

На правах рукописи



Фам Вьет Ань

**ДОПУСКОВЫЕ МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И КОНТРОЛЯ
ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ПРЕЦИЗИОННЫХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ
РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ**

Специальность 05.12.04

«Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2016

Работа выполнена на кафедре «Конструирование, технология и производство радиоэлектронных средств» Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

Научный руководитель: **Дембицкий Николай Леонидович**
кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструирование, технология и производство радиоэлектронных средств» Московского авиационного института (Национального исследовательского университета)

Официальные оппоненты: **Зинченко Людмила Анатольевна**
доктор технических наук, профессор кафедры «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры» МГТУ им. Н. Э. Баумана

Якимов Виктор Леонидович
кандидат технических наук, заместитель начальника кафедры приемных устройств и радиоавтоматики Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург

Ведущая организация: **ОАО (Открытое Акционерное Общество) «РТИ»**

Защита состоится «06» декабря 2016 г. в 15:30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.03 при Московском авиационном институте по адресу: 125993, Москва А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Московского авиационного института (125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4) и на сайте <http://www.mai.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.125.03, д.т.н., проф.

М.И. Сычѐв

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования:

Печатный узел является важнейшей сборочной единицей электронной аппаратуры, от которой во многом зависит качество функционирования радиотехнического устройства. Поэтому не ослабевает постоянный интерес к исследованиям и разработкам конструкторско-технологических проблем проектирования и производства печатных плат (ПП). В настоящее время при создании ПП на первое место выходят требования к повышению уровня плотности монтажа при безусловном обеспечении надежности, помехозащищенности и электрических параметров платы.

Проектирование прецизионных печатных плат следует рассматривать как часть комплексного этапа проектирования печатного узла, при котором только совместное рассмотрение схмотехнических, конструкторских и технологических задач позволит достичь успеха, создать работоспособное устройство. При этом все более актуальным становится исследование влияния технологических факторов на качество и надежность узлов РЭА на ПП. Отклонение параметров технологического процесса от номинальных значений приводит к появлению брака. Следствием нарушения технологических норм становятся скрытые дефекты печатных плат, которые обнаруживаются на поздних этапах производства аппаратуры. Такие дефекты приводят к резкому увеличению стоимости изделия. Дефекты нарушения допусков на конструктивно-технологические параметры могут проявляться и в процессе эксплуатации изделия, что снижает его надежность и может приводить к непоправимым последствиям (авариям сложной и дорогостоящей техники).

В настоящее время влияние погрешностей при проектировании быстродействующих цифровых устройств на прецизионных печатных платах определяется эмпирическими методами путем тестирования образцов на производстве. Такой подход приводит к значительному растягиванию времени проектирования, удорожанию изделий, снижению надежности радиотехнических устройств.

Прогнозирование и контроль погрешностей изготовления прецизионных ПП поможет разработчику узла РЭА адекватно оценивать надежность готового изделия, а технологу обеспечивать качество производства.

Целью диссертационной работы является повышение *надежности* радиотехнических устройств методами прогнозирования и оперативного контроля погрешностей конструктивно-технологических параметров на стадиях проектирования и производства прецизионных печатных плат.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решаются **следующие задачи:**

1. Исследование влияния конструктивно-технологических погрешностей на электрофизические параметры печатных проводников с целью создания допусковых методов прогнозирования и контроля показателей надежности прецизионных печатных плат на этапах их проектирования и производства.

2. Разработка методов прогнозирования вероятности выхода волнового сопротивления печатных проводников узлов РЭА за пределы производственных допусков. Целью разработки является повышение надежности изготовленных узлов РЭА с учетом конструктивных и технологических погрешностей ПП.

3. Создание способов неразрушающего контроля погрешностей производства ПП на основе электро-радиоизмерений параметров проводников, которые позволят упростить и удешевить проверку конструктивно-технологических параметров ПП на соответствие требованиям допусков. Целью разработки являются экономичные способы оперативного контроля прецизионных ПП.

