тенденции связано с фотолитографическим разрешением процесса формирования топологического рисунка, то на пути уменьшения зазоров вкралось ещё одно явление - нелинейность изменения сопротивления от величины зазора: при переходе величины зазоров за менее 100 мкм сопротивление изоляции падает несоразмерно расчетной величины. Для аппаратуры ответственного назначения, как например, для авионики и аэрокосмических комплексов, с сопротивлением изоляции приходится считаться в плане обеспечения надежности аппаратуры в экстремальных условиях эксплуатации.

Для проектных расчетов сопротивления изоляции между проводниками опорными данными является комплексное сопротивление между электродами типа «гребенки». Такие электроды полностью имитируют сопротивление между проводниками печатных плат. Как правило, установлены значения сопротивления электродов-гребенок для разных типов базовых материалов. Так для широкого ряда стеклоэпоксидных материалов, используемых в авионике, сопротивление «гребенки» с длиной зазора $C_{гр} = 600$ мм и шириной зазора между проводниками $l_{гр} = 1$ мм установлено 10 000 МОм. Для расчета реальных конструкций предлагается использовать эти цифры как исходные, так что сопротивление изоляции $R_{из}$ проектируемых зазоров вычисляется, исходя из линейности зависимости от ширины $l_{из}$ и длины $C_{из}$ изоляционного зазора:

$$R_{из} = R_{гр} \frac{C_{гр} l_{из}}{l_{гр} C_{из}}$$

Такой подход к проектированию топологии рисунка ПП справедлив до определенной величины зазора. Обнаружено, что при зазорах меньших примерно 100 мкм такой подход уже не правомерен. В данной работе проводится теоретическое рассмотрение причин нелинейности с позиций теоретической физики.

Проведено аналитическое исследование эксплуатационных параметров ПП: сопротивления между токоведущими элементами печатной платы. Рассмотрен-

ный вариант весьма перспективен, тем более что он вполне реализуем технически. По существу, единственным препятствием реализации такой новации является отсутствие сведений о сохранении электрических и надёжных характеристик ПП после уменьшения расстояний между его токоведущими элементами. Следовательно, требуется установить зависимость этих параметров от величины зазоров между токоведущими элементами ПП, для этого рассмотрен механизм электрического тока на носителях ПП. Печатные платы могут быть двух типов: твердыми и гибкими. Как правило, материал первого из них собой стеклотекстолит, а второго – полиимид.

Оба материала являются полимерами, то есть типичными аморфными твердыми телами. Следовательно, можно определить тип проводимости между элементами. Он не может быть электронным, так как отсутствует необходимое его условие - кристалличность структуры. Тогда возможен только один вариант: ионный ток.

Рассматривая «энергетическую» картину пластика: в пределах ближнего порядка существует чередование ограниченного числа потенциальных ям и барьеров (рис.6,а). Если в одной из них оказался инородный ион металла (катион), то он периодически испытывает взаимодействие с решеткой, повышающее его энергию. Частота таких обменных процессов $\nu \approx 10^{13} \text{ с}^{-1}$.

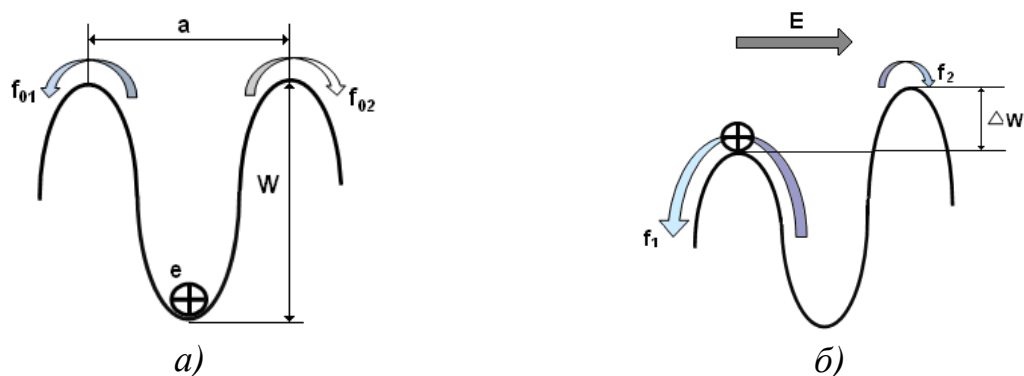


Рисунок 10 - Схема активационной ионной проводимости
а) при отсутствии внешнего поля; б) при внешнем поле E

Это означает, что через каждые интервалы времени: $\tau = \nu^{-1} \approx 10^{-13} \text{ с}$. инородный ион получает порцию тепловой энергии, иногда этой полученной энергии оказывается достаточной для преодоления барьера и перескока в соседнюю яму.

При оценке переноса зарядов между двумя потенциальными ямами было получено, что потоки ионов в противоположных направлениях одинаковы по своей величине (рисунок 10,а потоки $f_{01} = f_{02}$). А это означает, что суммарный поток ионов равен нулю, то есть ионный ток отсутствует.

Теоретически установлено, в диэлектрических носителях печатных плат, как жёстких, так и гибких, в изотермических условиях невозможно возбудить электрический ток при отсутствии внешнего поля.

