

На правах рукописи

ГРИГОРОВ МИХАИЛ СЕРГЕЕВИЧ

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
НЕРАЗРУШАЮЩЕГО РЕНТГЕНОВСКОГО КОНТРОЛЯ
ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ**

Специальность 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды,
веществ, материалов и изделий

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Орёл – 2015

Работа выполнена в Государственном казенном образовательном учреждении высшего профессионального образования Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации.

Научный руководитель: кандидат технических наук
Басов Олег Олегович,
ГКОУ ВПО Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации, г. Орел

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Подмастерьев Константин Валентинович,
ФГБОУ ВО "Приокский государственный университет", заведующий кафедрой "Приборостроение, метрология и сертификация";

кандидат технических наук, доцент
Харинов Михаил Вячеславович,
ФГБУН "Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук", старший научный сотрудник.


Ведущая организация: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина).

Защита состоится "03" декабря 2015 г. в 15-30 на заседании диссертационного совета Д. 212.233.01 в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения" по адресу: г. Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 67.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения" и на сайте www.guap.ru.

Автореферат разослан "08" октября 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д. 212.233.01
доктор технических наук,
профессор

 Шелест Дмитрий Константинович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Современное производство электронных модулей (ЭМ) предъявляет высокие требования к контролю качества выпускаемой продукции. При этом оценка качества модулей, для которых применение "традиционных" (оптических, вихретоковых и др.) методов диагностики и локализации дефектов малоэффективно или невозможно в силу различных причин, может быть произведена только с использованием неразрушающего рентгеновского контроля (НРК).

Современные ЭМ характеризуются сложной, многослойной, а, следовательно, неоднородной (с точки зрения ослабления рентгеновского излучения) структурой. Большое количество гетерогенных функциональных элементов (ФЭ) в составе ЭМ обуславливает необходимость проведения нескольких рентгеновских экспозиций, обеспечивающих для каждого типа ФЭ (уровня неоднородности) ЭМ формирование изображения требуемого качества. Процесс формирования набора рентгеновских изображений (РИ) в описанных условиях принято называть мультиэнергетической рентгенографией. Увеличение числа формируемых РИ требует обработки и анализа каждого из них, что приводит к возрастанию количества итераций и, соответственно, времени реализации задач НРК, в частности, по расшифровке дефектов ЭМ. При их решении эксперту приходится обрабатывать значительные объемы фактической информации о РИ и принимать решения, основываясь на результатах субъективных оценок, что делает актуальной поддержку рассматриваемого процесса с использованием компьютерных технологий.

Большим количеством авторов и научных школ выполнен значительный объем научных и экспериментальных исследований, посвященных вопросам формирования, обработки и анализа РИ. Совершенствованию систем цифровой рентгенографии в целом посвящены работы Зеликмана М.И., Йоффе М.Д., Кантера Б.М., Ключева В.В., Бару С.Е., Недавнего О.И., Роландса Д.А., Соснина Ф.Р., Удада В.А., Харрисона Р.М. Известны работы Воробель Р.А., Михельсона А., Нестерук В.Ф. и Порфирьева В.Н., описывающие алгоритмы оценки качества цифровых изображений; особо здесь следует отметить результаты исследований Жилиякова Е.Г. и Черноморца А.А., посвященные анализу субполосных свойств изображений. Значительный вклад в изучение и совершенствование вопросов анализа шума на цифровых изображениях внесли Вудс Р., Гонсалес Р., Спицин В.Г.; методов низкочастотной фильтрации шума на цифровых изображениях – Апальков И.В., Бухтояров С.С., Дэвис Е., Мандучи Р., Томаси Ц. и Хрящев В.В.; алгоритмов выделения контуров – Крылов А.С., Нео Х.С., Хазанчук А., Цибанов В.Н., Шарп Г., ЭнджелК.; алгоритмов бинаризации изображений – Ляо П.С., Бернсен Дж., Вдовин В.А., Муравьев А.В., Ниблэк У. и Оцу Н. Этими учеными созданы достаточные предпосылки для решения задач НРК, однако, не определена возможность получения РИ всех ФЭ гетерогенных объектов контроля с качеством, обеспечивающим расшифровку дефектов ЭМ.

Поэтому в настоящее время объективно существует противоречие между необходимостью получения изображения всех ФЭ ЭМ с требуемым качеством и снижением затрат времени на проведение НРК. Его разрешение лежит в области автоматизации существующих систем НРК за счет совершенствования математического и программно-технического обеспечения формирования, обработки и анализа РИ ЭМ.

Указанный подход представляет собой сложную научно-техническую задачу и обуславливает актуальность темы исследований.

Объектом исследования являются системы НРК ЭМ.

Предмет исследования – методы, методики и алгоритмы формирования, обработки и анализа РИ.

Целью исследования является повышение оперативности НРК при обеспечении заданной точности определения дефектов ЭМ. Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие **частные задачи**:

- проблемно-классификационный анализ систем НРК ЭМ;
- разработка структурно-функциональной модели системы НРК ЭМ;
- разработка метода формирования рентгеновского мультиизображения ЭМ на основе набора его РИ;
- разработка методики мультиэнергетической рентгенографии, обеспечивающей формирование набора РИ ЭМ;
- разработка программно-технического комплекса НРК ЭМ;
- экспериментальная проверка разработанного математического и программно-технического обеспечения НРК ЭМ с оценкой его эффективности.

Научная новизна полученных в диссертационной работе результатов, выводов и рекомендаций заключается в разработке:

- *структурно-функциональной модели системы НРК ЭМ*, отличающейся осуществлением обоснованного выбора режимов работы источника рентгеновского излучения (ИРИ) для получения набора РИ с целью формирования единого мультиизображения ЭМ, области которого соответствуют требованиям к качеству изображения ФЭ ЭМ, и обеспечивающая возможность автоматизации таких систем;

- *метода формирования рентгеновского мультиизображения ЭМ*, основанного на разделении и слиянии областей набора его РИ и отличающегося использованием одного квадродерева для различных РИ из указанного набора и логического предиката на основе показателя качества области РИ ЭМ, вычисляемого как отношение средней яркости области к сосредоточенности заданной доли энергии по ее подобластям пространственных частот;

- *методики мультиэнергетической рентгенографии*, позволяющей получить набор РИ ЭМ в моменты действия переменного анодного тока и напряжения, определяемые командами источнику рентгеновского излучения, и отличающейся процедурами получения зависимости интенсивности рентгеновского излучения от параметров его источника и формирования команд данному источнику при обеспечении минимального числа РИ;

- *программно-технического комплекса НРК*, обеспечивающего автоматизированный выбор режимов работы ИРИ для получения набора РИ ЭМ, формирование его единого мультиизображения из сегментов набора РИ на основе оценивания их качества и анализ полученных изображений на наличие дефектов ЭМ.

Практическая значимость работы заключается:

- в разработке программы формирования рентгеновского мультиизображения ЭМ, реализующей соответствующий метод и позволяющей повысить оперативность НРК ЭМ;
- реализации экспериментального образца детектора рентгеновского излучения, обеспечивающего повышение чувствительности и расширение динамического диа-

пазона преобразования излучения в частоту импульсов;

- установлении экспериментальной зависимости показателя качества области РИ от режима работы ИРИ, позволяющей сформировать команды источнику, при обеспечении минимального числа РИ;

- разработке программных средств, позволяющих провести анализ качества разварки соединительного проводника кристалл-рамка по расположению контактных площадок кристалла интегральной микросхемы.