4. Разработка методов для прогнозирования вероятности смещения компонентов при сборке за границы допуска с целью создания алгоритмов и программ оптимизации конструктивных параметров прецизионных ПП и выбора оборудования сборочно-монтажных производств для изготовления надежных узлов РЭА на прецизионных ПП.

Научная новизна предлагаемого в диссертации подхода состоит в том, что разработаны методы, математические модели и алгоритмы, позволяющие дополнить процесс верификации конструкций радиотехнических устройств прогнозированием

и оперативным контролем влияния производственных погрешностей на показатели надежности прецизионных ПП.

Признаками научной новизны обладают следующие **положения, выносимые на защиту:**

1. *Методика проектирования ПП*, дополняющая существующий подход к верификации конструкции расчетом вероятности нарушения производственных допусков на волновое сопротивление печатных проводников, что *позволяет* при проектировании быстродействующих цифровых устройств учитывать возможности производства изделия с заданным уровнем надежности.

2. *Способ* неразрушающего контроля погрешности ширины печатных проводников на основе рефлектометрического метода измерения волнового сопротивления, снижающий трудоемкость существующих методов контроля.

3. *Способ* неразрушающего контроля смещения слоев многослойных ПП на основе рефлектометрического метода измерения волнового сопротивления, снижающий трудоемкость и стоимость существующих методов контроля.

4. *Алгоритм* прогнозирования вероятности дефектов установки компонентов на поверхности прецизионных ПП, позволяющий автоматизировать расчет вероятности смещения выводов компонентов относительно контактных площадок за границы допуска, предоставляя разработчику узлов РЭА объективные оценки возможностей сборочно-монтажного производства при конструировании посадочных мест компонентов.

5. *Алгоритм* оптимизации конструкции посадочных мест компонентов с учетом факторов надежности и качества узлов РЭА при монтаже на поверхности, позволяющий находить оптимальное соотношение между требованиями погрешности установки компонентов в пределах допусков и обеспечением максимальной плотности монтажа.

Практическая значимость:

Разработанные в диссертации методы и алгоритмы при проектировании, способы контроля при производстве прецизионных ПП позволяют:

- *разработчикам* узлов РЭА повысить уровень надежности конструкций ПП при постоянном росте плотности монтажа и переходе к 5-7 классам точности ПП за счет дополнения методик проектирования учетом влияния погрешностей производства на вероятность обеспечения заданных допусков на электрические и конструктивные параметры прецизионных ПП;

- повысить уровень надежности конструкций ПП при мелкосерийном и опытном производстве, расширив возможности применения операций контроля конструктивно-технологических параметров ПП за счет предложенных экономичных и эффективных способов неразрушающего контроля, в 4-5 раз снижающих трудоемкость контроля по сравнению с разрушающим контролем и значительно снижающих затраты на внедрение контроля совмещения слоев многослойных печатных плат.

Реализация результатов диссертации:

Разработанные методы, алгоритмы и программы внедрены в учебном процессе кафедры 404 МАИ (НИУ) и в ОАО «РТИ».

Методология и методы исследований:

Построение параметрической и количественной модели для оценки ухода конструктивно-технологических параметров радиотехнических устройств на ПП за пределы допусков выполняется методами теории параметрической надежности и точности. Разработка технологических способов неразрушающего контроля качества ПП выполняется с применением метода рефлектометрии высокочастотных линий связи. Для разработки математической модели задачи оптимизации используется теория математического программирования. Исследования адекватности предлагаемых в диссертации методов, моделей и алгоритмов выполнялись моделированием на промышленной САПР, проверкой полученных результатов на примере конструкции узла РЭА, разработкой специального программного обеспечения, реализующего предложенные методы и алгоритмы.

Достоверность полученных результатов подтверждается:

- Проверкой точности предложенных математических моделей сравнением с результатами расчетов, полученными с помощью промышленной автоматизированной системы моделирования СВЧ устройств.
- Программной реализацией разработанных математических методов, моделей и алгоритмов.
- Проверкой разработанных моделей, методов и алгоритмов на примерах.

Апробация работы:

Основные положения диссертационной работы докладывались, обсуждались на 5 научных конференциях.