Качественно иная картина должна наблюдаться при наложении на аморфный диэлектрик электрического поля. Как видно из рисунка 10,б внешнее

электрическое поле искажает симметрию, свойственную до того потенциальному рельефу.

Напряжённость электрического поля E создает на участке, равном протяженности потенциальной ямы a , разность потенциалов $U_a = E \cdot a$. Это означает, что ионы, покидая потенциальную яму, могут иметь энергию, как большую, так и меньшую по отношению к глубине потенциальной ямы W . Эта разность равна работе, совершаемой ионом при перемещении в разности потенциалов U_a :

$$\Delta W = q \cdot U_a \text{ или } \Delta W = q \cdot E \cdot a.$$

Поскольку эта «прибавка» к энергии иона носит направленный характер (в направлении поля она положительна, а в противоположном - отрицательна), барьеры в узле ближнего порядка испытывают перекося. Как видно из рисунка 10,б в направлении поля барьер минимален и составляет:

$$W - \Delta W = W - q \cdot E \cdot a.$$

В противоположном направлении он, напротив, максимален:

$$W + \Delta W = W + q \cdot E \cdot a.$$

Такое различие в высотах барьеров означает, что Больцмановская вероятность перескока через барьеры также будет различна в направлении E она будет больше.

Соответственно, изменяются потоки ионов и плотность ионных токов. Равенство разнонаправленных потоков ионов, а значит и плотностей ионных токов нарушаются. Поэтому суммарная плотность тока уже становится не нулевой, а равной разности.

Для оценки изменения электрического сопротивления между двумя элементами при уменьшении расстояния между ними положим, что материал основания ПП имеет микрообласти двух сортов. Пусть один из них обладает активационной проводимостью, а другой – туннельной.

Следовательно, можно достаточно обоснованно сделать следующее предположение: основания ПП представляет собой не однородную, гомогенную среду с активационной проводимостью, в которой выполняется закон Ома и линейность ВАХ, но гетерогенную представляющую собой смесь отдельных областей с разным типом проводимости.

Действительно, как правило, при уменьшении зазора от 100 мкм до 50 мкм наблюдается уменьшение сопротивления не в два, а в значительно большее число раз. Это возможно только тогда, когда среда содержит элементы со сверхлинейной вольтамперной характеристикой (ВАХ). Поэтому, при уменьшении зазора его сопротивление уменьшается не пропорционально сужению, как для идеального аморфного диэлектрика, а по более сложному экспоненциальному закону. Наибольшее отличие свойственно удельному значению сопротивлений начальному и конечному - после сужения зазора.

Следовательно, при уменьшении зазора между токоведущими элементами произойдет уменьшение удельного сопротивления диэлектрика, заключенного между ними, то есть получаем на опыте эффект нелинейной зависимости удельного сопротивления зазора и его величины, но для доведения их до норм проектирования ПП требуются дополнительные исследования.

2. Определены тенденции роста плотности межсоединений в технических средствах электроники и в, частности, авионики, отличающейся особыми требованиями к характеристикам по массе и надежности аппаратуры в экстремальных условиях эксплуатации. Показано, что физическим носителем всех межсхемных соединений являются печатные платы по большей части - многослойные со сквозными металлизированными отверстиями, обеспечивающие максимальную плотность межсоединений. Дальнейшее увеличение плотности межсоединений можно достичь в новых конструкциях печатных плат за счет использования технологий послойного наращивания с глухими металлизированными отверстиями. Установлено, что заполнение глухих отверстий металлом увеличивает трассировочную способность печатных плат, по крайней мере в 2,4 раза и облегчает процедуру автоматического топологического проектирование за счет произвольного размещения межслойных переходов по полю и объему платы.

Увеличение плотности размещения монтажных элементов и линейных размеров плат требует пропорционального увеличения плотности соединений. С другой стороны, плотность соединений определяется плотностью трассировки, т.е. числом проводников, прокладываемых между отверстиями и коэффициентом использования трасс, а в ГЖПП – ещё и числом сигнальных слоёв m_C :

$$\rho_C = (n_{mp} + 1)qm_C / T ,$$

где n_{mp} – число проводников между отверстиями; T – шаг сквозных отверстий, между которыми трассируются проводники; q – коэффициент использования трассировочного пространства.

При изготовлении уникальной аппаратуры авионики с высокой степенью надежности происходит постоянное столкновение интересов разработчика и производителя. С одной стороны стоит задача увеличения степени интеграции изделия и повышения плотности межсоединений, с другой – необходимость сохранить технологичность изготавливаемой продукции. Поэтому важнейшей задачей производителей многослойных печатных плат является увеличение плотности межсоединений при их изготовлении, что дает возможность сохранить технологичность, разместить электрическую схему на печатной плате с меньшими габаритными размерами, использовать микросхемы BGA с меньшим шагом, снизить слойность печатной платы, повысить надежность межсоединений, избежать замыканий при установке планарных микросхем и микросхем BGA с использованием поверхностного монтажа.

Для решения этих задач, в работе представлены четыре пути повышения степени интеграции топологического рисунка и монтажа компонентов на печатных платах для решения вопросов увеличения производительности выпускаемых изделий:

1. Уменьшение размера отверстий и контактных площадок, чтобы высвободить пространство для трассировки проводников.

2. Увеличение количества трасс между отверстиями за счет уменьшения ширины проводников и зазоров.