Методы исследования. Для решения поставленных задач в работе использовались элементы теории информации, теории множеств, методы цифровой обработки изображений, статистического и корреляционного анализа, сегментации изображений, экспертных оценок. Компьютерная реализация разработанных алгоритмов производилась на основе объектно-ориентированного подхода.

Положения, выносимые на защиту:

1. Структурно-функциональная модель системы неразрушающего рентгеновского контроля электронных модулей.

2. Метод формирования рентгеновского мультиизображения электронного модуля на основе набора его рентгеновских изображений.

3. Методика мультиэнергетической рентгенографии, обеспечивающая формирование набора рентгеновских изображений электронного модуля.

4. Программно-технический комплекс неразрушающего рентгеновского контроля электронных модулей.

Обоснованность и достоверность научных положений, основных выводов и результатов диссертации обеспечивается за счет анализа состояния исследований в данной области, согласованности теоретических выводов с результатами экспериментальной проверки модели, а также апробацией основных теоретических положений диссертации в печатных трудах и докладах на международных научных конференциях.

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на V Международной научной конференции "Фундаментальные проблемы системной безопасности и устойчивости" (13-14 мая 2014, г. Елец), VI Международной научно-технической конференции "Информационные технологии в науке, образовании и производстве" (22-23 мая 2014, г. Орёл), 4-й Международной научно-практической конференции "Современные инновации в науке и технике" (29-30 мая 2014, г. Курск), 4-й Международной научно-практической конференции "Техника и технологии: пути инновационного развития", посвященной 50-летию Юго-Западного государственного университета, (30 июня 2014, г. Курск), Международной молодежной научно-технической конференции "Прогрессивные технологии и процессы" (25-26 сентября 2014, г. Курск), Международной научно-практической конференции "Наукоемкие технологии и инновации (XXI научные чтения)", посвященной 60-летию БГТУ им. В.Г. Шухова (9-10 октября 2014, г. Белгород), 3-й Международной молодежной научной конференции "Поколение будущего – 2014: взгляд молодых ученых" (13-15 ноября 2014, г. Курск), VI Международной интернет-конференции "Инновационные технологии: теория, инструменты, практика (InnoTech 2014)" (30 ноября 2014, г. Пермь), III Международной научно-технической интернет-конференции "Информационные системы и технологии" (1 апреля - 31 мая 2015, г. Орёл).

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 13 печатных работах, включая 4 публикации в рецензируемых научных изданиях из перечня Минобрнауки РФ: "Информационные системы и технологии", "Труды СПИИРАН", "Научные ведомости БелГУ". Получены 2 патента на изобретение, а также 4 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Реализация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы внедрены в работу ООО "Забтехсервис" (г. Чита), использованы при разработке малодозовых рентгеновских установок в ЗАО "Научприбор" (г. Орёл), а также в учебном процессе Академии ФСО России (г. Орёл), что подтверждается соответствующими актами внедрения.

Личный вклад автора. Автором лично выполнены все этапы диссертационного исследования: постановка задач, создание теоретических модельных описаний, методического, алгоритмического и программного обеспечения, проведение модельных экспериментов, обработка и интерпретация данных, формулировка выводов.

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 142 страницах машинописного текста, содержит 47 иллюстраций и 12 таблиц, состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (100 наименований), приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована ее актуальность, сформулированы цель и задачи, показаны направления исследований, научная новизна и практическая ценность полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту, и сведения об апробации, публикациях и реализации результатов работы.

В первой главе определены виды, методы и средства неразрушающего контроля, определены особенности проведения НРК и виды дефектов ЭМ; проанализированы и классифицированы технологии получения РИ, реализованные в системах НРК различных типов; на основе оценки их эффективности поставлена задача исследования.

В результате проблемно-классификационного анализа существующих систем НРК ЭМ установлено, что наиболее перспективными для проведения НРК ЭМ являются системы прямого преобразования на основе плоскострочных и строчных матричных детекторов без использования сцинтилляционного слоя. Однако их общим недостатком является низкая оперативность НРК, которую можно определить как:

$$T_K = t_{\Pi} + N \cdot (t_C + t_{\Pi P} + t_{AK} + t_{OBR}) + t_{AD}, \quad (1)$$

где t_{Π} – совокупное время выполнения процедур подготовительного этапа (проверка работоспособности, определение фокусного расстояния, прогрев ИРИ; размещение объекта контроля); N – количество итераций получения изображения (число РИ); t_C – время запоминания информации в виде скрытого изображения; $t_{\Pi P}$ – время преобразования скрытого изображения в цифровое; t_{AK} – время анализа РИ на соответствие требованиям по избранному критерию качества; t_{OBR} – время обработки одного РИ; t_{AD} – время анализа для принятия решения о наличии дефектов.

Так по результатам исследования 150 ЭМ различных типов установлено, что среднее значение показателя (1) составляет около 125 минут. При этом наибольшее

влияние на оперативность оказывают $t_{\text{ПР}}$, $t_{\text{АК}}$ и $t_{\text{АД}}$.

Значительное сокращение указанных показателей может быть достигнуто за счет автоматизации существующих систем НРК ЭМ. Для ее чего требуется разработать:

- структурно-функциональную модель системы НРК ЭМ, определяющую возможность автоматизации НРК при минимальных затратах операционных ресурсов;
- методы и методики формирования, обработки и анализа РИ ЭМ, обеспечивающие повышение оперативности ($\overline{T_K} \rightarrow \min$) НРК ЭМ;
- программно-технический комплекс НРК ЭМ, реализующий разработанный математический и алгоритмический инструментарий на основе существующих систем НРК.

Во второй главе представлена структурно-функциональная модель системы НРКЭМ; описан процесс формирования рентгеновского мультиизображения ЭМ; поставлены задачи разработки соответствующих метода и методики формирования, обработки и анализа РИ ЭМ.

Концептуальное моделирование существующих систем НРК ЭМ показало, что в них отсутствуют элементы, позволяющие оценивать качество полученного изображения ФЭ ЭМ, осуществлять выбор необходимого режима работы ИРИ, обрабатывать наборы РИ с целью формирования мультиизображения, сегменты которого соответствуют требованиям к качеству. Установлено, что автоматизация системы НРК (рисунок 1) может быть достигнута за счет разработки указанных элементов и их внедрения в существующие системы.

Для получения рентгеновского мультиизображения $I^Q(x, y)$ ЭМ и достижения цели НРК необходимо на основе данных, полученных по результатам анализа качества РИ ФЭ ЭМ, сформировать набор соответствующих управляющих команд $C_j(U_j^A, i_j^A)$ к ИРИ системы НРК F_I .