Публикации:

Основные результаты работы опубликованы в 13 печатных работах, в том числе 5 в журналах из списка ВАК, 5 в сборниках тезисов докладов, а также в 3 заявках на изобретения.

Личный вклад автора: Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причем вклад диссертанта был определяющим. Все представленные в диссертации результаты получены лично автором.

Структура и объем диссертации: Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения. Она содержит 175 страниц машинописного текста, включающего 54 рисунка и список литературы из 105 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, её научная новизна и практическая значимость, определены цели и задачи исследований и разработок. Дана общая характеристика диссертационной работы.

Глава 1. Проведенный анализ разработок и исследований в области технологий производства устройств на ПП позволяет сделать вывод: эта область практической радиотехники находится в непрерывном, ускоренном развитии. Тенденции развития определяется требованиями повышения уровня интеграции и

возрастающей роли быстродействующих цифровых устройств, прогрессом элементной базы, совершенствованием технологического оборудования, появлением новых материалов. На фоне прогресса технологий ПП наблюдается непрерывный рост плотности монтажа и уменьшение размеров компонентов, которые предъявляют повышенные требования к показателям качества технологического процесса.

При переходе на прецизионные технологии ПП (классы точности 5 и выше) возрастает вероятность брака и снижения надежности узлов РЭА на ПП из-за нарушений условий передачи сигналов. На целостность сигнала быстродействующих цифровых устройств сильное влияние оказывают нарушения допусков на волновое сопротивление печатных проводников, связанных с погрешностями производства ПП. Такие дефекты трудно прогнозируемы и определимы, поэтому особенно опасны. Становится актуальной задача дополнения существующих методик проектирования прецизионных ПП процедурами анализа влияния *производственных погрешностей* на волновое сопротивление сигнальных межсоединений, которые позволили бы анализировать и прогнозировать вероятность обеспечения заданных допусков с целью определения достижимости требуемых показателей надежности при выбранном технологическом процессе (ТП) изготовления ПП.

На этапе производства высока вероятность нарушения конструктивно-технологических параметров прецизионных ПП. Для повышения показателей качества ПП необходимо осуществлять контроль ТП. Анализ и выявление погрешностей изготовления ПП требует применения очень дорогого оборудования, а разрушающие способы контроля резко снижает производительность ТП, что создает проблемы для мелкосерийных и опытных производств. Становится *актуальной задачей* разработки простых и эффективных методов оперативного контроля ПП. *Целью* разработки является снижение временных и финансовых затрат при контроле погрешностей производства прецизионных ПП.

В условиях уменьшения размеров компонентов и проектных норм ПП на снижение надежности и качества изделий значительное влияние оказывают

операций сборки. Поэтому при разработке конструкции узлов РЭА на ПП весьма *актуальна* задача прогнозирования и расчета параметров точности сборочно-монтажных операций. Необходимо найти компромиссный (оптимальный) вариант между уровнем надежности устройства и снижением его габаритов за счет повышения плотности монтажа.

На основе проведенного анализа проблем проектирования и производства радиотехнических устройств для обработки цифровой информации сделаны выводы о необходимости проведения исследований в области допускового контроля и прогнозирования погрешностей прецизионных ПП. Определены цели и задачи актуальных исследований и разработок.

Глава 2. В разработке конструкций ПП для быстродействующих устройств обработки цифровой информации используются методики, основанные на последовательном, циклическом подходе, в котором инженер схемотехник и конструктор совместно решают задачу проектирования. С переходом на прецизионные технологии и ростом быстродействия все более значительной становится зависимость параметров цифровых устройств от технологических процессов изготовления сигнальных проводников. *Целью* проведенных в главе 2 исследований является разработка методики прогнозирования уровня надежности прецизионных ПП по критерию обеспечения производственных допусков на волновые сопротивления печатных проводников.

С помощью программы моделирования ADS2008 проведено исследование точности предлагаемых в технической и научной литературе аналитических зависимостей волнового сопротивления проводников Z от геометрических параметров линий связи толщины диэлектрика h , ширины проводника w , толщины металлизации t и эффективной диэлектрической проницаемости платы ϵ_{eff} .