3. Увеличение количества слоев.

4. Введение многоуровневых межсоединений: отказ от сквозных отверстий в пользу глухих и слепых межслойных переходов.

Основным препятствием на пути увеличения плотности межсоединений являются контактные площадки (КП) большого диаметра, т.к. они уменьшают трассировочное пространство между отверстиями. Размер контактных площадок определяется тем, что они как бы являются мишенью для сверла при сверлении отверстий. Чем больше погрешности пространственного совмещения элементов межсоединений, тем вынуждено больше размер контактных площадок, чтобы обеспечить уверенное в них попадание. Поэтому назначение размера пояaska контактных площадок вокруг просверленных отверстий состоит в том, чтобы компенсировать любые возможные смещения элементов межсоединений в слоях относительно друг друга, а также не допустить попадания отверстия за пределы контактной площадки. Такие несовпадения в основном вызываются размерной нестабильностью базового материала и смещением основания на различных этапах производства печатных плат.

Двукратное уменьшение диаметра контактной площадки дает трехкратный выигрыш в плотности разводки, что на практике позволяет избавиться минимум от половины сигнальных слоев, и, вследствие этого, от половины слоев земли и питанияПП.

Авиационная и космическая техника, отличающаяся повышенными требованиями к надежности, не допускает выход переходного отверстия за пределы КП. Поэтому, чтобы максимально уменьшить диаметр КП с целью увеличения трассировочного пространстваПП, необходимо, в первую очередь, обеспечить качественное совмещение элементов межсоединений.

Уменьшение ширины проводников и зазоров позволяет увеличить количество трасс на каждом слое платы. Но, все же, уменьшать ширину проводников бесконечно невозможно. Такое уменьшение ограничено токонесущими свойствами и омическим сопротивлением проводников.

Уменьшение ширины проводников существенно уменьшает число слоёв, необходимое для сигнальной разводки, при условии, что выход годной продукции, плотность межсоединений и площадь платы остаются постоянными. Это уменьшение числа слоёв может существенно снизить затраты на производство печатных плат.

Увеличение числа проводящих слоёв - самое простое решение увеличения плотности межсоединений: когда не хватает места на существующих слоях для размещения всех необходимых межсоединений, добавляют ещё один слой. Этот подход широко применялся в прошлом, но когда эффективность затрат на изготовление подложек стала иметь огромное значение, необходимым стал тщательный анализ проекта для минимизации числа слоев, потому что с каждым дополнительным слоем существенно растут затраты на изготовление платы. Существует почти линейная зависимость между затратами на изготовление платы и количеством слоев.

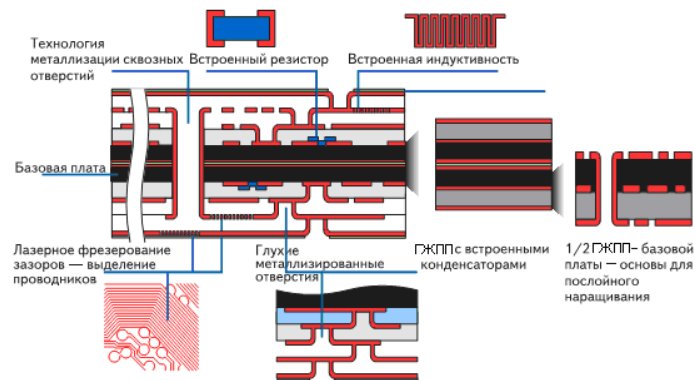


Рисунок 11 - ГЖПП с послойным наращиванием межслойных переходов, лазерным формированием прецизионного рисунка, с встроенными пассивными элементами схем

Любое увеличение числа слоев сигнальной разводки в платах, работающих на высоких ($>1\text{ГГц}$) частотах, удвоит общее число слоев из-за необходимости использования экранных слоев (слоев заземления или слоев питания) между слоями сигнальной разводки.

Ради увеличения трассировочного пространства и мобильности трехмерной разводки проводников проектировщики и производители идут на значительные усложнения технологий, чтобы выполнять в многослойных структурах глухие и скрытые отверстия, как показано на рисунке 11.

Традиционные технологии многослойных печатных плат методом металлизации сквозных отверстий, не способны к монтажу микросхем с матричными выводами с шагом менее $1,0\text{ мм}$. Но уже созданы корпуса микросхем типа CSP с шагом матричных выводов $0,508\text{ мм}$ и $0,254\text{ мм}$ ($0,010\text{ дюйма}$). Для монтажа таких компонентов к ГЖПП добавляются специальные слои с глухими металлизированными отверстиями, на которых реализуется разводка цепей из-под микрокорпусов или из-под бескорпусных кристаллов микросхем (рисунок 12).

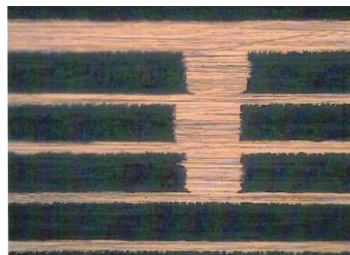


Рисунок 12 - Межслойные переходы с глухими отверстиями

Эти тонкие дополнительные специализированные слои напрессовываются на МПП, после чего в них выполняются глухие металлизированные отверстия. Эта технология подразумевает сочетание методов металлизации сквозных отверстий и послойного наращивания — «ГЖПП с послойным наращиванием внешних слоев» или «ГЖПП с глухими отверстиями».