В качестве ИРИ F_I обычно применяются рентгеновские трубки, формирующие тормозное рентгеновское излучение интенсивностью $J_k^И(\lambda)$, которая зависит от заданных параметров источника (U_j^A, i_j^A) . Посредством метода прошедшего излучения M_{PI} производится просвечивание объекта контроля (ЭМ) и регистрация детектором F_D излучения с интенсивностью $J_{k,n}^{OK}(\lambda)$, прошедшего через этот объект. Затем устройство преобразования сигнала F_S на основании данных D_D , полученных с детектора, посредством метода M_D про-

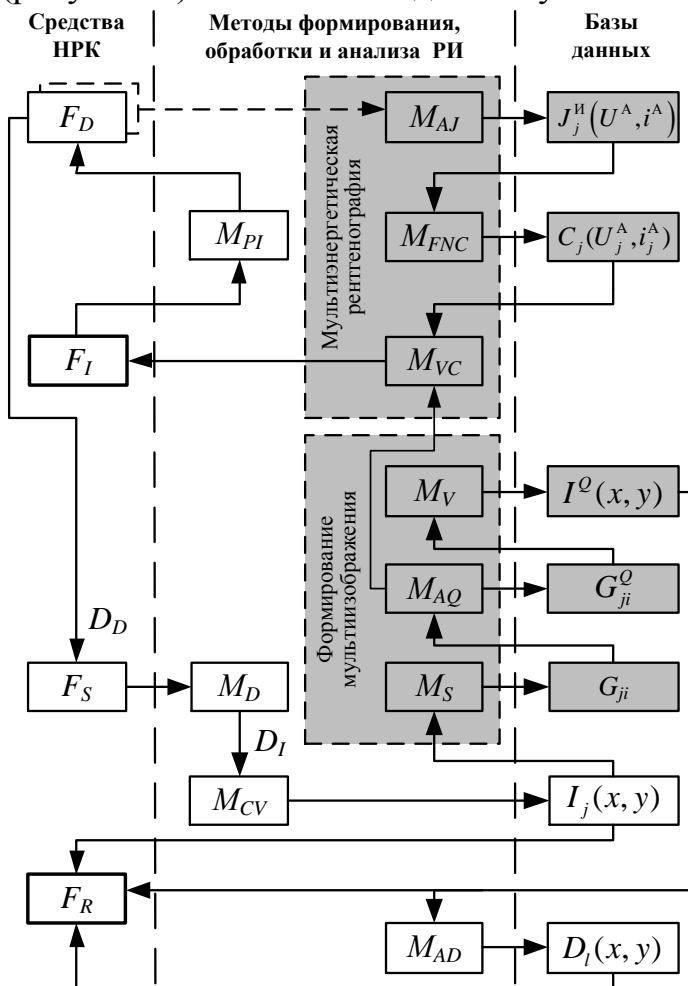


Рисунок 1 – Структурно-функциональная модель системы НРК ЭМ

изводит пространственную дискретизацию изображения, а также посредством метода квантования M_{CV} производит запись данных D_I об интенсивности "засветки" каждого элемента изображения, по которым строится растровое цифровое РИ $I_j(x, y)$.

В связи с тем, что ЭМ может состоять из ФЭ разных типов, РИ которых необходимо обрабатывать по отдельности, в модель включен метод формирования рентгеновского мультиизображения, включающий в себя: разделение всего РИ ЭМ на сегменты с использованием метода сегментации $M_S : I_j(x, y) \rightarrow G_{ji}^Q$, проверку полученных сегментов РИ на основе метода $M_{AQ} : G_{ji} \rightarrow G_{ji}^Q$, на соответствие заданному значению показателя качества и восстановление (соединение сегментов) мультиизображения. Данные о сегментах РИ требуемого качества G_{ji}^Q сохраняются в базу данных. Формирование остальных сегментов РИ основано на применении метода мультиэнергетической рентгенографии по методике, реализующей процедуры анализа интенсивности излучения ИРИ M_{AJ} , формирования набора команд $C_j(U_j^A, i_j^A)$ M_{FNC} и их выбора $M_{VC} : G_{ji}^Q \rightarrow C_j(U_j^A, i_j^A)$. После получения всех сегментов РИ ЭМ с требуемым значением показателя качества производится восстановление мультиизображения $I^Q(x, y)$ с использованием соответствующего метода $M_V : G_{ji}^Q \rightarrow I^Q(x, y)$ по области

$$G^Q = \bigcup_{j=1}^N \bigcup_{i=1}^{O_j} G_{ji}^Q, \text{ такой что:}$$

а) G_{ji} является связной областью, $j = \overline{1 \dots N}$, $i = \overline{1 \dots O_j}$, где O_j – число подобластей области G_j , соответствующей j -му РИ (в общем случае, O_j для разных РИ различно);

б) $G_{ji} \cap G_{jt} = \emptyset$ для $i, t = \overline{1 \dots O_j}, i \neq t$;

в) $\bigcup_{i=1}^{O_j} G_{ji} = G_j$ для $j = \overline{1 \dots N}$;

г) $P(G_{ji}) = TRUE$, $j = \overline{1 \dots N}$, $i = \overline{1 \dots O_j}$, где P – некоторый логический предикат:

$$P(G_{ji}) = \begin{cases} TRUE, \text{ если } G_{ji} = G_{ji}^Q; \\ FALSE, \text{ если } G_{ji} \neq G_{ji}^Q; \end{cases} \quad (2)$$

д) $P(G_{ji} \cup G_{jt}) = FALSE$ для любых двух смежных областей G_{ji} и G_{jt} j -го РИ.

Затем в зависимости от задачи, решаемой оператором системы НРК, мультиизображение передается либо на устройство вывода результатов F_R , либо на дальнейший автоматизированный анализ M_{AD} для обнаружения дефектов в ЭМ $D_i(x, y)$.

Для достижения цели исследования необходимо:

1) разработать метод формирования рентгеновского мультиизображения на основе областей G_{ji} , удовлетворяющих приведенным выше условиям (а)-(д), при минимальном числе РИ одного ЭМ и минимальных вычислительных затратах на сегментацию одного РИ, при этом:

- обосновать выбор количественного показателя качества области изображения и модифицировать соответствующий метод анализа качества M_{AQ} для однозначного определения логического предиката $P(2)$;

- обосновать выбор методов восстановления M_V рентгеновского мультиизображения;

2) разработать методику мультиэнергетической рентгенографии, позволяющую при минимальном числе РИ получить все необходимые области G_{ji} путем задания соответствующих режимов работы ИРИ.

В третьей главе представлены указанные методы и методика формирования, обработки и анализа РИ ЭМ.

Метод формирования рентгеновского мультиизображения ЭМ базируется на модификации метода сегментации, на основе разделения и слияния областей, на случай набора РИ ЭМ, полученных при различных параметрах ИРИ, и может быть представлен в виде следующих этапов.

I. Сегментация первого РИ на основе разделения и слияния областей, включающая в себя следующие шаги.

1. Получение первого ($j=1$) РИ ЭМ.

2. Приведение размера РИ к наименьшему объемлющему квадрату, сторона которого есть степень числа 2.

3. Разделение на четыре непересекающиеся подобласти (рисунок 2, а) любой области $G_{1i}, i = \overline{1...O_j}$, для которой $P(G_{1i}) = FALSE$.