Показано, что выбранные для расчетов формулы могут быть использованы для анализа производственных погрешностей, т.к. имеют точность не хуже 1% в диапазоне значений параметров ПП. Пример анализа зависимостей волнового сопротивления от конструктивного параметра микрополосковой линии (ширины

проводника) приведен на рисунке 1. Аналогичные зависимости были исследованы и для других типов линий связи.

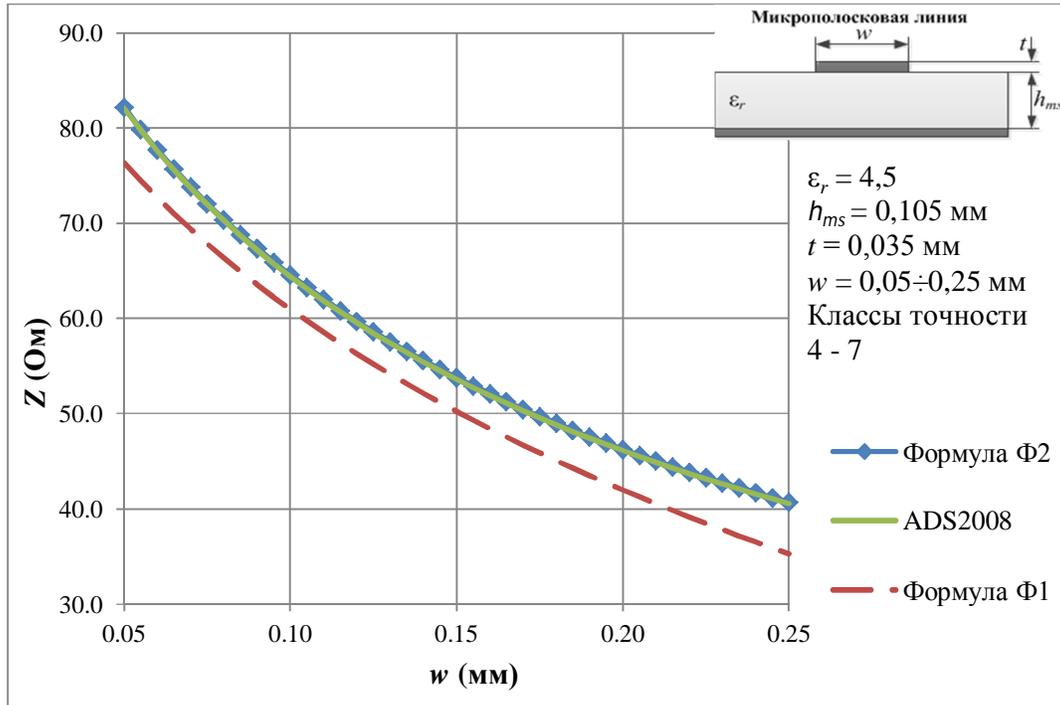


Рисунок 1 - Зависимость волнового сопротивления (Z) от ширины проводника (w) для микрополосковой линии

На основе теории параметрической надежности получены формулы для расчета коэффициентов влияния конструктивных параметров q_i на погрешность волнового сопротивления печатных проводников $A_i = \left[\frac{\partial f}{\partial q_i} \cdot \frac{q_i}{f} \right]$.

Относительная погрешность волнового сопротивления, как случайная величина, характеризуется шириной поля рассеяния:

$$\delta \left(\frac{\Delta Z}{Z} \right) = \sqrt{\sum_{i=1}^n A_i^2} \cdot \delta \left(\frac{\Delta q_i}{q_i} \right), \quad (1)$$

где $\delta \left(\frac{\Delta q_i}{q_i} \right)$ – половина поля допуска относительной погрешности $\frac{\Delta q_i}{q_i}$ параметра q_i .

Показателем надежности ПП является вероятность попадания относительной погрешности волнового сопротивления проводников ПП в поле допуска:

$$P = \prod_{i=1}^n p_i, \quad (2)$$

где p_i – вероятность попадания в поле допуска i -го проводника, n – количество проводников.