Проведенные расчеты показывают, что при использовании традиционных технологий плотность монтажного поля составляет 170 элементов на кв. см., в то время как новая технология, построенная на принципах послойного наращивания с глухими отверстиями заполненными металлом позволяет разместить на одном кв. см 400 монтажных элементов, т.е. в $2,3$ раза больше.

Глухие переходные отверстия предназначены для соединения наружного слоя с одним или несколькими внутренними слоями ГЖПП.

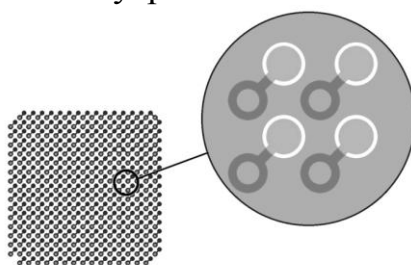


Рисунок 13 - Участок многослойной печатной платы для размещения микросхемы BGA с переходными отверстиями (вид сверху)

Устанавливать переходные отверстия можно разными способами, но наиболее эффективным и часто используемым является установка переходных отверстий по диагонали от контактных площадок для выводов элементов (рисунок 13 и 14).

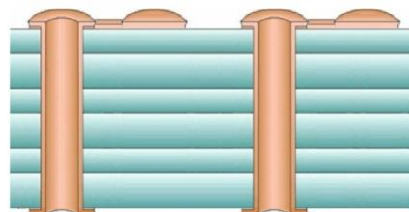


Рисунок 14 - Участок многослойной печатной платы для размещения микросхемы BGA с переходными отверстиями (в разрезе)

Предлагаемое техническое решение заключается в уменьшении плотности межсоединений многослойной печатной платы без увеличения габаритного размера изделия для дополнительного увеличения степени интеграции топологии проводящего рисунка. Его суть состоит в смещении переходных отверстий непосредственно под контактные площадки выводов микросхем. При изготовлении ГЖПП используется технология послойного наращивания, с последующим заравниванием глухих переходных отверстий медью (рисунок 15).

Главные требования сегодняшнего дня, и тем более будущего, таковы: глухие микроотверстия должны быть заполнены с небольшим остаточным углублением, и медное покрытие при этом должно быть тонким и равномерно распределенным по всей поверхности платы. Все эти факторы способны обеспечить получение схемы с возможным допуском проводников и расстояний между ними до 70 мкм.

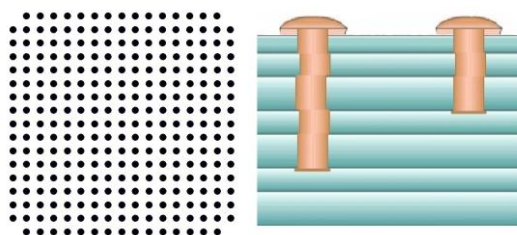


Рисунок 15 – Участок многослойной печатной платы для размещения микросхемы BGA с глухими отверстиями под контактными площадками

(слева - вид сверху, справа - в разрезе)

Так как основными характеристиками, которые влияют на процессы и качество заполнения отверстий являются: диаметр и глубина отверстия, была поставлена задача, добиться стабильного заполнения медью глухих отверстий диаметром от 100–150 мкм с соотношением диаметра отверстия к его глубине 1:1 для перехода с первого на третий слой МПП, т.к. формирование металлизации глухого отверстия в МПП зависит от толщины слоя.

Например, при толщине фольги 12 мкм и толщине диэлектрика 50 мкм суммарная толщина слоя $12+12+50=74$ мкм + 50 мкм (межслойная изоляция). Итого суммарная толщина слоя с учетом изоляции до следующего слоя будет равна 136 мкм (рисунок 16).

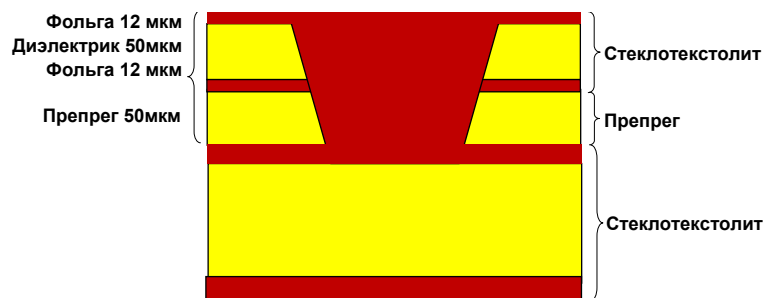


Рисунок 16 – Положение глухого отверстия по отношению к внутренним слоям ПП

Расчет величины заполнения глухого отверстия (углубления) рассчитывается по формуле:

$$D = 1 - (A/C),$$

где D - углубление; A - толщина внутри отверстия; C - начальная толщина (рисунок 17). Отрицательное значение величины D говорит о полном заполнении глухого отверстия.

