

*На правах рукописи*

**Антипов Владимир Анатольевич**

**МУЛЬТИАГЕНТНЫЕ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ  
СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ РЭА**

Специальность: 05.11.16 –  
«Информационно-измерительные и управляющие системы»  
(в технических системах).

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
доктора технических наук

Рязань 2007

Работа выполнена в Федеральном государственном учреждении высшего профессионального образования "Рязанский государственный радиотехнический университет"

|                       |  |
|-----------------------|--|
| Научный консультант   | – доктор технических наук, профессор<br>Жулёв Владимир Иванович  |
| Официальные оппоненты | – доктор технических наук, профессор<br>Самойлов Леонтий Константинович;<br><br>– доктор технических наук, профессор<br>Сапельников Валерий Михайлович;<br><br>– доктор технических наук, профессор<br>Одинокоев Валерий Фёдорович |
| Ведущая организация   | – Российский государственный университет<br>нефти и газа им. И.М. Губкина, г. Москва   |

Защита состоится 19 октября 2007 г., в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 212.211.04 по присуждению учёной степени доктора технических наук в Рязанском государственном радиотехническом университете по адресу: 39005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1, тел (4912) 92-03-48.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке РГРТУ.

Автореферат разослан " \_\_ " \_\_\_\_\_ 2007 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
к.т.н., доцент

А.Г. Борисов.

**Актуальность темы.** Потребность современных предприятий в быстрой реакции на изменения во внешней среде, к разнообразию и высокому качеству выпускаемой продукции при малых размерах партий привели к появлению новой парадигмы организации производства — интеллектуальным распределённым производственным системам (IDMS). Эта парадигма требует информационной интеграции предприятия, распределенного управления, способности к взаимодействию в гетерогенных окружающих средах, открытой и динамичной структуры, сотрудничества, интеграции людей с программным обеспечением и аппаратными средствами, масштабируемости и толерантности к ошибкам.

В многообразии проблем, возникающих при проектировании таких систем, можно выделить класс задач, касающийся контроля качества выпускаемой продукции. В настоящее время, как в нашей стране, так и за рубежом, ведется интенсивная работа над созданием методов проектирования систем менеджмента качества (СМК) в соответствии со стандартами ISO 9000. Одной из важных составляющих СМК является система контроля качества (СКК) продукции, выпускаемой по заданной технологии. Эффективность СКК существенно зависит от её объективности и своевременности вмешательства в контролируемый процесс, что, в свою очередь, определяется тем, насколько адекватно и оперативно отображает реальную ситуацию действующая система технического контроля и диагностики (СТКД).

Новая организация производства определяет новые требования к СТКД. На сегодняшний день создание СТКД, отвечающей требованиям парадигмы интеллектуального распределённого производства, разработка теоретических и методологических основ её построения является крайне важной и актуальной задачей. В данной работе предлагается новый подход к построению систем технического контроля и диагностики радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) в процессе её производства — мультиагентные информационно-измерительные системы технического контроля и диагностики (МИИСКД).

Первоначальная концепция создания информационно-измерительных систем (ИИС) как нового класса средств информационно-измерительной техники была сформулирована в начале 60-х годов. В основу построения ИИС уже в то время была положена системная организация совместной автоматической работы средств сбора, обработки и передачи количественной информации. В результате были созданы ИИС, которые относят к первому поколению. Дальнейшее развитие ИИС — второе (70-е годы) и третье (80–90-е годы) поколения, в основном, связывают с развитием вычислительной техники и стандартных системных интерфейсов. Теоретические основы и принципы построения информационно-измерительных систем были заложены научными коллективами, руководимыми Ф. Е. Темниковым, К. Б. Карандеевым, П. П. Орнатским, П. М. Цапенко, А. М. Мелик-Шахназаровым, Э. И. Цветковым, Т. М. Алиевым, П. В. Новицким и другими известными специалистами в области информационно-измерительной техники. Целостность ИИС, как основное системное требование, обеспечивалась централизованным, а затем иерархическим управлением.

Широкое внедрение на современных предприятиях-изготовителях РЭА стандартов ISO 9000, ISO 10303, ERP требует интенсивного информационного взаимодействия между компонентами СТКД для достижения общей цели — обеспечения высокого качества выпускаемой продукции. Основной трудностью информационной интеграции является гетерогенность тестового и инспекционного оборудования, а отсутствие стандартных, унифицированных методов информационного взаимодействия ставит эту проблему перед производителями РЭА на первый план. Создание ИИС, отвечающих требованиям современного производства, связано с использованием методов и средств искусственного интеллекта. Предлагаемые парадигмы интеллектуальных производственных систем в той или иной форме используют метафору агента. В настоящее время нет единого определения для термина "агент", который является и техническим понятием и метафорой. Можно определить понятие агента как компонент программного обеспечения и/или аппаратных средств, обладающий автономией, знаниями, способностью к коммуникации и сотрудничеству с другими агентами, направленными на достижение общей цели. Таким образом, агенты могут рассматриваться как объекты производственной системы и, в частности, объекты МИИСКД.

В данной работе рассматривается методология построения МИИСКД, агентами-учредителями которой являются тестовые и инспекционные оборудование. При этом само тестовое и инспекционное оборудование, являясь локальными ИИС, строится также как мультиагентные системы, что обеспечивает концептуальное единство в проектировании. Целостность системы определяется некоторой организующей общностью\*. В традиционных ИИС организующей общностью является процесс управления, основанный на целевых критериях. Способом проявления организующей общности, делающей МИИСКД системой, является способность агентов-учредителей к взаимодействию на домене сотрудничества. К свойствам МИИСКД, которые связаны с его целостностью, можно отнести: единую цель, единую сетевую инфраструктуру, единый материальный поток. Виртуальный характер системы определяется тем, что организующей общностью является домен сотрудничества, реализованный в виде онтологии технического контроля и диагностики (ОТКД), то есть в виде общности, не имеющей физического воплощения.

Предлагаемый новый подход к построению СТКД порождает ряд задач теоретического, методологического и организационного плана, и ряд новых проблем.

**Объект исследования.** Объектом исследования является информационно-измерительная система технического контроля и диагностики процесса производства узлов РЭА ответственного назначения, построенная как мультиагентная система.

**Предмет исследования.** Предметом исследования является программно-аппаратное, информационное и организационное обеспечение МИИСКД.

**Цель работы.** Целью работы является разработка теоретических и методологических основ построения МИИСКД и их метрологического обеспечения для решения задач повышения эффективности управления качеством производства РЭА ответственного назначения.

Для достижения поставленной цели решались следующие **основные задачи**:

1. Анализ факторов, формирующих требования и основные признаки нового подхода к построению ИИС, используемых для контроля и диагностики при производстве РЭА ответственного назначения.

2. Разработка мультиагентной модели, методологии анализа и проектирования МИИСКД. Выбор и обоснование модели взаимодействия агентов-учредителей, разработка коммуникационного протокола.

3. Разработка семантической модели домена контроля и диагностики, а также схем (моделей) сообщений о результатах контроля качества РЭА, поступающих от тестовых и инспекционных систем.

4. Разработка и анализ алгоритмов выбора оптимальной стратегии тестирования и размещения тестового и инспекционного оборудования МИИСКД в многооперационном процессе производства РЭА.

5. Разработка принципов построения и методики проектирования мультиагентной тестовой системы.

6. Разработка методологии моделирования и предварительного анализа погрешности измерительного канала Физического Измерительного Агента (ФИ\_А). Разработка и исследование операционной части многофункционального измерительного канала ФИ\_А с программно-настраиваемой структурой.

7. Разработка и исследование методов самокоррекции и самонастройки измерительного канала ФИ\_А, направленных на повышения точности, метрологической надёжности и быстродействия.

**Методы исследования.** Методы исследования, используемые в данной работе, объединяются на основе системного подхода к решаемой проблеме. Используется аппарат, принципы и основные положения теории измерений, метрологии, теории вероятностей, идентификации и оптимизации, дифференциального и интегрального исчисления, объектно-ориентированного анализа, логико-алгебраических моделей.

---

\* Ю.А. Шрейдер, А.А. Шаров. Системы и модели – М.: Радио и связь, 1982. – 152 с., ил. – (Кибернетика).

### **Научная новизна.**

1. Впервые предложена методология построения мультиагентной модели информационно-измерительной системы технического контроля и диагностики. Разработаны метамодели модельного представления МИИСКД, что даёт возможность провести её анализ и проектирование как мультиагентной системы.

2. Предложена коммуникационная модель взаимодействия агентов-учредителей системы и заинтересованных агентов внешней среды на домене сотрудничества, основанная на XML-сообщениях и Посреднике, позволяющая рассматривать Intranet как распределённую вычислительную платформу мультиагентной ИИС и использовать коммуникационные Internet-технологии, обеспечивающие надёжную передачу данных.

3. Предложен теоретико-множественный подход к формальному отображению семантики домена контроля и диагностики на структуру XML-сообщений. На его основе разработана структура XML-сообщений о результатах операций контроля и диагностики и оценках метрологического состояния тестового и инспекционного оборудования.

4. Разработан метод оптимизации размещения тестового и инспекционного оборудования в многооперационном процессе изготовления РЭА, позволивший специфицировать программное обеспечение класса DfT (Design for Test).

5. Предложены принципы построения мультиагентной тестовой системы (на примере анализатора производственных дефектов – АПД). В приведённой таксономии агентов-учредителей системы выделен класс Физических Измерительных Агентов, определяющий функциональные возможности системы и инкапсулирующий в себе все необходимые программно-аппаратные и информационные ресурсы. Особенностью структуры программно-аппаратных средств ФИ\_А является выделенная агентная часть, реализующая агентные функции, и контрольно-измерительный терминал (КИТ), реализующий элементарные контрольно-измерительные операции.

6. Разработана методология компьютерного моделирования и предварительного анализа погрешности измерительного канала КИТ ФИ\_А, основанная на детерминированном подходе и использовании аппарата линейной алгебры, что позволяет в отличие от метода, использующего теорию чувствительности, получить модель детерминированной погрешности измерительного канала при произвольных (сколь угодно больших) приращениях величин — источников погрешности. Предложенная методология использована при проектировании программно-перестраиваемого измерительного канала КИТ (на примере тестовой системы входного контроля, совмещённой с технологической операцией установки ИЭТ на ПП).

7. Проведен морфологический<sup>†</sup> анализ методов автоматической коррекции погрешности (АКП) средств измерений, позволивший составить новую классификацию методов АКП, провести сравнительный анализ существующих методов АКП и выявить новый метод последовательной коррекции, найти пути его совершенствования, разработать базовые структурные схемы предложенного метода. Разработана методика синтеза системы самонастройки для нелинейных функций преобразования измерительного канала с использованием гладкого восполнения на базе полинома Ньютона и трёхточечного кубического сплайна, сравнительный анализ процедур самонастройки позволил выявить, что при использовании последнего интерполянта быстродействие увеличивается в 2,4 раза.

8. Предложен оригинальный многофункциональный измерительный канал КИТ с программно-перестраиваемой структурой, реализующий дифференциально-разностный метод, повышающий чувствительность в окрестности измеряемого параметра, и итерационный метод самокоррекции, обеспечивающий высокую точность и надёжность измерений.

### **Практическая ценность.**

1. Предложена методология анализа и проектирования информационно-измерительной системы технического контроля и диагностики как мультиагентной системы, позволяющая осуществить её визуальное специфицирование в нотации UML (AUML).

---

<sup>†</sup> Янч Эрих. Прогнозирование научно-технического прогресса. – М.: Наука, 1976.

2. В соответствии с предложенной коммуникационной моделью взаимодействия агентов МИИСКД, основанной на архитектуре MOM, сервер сети обеспечивает функциональные возможности HTTP, а посредник (Брокер Сообщений) — остальные услуги по передаче данных, что даёт значительные экономические выгоды и упрощает написание необходимого программного кода серверной и клиентских частей системы.

3. Разработанные XML-схемы и их метаописания, образующие язык домена контроля и диагностики, делают возможным взаимодействие систем тестирования и инспекции МИИСКД на уровне сообщений.

4. Разработана виртуальная программная система, позволяющая моделировать все виды сообщений реального тестового и инспекционного оборудования, передавать их по сети через Брокер Сообщений, имитируя ситуацию взаимодействия.

5. Разработанные метод и алгоритм оптимального размещения тестового и инспекционного оборудования в многооперационных процессах изготовления РЭА, являются основой для специфицирования программного обеспечения класса DfT.

6. Разработана методика инженерного проектирования преобразователей относительного отклонения параметров контролируемых ИЭТ, составляющих основу измерительного канала ФИ<sub>A</sub>.

7. Разработанный измерительный канал КИТ, реализующий дифференциально-разностный метод и метод итерационной коррекции, позволяет уменьшить погрешность измерения контролируемых параметров в 10–20 раз и повысить надёжность измерений за счёт самокоррекции.

8. Разработанный метод с последовательной коррекцией погрешности позволяет повысить быстродействие измерительного канала в 4-6 раз при обеспечении той же точности, что и известные методы коррекции.

#### **Реализация и внедрение результатов работы.**

1. На предприятиях ФГУП "Государственный рязанский приборный завод" и Корпорации "Аэрокосмическое оборудование" ООО "Объединённый авиаприборный консорциум" ведутся работы по внедрению и опытной эксплуатации разработанной мультиагентной информационно-измерительной системы технического контроля и диагностики производства РЭА ответственного назначения. Проведённые экспериментальные исследования в условиях производства подтвердили правильность разработанных в главах 2-4 диссертации теоретических положений и технических решений, связанных с интеграцией гетерогенного тестового оборудования и его размещения в многооперационных процессах. На предприятии ООО "Объединённый авиаприборный консорциум" с целью расширения функциональных возможностей анализатора производственных дефектов TR8 системы технического контроля внедрены разработанные автономные физические измерительные агенты измерения малых сопротивлений и тока утечки КБЕ, конструктивно и программно совместимые с анализатором. Эксплуатация модулей показала их высокие метрологические характеристики, обеспечиваемые предложенными структурно-алгоритмическими методами коррекции погрешности.

3. На предприятии ФГУП "Касимовский приборный завод" с целью повышения качества производимой продукции внедрены система входного контроля ИЭТ и система технического контроля индукторов производства РЭА медицинского назначения. Основу измерительной части систем составляют разработанные в главе 5-7 структуры измерительных преобразователей. Эксплуатация систем показала их высокие эксплуатационные и метрологические характеристики.

4. Совместно с ФГУП ОКБ "Спектр" разработана и внедрена система контроля и диагностики наземного оборудования пускового комплекса шахтных ракетных установок. В измерительной части системы использовались структуры преобразователей, в основу которых положены методы повышения точности и быстродействия, разработанные и исследованные в главах 6-8.

5. На ЗАО "МЕДКОМ Групп" г. Зарайска разработаны и внедрены мультиагентная подсистема контроля процесса плавки и онтология контроля качества. Подсистема была разработана с использованием методологии, предложенной в главах 2, 5, и описана в главе 9.

6. На предприятии ООО "Технософт" разработана и внедрена система "Метролог".

7. Результаты полученных в диссертации теоретических, прикладных и экспериментальных исследований используются в учебном процессе Рязанского государственного радиотехнического университета при обучении студентов специальности 200106 «Информационно-измерительная техника и технологии».

#### **Основные положения выносимые на защиту.**

1. Методология построения мультиагентной модели информационно-измерительной системы технического контроля и диагностики на основе метамоделного представления, позволяющего провести её анализ и проектирование как мультиагентной системы.

2. Коммуникационная модель взаимодействия агентов-учредителей МИИСКД и заинтересованных агентов внешней среды на домене сотрудничества, основанная на XML-сообщениях и Посреднике, отличающаяся тем, что рассматривает Intranet как распределённую вычислительную платформу ИИС и использует коммуникационные Internet-технологии, обеспечивающие надёжную передачу данных по сети.

3. Теоретико-множественный подход к формальному отображению семантики домена контроля и диагностики на структуру XML-сообщений, отличающийся представлением структур в виде семантических сетей и позволивший осуществить разработку схем XML-сообщений о результатах операций контроля и диагностики.

4. Общие принципы построения мультиагентной тестовой системы. Таксономия агентов-учредителей системы с выделенным классом Физических Измерительных Агентов (ФИ\_А), определяющим функциональные возможности системы. Структура программно-аппаратных средств ФИ\_А с выделенной агентной частью, реализующей агентные функции, и контрольно-измерительным терминалом (КИТ), реализующим элементарные контрольно-измерительные операции.

5. Методология компьютерного моделирования и предварительного анализа погрешности измерительного канала КИТ ФИ\_А, основанная на детерминированном подходе и использовании аппарата линейной алгебры, позволяющая в отличие от метода на основе теории чувствительности получить модель детерминированной погрешности измерительного канала при произвольных приращениях величин — источников погрешности.

6. Морфологический анализ методов автоматической коррекции погрешности (АКП) средств измерений, новая классификация методов АКП, новые методы последовательной коррекции с самонастройкой, базовые структурные схемы предложенных методов. Методика синтеза системы самонастройки для нелинейных функций преобразования измерительного канала с использованием гладкого восполнения на базе полинома Ньютона и трёхточечного кубического сплайна. Процедуры самонастройки, позволяющие при использовании последнего интерполянта увеличить быстродействие в 2,4 раза.

7. Многофункциональный измерительный канал КИТ с программно-перестраиваемой структурой, реализующий дифференциально-разностный метод, позволяющий повысить чувствительность в окрестности измеряемого параметра, и итерационный метод самокоррекции, обеспечивающий высокую точность и надёжность измерений.

**Апробация работы.** Материалы диссертации докладывались и обсуждались в период с 1981 по 2006 г. более чем на 17-ти Всесоюзных, Всероссийских и Международных конференциях, совещаниях и семинарах в отраслевых институтах и вузах.

**Личный вклад автора.** Постановка задач, способы решения, основные научные результаты, выводы и рекомендации принадлежат автору. Автором сформулированы основные идеи защищаемых методов и алгоритмов. Аппаратные и программные средства для реализации полученных результатов разработаны под руководством и при непосредственном участии автора. Работы, выполненные в соавторстве, подчинены общей постановке проблемы и концепции её решения, предложенной автором.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 64 печатных работ, в том числе 22 публикаций в изданиях, включённых в перечень ВАК, среди них монография, 14 статей в центральных журналах, 7 авторских свидетельств на изобретения.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, девяти глав, заключения, списка литературы из 260 наименований, 9 приложений. Диссертация содержит 340 страницу основного текста и 120 страниц рисунков и таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, проанализировано состояние проблемы, сформулированы цель и задачи исследований, показана научная новизна и практическая значимость работы, представлены основные положения выносимые на защиту.