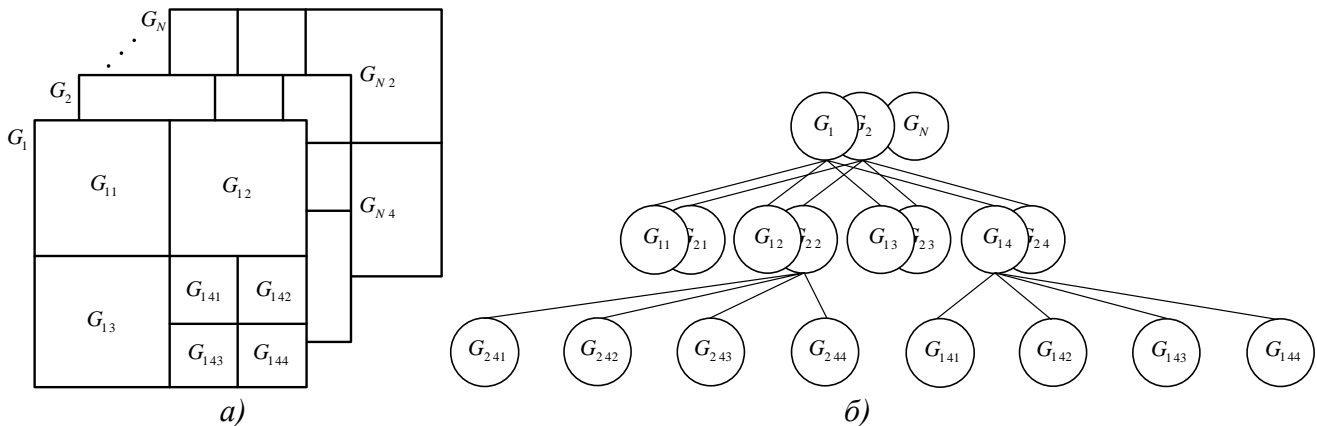


Рисунок 2 – Разделение и слияние областей:

а) принцип деления областей на части; б) соответствующее квадродерево

4. Объединение в одну область любых двух соседних подобластей G_{1i} и G_{1t} , для которых $P(G_{1i} \cup G_{1t}) = TRUE; i, t = \overline{1...O_j}$.

5. При невозможности выполнения ни одной операции слияния или разделения при любых $i = \overline{1...O_j}$, выполнение следующего шага. Иначе – переход к шагу 3.

II. Сегментация следующих ($j = 2...N$) РИ, включающая шаги.

6. Получение j -го РИ.

7. Приведение размера РИ к наименьшему объемлющему квадрату, сторона которого есть степень числа 2.

8. Если $P(G_{gi}) = FALSE$ для всех имеющихся ($g = j, j-1, \dots, 1$) РИ, то разделение области $G_{gi}, i = \overline{1...O_j}$ на четыре непересекающиеся подобласти.

9. Объединение в одну область любых двух соседних подобластей G_{gi} и G_{ht} , $g, h = \overline{1...j}; i, t = \overline{1...O_j}$, для которых $P(G_{gi} \cup G_{ht}) = TRUE$.

10. При невозможности выполнения ни одной операции слияния (разделения) при любых $i = \overline{1..O_j}$, выполнение следующего шага. Иначе – переход к шагу 8.

11. Если итоговая область G^O не сформирована и $j < N$, переход к шагу 6. Иначе – выполнение следующего шага.

12. Приведение размера области G^O к исходному.

III. Формирование и вывод результирующего мультиизображения.

Достоинствами разработанного метода являются:

- соответствие представления разделяемых областей изображений (в виде матриц с размерностью кратной степени числа 2) принципу получения РИ на основе строчных матричных детекторов;

- соответствие формы областей изображений структуре ЭМ;

- использование одного и того же квадродерева (рисунок 2, б) для разделения и слияния подобластей различных РИ;

- сокращение вычислительных (временных) затрат на сегментацию одного РИ за счет исключения из анализа (разделения, слияния) областей, для которых предикат $P(2)$ имеет истинное значение на предыдущих РИ.

Для определения предиката $P(2)$ был проведен анализ экспертных и количественных показателей качества РИ ЭМ (печатной платы импульсного блока питания ЭВМ) с 14 разнотипными ФЭ (рисунок 3). Его результаты (таблица 1) позволили сделать вывод о том, что для расшифровки дефектов области G_{ji} , средняя яркость ее элементов (пикселов) должна лежать вблизи некоторого среднего (по всем элементам РИ) значения и область должна обладать требуемой четкостью.

Исходя из чего, в качестве количественного показателя качества области РИ ЭМ предложено использовать величину:

$$Q_{\text{кол},ji} = \bar{I}_{G_{ji}} / C_{G_{ji}}, \quad (3)$$

где $\bar{I}_{G_{ji}}$ – средняя яркость области G_{ji} ; $C_{G_{ji}}$ – сосредоточенность заданной доли энергии изображения области G_{ji} .

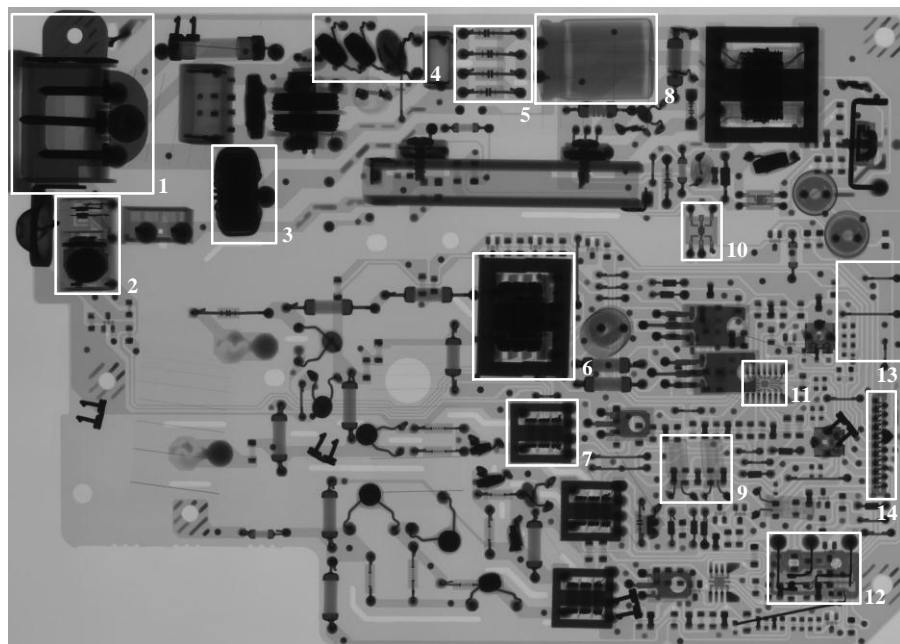


Рисунок 3 – Исследуемый ЭМ с размеченными областями

Применение $\bar{I}_{G_{ji}}$ основано на гипотезе о том, что изображение, воспринимаемое субъективно как оптимальное, имеет распределение яркостей его элементов по нормальному закону.