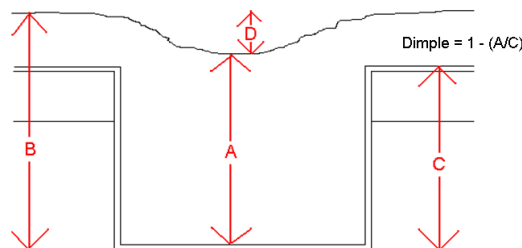


Рисунок 17 – Геометрия глухого отверстия

На этапе разработке процессов заравнивания микроотверстий обнаружено, что тип перемешивания, соотношение медь–кислота, отношение ширины к толщине микроотверстий и спецификация размера ванн, все влияет на качество электролитического осаждения.

Помимо химических технологий процесса и состава ванн, также факторами, влияющими на наполнение отверстий, являются состояние поток раствора, плотность тока и процесс предварительной обработки.

Вследствие этого были выполнены технические доработки, подбор органических добавок, позволяющие оптимизировать распределение гальванической меди на поверхности заготовки.

Было получено, что механизм ускоренного заполнения отверстия (а именно, заполнение снизу вверх) в большей степени объясняется назначением органических добавок. Концентрация осветлителя (ускорителя) действительно увеличивается в отверстие, так как площадь поверхности уменьшается. Локализованное увеличение концентрации осветлителя приводит к ускоренному осаждению в отверстии, по сравнению с поверхностью. Этот процесс действует во взаимодействии с большей степенью поверхностного подавления, предусмотренного полу избирательным поглощением разбавителей тем самым, чтобы в дальнейшем изменять соответствующие скорости для локализованной металлизации. Для того чтобы произошло ускоренное заполнение дна, композиция добавок должна функционировать сбалансировано друг с другом и поддерживаться в пределах определенных параметров.

Заращивания отверстия без пустот очень важен для обеспечения надежное формирования последующих уровней при использования метода послойного наращивания.

Использование метода послойного наращивания позволяет получить высокую плотность размещения проводников во всех слоях печатной платы и очень высокую плотность монтажа, вследствие возможности выполнения межслойных переходов в любой точке ГЖПП, независимо от трассировки и расположения межслойных соединений любых смежных слоев.

Результатом использования данного технического решения является заполнение освобожденных от переходных отверстий мест между контактными площадками выводов микросхемы BGA элементами токопроводящего рисунка. Зарощенное переходное отверстие будет выполнять роль контактирующего элемента с выводом микросхемы BGA и одновременно обеспечивать межслойную связь с другими элементами схемы (таблица 2).

Таблица 2 – Технологические параметры печатной платы, изготавливаемой предложенным способом

Технологические параметры печатной платы								
	известная технология				предложенная технология			
Шаг микросхемы	1,5	1,27	1,0	0,75	1,5	1,27	1,0	0,75
КП микросхемы	0,6	0,6	0,5	0,3	0,6	0,6	0,5	0,3
Диаметр сверла сквозного переходного отверстия	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,2	0,15
Толщина проводника	0,15	0,15	0,12	0,11	0,15	0,15	0,12	0,11
Гарантийный пояс	0,175	0,175	0,125	0,075	0,175	0,175	0,15	0,125
Минимальный зазор топологии	0,18	0,15	0,15	0,1	0,375	0,26	0,19	0,17
Процент свободного трассировочного пространства под микросхемой BGA	62	53	52	58	72	70	71	78

Таким образом, увеличение плотности межсоединений многослойной печатной платы, за счет смещения переходных отверстий под контактные площадки микросхемы BGA и заращивания их медью, дает возможность

разместить электрическую схему на печатной плате с меньшими габаритными размерами, использовать микросхемы BGA с меньшим шагом, снизить слойность печатной платы, повысить надежность межсоединений, избежать замыканий при установке планарных микросхем и микросхем BGA с использованием поверхностного монтажа, полностью устранить короткие замыкания между токоведущими элементами МПП в процессе пайки.

Данные конструкции и технологии изготовления защищены автором тремя патентами на изобретение и одним патентом на полезную модель.

Проектирование на основе САПР ГЖПП с высокой плотностью межсоединений стало одной из важных функций технологического процесса электронной продукции. Постановка технологического процесса под контроль требует методологии, которая включает в себя планирование процесса разработки топологии печатной схемы с прогностическими моделями плотности трассировки. Перечень элементов для автоматизированного проектирования (CAD) ГЖПП с высокой плотностью межсоединений выглядит следующим образом:

- оптимизация трассировщиком смешанных переходных отверстий;
- автоматизированная трассировка для изготовления переходов;
- контроль глухих переходных отверстий на слое;
- контроль переходных площадок;
- контроль ступенчатого расположения переходов;
- площадка внутри площадки;
- главенство технологического процесса над всеми фазами проектирования.

Все описанные методы позволяют существенно увеличить плотность трассировки с помощью использования переходных отверстий в технологии поверхностного монтажа площадок, уменьшить размер, вес изделия и улучшить электрические характеристики системы.