**Первая глава** посвящена анализу факторов, формирующих требования и основные признаки мультиагентных информационно-измерительных систем технического контроля и диагностики, поддерживающих производственный этап сборки узлов РЭА. Особое внимание отечественных и зарубежных производителей электронной аппаратуры к этапу сборки электронных узлов (ЭУ) объясняется тем, что он является одним из основных факторов, влияющих на формирование качества выпускаемой продукции. При этом в качестве объектов контроля и диагностики (ОКД) выступают комплектующие и собранные электронные узлы.

Анализ ряда технологических процессов производства электронных узлов (аналоговых, цифровых и гибридных) показал, что в среднем 12...33% ЭУ, поступающих на операцию регулировки и настройки или функционального тестирования, являются дефектными и требуют ремонтно-восстановительных работ. Относительное распределение дефектов, обнаруженных при проверке, показывает, что большинство дефектов возникает в процессе изготовления печатных плат (ПП) и ЭУ, а дефекты комплектующих изделий электронной техники (ИЭТ) составляют 5...20%. Разброс в распределении дефектных ЭУ — 12...33%.

Учёт таких показателей ОКД, как среднее число дефектов  $\lambda$ , степень гибридности  $S_h$ , закон распределения дефектов между узлами исследуемой партии, преобладающий класс дефектов, конструктивные особенности печатных узлов, позволяет осуществить выбор наиболее эффективных методов и средств их диагностирования в условиях производства.

Рассмотрены основные методы и средства, используемые для контроля и диагностики ИЭТ, ПП и ЭУ в процессе сборки. Известные методы контроля и диагностирования можно разделить на две группы: методы инспекции и методы тестового диагностирования. В свою очередь, методы тестового диагностирования делят на функциональное тестовое диагностирование (ФТ) и внутрисхемное (ИСТ). На основе анализа этих методов построена таблица тестового покрытия дефектов различными методами тестирования и инспекции. Ни один из представленных в таблице методов не позволяет обнаруживать 100% дефектов на выпускаемом электронном изделии. Поэтому для достижения основной цели — выявления всех дефектов производства необходимо объединение различного автоматизированного инспекционного и тестового оборудования (АТИО) в систему технического контроля и диагностики (СТКД). Исходя из решаемых производственных задач, необходима всесторонняя оценка и рациональный выбор тестовой стратегии и соответствующего АТИО, которое при приемлемых затратах обеспечит высокий уровень выявляемости дефектов. Для выбора той или иной стратегии тестирования применяется специализированное программное обеспечение класса DfT (Design-for-Test).

Используемое АТИО является продукцией разных производителей, поэтому СТКД можно рассматривать как *гетерогенную среду* с разнородным программным обеспечением, разным представлением данных и форматами обмена информацией.

В работе проведён анализ фундаментальных требований, формирующих основные черты современного производства РЭА, которым должна удовлетворять СТКД. Широкое внедрение в производство CALS-идеологии и таких стандартов как ISO 10303, ISO 9000, ERP, а также стратегия на дальнейший переход к распределённым интеллектуальным производственным системам (DIMS) требуют нового подхода к построению СТКД. В работе предложен и обоснован подход, рассматривающий СТКД как мультиагентную информационно-

измерительную систему технического контроля и диагностики (МИИСКД). Построенная на новых принципах СТКД должна удовлетворять требованиям информационной интеграции, распределённой организации, функциональной и информационной совместимости в гетерогенной среде, открытой и динамичной структуры, масштабируемости, отказоустойчивости.

Предлагаемая концепция позволяет связать задачи технического контроля и диагностики с задачами системы менеджмента качества (СМК) на всех этапах жизненного цикла выпускаемых изделий. Показано, что СТКД является информационной обратной связью СМК, предоставляющей достоверную информацию о техническом состоянии производимых изделий. Определены возможные временные циклы использования СМК информации, получаемой от СТКД, для управления качеством. Это режим "жёсткого реального времени" (совмещение операций установки ИЭТ на ПП с операциями входного контроля); режим "мягкого" реального времени (принятие решения о ремонте и восстановлении ЭУ после операций тестирования); тактическое и стратегическое управление качеством (статистический анализ результатов контроля и диагностики, коррекция технологического процесса). В любом случае необходимо своевременное поступление и накопление знаний о состоянии каждого экземпляра производимой продукции на всех этапах сборочного процесса. А для достижения глобальной цели — обеспечения высокого качества продукции необходимо сотрудничество компонентов СТКД между собой и с окружающей средой.

Достоверность поставляемой СТКД информации определяется уровнем метрологического состояния АТИО. Управление же качеством АТИО осуществляется системой метрологического обеспечения (СМО). Постоянное поступление информации о метрологическом состоянии АТИО и её мониторинг со стороны СМО обеспечит возможность управления качеством АТИО не по регламенту, а по его реальному состоянию. Поддержка высоких метрологических характеристик, метрологической надёжности и оценки метрологического состояния, требуют от АТИО введения специальных мер.

Показано, что поступление информации о качестве производимой продукции, техническом и метрологическом состоянии АТИО и режимах его использования в реальном масштабе времени обеспечит: повышение качества за счёт своевременных ремонтно-восстановительных работ и метрологического обслуживания контрольного оборудования; учёт и рациональное управление использованием технологического оборудования; возможность сбора, анализа и архивации важнейшей информации о ходе технологического процесса, которая позволит быстро влиять на его качество; индивидуальное сопровождение каждого экземпляра производимой продукции; создание информационного домена контроля и диагностики.

Широкое распространение сети Internet привело к тому, что в настоящее время поддерживаемые её технологии рассматриваются в качестве основы построения распределённой вычислительной платформы предприятия. А это, в свою очередь, определяет возможные коммуникационные механизмы внутрисистемного взаимодействия СТКД и организацию домена контроля и диагностики (ДКД). Информационная интеграция ДКД может быть осуществлена на основе онтологии технического контроля и диагностики (ОТКД).

В работе рассмотрены особенности представления в интегрированной модели изделия данных, связанных с задачами технических измерений, контроля и диагностики. Модель обладает сложной структурой и представляет собой логические группы информационных объектов (ИО) с установленными между ними отношениями. При этом группа ИО, связанных с ОКД, образует прикладной информационный домен контроля и диагностики, реализованный в виде онтологии (ОТКД).

Каждый ИО прикладного домена имеет набор характеристик (атрибутов), описывающих свойства реального объекта, отображением которого он является. Данные о качестве изделия представляют собой совокупность информационных объектов, порождаемых при выполнении всех видов тестирования и инспекции. Эти данные ассоциированы с информацией, описывающей изделие и его компоненты, и содержат сведения о степени соответствия конкретных экземпляров и их компонентов заданным техническим требованиям, техническим условиям, требованиям стандартов и другим нормативно-техническим документам.

**Таблица 1. Этапы жизненного цикла МИИСКД**

| Название этапа            | Описание этапа  |
|---------------------------|---|
| Этап <i>Идентификации</i> | Построение информационной модели ОКД ( $W_d$ ), содержащей перечень сведений, необходимых для решения задач проектирования процессов контроля и диагностики.  |
| Этап <i>Формирования</i>  | Формирование домена контроля и диагностики. Рациональный выбор стратегии тестирования и тестового оборудования на основе анализа диагностической модели, метрологической экспертизы и особенностей технологического процесса. |
| Этап <i>Выполнения</i>    | Выполнение производственной задачи контроля и диагностики с целью обеспечения качества выпускаемой продукции. Контроль процесса функционирования тестового оборудования МИИСКД.   |
| Этап <i>Окончания</i>     | Окончание функционирования МИИСКД в рамках данного технологического процесса. Анализ и оценка выбранной стратегии тестирования и тестового оборудования с целью последующего использования полученного опыта.                 |

На основе проведённого анализа выявлены новые черты и сформулированы основные признаки СТКД как МИИСКД. Определены этапы жизненного цикла (ЖЦ) МИИСКД, краткое содержание этапов представлено в табл. 1.

Проведён анализ и обоснование мультиагентного подхода к построению СТКД. Сформулированы основные свойства мультиагентной системы (МАС) и свойства агентов-учредителей (АТИО). Предложенный подход к представлению АТИО соответствует современной концепции интеллектуального производства, основанного на распределённом управлении производственными знаниями.

Идентификация МИИСКД представлена в виде следующих определений.

**Определение 1.** МИИСКД является многофункциональной, распределённой, гетерогенной системой, предназначенной для контроля и диагностики множества производственных дефектов  $Q = \{q_i\}$ .

**Определение 2.** МИИСКД – это гибкая, открытая, масштабируемая структура, построенная на основе мультиагентной технологии и позволяющая динамически объединять новые агенты или удалять из системы существующие, не разрушая имеющихся связей.

**Определение 3.** Система не имеет общего управления, интегрируется на основе домена сотрудничества составляющих её агентов, онтологии контроля и диагностики, единого материального потока и единой цели — контроля качества выпускаемой продукции.

**Определение 4.** Система использует Internet технологии в качестве основы распределённой вычислительной платформы, информационной и функциональной совместимости в гетерогенной среде.

**Определение 5.** Система выполняет активный контроль, результаты которого используются для обнаружения наиболее слабых мест в технологическом процессе и выполнения корректирующих действий в реальном масштабе времени.

На основе проведённого анализа и предварительных оценок сформулированы основные задачи исследования.

**Вторая глава** посвящена разработке методологии построения мультиагентной модели МИИСКД.

Применение мультиагентной парадигмы при разработке вновь создаваемого производства или "агентификации" уже существующего, требует развития и адаптации имеющих место методологий анализа и проектирования, которые должны сосредотачивать внимание не только на специфике внутренней организации каждого из агентов-учредителей системы, но также и на социальных аспектах их поведения, на особенностях производственной окружающей среды. Анализ существующих методологий, применяемых для проектирования ин-

формационных систем, показал, что на сегодняшний день нет известной всеобъемлющей методологии анализа и проектирования МАС, которая бы покрывала весь процесс разработки проекта от начального формулирования требований до его окончания и учитывала бы особенности производства. К наиболее разработанным методологиям проектирования информационных систем можно отнести методологии Message, MAS-Common KADS. В данной работе ставится задача их развития в практическую методологию создания Мультиагентной ИИС, которая описывала бы все шаги разработки системы. В качестве отправной точки взято организационное представление МИИСКД и определены шаги развития системы для прикладной области.

Для систематизации анализа МИИСКД выделены подмодели, которые отражают её различные аспекты: модель Домена (DM); модель Агента (AM); модель Организации (OM); модель Цели/Задачи (GM); модель Взаимодействия (IM).

Методология основана на метамодельном подходе. На рис. 1 представлена **метамодель Организации** МИИСКД в нотации UML, определены основные понятия, объекты и их отношения.

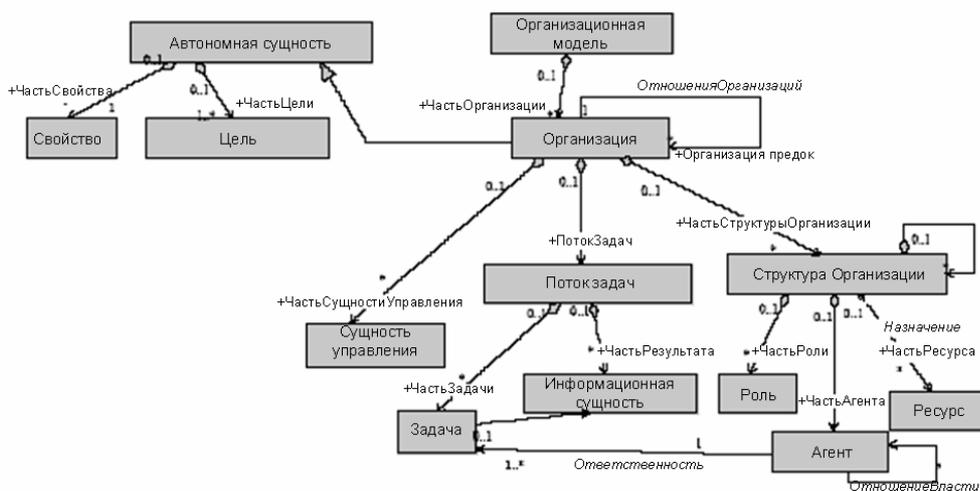


Рис. 1. Метамодель организации МИИСКД

За архитектурную основу взята архитектура PROSA, являющаяся базовой при построении холонических производственных систем (HMS). В стандарте IDEF0 разработана иерархическая модель процессов тестирования и инспекции на этапе сборки ЭУ.

Модель позволила провести анализ материальных и информационных потоков. На основе предложенной модели процессов контроля, с учётом функций, целей и задач базовых классов архитектуры Prosa было осуществлено разделение последних на специализированные агенты. В результате получена типология агентов-учредителей МИИСКД. Определена внешняя по отношению к МИИСКД среда и сценарии взаимодействия с её компонентами. Существенными составляющими МАС являются два основных класса проблем, касающихся окружающей среды: структура окружающей среды; деятельность МАС в окружающей среде. Структура окружающей среды рассматривается на организационном уровне и объединяется в организационную структуру МАС. На рис. 2 в неформальном виде изображена окружаю-

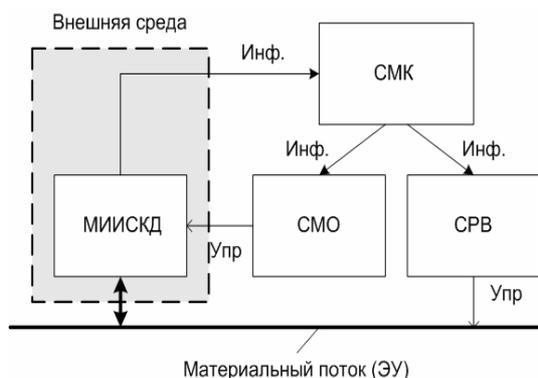


Рис. 2. Окружающая среда МИИСКД

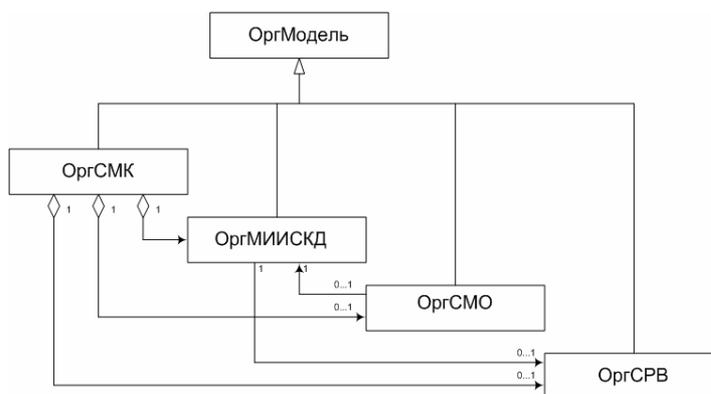


Рис. 3. Окружающая среда МИИСКД в рамках OM

щая среда МИИСКД, где СМК – система менеджмента качества; СМО – система метрологического обслуживания; СРВ – система ремонта и восстановления; материальный поток (ОКД). В рамках Организационной модели окружающая среда МИИСКД изображена на рис. 3. На рисунке показаны организации и отношения между ними. МИИСКД находится в агрегативных отношениях с СМК и в ассоциативных отношениях с СМО и СРВ.

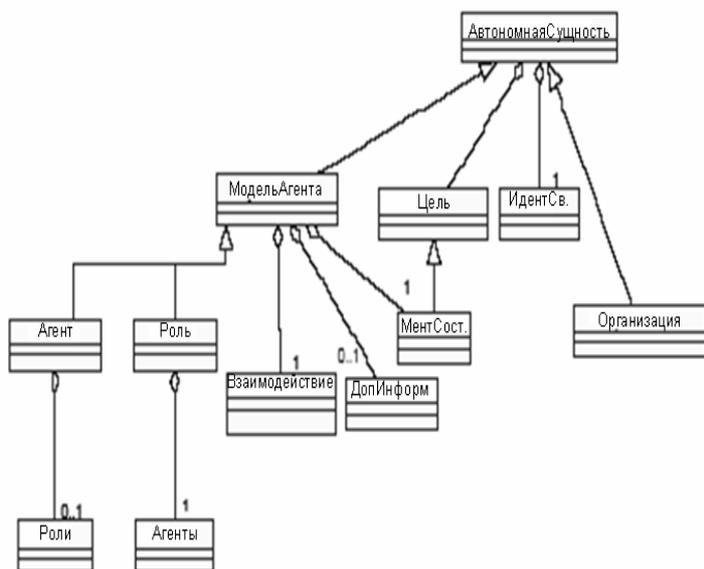


Рис. 4. Структурная модель Агента

ния системы и её окружающей среды. В качестве основной цели МИИСКД определено её намерение выявить все дефекты производства на этапе сборки узлов РЭА. *Задачи* описывают те переходы состояний, которые необходимы, чтобы удовлетворить целевые обязанности агентов, то есть выполнение тестовым и инспекционным оборудованием процессов контроля и диагностики. Переходы состояний определены как пары атрибутов пред и пост-условий. *Действия* – это атомарные задачи, которые выполняются агентами для удовлетворения их целевых обязательств и могут быть интерпретированы как элементарные операции тестирования и инспекции.

*Модель Агента* состоит из ряда индивидуальных агентов и ролей. Она объединяет всю информацию, определенную для индивидуального агента или роли, включая отношения с другими агентами. Это также добавляет далее описательные детали, определенные для данного агента или роли. Идентифицируются главные особенности агента, такие, как его поведение и его ментальное состояние. Также заявляется, что агент расположен в окружающей среде, с которой он взаимодействует. Разработана структурная модель Агента (рис. 4) и определены основные понятия.

*Модель Цели/Задачи* призвана ответить на вопросы: "почему?", "кто?" и "как?". Цель сложной мультиагентной системы (МИИСКД) и её окружающей среды, декомпозиция на подцели отвечает на вопрос "почему?". Ответственность агентов по своим обязательствам отвечает на вопрос "кто?". Выполнение задач и действий агентами для удовлетворения целей, и декомпозиция задач на подзадачи отвечает на вопрос "как?". Эта модель может быть использована в дальнейшем для описания задач, вовлечённых в поток работ МИИСКД. Разработана метамодель GM, для которой определены основные понятия и отношения. *Цели* описывают желательные состоя-



Рис. 5. Домен производства РЭА

Информацию о прикладной области содержит *модель Домена* (информационная модель). В случае МИИСКД DM охватывает классы, объекты и отношения, связанные с техническим контролем и диагностикой РЭА: контрольно-диагностические операции, процесс контроля, комплектующие детали, печатные узлы, методы и технические средства тестирования и инспекции ОКД, модели ОКД, состояние тестового оборудования, результаты контроля, диагностики и ремонта. На рис. 5 представлены составляющие домена основного производства РЭА и ассоциативные связи между ними. Выделены части прикладной области контроля и диагностики, связанные с этими составляющими. Домены реализованы в виде онтологий. Онтологии доменов могут быть описаны с использованием разных формализмов: онтологии МИИСКД, ОКД – ISO 10303 AP 210; онтологии процессов контроля и диагностики – PSL; онтологии результатов контроля и диагностики – XML.

**Модель Взаимодействия** описывает взаимодействия между агентами МИИСКД и используемые ими протоколы. Разработанная метамодель взаимодействия агентов МИИСКД показана на рис. 6. По существу, взаимодействие представляет собой влияние агентов друг на друга на высоком уровне, в форме переговорного процесса в терминах обслуживания. Взаимодействие обеспечивает достижение общей цели — качественного выполнения процесса. Обмен информацией осуществляется в соответствии с протоколом взаимодействия, а конкретное содержание данных заключено в сообщении. Необходимо определить синтаксис и семантику сообщений, механизм и протокол их транспортировки.

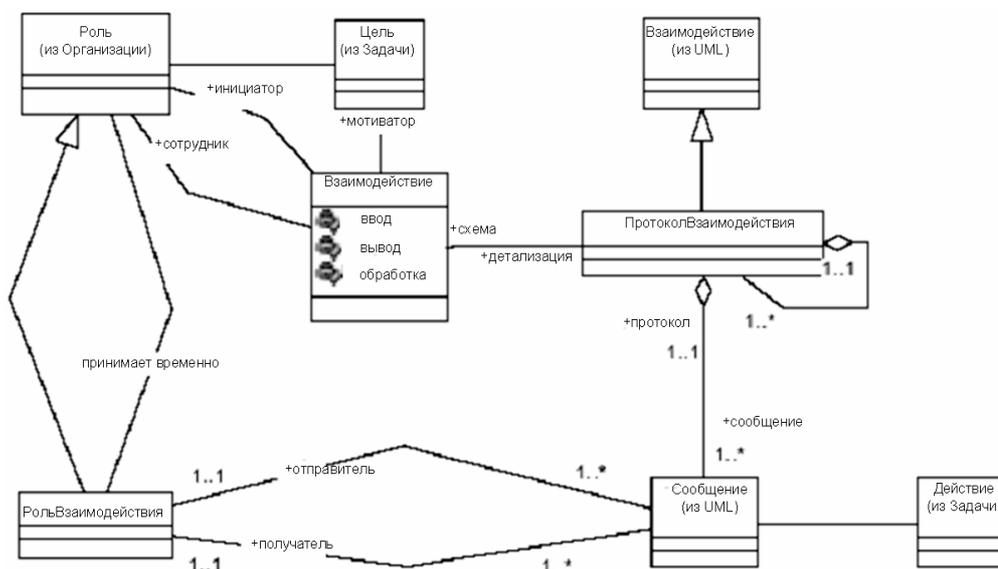


Рис. 6. Метамодель взаимодействия агентов МИИСКД

**В третьей главе** решается задача разработки модели внутрисистемного взаимодействия между агентами МИИСКД, и их взаимодействие с заинтересованными агентами окружающей среды.

Проведён анализ и выбор модели взаимодействия на основе Сообщений. При анализе учитывались: современные тенденции, рассматривающие Internet как распределённую вычислительную платформу предприятия; аппаратная и программная независимость; максимальная возможность использования стандартных протоколов (как решение задачи надёжности передаваемых данных); наиболее универсальный синтаксис передаваемых сообщений. В табл. 2 приведены уровни коммуникационной архитектуры.

Первые три уровня определяют коммуникационный транспортный слой между клиентами и централизованным WEB сервером (Брокером Сообщений), который называется MOM (Message Oriented Middleware). При этом используется комбинация протоколов HTTP, XML, SOAP, являющаяся стандартом W3C. Остальная часть уровней определяет содержание сообщений, связанных с данными о качестве выпускаемой продукции и оценками метрологического состояния тестового и инспекционного оборудования. MOM-механизм позволяет оборудованию и программному обеспечению обмениваться данными гибким, асинхронным способом и обеспечивает множество услуг: способность к многопользовательским связям, маршрутизации сообщений, балансирования нагрузки, сервисы взаимодействия "точка-точка" и "публикация/подписка".

**Таблица 2. Уровни коммуникационной архитектуры**

|                     |   |
|---------------------|---|
| Обмен сообщениями   | IPC 2501 – стандарт, специфицирующий управляющую семантику и XML сообщения для взаимодействия между электронным оборудованием участка сборки ЭУ.                        |
| Семантика сообщений | Разработка структуры сообщений о метрологическом и техническом состояниях тестового и инспекционного оборудования, сообщений о результатах тестирования и инспекции ЭУ. |
| Синтаксис сообщений | XML – расширяемый язык разметки, язык для записи информации, обеспечивающий возможность представления любой структуры данных.   |
| Пакет               | SOAP w/Attachments, IPC 2501 Extentions. Структура SOAP пакета, содержащего информационный элемент IPC 2501.  |
| Транспорт           | HTTP – транспортный протокол, используемый совместно с SOAP для передачи IPC 2501 сообщений.  |
| Сеть                | TCP/IP – стандартные протоколы, гарантирующие высокую эффективность взаимодействия по сетям Internet.   |

На рынке имеются MOM-продукты, такие как MQ Series (IBM), MS MQ (MS), Java Message Queue (Sun), Smart Sockets, которые упрощают создание предлагаемого механизма взаимодействия.

Сформулированные ограничения и правила целостности передаваемых данных, позволяют специфицировать низкоуровневое коммуникационное программное обеспечение агентов домена сотрудничества. Разработана модель поведения тестового и инспекционного оборудования в виде диаграммы состояний Харела, что позволило определить основные состояния и условия их переходов.

Информация о результатах контроля и диагностики каждого экземпляра выпускаемых электронных узлов РЭА, передаваемая в виде XML-сообщений, составляет основное содержание онтологии домена сотрудничества — онтологии технического контроля и диагностики (ОТКД). Поставщиками информации ОТКД являются тестовое и инспекционное оборудование. Потребителями — само тестовое и инспекционное оборудование, а также система менеджмента качества (СМК), система метрологического обслуживания (СМО) и станции ремонта и восстановления, которые образуют внешнюю среду МИИСКД.

В этой связи встаёт задача разработки семантической модели ОТКД, определение её основных информационных объектов и отношений между ними на основе одного из известных подходов моделирования — моделирования типа "объект/отношение". Семантика ОТКД тесно связана с семантикой сообщений, поставляющих для неё информацию и составляющих её содержание. Поэтому применение понятий предметной области к XML-структурам является ключевым вопросом.

В результате системного анализа процессов тестирования, инспекции и ремонта электронных узлов была разработана *концептуальная схема домена контроля и диагностики* (ДКД). На рис. 7 она представлена в нотации Баркера и относится к классу моделей, называемых "расширенными" или семантическими. С целью отображения семантики ДКД на семантику и структуру XML-сообщений объекты концептуальной схемы интерпретируются как ключевые события, генерирующие эти сообщения. Показано, что при асинхронности событий отношения между сообщениями в виде ссылок связывают и группируют их в информационные объекты, несущие информацию о качестве производимой продукции. В простейшем случае XML-схемы, моделирующие структуры передаваемых данных, представляются в виде деревьев объектов. Чтобы выразить более сложные отношения между XML-элементами, использован механизм связи типа идентификатор(ID)/ссылка(IDREF). Схемы сообщений представляются в графической нотации, предложенной в стандарте IPC 2503.

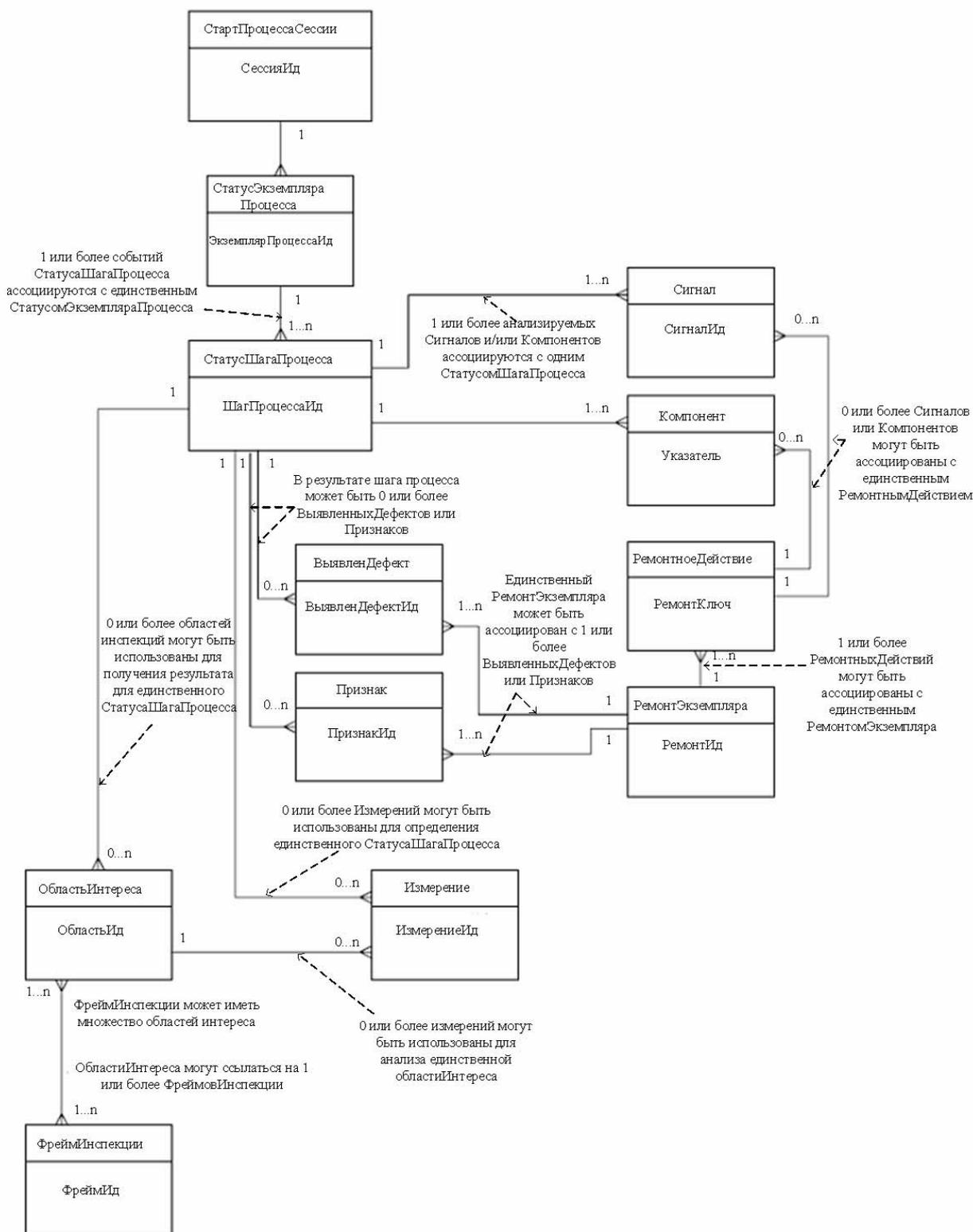


Рис. 7. Концептуальная схема домена контроля и диагностики

В работе предлагается *теоретико-множественный подход* к отображению семантики домена контроля и диагностики на структуру XML-сообщений. Это позволило формально специфицировать XML-схемы и осуществить их проверку (синтаксический анализ).

В рамках этого подхода в работе решены следующие **задачи**:

- 1) разработка теоретических основ для моделирования XML-структур;
- 2) разработка формализма для доказательства правильности XML-структур;
- 3) разработка формального метода отображения семантики предметной области на XML-структуры;

4) определение того, как полученные результаты удовлетворяют требованиям XML-алгебры и какой вклад они вносят в область формализации разработки XML-приложений.

В качестве ключевых **принципов** определены следующие:

- *моделирование XML-структур в виде направленных графов (DG) вместо традиционного древовидного представления;*

$DG = (N, L)$ , где  $N$  – множество вершин;  $L \subseteq N_S \times N_E \times LS$ ;  $N_S \subseteq N$  – множество начальных вершин;  $N_E \subseteq N$  – множество конечных вершин;  $LS \subseteq \prod_{n \in N} L_n$  – множество последовательностей

соединений таких, что  $LS = \{(I_1, I_2, I_3, \dots, I_k) | k \geq 0 \wedge \forall i, k \geq i(k-1) : t(I_i) = s(I_{i+1})\}$ ;  $I$  – множество связей;  $s(I), t(I)$  – две функции определяющие связи  $I$  так, что  $s(I) = n_s, t(I) = n_e$ ;  $s$  – отображение на начальные узлы  $n_s$ ;  $t$  – отображение на конечные узлы  $n_e$ . Рекурсивное определение последовательности связей можно представить как  $L = \{ \langle n_s, n_e, I_s \rangle | I_s = I_s^0 \vee \forall I_s \neq I_s^0 : s(I_s) = n_s \wedge t(I_s) = n_s \}$ ;

- *тип как средство отображения понятий предметной области в XML-структурах;* введены понятия:  $NT = \{ t_{node} \}$  – множество узлов определённого типа;  $LT = \{ t_{inc} \}$  – множество связей определённого типа, используемых для того, чтобы понятия предметной области отобразились на типах узлов, а отношения между понятиями, отобразились на типах связей; вводится нотация, определяющая Граф\_Типов (TG):  $TG = (TN, TL, dom(TG))$ , где  $TN$  – множество типов вершин;  $TL$  – множество типов связей;  $dom(TG)$  – домен типов;

- *типы иерархий как отображение предметной области на различные уровни иерархии;* для графа типов были расширены понятия типов вершин и типов связей введением типов иерархий:

$NT_H = (NT, L_{NT})$  – иерархия типов вершин;

$LT_H = (LT, L_{LT})$  – иерархия типов связей;

$GT = (NT_H, LT_H)$  – граф типов;

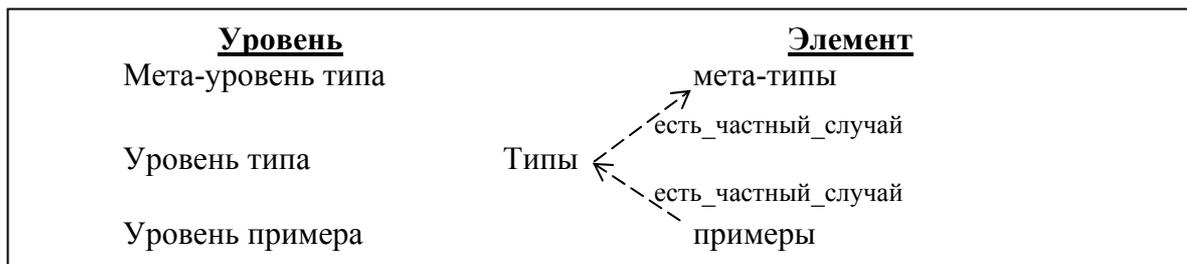
- *выражение знаний предметной области через структурные ограничения:*  $s$ -card,  $e$ -card – ограничения на кардинальные числа;

- *трёхуровневая метамодель, обеспечивающая последовательное разделение структуры и содержания с определением типов и структурных ограничений:*

$TG = (TN, TL, dom(TG))$  – граф уровня примера;

$GT = (GTN, GTL, dom(GT))$  – граф уровня типа;

$MT = (MNT, MLT)$  – граф уровня мета-типа.



В результате системного анализа процессов тестирования, инспекции, ремонта и восстановления электронных узлов были определены ключевые события, генерирующие сообщения о результатах контроля качества, и выстроена их иерархия. На рис. 7 представлены объекты ключевых событий, отношения между ними и кардинальные числа, связанные с формированием сообщений о состоянии выпускаемой продукции. Перечисленные события необходимы для того, чтобы отследить продукцию и процесс контроля качества, а, кроме того, влиять на качество через коррелированную с дефектом сигнатуру ошибки, адресуемую к действиям по ремонту и восстановлению.

Разработаны структуры сообщений, генерируемые тестовым (инспекционным) оборудованием, содержащие информацию об их техническом и метрологическом состоянии, что позволяет осуществлять мониторинг технического состояния оборудования и своевременно проводить ремонтно-восстановительное и метрологическое обслуживание.

Разработанные метамоделли (схемы) сообщений являются основой для построения онтологии технического контроля и диагностики. Основными информационными объектами ОТКД являются: сессия – объединяет всю информацию, ассоциированную с оператором, началом новой рабочей смены, изменением выпускаемой продукции или программы тестирования/инспекции; статус экземпляра процесса – результат исполняемого теста и/или программы инспекции экземпляра производимой продукции; статус шага процесса – результат шага тестового процесса или инспекционной программы; ремонт экземпляра – содержит информацию о ремонтных действиях, связанных с конкретным экземпляром производимой продукции.

Формирование онтологии контроля и диагностики, обеспечение взаимодействия на её основе ключевых служб, позволяет рассматривать МИИСКД как полноценный информационный актив предприятия, обеспечивающий достоверной информацией о результатах контроля качества выпускаемых изделий, а также метрологическом и техническом состоянии тестового и инспекционного оборудования.

**Четвёртая глава** посвящена оптимизации размещения автоматизированного тестового и инспекционного оборудования (АТИО) многооперационного процесса контроля, что является одним из важных сервисов программного обеспечения класса DfT (Design for Test).

Проведён анализ целевых функций и ограничений на построение моделей размещения АТИО. За критерий оптимальности размещения принят критерий минимума средних потерь производства. Эффективность от введения контрольных операций тестирования и инспекции (ОТиИ)

$$\mathcal{E} = 1 - \frac{Z^k}{Z}, \quad (1)$$

где  $\mathcal{E}$  – эффективность от введения системы межоперационного контроля;  $Z^k$  – себестоимость единицы продукции с внедрённым АТИО, выраженная в некоторых единицах затрат (например, рублях, минутах и т. п.);  $Z$  – себестоимость единицы продукции, производимой технологическим процессом (ТП) без АТИО, выраженная в тех же единицах, что и  $Z^k$ . В качестве  $Z^k$  и  $Z$  могут выступать себестоимости единицы кондиционной продукции. Ограничения на вероятность выхода годных изделий (с определенной доверительной вероятностью) можно представить в виде

$$\mathfrak{R} = \text{Вер} \left\{ \left| P_2 - P_{2\text{доп}} \right| \leq \Delta P \right\}, \quad (2)$$

где  $\mathfrak{R}$  – доверительная вероятность;  $\Delta P$  – доверительный интервал;  $P_2$  – вероятности выхода годных, полученная в ТП с введённым межоперационным контролем;  $P_{2\text{доп}}$  – допустимая вероятность выхода годных. Возможны также и другие ограничения, обусловленные физическими условиями существования величин, типом и требованиями производства и т. п.

Получены основные соотношения, определяющие вид моделей ТП с АТИО при межоперационном фильтрующем контроле (МФК):

$$\begin{aligned} \bar{Z}^k &= \frac{C_n^n}{P_n^n} = \frac{\sum_{i=1}^n \prod_{j=1}^{i-1} (1 - a_j + a_j K_j) (\Delta C_i + a_j C_i^k)}{\prod_{i=1}^n P_i \frac{1 - a_i P_i^i}{1 - a_i + a_i K_i}}; & \bar{Z} &= \frac{\sum_{i=1}^n \Delta C_i}{\prod_{i=1}^n P_i}; \\ \mathcal{E} &= 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \prod_{j=1}^{i-1} (1 - a_j + a_j K_j) (\Delta C_i + a_j C_i^k)}{\sum_{i=1}^n \Delta C_i \prod_{i=1}^n \frac{(1 - a_i P_i^i)}{(1 - a_i + a_i K_i)}}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $C_n^n$  – затраты, вложенные в единицу продукции после  $n$ -ой операции;  $P_i^n$  – вероятность выхода годного изделия после  $n$ -ой операции;  $P_i$  – вероятность правильного исполнения  $i$ -ой операции;  $\Delta C$  – затраты, вносимые ТО на единицу продукции;  $K$  – коэффициент пропуска изделия операцией контроля.

Исходная задача проектирования системы контроля ТП сводится к нахождению такого набора  $\{a_i\}$ , который минимизирует (3) при

$$a_i = \begin{cases} 1, & \text{если после } i\text{-й ТО требуется контроль с параметрами и} \\ P_i^I, P_i^{II}, C_i^k; \\ 0, & \text{в противном случае;} \\ 0 < P_i \leq 1; & i = \overline{1, n}; \end{cases}$$

ТО – технологическая операция;  $P_i^I, P_i^{II}$  – вероятности ошибок I-го и II-го рода  $i$ -ой ОТиИ.

В этом случае задача проектирования оптимальных систем межоперационного тестирования и инспекции формулируется следующим образом.

*Исходные данные:*  $P_{2\text{доп}}$  – допустимая вероятность выхода годной продукции;  $\mathfrak{R}_{\text{доп}}$  – минимальная доверительная вероятность того, что величина  $P_{2\text{доп}}$  лежит в интервале  $(P_{2\text{доп}} + \Delta P_n; P_{2\text{доп}} - \Delta P_n)$ ;  $P_{2\text{доп}} + \Delta P_n, P_{2\text{доп}} - \Delta P_n$  – нижнее и верхнее значения доверительного интервала;  $\Delta C_i^k$  – затраты на единицу продукции на операциях изменения состояния предмета производства,  $i = \overline{1, n}$ ;  $C_i^k = f(P_i^I, P_i^{II})$  – массивы зависимостей затрат на контроль единицы продукции от ошибок первого и второго рода,  $i = \overline{1, m}$ . Здесь  $m$  – допустимый парк автоматизированного тестового и инспекционного оборудования, составляющего МИИСКД.

*Задача:* определить максимум функции (3) при условии, что  $0 \leq a_i \leq 1$  и ограничениях:

$$\begin{cases} \mathfrak{R}_n = \text{Вер} \left\{ \left| P_n'' - P_{2\text{доп}} \right| \leq \Delta P_n \right\} \geq \mathfrak{R}_{\text{доп}}; \\ C_i^k = f(P_i^I, P_i^{II}) + \varphi(\mathfrak{R}_i), \quad i = \overline{1, n}; \\ 1 > P_i, \Delta P_i, P_i', P_j'', \mathfrak{R}_i > 0, \end{cases} \quad (4)$$

где  $\varphi(\mathfrak{R}_i)$  – функция затрат от неверных решений на  $i$ -й ОТиИ;  $\mathfrak{R}_i$  – доверительная вероятность того, что параметр находится в доверительном интервале после  $i$ -й ОТиИ;  $P_i'$  – вероятность того, что на вход  $i$ -й ОТиИ поступило годное изделие.

Технологические процессы с системами межоперационного контроля, удовлетворяющие цели (3) и ограничениям (4), будем считать стабильными относительно уровня  $\frac{\Delta P_n}{P_{2\text{доп}}} 100\%$  с надежностью не ниже  $\mathfrak{R}_{\text{доп}}$ , где  $\frac{\Delta P_n}{P_{2\text{доп}}}$  – 100%-процентное отношение доверительного интервала к вероятности выхода годных изделий.

В работе исследуется устойчивость технологического процесса с подсистемами тестирования и инспекции. Стабильность ТП с введёнными ОТиИ, определённая в смысле вероятности относительного отклонения, представляется для некоторой ТО или ОТиИ выражением:  $\delta_j^y = \frac{\Delta P_i^y}{P_i^y}$ .

Для решения вопроса о стабилизации некоторого выходного параметра (вероятности выхода годного) необходимо решить следующие задачи:

- 1) показать принципиальную возможность стабилизации вероятности выхода годных (т. е. уменьшение  $\delta_j^y$  в ТП с ОТиИ), помимо увеличения его абсолютного значения;
- 2) разработать алгоритмы и программы оптимального проектирования МИИСКД;
- 3) разработать и исследовать методы исследования стабильности ТП с ОТиИ.

Показано, что решение задачи максимизации целевой функции (3) с учетом имеющихся ограничений дает принципиально новое явление, присущее оптимальной МИИСКД, — уменьшение разброса выходного параметра и повышение вероятности выхода годных изделий. Этот эффект проявляется помимо максимизации  $P_n''$  и важен для решения задачи стабилизации данного параметра.

Показано, что относительное отклонение вероятности выхода годных изделий после ОТиИ ( $\delta_i''$ ) меньше относительного отклонения вероятности выхода годных изделий после ТО ( $\delta_i'$ ) т. е.  $\delta_i'' < \delta_i'$ , что доказывает стабилизирующие свойства оптимальной МИИСКД. Следующее выражение дает количественную оценку общего уменьшения нестабильности выходного параметра при наличии ОТиИ:

$$\Delta\delta_n'' = \sum_{l=0}^n \Delta\delta_l = \frac{\sum_{l=0}^n \delta_l \left[ \sum_{j=0}^n b_j \prod_{i=j+1}^n l_i P_i \right]}{\prod_{i=0}^n l_i P_i + \sum_{j=0}^n b_j \prod_{i=j+1}^n l_i P_i},$$

где  $l_i, b_i$  – коэффициенты, связанные с аппроксимацией зависимости  $P_i = f(P_i')$ ;  $\delta_l$  –  $l$ -й компонент нестабильности.

### **Постановка задачи оптимизации МИИСКД.**

Для построения алгоритма оптимизации МИИСКД необходимо исследовать поведение функционала  $\mathcal{E}$  в зависимости от управления  $\{U_s^{(t)}\}$ , т. е.  $\max_{\{U_s^{(t)}\}} \mathcal{E}$  при ограничениях (4).

Алгоритм оптимизации основан на методе последовательного ввода вершин  $t$  и проверки условия положительности эффекта от их введения. Для этого рассматривается влияние выбора и назначения двух произвольных операций контроля после соответствующих ТО (например,  $s$ -й и  $t$ -й). Условие положительности эффекта от введения  $t$ -й вершины при наличии  $s$ -й:  $\Delta\bar{Z}^k(t/s) > 0 \Rightarrow C_s^k - C_{s+1,n}(1 - P_s^{II}) + C_{t+1,n} > \frac{P_t^I C_{1,t} + C_t^k}{B_t}$ .

Предложен метод размещения ОТиИ, учитывающий критерий выхода годных изделий и экономическую эффективность принимаемых решений.

Разработан алгоритм оптимизации размещения ОТиИ, обеспечивающий существенно лучшие результаты, чем назначение контрольных операций экспертами.

Испытания рабочей программы проведено на примере ТП изготовления изделий массовой РЭА, состоящего из 40 операций. Найден вариант расстановки, при котором потери могут быть сокращены в 1,5 раза по сравнению с вариантом, предлагаемым технологами эвристическим способом.

**В пятой главе** впервые поставлена задача разработки методологии мультиагентного подхода к проектированию АТИО.

Требования гибкости, расширяемости на уровне технологии Plug&Play, автономности измерительных модулей при решении локальных задач и взаимодействие с другими модулями при решении общей задачи, делают целесообразным построение АТИО на основе мультиагентного подхода. При этом обеспечивается концептуальное единство проектирования и организации как МИИСКД так и его компонентов — тестового и инспекционного оборудования. В контексте мультиагентного подхода контрольно-измерительные модули можно представить агентами, выполняющими локальные задачи контроля и принимающими решения по его результатам. То есть, агент инкапсулирует в себе всё необходимое программное, аппаратное и информационное обеспечение, а программа выполнения элементарных контрольно-измерительных операций управляется поступающими внешними данными. Такая организация допускает простое наращивание функциональных возможностей системы инсталлированием новых программно-аппаратных агентов и централизованным конфигурированием МАС.

Функционирование АТИО в ритме технологического процесса требует организации взаимодействия его агентов-учредителей в режиме реального масштаба времени. Это накладывает определенные особенности на проектирование тестовой МАС. Предложена методика проектирования мультиагентных тестовых систем с учётом их функционирования в реальном масштабе времени, которая основывается на предложенной в главе 2 методологии моде-

лирования МАС и использовании профиля UML для проектирования систем реального времени. Представлены диаграмма состояний процесса тестирования с учётом временных ограничений и диаграмма протокола взаимодействия, расширенные временными маркерами. Разработана таксономия агентов и мультиагентная архитектура, определены цели и задачи каждого агента, показано, что функциональные возможности АТИО определяются Физическими

Измерительными Агентами. На рис. 8 представлена архитектура МАС АТИО. Структура ФИ\_А представлена в виде 2-х основных компонентов: Агентного слоя и контрольно-измерительного терминала (КИТ). Агентный слой обеспечивает агентные функции, т. е. реализацию основных спецификаций FIPA (международный стандарт на проектирование мультиагентных систем). КИТ выполняет целевую контрольно-измерительную функцию и определяет основные метрологические характеристики тестового оборудования. При этом взаимодействие КИТ с Агентным слоем носит событийный характер.

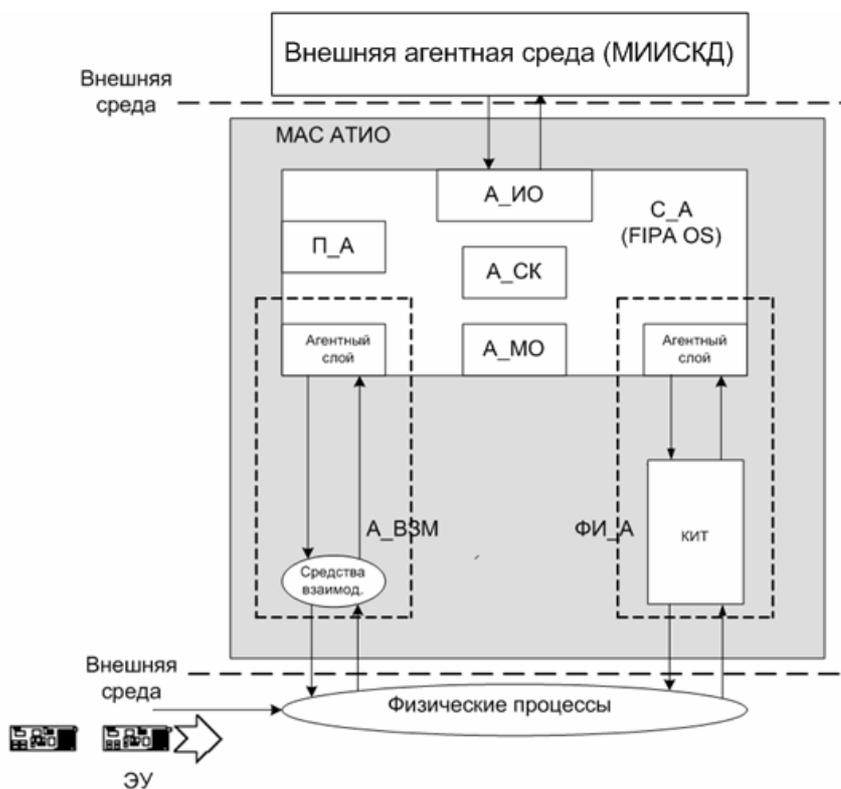


Рис. 8. Архитектура МАС АТИО

Взаимодействие ФИ\_А с внешней средой (ЭУ), обеспечивается агентом взаимодействия (А\_ВЗМ). В качестве средств взаимодействия могут использоваться: летающие пробники; поле контактов; контактные клипсы и т. д.

Для решения задач контроля необходимы знания модели ОКД и знания процедур выполнения элементарных контрольно-измерительных операций. Первые можно отнести к декларативным, вторые — к процедуральным знаниям.

Каждая тестовая и инспекционная система имеет своё модельное представление ОКД. В работе рассмотрена модель ОКД на примере анализаторов производственных дефектов (АПД), где объектами контроля являются собранные электронные узлы, которые могут быть поэлементно и/или покомпонентно диагностируемыми. Наиболее общее теоретико-множественное описание ОКД можно представить в виде системы множеств  $\Psi = \{M, A\}$ , где  $M$  и  $A$  — семейства множеств элементов ЭУ и их дефектов соответственно. Будем полагать, что  $M = \{K, A, P\}$ , где  $K$  — множество изделий электронной техники, установленных на ЭУ;  $A$  — множество проводников;  $P$  — множество монтажных точек (контрольных точек). Множество  $K$  представляет собой объединение попарно непересекающихся подмножеств  $K = \bigcup_{l=1}^L K^l$ , где  $K^l$  — подмножество всех ИЭТ одного типа;  $L$  — число типов ИЭТ, установленных на ЭУ. В качестве модельного представления объекта контроля АПД предлагается модель, имеющая логическую структуру в виде линейно связанного списка  $L = (L_1, L_2, L_3, \dots, L_i, \dots, L_m)$ , элементами которого являются подписки  $L_i$ , описывающие типовые элементы электрического монтажа исходного объекта контроля. Элементами подписков  $L_i$  являются атомы  $w_{ij}$  (в случае компонентной диагностики — списки), которые описывают свойства типовых элементов контроля и диагностики (ТЭЖид). Первый атом является идентификатором контрольно-измерительной операции.

В процессе контроля участвуют следующие модели:  $L_{исх}$  – исходная модель ОКД, содержащая априорно известные данные об объекте контроля;  $L_{цел}$  – целевая модель ОКД, содержащая знания, которые используются в принятии решений о техническом состоянии ОКД;  $L_{рез}^k$  – результирующая модель ОКД, содержащая получаемые в результате контроля знания о  $k$ -м экземпляре, где  $k$  – идентификатор тестируемого экземпляра ЭУ. Априорная и целевая модели объекта соответствуют постановке задачи испытаний, преобразование априорной модели в результирующую — процедуре или решающему правилу задачи испытаний ( $F_{np}$ ). В зависимости от соотношения между исходной и целевой моделями возможны различные типы процедур контроля. При этом модели  $L_{цел}$  и  $L_{рез}^k$  состоят в отношении наследования свойств к модели  $L_{исх}$ .

Для описания состояний АТИС будем использовать списочную структуру  $L$ , а для описания операторов перехода из одного состояния в другое — модель преобразования  $F_{np}$ , на основании которой строятся процедуры элементарных контрольно-измерительных операций. На каждом этапе процесса присутствуют исходная модель (априорная)  $L_{исх}$ , целевая (ожидаемая)  $L_{цел}$ , результирующая  $L_{рез}$  и модель преобразования  $F_{np}$ .

Процесс преобразования представляется поэтапным изменением атрибутов исходной модели ( $L_{исх}$ ) ОКД и, в конечном итоге, получением результирующей модели  $L_{рез}^k$ :

$$\begin{aligned} F_{np}(L_{исх}) &= |F_{np1}(L_{исх1}) \rightarrow L_{рез1}^k; \\ &|F_{np2}(L_{исх2}) \rightarrow L_{рез2}^k; \\ &|F_{np3}(L_{исх3}) \rightarrow L_{рез3}^k; \\ &\dots \\ &|F_{npN}(L_{исхN}) \rightarrow L_{резN}^k, \end{aligned}$$

где  $L_{рез}^k = L_{резN}^k$  – результирующая модель ОКД на последнем этапе процесса тестирования;  $k$  – идентификатор экземпляра тестируемого ЭУ;  $F_{npi}$  – модель  $i$ -й процедуры тестирования.  $L_{рез}^k$  несёт информацию о техническом состоянии ОКД, а для принятия решения о годности  $k$ -го экземпляра изделия используется целевая модель  $S_{цел}$ . Таким образом, в процессе контроля происходит пошаговое изменение состояния результирующей модели:

$$L_{рез1}^k \rightarrow L_{рез2}^k \rightarrow L_{рез3}^k \rightarrow \dots \rightarrow L_{резi}^k \dots \rightarrow L_{резN}^k,$$

где  $N$  – количество элементарных операций тестирования.

Были введены понятия СтатусШагаПроцесса, которое соответствует  $L_{резi}^k$ , и СтатусЭкземпляра, которое соответствует  $L_{рез}^k$ . Они обозначают основные информационные объекты, формирующие знания о конкретном экземпляре выпускаемой продукции и составляют содержание онтологии задачи технического контроля и диагностики (ОЗТКД). В соответствии с онтологическими обязательствами информационные объекты СтатусЭкземпляра передаются онтологии домена технического контроля и диагностики МИИСКД.

Значительную роль в деле эффективного построения программного обеспечения автоматизированной тестовой и инспекционной системы (АТИС) играют способы представления структур и типов данных, составляющих модели ОКД. Во-первых, это обеспечивает эффективную организацию базы знаний, адекватную уровню модельных представлений процесса контроля. Во-вторых, структура данных существенно влияет на возможность реализации задач интерпретации и реализации управления процессом контроля и измерения.

Информационная интеграция агентов-учредителей АТИС осуществляется через ОЗТКД. Онтология АТИС должна содержать декларативные знания об ОКД и ассоциированные с каждым экземпляром продукции результаты контрольно-диагностических операций. Знания об ОКД предлагается представить в виде сети фреймов. Описание знаний выполняется с помощью обобщённого списка свойств, описывающих ОКД и представляющих фреймовую сеть, что хорошо согласуется с логическим представлением модели ОКД в виде

списков. Расширение традиционного списка свойств достигается введением таких средств как комментарии, абстракции, ограничения, косвенные указатели и связанные процедуры.

Фрейм – это минимальная структура информации, необходимая для представления класса объектов из множества  $K$  и связанных с ними контрольно-измерительных процедур. Слот – это подструктура фрейма, которая включает в себя: имя слота; значение свойств типового элемента контроля и диагностики (ТЭКиД); присоединённые процедуры. В общем случае фрейм ТЭКиД может быть декомпозирован в сеть субфреймов  $f_h$ , каждый из которых отображает его определённые свойства и связан с выявлением определённых дефектов. В структуре фрейма субфреймы нижних уровней являются терминальными. Ввод значений свойств в слоты терминальных фреймов  $f_i$ , преобразует прототип фрейма  $f_p$  (протофрейм) в экземпляр фрейма ТЭКиД (экзофрейм)  $f_e$ . Как в процедуральной, так и в декларативной части фрейма имеются незаполненные слоты, которые заполняются в процессе активации и функционирования фрейма в соответствии с определёнными условиями или предписаниями. В эти слоты записываются знания о значениях свойств ТЭКиД, то есть измеренные значения и результаты контроля параметров типовых элементов электрического монтажа.

Процедуральные знания содержатся в виде контрольно-измерительных процедур, реализуемых КИТ. Предложена обобщённая модель КИТ в виде гибридного интерпретирующего автомата с программно-настраиваемой структурой. Последнее связано с тем, что обновление поступающих на КИТ данных ( $T_i \subset L_i$ ) равнозначно изменению структуры измерительной части КИТ посредством программной настройки. Модель представлена в виде композиции двух автоматов — настроечного (НА) и функционального (ФА). С целью более глубокого анализа КИТ была предложена дальнейшая декомпозиция ФА на информационный (ИА), логический (ЛА) и управляющий (УПА) автоматы, причём ИА и ЛА составляют операционную часть (ОпЧ), а УПА – управляющую часть (УпЧ). НА задаёт функции переходов и выводов ФА, которые записываются в виде:  $S_{v+1} = \varphi \{S_v, [\gamma(t)]_v\}$ ;  $\lambda_v^* = \delta \{S_v, [\gamma(t)]_v\}$ , где  $[\gamma(t)]_v$  – цифровой эквивалент входного воздействия  $\gamma(t)$ , несущего информацию о значении измеряемой величины  $\lambda$ ;  $\lambda_v^*$  – результат измерения (выходной алфавит);  $S_v$  – слово текущего состояния, определяющее элементарную контрольно-измерительную операцию;  $\tau_v$  – дискретное автоматное время, в которое на ФА поступает  $\gamma(t)$  и настроечная информация  $T_i$ . Гибридный способ описания позволяет представить функционирование КИТ как дискретный процесс, а переход из одного состояния ( $S_v$ ) в другое ( $S_{v+1}$ ) аналитически описать основным уравнением измерения в обобщённом операторном виде

$$\lambda^* = R_2 K R_1 \gamma(t), \quad (5)$$

где  $R_1$ ,  $R_2$  и  $K$  – соответственно операторы аналогового, цифрового и аналого-цифрового преобразования. Переход КИТ из состояния  $S_v$  в состояние  $S_{v+1}$  представлен в виде фазовой диаграммы, на которой определены фазы и условия переходов.

УпЧ в предложенной модели не имеет специфики по сравнению с УпЧ в модели дискретного преобразователя информации. Это даёт возможность использовать для её анализа и синтеза уже разработанные методы. ОпЧ, вносящая гибридный характер, является структурой, организованной для преобразования измерительной информации и формирования результатов измерения и контроля. Она зависит от измеряемых величин, принципа действия, способов обеспечения заданной точности, возможности программного управления и, в значительной мере, определяет технические и метрологические характеристики ФИ\_А. Это требует рассмотрения вопросов, связанных с методикой разработки ОпЧ.

**Шестая глава** посвящена разработке методологии проектирования операционной части (ОпЧ) ФИ\_А. ОпЧ модели КИТ представляет собой измерительный канал (ИК), осуществляющий преобразование входных воздействий в результат измерения и контроля, и реализующий операторное уравнение (5). Показано, что метрологические и эксплуатационные характеристики ФИ\_А в основном определяются организацией структуры ОпЧ с использованием всех возможностей агентной технологии — реконфигурабельности, про-

граммной настройки параметров измерительной цепи, поддержки концепции самокоррекции и самонастройки.

На этапе Формирования ЖЦ МИИСКД в рамках метрологической экспертизы определяются контролируемые параметры, точность их измерения, методы измерения, обоснование функций преобразования и т. д. Это необходимо для выбора имеющегося тестового и инспекционного оборудования или формулирования требований к вновь разрабатываемому.

В данной работе на примере тестовой системы входного контроля ИЭТ рассматриваются вопросы, связанные с методикой проектирования и разработки ОпЧ КИТ. Так как процесс проектирования измерительного канала предусматривает многократные процедуры анализа погрешностей, то представляется целесообразной разработка машинно-ориентированных способов построения модели средства измерения и модели погрешности.

Специфической особенностью измерительных устройств является то, что по передаче информативных параметров сигнала они являются линейными устройствами. Линейность преобразования по информативным переменным позволяет применить для построения моделей и анализа измерительного канала ФИ\_А аппарат линейной алгебры, и это является предпосылкой для автоматизации проектирования, так как аппарат линейной алгебры достаточно алгоритмизирован. Измерительную цепь можно представить в виде совокупности преобразовательных элементов, в которых происходит одна из элементарных операций. Статический режим каждого преобразователя характеризуется коэффициентом преобразования в виде отношения выходной переменной к входной. Функционирование измерительной цепи может быть описано системой уравнений, которую целесообразно представить в матричной форме и решать относительно искомым переменных через соответствующие определители. Разработаны правила составления матричной формы модели ИК для линейных цепей, для измерительных цепей с нелинейными и двунаправленными элементами, и для цепей с разделением ИК во времени. При последующем анализе погрешностей модели измерительного канала представляются определителями. Разработан алгоритм вычисления определителя в символьном виде. Определитель  $n$ -го порядка равен сумме произведений своих элементов в различных неповторяющихся сочетаниях

$$|a_{ij}| = \sum_{k=1}^{n!} (-1)^p \prod_{i,j=1}^n a_{ij}, \quad (6)$$

где  $i, j = 1, 2, 3, \dots, n$ ; порядок расположения номеров  $j$  в каждом произведении должен быть неповторяющимся;  $p$  – количество беспорядков по  $j$ , если  $i$  располагаются по порядку.

Если элементу  $a_{ij}$  поставить в соответствие дробный символ  $i/j$ , то произведения в (5) будут записаны как произведения дробей, в которых числители представляют собой упорядоченный набор чисел  $1, 2, 3, \dots, n$ , а знаменатели — неупорядоченный набор этих чисел. Каждое число в числителе — это номер строки, а в знаменателе — номер столбца. Если применить жёсткий порядок перебора элементов в каждом произведении от первой строки до последней, то целесообразно ввести понятие символьного определителя, отличающегося тем, что на месте ненулевых элементов проставляется число, равное номеру столбца, в котором находится данный ненулевой элемент. Такая процедура построения произведений путём перебора возможных траекторий заложена в программу вычисления определителей. Знак перед слагаемым определяется как  $\text{sign}(-1)^p$ , где  $p$  – число перестановок, которые необходимо выполнить в знаменателе для достижения такого же порядка, как и в числителе.

Поставлена и решена задача получения детерминированной модели погрешности ИК при произвольных (сколь угодно больших) приращениях величин, являющихся источниками погрешностей. Искомые характеристики представляют собой отношение определителей. Относительное приращение такого отношения как  $z = \frac{x}{y}$  равно  $\delta = \frac{\delta_x - \delta_y}{1 + \delta_y}$ , где  $\delta_x, \delta_y$  – относительные приращения числителя и знаменателя.

Если  $x$  и  $y$  заданы определителями, то необходимо нахождение приращений определителей в зависимости от приращений их элементов  $a_{ij} = \bar{a}_{ij} + \Delta_{ij}$ , где  $\bar{a}_{ij}$  – номинальное

значение элемента;  $\Delta_{ij}$  – приращение элемента или его погрешность. Введено понятие *определителя  $n$ -го порядка  $k$ -го порядка приращения* –  $D_n^k$ , где  $k=0, 1, \dots, n$ , в котором  $k$  – столбцов представляют собой приращения, а  $(n-k)$  – номинальные значения. Также введено понятие *члена  $k$ -го порядка приращений* –  $B_k$ , который представляет собой сумму определителей  $n$ -го порядка  $k$ -го порядка приращений. Определитель  $n$ -го порядка, в котором все элементы представляют собой сумму номинального значения и приращения элемента, равен

$$D_n = \sum_{k=0}^n B_k. \quad (7)$$

Число определителей в сумме  $B_k$  равно числу сочетаний из порядка определителя  $n$  по порядку приращений  $k$

$$B_k = \sum_{l=1}^{C_n^k} D_n^k l = D_n^k 1 + D_n^k 2 + \dots + D_n^k C_n^k. \quad (8)$$

Число сочетаний из  $n$  по  $k$  представляет собой коэффициенты бинома Ньютона, легко определяемые по треугольнику Паскаля. Для приближенного анализа погрешностей учитывают только определители первого порядка приращений. Так как число определителей первого порядка приращений равно порядку определителя  $C_n^1 = n$ , а разложение каждого определителя по соответствующему столбцу дает  $n$  слагаемых, то общее число слагаемых в члене первого порядка приращений равно  $n^2$

$$B_1 = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \Delta_{ij} A_{ij}, \quad (9)$$

где  $\Delta_{ij}$  – приращение  $ij$ -го элемента;  $A_{ij}$  – алгебраическое дополнение  $ij$  приращения. Относительное приращение первого порядка

$$\delta_1 = \frac{B_1}{B_0}. \quad (10)$$

Относительное приращение первого порядка, выраженное через относительные приращения элементов

$$\delta_1 = \frac{1}{B_0} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \delta_{ij} \bar{a}_{ij} A_{ij}, \quad (11)$$

где  $\delta_{ij} = \frac{\Delta_{ij}}{\bar{a}_{ij}}$  – относительное приращение  $ij$ -го элемента.

Таким образом, получена общая и достаточно формализованная методика построения детерминированной модели погрешности и модели ИК в матричной форме, которая в дальнейшем используется для анализа и оценки ИК тестовой системы входного контроля.

Первоочередной задачей проектирования является определение всех контролируемых параметров, полностью характеризующих работоспособность устанавливаемых на ПП ИЭТ и обеспечивающих возможность выявления их дефектов.

На основании функционального анализа операций сборки определено множество  $\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_l\}$  возможных типов устанавливаемых ИЭТ и множество  $\Omega_k \subseteq \Omega$  ИЭТ, устанавливаемых на ПП  $k$ -го типа. Считаем, что  $\forall \omega_i \in \Omega$  полностью характеризуются набором параметров  $P = \bigcup_{i=1}^l P_i$ , задаваемых в виде матрицы инцидентности  $P = \|r_{ij}\|$ , где

$$r_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } P_j \in P_i; \\ 0, & \text{если } P_j \notin P_i, \quad j = \overline{1, J}. \end{cases}$$

Далее решалась задача выбора и обоснования функции преобразования измерительных преобразователей (ИП), определяемых в виде матрицы инцидентности контролируемых параметров  $r_{ij}$ . Автоматическая сборка осуществляет монтаж ИЭТ в соответствии с програм-

мой установки в строго определённой последовательности, когда элемент определённого номинала устанавливается на своё место. В этом случае определение номинальных значений не является необходимым и управление целесообразней производить по относительным отклонениям от номинала. В работе найдены количественные соотношения, позволяющие сравнить по точности преобразователи относительных отклонений в напряжение (ПООН) и преобразователи абсолютных значений в напряжение (ПАЗН). Измерительные преобразователи характеризуются следующими функциями преобразования:  $U_{\text{облх}} = k_o \delta x$  и  $U_{\text{аблх}} = k_a x$ , где  $x$  – параметр радиоэлемента,  $\delta x$  – его относительное отклонение. Ставилась задача оценки точности всего массива преобразований, как по всем возможным отклонениям в пределах допусков  $\pm \delta x_i$ , так и по всем номиналам  $x_{0i}$ . В решаемой задаче применялся критерий вида:  $\overline{\gamma x^2} = \int_x \gamma(x^2) p(x) dx$ , где  $\overline{\gamma x^2}$  – квадрат относительной погрешности, усредненной по параметру;  $p(x)$  – плотность вероятности отклонений преобразуемого параметра.

Проведена оценка суммарного выигрыша  $\mathcal{E}$  с учётом характеристики входного потока радиоэлементов в системе управления автоматической сборкой узлов РЭА. Оценка проводилась для равномерного и нормального законов. Оценка  $\mathcal{E}$  для нормального закона с учётом упрощений имеет вид

$$\mathcal{E}_H = \frac{\sum_{x_{0i}} \overline{(\delta x^2)}_H}{\sum_{x_{0i}} \Delta(\delta x^2)_H};$$

$$\sum_{x_{0i}=x_n}^{x_e} \overline{(\delta x^2)}_H = \frac{2\delta^2}{N+1} \left\{ \frac{3x_e^2(1+\delta x_m)^2 K}{\sqrt{2\pi}\delta x_i} \sum_{x_{0i}=1}^{10} \left[ \frac{1}{x_{0i}} \int_{x_{0i}(1-\delta x_i)}^{x_{0i}(1+\delta x_i)} \exp\left(-\frac{9(x-x_{0i})^2}{2\delta x_i^2 x_{0i}^2}\right) \frac{dx}{x^2} \right] + \right.$$

$$\left. + N + 1 + \frac{3K}{x_e^2(1+\delta x_m)^2 \sqrt{2\pi}\delta x_i} \sum_{x_{0i}=1}^{10} \left[ \frac{1}{x_{0i}} \int_{x_{0i}(1-\delta x_i)}^{x_{0i}(1+\delta x_i)} \exp\left(-\frac{9(x-x_{0i})^2}{2\delta x_i^2 x_{0i}^2}\right) x^2 dx \right] \right\};$$

$$\sum_{x_{0i}=x_n}^{x_e} \Delta(\delta x^2)_H = \frac{\delta^2}{N+1} \left\{ S_1 x_e \left[ \delta x_m^2 + 2 \int_0^{\delta x_i} y^2 p(y) dy \right] + (N+1) \times \right.$$

$$\left. \times \left[ \delta x_m^2 + 2 \int_0^{\delta x_i} y^2 p(y) dy + \frac{1}{\delta x_m^2} \int_0^{\delta x_i} y^4 p(y) dy \right] + \frac{2S_2}{x_e^2 \delta x_m^2} \int_0^{\delta x_i} y^4 p(y) dy, \right.$$

где  $N$  – число членов ряда номинальных значений, подчиняющихся геометрической прогрессии со знаменателем  $q = \sqrt[10]{10}$ ;  $K$  – коэффициент преобразования;  $S_1, S_2$  – суммы геометрических прогрессий всех членов ряда,

$$S_1 = \frac{0,99 \sqrt[10]{100}}{\sqrt[10]{100} - 1}; \quad S_2 = \frac{99}{\sqrt[10]{100} - 1}.$$

Из полученных зависимостей (рис. 9) видно, что для ИЭТ с допусками на контролируемые параметры от  $\pm 5$  до  $\pm 20\%$  значение  $\mathcal{E}_H$  изменяется в пределах 82–726, что соответствует повышению точности ПООН по сравнению с ПАЗН в 9–27 раз.

На основе обобщённой структуры ПАЗН проведён неформальный структурный синтез и разработан функционально-полный комплекс измерительных преобразователей ФИ А.

Разработаны ПООН параметров резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности, дросселей, диодов и стабилитронов, транзисторов, сложных комплексных сопротивлений.

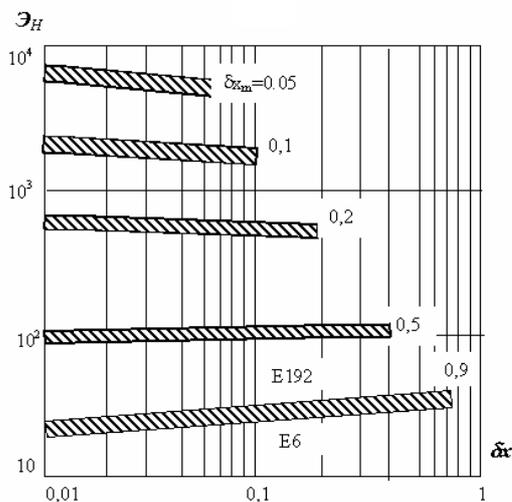


Рис. 9. Оценка выигрыша по точности

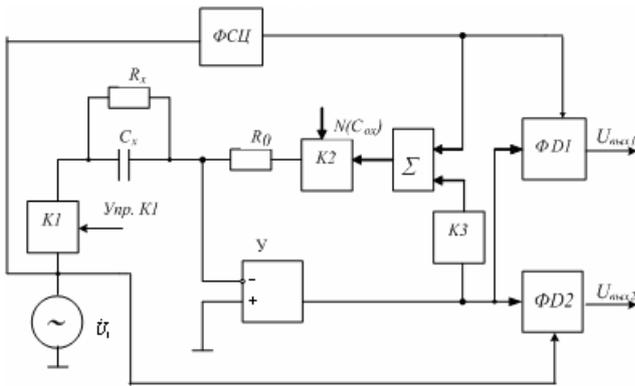
Разработаны структуры ПООН, состоящие из общих для разных ИП элементов и узлов. Высокая эффективность и высокие метрологические характеристики ИП обеспечиваются за счёт программного доступа к дискретно-управляемым параметрам. Получены функции преобразования, например, для катушек индуктивности и конденсаторов:

$$U_{\text{вых}} = -\frac{U_1 j \omega C_{ox} K_1 + U_2 K_2}{K_2 K_3} - \frac{U_1 j \omega R_0 K_1}{K_2 K_3} \Delta C_x; \quad U_{\text{вых}} = -\frac{U_1 j \omega L_{ox} K_1 + U_2 K_2 R_0}{K_2 K_3 R_0} - \frac{U_1 j \omega K_1}{K_2 K_3 R_0} \Delta L_x,$$

где  $U_1, U_2$  – источники опорного напряжения;  $K_1, K_2, K_3$  – дискретно-управляемые делители напряжения;  $L_x = L_{0x} + \Delta L_x$ ;  $C_x = C_{0x} + \Delta C_x$ ;  $\delta L_x, \delta C_x$  – относительное отклонение от номинала контролируемого параметра;  $R_0$  – эталонный резистор. При выполнении для каждого номинального значения  $C_{0x}, L_{0x}$  условий

$$K_2 = -\frac{U_1 j \omega R_0 K_1}{U_2} C_{0x} \quad \text{и} \quad K_2 = -\frac{U_1 j \omega K_1}{U_2 R_0} L_{0x}$$

и выделении квадратурных составляющих выходного напряжения получаем:



$$U_{\text{вых}} = \frac{R_x U_2}{j \omega L_x K_3} + \frac{U_2}{K_3} \delta L_x = -j \frac{U_2}{K_3} \frac{1}{Q} + \frac{U_2}{K_3} \delta L_x,$$

$$U_{\text{вых}} = \frac{U_2}{R_x K_3 j \omega C_x} - \frac{U_2}{K_2} \delta C_x = -j \frac{U_2}{K_3} \text{tg} \delta + \frac{U_2}{K_3} \delta C_x,$$

где  $\text{tg} \delta = 1/R_x \omega C_x$  – тангенс угла потерь конденсатора;  $Q = \omega L_x / R_x$  – добротность катушки индуктивности. На рис. 10 приведен пример структуры ИП параметров реального конденсатора с параллельной схемой замещения.

**Рис. 10.** ИП параметров конденсатора

Разработаны оригинальные структуры автокомпенсационных ИП, защищённые авторскими свидетельствами. Наличие общих для всех схем узлов позволяет объединить ИП средствами реконfigurационной коммутации в единое операционное поле с программно-настраиваемой структурой. Программная настройка операционного поля (ОП) обеспечивает получение необходимого преобразователя для конкретного ИЭТ.

Декомпозиция структур ИП на элементарные преобразователи (ЭП) позволяет выделить минимальное структурно-полное множество  $A$  ЭП:  $A = \{a : \forall a \in \bigcup_{j=1}^J S_j\}$ , где  $a$  – элемент

множества  $A$ ;  $S_j$  – структура  $j$ -го ИП, задаваемого на множестве  $A$ . Структуру ИП аналитически можно представить в виде матрицы соединений (инцидентности)  $C_j = [C_{m,n}]_j$ ,  $j = \overline{1, J}$ , у которой строками являются упорядоченные входы ( $m$ ), а столбцами – выходы ЭП ( $n$ ). Элемент матрицы  $C_{m,n} = 1$ , если  $m$ -й вход ЭП отождествляется с  $n$ -м выходом, в противном случае,  $C_{m,n} = 0$ . Для реализации комплекса ИП с программно-настраиваемой структурой необходимо иметь возможность задать любую из  $C$  матриц на множестве  $A$ .

При оценке эффективности полученной структуры была сконструирована функция  $K_c = \varphi(q_{01}, q_{02}, \dots, q_{0J}, q_{M1,2,3, \dots, J})$ , обладающая свойствами, при которых  $K_c = 1$ , если совмещение не дает выигрыша, и  $K_c > 1$ , если выигрыш есть. В простейшем случае это коэффициент со-

вмещения  $K_c = \frac{\sum_{j=1}^J q_{0j}}{q_{M1,2, \dots, J}}$ , где  $q_{0j}$  – сложность  $j$ -го однофункционального преобразователя;

$q_{M1,2, \dots, J}$  – сложность скомплексированного ОП с программно-настраиваемой структурой. Один из вариантов совмещения обеспечил  $K_c = 8$ .

Исходя из необходимой достоверности, были оптимизированы основные параметры преобразователей, влияющие на точность преобразования. Был осуществлён выбор количе-

ства диапазонов измерения исходя из оптимальных границ их переключения:

$$\frac{1}{K_{2\min}} = \frac{x_{\max}}{x_{\min}} \leq \frac{\sqrt{\Delta_{\text{доп}}^2 - \left(\sum_{i=1}^3 \gamma_i^2 + K_3^2 \gamma_{0\text{АЦП}}^2 + \delta x^2 \sum_{j=1}^3 \gamma_j^2\right)}}{\Delta K_2}, \quad (12)$$

где  $\gamma_i, \gamma_{0\text{АЦП}}$  – относительные погрешности элементов измерительной цепи.

Исследование выражения (12) показало, что наиболее целесообразно переключение диапазонов по декадному принципу.

Проведена оптимизация коэффициентов передачи дискретно-управляемых делителей напряжения на основании выражения

$$\mathcal{E}_{\text{МС}}(x) = \frac{(N+1)(15 + 4\delta x_m^2) + 3S_1}{(N+1)(12 + 4\delta x_m^2) + S_2 + x_\epsilon^2 \sum_{p=1}^{n-1} K_{1p}^2 \sum_{x_{\text{гр}}} \frac{1}{x_{\text{гр}}^2}},$$

где  $x_{\text{гр}}$  – граничное значение измеряемого параметра;  $N$  – количество элементов в ряду;  $n$  –

количество переключений;  $S_1 = x_\epsilon^2 \sum_{x_{0i}} \frac{1}{x_{0i}^2}$ ;  $S_2 = \frac{(4^n - 1)}{3}$ ;  $r = \text{int}\{N[1 - (n-1)\lg 2]\}$  – номер по-

следнего элемента, входящего в  $p$ -й диапазон с номиналом  $x_r = 10^{\frac{r-1}{n}}$ .

Показано, что увеличению точности в 2 раза соответствует введение трёх поддиапазонов мультипликативного согласования.

В работе исследовались динамические характеристики разработанных ИП. На основе полученной обобщённой структурной схемы составлены передаточные функции замкнутых систем, по которым оценивалась устойчивость и систематические ошибки, возникающие из-за переключения рабочих частот. Показано, что система имеет большой запас устойчивости, а время переходного процесса не превышает одного-двух периодов основной частоты.

В **седьмой главе** рассматриваются вопросы, связанные с повышением точности и метрологической надёжности измерительного канала ФИ\_А.

Эффективность решения проблемы обеспечения высоких метрологических характеристик ИК при эксплуатации его в реальных условиях технологического процесса связана с используемым методом автоматической коррекции погрешности (АКП), позволяющим постоянно оценивать метрологическое состояние тестовой системы, предотвращая возможность длительного её функционирования в неисправном состоянии. Проведён предварительный анализ существующих методов АКП. Установлено, что главным признаком методов является формирование физической модели номинальной статической функции преобразования (НСФП). Под физической моделью НСФП понимается физически реализуемая структура, отражающая аналитическую зависимость между измеряемой величиной и её цифровым или аналоговым эквивалентом. Наиболее эффективными методами АКП являются те, которые базируются на моделях НСФП, организованных в виде эталонных сигналов.

С целью нахождения новых путей совершенствования методов АКП в работе проведён морфологический анализ методов автоматической коррекции погрешностей ИК. В результате определены отличительные признаки методов с их характерными свойствами:

- способ задания НСФП (функция преобразования вспомогательного канала преобразования, источник образцовых сигналов, образцовый обратный преобразователь, образцовый прямой преобразователь);
- сравнение характеристик НСФП и РСФП (номинальной и реальной статических функций преобразования);
- место воздействия вектора управления (введение поправок в результат измерения, воздействие на РСФП ИК, воздействие на статическую функцию преобразования корректирующего устройства, воздействие на влияющие факторы);
- организация процедуры управления (аналитическая, поисковая).

Установленные характерные признаки и свойства позволили составить главную матрицу морфологического анализа и классификацию методов АКП. Проведенный анализ характерных свойств признаков определил круг задач, возникающих при решении проблемы автоматической коррекции, пути и особенности их решения. Главная матрица морфологического анализа дала возможность выявить варианты при выборе АКП. В результате оценки полученных решений предложена модификация метода образцового обратного преобразователя (итерационный метод) и новый метод АКП — метод с последовательной коррекцией.

Проведенный сравнительный анализ показал, что метод последовательной коррекции, реализующий беспоисковую процедуру, обладает более высоким быстродействием, в то время как метод итераций обладает свойством "самоисправления" (отдельная ошибка, допущенная в преобразовании, не отражается на окончательном результате, так как ошибочное приближение можно рассматривать как новый начальный вектор) и не требует априорной информации о РСФП канала. Процесс итераций приводит к выполнению однообразных операций и легко программируется. Самокорректирующиеся измерительные средства, реализующие итерационный метод коррекции, являются устойчивыми к различным перемежающимся отказам (сбоям элементов измерительной цепи, АЦП и т. д.), к импульсным наводкам т. д. Как бы не велика была погрешность вследствие такого рода отказов в  $i$ -м цикле коррекции, практически всегда уже в  $(i+2)$  или  $(i+3)$ -м цикле устройство вновь начинает работать в режиме точного измерения. Свойство самокоррекции делает данный метод одним из самых надежных методов измерения. Основным недостатком метода является его невысокое быстродействие из-за поискового характера.

При синтезе КИТ за структурную основу был взят разработанный функционально-полный набор ИП с программно-настраиваемой структурой (см. гл. 6), а за алгоритмическую — универсальный метод последовательных приближений. Математически процесс функционирования итерационного ИК представлен как решение уравнения замещения

$$F \equiv f[\psi_1(x)] - f[\psi_2(p)] = 0 \quad (13)$$

— для скалярных величин и решение системы двух уравнений замещения

$$\left. \begin{aligned} F_1 &\equiv f\{\operatorname{Re}[\psi_1(\bar{x}^*)]\} - f\{\operatorname{Re}[\psi_2(\bar{p})]\} = 0 \\ F_2 &\equiv f\{\operatorname{Im}[\psi_1(\bar{x}^*)]\} - f\{\operatorname{Im}[\psi_2(\bar{p})]\} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

— для векторных величин методом последовательных приближений

$$\bar{p}^{(i)} = \bar{\varphi}(\bar{p}^{(i-1)}),$$

где  $\psi_1(\cdot)$ ,  $\psi_2(\cdot)$  — РСФП соответственно входного и замещающего воздействий;  $\operatorname{Re}[\cdot]$ ,  $\operatorname{Im}[\cdot]$  — операторы выделения реальной и мнимой составляющих;  $f(\cdot)$  — РСФП АЦП;  $\bar{x}^*$ ,  $\bar{p}$  — векторы входного и замещающего воздействий. Решения уравнения (13) и системы уравнений (14) представляют собой "истинные" значения измеряемых параметров  $\bar{p} \approx \bar{x}^*$ , а процесс функционирования заключается в программной настройке элементов измерительной цепи, непосредственно формирующих замещающие воздействия. Оригинальность предложенных структур защищена авторским свидетельством на изобретение.

В работе проведен анализ эффективности итерационной коррекции на основании выражения для коэффициента коррекции  $\eta = \frac{1}{|1-Z|}$ , где  $Z = \frac{\Delta}{\Delta_K}$ ,  $\Delta$ ,  $\Delta_K$  — значение абсолютной погрешность преобразования до и после коррекции соответственно.

Получены и исследованы выражения для эффективности коррекции линейных амплитудных и фазовых искажений. Сформулированы требования к точностным характеристикам элементов измерительной цепи для различных значений погрешности исходного ИК, при которых достигается заданный эффект коррекции.

При измерении малых значений индуктивностей, сопротивлений, емкостей сильное влияние на погрешность оказывают такие факторы, как переходные сопротивления коммутирующих элементов и паразитные параметры. На основании анализа эффективности кор-

рекции погрешности показано, что итерационный метод не устраняет полностью влияния указанных факторов. Предложены структурные методы компенсации, которые в сочетании с итерационным методом обеспечивают высокую эффективность коррекции во всем диапазоне измерений. Проведен анализ и сформулированы требования к параметрам схем компенсации. Оригинальность предложенных структурных методов защищена авторскими свидетельствами на изобретения.

В работе был проведен анализ погрешности квантования в ИК. Выявлены составляющие погрешности. Исследование трансформированной составляющей ( $\Delta_T$ ) позволило сформулировать требование к рациональному соотношению разрядов между АЦП ( $n_{\text{АЦП}}$ ) и ЦАП ( $n_{\text{ЦАП}}$ ), непосредственно формирующих замещающие воздействия. Показано, что при  $\Delta n = (n_{\text{АЦП}} - n_{\text{ЦАП}}) \geq 3$ ,  $\Delta_T \approx 0$ . Исследованы зависимости с.к.з. погрешности квантования от  $\Delta n$  с учетом и без учета взаимосвязи контуров настройки.

Проведено исследование алгоритмов самонастройки ИК, ориентированных на повышение точности и построенные по методу простых итераций и методу Ньютона-Рафсона. Исследования проводились для линейной и нелинейной моделей канала. Получены выражения для вычисления начального приближения, асимптотически постоянного значения погрешности коррекции, теоретического значения числа итераций, необходимых для достижения заданной погрешности. Сформулированы требования к условию сходимости процесса коррекции, которое для ИК векторных величин определяется как  $\|\gamma\| < 1$ , где  $\|\gamma\|$  – норма погрешности, возникающей за счет нелинейности РСФП и взаимосвязи контуров настройки. Получены выражения для проверки условий, выполнение которых гарантирует, что данное начальное приближение обеспечит сходимость процесса коррекции, построенного по методу Ньютона-Рафсона со сверхлинейной скоростью. За критерий эффективности алгоритма коррекции принято число  $N$ , которое определяет количество обращений к измерительной процедуре, необходимых для достижения заданной точности.

Проведено численное моделирование и сравнение процессов коррекции, построенных по методу простых итераций и методу Ньютона-Рафсона для различных значений угла  $\alpha$ , характеризующего фазовые искажения ИК, и коэффициента нелинейности  $g_2$ . Показано, что число  $N$  (при  $0,01 < g_2 \leq 0,05$  и  $\alpha = 0,1 \dots 5^\circ$ ) для метода Ньютона-Рафсона в 2 раза меньше, что делает его применение значительно эффективнее.

В работе исследованы динамические характеристики разработанных ИК. Проведено сравнение времени установления ИК, которое показало, что наиболее длительными являются операции преобразования параметров комплексных сопротивлений и тока утечки конденсаторов. Для сокращения времени преобразования тока утечки конденсаторов разработан метод измерения установившегося значения по трем отсчетам кривой переходного процесса, позволивший сократить время более чем на порядок.

В качестве меры по сокращению времени преобразования параметров комплексного сопротивления до 2-3 периодов основной частоты предлагается измерять параметры сигнала, несущего информацию о составляющих комплексного сопротивления, по его мгновенным значениям, используя для этого известные методы и разработанную структуру канала.

Одним из рациональных путей сокращения времени итерационного измерения является уменьшение числа обращений к измерительной процедуре, необходимых для достижения заданной точности коррекции. Для этого в работе были исследованы модификации метода Ньютона-Рафсона:

$$\bar{p}^{(i+1)} = \bar{p}^{(i)} - [J(\bar{p}^{(0)})]^{-1} \bar{F}(\bar{p}^{(i)}); \quad (15)$$

$$\bar{p}^{(i+1)} = \bar{p}^{(i)} - [J(\bar{p}^{(\xi t)})]^{-1} \bar{F}(\bar{p}^{(i)}), \quad (16)$$

где  $\bar{p}^{(i)}$  – вектор замещающего воздействия;  $\bar{p}^{(0)}$  – вектор начального приближения;  $i = \xi t + k$ ;  $\xi = 0, 1, \dots$ ;  $k = 0, 1, 2, \dots, (t-1)$ ;  $t \geq 1$  – произвольное число, определяющее число шагов, через которое осуществляется обновление матрицы. Проведено численное моделирование процес-

сов коррекции, построенных в соответствии с (15) и (16) для различных значений коэффициентов нелинейности  $g_2$  модели РСФП канала. Сравнение результатов моделирования показало, что для  $g_2 \leq 0,01$  наиболее целесообразно применение (15), т. к. в окрестности решения матрица  $J$  меняется незначительно, для  $0,05 \geq g_2 > 0,01$  наиболее эффективным является процесс, построенный в соответствии с (16) при  $t=4$ . Это даёт возможность сократить число  $N$ , а следовательно и время измерения, в 1,5...2 раза. С целью уменьшения среднего времени, затрачиваемого на процедуры измерения и контроля параметров потока ИЭТ, устанавливаемых на ПП, в работе предложен комбинированный метод коррекции, сущность которого заключается в сочетании поискового и беспойскового методов и предполагает выполнение следующих фаз:

1) фаза измерения контролируемых параметров; оценка их в соответствии с оператором коррекции  $\Phi$  и контроль метрологических характеристик (МХ) в реальном масштабе времени; при выходе МХ за допустимый предел – переход к фазе 2;

2) фаза итерационной коррекции погрешности; использование информации, полученной в ходе коррекции для уточнения оператора  $\Phi$ .

Беспойсковая оценка входных воздействий ИК скалярных и векторных величин осуществляется в соответствии с выражениями

$$\begin{aligned} \tilde{x}^* &= \Phi[Y^*] = M_j Y^* + A_j; \\ \left. \begin{aligned} \tilde{x}_1^* &= \Phi_1[\tilde{Y}^*] = Y_1^* S_{11}^{ij} + Y_2^* S_{12}^{ij} + S_{13}^{ij} \\ \tilde{x}_2^* &= \Phi_2[\tilde{Y}^*] = Y_1^* S_{21}^{ij} + Y_2^* S_{22}^{ij} + S_{23}^{ij} \end{aligned} \right\}, \end{aligned}$$

где  $M_j, S_{11}^{ij}, S_{12}^{ij}, S_{13}^{ij}$  – коэффициенты коррекции мультипликативных составляющих;  $A_j, S_{21}^{ij}, S_{22}^{ij}, S_{23}^{ij}$  – коэффициенты коррекции аддитивных составляющих погрешности ИК. Процесс итерационной коррекции погрешности строится в соответствии с данным алгоритмом.

В работе проведена ориентировочная оценка выигрыша при использовании предложенного комбинированного метода. Показано, что суммарное время, затрачиваемое на контрольно-измерительные операции при реальных условиях установки однотипных ИЭТ  $L=10\ 000$ , сокращается более чем в 2,5 раза.

**Восьмая глава** посвящена синтезу самонастраивающегося ИК ФИ\_А с последовательной коррекцией погрешности. Сущность метода состоит в том, что измерительный канал дополняется последовательным корректирующим устройством, реализующим статическую функцию преобразования (СФП), относящуюся к классу одновременно сюръективных и биективных функций. Корректирующее устройство имеет доступ к вектору настраиваемых параметров (коэффициентов), с помощью которого можно значительно изменять форму СФП. Путём организации процедуры настройки с помощью устройства управления осуществляется приближение композиции РСФП и СФП к НСФП. Предложенный подход иллюстрируется структурными схемами, которые отличаются способом организации модели НСФП: в первом случае, модель НСФП представляет набор пар эталонов, во втором, реализуется образцовым прямым преобразователем, структура которого организуется на базе ИК с последовательной коррекцией, и моделью НСФП в виде набора пар эталонов.

Было осуществлено преобразование структурной схемы, иллюстрирующей метод последовательной коррекции, которое позволило применить метод идентификации. В преобразованной структурной схеме объект идентификации определён конечным числом пар  $(Y, Z_s)$ , принадлежащих множеству  $\Phi^{-1}$ , где  $\Phi^{-1}$  – обратное отображение композиции  $F^{-1}$  и  $F_p$ ,  $F^{-1}$  – обратное отображение НСФП,  $F_p$  – РСФП ИУ,  $Y$  – выходной сигнал ИУ,  $Z_s$  – выходной эталонный сигнал.

Устройством управления осуществляется процедура настройки, в результате которой обеспечивается  $F_K \cong \Phi^{-1}$ , где  $F_K$  – СФП корректирующего устройства. После окончания процедуры настройки СФП корректирующего устройства  $F_K$  проходит через узлы интерполяции, порождённые функцией  $\Phi^{-1}$ , и является гладкой.

В качестве аналитической модели  $F_K$  предлагается использовать полином Ньютона, гладкое восполнение на базе полинома Ньютона и трёхточечный кубический сплайн.

*Определение.* Функция  $g(y)$  называется кубическим трёхточечным интерполяционным сплайном для функции  $Z(y)$ , если  $g(y)$  определяется как кубический сплайн, принадлежит классу  $c^{(2)}(a, b)$ , на каждом из отрезков  $[y_{k-1}, y_k]$  является кубическим многочленом, в узлах сетки

$$\Delta_h : a = y_0 < y_1 < \dots < \bar{y}_n = b \quad (n \geq 2), \quad (17)$$

выполняется равенство  $g(y_k) = Z_k$  ( $k = 0, 1, \dots, n$ ), в узлах сетки

$$\bar{\Delta} : \bar{y}_0 = a < \bar{y}_1 < \dots < \bar{y}_n < b = \bar{y}_{n+1} = B \quad (18)$$

выполняется равенство  $g(\bar{y}_l) = Z_l$  ( $l = 0, 1, \dots, n+1$ ).

Коэффициенты интерполянта  $g(y)$  находятся из выражения

$$B_i = \frac{\bar{Z}_i - b_{i-1} \frac{(y_i - \bar{y}_i)^3}{6h_i} - \bar{Z}_{i-1} \frac{y_i - \bar{y}_i}{h_i} + b_{i+1} \frac{h_i(y_i - \bar{y}_i)}{6} - \bar{Z}_i \frac{\bar{y}_i - y_{i-1}}{h_i}}{\frac{(\bar{y}_i - y_{i-1})^3}{6h_i} - \frac{h_i(\bar{y}_i - y_{i-1})}{6}}, \quad (19)$$

$$B_0 = g''(y), \quad \dots, y_{i-1} < \bar{y}_i < y_i, \quad h_i = y_i - y_{i-1}. \quad (20)$$

Для оценки порядка приближения и сходимости введённого интерполянта показано, что, если  $Z(y) \in c^{(2)}(a, b)$ , то для трёхточечного сплайна с узлами (17), (18), коэффициентами (19) и условием  $B_0 = 0$  имеет место неравенство:

$$|R(y)| = |Z(y) - g(y)| \leq |Z^n(\xi_i)| \|\Delta_n\|^2, \quad y \in [a, b], \quad \bar{y}_i = \frac{y_{i-1} + y_i}{2}. \quad (21)$$

Указанные функции обладают важным практическим свойством — коэффициенты интерполянтов определяются как в явном виде, так и путём сепарабельной настройки в замкнутом контуре, что обуславливает простые алгоритмы и устройства управления. В случае неявной самонастройки коэффициенты  $b_i$  интерполянта СФП корректирующего устройства предлагается определять с помощью процедуры

$$B_j[n+1] = B_j[n] + \mu_j \Delta_j[n], \quad (22)$$

где  $\mu_j$  — весовые коэффициенты,  $\Delta_j[n]$  — рассогласование между  $F_K$  и  $\Phi^{-1}$  в узлах интерполяции,  $n = 1, 2, 3, \dots$  — номер итерации при настройке коэффициента.

Процедура вида (22) обуславливает передаточную функцию замкнутой системы настройки каждого коэффициента  $B_j$ :

$$W = \frac{\mu_j D_j}{z - 1 + \mu_j D_j}. \quad (23)$$

Установлено, что система настройки устойчива при  $\mu_j D_j < 2$ , а при  $\mu_j D_j = 1$  обладает максимальным быстродействием. Коэффициенты  $D_j$  зависят от вида используемых интерполянтов НСФП, РСФП и сетки входных эталонов. Получены выражения для определения максимальных коэффициентов  $D_j$  в случае использования предложенных интерполянтов как функции сетки входных эталонов. Так как произведения  $\mu_j D_j$  определяют устойчивость контуров настройки, в диссертации даётся методика определения  $\mu_j$  при ограничениях, накладываемых на вариацию РСФП, аналитическая модель которой имеет вид

$$y = \sum_{i=0}^m a_i x^i = F_p : X \rightarrow Y. \quad (24)$$

Ограничение на РСФП для случаев, когда применяются интерполянты СФП корректирующего устройства в виде полинома Ньютона и гладкого восполнения на базе полинома Ньютона, предлагается в виде зоны, заключенной между прямыми

$$y = L_0 + L_1 x, \quad y = P_0 + P_1 x \quad (25)$$

и областью определения  $F_p, D_{Fp} \subset x$ .

Были получены выражения для максимальных значений  $D_j$  для случая, когда вектор параметров полинома не менял размерность, первая производная (24) была больше нуля, а корректирующее устройство реализовало полином Ньютона:

$$\left. \begin{aligned} D_{0,\max} &= 1; \\ D_{1,\max} &= L_0 + L_1\Delta x - P_0; \\ D_{2,\max} &= (L_0 + L_1 2\Delta x - P_0)(L_0 + L_1 2\Delta x - P_0 - P_1\Delta x); \\ D_{3,\max} &= (L_0 + L_1 3\Delta x - P_0)(L_0 + L_1 3\Delta x - P_0 - P_1\Delta x)(L_0 + L_1 3\Delta x - P_0 - P_1\Delta x); \\ D_{k,\max} &= (L_0 + L_1 k\Delta x - P_0)(L_0 + L_1 k\Delta x - P_0 - P_1\Delta x) \dots [L_0 + L_1 k\Delta x - P_0 - P_1(k-1)\Delta x], \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

где  $\Delta x$  – шаг сетки входных эталонов.

В работе также приводятся выражения для определения максимальных значений коэффициентов при реализации гладкого восполнения на базе полинома Ньютона и кубического трёхточечного сплайна.

С целью сравнения самонастраивающихся ИУ, реализующих предложенные интерполлянты, было проведено их моделирование. В качестве примера выбраны РСФП, описываемые полиномами второй и третьей степени. Качество коррекции оценивалось максимальным расстоянием между НСФП и РСФП скорректированного канала ИУ в каждом интервале сетки эталонных сигналов, а также отношением

$$V = \frac{\int_{D_{Fp}} |F_P - F_M| dx}{\int_{D_{Fp}} |F_C - F_M| dx},$$

где  $F_C$  – РСФП скорректированного ИУ;  $F_M$  – номинальная СФП.

Результаты сравнения показали, что при сильных нелинейностях лучший эффект последовательная коррекция даёт, когда СФП корректирующего устройства воспроизводит гладкое восполнение на базе полинома Ньютона или кубический трёхточечный сплайн. При проектировании самонастраивающихся ИУ с последовательной коррекцией необходимо корректировать СФП канала в диапазоне преобразуемого сигнала несколько большим, чем в ИУ без последовательной коррекции.

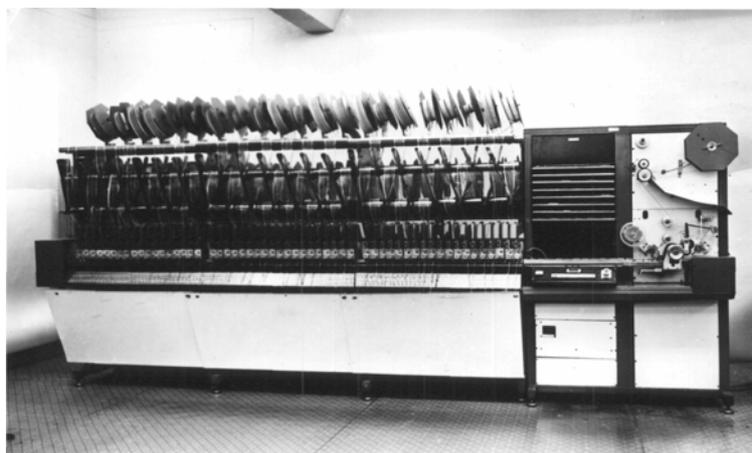
**Девятая глава** посвящена описанию практической реализации разработанных систем технического контроля и диагностики и методов их информационной интеграции, структурных решений узлов и блоков, алгоритмов и программного обеспечения, а так же результатов экспериментальных исследований.

Представлены проектные решения МИИСКД, связанные с информационной интеграцией гетерогенного тестового и инспекционного оборудования. Основой представленных проектных решений является платформенная и языковая независимость, простота внедрения и адекватность функционирования. Приведены основные DTD файлы, описывающие XML-сообщения, несущие информацию о метрологическом состоянии АТИО и техническом состоянии каждого экземпляра собираемого ЭУ. Разработана виртуальная машина, позволяющая моделировать все виды сообщений реального тестового и инспекционного оборудования, передавать их по сети через Брокер Сообщений, имитируя ситуацию взаимодействия. Приведены результаты экспериментальной проверки коммуникационного механизма МИИСКД и тестирования возможностей Брокера Сообщений, показавшие высокую эффективность предложенной коммуникационной модели внутрисистемного взаимодействия МИИСКД.



Приведены описания и технические характеристики двух разработанных модулей: РП32801 — предназначенного для точного измерения сопротивления в миллиомном диапазоне и РП32802 — для определения полярности и тока утечки конденсаторов большой ёмкости. Основой модулей являются разработанные и исследованные в диссертации преобразователи, реализующие итерационный метод коррекции и структурные методы компенсации влияющих факторов, обеспечившие высокие метрологические характеристики. Модуль РП32801 предназначен для тестирования собранных ЭУ, разъёмных соединений, сопротивлений контактов реле, сопротивлений дорожек ПП, тестирования шунтов. Технические характеристики: РП32801 — диапазон/погрешность ( $2 \div 20$  мОм /  $\delta=10\%$ ;  $20 \div 200$  мОм /  $\delta=7\%$ ;  $200$  мОм  $\div 2$  Ом /  $\delta=6\%$ ); РП32802 —  $I_{ум} = 10$  мкА  $\div 10$  мА. Модули могут использоваться как автономные ФИ\_А в мультиагентной тестовой системе или как модули расширения функциональных возможностей существующих анализаторов производственных дефектов (например, MDA TR8 фирмы CheckSum).

Предложенные структуры преобразователей и методика их проектирования нашли применение при разработке семейства контрольно-измерительных терминалов (КИТ) "А36Т-5", "А36Т-6", предназначенных для входного контроля ИЭТ, вклеенных в ленту в составе ГАП узлов РЭА "Трасса" и для автоматизированной системы подготовки комплектующих ИЭТ к монтажу в виде программной ленты "Трал-МК". Основу КИТ составляют разра-



ботанный и исследованный в диссертации комплекс измерительных преобразователей с программно-настраиваемой структурой. В "А36Т-6" использованы методы коррекции и самонастройки, предложенные в диссертации, что позволило повысить точность на порядок. Основная приведённая погрешность преобразования лежит в пределах  $\delta = 0,06\% \div 0,1\%$ , это обеспечивает высокую достоверность контроля. Основные измеряемые параметры и диапазоны их измерения:  $R(0,1$  Ом  $\div 10$  Мом);  $L(100$  мкГн  $\div 1$  Гн);  $Q(3 \div 1000)$ ;  $C(10$  пФ  $\div 1200$  мкФ);  $tg\delta(0,001 \div 0,3)$ ;  $I_{ум}(10$  мкА  $\div 10$  мА);  $U_{пр}$  (прямое падение напряжения на  $p-n$  переходе при  $I=10$  мА,  $0,1 \div 50$  В);  $I_{обр}$  (обратный ток  $p-n$  перехода,  $10$  мкА  $\div 100$  мА);  $\beta$  (коэффициент усиления транзисторов  $1 \div 1000$ ).

Разработанные и исследованные структуры измерительных преобразователей использованы в подсистеме технического контроля индукторов при производстве магнитотерапевтических комплексов семейства "Мультимаг".

Предложенные структурно-алгоритмические методы коррекции погрешности переходных сопротивлений и подводящих проводов позволили реализовать модуль удалённых измерений малых сопротивлений, который в совокупности с модулями измерения тока и частоты образует систему допускового эксплуатационного контроля ракет.

Приведенные в работе описания и основные технические решения лежат в основе построения систем межоперационного контроля технологического процесса сборки схем управления ферритовыми фазовращателями (ФФВ) ФАР. Системы А 11-2, А 14-1 осуществ-

ляют контроль и диагностику статических параметров в цепях управления, контроль функционирования и контроль входных токов микросхемы управления ФФВ. В системе А112А-7/2 на основе использования разработанных преобразователей активного сопротивления, добротности и индуктивности, защищённых авторскими свидетельствами на изобретения, реализовано совмещение контроля правильности намотки, активного сопротивления, межвитковых и межвитковых замыканий, а также числа витков катушек управления ФФВ.

Разработанные системы, устройства, алгоритмы и программное обеспечение внедрены на заводах-изготовителях РЭА, в научно-исследовательских организациях и в учебный процесс Рязанского государственного радиотехнического университета.

**В заключении** приведены основные научные выводы и практические результаты диссертационной работы.

1. На основании анализа тенденций развития современного производства, связанного с появлением парадигмы интеллектуальных распределённых производственных систем, сформулированы признаки и требования к новому поколению ИИС технического контроля и диагностики РЭА — мультиагентным виртуальным информационно-измерительным системам. Проведённый анализ показал, что на сегодняшний день практически отсутствует как таковая теория таких систем и методология их построения.

2. Впервые предложен и обоснован мультиагентный подход к анализу и проектированию нового класса информационно-измерительных систем — МИИСКД. Разработанная методология основана на метамодельном представлении системы, что позволило отразить различные системные аспекты и понятия, связанные с её организацией, целями и задачами, предметной областью, агентами-учредителями и их взаимодействием, а также взаимодействием с внешней средой.

3. Разработаны принципы информационной интеграции агентов-учредителей МИИСКД — автоматизированного тестового и инспекционного оборудования (АТИО). Выбрана модель взаимодействия агентов МИИСКД на Web основе, использующая HTTP протокол и XML-сообщения, рассматривающая Internet/Intranet как распределённую вычислительную платформу предприятия. Разработан протокол взаимодействия агентов с Брокером Сообщений, сформулированы ограничения и правила целостности передаваемых данных, специфицировано коммуникационное программное обеспечение агентов домена сотрудничества. Разработана модель поведения АТИО в виде диаграммы состояний Харела, определены основные состояния оборудования и условия их переходов, связанные с генерацией сообщений о техническом и метрологическом состоянии.

4. В результате системного анализа процессов тестирования, инспекции и ремонта ЭУ была разработана семантическая модель домена контроля и диагностики (ДКД). Предложен теоретико-множественный подход к формальному отображению семантики ДКД на структуру XML-сообщений. Разработаны схемы XML-сообщений о результатах операций контроля и диагностики и оценках метрологического состояния АТИО. Показано, что при асинхронности событий отношения между сообщениями в виде ссылок связывают и группируют их воедино. Разработанные схемы сообщений послужили основой для построения онтологии технического контроля и диагностики (ОТКД) домена сотрудничества. Формирование ОТКД, обеспечение взаимодействия на её основе ключевых служб позволяет рассматривать МИИСКД как полноценный информационный актив предприятия, обеспечивающий достоверной информацией о результатах контроля качества выпускаемых изделий, а также метрологическом и техническом состоянии АТИО.

5. Разработан метод и алгоритм оптимизации размещения АТИО в многооперационном технологическом процессе производства РЭА, учитывающий критерий выхода годных изделий и экономическую эффективность принимаемых решений. Разработаны спецификации на программное обеспечение класса DfT (Design for Test).

6. Разработаны принципы построения мультиагентной тестовой системы (на примере анализатора производственных дефектов – АПД). Предложена методология проектирования мультиагентных тестовых систем с учётом их функционирования в реальном масштабе времени. В приведённой таксономии агентов-учредителей системы выделен класс

мени. В приведённой таксономии агентов-учредителей системы выделен класс Физических Измерительных Агентов (ФИ\_А), определяющий функциональные возможности АПД и инкапсулирующий в себе все необходимые программно-аппаратные и информационные ресурсы. Особенностью структуры программно-аппаратных средств ФИ\_А является выделенная агентная часть и контрольно-измерительный терминал (КИТ), реализующий элементарные контрольно-измерительные операции. Обобщённая модель КИТ представлена в виде гибридного интерпретирующего автомата.

7. Разработана методология моделирования и предварительной оценки погрешности измерительного канала ФИ\_А. В методологии реализован детерминированный подход к оценке погрешности и аппарат линейной алгебры. Впервые получены соотношения, связывающие величины составляющих погрешностей узлов преобразователей и характеристики потока контролируемых ИЭТ, позволившие определить выигрыш в точности преобразователей относительных отклонений по сравнению с преобразователями абсолютных значений при метрологической экспертизе средств технического контроля. Проведён структурный и параметрический синтез операционной части ФИ\_А, представляющей собой комплекс измерительных преобразователей с программно-перестраиваемой структурой. Оригинальность преобразователей защищена авторскими свидетельствами.

8. Проведён морфологический анализ существующих методов автоматической коррекции погрешностей. Построена главная матрица системного анализа, позволившая найти новый путь совершенствования метода самонастройки (названного методом последовательной коррекции) и модификацию существующего метода итерационной коррекции.

9. Разработаны структуры каналов преобразования с итерационным методом коррекции. Оригинальность предложенных структур защищена авторскими свидетельствами на изобретение и патентами. Получены и исследованы выражения для эффективности коррекции линейных амплитудных и фазовых искажений в канале преобразования. Сформулированы требования к точностным характеристикам элементов измерительной цепи. Разработаны структурные способы компенсации погрешностей, возникающих от действия известных влияющих факторов и не устранимых итерационной коррекцией, новизна которых защищена авторскими свидетельствами.

10. Разработаны и исследованы алгоритмы итерационной коррекции на основе методов простых итераций и Ньютона-Рафсона для линейной и нелинейной моделей РСФП канала. Предложены меры по сокращению времени итерационных измерений наиболее медленнорействующих ИП за счёт уменьшения количества обращений к измерительной процедуре.

11. Предложен и исследован метод последовательной коррекции с самонастройкой. Проведён синтез устройств системы последовательной коррекции погрешностей с использованием гладкого восполнения на базе полинома Ньютона и трёхточечного кубического сплайна. Решена задача синтеза сепарабельных систем самонастройки характеристик ИУ с последовательным корректором, реализующим полиномом Ньютона, гладкое восполнение на базе полинома Ньютона и трёхточечный кубический сплайн. Даны методики выбора весовых коэффициентов контуров для неявных методов самонастройки, что позволяет обеспечивать устойчивость контуров настройки при вариациях параметров РСФП ИУ. Доказана сходимость трёхточечного кубического сплайна. Получено выражение для оценки точности интерполирования трёхточечным кубическим сплайном и эффективности коррекции.

12. Представлены проектные решения МИИСКД, связанные с информационной интеграцией гетерогенного тестового и инспекционного оборудования, основой которых является платформенная и языковая независимость, простота внедрения и адекватность функционирования. Для проверки работоспособности предложенных методов коммуникации разработана виртуальная машина, позволяющая моделировать все виды сообщений реального тестового и инспекционного оборудования, передавать их по сети через Брокер Сообщений, имитируя ситуацию взаимодействия. Брокер Сообщений разработан на основе IIS (MS) и MS MQ. Проведённая экспериментальная проверка показала правильность теоретических положений, приведённых в диссертации. Для разработанных по принципу автономных агентов

модулей РП32801, РП32802 и контрольно-измерительных терминалов А36Т-5, А36Т-6 был разработан простой клиент (Java апплет), который позволил проверить возможность их взаимодействия через Брокер Сообщений в режиме протоколов "точка-точка" и "публикация-подписка". Проверка показала работоспособность и возможность взаимодействия тестового оборудования в соответствии с предложенной в работе коммуникационной моделью.

Анализ приведённых выше результатов показывает, что представляемая работа связана с решением крупной научно-технической задачи и развитием нового научного направления — мультиагентных виртуальных информационно-измерительных систем технического контроля и диагностики, удовлетворяющих современным требованиям парадигмы интеллектуального распределённого производства.

### ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Антипов В.А., Мелехин В.П. Повышение точности средств измерений. – М.: Радиотехника, 2007. – 288 с.
2. Антипов В.А. Новые информационно-измерительные технологии: Учебное пособие. – Рязань: Радиотехническая акад., 2002. – 80 с.
3. Антипов В.А., Бурлаков В.Д., Бородавченко В.В., Фролин М.И., Лукьянов Ю.А. Измерительная система параметров радиоэлементов на базе мини-ЭВМ СОУ-1 // Тезисы докладов Всесоюзной НТК по информационно-измерительным системам "ИИС-81". Ч. 3. – Львов, 1981. – с. 24.
4. Антипов В.А., Фролин М.И. Система для статических прочностных испытаний // Информационный листок № 258-82. – Рязань: Межотраслевой центр, 1982. – 4 с.
5. Антипов В.А., Бородавченко В.В. Применение микропроцессора в качестве процессора ввода-вывода аналоговых сигналов в системе с мини-ЭВМ // Автоматизация измерений: Межвуз. сб. научных трудов. – Рязань: РРТИ, 1982. – с. 18–22.
6. Антипов В.А., Масляев В.Н., Сычук А.М., Белеволенская Е.М. Измерительно-вычислительный комплекс для статических испытаний на прочность конструкций железнодорожной техники // Динамика и прочность магистральных тепловозов: Труды ВНИТИ. Вып. 60. Коломна, 1984. – с. 24–30.
7. Антипов В. А. Проблемы тестирования сложных схемных плат и путей их решения // Электроника. – 1985, № 15. – с. 34–40.
8. Антипов В.А., Бурлаков В.Д. Преобразователь относительных отклонений активного сопротивления для автоматизированной системы контроля // Автоматизация экспериментальных исследований и испытаний: Межвуз. сб. научных трудов. – Рязань: РРТИ, 1985. – с. 11–17.
9. А.с. № 1190298. Преобразователь сопротивления в постоянное напряжение / В.А. Антипов, В.Д. Бурлаков, В.П. Мелехин, М.И. Фролин. – Оpubл. в БИ 1985, № 41.
10. А.с. № 1193601. Преобразователь сопротивления в напряжение / В.А. Антипов, В.Д. Бурлаков, В.В. Елисеев, В.П. Мелёхин. – Оpubл. в БИ 1985, № 43.
11. А.с. № 1246012. Преобразователь относительных отклонений составляющих комплексного сопротивления / В.А. Антипов, В.Д. Бурлаков, В.В. Елисеев, В.П. Мелёхин. – Оpubл. в БИ 1986, № 27.
12. А.с. № 1264107. Устройство для измерения добротности колебательных систем / В.А. Антипов, В.П. Мелёхин, С.Ю. Новожилов, М.И. Фролин. – Оpubл. в БИ 1986, № 38.
13. Антипов В.А., Каневский А.О. Автоматизация процесса контроля дозирования и взвешивания комбикормов на свинооткормочном комплексе "Искра" // Тезисы докладов Всесоюзной конференции "АПК – интенсивное развитие". Ч. 4. – Рязань, 1986. – с. 4.
14. Антипов В.А. Измерительный преобразователь итерационной коррекцией погрешности // Автоматизация измерений при испытаниях: Межвуз. сб. научных трудов. – Рязань: РРТИ, 1987. – с. 99–104.
15. Антипов В.А. Синтез самонастраивающихся функциональных преобразователей для систем автоматического контроля // Электроника. – 1987, № 15. – с. 30–35.

16. Антипов В.А., Фролин М.И. Обобщенная структурная модель контрольно-измерительного терминала // Автоматизация испытаний и измерений: Межвуз. сб. научных трудов. – Рязань: РРТИ, 1988. – с. 15–22.
17. Антипов В.А., Петров В.С., Фролин М.И. Контрольно-измерительный терминал ГАП узлов РЭА // Тезисы докладов Всесоюзной НТК "Конструкторско-технологическое обеспечение качества микро- и радиоэлектронной аппаратуры при проектировании и производстве". Ч. 2. – Ижевск, 1988. – с. 10–11.
18. Антипов В.А., Бурлаков В.Д., Петров В.С., Фролин М.И. Определение достоверности результатов контроля ИЭТ при использовании мультипликативной коррекции погрешности измерения // Тезисы докладов Всесоюзной НТК "Конструкторско-технологическое обеспечение качества микро- и радиоэлектронной аппаратуры при проектировании и производстве". Ч. 2. – Ижевск, 1988. – с. 65–66.
19. Антипов В.А. Анализ эффективности канала преобразования с самокоррекцией // Автоматизация испытаний и измерений: Межвуз. сб. научных трудов. – Рязань: РРТИ, 1988. – с. 55–60.
20. Антипов В.А., Бородавченко В.В., Бурлаков В.Д., Петров В.С., Фролин М.И. Гибкий измерительный модуль автоматизированной системы сборки узлов на печатных платах // Тезисы докладов Всесоюзной НТК "Конструкторско-технологическое обеспечение качества микро- и радиоэлектронной аппаратуры при проектировании и производстве". Ч. 2. – Ижевск, 1988. – с. 69–70.
21. Антипов В.А. Комбинированный метод коррекции погрешности канала преобразования параметров радиоэлементов // Автоматизация испытаний и измерений: Межвуз. сб. научных трудов. – Рязань: РРТИ, 1990. – с. 4–9.
22. Антипов В.А., Мелехин В.П. Устройство контроля катушек индуктивности // Информационный листок № 147-90. – Рязань: Межотраслевой центр, 1990. – 4 с.
23. Антипов В.А., Мелёхин В.П. Устройство допускового контроля сопротивлений // Информационный листок № 90-14. – Рязань: Межотраслевой центр, 1990. – 4 с.
24. А.с. № 1622837. Преобразователь малых сопротивлений в напряжение / В.А. Антипов, В.Е. Мелехин, М.И. Фролин, В.Л. Колесников, С.И. Петраков. – Оpubл. в БИ 1991, № 3.
25. А.с. № 1626190. Измеритель комплексного сопротивления с компенсацией паразитных параметров / В.А. Антипов. – Оpubл. в БИ 1991, № 5.
26. А.с. № 1691776. Устройство измерения и контроля параметров радиоэлементов с самокоррекцией / В.А. Антипов, В.Д. Бурлаков, М.И. Фролин. – Оpubл. в БИ 1991, № 42.
27. Антипов В.А., Мелехин В.П., Складчикова О.Б. Исследование связи параметров электрической модели биоткани с физиологическим состоянием животных // Автоматизация испытаний и измерений: Межвуз. сб. научных трудов. – Рязань: РРТИ, 1992. – с. 28–33.
28. Антипов В.А., Мелехин В.П., Складчикова О.Б. Исследование электрофизических параметров биоткани // Автоматизация испытаний и измерений: Межвуз. сб. научных трудов. – Рязань: РРТИ, 1992. – с. 77–80.
29. Антипов В.А., Мелехин В.П. Система мониторинга текущего физиологического состояния биологических объектов // Тезисы докладов Международной конференции "Технологии и системы сбора, обработки и представления информации". – Рязань, 1993. – с. 102–103.
30. Антипов В.А., Мелехин В.П., Чуляева О.Б. Экспериментальные исследования по определению физиологического состояния животных // Тезисы докладов Всероссийской НТК "Электронизация и компьютеризация сельскохозяйственного производства". – Рязань, 1993. – с. 5–6.
31. Антипов В.А., Мелехин В.П., Чуляева О.Б. Структура электронного измерительного прибора для определения физиологического состояния животных // Тезисы докладов Всероссийской НТК "Электронизация и компьютеризация сельскохозяйственного производства". – Рязань, 1993. – с. 6–7.

32. Антипов В.А., Мелехин В.П. Инвариантный преобразователь относительного отклонения активного сопротивления // Автоматизация испытаний и измерений: Межвуз. сб. научных трудов. – Рязань: РГРТА, 1995. – с.55–59.
33. Антипов В.А., Лукьянов Ю.А., Новожилов С.Ю. Методы и средства измерений: Учебное пособие. – Рязань: Радиотехническая акад., 1995. – 64 с.
34. Антипов В.А., Мелехин В.П. Метод измерения добротности колебательных систем // Автоматизация измерений и испытаний: Межвуз. сб. научных трудов. – Рязань: РГРТА, 1996. – с. 27–30.
35. Антипов В.А., Мелехин В.П. Методы повышения точности измерений // Учебное пособие. – Рязань: Радиотехническая акад., 1996. – 64 с.
36. Антипов В.А., Мелехин В.П. Измерительный преобразователь с компенсацией паразитных параметров // Автоматизация измерений и испытаний: Межвуз. сб. научных трудов. – Рязань: РГРТА, 1996. – с. 61–65.
37. Антипов В.А., Мелехин В.П. Автоматизированная система медико-биологических исследований // Автоматизация измерений и испытаний: Межвуз. сб. научных трудов. – Рязань: РГРТА, 1999. – с. 35–40.
38. Антипов В.А., Москвитина А.А. Использование новых информационных технологий в обучении // Информатика и прикладная математика: Межвуз. сб. научных трудов. – Рязань: РГПУ, 1999. – с. 8–15.
39. Антипов В.А., Коричнев Л.П. Система управления надежностью ГРЭС // Материалы 8-го Международного НТС "Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций". – Рязань, 1999. – с. 55–58.
40. Антипов В.А. Разработка автоматизированной системы экономического управления на ОАО "Рязанская ГРЭС" // Математическое и программное обеспечение вычислительных систем: Сб. научных трудов. – М: Минобразования России, 1999. – с. 167–172.
41. Антипов В.А. Управление технологическими процессами с помощью экспертной системы // Автоматизация измерений и испытаний: Межвуз. сб. научных трудов. – Рязань: РГРТА, 1999. – с. 118–122.
42. Антипов В.А. Организация диагностирования и прогноза состояния энергооборудования ТЭС // Материалы 8-го Международного НТС "Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций". – Рязань, 1999. – с. 58–59.
43. Антипов В.А. Подсистема контроля и диагностики системы обеспечения качества технологического процесса сборки узлов медицинской электронной техники // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. – 2002, № 7. – с. 42–48.
44. Антипов В.А. К вопросу об оптимизации размещения тестового и инспекционного оборудования // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. – 2003, № 7 – с. 59–65.
45. Антипов В.А. Измерительный преобразователь, реализующий тестовый метод коррекции // Информационно-измерительная и биомедицинская техника: Межвуз. сб. научных трудов. – Рязань: РГРТА, 2003. – с. 34–39.
46. Антипов В.А., Мелёхин В.П. Повышение точности средств измерений: Учебное пособие. – Рязань: Радиотехническая акад., 2003. – 80 с.
47. Антипов В.А. Анализ задач проектирования подсистемы активного технологического контроля системы управления качеством // Информационно-измерительная и биомедицинская техника: Межвуз. сб. научных трудов. – Рязань: РГРТА, 2003. – с. 44–50.
48. Антипов В.А. Повышение достоверности получения и сбора измерительной информации о технологическом объекте // Материалы 14-й Международной НТК "Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций". – Рязань, 2005. – с. 6–8.
49. Антипов В.А. Выбор контрольно-измерительных средств производства медицинского радиоэлектронного оборудования // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. – 2005, № 7 – с. 47–51.

50. Антипов В.А., Жулёв В.И. Организация интегрированной системы сбора контрольно-диагностической информации технологического процесса сборки узлов РЭА // Материалы 14-й Международной НТК "Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций". – Рязань, 2005. – с. 8–9.
51. Антипов В.А. Методология разработки мультиагентных систем реального времени // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. – 2006, №7. – с. 44–49.
52. Антипов В.А., Жулёв В.И., Соколов В.П. Концепция виртуальных ИИС контроля и диагностики процесса производства РЭА медицинского назначения // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. – 2006, №7. – с. 53–59.
53. Антипов В.А. Мультиагентная модель виртуальной ИИС промышленного назначения // Тезисы докладов 5 Международной НТК "Физика и технические приложения волновых процессов". – Самара, 2006. – с. 20.
54. Антипов В.А. Мультиагентная модель виртуальных информационно-измерительных систем промышленного назначения // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. – 2006, №7. – с. 67–72.
55. Антипов В.А., Соколов В.П. Информационная интеграция системы контроля // Вестник РГРТА. Вып. 17. Рязань, 2006. – с. 105–108.
56. Антипов В.А. Системный анализ методов автоматической коррекции погрешностей измерительных устройств // Вестник РГРТА. Вып. 18. Рязань, 2006. – с. 51–58.
57. Антипов В.А., Соколов В.П. Коммуникационная Архитектура Виртуальных информационно-измерительных систем промышленного назначения // Информационно-измерительная и биомедицинская техника: Межвуз. сб. научных трудов. – Рязань: РГРТУ, 2006. – с. 116–123.
58. Антипов В.А., Соколов В.П. Основные требования к передаче сообщений о метрологическом и техническом состоянии тестового оборудования // Информационно-измерительная и биомедицинская техника: Межвуз. сб. научных трудов. – Рязань: РГРТУ, 2006. – с. 123–128.
59. Антипов В.А., Соколов В.П. Оптимизация стратегии производственной диагностики узлов РЭА ответственного назначения // Тезисы докладов 5 Международной НТК "Физика и технические приложения волновых процессов". – Самара, 2006. – с. 7.
60. Антипов В.А., Жулёв В.И., Никишкин Д.А. Концепция виртуальных информационно-измерительных систем промышленного назначения // Тезисы докладов 5 Международной НТК "Физика и технические приложения волновых процессов". – Самара, 2006, – с. 9.
61. Антипов В.А. Разработка многофункционального итерационного измерительного канала системы входного контроля // Вестник РГРТА, Вып. 17. Рязань, 2006. – с. 20–25.
62. Антипов В.А. Организационная структура мультиагентной модели виртуальной ИИС контроля и диагностики // Вестник РГРТА. Вып. 19. Рязань, 2006. – с. 89–94.
63. Антипов В.А. Мультиагентный подход к проектированию систем тестирования и инспекции РЭА // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. – 2007, №7. – с. 35–43.
64. Антипов В.А., Соколов В.П. Отображение семантики домена контроля и диагностики на структуру XML-сообщений // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. – 2007, №7. – с. 59–68.

Антипов Владимир Анатольевич

Мультиагентные информационно-измерительные системы  
технического контроля и диагностики РЭА

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
доктора технических наук

Подписано в печать                      Формат бумаги 60\*84 1/16  
Усл. печ. л. 2,0. Тираж 100 экз. Заказ №

Рязанский государственный радиотехнический университет.  
390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Отпечатано в НПЦ "Информационные технологии"  
г. Рязань, ул. Островского, 21/1. Тел.: (4912) 98-69-84