Для определения сосредоточенности $C_{G_{ji}}$ заданной доли энергии, соответствующей $100 \cdot m\%$ суммарной энергии области G_{ji} по $R_1 R_2$ подобластям пространственных ча-




стот, вычислялась величина отношения минимального количества l_m подобластей пространственных частот, в которых сосредоточено $100 \cdot m\%$ энергии области, к общему числу подобластей пространственных частот:

$$C = l_m / R_1 \cdot R_2. \quad (4)$$

Таблица 1 – Сравнение экспертных оценок и количественного показателя качества ФЭ ЭМ

U^A/i^A (кВ/мА)	Номер элемента						
	1	2	3	4	5	6	7
80/1	100,65	86,05	71,53	133,25	162,14	41,46	46,64
80/2	208,04	160,22	170,27	304,38	367,59	97,19	107,57
80/3	349,57	251,35	226,22	428,20	565,54	146,07	189,34
100/1	181,07	138,07	123,31	220,66	276,99	65,77	106,40
100/2	411,15	264,21	249,35	473,85	627,40	175,38	242,71
100/3	577,42	464,04	377,53	753,72	939,92	250,03	319,14
120/1	297,29	173,41	206,98	331,66	425,86	107,87	149,51
120/2	743,66	539,53	431,22	799,86	1005,27	289,07	364,09
120/3	100,51	676,08	572,48	1189,64	1501,65	459,48	544,95
140/1	399,20	277,25	236,44	451,05	572,65	188,69	236,84
140/2	1035,67	632,66	629,43	955,73	1365,84	441,90	547,62
140/3	1436,09	897,29	809,76	1368,02	1854,14	609,16	741,12
160/1	542,54	367,39	372,20	607,10	708,88	233,37	294,94
160/2	1285,35	950,34	684,25	1407,05	1757,35	526,83	635,02
160/3	1940,49	1351,30	808,21	1579,93	2209,21	736,66	977,80
180/1	644,95	429,78	347,21	703,63	834,46	258,77	318,99
180/2	1580,89	1048,21	855,46	1506,70	2039,17	676,18	800,29
180/3	2470,06	1448,77	878,30	1620,66	2615,27	990,87	1245,31
U^A/i^A	Номер элемента						
	8	9	10	11	12	13	14
80/1	129,34	172,67	143,05	111,15	93,85	300,34	86,83
80/2	255,64	360,41	317,12	205,44	209,80	631,97	222,11
80/3	418,22	602,57	425,64	333,38	313,35	995,04	323,72
100/1	231,17	292,90	257,87	153,13	152,82	468,79	154,06
100/2	546,43	652,68	546,50	384,37	378,49	1052,53	397,29
100/3	787,71	989,03	758,92	588,18	578,37	1663,54	558,40
120/1	331,68	454,41	363,79	264,59	262,71	711,73	217,99
120/2	865,06	1085,62	829,34	636,24	616,73	1720,45	546,54
120/3	1344,32	1629,04	1314,60	1026,04	949,57	2431,46	867,72
140/1	538,59	604,63	515,97	392,29	362,97	805,75	299,91
140/2	1222,72	1568,82	1203,31	826,08	856,26	2223,03	795,41
140/3	1985,18	2169,23	1619,55	1071,14	1256,99	3181,62	1052,28
160/1	678,07	809,70	610,88	497,21	469,49	1052,03	430,37
160/2	1587,15	1928,80	1501,99	1149,43	1107,66	2883,82	1052,53
160/3	3060,31	2660,42	1938,66	1714,42	1607,94	3439,38	1337,03
180/1	712,01	912,72	683,50	551,96	577,46	1345,07	528,33
180/2	2181,41	2423,80	1693,16	1443,72	1380,36	3382,43	1328,81
180/3	4280,51	3011,62	2392,44	2133,72	1944,21	3932,25	1468,87

Примечание: в ячейках таблицы представлены результаты расчета показателя (2), цвет ячеек определен в соответствии с оценками экспертов:

-  – дефекты на изображении не распознаваемы;
-  – дефекты на изображении трудно распознаваемы;
-  – дефекты на изображении хорошо распознаваемы.

Точное значение доли энергии области G_{ji} в частотном субинтервале Ω :

$$P_{\Omega} = \frac{\text{tr}(A_{r_1}^T \cdot M \cdot A_{r_2} \cdot M^T)}{\text{tr}(M \cdot M^T)}, \quad (5)$$

где M – матрица значений функции $G_{ji}(x,y)$; A_{r_1} и A_{r_2} – субполосные матрицы, значения элементов которых определяется:

$$a_{x_1, x_2}^{r_1} = \begin{cases} \frac{2 \cos \frac{\pi(2r_1-1)(x_1-x_2)}{2R_1} \sin \frac{\pi(x_1-x_2)}{2R_1}}{\pi(x_1-x_2)}, & x_1 \neq x_2; \\ 1/R_1, & x_1 = x_2 \end{cases} \quad (6)$$

$$a_{y_1, y_2}^{r_2} = \begin{cases} \frac{2 \cos \frac{\pi(2r_2-1)(y_1-y_2)}{2R_2} \sin \frac{\pi(y_1-y_2)}{2R_2}}{\pi(y_1-y_2)}, & y_1 \neq y_2, \\ 1/R_2, & y_1 = y_2 \end{cases} \quad (7)$$

где $r_1 = 1, 2, \dots, R_1$ и $r_2 = 1, 2, \dots, R_2$.

В соответствии с результатами вычислительных экспериментов были выбраны: количество подобластей пространственных частот $R_1 = 16, R_2 = 16$ и значение доли суммарной энергии $m = 0,99$. Результаты анализа предложенного показателя качества (3) и экспертных оценок (таблица 1) показали высокую степень их корреляции. Так для рассматриваемого в работе случая (набора РИ печатной платы импульсного блока питания ЭВМ) $CORR = 0,8932$. На основе полученных данных логический предикат представлен в виде

$$P(G_{ji}) = \begin{cases} TRUE, & \text{если } 450 \leq Q_{\text{кол},ji} \leq 2500; \\ FALSE, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (8)$$

При формировании рентгеновского мультиизображения ЭМ для устранения краевых эффектов, неизбежно возникающих при объединении в одну область любых двух соседних подобластей G_{g_i} и G_{h_t} ($g, h = \overline{1 \dots j}; i, t = \overline{1 \dots O_j}$) различных РИ, в работе использовано выравнивание гистограмм на основе усреднения локальных гистограмм отдельных областей G_{ji}^Q РИ ($j = \overline{1 \dots N}$).

Для получения набора РИ одного ЭМ, позволяющих сформировать область G^Q , разработана методика мультиэнергетической рентгенографии, включающая в себя следующие шаги.

1. Установление зависимости интенсивности $J^H(\lambda)$ от параметров ИРИ.
2. Интерполяция полученных значений интенсивности для обеспечения большей точности установки параметров ИРИ.
3. Формирование набора команд $\{C_j(U^A, i^A)\}$, $j = \overline{1 \dots N}$ ИРИ на основе анализа зависимости значений $Q_{\text{кол}}$ от режима работы ИРИ.
4. Формирование первого (опорного) РИ ЭМ.
5. Выбор набора команд $\{C_j(U^A, i^A)\}$, $j = \overline{1 \dots N}$, обеспечивающих получение G^Q .
6. Формирование РИ в моменты действия анодных напряжения и тока, соответствующих командам из набора $\{C_j(U^A, i^A)\}$, на основе метода мультиэнергетической рентгенографии.

Таблица 2 – Параметры излучения вне ЭМ

U^A , кВ	i^A , мА	$J''(\lambda)$, отн. ед.	$Q_{\text{кол.}}$
80	1	1,76	900,51
	2	3,69	2700,37
	3	5,77	4228,57
100	1	2,60	1901,47
	2	5,77	4224,54
	3	8,80	6445,42
120	1	3,55	2603,30
	2	8,33	7115,81
	3	12,42	9100,73
140	1	4,54	3322,71
	2	10,71	7842,86
	3	12,70	9304,03
160	1	5,55	4064,84
	2	12,66	9278,02
	3	12,70	10854,70
180	1	6,05	4432,23
	2	12,70	10854,70
	3	12,70	9304,03

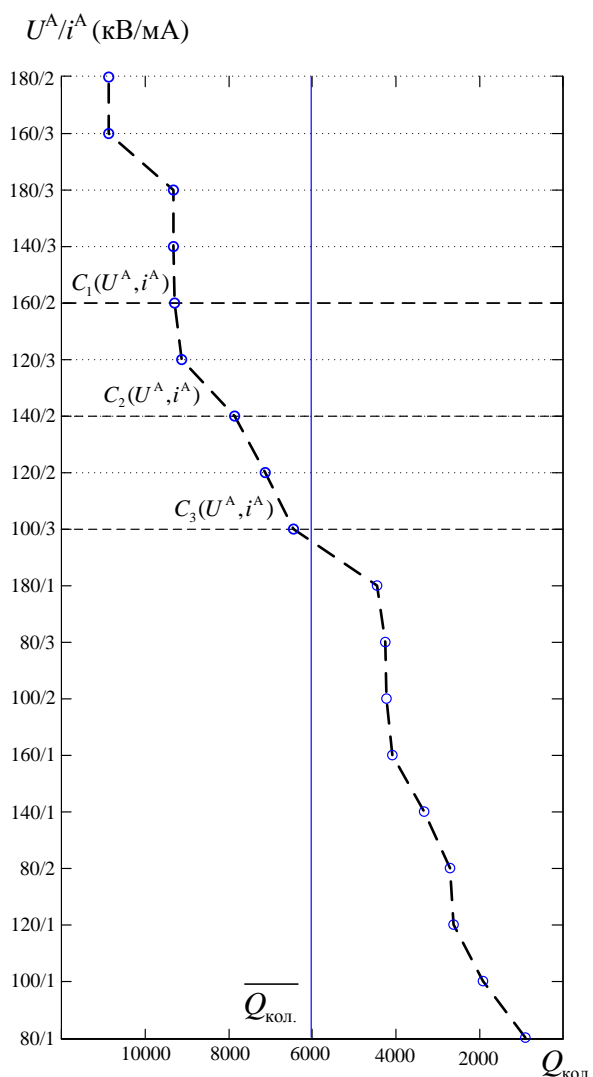


Рисунок 4 – Зависимость интенсивности излучения от режима работы ИРИ

Шаги 1–3 являются предварительными и реализуются только на этапе калибровки системы НРК ЭМ, для которой не установлена зависимость интенсивности $J''(\lambda)$ рентгеновского излучения от анодного напряжения U^A и анодного тока i^A . Так, с использованием введенного в контур регулирования параметрами ИРИ (автономная просвечивающая полнокадровая рентгеновская установка "Калан-4У") звена обратной связи на основе датчика рентгеновского излучения, были проведены: натурный эксперимент по установлению искомой зависимости (таблица 2), кубическая интерполяция полученных значений и расчет количественного показателя качества $Q_{\text{кол.},ji}$ вне объекта контроля.

Анализ зависимости количественного показателя качества $Q_{\text{кол.},ji}$ вне объекта контроля, упорядоченного в порядке возрастания, от режима работы (рисунок 4) и ее сопоставление с результатами экспертной оценки позволили сделать ряд важных выводов.

1. В качестве "рабочих" следует выбирать параметры работы ИРИ (U^A, i^A), которые обеспечивают получение значений показателя $Q_{\text{кол.}} > \overline{Q_{\text{кол.}}}$, где $\overline{Q_{\text{кол.}}}$ – среднее значение данного показателя по множеству режимов работы ИРИ.

2. Для формирования опорного РИ следует использовать "средний" режим работы ИРИ, попавший в диапазон рабочих. В рассматриваемом случае такой режим формируется командой $C_1(160 \text{ кВ}, 2 \text{ мА})$.

3. Получение РИ следует осуществлять на основе метода мультиэнергетической рентгенографии в моменты времени действия переменных анодных напряжения U^A и тока i^A , соответствующих значениям из "рабочего" диапазона режимов функционирования, а сами значения использовать для формирования набора команд $\{C_j(U^A, i^A)\}$.

При этом обеспечивается более точная установка интенсивности излучения с заданной длиной волны и увеличивается "время жизни" ИРИ.

Реализация методики мультиэнергетической рентгенографии позволяет получить набор РИ, необходимый для осуществления разработанного метода формирования рентгеновского мультиизображения ЭМ.

В четвертой главе представлен программно-аппаратный комплекс НРК ЭМ (рисунок 5), в состав которого введены подсистемы мониторинга интенсивности излучения (МИИ), мультиэнергетической рентгенографии (МЭРГ) и анализа рентгеновских мультиизображений (АРМИ), а также модуль формирования рентгеновского мультиизображения.

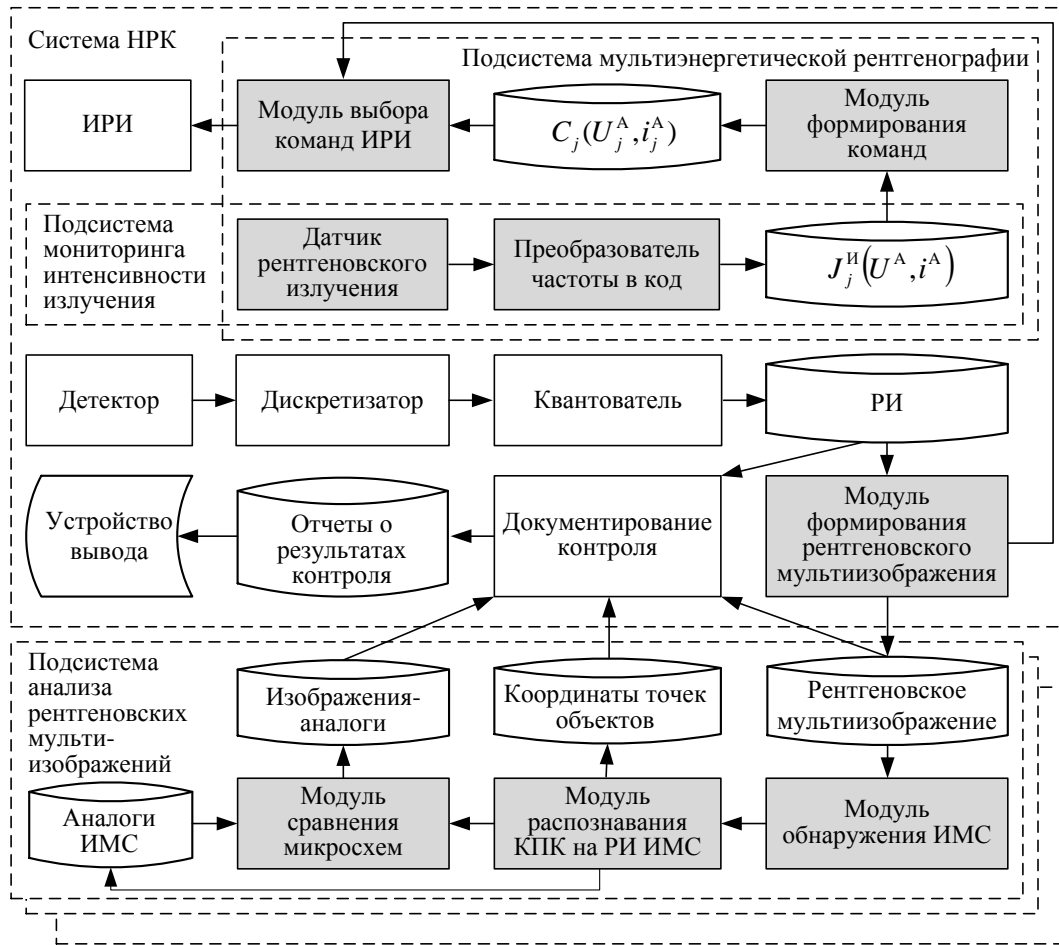


Рисунок 5 – Схема взаимодействия элементов программно-технического комплекса НРК ЭМ

Подсистема МИИ позволяет выполнить считывание цифрового кода с преобразователя частоты в код при поступлении на апертуру входа датчика рентгеновского излучения определенной интенсивности. Полученные данные для разных режимов работы ИРИ аппроксимируются и сохраняются в базе данных в виде зависимостей интенсивности рентгеновского излучения от параметров ИРИ. Эти зависимости используются в подсистеме МЭРГ для определения команд ИРИ при формировании рентгеновского мультиизображения. Система НРК позволяет осуществить управление ИРИ и сформировать рентгеновское мультиизображение ЭМ. В диалоговом окне устройства вывода отображается текущее состояние ИРИ, его параметры, задание на проведение НРК. Оператор выбирает вариант проведения НРК: контроль известного ФЭ ЭМ или контроль ЭМ. В первом случае в подсистеме "источник-детектор" считывается РИ, получаемое при известных параметрах источника. Во вто-

ром после получения первого РИ, запускается процесс его обработки на основе профиля формирования мультиизображения или без него.

Процесс обработки РИ начинается с разделения его на области, по результатам которого данные о сегментах поступают для выполнения различных операций с изображением. В зависимости от выбора программы контроля оператором возникают события, инициирующие запуск процедур: выбор команды ИРИ, формирование мультиизображения или оценка качества сегментов РИ. Выбор команды ИРИ производится на основе: профиля формирования мультиизображения известного ЭМ или определения требуемого режима просвечивания для исследуемых ФЭ ЭМ с использованием известных зависимостей интенсивности рентгеновского излучения от параметров ИРИ, полученных в подсистеме МИИ.

На основе выполнения процедуры выбора производится формирование команды ИРИ, содержащей параметры, необходимые для получения изображения требуемого качества.

Модуль формирования рентгеновского мультиизображения ЭМ реализует соответствующий метод.

Подсистемы АРМИ предназначены для проведения автоматизированного анализа полученных РИ на наличие дефектов ЭМ. Программные модули, разработанные для одной из таких подсистем, позволяют провести анализ качества разварки соединительного проводника кристалл-рамка по расположению контактных площадок кристалла (КПК) интегральных микросхем (ИМС) за счет выполнения следующих алгоритмов:

- выделения области интереса на РИ путем обнаружения ИМС;
- обнаружения КПК ИМС;
- поиска аналога ИМС в базе данных;
- сравнения анализируемой ИМС с эталонной.

По результатам работы данных модулей в базу данных сохраняются информация о координатах обнаруженных точечных объектов и изображения аналогичных ИМС.

Для представления оператору результатов контроля производится его документирование, которое предполагает представление:

- полученного РИ известного ФЭ ЭМ или мультиизображения ЭМ;
- РИ, найденных в базе данных аналогов;
- результатов сравнения с изображением эталонного ЭМ;
- профиля формирования мультиизображения ЭМ;
- текстовых комментариев оператора контроля.

Для оценки эффективности НРК ЭМ были проведены сравнительные испытания работы соответствующей системы (рентгеновской установки "Калан-4У" и сканирующей системы НРК "Вид-ЭП" на базе сканера Duerr NDT CR-43 с управляющей ЭВМ InWin (процессор: Intel Core i5-2300 CPU 2,8 ГГц; ОЗУ: 8 Гб)) до и после внедрения разработанного математического и программно-технического обеспечения (рисунков 5). Испытания проводились на тестовой выборке из 150 ЭМ различных типов: ИМС (один уровень неоднородности) – 50 шт., печатные платы импульсного блока питания ПЭВМ (три уровня) – 50 шт., системные платы ПЭВМ (4 уровня) – 50 шт.

Для определения степени достижения цели исследования оценивалась точность распознавания следующих дефектов ЭМ: качество разварки соединительного про-

водника кристалл-рамка (автоматизированный анализ), состояние печатных проводников и смещение выводов (в "ручном" режиме).

По результатам испытаний на тестовой выборке РИ ИМС значение средней абсолютной ошибки обнаружения КПК ИМС составило $MAPE = 4,8\%$, что соответствует высокой точности разработанного программного обеспечения. Состояние печатных проводников и смещение выводов определены оператором контроля правильно и в полном объеме. При этом (при использовании единого мультиизображения) существенно сократилось среднее время проведения длительных операций НРК ЭМ, а общее время контроля по показателю (1) – приблизительно в 3 раза (таблица 3), за счет автоматизации процедур оценки качества изображений, формирования команд ИРИ, формирования и анализа рентгеновского мультиизображения контролируемого ЭМ.

Таблица 3 – Оценка временных параметров НРК ЭМ

Показатель	$\bar{t}_П$	$\bar{t}_С$	$\bar{t}_{ПР}$	$\bar{t}_{АК}$	$\bar{t}_{АД}$	$\bar{T}_К$
Средние значения показателя без использования средств автоматизации, мин	5	1	8	17	32	125,5
Средние значения показателя с использованием предложенных средств автоматизации, мин	5	1	8	1	1	39

При этом естественным образом увеличились вычислительные затраты, которые могут быть снижены за счет предварительного расчета значений субполосных матриц A_{r_1} и A_{r_2} для всех возможных размеров областей G_{ji} . Очевидно, что в данном случае незначительно возрастают требования к объему памяти, необходимой для хранения указанных результатов расчета.

В процессе работы программных модулей программно-технического комплекса НРК заполняется база данных с профилями формирования мультиизображений проверяемых ЭМ, что позволяет при проведении контроля аналогичных образцов в большей степени сократить время на проведение отдельных операций, а также исключить воздействие "человеческого фактора" на процесс обнаружения дефектов ЭМ.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы по работе.

В приложении представлен набор РИ ЭМ, полученных при различных параметрах ИРИ.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертационной работе решена актуальная задача разработки математического и программно-технического обеспечения формирования, обработки и анализа рентгеновских изображений, обеспечивающего повышение оперативности неразрушающего рентгеновского контроля электронных модулей.

На основании проведенного исследования сформулированы следующие выводы.

1. При приемлемых стоимостных затратах перспективными для проведения неразрушающего рентгеновского контроля электронных модулей являются системы прямого преобразования на основе плоскпанельных и строчных матричных детекторов без использования сцинтилляционного слоя. Наибольшее влияние на оперативность неразрушающего рентгеновского контроля с использованием указанных средств оказывают время преобразования скрытого радиационного изображения в цифровое рентгеновское, время анализа цифрового рентгеновского изображения на соответствие требованиям по избранному критерию качества, а также время анализа для принятия решения о наличии дефектов. Значительное сокращение указанных показателей может быть достигнуто за счет автоматизации соответствующих процедур.

2. Разработана структурно-функциональная модель системы неразрушающего рентгеновского контроля электронных модулей, определяющая возможность автоматизации таких систем за счет применения разработанных методики мультиэнергетической рентгенографии и метода формирования единого рентгеновского мультиизображения.

3. Разработан метод формирования рентгеновского мультиизображения электронного модуля на основе разделения на области его рентгеновских изображений из некоторого набора и слияния областей, для которых выполняются требования к количественному показателю качества, основанному на отношении средней яркости рассматриваемой области к сосредоточенности заданной доли энергии по подобластям пространственных частот.

4. Разработана методика мультиэнергетической рентгенографии, основанная на получении набора рентгеновских изображений в определенные моменты действия переменного тока и напряжения анода рентгеновской трубки, обеспечивающая возможность формирования единого мультиизображения электронного модуля.

5. Предложенные методы, методика и алгоритмы реализованы в программно-аппаратном комплексе неразрушающего рентгеновского контроля и обеспечивают получение набора рентгеновских изображений требуемого качества функциональных элементов электронного модуля, формирование единого мультиизображения электронного модуля из сегментов набора его цифровых рентгеновских изображений на основе анализа их качества и анализ полученных изображений на наличие дефектов.

6. Результаты проведенных экспериментов по оценке функционирования программно-технического комплекса неразрушающего рентгеновского контроля показали, что применение предложенных методов позволяет существенно (до трех раз) сократить время проведения контроля при обеспечении заданной точности определения дефектов электронных модулей.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых научных изданиях из перечня Министерства образования и науки РФ:

1. Григоров, М.С. Классификация цифровых систем неразрушающего рентгеновского контроля изделий микроэлектроники / М.С. Григоров // Труды СПИИРАН, 2014.-№ 4 (35). – С.94-107.

2. Григоров, М.С. Распознавание контактных площадок кристаллов интегральных микросхем на рентгеновских изображениях / М.С. Григоров, А.А. Невров, О.О. Басов // Информационные системы и технологии, 2015.-№ 1 (87). – С. 59-65.

3. Григоров, М.С. Метод формирования рентгеновского мультиизображения изделия микроэлектроники с неоднородной структурой / М.С. Григоров, О.О. Басов // Научные ведомости БелГУ, 2015.-№2.– С. 89-94.

4. Григоров, М.С. Методика мультиэнергетической рентгенографии изделий микроэлектроники с неоднородной структурой / М.С. Григоров, О.О. Басов // Труды СПИИРАН, 2015.-Вып. 40. -С. 19-32.

В других изданиях:

5. Григоров, М.С. Метод иерархической сегментации рентгеновских изображений изделий микроэлектроники / М.С. Григоров, О.О. Басов // Современные инновации в науке и технике: Сборник научных трудов 4-ой Международной научно-практической конференции. В 4-х томах. Том 1. // Курск: Юго-Зап. гос. ун-т. – 2014. – С. 303-305.

6. Григоров, М.С. Концептуальная модель системы мультиэнергетической рентгенографии / М.С. Григоров, О.О. Басов // Техника и технологии: пути инновационного развития: Сборник научных трудов 4-ой Международной научно-практической конференции, посвященной 50-летию Юго-Западного государственного университета // Курск: Юго-Зап. гос. ун-т. – 2014. – С. 97-100.

7. Григоров, М.С. Применение неразрушающего рентгеновского контроля при производстве электронных изделий / М.С. Григоров, О.О. Басов. // Фундаментальные проблемы системной безопасности и устойчивости. Сборник научных трудов V Международной научной конференции // Елец. – 2014.– С. 57-59.

8. Григоров, М.С. Применение мультиэнергетической цифровой рентгенографии для контроля качества изделий микроэлектроники с неоднородной структурой [Электронный ресурс] / М.С. Григоров, О.О. Басов // Информационные технологии в науке, образовании и производстве: Сборник научных трудов VI Международной научно-технической конференции // Орел: Госуниверситет-УНПК. -2014. – Режим доступа: <http://youconf.ru/itnop2014/materials/manager/view/61>.

9. Григоров, М.С. Автоматизация неразрушающего рентгеновского контроля изделий микроэлектроники при применении мультиэнергетической рентгенографии / М.С. Григоров, О.О. Басов // Прогрессивные технологии и процессы: Сборник научных статей Международной молодежной научно-технической конференции. В 2-х томах. Том 1. // Курск: Юго-Зап. гос. ун-т. -2014 - С. 97-100.

10. Григоров, М.С. Анализ распределения энергии рентгеновского изображения по частотным интервалам / М.С. Григоров, О.О. Басов // Наукоемкие технологии и инновации (XXI научные чтения): Сборник научных трудов Международной науч-

но-практической конференции, посвященной 60-летию БГТУ им. В.Г. Шухова // Белгород. -2014.– С. 160-165.

11. Григоров, М.С. Функциональная модель системы неразрушающего рентгеновского контроля изделий микроэлектроники с неоднородной структурой / М.С. Григоров // Сборник научных трудов III международной научно-технической интернет-конференции "Информационные системы и технологии" // Орел: Госуниверситет-УНПК. - 2015. – Режим доступа: <http://youconf.ru/isit2015/materials/manager/view/532>.

Патентные материалы:

12. Григоров, М.С. Способ мультэнергетической рентгенографии / М.С. Григоров, О.О. Басов, Д.А. Гуляйкин, Р.С. Шитов (РФ). – Патент на изобретение № 2559167. – Зарегистрировано 10.07.2015.

13. Григоров, М.С. Микромощный фотодатчик с частотным выходом / М.С. Григоров, Ю.Б. Иванов (РФ). - Патент на изобретение № 2558283. – Зарегистрировано 01.07.2015.

14. Григоров, М.С. Модуль распознавания контактных площадок на рентгеновских изображениях интегральных микросхем. / М.С. Григоров, С.В. Козлов, А.А. Невров, А.В. Козачок (РФ). - Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014618454. – Заявлено 17.06.2014; зарегистр. 20.08.2014.

15. Григоров, М.С. Модуль сравнения микросхем. / М.С. Григоров, С.В. Козлов, А.А. Невров, А.В. Козачок (РФ). - Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014618455. – Заявлено 17.06.2014; зарегистр. 20.08.2014.

16. Григоров, М.С. Анализатор выделения границ объектов на изображениях ("Focusborder") / М. С. Григоров, О. О. Басов, А. А. Бречко (РФ). - Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015612645. – Заявлено 29.12.2014; зарегистр. 24.02.2015.

17. Григоров, М.С. Программа формирования рентгеновского мультиизображения изделий микроэлектроники / М. С. Григоров, О. О. Басов, Е. А. Васечкин (РФ). - Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015618185. – Заявлено 08.06.2015; зарегистр. 03.08.2015.