Модели, методы и инструментальные средства реализованы на АО «Государственный Рязанский приборный завод» в производственно-техническом комплексе «Печатные платы» с помощью уникального оборудования крупнейших фирм мира которым оснащен комплекс, это:

- гальванический вакуумный пятипоршневый пресс с гибридной технологией нагрева, ф. Fusei Menix, Корея;
- прецизионная система изготовления микрошлифов металлизированных отверстия ПП, ф. Carl Zeiss, Германия;
- автоматический ламинатор с модулем предварительного нагрева, входным конвейером с крышкой, системой обрезки фоторезиста по двум сторонам, ф. ALT Srt, Италия;
- высокоточный двухшпиндельный сверлильно-фрезерный станок. Специальная прижимная пята для фрезерования. Система контроля точности. Фрезерование от токопроводящей поверхности модуль масштабирования Ultraspeed Mono Combi, ф. Posalux, Швейцария;
- высокоточный двух шпиндельный фрезерный станок. Специальная прижимная пята для фрезерования. Система контроля точности. Модуль масштабирования, ф. Posalux, Швейцария;

– двухшпиндельная высокоточная установка с автоматическим оптическим позиционированием, усреднением погрешностей, центрированием и сверлением, ф. PrintProcess, Швейцария;

– установка прямого автоматического нанесения маркировки струйно-капельным методом с универсальной системой базирования, которая включает пневматический клампинг, вакуумный стол и порталный прижимы, ф. New System S.r.l. - Orbotech, Италия;

– автоматическая установка двухстороннего экспонирования коллимированным светодиодным источником света повышенной мощности с оптическим совмещением по реперным знакам для внутренних слоев, внешних слоев и паяльной маски, ф. PrintProcess, Швейцария.

Внедрена уникальная система MAS LAM, позволяющая достичь точности совмещения слоев до 5 мкм, состоящая из Targomata, Targomil (ф. Printprocess).

Впервые в Российской Федерации внедрена технология САПР InCam (ф. Orbotech, Израиль) которая обеспечивает технологическую постобработку и генерацию управляющих файлов для изготовления фотошаблонов, для сверления отверстий на станках с ЧПУ, для автоматического тестирования плат на автоматах электрического контроля A3/8 ATG (Германия) и оптического контроля Camtex (ф. Orbotech, Израиль).

Для адаптации оборудования и программного обеспечения к задачам отечественной авионики разработаны новейшие технологически процессы, подкрепленные разработанными программными средствами, которые зарегистрированы в Роспатенте.

Разработана современная структура интегрированной САПР ГЖПП, которая включает в себя перечень CAD/CAM-систем, в наибольшей степени отвечающих современным требованиям технологии проектирования и производства ГЖПП, а также содержит специальный программный комплекс, который учитывает уникальную специфику ГЖПП и является предметом дальнейшего развития отечественной авионики.

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 ГЖПП и разработкой методов автоматизированного проектирования электрических межсоединений в электронных устройствах авионики.

В целом организация интегрированного конструкторско-технологического комплекса серийного производства печатных плат для авионики и другой специальной техники нового поколения решает важные государственные задачи технологического обеспечения разработок военно-технического назначения радиоэлектронного комплекса. Реализация этой разработки обеспечила лидирующие позиции АО «ГРПЗ» в России и за рубежом, позволило создать современное с заделом на будущее рентабельное саморазвивающееся высокотехнологическое производство, обеспечивающее конкурентоспособность отечественных разработок на международном рынке вооружений.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ В изданиях из перечня ВАК РФ

1. Мылов Г.В. Проектирование и производство печатных плат - проблемы и решения /А.А.Бурмакин, Б.С. Кузнецов //САПР и графика. – 2000.– №3. – С.44-51.
2. Мылов Г.В. Современные требования к электронным сборкам. //Сборки в машиностроении и приборостроении / А.М. Медведев– 2012 – №10. – С.32-40.
3. Мылов Г.В. Эволюция технологий электрических межсоединений /А.М.Медведев //Сборки в машиностроении и приборостроении. – 2013. – №2. – С.35-40.
4. Мылов Г.В. Ультразвуковая очистка электронных сборок / А.М. Медведев //Сборки в машиностроении и приборостроении. – 2012. – №11. – С.18-27.
5. Мылов Г.В., Надежность электрических межсоединений в электронных сборках авионики / А.М. Медведев //Сборки в машиностроении и приборостроении. – 2013. – №9. – С.12-18.
6. Мылов Г.В. Пластичность медного покрытия в отверстиях печатных плат. Результаты последних исследований / А.М. Медведев //Гальванотехника и обработка поверхностей. – 2012. – №3. – С.73-78.
7. Мылов Г.В. Проблемы технологического обеспечения параметров линий передач в МПП / А.М. Медведев, Л.Н. Кечиев //Технологии ЭМС. – 2012. – №3. – С.73-78.
8. Мылов Г.В. Концепция входного контроля материалов и комплектующих / А.М. Медведев //Надежность. – 2013. – №1. – С.28-36.
9. Мылов Г.В. Снижение плотности межсоединений многослойных печатных плат / И.В. Дрожжин // Вести РГРГУ. – 2015. – №54. – С.115-120.
10. Мылов Г.В. Проектирование высокоплотных соединений в авионике /А.М. Медведев // Автоматизация. Современные технологии. – 2017. – №1.– С.12-18.

Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. (Роспатент)

11. Мылов Г.В. ПОЛЕЗНАЯ МОДЕЛЬ. Преобразование напряжений планарный / В.Д. Кабанов, М.А. Грибков и др. //Регистрационный №91499 от 10.02.2010г. Присвоено патентное ведомство РФ, Федеральный институт промышленной собственности, Москва. Составная часть Роспатента.
12. Мылов Г.В. ПОЛЕЗНАЯ МОДЕЛЬ. Многослойная печатная плата (с заращиванием отверстий планарного вывода BGA / И.В. Дрожжин // Регистрационный №144226 от 25.03.2014г. Присвоено патентное ведомство РФ, Федеральный институт промышленной собственности, Москва. Государственный реестр полезных моделей.
13. Мылов Г.В. ИЗОБРЕТЕНИЕ. Способ изготовления многослойных печатных плат / И.В. Дрожжин // Регистрационный №2574290 от 10.02.2016г.
14. Мылов Г.В. ИЗОБРЕТЕНИЕ. Способ изготовления многослойных печатных плат / И.В. Дрожжин, М.В. Ларин // Регистрационный №2602084 от 19.10.2016г.

15. Мылов Г.В. ИЗОБРЕТЕНИЕ Способ изготовления многослойной печатной платы /И.В.Дрожжин, М.В. Ларин // Регистрационный №2603130 от 31.10.2016г.

Монографии

16. Мылов Г.В. Технологии в производстве электроники. Гибкие печатные платы / А.М. Медведев // М.: Группа ИДТ, 2008. – 488с.

17. Мылов Г.В. Методологические основы автоматизации конструкторско-технологического проектирования гибких многослойных печатных плат /А.И Таганов // М: Горячая линия - Телеком, 2014. - 168с.

18. Мылов Г.В. Печатные платы. Выбор базовых материалов. //М: Горячая линия - Телеком, 2015г. - 176с.

19. Мылов Г.В. Технологическое обеспечение плотности межсоединений печатных плат / А.М. Медведев, П.В. Семенов // М: Горячая линия - Телеком, 2016. - 200с.

20.Мылов Г.В. Производство жестких и гибко-жестких печатных плат /А.М.Медведев, И.В. Дрожжин // М: Горячая линия - Телеком, 2016. - 268с.

21. Мылов Г.В. Научные основы проектирования межсоединений на печатных платах / А.М Медведев, П.В. Семенов, П.Н. Константинов // М: Горячая линия - Телеком, 2016. - 98с.

Статьи в изданиях, зарегистрированных в Роскомнадзоре

22. Мылов Г.В. Гибкие печатные платы. Преимущества и применения /А.М.Медведев //Компоненты и технологии. – 2007. - № 9. – С. 202- 208.

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

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

25. 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.

26. Описание работы на соискание премии Правительства РФ «Золотая идея» за достижение в области продукции военного назначения за 2008г. «Разработка интегрированного конструкторско-технологического комплекса серийного производства печатных плат для авионики и другой специальной техники нового поколения». АО «ГРПЗ». – Авторский коллектив, возглавляемый Мыловым Г.В. – начальник ПТК печатных плат АО «ГРПЗ»,– 2007. Рязань. – 470 с.

27. Мылов Г.В. Будущее технологий электрических межсоединений в электронном приборостроении / А.М. Медведев //Технологии в электронной промышленности. - 2012.- №6- С.-45-49.

28. Мылов Г.В. Иммерсионное золочение. Эффект черных контактных площадок / А.М.Медведев // Технологии в электронной промышленности. - 2012.- №4- С.16-18.
29. Мылов Г.В. Печатные платы. Причины коробления / А.М.Медведев // Технологии в электронной промышленности. - 2012.- №2- С.18-20.
30. Мылов Г. Печатные платы. Как и где делать? / П. Семенов, А. Сержантов // Технологии в электронной промышленности. - 2007. - №7. - С.4-7.
31. Мылов Г.В. Производство гибких и гибко-жестких печатных плат. Часть 1. Производство гибких печатных плат без металлизированных отверстий /А.М.Медведев, В.И.Люлина, Ю.А.Набатов, П.Семенов, А. Сержантов // Технологии в электронной промышленности. - 2008. - №3. - С.6-11.
32. Мылов Г.В. Производство гибких и гибко-жестких печатных плат. Часть 2. Производство гибких печатных плат с металлизированными отверстиями /А.М.Медведев, В.И.Люлина, Ю.А.Набатов, П.Семенов, А. Сержантов // Технологии в электронной промышленности. - 2008. - №4. - С.24-29.
33. Мылов Г.В. Производство гибких и гибко-жестких печатных плат. Часть 3. Нанесение покровного слоя /А.М.Медведев, В.И.Люлина, Ю.А.Набатов, П.Семенов, А. Сержантов // Технологии в электронной промышленности. - 2008. - №5. - С.32-40.
34. Мылов Г.В. Производство гибких и гибко-жестких печатных плат. Часть 4.1. Изготовление гибких и гибко-жестких многослойных печатных плат /А.М.Медведев, В.И.Люлина, Ю.А.Набатов, П.Семенов, А. Сержантов // Технологии в электронной промышленности. - 2008. - №6. - С.22-26.
35. Мылов Г.В. Производство гибких и гибко-жестких печатных плат. Часть 4.2. Изготовление гибких и гибко-жестких многослойных печатных плат /А.М.Медведев, В.И.Люлина, Ю.А.Набатов, П.Семенов, А. Сержантов // Технологии в электронной промышленности. - 2008. - №7 - С.24-31.
36. Мылов Г.В. Производство гибких и гибко-жестких печатных плат. Часть 5. Специальные виды обработки /А.М.Медведев, В.И.Люлина, Ю.А. Набатов, П.Семенов, А. Сержантов // Технологии в электронной промышленности. - 2008. - №8 - С.25-27.
37. Мылов Г.В. Производство гибких и гибко-жестких печатных плат. Часть 6. Специальные средства контроля и испытания печатных плат /А.М.Медведев, В.И.Люлина, Ю.А.Набатов, П.Семенов, А. Сержантов // Технологии в электронной промышленности. - 2009. - №1 - С.11-21.
38. Мылов Г.В. Производство гибких и гибко-жестких печатных плат. Часть 7. Базовые и вспомогательные материалы /А.М.Медведев, В.И.Люлина, Ю.А.Набатов, П.Семенов, А. Сержантов // Технологии в электронной промышленности. - 2009 - №2- С.22-28.
39. Мылов Г.В. Производственно-технического комплекс печатных плат на Государственном Рязанском приборном заводе. Состояние и перспективы /В.И.Люлина, Ю.А. Набатов // Технологии в электронной промышленности. - 2005. - №5.- С.18-20.