На основе полученных аналитических зависимостей разработана методика расчета показателя надежности ПП (рисунок 2), которая позволяет в процессе проектирования цифровых узлов РЭА на прецизионных ПП осуществлять прогнозирование возможностей производства ПП по обеспечению требуемых допусков на волновое сопротивление. Предлагаемый подход в отличие от существующей методики проектирования плат с контролируемым волновым сопротивлением позволяет проектировщику ПП давать оценку конструкции с позиций параметрической надежности.

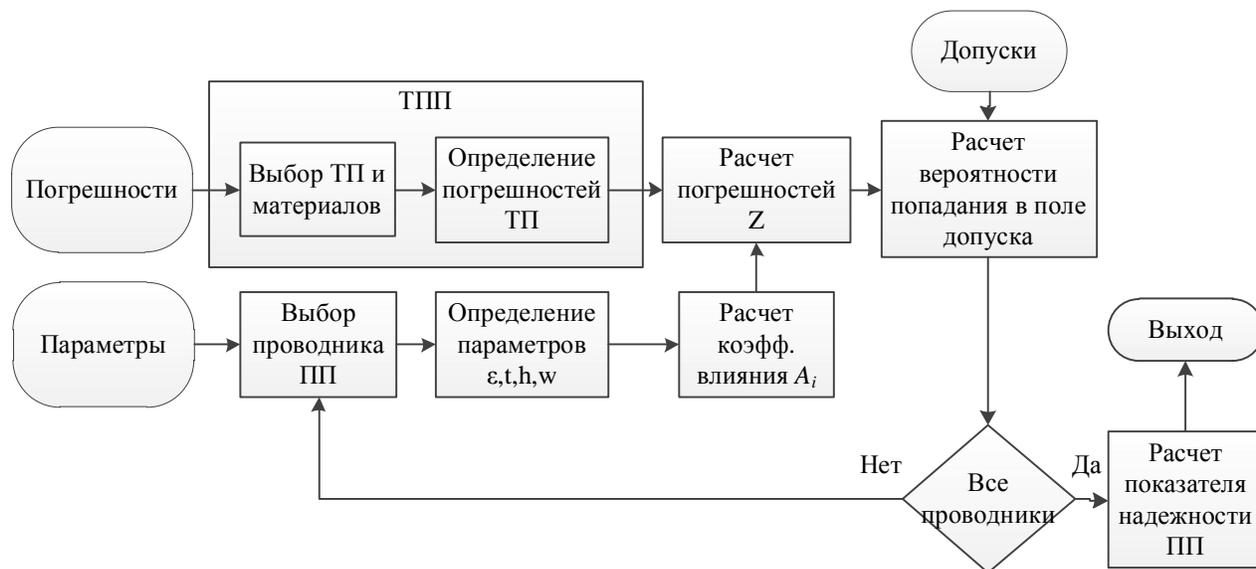


Рисунок 2 - Оценка ТП по критерию параметрической надежности

Глава 3 посвящена разработке методов неразрушающего контроля погрешностей конструктивно-технологических параметров ПП. Этап контроля является необходимым в технологии прецизионных ПП, так как снижает риски выпуска ненадежных изделий. Целью разработки новых методов неразрушающего контроля является снижение стоимости и повышение производительности контрольных операций.

Изменение ширины проводников в результате подтравов является одной из технологических проблем производства прецизионных ПП. Для создания стабильных технологических процессов необходим постоянный контроль операций

травления. В диссертации предложен способ неразрушающего контроля ширины проводников измерением отклонений волнового сопротивления проводника на тестовом образце ПП с помощью рефлектометра. Технический результат заключается в снижении трудоемкости и повышении оперативности контроля погрешности ширины проводников после формирования токопроводящего рисунка слоев ПП без необходимости визуальных измерений ширины проводников.

Измерения проводятся на тестовых образцах. Относительная погрешность ширины проводника тестового образца вычисляется с помощью формулы

$$\delta_w = \frac{\Delta w}{w} \approx \frac{\Delta Z}{Z \cdot A_w} = \delta_Z \cdot A_w^{-1}, \quad (3)$$

где δ_Z – относительная погрешность измеренного волнового сопротивления, A_w – коэффициент влияния погрешности ширины проводника на погрешность волнового сопротивления.

Контроль совмещения слоев многослойных ПП (МПП) является дорогостоящим процессом, который требует применения специального оборудования и сложной технологической оснастки. В предлагаемом способе дорогостоящие и трудоемкие операции с применением машинного зрения или разрушающего контроля заменяются измерениями электрофизических параметров.

В слоях металлизации тестируемой многослойной печатной платы формируются тест-купоны в виде N пар отрезков проводников, расположенных в соседних слоях металлизации и смещенных на величину Δ_i ($i \leq N$) относительно друг друга (рисунок 3).

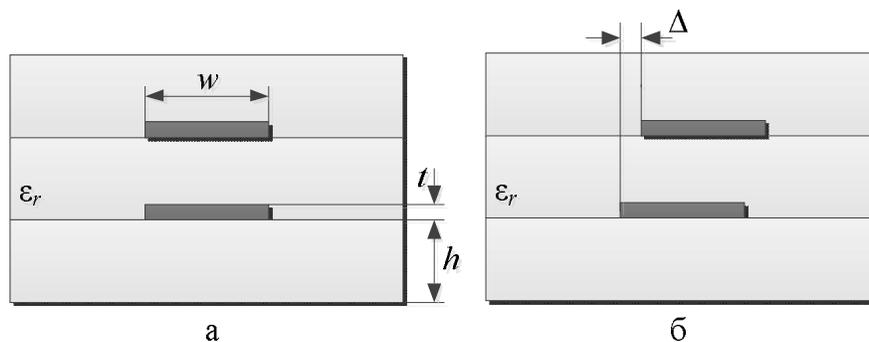


Рисунок 3 - Конструкция линии проводников: а) сечение проводников без смещения; б) сечение проводников при смещении Δ

При сдвиге слоев происходит изменение волнового сопротивления каждой пары, которое регистрируется с помощью рефлектометра. Определяется пара с минимальным волновым сопротивлением. Сдвиг проводников выбранной пары показывает величину рассовмещения слоев.

Глава 4. При сборке устройств на прецизионных ПП усиливается влияние смещения компонентов на надежность монтажа. Алгоритм прогнозирования вероятности дефектов использует разработанные в диссертации модели расчета размеров посадочных мест и правила определения недопустимых состояний при монтаже печатных узлов. Основными процедурами алгоритма, являются: выбор размеров КП из базы данных компонентов, расчет допусков с помощью логической обработки правил сборки, расчет погрешностей установки компонентов и вероятности нарушения допусков.

Относительная погрешность смещения компонента рассчитывается по формуле:

$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{\varphi \in F} \delta_{\varphi}^2}, \quad (4)$$

где δ_{φ} - допуски на относительные смещения по различным факторам φ из множества факторов F , влияющих на расположение вывода по отношению к контактной площадке. Среди выбранных факторов конструктивные погрешности ПП, неточности формовки выводов и ошибки оборудования.

Вероятность отклонения центра вывода за допуск для компонента:

$$q = 1 - 2 \cdot \Phi\left(\frac{Del}{\sigma}\right), \quad (5)$$

где Φ - функция Лапласа, σ - среднеквадратичная относительная погрешность смещения компонента, Del – допуск на предельное отклонение положения вывода компонента. Вероятность нарушения качества сборки по всему узлу рассчитывается по формуле:

$$\bar{Q} = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - q_i), \quad (6)$$

где m - количество компонентов, устанавливаемых автоматом.

Разработанный алгоритм использован в программном комплексе (рисунок 4), позволяющем формировать у разработчика ПП адекватную модель для контроля принимаемых решений при выборе конструктивно-технологических параметров ПП и технологического оборудования сборочно-монтажных операций.



Рисунок 4 - Структура программного комплекса прогнозирования надежности сборки

На базе метода динамического программирования и алгоритма проверки допусков на сборку компонентов был разработан алгоритм оптимизации конструкций контактных площадок по критерию максимальной плотности монтажа.

Задача оптимизации: найти оптимальное назначение уровней плотности монтажа $K^* = (k_1^*, k_2^*, \dots, k_m^*)$ для компонентов устройства, по максимуму значения суммарного, освобождаемого ресурса магистралей между КИП посадочных мест компонентов:

$$\Psi^* = \Psi(K^*) = \max \Psi(K) = \max \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^3 \frac{(E_i - x_{ij})k_{ij}}{t}, \quad (7)$$

где E_i - шаг выводов i -го компонента, x_{ij} - ширина КП посадочного места i -го компонента при выборе j -го уровня плотности монтажа, k_{ij} - бинарная функция назначения уровня плотности монтажа для i -го компонента,

$$k_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если выбран } j\text{-го уровня плотности монтажа} \\ 0, & \text{если } j\text{-й уровень плотности монтажа не выбран} \end{cases}$$

t - минимальный шаг трассировки соединений, равный сумме минимальной ширины проводника и минимального зазора между элементами топологии ПП.

Задавая предельную вероятность $Q_{\text{доп}}$ превышения допуска на смещение компонентов, можно записать ограничение задачи оптимизации:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^3 k_{ij} q_{ij} \leq Q_{\text{доп}}, \quad (8)$$

где q_{ij} – вероятность нарушения допуска при выборе j -го уровня плотности монтажа для i -го компонента.

В данной постановке задача оптимизации была решена классическим методом динамического программирования.

При разработке алгоритма оптимизации введено понятие кластера частного решения, который является моделью рекуррентного соотношения:

$$\Psi_k(Q) = \max_k [\Psi_{k-1}(Q_{k-1}) + \rho_k(q_k)], \quad (9)$$

где $Q_{k-1} + q_k \leq Q \leq Q_{\text{доп}}$, заданного на k -м шаге алгоритма оптимизации при ограничении $\sum_{i=1}^k q_i \leq Q$, ($0 \leq Q \leq Q_{\text{доп}}$).

Основные результаты диссертационной работы:

1. На базе инженерных методов расчета волнового сопротивления печатных проводников и методов параметрической надежности радиотехнических устройств *разработана методика*, расширяющая возможности существующего подхода к проектированию прецизионных ПП быстродействующих цифровых устройств в направлении учета влияния технологических процессов на надежность ПП и позволяющая:

- на этапе проектирования прецизионных ПП для быстродействующих

устройств цифровой обработки информации прогнозировать вероятность выполнения требований допусков на погрешности волнового сопротивления печатных проводников;

- принимать решение о применимости технологического процесса изготовления ПП для получения надежных быстродействующих цифровых устройств.

2. *Предложен способ* неразрушающего контроля ширины проводников с помощью измерения отклонений волнового сопротивления проводника на тестовом образце печатной платы, который не требует проведения измерений с помощью рентгеноскопии или разрушающего контроля, что значительно снижает трудоемкость контроля.

3. *Предложен способ* неразрушающего контроля смещения слоев МПП с помощью измерения волнового сопротивления пар проводников на тест-купоне ПП, в котором не требуется проведения визуальных измерений смещения слоев МПП и систем машинного зрения, что отличает предлагаемое техническое решение от существующих дорогостоящих и трудоемких способов контроля.

4. *Разработан алгоритм* прогнозирования дефектов сборки, позволяющий с использованием методов расчета размеров посадочных мест и правил определения недопустимых состояний при монтаже печатных узлов при проектировании ПП:

- связывать вероятность нарушения требований допусков на установку компонентов в посадочные места с погрешностями сборки;
- формировать у разработчика ПП адекватную модель для контроля принимаемых решений при выборе параметров посадочных мест.

5. На основе метода динамического программирования и предложенного алгоритма расчета показателей надежности паяных соединений *разработан алгоритм* оптимизации размеров контактных площадок для монтажа компонентов на поверхности ПП, позволяющий находить оптимальное соотношение между требованиями допустимой надежности устройств и максимальной плотности монтажа.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных перечнем ВАК:

1. Фам, Вьет Ань. Оптимизация выбора оборудования для производства бортовых радиотехнических комплексов / Н.Л. Дембицкий, А.В. Луценко, Фам Вьет Ань. – Электрон. журн. – Труды МАИ, 2015 - № 81. – режим доступа к журн.: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=57879>.

2. Фам, Вьет Ань. Экспертная система технологической подготовки процесса сборки и монтажа узлов бортовой радиоаппаратуры / Н.Л. Дембицкий, А.В. Луценко, Фам Вьет Ань. – Электрон. журн. – Труды МАИ, 2015 - № 83. – режим доступа к журн.: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=62213>.

3. Фам, Вьет Ань. Расчет рисков в автоматизированной системе покрытия комплексов радиоаппаратуры унифицированными блоками / Н.Л. Дембицкий, Д.Н. Дембицкий, Фам Вьет Ань // Авиакосмическое приборостроение. – 2014. - № 8. - С. 3-9.

4. Фам, Вьет Ань. Разработка регрессионной модели для расчета площади печатной платы функциональной ячейки / Зыонг Дык Ха, Фам Вьет Ань – Электрон. журн. – Труды МАИ, 2010 - № 41. – режим доступа к журн.: <https://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=23795>.

5. Фам, Вьет Ань. Учет влияния погрешностей технологического процесса на выход годных при изготовлении высокочастотных устройств на печатных платах / Н.Л. Дембицкий, Фам Вьет Ань // Доклады ТУСУРа. – 2016. – том 19. № 1. - С. 9-13.

Заявки на получение патента:

6. Фам, Вьет Ань. Способ контроля отклонений ширины проводников печатной платы от номинальных значений / Н.Л. Дембицкий, Фам Вьет Ань // Заявка № 2016115784. Зарегистрирована 22.04.2016 г.

7. Фам, Вьет Ань. Устройство контроля технологической погрешности ширины проводников печатной платы / Н.Л. Дембицкий, Фам Вьет Ань, А.М. Петраков // Заявка № 2016115787. Зарегистрирована 22.04.2016 г.

8. Фам, Вьет Ань. Тест-купон и способ контроля погрешностей совмещения слоев многослойной печатной платы / Н.Л. Дембицкий, Фам Вьет Ань, А.М. Петраков // Заявка № 2016126038 Зарегистрирована 29.06.2016 г.

В других изданиях:

9. Фам, Вьет Ань. Программный комплекс оптимального выбора технологического оборудования для производства радиоаппаратуры [Текст] / Фам Вьет Ань // 13-й Международной конференции «Авиация и Космонавтика - 2014». 17-21 ноября 2014 года. Москва. Тезисы. – СПб.: Мастерская печати, 2014. - С. 468-469.

10. Фам, Вьет Ань. Улучшение показателей сборочно-монтажных операций производства РЭА методами программно-алгоритмического моделирования [Текст] / Фам Вьет Ань // 14-й Международной конференции «Авиация и Космонавтика - 2015». 16-20 ноября 2015 года. Москва. Тезисы. – Типография «Люксор», 2015. - С. 286-287.

11. Фам, Вьет Ань. Интерактивные программные средства настройки задачи оптимизации технологического процесса [Текст] / Фам Вьет Ань // Московская молодёжная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике - 2015». 21-23 апреля 2015 года. Москва. Сборник тезисов докладов. – М.: МАИ, 2015. - С. 172-173.

12. Фам, Вьет Ань. Оптимизация управления рисками в проектировании радиоэлектронной аппаратуры / Д.Н. Дембицкий, Фам Вьет Ань // Конкурс научно-технических работ и проектов «Молодежь и будущее авиации и космонавтики - 2014». 17-21 ноября 2014 года. Москва. Сборник аннотаций. - М.: МАИ, 2014. - С. 157-158.

13. Фам, Вьет Ань. Интерактивные программные средства настройки задачи оптимизации технологического процесса [Текст] / Фам Вьет Ань, Ву Хонг Фук // Гагаринские чтения – 2016: XLII Международная молодёжная научная конференция. Сборник тезисов докладов. – М.: МАИ, 2016. - С. 551-552.