40. Мылов Г.В. Рязанский приборный завод - ваш надежный партнер в производстве электронной техники 4-5 поколения / Н.Андреев, В.Коробчак //Электронные компоненты. - 2001.- №5 С.41-42.
41. Мылов Г.В., Печатные платы. Требования для поверхностного монтажа /А.М.Медведев //Компоненты и технологии. - 2007. - №10. - С.164-168.
42. Мылов Г.В., Конструирование гибких и гибко-жестких печатных плат /А.М.Медведев //Компоненты и технологии. - 2008. - №6. - С.147-160.
43. Мылов Г.В. Требования к пластичности медной металлизации отверстий в печатных платах. «Покрyтия и обработка поверхности» - тезисы докладов /А.М.Медведев //Издательский центр Российского химико-технологического университета им.Д.И.Менделеева. - 2012.- С.12-13.
44. Мылов Г.В. Системная модель интеллектуальной системы автоматизированного проектирования и производства гибких многослойных плат /И.В.Дрожжин //Современные тенденции в образовании и науке: сборник научных трудов по материалам Международной научно-технической конференции 31 октября 2013г. : в 26 частях. Часть 25; М-во обр. и наук РФ. Тамбов: Изд-во ТРОО «Бизнес-Наука-Общество», 2013.- С.147.
45. Мылов Г.В., Печатные платы. Базовые материалы. Фольги /А.М.Медведев //ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕКТРОНИКИ. Технология, оборудование, материалы. - 2012 - №1 - С.12-18.
46. Мылов Г.В. Физические характеристики печатных плат /А.М.Медведев //ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕКТРОНИКИ. Технология, оборудование, материалы. - 2012 - №2 - С.22-30.
47. Мылов Г.В. Печатные платы. Современное состояние базовых материалов /А.М.Медведев, В.В. Можаров //ЭЛЕКТРОНИКА. Наука. Технология. Бизнес. Печатный монтаж. – 2011. – № 5. – С.148-162.
48. Мылов Г.В. Развитие технологий элементов электрических межсоединений в электронных системах / А.М. Медведев // ЭЛЕКТРОНИКА. Наука. Технология. Бизнес. Печатный монтаж. – 2012. – № 1. – С. 196-207.
49. Мылов Г.В. Заказчик и производитель / А.М. Медведев //ЭЛЕКТРОНИКА. Наука. Технология. Бизнес. Печатный монтаж. – 2007. – №5. – С.34-39.
50. Мылов Г.В. Печатные платы. Электрические свойства базовых материалов /А.М. Медведев //ЭЛЕКТРОНИКА. Наука. Технология. Бизнес. Печатный монтаж. – 2011. – №6. – С.150-157.
51. Мылов Г.В. Выбор базовых материалов для поверхностного монтажа /А.М. Медведев //ЭЛЕКТРОНИКА. Наука. Технология. Бизнес. – 2011. – №3. – С.30-32.
52. Мылов Г.В. Сопротивление изоляции в тонких зазорах / А.М. Медведев // Сборник статей международной научно- практической конференции « Развитие науки в XXI веке». Научно-информационный центр «Знание». Харьков. – 2016.– С.105-114/

Государственная регистрация программ для ЭВМ. (Федеральная служба по интеллектуальной собственности. Роспатент).

53. Мылов Г.В. Программа модификации управляющих файлов для сверловочного и фрезеровочного станков при конструкторско-технологической подготовке производства печатных плат на базе САПР «InCAM FRONTLINE» Регистрационный №2013615159 от 29.05.2013г.

54. Мылов Г.В. Программа модификации диаметров отверстий под диаметр сверл при конструкторско-технологической подготовке производства печатных плат на базе САПР «InCAM FRONTLINE» Регистрационный №2013615158 от 29.05.2013г.

55. Мылов Г.В. Подсистема расчета коэффициентов для корректировки усадки материала в гибко-жестких многослойных печатных платах. Регистрационный №2013617335 от 09.08.2013г.

Мылов Геннадий Васильевич

**МОДЕЛИ, МЕТОДЫ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ
СРЕДСТВА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ТРЕХМЕРНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МЕЖСОЕДИНЕНИЙ
В СИСТЕМАХ АВИОНИКИ**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук