

Государственное казенное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации

*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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
Басов Олег Олегович,  
кандидат технических наук

Орёл – 2015

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 ПРОБЛЕМНО-КЛАССИФИКАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ СРЕДСТВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО РЕНТГЕНОВСКОГО КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ.....	11
1.1 Роль и место неразрушающего рентгеновского контроля при производстве электронных модулей.....	11
1.2 Классификация цифровых систем неразрушающего рентгеновского контроля электронных модулей.....	16
1.3 Оценка эффективности неразрушающего рентгеновского контроля электронных модулей и постановка задачи исследования.....	27
1.4 Выводы по первой главе.....	33
2 СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО РЕНТГЕНОВСКОГО КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ.....	35
2.1 Концептуальная модель системы неразрушающего рентгеновского контроля электронных модулей.....	35
2.2 Структурно-функциональная модель системы неразрушающего рентгеновского контроля электронных модулей.....	42
2.3 Постановка задачи разработки математического обеспечения неразрушающего рентгеновского контроля электронных модулей.....	48
2.4 Выводы по второй главе.....	51
3 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО РЕНТГЕНОВСКОГО КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ.....	52
3.1 Метод формирования рентгеновского мультиизображения электронного модуля.....	52
3.1.1 Существующие методы сегментации изображений.....	52
3.1.2 Модификация выбранного подхода к сегментации рентгеновских изображений на случай формирования мультиизображения.....	55

3.1.3	Существующие методы оценки качества изображений.....	57
3.1.4	Выбор количественного показателя качества области рентгеновского изображения электронного модуля.....	66
3.1.5	Формирование рентгеновского мультиизображения электронного модуля.....	80
3.2	Методика мультиэнергетической рентгенографии.....	83
3.2.1	Метод мультиэнергетической рентгенографии.....	83
3.2.2	Основные этапы методики мультиэнергетической рентгенографии.....	84
3.2.3	Средства реализации методики мультиэнергетической рентгенографии...	85
3.2.4	Анализ результатов экспериментов.....	91
3.3	Выводы по третьей главе.....	94
4	ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО РЕНТГЕНОВСКОГО КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ.....	96
4.1	Программно-технический комплекс неразрушающего рентгеновского контроля электронных модулей.....	96
4.2	Комплекс алгоритмов автоматизации анализа рентгеновских изображений электронных модулей .....	100
4.2.1	Алгоритм автоматизированного распознавания областей расположения интегральных микросхем на рентгеновских изображениях.....	101
4.2.2	Алгоритм распознавания контактных площадок кристаллов интегральных микросхем на рентгеновских изображениях.....	106
4.2.3	Алгоритм сравнения рентгеновских изображений интегральных микросхем с аналогами из базы данных.....	109
4.2.4	Алгоритм поиска аналогов интегральных микросхем в базе данных.....	113
4.3	Экспериментальное исследование разработанного программно-технического комплекса.....	114
4.3.1	Оценка точности обнаружения контактных площадок кристаллов интегральных микросхем.....	115
4.3.2	Оценка работы системы неразрушающего рентгеновского контроля.....	115

4.4 Выводы по четвертой главе.....	117
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	119
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	121
СПИСОК ТЕРМИНОВ.....	122
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	124
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	134

## ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие производства электронных модулей (ЭМ) предъявляет высокие требования к контролю качества выпускаемой продукции. При этом оценка качества изделий, для которых применение "традиционных" 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 моделирования, оптимизации и программного обеспечения процессов формирования, обработки и анализа РИ. Вопросам совершенствования систем цифровой рентгенографии посвящены работы Бару С.Е., Зеликмана М.И., Йоффе М.Д., Кантера Б.М., Ключева В.В., Недавнего О.И., Роландса Д.А., Соснина Ф.Р., Удода В.А., Харрисона Р.М. В области разработки алгоритмов

определения контрастности цифровых изображений известны работы Михельсона А., Воробель Р.А., Порфирьева В.Н. и Нестерук В.Ф. Большой вклад в изучение вопросов анализа шума на цифровых изображениях внесли Вудс Р., Гонсалес Р., Спицин В.Г. В области низкочастотной фильтрации шума на цифровых изображениях важные исследования выполнены Апальковым И.В., Бухтояровым С.С., Дэвисом Е., Мандучи Р., Томаси Ц. и Хрящевым В.В. Работы Крылова А.С., Нео Х.С., Хазанчука А., Цибанова В.Н., Шарра Г. и Энджела К. посвящены решению вопросов совершенствования алгоритмов выделения контуров цифровых изображений. Существенный вклад в исследование и развитие алгоритмов бинаризации изображений внесли Бернсен Дж., Вдовин В.А., Ляо П.С., Муравьев А.В., Ниблэк У. и Оцу Н. Субполосному анализу изображений посвящены работы Жилиякова Е.Г. и Черноморца А.А. Этими учеными созданы достаточные предпосылки для решения задач НРК, однако, не определена возможность получения РИ всех ФЭ гетерогенных ЭМ с качеством, обеспечивающим расшифровку дефектов ЭМ.

Поэтому в настоящее время объективно существует противоречие между необходимостью получения изображения всех ФЭ ЭМ с требуемым качеством и снижения 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 разработка 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.

**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.

**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 ценность 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 диапазона 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.



**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. Орел), 4-ой Международной научно-практической конференции "Современные инновации в науке и технике" (29-30 мая 2014, г. Курск), 4-ой Международной научно-практической конференции, посвященной 50-летию Юго-Западного государственного университета "Техника и технологии: пути инновационного развития" (30 июня 2014, г. Курск), Международной молодежной научно-технической конференции "Прогрессивные технологии и процессы" (25-26 сентября 2014, г. Курск), Международной научно-практической конференции, посвященной 60-летию БГТУ им. В.Г. Шухова "Научоемкие технологии и инновации (XXI научные чтения)" (9-10 октября 2014, г. Белгород), 3-ей 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. Орел).

**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 положительные решения о

выдаче двух патентов 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. Орел), а также в учебном процессе Академии ФСО России (г. Орел), что подтверждается соответствующими актами внедрения.

**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.

# 1 ПРОБЛЕМНО-КЛАССИФИКАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ СРЕДСТВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО РЕНТГЕНОВСКОГО КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ

## 1.1 Роль и место неразрушающего рентгеновского контроля при производстве электронных модулей

В настоящее время в России более трехсот предприятий различных форм собственности занимаются производством ЭМ [1]. Перспективы развития электронной промышленности России определены в стратегии на период до 2025 года [2]. Дополнительным условием ускоренного роста показателей, определенных стратегией, является задача импортозамещения, поставленная руководством страны в условиях санкционной политики, проводимой иностранными государствами.

Под ЭМ здесь и далее будем понимать - конструктивно и функционально законченное радиоэлектронное устройство (изделие и его составные части, в основу функционирования которых положены принципы радиотехники и электроники) или радиоэлектронный функциональный узел, выполненное (выполненный) в модульном или магистрально-модульном исполнении с обеспечением конструктивной, электрической, информационной совместимости и взаимозаменяемости [3].

Основными регламентирующими документами при производстве ЭМ в России являются ГОСТ Р 53429-2009 [4], ГОСТ Р 53432-2009 [5], ГОСТ 54844-2011 [6], ГОСТ 11630-84 [7], ГОСТ 18725-83 [8], ГОСТ 20215-84 [9], ГОСТ 25467-82 [10], ГОСТ 28623-90 [11], ГОСТ Р 50044-2009 [12]. Эти документы определяют требования к основным параметрам и размерам ЭМ, а также требования к их производству, обеспечивающему изготовление ЭМ со стабильными характеристиками в соответствии с конструкторской документацией, техническими условиями и требованиями ГОСТ Р ИСО 9001-2011 [13].

Обеспечение данных требований достигается за счет контроля качества ЭМ, проводимого на различных стадиях производства [14] с учетом требований ГОСТ [4-13] и заказчика продукции (рис. 1.1). Производственный контроль качества является составной частью типового технологического процесса и сводится к определению двух составляющих: явных дефектов, характеризующих процент выхода годных изделий, и скрытых дефектов, снижающих надежность изделий [15].

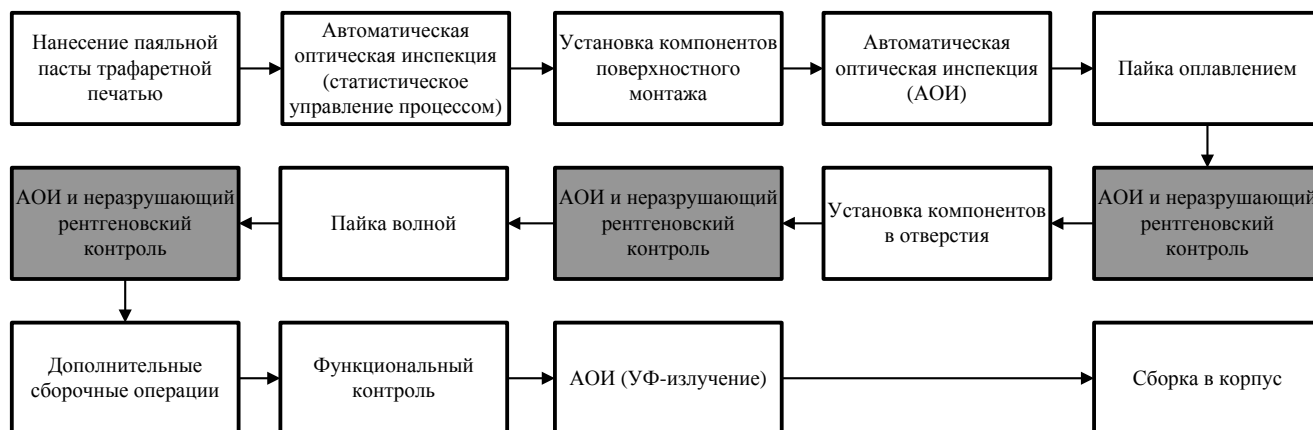


Рисунок 1.1 – Место выполнения неразрушающего рентгеновского контроля в процессе сборки модуля на печатной плате

Основными методами контроля ЭМ являются неразрушающие методы (рис. 1.2) [16]. При этом оценка качества изделий, для которых проверка иным способом невозможна или малоэффективна путем применения традиционных методов диагностики и локализации дефектов, возможна только с использованием рентгеновского контроля. Основными причинами снижения эффективности традиционных методов являются:

- применение конструкций печатных узлов с использованием компонентов в корпусах BGA,  $\mu$ BGA, Flip-Chip, TQFP, CSP, POP;
- монтаж на многослойные печатные платы;
- применение внешних экранирующих слоев.

Неразрушающий рентгеновский контроль относится к диагностическому виду контроля и может применяться как на стадии производства в качестве входного или пооперационного контроля, так и на стадии проверки готовых ЭМ в качестве финишного контроля (рис. 1.2).

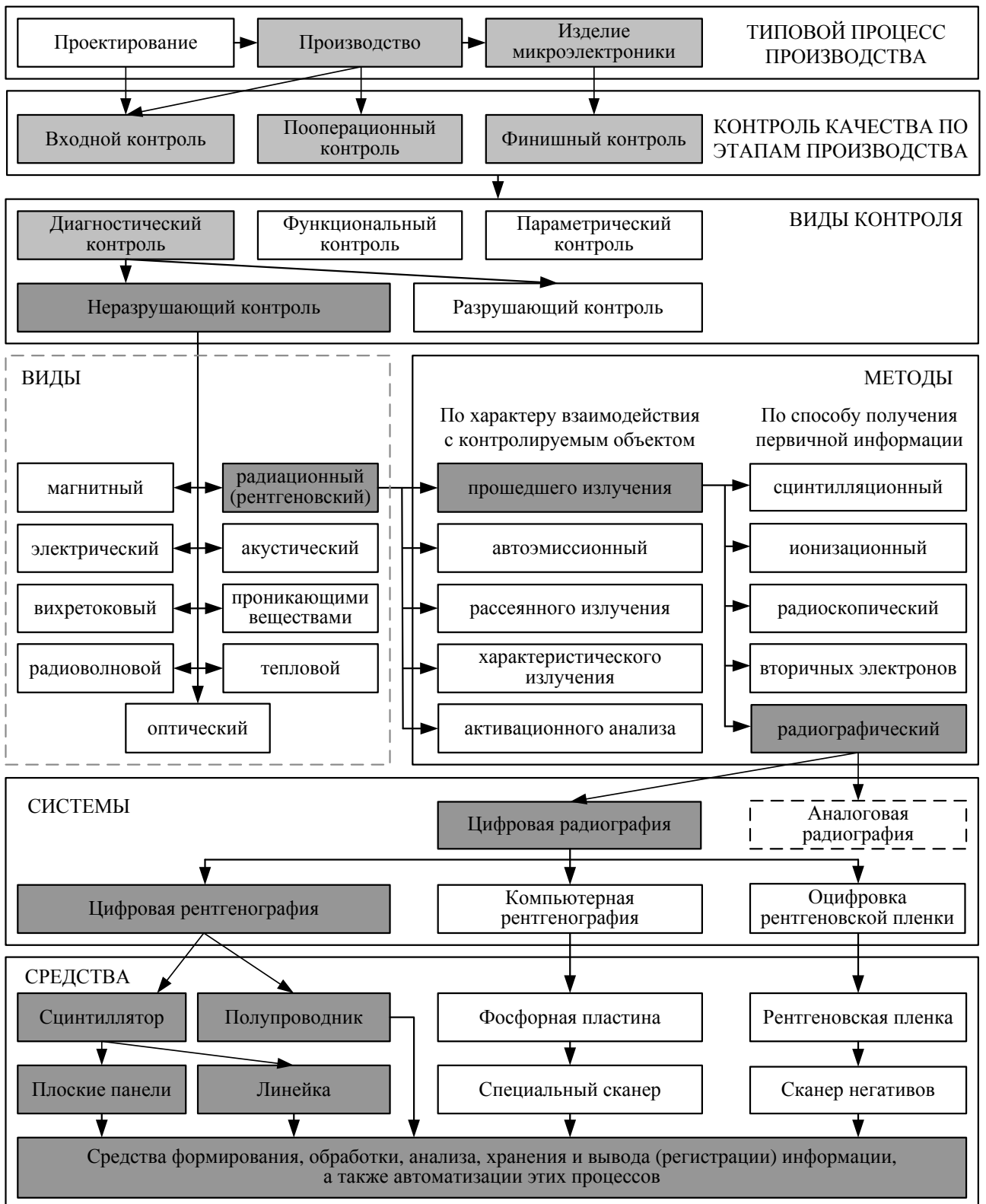


Рисунок 1.2 – Место контроля качества в процессе производства ЭМ

Современная промышленность широко использует специализированные установки (системы) рентгеновского контроля, основанные на радиационном методе прошедшего излучения и использующие различные типы средств

регистрации рентгеновского излучения, подсистем формирования, обработки и анализа информации (рис. 1.2) [17-32].

Возможности систем неразрушающего рентгеновского контроля при контроле качества монтажа компонентов и структуры ЭМ определяются номенклатурой выявляемых дефектов (рис. 1.3) и техническими характеристиками этих систем [17-32].

При этом существуют определенные сложности масштабирования изображения контролируемого объекта, поскольку в этих системах не используются линзы и другие элементы оптики. Основная задача в этом случае возлагается на алгоритмы обработки и анализа рентгеновских изображений.

Современное состояние НРК ЭМ характеризуется интенсивным развитием цифровых систем (ЦС), которые предполагают получение РИ объекта контроля (ОК) в виде цифрового сигнала. Массив данных, полученный из этого цифрового сигнала, может быть обработан с использованием различных алгоритмов и затем выведен на экран графического дисплея для представления оператору контроля в виде полутонового изображения [17-32].

Основными причинами, оказавшими влияние на развитие ЦС НРК ЭМ, являются [22, 23]:

- желание отказаться от процедуры химической обработки, применяемой в пленочной технологии и требующей дополнительных помещений и затрат;
- развитие компонентной базы электронной промышленности, позволяющей разрабатывать современные типы детекторов рентгеновского излучения;
- развитие вычислительных мощностей современных компьютеров, позволяющих реализовывать сложные алгоритмы обработки массивов данных рентгеновских изображений за минимальное время;
- предоставление широких возможностей по автоматизации процесса НРК ЭМ при использовании ЦС и т.д.

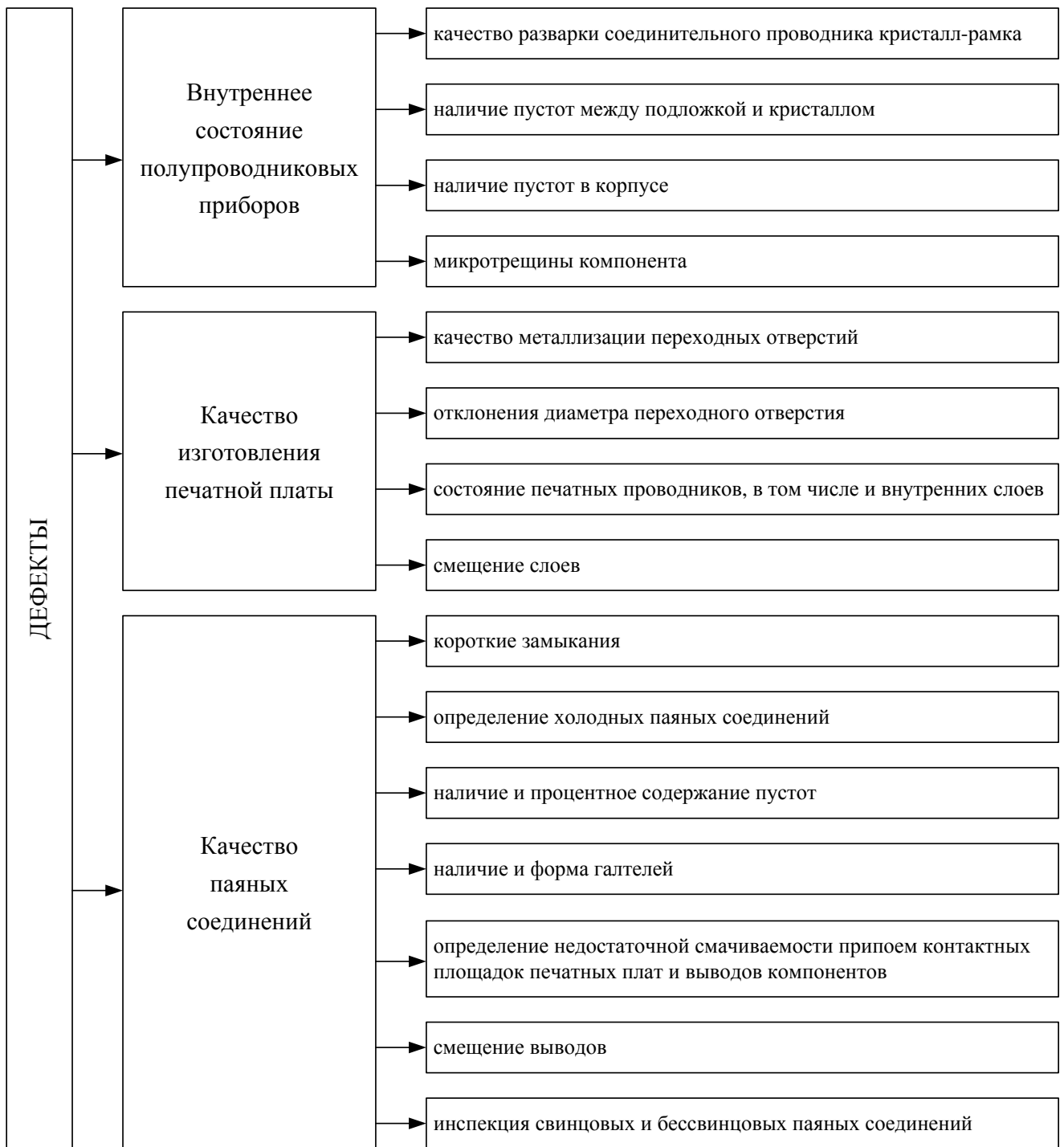


Рисунок 1.3 – Виды дефектов, выявляемых с помощью неразрушающего рентгеновского контроля

Современные ЭМ характеризуются сложной неоднородной структурой (рис. 1.4) и содержат ФЭ с различным числом слоев  $n = \overline{1...N}$  толщиной  $d_n$  и линейным коэффициентом ослабления  $\mu_n$ , что предопределяет необходимость получения нескольких РИ с разными значениями интенсивности рентгеновского излучения

для одного ОК, обеспечивающих требуемое качество изображения по выбранному показателю для каждого его элемента.

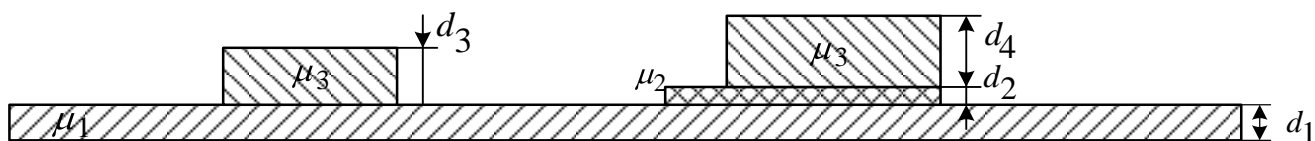


Рисунок 1.4 – Структура электронного модуля

Увеличение количества формируемых изображений, необходимость их анализа для выбора следующего режима просвечивания приводит к снижению оперативности НРК ЭМ в целом [33].

Таким образом, актуальной задачей является анализ и классификация ЦС НРК ЭМ с целью определения наиболее перспективного типа с точки зрения возможности автоматизации и, следовательно, повышения оперативности контроля при требуемом качестве РИ.

## 1.2 Классификация цифровых систем неразрушающего рентгеновского контроля электронных модулей

На основе анализа литературы [17-32, 34, 35] и существующего уровня развития техники предложена следующая классификация ЦС НРК ЭМ (рис. 1.5) [36]. В соответствии с ней ЦС НРК ЭМ разделены на две группы по способу формирования РИ:

- полнокадровые системы, характеризующиеся получением проекции полного участка ОК на детектор за одну экспозицию;
- сканирующие системы, характеризующиеся построчным получением проекции ОК.



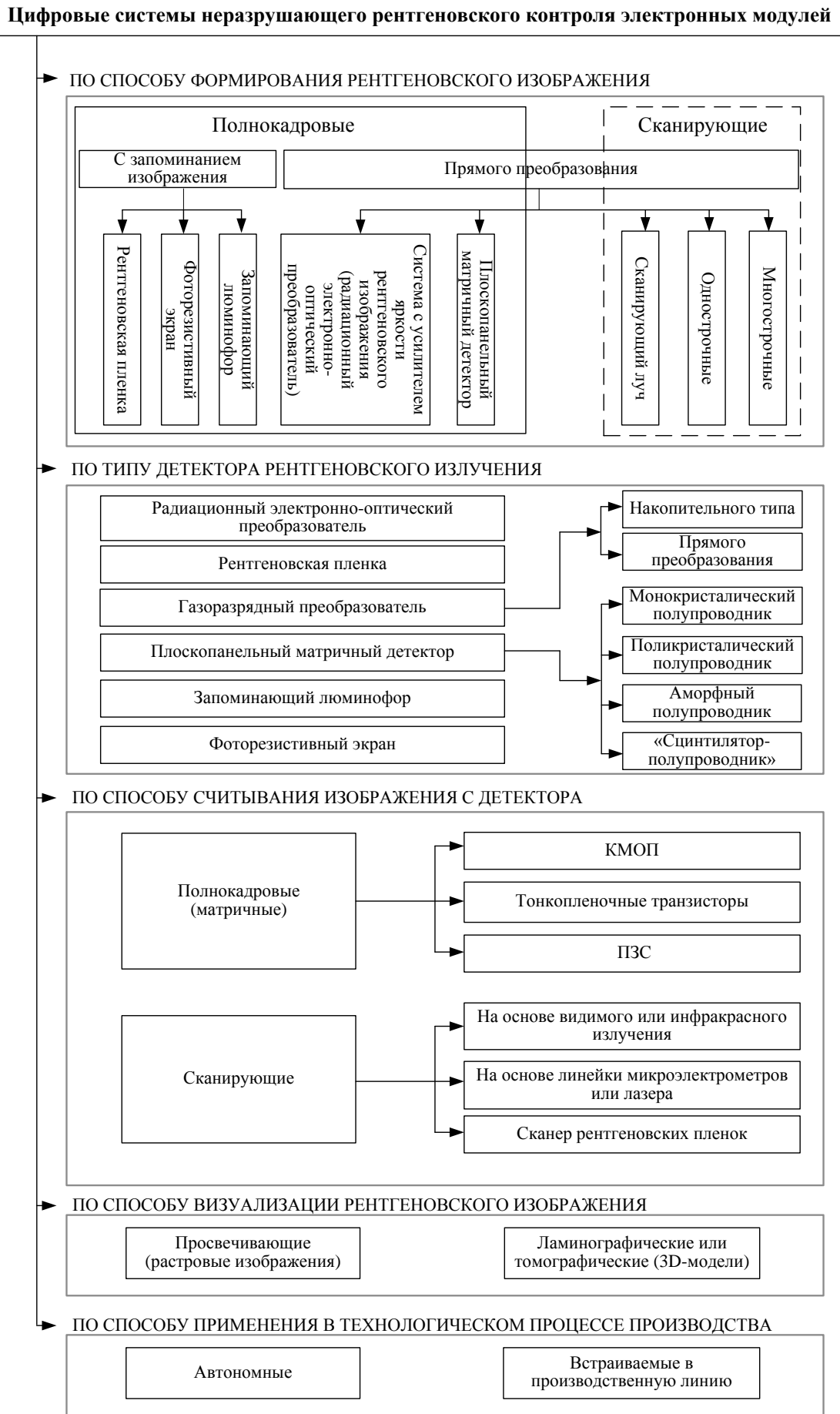


Рисунок 1.5 - Классификация ЦС НРК ЭМ

Важной характеристикой, влияющей на классификацию ЦС НРК ЭМ по способу формирования РИ, является скорость получения РИ. В соответствии с ней рассматриваемые системы разделены на две основные группы:

- системы с запоминанием изображения. В литературе [22, 23] встречается описание данных систем как систем "оцифровки рентгеновских пленок" и "компьютерной рентгенографии" (зарубежное обозначение: CR – Computed Radiography);

- системы прямого преобразования рентгеновского излучения в РИ. В литературе [22, 23] встречается описание данных систем как систем "цифровой рентгенографии". Зарубежное обозначение: DR (встречаются различные расшифровки: Digital Radiography – цифровая рентгенография или Direct Radiography – прямая рентгенография).

*К полнокадровым ЦС НРК ЭМ с запоминанием изображения* относятся системы, основанные на использовании рентгеновской пленки, фоторезистивных экранов, экранов (пластин) с нанесенным на них запоминающим люминофором. Используемые в данных системах детекторы являются, по сути, буфером хранения скрытого РИ, которое необходимо считать (перевести в цифровой сигнал) с использованием дополнительного оборудования.

*Технология с использованием рентгеновской пленки* основана на химическом эффекте ионизации [25]. Результат детектирования определяется по разнице почернения различных участков пленки под воздействием рентгеновского излучения в зависимости от плотности и толщины ОК. До недавнего времени эта технология являлась основной при проведении рентгенологических исследований в различных областях применения.

Однако существует ряд причин, вызвавших необходимость разработки других способов регистрации РИ [22, 23]: низкая квантовая эффективность пленки; ограниченный динамический диапазон, препятствующий одновременной передаче ОК различной плотности, и затрудняющий выбор оптимальной экспозиции; низкая оперативность технологии; растущие расходы на процесс

фотохимической обработки рентгеновской пленки; трудность содержания пленочного архива и автоматизации процесса контроля.

Рентгеновская пленка как детектор имеет существенные отличия от других детекторов с запоминанием изображения в том, что она может быть использована только один раз, и имеется возможность считать информацию в "аналоговом виде" непосредственно с пленки путем ее просвечивания источником света. Однако из-за развития методов и систем оцифровки экспонированной пленки системы на основе такого детектора принято относить к цифровым системам [22, 23]

*Фоторезистивные экраны* – это пластины с нанесенным на них слоем аморфного селена. Принцип детектирования основан на преобразовании рентгеновского излучения в электростатическое изображение (потенциальный рельеф), которое затем считывается специальным сканером с помощью микроэлектрометров или лазера. После считывания информация с фоторезистивного экрана стирается и экран можно использовать повторно [26].

Принцип детектирования с помощью *экранов (пластин) с запоминающим люминофором* заключается в том, что в процессе рентгеновской экспозиции происходит "запоминание" люминофором скрытого изображения, которое затем считывается специальным сканером с помощью видимого или инфракрасного излучения. После считывания информация с экрана стирается путем засвечивания или нагрева и экран можно использовать повторно [27].

*К полнокадровым ЦС НРК ЭМ с прямым преобразованием* относятся системы, основанные на использовании плоскопанельных матричных детекторов или усилителя яркости рентгеновского изображения.

*Системы на базе усилителя яркости рентгеновского изображения* основаны на преобразовании рентгеновского излучения в световое излучение в слое сцинтиллятора, передаче получаемого излучения через оптику переноса, преобразовании светового излучения в электрический сигнал ПЗС-матрицей со сцинтилляционным слоем (рис. 1.6).

Данные системы обладают некоторыми недостатками: в системе исходная информация искажается из-за большого количества преобразований (размытие в сцинтилляционном слое, дисторсия изображения в оптике переноса); сцинтилляторы, используемые как среда преобразования рентгеновского излучения, подвержены эффекту "выжигания", что приводит к постоянной деградации чувствительности; временная деградация оптики переноса под воздействием рентгеновского излучения [22, 23, 28].

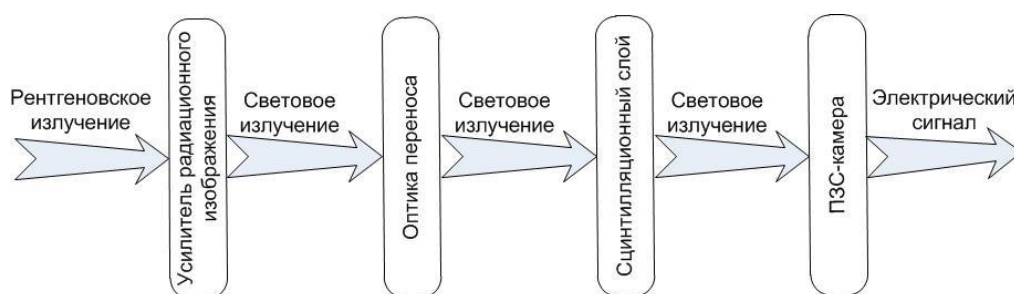


Рисунок 1.6 - Схема преобразования информации в системе с УРИ

Системы на основе плоскпанельных матричных детекторов можно разделить на системы, использующие детекторы с сцинтилляционным слоем и без него. Схемы преобразований информации в этих системах существенно отличаются друг от друга по количеству преобразований первичной информации (рис. 1.7) [28, 29].



Рисунок 1.7 - Схема преобразования информации в детекторах со сцинтилляционным слоем (а) и без него (б)

В детекторах со сцинтилляционным слоем в качестве сцинтиллятора используются соединения цезия или гадолиния, в качестве преобразователя света в электрический заряд – матрица светодиодов на основе аморфного кремния. Детекторы на основе соединения цезия имеют преимущество перед детекторами на основе соединения гадолиния из-за монокристаллической структуры, по которой свет, образующийся в результате фотоэффекта, распространяется к фотодиодной матрице вдоль волокон, что приводит к существенному снижению рассеивания света, и, как следствие, к улучшению пространственного разрешения детектора [29].

В детекторах без использования сцинтилляционного слоя, то есть с прямым преобразованием рентгеновского излучения в электрический заряд самим полупроводником, используются монокристаллические, поликристаллические и аморфные полупроводники. В наиболее распространенных системах используются детекторы на основе аморфного селена и монокристаллического теллурида кадмия. Последний имеет ряд преимуществ по сравнению с другими типами детекторов, а именно: большую четкость изображения из-за отсутствия сцинтилляционного слоя и связанных с ним рассеивания и "эффекта выжигания"; высокий коэффициент экранирования рентгеновского излучения, что существенно снижает эффект временной деградации считывающей электроники; отсутствие "фантомных изображений", характерных для аморфного селена при высоких энергиях рентгеновского излучения ( $>180$  кэВ) [28, 29].

Электрические сигналы, получаемые на выходе матричного детектора (рис. 1.7), считываются электроникой с использованием различных технологий (ПЗС, КМОП, тонкопленочные транзисторы) [28, 29].

*Сканирующие ЦС НРК ЭМ* являются системами с прямым преобразованием и разделяются на:

- однострочные системы, характеризующиеся применением одномерных матричных детекторов (линеек);
- многострочные системы, характеризующиеся применением нескольких одномерных матричных детекторов (линеек);

- системы типа "сканирующий луч", характеризующиеся применением узконаправленного пучка рентгеновского излучения.

*Сканирующие системы, построенные с применением линеек детекторов*, основаны на просвечивании ОК веерным пучком рентгеновского излучения, который формируется при помощи щелевого коллиматора источника излучения, и одной или нескольких линеек детекторов (одномерных матричных детекторов), также коллимированных для снижения влияния рассеянного рентгеновского излучения. Система из источника и линейки детекторов перемещается одновременно вдоль ОК, и в результате формируется итоговое полное РИ [22, 23, 30, 34].

Детекторы, применяемые в данных системах, можно разделить на следующие типы: полупроводниковые без сцинтилляционного слоя; полупроводниковые с использованием сцинтилляционного слоя; газоразрядные преобразователи. Принцип работы полупроводниковых детекторов тот же, который применяется в матричных детекторах.

Газоразрядные преобразователи (ГРП) разрабатываются на основе искровых камер, которые применяются для регистрации треков элементарных частиц в ядерной физике. ГРП подразделяются на две группы [35]:

- накопительные ГРП (регистрация отдельных квантов излучения с накоплением отдельных событий и последующим получением изображения);
- ГРП прямого преобразования (одновременная регистрация потока излучения и получение на преобразователе сразу всего изображения).

К накопительным ГРП относятся преобразователи с различными:

- конструкцией: двух- и трехэлектродные, с детектирующим пространством и сеткой, сплошные и проволочные, отпаянные и проточные;
- режимом работы: пропорциональные и непропорциональные;
- способом съема информации: оптический и электрический.

Принцип работы ГРП прямого преобразования состоит в формировании в газе под действием рентгеновского излучения электронно-ионного изображения, усилении этого изображения посредством газового разряда и преобразовании

ультрафиолетового излучения газового разряда в видимое излучение в люминофорном слое [35].

Сегодня наибольшее распространение получают ГРП в виде многопроволочных пропорциональных камер, сигнал с которых пропорционален энергии кванта излучения [35].

*Системы типа "сканирующий луч"* основаны на использовании "игольчатого" пучка излучения, формируемого щелевым коллиматором и модулятором (вращающийся диск с радиально-направленными щелями на краях) источника излучения, либо бомбардировкой анода рентгеновской трубки бегущим электронным лучом. Детектирование "луча" осуществляется "одноэлементным" комбинированным преобразователем с последующей оцифровкой и обработкой цифрового сигнала [21].

*Системы считывания*, применяемые в ЦС НРК ЭМ, разделяются на две группы:

- матричные, применяемые в системах прямого преобразования рентгеновского излучения в РИ ("цифровая рентгенография");
- сканирующие, применяемые в системах с запоминанием изображения ("оцифровка рентгеновских пленок" и "компьютерная рентгенография").

*Матричные системы считывания* (в том числе одномерные) основаны на применении технологий с использованием [17-19, 21-32]:

- тонкопленочных транзисторов (TFT – thin film transistors). Используются как для детекторов со сцинтилляционным слоем (сборка фотодиодов на активной TFT-матрице), так и без него (детекторный слой наносится прямо на матрицу);
- КМОП-элементов (CMOS – complementary metal-oxide semiconductor);
- ПЗС-элементов (CCD – charge-coupled device);
- газоразрядных преобразователей.

Применение конкретного типа технологии считывающей системы определяется особенностями применяемого детектора рентгеновского излучения.

*Сканирующие системы считывания*, применяемые в системах с запоминанием изображения, решают задачу считывания информации (скрытого

изображения) с различного типа носителей. Типом носителя скрытого изображения определяется принцип считывания информации.

*Сканирующие системы оцифровки рентгеновской пленки* используют общий принцип получения изображения в цифровой форме: просвечивание пленки источником света и регистрация светового излучения, прошедшего через пленку, линейкой фотодатчиков с последующим аналого-цифровым преобразованием сигналов. В таких системах различаются типы источника света: лазер, флуоресцентная лампа, светодиодная лампа [24, 25].

*Сканирующие системы считывания с экранов (пластин) с запоминающим люминофором* используют пучок видимого или инфракрасного излучения, испускаемый лазером, для освобождения накопленной в люминофоре энергии в виде вспышек света (фотостимулированной люминесценции), которые преобразуются фотоэлектронным умножителем в электрические сигналы с последующим аналого-цифровым преобразованием сигналов [20-32].

*Сканирующие системы считывания с фоторезистивных экранов* используют линейку микроэлектрометров для считывания потенциального рельефа, сформированного на экране в результате облучения, с последующим аналого-цифровым преобразованием сигналов [21, 26].

Данные с детектора после считывания передаются на обработку в ЭВМ, которая формирует и визуализирует рентгеновское изображение. Возможности по визуализации РИ определяются возможностями системы НРК и реализуются в виде растрового изображения или 3D-модели (томограммы).

*Просвечивающие системы* реализуют визуализацию одной экспозиции ОК в виде растрового изображения [37].

*Ламинографические (томографические) системы* реализуют визуализацию набора экспозиций ОК в разных плоскостях просвечивания в виде 3D-модели [37].

Принцип получения растрового изображения описан в п. 2.1. Построение 3D-модели (томограммы) производится путем реконструкции изображения из набора растровых рентгеновских изображений ОК, полученных при



неизменяемых параметрах источника излучения в разных положениях ОК относительно подсистемы "источник-детектор". В различных 3D-системах НРК могут применяться поворотные модули для перемещения ОК или детектора.

Применение разных методов визуализации РИ зависит от задачи НРК. Очевидно, что 3D-системы имеют гораздо больше возможностей по визуализации РИ ЭМ, т.к. позволяют получать не только 3D-модель, но и растровые изображения в любой плоскости томограммы. Однако стоимость таких систем в несколько раз выше, чем у систем с возможностью визуализации только растровых изображений, и их применение для НРК, например, однослойных печатных плат, может быть не целесообразным. При этом некоторые виды дефектов, таких как обрыв припоя на BGA или недостаточный галтель припоя, можно идентифицировать только на 3D-системе [37].

Метод построения растрового изображения имеет очевидное преимущество перед методом 3D-моделирования (томографии) по критерию оперативности, т.к. для построения точной 3D-модели необходимо получение большого количества проекций, которое зависит от шага поворотной системы, а также дополнительное время на компьютерное моделирование.

Описание методов визуализации РИ приведено в условиях априорной определенности о параметрах ОК и параметрах источника рентгеновского излучения, требуемых для получения изображения требуемого качества. В случае необходимости проведения контроля ЭМ, вне зависимости от применяемого метода визуализации, для обеспечения требуемого качества контроля (определения дефектов) каждого ФЭ необходимо формирование нескольких РИ (3D-моделей) для ЭМ.

Особенности применения систем НРК в технологическом процессе производства различных изделий определяют их разделение на *автономные* и *встраиваемые в производственную линию* [37].

Анализ представленных систем на предмет возможности реализации на их основе НРК ЭМ показал, что к настоящему времени цифровые системы почти

полностью вытеснили традиционные экранно-пленочные радиографические системы. Это обусловлено тем, что современные ЦС НРК ЭМ позволяют [17-37]:

- получать изображения внутренней структуры ОК с требуемым разрешением и большим динамическим диапазоном;
- существенно ускорить процесс получения РИ для анализа;
- исключить процесс фотохимической обработки;
- использовать алгоритмы обработки и анализа РИ на предмет обнаружения дефектов и сравнения ОК с аналогами;
- увеличить информативность представления РИ за счет возможностей графических редакторов;
- облегчить процесс хранения архивов изображений и их транспортировки;
- автоматизировать соответствующие процессы получения, формирования, обработки, анализа, хранения и вывода РИ.

Развитие ЦС НРК ЭМ сопровождается выявлением недостатков существующих и разработкой новых систем с улучшенными характеристиками. Так, ЦС НРК ЭМ с запоминанием изображения, пришедшие на смену традиционным экранно-пленочным системам, имеют ряд очевидных недостатков [33], связанных:

- с большим количеством операций, необходимых для получения РИ, что приводит к увеличению времени проведения НРК. При проведении НРК ЭМ это время увеличивается в  $N$  раз (где  $N$  – количество экспозиций, необходимое для получения РИ всех ФЭ с требуемым качеством);
- появлением артефактов на РИ при длительном использовании детекторов, обусловленное механическим воздействием в специальных сканирующих устройствах;
- низкой восприимчивостью к автоматизации процесса получения и формирования РИ.

В настоящее время наиболее активно развивающимися ЦС НРК ЭМ являются системы прямого преобразования на основе плоскопанельных и строчных матричных детекторов без использования сцинтилляционного слоя, о

недостатках применения которого было сказано выше. Данные системы обладают рядом преимуществ, одним из которых является малое время формирования РИ, что позволяет оперативно реагировать на необходимость дополнительного просвечивания ОК, а получение РИ сразу в цифровом виде определяет высокую восприимчивость систем данных типов к автоматизации.

При этом сканирующие системы на основе строчных матричных детекторов, наряду с общими преимуществами, имеют ряд отличающих достоинств [21-33]:

- отсечка рассеянного излучения, что повышает контрастность итогового РИ;
- большая область контроля за одну экспозицию (проход сканирующей системы);
- более низкая стоимость производства и обслуживания системы.

Проведенный анализ позволяет выделить наиболее перспективные ЦС, которые могут быть применены для проведения НРК ЭМ, и провести их сравнение с точки зрения эффективности процесса.

### 1.3 Оценка эффективности неразрушающего рентгеновского контроля электронных модулей и постановка задачи исследования

НРК ЭМ является целенаправленным процессом, целью которого является обнаружение дефектов контролируемого изделия. Для достижения цели исследуемого процесса используются сложные человеко-машинные системы, включающие в себя различные по цели и связанные между собой подсистемы получения, формирования, обработки, анализа, хранения и вывода РИ контролируемых изделий. Каждая из подсистем достигает свою цель через выполнение специфических (присущих ей) операций, где под операцией понимается целенаправленный процесс функционирования подсистемы [38].

Для характеристики целенаправленного процесса функционирования указанных подсистем НРК существенными являются только его операционные свойства, которые определяют качество данного процесса как объекта

исследования. Оценивание качества операции называется ее эффективностью. Показателями качества операции являются: результативность, ресурсоемкость, оперативность, которые не могут характеризовать качество операции отдельно друг от друга [38], т.е. показатель качества операции определяется в развернутой форме как:

$$Y_{\langle 3 \rangle} = \langle \mathcal{E}_i, r_i, \tau_i \rangle, \quad (1.1)$$

где:  $\mathcal{E}$  – показатель (вектор) операционного целевого эффекта операции;  $r$  – показатель (вектор) затрат операционных ресурсов на получение целевых эффектов;  $\tau$  – показатель (вектор) затрат операционного времени на получение целевых эффектов;  $i = 1, \dots, n$ .

Показатель операционного целевого эффекта НРК в настоящем исследовании определяется следующим образом.

1) Для контроля расположения контактных площадок кристалла ИМС при оценке качества разварки соединительного проводника кристалл-рамка - значением средней абсолютной ошибки обнаружения контактных площадок кристалла (КПК) [39, 40]:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|x_i - l_i|}{x_i} \cdot 100\%, \quad (1.2)$$

где:  $x_i$  – количество КПК на исследуемой ИМС;  $l_i$  – количество правильно обнаруженных КПК на исследуемой ИМС;  $n$  – количество измерений.

Значение средней абсолютной ошибки характеризует точность обнаружения КПК ИМС исходя из следующих правил [39]:

- $MAPE \leq 5\%$  – высокая точность;
- $5\% < MAPE \leq 15\%$  – средняя точность;
- $15\% < MAPE \leq 50\%$  – низкая точность;

$MARE > 50\%$  - неудовлетворительная точность.

2) Для контроля наличия пустот в корпусе ИМС, состояния проводников, смещения выводов и др. – значением функции выявления дефекта:

$$f_x = \begin{cases} 0, Q < Q_{тр}; \\ 1, Q \geq Q_{тр}, \end{cases} \quad (1.3)$$

где:  $Q$  - значение показателя качества рентгеновского изображения;  
 $Q_{тр}$  - требуемое значение показателя качества рентгеновского изображения, при достижении которого обеспечивается распознаваемость дефекта.

Функция (1.3) определяется при следующих ограничениях:

- выявление дефекта производит эксперт, имеющий высокую квалификацию, обеспечивающий выявляемость дефекта с вероятностью 100% при наличии рентгеновского изображения объекта контроля требуемого качества;

- выбор значения показателя  $Q_{тр}$  определяется по результатам эксперимента, при обеспечении степени корреляции с результатами экспертных оценок не менее 0,75;

- исследованию подвергаются функциональные элементы односторонней печатной платы.

Показатель затрат операционных ресурсов НРК определяется:

- совокупной стоимостью машинной и программной частей системы НРК, расходных элементов, обслуживания, заработной платы операторов. Выведем операцию определения данного показателя за пределы исследования, т.к. в рамках работы не вносятся предложения по изменению структуры стоимостных затрат;

- затрачиваемым вычислительным ресурсом, который определяется сложностью применяемых алгоритмов.

Оперативность НРК определяется суммой затрачиваемого времени на достижение целей отдельных процессов (этапов контроля). НРК ЭМ можно условно разделить на следующие этапы.

1. Подготовительный этап, включающий в себя:
  - проверку работоспособности системы НРК и систем обеспечения безопасности проведения работ;
  - определение фокусного расстояния;
  - прогрев источника рентгеновского излучения;
  - размещение объекта контроля в подсистеме "Излучатель-Детектор".
2. Формирование набора цифровых рентгеновских изображений ЭМ методом прошедшего рентгеновского излучения [20].
3. Обработка цифрового рентгеновского изображения ЭМ (применение различных способов обработки изображений зависит от типа используемой системы НРК).
4. Анализ цифрового рентгеновского изображения на предмет наличия дефектов ЭМ.

Тогда оперативность НРК можно определить как

$$T_K = t_{\Pi} + N \cdot (t_{\Phi} + t_{\text{ОБР}}) + t_{\text{АД}}, \quad (1.4)$$

где  $t_{\Pi}$  - совокупное время выполнения процедур подготовительных этапов;  $N$  - количество итераций формирования изображения;  $t_{\Phi}$  - время формирования изображения;  $t_{\text{ОБР}}$  - время обработки одного изображения;  $t_{\text{АД}}$  - время анализа для принятия решения о наличии дефектов.

Необходимость осуществления  $N$  итераций (формирования  $N$  РИ) обусловлена невозможностью распознавания дефектов всех ФЭ ЭМ по одному РИ.

При этом  $t_{\Pi}$  не зависит от применяемой системы НРК, а

$$t_{\Phi} = t_C + t_{\text{ГР}} + t_{\text{АК}}, \quad (1.5)$$

где:  $t_c$  – время запоминания информации в виде скрытого изображения;  $t_{\text{ПР}}$  – время преобразования скрытого изображения в цифровое;  $t_{\text{АК}}$  – время анализа цифрового изображения на соответствие требованиям по избранному критерию качества.

Случайная величина  $T_K$  является результатом действия большого числа различных взаимонезависимых (или слабозависимых) факторов, влияние каждого из которых на величину  $T_K$  мало, и для нее выполняется "правило трех сигм". Следовательно, величина  $T_K$  распределена по нормальному закону и описывается средним значением [41, 42].

По результатам экспериментального исследования семью сотрудниками рентгенологической лаборатории Академии ФСО России 150-ти ЭМ различных типов на установке НРК "Калан-4У" со сканером DuettNDT CR-43 установлено, что среднее значение показателя (1.4) составляет 125 мин. 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.

На основании проведенного проблемно-классификационного анализа средств НРК ЭМ и оценки эффективности НРК ЭМ введем следующие ограничения и допущения:

- в качестве источника рентгеновского излучения применяется рентгеновская трубка, в которой создается тормозное рентгеновское излучение, имеющее сплошной спектр;
- для детектирования используется матрица идентичных детекторов, которые наведены на источник и равноудалены от него;
- излучение, рассеянное в среде распространения и ОК, детекторами не регистрируется (пренебрежимо мало);
- в пределах угла выхода рабочего пучка излучения лучевой размер ОК меняется незначительно (вследствие расположения детектора максимально близко за ОК);

- в качестве ОК рассматривается ЭМ типа односторонней печатной платы с функциональными элементами, имеющими различные значения линейного коэффициента ослабления рентгеновского излучения;

- в качестве исследуемой системы НРК ЭМ рассматривается автономная просвечивающая система НРК, позволяющая формировать растровое цифровое рентгеновское изображение;

- внедрение предлагаемых решений не влияет на увеличение совокупной стоимости машинной и программной частей системы НРК, расходных элементов, обслуживания, заработной платы операторов.

С учетом приведенных ограничений и допущений произведена постановка задачи исследования.

Для повышения оперативности существующих систем НРК ЭМ при достижении операционного целевого эффекта требуется:

- разработать структурно-функциональную модель системы НРК ЭМ, определяющую возможность автоматизации процесса НРК при минимальных затратах операционных ресурсов;

- обоснованно выбрать из существующих и разработать новые метод и методику формирования, обработки и анализа РИ ЭМ, обеспечивающие повышение оперативности НРК ЭМ при достижении требуемого значения показателя операционного целевого эффекта (с учетом введенных ограничений):

- для контроля качества разварки соединительного проводника кристалл-рамка ИМС значение средней абсолютной ошибки обнаружения КПК ИМС должно быть  $MAPE \leq 5\%$ , что соответствует высокой точности обнаружения;

- для контроля наличия пустот в корпусе ИМС, состояния проводников, смещения выводов и др., значение функции выявления дефекта (1.3) должно быть равно 1;

- предложить программно-технический комплекс НРК ЭМ, реализующий разработанный математический и алгоритмический инструментарий на основе существующих систем НРК;



- спланировать и провести эксперимент по оценке функционирования программно-технического комплекса НРК ЭМ.

#### 1.4 Выводы по первой главе

1. Кратко представлены основные положения концепции контроля качества электронных модулей, проводимого на различных стадиях производства. Проанализировано и определено место рентгеновского контроля в системе неразрушающих методов контроля качества, определены особенности проведения неразрушающего рентгеновского контроля электронных модулей.

2. Проанализированы технологии получения рентгеновских изображений, реализованные в системах неразрушающего рентгеновского контроля различных типов. Предложена классификация цифровых систем неразрушающего рентгеновского контроля, приведен их сравнительный анализ и выявлены основные недостатки, влияющие на оперативность контроля: 1) отсутствие автоматизации процесса определения параметров источника рентгеновского излучения для проведения контроля электронных модулей; 2) отсутствие автоматизированной количественной оценки качества полученного рентгеновского изображения объекта контроля; 3) высокая стоимость современных систем. Наиболее перспективными, с точки зрения автоматизации, следует считать системы прямого преобразования на основе плоскопанельных и строчных матричных детекторов без использования сцинтилляционного слоя.

3. Проанализированы показатели эффективности целенаправленного процесса функционирования подсистем неразрушающего рентгеновского контроля. Результаты проведенного анализа показывают, что при обеспечении требуемого целевого эффекта наибольшее влияние на эффективность системы неразрушающего рентгеновского контроля оказывают характеристики системы, влияющие на 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.

4. На основании проведенного проблемно-классификационного анализа средств НРК ЭМ и оценки эффективности НРК ЭМ введены ограничения и допущения, с учетом которых произведена постановка задачи исследования.

## 2 СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО РЕНТГЕНОВСКОГО КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ

Для построения структурно-функциональной модели системы НРК ЭМ, которая позволит определить возможность автоматизации таких систем, по результатам анализа существующих ЦС НРК ЭМ необходимо сформировать их концептуальную модель, определяющую структуру моделируемой системы, свойства ее элементов, причинно-следственные связи между ними, и позволяющую выявить недостатки существующих ЦС НРК ЭМ, оказывающие влияние на оперативность.

### 2.1 Концептуальная модель системы неразрушающего рентгеновского контроля электронных модулей

Для построения концептуальной модели системы НРК ЭМ примем следующие допущения:

- в качестве источника рентгеновского излучения применяется рентгеновская трубка, в которой создается тормозное рентгеновское излучение, имеющее сплошной спектр;
- для детектирования используется матрица идентичных детекторов, которые наведены на источник и равноудалены от него;
- излучение, рассеянное в среде распространения и ОК, детекторами не регистрируется (пренебрежимо мало);
- в пределах угла выхода рабочего пучка излучения лучевой размер ОК меняется незначительно (вследствие расположения детектора максимально близко за ОК).

Основываясь на анализе ЦС НРК ЭМ (п. 1.2.1) и приведенных допущениях сформируем концептуальную модель системы НРК ЭМ (рис. 2.1) [43].

Источник излучения представляет собой рентгеновскую трубку и предназначен для формирования тормозного рентгеновского излучения требуемой интенсивности в соответствии с управляющими сигналами блока управления, задающими рабочие параметры источника.

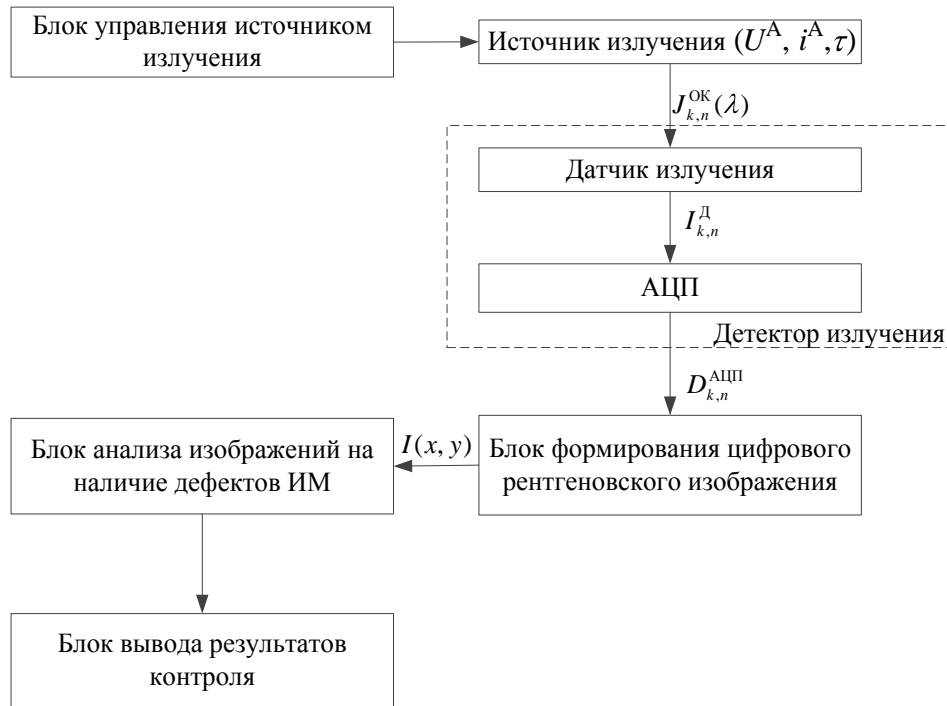


Рисунок 2.1 - Концептуальная модель системы НРК ЭМ

Тормозное рентгеновское излучение, создаваемое в рентгеновской трубке, имеет сплошной спектр. Распределение плотности потока интенсивности излучения источника по спектру  $J^H(\lambda)$  зависит от величин и формы изменения напряжения на аноде рентгеновской трубки  $U^A$  (рис. 2.2), тока анода  $i^A$  (рис. 2.3), атомного номера вещества мишени анода  $Z$  и свойств выходных сред излучателя [44]:

$$J^H(\lambda) = KZi^A U^A \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda^3}, \quad (2.1)$$

где:  $\lambda_0$  - минимальная длина волны в спектре рентгеновского излучения;  
 $K$  - постоянный коэффициент, полученный Куленкампом экспериментальным  
 путем [44].

Выражение (2.1) является математической моделью источника  
 рентгеновского излучения, имеющего сплошной спектр, и позволяет рассчитать  
 плотность потока интенсивности излучения в зависимости от изменяемых  
 параметров источника  $U^A$  и  $i^A$ .

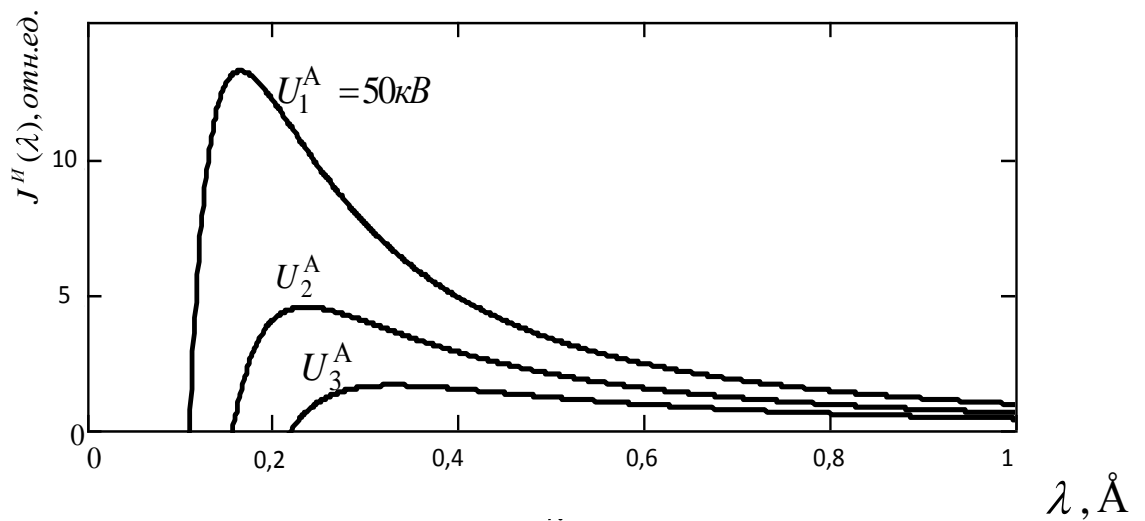


Рисунок 2.2 - Зависимость интенсивности тормозного рентгеновского излучения  
 от анодного напряжения рентгеновской трубки

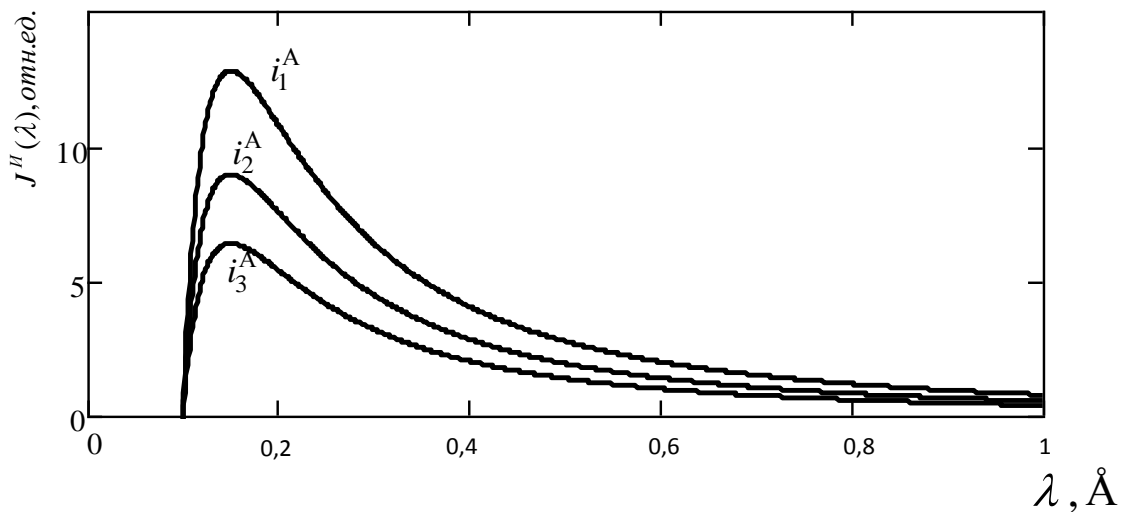


Рисунок 2.3 - Зависимость интенсивности тормозного рентгеновского излучения  
 от анодного тока рентгеновской трубки

Блок управления источником излучения позволяет выставить определенные оператором значения параметров источника излучения. Определение параметров производится оператором на основе априорных данных об ОК с использованием номограмм, указанных в документации на источник рентгеновского излучения и ГОСТ 20426-82 [45]. Необходимо отметить, что указанная документация оператора определяет номограммы для изделий, состоящих из однородных материалов, и рентгеновской пленки определенной чувствительности.

Таким образом в ЦС НРК для ЭМ, содержащего элементы из различных комбинаций материалов различной толщины, обладающих разной проникающей способностью, определение параметров источника излучения для получения требуемой чувствительности контроля становится сложной задачей, при решении которой оператор может опираться только на собственный опыт, полученный эмпирическим путем. Для ЭМ, содержащего функциональные элементы (узлы) с различными толщиной и линейным коэффициентом ослабления (ЛКО), необходимо формирование нескольких РИ, обеспечивающих требуемое качество для каждого из функциональных элементов изделия. Для получения необходимых РИ оператор системы НРК меняет параметры источника излучения путем "ручного" изменения настроек.

В современных ЦС НРК делаются попытки использовать запрограммированные режимы работы источника излучения для определенных ОК. В основном это применяется там, где накоплен большой практический опыт и известны характеристики ОК (например, в медицине [22, 26]), но эти системы не позволяют учесть все многообразие вариантов ЭМ, подвергаемых контролю, а значит, не могут предложить оператору готовое решение по выбору параметров источника излучения для проведения НРК ЭМ.

Блоки управления современных рентгеновских аппаратов могут быть исполнены в виде отдельного модуля (пульта) или ЭВМ со специальным программным обеспечением. Блок управления подключается к блоку питания источника излучения посредством цифрового интерфейса, например, RS-232 [46].

ОК (на рис. 2.1 не указан) располагается между источником и детектором рентгеновского излучения так, чтобы детектор был расположен максимально близко за ОК. Принцип проведения НРК ЭМ основан на взаимодействии рентгеновского излучения с ОК (рис. 2.4). При этом источник рентгеновского излучения 1 генерирует излучение 2, имеющее на поверхности ОК 3 интенсивность, определяемую согласно выражению (2.1). При взаимодействии материала ОК с широким пучком излучения образуются рассеянные фотоны 4, энергия которых преобразуется детектором 5 в электрический сигнал.

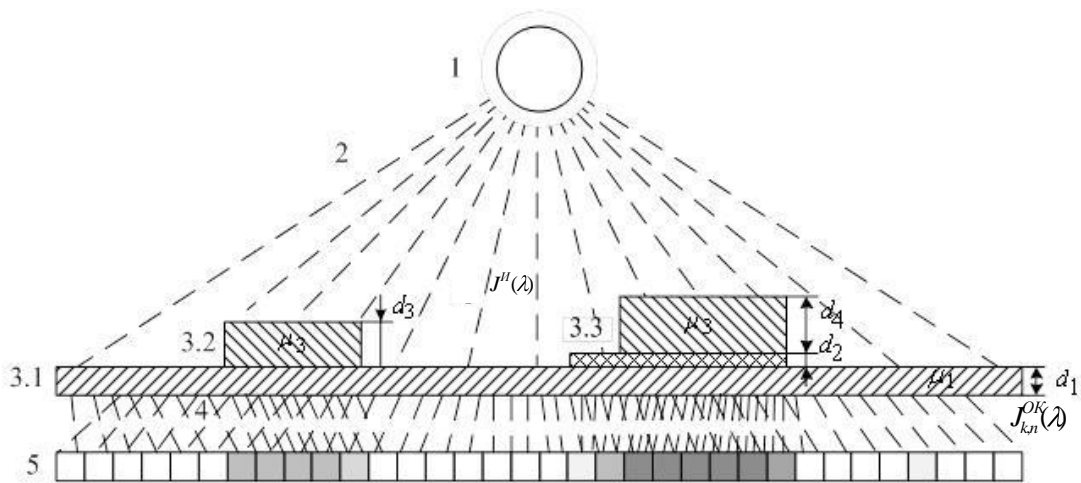


Рисунок 2.4 – Взаимодействие рентгеновского излучения с объектом контроля

Интенсивность рентгеновского излучения, прошедшего через ОК, ослабляется в результате взаимодействия этого излучения с веществом. Для ЭМ с несколькими уровнями неоднородности рентгеновское излучение ослабляется до уровня [25, 47]:

$$J_{k,n}^{OK}(\lambda) = J^H(\lambda) \cdot e^{-\rho(\lambda)}, \quad (2.2)$$

где:  $k$  – номер строки (линейки) детектора;  $n$  – номер элемента детектора в строке (линейке);  $\rho(\lambda) = \sum_t \mu_t(\lambda) d_t$  – параметр неоднородности функционального

элемента ЭМ;  $\mu_t$  – ЛКО излучения  $t$ -м слоем (материалом) ОК;  $d_t$  – толщина  $t$ -го слоя ОК ( $t = \overline{1..T}$ ).

Например, за функциональным узлом 3.1 (рис. 2.4) интенсивность излучения уменьшается в  $e^{-(\mu_1 d_1 + \mu_3 d_3)}$  раз, за узлом 3.2 – в  $e^{-(\mu_1 d_1 + \mu_2 d_2 + \mu_3 d_3)}$  раз. Это связано не только с изменением толщины слоев ОК, но и со значением ЛКО вещества каждого слоя.

Выражение (2.2) является математической моделью ЭМ, позволяющей определить интенсивность рентгеновского излучения на входе детектора.

Детектор рентгеновского излучения состоит из двух основных частей: датчика, фиксирующего энергию рентгеновского излучения, и устройства преобразования сигнала датчика в цифровой сигнал.

Общее аналитическое выражение для энергии, регистрируемой датчиком [44], описывается выражением:

$$W_{k,n}^D = \int_{s_d} \int_{\lambda_n}^{\lambda_b} J_{k,n}^{OK}(\lambda) d\lambda ds, \quad (2.3)$$

где:  $\lambda_n$  - нижний порог длин волн, фиксируемый датчиком измерения энергии рентгеновского излучения;  $\lambda_b$  - верхний порог длин волн, фиксируемый датчиком измерения энергии рентгеновского излучения;  $S_d$  – площадь апертуры датчика;  $J_{k,n}^{OK}(\lambda)$  - интенсивность излучения на входе  $n$ -го датчика  $k$ -ой строки (линейки) после прохождения ОК.

Датчик детектора преобразует энергию рентгеновского излучения в электрический сигнал  $I_{k,n}^D$ , который с помощью аналого-цифрового преобразователя детектора формируется в последовательность импульсов, характеризующуюся частотой следования  $f_{\text{вых}}$ . Ток на выходе датчика и данные  $D_{k,n}^{\text{АЦП}}$  на выходе детектора зависят от типа и, соответственно, характеристик



конкретных применяемых образцов, что обуславливает описание этих параметров в виде функционалов:

- ток на выходе датчика рентгеновского излучения  $I_{k,n}^D = f(J_{k,n}^{OK}(\lambda), S_i)$ , где  $S_i$  – токовая чувствительность, определяющая значение фототока, создаваемого единичным потоком излучения;

- данные на выходе детектора  $D_{k,n}^{АПД} = f_{\text{ВЫХ}}(I_{k,n}^D, I_{k,n}^{\text{шд}})$ , где  $I_{k,n}^{\text{шд}}$  – шум электроники  $n$ -го датчика  $k$ -ой строки (линейки) детектора.

Учитывая допущение о том, что все детекторы строки (линейки) равноудалены от источника излучения, то по данным на выходе детектора  $D_{k,n}^{АПД}$  можно определить интенсивность рентгеновского излучения на его входе  $J_{k,n}^{OK}(\lambda)$ , которую можно перевести в параметры элементов изображения, например, в градации яркости и/или цвета. Эта операция производится в блоке формирования цифрового рентгеновского изображения, в котором, в результате применения известных алгоритмов [48-50], получается растровое изображение, каждый элемент (точка) которого закодирован стандартным образом. Закодированные значения хранятся в двумерном массиве  $I(x, y)$ , индексы которого соответствуют координатам элемента (точки) в изображении.

Анализ ЭМ на наличие дефектов производится либо оператором по визуализированному на устройстве вывода рентгеновскому изображению  $I(x, y)$ , либо автоматизировано в соответствующем блоке, который представляет собой набор специализированных программных средств, алгоритмическое обеспечение которых является интеллектуальной собственностью компаний производителей ЦС НРК.

Блок вывода результатов контроля предназначен для представления рентгеновского изображения ЭМ оператору для контроля дефектов изделия. Данный блок представляет собой штатное устройство вывода ЭВМ, которое позволяет оператору произвести визуальную оценку изображения. В современных системах НРК оператору представляется набор рентгеновских изображений одного ЭМ, полученных с различными параметрами источника излучения.

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

## 2.2 Структурно-функциональная модель системы неразрушающего рентгеновского контроля электронных модулей

При проведении НРК ЭМ основной целью автоматизированной системы НРК является формирование РИ требуемого качества всех ФЭ ЭМ и обнаружение дефектов.

Для задания необходимых режимов работы программно-технического комплекса НРК и достижения цели НРК необходимо на основе данных, полученных по результатам анализа качества РИ функциональных элементов ЭМ, сформировать набор соответствующих управляющих команд  $C_k(i^A, U^A)$  к источнику рентгеновского излучения системы НРК  $F_I$ , ввести в систему модули, реализующие методику мультиэнергетической рентгенографии (МЭРГ) и метод формирования мультиизображения ЭМ  $I^o(x, y)$ .

На основе описанных выше положений предложена структурно-функциональная модель системы НРК ЭМ [52], обеспечивающая автоматизированное формирование рентгеновского мультиизображения ЭМ и обнаружение дефектов ЭМ (рис. 2.5).

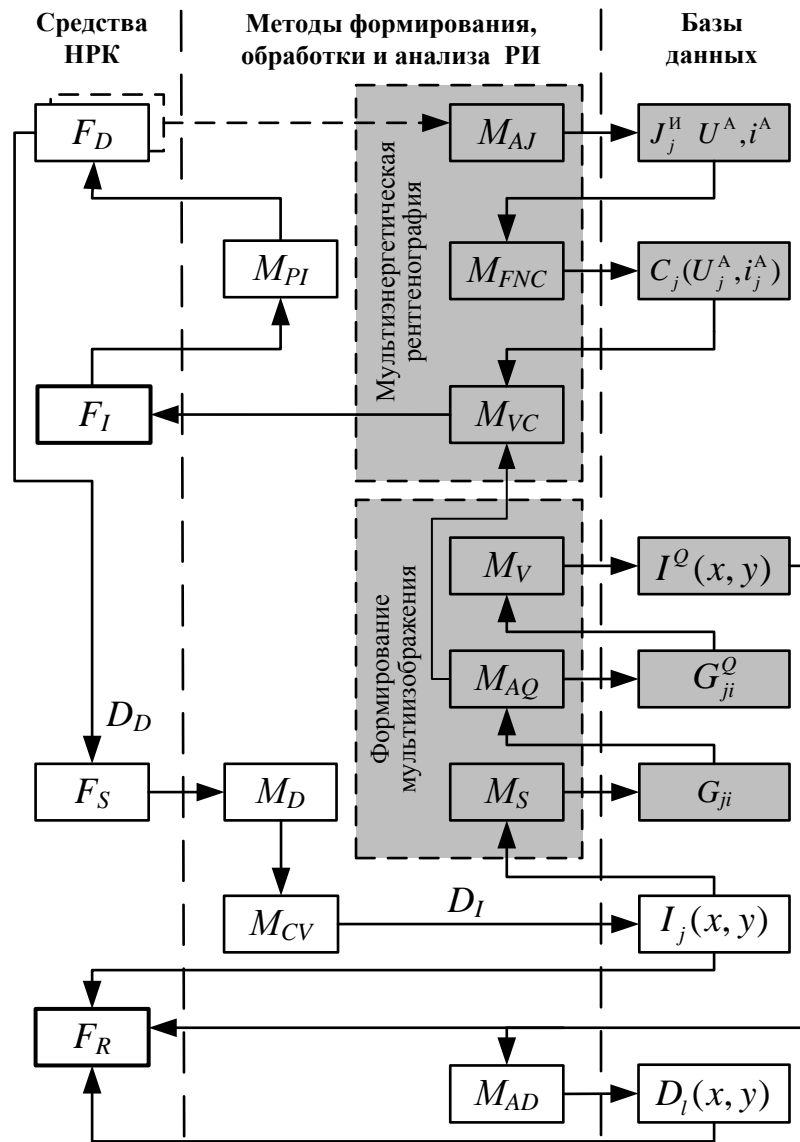


Рисунок 2.5 – Структурно-функциональная модель системы НРК ЭМ

В системах НРК ЭМ применяются следующие средства: источник излучения  $F_I$ , детектор излучения  $F_D$ , устройство преобразования сигнала  $F_S$  и устройство вывода результатов контроля  $F_R$ .

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  $M_D$  производит 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  $I_j(x, y)$ :

$$D_I = M_D(D_D); I_j(x, y) = M_{CV}(D_I), \quad (2.4)$$

которое передается либо на устройство вывода результатов  $F_R$ , либо сохраняется в виде файлов различных форматов, например, \*.BMP, \*.CSV, \*.DCM, \*.FITS, \*.JPEG, \*.PCX, \*.PNG, \*.RAW, \*.TIFF, \*.XRD, \*.XRI, \*.XYZ, в базу данных для дальнейшей обработки и анализа.

Под методами обработки рентгеновских изображений будем понимать набор операций, направленный на улучшение качества сформированных изображений.

В известных системах НРК в случае если сформированное РИ исследуемого ЭМ не удовлетворяет оператора контроля по критерию качества, то он может воспользоваться известными методами обработки цифровых изображений [48-50]:

- методами цифровой обработки:

- редактирование (изменение размера кадра, обрезание и склеивание кадров, масштабирование значений пикселей и т.д.);

- преобразование изображений (вращение, зеркальное преобразование, ортогональное преобразование, аффинное преобразование и т.д.);

- коррекция фона (вычитание фона, коррекция по черному и белому фону, выравнивание вдоль линий и т.д.);

- цифровой фильтрацией (непрямоугольные фильтры, фильтры порядковых статистик, фильтры выравнивания фона, нелинейные фильтры, частотные фильтры и др.)

Выбор методов обработки конкретного РИ зависит от квалификации оператора контроля, что не гарантирует получение РИ ОК требуемого качества, т.е. пригодного для анализа, т.к. в случае неправильного (ошибочного) выбора параметров источника излучения для инспекции ЭМ возможно, что применяемые методы обработки не дадут необходимого результата.

В связи с тем, что рассматриваемое в рамках исследования 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 изображения  $I_j(x, y)$  на сегменты  $G_{ji}$  с использованием метода сегментации  $M_S$ :

$$G_{ji} = M_S(I_j(x, y)), I_j(x, y) = \bigcup_{i=1}^q G_{ji}, \quad (2.5)$$

проверку полученных сегментов РИ на основе метода  $M_{AQ}$ :

$$\{\bar{G}_{ji}^Q, G_{ji}^Q\} = M_{AQ}(G_{ji}), \quad (2.6)$$

на соответствие заданному значению показателя качества и восстановление 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, основанной на процедурах анализа интенсивности излучения ИРИ  $M_{AJ}$ :

$$\{U_j^A, i_j^A\} = M_{AJ}(J_{k,n}^{OK}(\lambda)), \quad (2.7)$$

формирования набора команд  $C_j(U_j^A, i_j^A)$   $M_{FNC}$  и их выбора  $M_{VC}$ .

После получения всех сегментов РИ ЭМ с требуемым значением показателя качества производится восстановление (соединение сегментов) мультиизображения  $I^Q(x, y)$  с использованием соответствующего метода  $M_V$ :

$$I^Q(x, y) = M_V(G_{ji}^Q), I^Q(x, y) = \bigcup_{i=1}^q G_{ji}^Q, G_{ji} \cap G_{jk} = \emptyset, i \neq k. \quad (2.8)$$

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:

$$D_i(x, y) = M_{AD}(I^Q(x, y)). \quad (2.9)$$

Под методами анализа рентгеновских изображений будем понимать набор операций, направленный на обнаружение дефектов и документирование результатов НРК.

Современное программное обеспечение [51, 53] позволяет производить поиск дефектов ЭМ по их РИ с использованием различных методов анализа изображений, предназначенных для разных задач контроля:

- сравнение изображений (исследуемого ОК и его аналога-эталона):
  - переключение между совмещенными изображениями;
  - вычитание одного изображения из другого;
- распознавание точечных объектов;
- контроль ВГА.

Сравнение изображений требует предварительной обработки изображений с целью их совмещения, которые могут потребовать масштабирования, поворота или аффинного преобразования. В современных системах реализация этих функций автоматизирована. Контроль с помощью переключения между совмещенными изображениями производится оператором и позволяет увидеть

крупные различия между ОК и эталоном, например, отсутствие элемента ЭМ. Вычитание одного изображения из другого позволяет выделить на изображении области различия по явному изменению уровня яркости на уровне общего фона и затем выделить на изображении контролируемого ЭМ области различия [53].

Распознавание точечных объектов применяется, например, для распознавания микросхем по их контактными площадкам [51] или для контроля расположения контактных площадок кристалла ИМС при оценке качества разварки соединительного проводника кристалл-рамка [40]. Решение этой задачи требует предварительной цифровой обработки изображений. Представленные на рынке средства автоматизации (программные продукты) предлагают ограниченный набор методов цифровой обработки для решения задачи, которые при этом требуют большой степени участия оператора на всех стадиях распознавания точечных объектов и его высокой квалификации для выбора методов цифровой обработки и определения параметров контроля.

Контроль BGA подразумевает обнаружение расположения точек BGA и контроль их качества по проценту заполнения. Обнаружение расположения точек BGA выполняется по принципу распознавания точечных объектов.

Анализ рентгеновских изображений ЭМ завершается документированием результатов контроля. Современное программное обеспечение автоматизации НРК предоставляет следующие возможности:

- рисование на изображении;
- сохранение изображений;
- печать изображений;
- создание демонстрационных видео-фильмов.

Применение предложенной модели требует разработки методов и методик формирования, обработки и анализа рентгеновских изображений электронных модулей.

### 2.3 Постановка задачи разработки математического обеспечения неразрушающего рентгеновского контроля электронных модулей

В задаче НРК ЭМ интерес представляет анализ РИ ( $M_{AD}$ ) с целью выявления определенных дефектов (рис. 1.3), поэтому не имеет смысла проводить сегментацию ( $M_S$ ) мельче того уровня детализации, который необходим для обнаружения подобных дефектов. С другой стороны, недостаточная степень детализации может привести к снижению качества формирования мультиизображения при объединении ( $M_V$ ) отдельных областей ( $G_{ji}^O$ ) различных сегментированных РИ требуемого качества ( $M_{AQ}$ ).

При этом обработку РИ ЭМ ( $I_j(x, y) \rightarrow I^O(x, y)$ ) можно рассматривать как формирование рентгеновского мультиизображения путем его восстановления

$$M_V : G_{ji}^O \rightarrow I^O(x, y), \quad (2.10)$$

по совокупности отдельных областей  $G_{ji}^O$ , полученных в результате анализа качества

$$M_{AQ} : G_{ji} \rightarrow G_{ji}^O, \quad (2.11)$$

результатов сегментации

$$M_S : I_j(x, y) \rightarrow G_{ji}^O, \quad (2.12)$$

отдельных РИ  $I_j(x, y)$ , получаемых по различным командам  $C_k(i^A, U^A)$ , источнику рентгеновского излучения:

$$M_{VC} : G_{ji}^{\bar{O}} \rightarrow C_k(U^A, i^A). \quad (2.13)$$



Пусть при формировании рентгеновского мультиизображения осуществляется его восстановление  $G^Q \rightarrow I^Q(x, y)$  на основе некоторой области

$$G^Q = \bigcup_{j=1}^N \bigcup_{i=1}^{O_j} G_{ji}, \quad (2.14)$$

такой, что:

а)  $G_{ji}$  является связной областью,  $j = \overline{1 \dots N}$ ,  $i = \overline{1 \dots O_j}$ , где  $N$  – число РИ одного ЭМ;  $O_j$  – число подобластей области  $G_j$ , соответствующей одному  $j$ -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)  $P(G_{ji}) = TRUE$ ,  $j = \overline{1 \dots N}$ ,  $i = \overline{1 \dots O_j}$ ;

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

Здесь  $\emptyset$  обозначает пустое множество, а  $P$  – некоторый логический предикат, определенный на точках множества  $G_{ji}$ :

$$P G_{ji} = \begin{cases} TRUE, \text{если } G_{ji} = G_{ji}^Q; \\ FALSE, \text{если } G_{ji} \neq G_{ji}^Q, \end{cases} \quad (2.15)$$

по сути, отражающий результат реализации метода  $M_{AQ}$ .

Условие (а) означает, что точки каждой области  $G_{ji}$  должны быть связными, в некотором оговоренном смысле (например, они 4- или 8-связны [48]). Условие (б) указывает на то, что области одного  $j$ -го изображения не должны пересекаться. Условие (в) означает, что сегментация  $j$ -го изображения должна

быть полной<sup>1</sup>, т.е. каждый пиксел изображения  $G_j$  принадлежит какой-то области  $G_{ji}$ . Условие (г) относится к свойствам, которые должны соблюдаться для каждого пиксела из одной области  $G_{ji}$  каждого изображения, так, чтобы можно было сделать однозначный вывод о ее соответствии заданному значению показателя качества. Условие (д) означает, что прилегающие области  $G_{ji}$  и  $G_{jt}$  одного  $j$ -го изображения различаются в смысле логического предиката  $P$  (2.15).

**Тогда** для автоматизации процессов формирования, обработки и анализа рентгеновских изображений электронных модулей необходимо:

1) разработать метод формирования рентгеновского мультиизображения (2.10) из подобластей  $G_{ji}$ , удовлетворяющих приведенным выше условиям (а)-(д), при минимальном числе РИ одного ЭМ ( $N \rightarrow 1$ ) и минимальных затратах (временных, вычислительных) на сегментацию одного РИ (фактически,

$\sum_{j=1}^N O_j \rightarrow \min$ ), при этом:

- обосновать выбор количественного показателя качества области изображения и модифицировать соответствующий метод  $M_{AQ}$  (2.11) анализа качества для однозначного определения логического предиката  $P$  (2.15);

- обосновать выбор методов объединения подобластей  $G_{ji}$  в область  $G^Q$  (2.14) и восстановления рентгеновского мультиизображения (2.10);

2) разработать методику мультиэнергетической рентгенографии, позволяющую при минимальном числе ( $N \rightarrow 1$ ) РИ  $I_j(x, y)$ ,  $j = \overline{1...N}$  получить все необходимые подобласти  $G_{ji}$  путем задания соответствующих режимов (2.13) работы ИРИ.

Соответствующие метод формирования рентгеновского мультиизображения и методика мультиэнергетической рентгенографии представлены в следующей главе.

---

<sup>1</sup> Ниже будет показано, что при формировании рентгеновского мультиизображения, согласно разработанного метода, данное условие может быть ослаблено.

## 2.4 Выводы по второй главе

1. Разработана концептуальная модель существующих систем неразрушающего рентгеновского контроля электронных модулей. Анализ разработанной модели показал, что в данных системах отсутствуют элементы, позволяющие производить оценку качества полученного изображения неоднородных функциональных элементов ЭМ, осуществлять поддержку принятия решения при определении необходимого режима работы источника рентгеновского излучения, обрабатывать наборы изображений с целью формирования единого мультиизображения, сегменты которого соответствуют требованиям по критерию качества.

2. Разработана структурно-функциональная модель системы неразрушающего рентгеновского контроля электронных модулей, позволяющая повысить оперативность такого контроля за счет автоматизации процессов получения и сегментации рентгеновских изображений, оценки их качества, формирования единого рентгеновского мультиизображения и анализа дефектов.

3. Для достижения цели исследования необходимо разработать:

1) метод формирования рентгеновского мультиизображения 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 для однозначного определения логического предиката;

- обосновать выбор методов объединения и восстановления рентгеновского мультиизображения;

2) методику мультиэнергетической рентгенографии, позволяющую при минимальном числе рентгеновских изображений ЭМ получить изображения требуемого качества всех его функциональных элементов путем задания соответствующих режимов работы источника рентгеновского излучения.

### 3 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО РЕНТГЕНОВСКОГО КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ

При решении задач, сформулированных в п. 2.3, необходимо обеспечить минимальное число РИ одного ЭМ ( $N \rightarrow 1$ ) и минимальные затраты на сегментацию одного РИ ( $\sum_{j=1}^N O_j \rightarrow \min$ ). Для этого необходимо проводить первичное разбиение каждого РИ на множество произвольных (но одинаковых для каждого РИ) непересекающихся областей и в дальнейшем осуществлять слияние и/или разделение этих областей, стремясь к выполнению условий, сформулированных в п. 2.3.

Далее излагается метод формирования рентгеновского мультиизображения ЭМ, который соблюдает эти ограничения.

#### 3.1 Метод формирования рентгеновского мультиизображения электронного модуля

##### 3.1.1 Существующие методы сегментации изображений

Для проведения анализа изображения ФЭ ЭМ необходимо произвести его сегментацию – разделение изображения на составные части и объекты. На вход блока сегментации подается изображение  $I_j(x, y)$ , а на выходе формируются свойства и атрибуты  $G_{ji}$  (2.5), извлеченные из изображения.

Для сегментации РИ применяются подходы к сегментации, основанные на свойствах яркости изображения: разрывности и однородности. Подход, основанный на свойстве разрывности, состоит в разделении изображения на сегменты за счет нахождения границ объектов по резким перепадам яркости. Подход, основанный на свойстве однородности, состоит в разделении изображения на сегменты за счет нахождения границ однородных объектов по заранее заданным критериям [48-50].

Подходы, основанные на свойстве разрывности разделяются на [48-50]:

- обнаружение точек и линий, основанное на фиксации откликов скользящей маски по вычислению линейной комбинации коэффициентов маски со значениями яркости элементов изображения, накрываемых маской;

- обнаружение краев (перепадов), основанное на вычислении производных яркости первого, второго порядка и нахождении мест, где первая производная яркости превосходит по модулю заданный порог, а вторые производные имеют пересечения нулевого уровня. Для решения задачи обнаружение краев (перепадов) применяются следующие оценки: Собела, Превитта, Робертса, Лапласиан гауссиана, Канни, пересечения нулевого уровня;

- обнаружение прямых участков, основанное на преобразовании Хаффа, позволяющее объединить выделенные пиксели, полученные по результатам выделения краев, в линии и краевые сегменты;

- пороговые преобразования, позволяющие преобразовать полутоновое рентгеновское изображение в монохромное, выделив объекты, отличающиеся по яркости от фона. Особенности применения пороговых преобразований заключаются в процедуре выбора порога принятия решения об отнесении точки к той или иной моде яркости. Различают преобразования с глобальным и адаптивным порогом.

Подходы, основанные на свойстве однородности разделяются на [48-50]:

- выделение областей, заключающееся в прямом поиске подходящих областей. Различают методы выделения областей, основанные на: выращивании областей, разделении и слиянии областей;

- морфологический подход, основанный на сегментации преобразованием водораздела. Этот подход характеризуется избыточной сегментацией для изображений, имеющих большое количество локальных неоднородностей. Такой характеристикой и обладают рентгеновские изображения ЭМ, следовательно, данный подход слабо применим в области НРК ЭМ.

Для решения задачи сегментации рентгеновских изображений ЭМ воспользуемся известным подходом, основанном на разделении и слиянии

областей  $G_j$  [50], состоящем в последовательном разбиении этих областей на квадратные подобласти  $G_{ji}$ , пока выполняется условие  $P(G_{ji}) = TRUE$ .

Процесс разбиения начинается со всего изображения. Изображение делится на четверти в случае, если  $P(G_j) = FALSE$ . Если для любой четверти предикат  $P$  принимает значение  $FALSE$ , то она также делится на четверти, и т. д. Такой метод разбиения удобно представлять в форме так называемого *квадродерева*, т. е. дерева, у которого вершины, не являющиеся листьями, имеют в точности четыре потомка. Корень дерева соответствует целому изображению, а каждая другая вершина – какой-то из его подобластей.

При использовании одной операции разделения в окончательном разбиении изображения могут присутствовать соседние области, имеющие одинаковые свойства. Для устранения этого эффекта применяется операция слияния. Для соблюдения условий из п. 2.3 требуется, чтобы слиянию подвергались только соседние области, пикселы которых в совокупности удовлетворяют предикату  $P$ .

Возможны различные варианты реализации основной схемы разделения и слияния. Например, изображение вначале может разбиваться на множество блоков. Дальнейшее разделение проводится, как описано выше, но слияние допускается только внутри группы из четырех блоков, являющихся потомками в квадродереве и удовлетворяющих предикату  $P$ . Когда дальнейшее слияние такого вида оказывается невозможным, процедура заканчивается однократным слиянием областей, для которых  $P(G_{ji} \cup G_{ji}) = TRUE$ , при этом объединяемые области могут быть разных размеров. Главное достоинство такого подхода состоит в использовании одного и того же квадродерева для разделения и слияния на всех шагах, кроме заключительного шага слияния.

### 3.1.2 Модификация выбранного подхода к сегментации рентгеновских изображений на случай формирования мультиизображения

Подход, рассмотренный в п. 3.1.1, можно обобщить на случай сегментации нескольких РИ ЭМ (рис. 3.1).

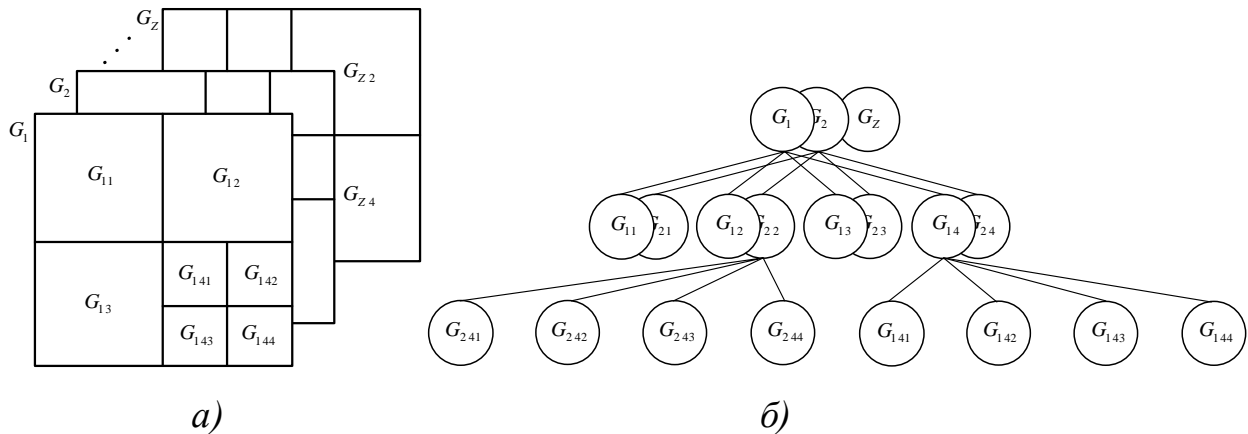


Рисунок 3.1 – Разделение и слияние областей:  
а) принцип деления областей на части; б) соответствующее квадродерево

Процессы разделения и слияния для первого РИ  $G_1$  аналогичны описанным выше. Для каждого последующего РИ ( $j > 1$ ) операция разделения осуществляется только для подобластей, для которых на предыдущих изображениях предикат  $P$  принимал значение *FALSE*, а операция слияния – для "соседних" подобластей всех доступных для сегментации РИ, удовлетворяющих условиям п. 2.3. Соответствующая такому разбиению форма мультиквадродерева представлена на рисунке 3.1 (б).

Достоинствами предлагаемого подхода к сегментации рентгеновских изображений ЭМ являются:

- соответствие представления разделяемых областей изображений (в виде матриц с размерностью, кратной степени числа 2) принципу получения РИ на основе матричных детекторов (см. п. 1.2);

- соответствие формы областей изображений структуре ЭМ;

- использование одного и того же квадродерева для разделения и слияния подобластей РИ;

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

Основываясь на приведенных сведениях, метод формирования рентгеновского мультиизображения ЭМ можно представить в виде последовательности следующих шагов [54].

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<sup>2</sup>, сторона которого есть степень числа 2.
3. Разделение на четыре непересекающиеся подобласти (рис. 3.1, а) любой области  $G_{1i}, i = \overline{1...O_j}$ , для которой  $P(G_{1i}) = FALSE$ .
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 следующие шаги.

6. Получение следующего ( $j = j + 1$ ) 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.

<sup>2</sup> Для обеспечения возможности разделения изображения вплоть до единичного размера.



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 или разделения при любых  $i = \overline{1...O_j}$ , выполнение следующего шага. Иначе – переход к шагу 8.

11. Если итоговая область  $G^o$  (2.14) 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.

Для реализации разработанного метода формирования рентгеновского мультиизображения необходимо определить предикат  $P$  (2.15) и минимальное число  $N$  РИ одного ЭМ. Очевидно, что указанные формализмы могут быть получены на основе оценки качества РИ ЭМ и его подобластей.

### 3.1.3 Существующие методы оценки качества изображений

Качество изображения определяется характеристиками формирующей его системы с помощью математических методов, которые позволяют оценить качество количественно, и/или субъективными оценками наблюдателя по результатам визуального восприятия изображений. В свою очередь и субъективные и количественные методы могут быть абсолютными или сравнительными [55]. Выбор количественного метода оценки качества РИ для автоматизации НРК может быть основан на близости его результатов к результатам субъективных методов. Обоснование выбора количественного метода оценки качества РИ приведено в п.3.1.4.

Методы абсолютных оценок используются для оценки одного изображения по рейтинговым шкалам. Методы сравнительных оценок используются для сравнения изображений и, если это необходимо, для определения ранга изображения в группе по шкале качества.

При использовании субъективных методов оценки качества изображений в зависимости от поставленной задачи определяются тестовые изображения, шкала оценки, наблюдатели, условия наблюдения.

При решении задачи установления величины искажения применяются пяти- (табл. 3.1) и/или семиградационные шкалы качества или ухудшений (погрешностей) [56, 57].

Таблица 3.1 – Пятиградационные шкалы абсолютной оценки качества изображения

Шкала качества	Шкала ухудшений (погрешностей)
5 – отлично	5 – незаметно
4 – хорошо	4 – заметно, но не раздражает
3 – удовлетворительно	3 – немного мешает
2 – плохо	2 – мешает, раздражает
1 – очень плохо	1 – сильно мешает

При решении задачи сравнения изображений и ранжирования их в группе применяются семиградационные шкалы сравнения (табл. 3.2) [56, 57].

Таблица 3.2 – Семиградационные шкалы сравнительной оценки качества изображения

Шкала сравнения	Шкала места в группе
+3 – намного лучше	7 – лучшее в группе
+2 – лучше	6 – заметно лучше среднего
+1 – немного лучше	5 – несколько лучше среднего
0 – одинаково	4 – среднее
-1 – немного хуже	3 – несколько хуже среднего
-2 – хуже	2 – заметно хуже среднего
-3 – намного хуже	1 – самое плохое

При решении задачи установления предельно допустимого значения помехи применяют двухградационную шкалу оценок, определяющую соответствие качества изображения заданному критерию.

Показателем качества изображения при использовании методов субъективной оценки является средняя оценка, данная группой наблюдателей:

$$C = \sum_{k=1}^M k \cdot f_k, \quad (3.1)$$

где:  $k = 1, 2, \dots, M$  – категория качества изображения по выбранной шкале оценки;  $f_k = n_k/N$  – относительная частота оценок;  $n_k$  – число оценок, относящих качество изображения к  $k$ -ой категории;  $N = \sum_{k=1}^M n_k$  – общее число оценок.

Результаты субъективных методов оценки качества изображений существенно зависят от условий наблюдения, остроты зрения и настроения наблюдателя, характеристик изображающей системы и других факторов, что можно отнести к недостаткам применения этих методов.

Для задачи определения качества РИ по результатам одной экспозиции логично применить методы абсолютных оценок. По этой причине рассмотрим кратко типы оценок качества изображений, отметив, что абсолютные оценки можно использовать для сравнения изображений, получив их отдельно друг от друга.

Сравнительные методы оценки качества изображений включают в себя:

1. Сравнение по критерию среднеквадратической ошибки, который определяется согласно следующему выражению [49]:

$$\overline{\varepsilon^2} = \int \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \tilde{G}(v_x, v_y) - \hat{G}(v_x, v_y) \right]^2 dv_x dv_y, \quad (3.2)$$

где:  $\tilde{G}(v_x, v_y)$  – спектр исходного изображения в исследуемой области;  $\hat{G}(v_x, v_y)$  – спектр измененного изображения в исследуемой области на выходе изображающей системы; черта сверху обозначает математическое ожидание;  $v_x, v_y$  – пространственные частоты вдоль соответствующих координатных осей.

Данный критерий плохо учитывает ошибку в передаче контуров, при этом качество изображения  $\hat{G}(x, y)$  зависит не только от ошибки, но и от исходного

изображения  $G(x, y)$  [58]. По этим причинам применение этого критерия дает слабую корреляцию с результатами субъективных оценок [59].

2. Сравнение по коэффициенту корреляции, который определяется согласно следующему выражению [49]:

$$K = \frac{\int \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{G}(v_x, v_y) \tilde{G}^*(v_x, v_y) dv_x dv_y}{\int \int_{-\infty}^{\infty} |\tilde{G}(v_x, v_y)|^2 dv_x dv_y}, \quad (3.3)$$

где  $\tilde{G}^*(v_x, v_y)$  - функция комплексно-сопряженная к  $\tilde{G}(v_x, v_y)$ .

Применение данного критерия дает слабую корреляцию с результатами субъективных оценок: коэффициент корреляции может быть достаточно большим в случаях, когда подавлены средне- и высокочастотные компоненты изображения и изображение субъективно оценивается как низкого качества [49].

3. Сравнение по отношению Штреля, которое определяется согласно следующему выражению [49]:

$$Q = \frac{\int \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{G}(v_x, v_y) dv_x dv_y}{\int \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{G}(v_x, v_y) dv_x dv_y}. \quad (3.4)$$

Приведенное отношение является мерой уменьшения контраста изображения  $\hat{G}(x, y)$  по сравнению с  $G(x, y)$ . Данная мера, согласно [49], может иметь небольшие значения, а объекты на изображении легко обнаруживаются, что говорит о слабой корреляции с результатами субъективных оценок.

Существуют также другие сравнительные методы оценки качества изображений, например, норма Минковского [60], мера структурного подобия,

предложенная Вангом [61], основанные на приведенных выше критериях или их комбинациях.

Известны следующие абсолютные методы оценки качества изображений.

### 1. Оценка разрешающей способности.

Разрешающая способность характеризует предельные возможности системы воспроизводить раздельно близко расположенные детали объекта на изображении.

Разрешающая способность по Релею определяется как минимальное расстояние между двумя близко расположенными одинаковыми точечными объектами (источниками), позволяющее принять решение о наличии на изображении этих двух объектов. Этот критерий применяется в задачах определения качества изображений систем, для которых предметами наблюдения являются близко расположенные точки или линии (астрономические телескопы и т.п.) [62-63].

Разрешающая способность по Фуко определяется как максимальная пространственная частота периодического тест-объекта, в изображении которого еще различимы штрихи [63]. При НРК в качестве тест-объектов используются наборы проволочек различной толщины. Значение разрешающей способности по Фуко выражается в парах линий/мм (проволочка тест-объекта и промежуток между проволочками, равный толщине проволочки, принимаются за две линии) [25].

Разрешающая способность, как критерий качества изображения, не учитывает поведение системы в отображении размеров в деталях объекта контроля, что может привести к значительным погрешностям в количественной оценке [64].

### 2. Оценка отношения сигнал/шум.

В качестве критерия рассматривается отношение математического ожидания изображения  $\overline{\hat{G}(x, y)}$  к среднеквадратическому отклонению шума  $\sigma(x, y)$  на выходе системы:

$$q(x, y) = \frac{\hat{G}(x, y)}{\sigma(x, y)}. \quad (3.5)$$

Чем больше величина  $q(x, y)$ , тем меньше возможные отклонения изображения на выходе системы от среднего [62].

### 3. Оценка информационной емкости изображения.

Информационная емкость изображения означает предельное количество информации, содержащейся в изображении [64], и определяется как [65]:

$$I = n \cdot \log_2 m, \quad (3.6)$$

где:  $n = XYR^2$  – число разрешаемых элементов изображения;  $X, Y$  – размеры изображения;  $R$  – разрешающая способность системы;  $m$  – число различаемых градаций интенсивности.

Важным недостатком информационной емкости является то, что в этом критерии не учитывается смысловое содержание информации.

### 4. Оценка резкости изображения.

Резкость изображения – это степень размытия границы между двумя соседними участками изображения с разной интенсивностью (яркостью).

В [55] описывается метод оценки резкости изображения через вычисление меры эксцесса двумерного спектра Фурье. Эксцесс определяется как:

$$\gamma_2 = \frac{\mu_4}{\mu_2} = \frac{\mu_4}{\sigma^4}, \quad (3.7)$$

где:  $\mu_2$  – второй центральный момент;  $\mu_4$  – четвертый центральный момент;  $\sigma$  – стандартное отклонение. По результатам экспериментов получено соответствие более резкого изображения большей величине эксцесса [55].

В [65] описывается метод оценки резкости изображения  $S$  по углу наклона профиля яркости изображения на границе перепада:

$$S_i = \operatorname{tg}(\alpha) = \frac{I(A) - I(B)}{w}, \quad (3.8)$$

где:  $\alpha$  - угол наклона профиля яркости изображения на границе перепада;  $I(A)$  и  $I(B)$  – значения яркостей пикселей А и В;  $w$  – ширина перепада. Максимальное значение  $S = \max\{S_i\}$  - является мерой резкости изображения [55, 65].

#### 5. Оценка контраста изображения.

Контраст изображения - это характеристика изображения, описывающая различие по градациям яркости (интенсивности) наиболее ярких и темных его участков.

Контраст изображения в целом определяется из контраста отдельных элементов изображения, которые рассматриваются как равнозначные [66]. Контраст каждой пары элементов изображения (например, соседних пикселей по горизонтали и вертикали) определяется следующим образом:

$$K_{ij} = \frac{I_i - I_j}{I_i + I_j}, \quad (3.9)$$

где  $I_i, I_j$  – значения яркости элементов изображения.

В результате получается матрица локальных контрастов, проведя усреднение которой получают суммарный контраст изображения [55, 66].

#### 6. Распределение яркостей элементов изображения.

Данный метод основан на гипотезе о том, что изображение, воспринимаемое субъективно как оптимальное, имеет распределение яркостей его элементов по нормальному закону [55, 66]. Оценка качества исследуемого изображения производится по степени отклонения распределения яркостей его элементов от нормального.

#### 7. Распределение энергии изображения по частотным интервалам.

Предложенный в работах [67-70] метод анализа распределений энергии изображения по заданным частотным интервалам является одним из современных методов анализа изображений, основанных на исследовании энергетических характеристик в области пространственных частот [50].

Исходными данными для реализации указанного метода являются:

- изображение, определяемое в виде двумерной функции  $I(x, y)$ , значения которой являются уровнем яркости в точке, задаваемой парой координат  $x = 1, 2, \dots, N$  и  $y = 1, 2, \dots, K$  [50];

- количество частотных субинтервалов  $R_1$  и  $R_2$  в двумерной частотной области (рис. 3.2).

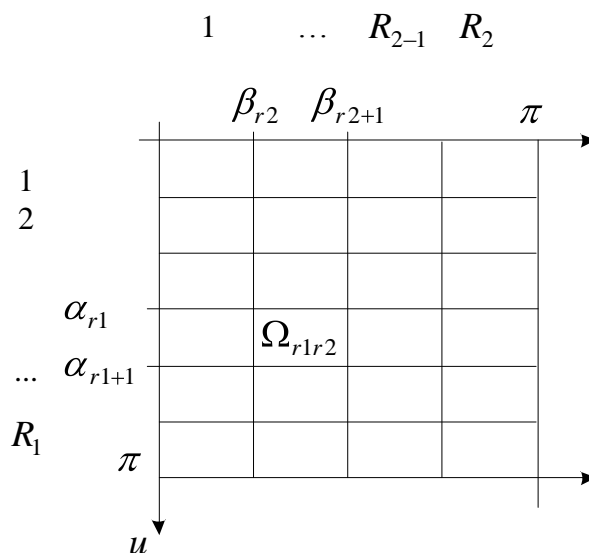


Рисунок 3.2 – Разбиение области пространственных частот

Частотный субинтервал  $\Omega$  – центрально-симметричная область частотной плоскости, задаваемая следующим образом [67]:

$$\Omega: \{\Omega(u, v) | (u \in [\alpha_1, \alpha_2], v \in [\beta_1, \beta_2]) \cup (u \in [\alpha_1, \alpha_2], v \in [-\beta_2, -\beta_1]) \cup (u \in [-\alpha_2, -\alpha_1], v \in [-\beta_2, -\beta_1]) \cup (u \in [-\alpha_2, -\alpha_1], v \in [\beta_1, \beta_2])\}, \quad (3.10)$$

где:  $0 \leq \alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2 \leq \pi$ ;  $u, v$  – пространственные частоты;  $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$  – координаты области  $\Omega$  в частотной плоскости.

Точное значение доли энергии изображения в частотном субинтервале  $\Omega$  определяется в соответствии со следующим выражением [68]:



$$P_{\Omega} = \frac{\text{tr}(A_{r_1}^T \cdot M \cdot A_{r_2} \cdot M^T)}{\text{tr}(M \cdot M^T)}, \quad (3.11)$$

где:  $M = (f_{xy})$  – матрица значений функции  $I(x, y)$ ;  $A_{r_1}$  и  $A_{r_2}$  – субполосные матрицы, значения элементов которых определяются:

$$a_{x_1, x_2}^{r_1} = \begin{cases} \frac{2 \cos \frac{\pi(2r_1-1)(x_1-x_2)}{2R_1} \sin \frac{\pi(x_1-x_2)}{2R_1}}{\pi(x_1-x_2)}, & x_1 \neq x_2; \\ 1/R_1, & x_1 = x_2 \end{cases}, \quad (3.12)$$

$$a_{y_1, y_2}^{r_2} = \begin{cases} \frac{2 \cos \frac{\pi(2r_2-1)(y_1-y_2)}{2R_2} \sin \frac{\pi(y_1-y_2)}{2R_2}}{\pi(y_1-y_2)}, & y_1 \neq y_2, \\ 1/R_2, & y_1 = y_2 \end{cases}, \quad (3.13)$$

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

Анализ распределения значений  $P_{\Omega}$  долей энергий изображений по заданным подобластям пространственных частот позволяет подобрать границы одной или нескольких подобластей пространственных частот таких, что при наименьшей суммарной площади в них была бы сосредоточена подавляющая доля  $m$  энергии анализируемого изображения.

Для определения сосредоточенности заданной доли энергии, соответствующей  $100 \cdot m\%$  суммарной энергии изображения  $M$  по  $R_1 R_2$  подобластям пространственных частот, вычисляется величина отношения минимального количества  $l_m$  подобластей пространственных частот, в которых сосредоточено  $100 \cdot m\%$  энергии изображения, к общему числу подобластей пространственных частот:

$$C = \frac{T}{R_1 \cdot R_2}. \quad (3.14)$$

Подобласти пространственных частот, в которых сосредоточено  $100 \cdot m\%$  энергии изображения, названы информационными и образуют множество  $L_m$ . Подобласти пространственных частот, не включенные в подмножество  $L_m$ , соответственно, названы неинформационными.

### 3.1.4 Выбор количественного показателя качества области рентгеновского изображения электронного модуля

Выбор метода ( $M_{AQ}$ ) анализа качества области  $G_{ji}$ ,  $j = \overline{1 \dots N}$ ,  $i = \overline{1 \dots O_j}$ , должен основываться на результатах исследования различных свойств РИ. Поскольку многие современные методы анализа изображений основаны на учете свойств изображений в области пространственных частот [50], имеются положительные результаты анализа субполосных свойств различных типов изображений видимого диапазона [67-70], то представляется целесообразным провести исследование свойств РИ, используя процедуры субполосного анализа, в отдельных подобластях пространственных частот  $\Omega$ . При применении указанных процедур предполагается, что область нормированных пространственных частот  $-\pi \leq u \leq \pi, -\pi \leq v \leq \pi$  разбита на непересекающиеся подобласти (субинтервалы) вида (3.10).

Для исследования целесообразности использования отдельных субполосных свойств изображений в различных подобластях пространственных частот при анализе РИ ЭМ и обосновании количественного показателя качества его областей, по аналогии с [68], был проведен ряд экспериментов, в ходе которых было проанализировано значительное количество РИ ЭМ и их функциональных элементов, полученных при различных параметрах рентгеновского излучения (напряжения  $U^A$  и тока  $i^A$  рентгеновской трубки, времени экспозиции). Примеры некоторых из них приведены на рисунках 3.3–3.4 и в приложении А.

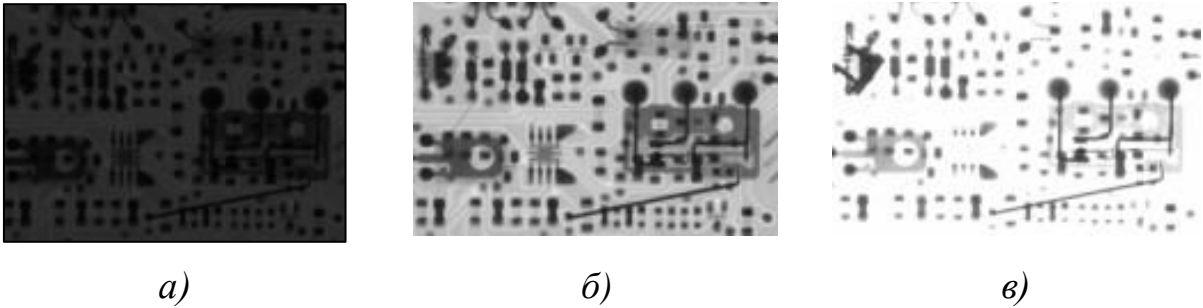


Рисунок 3.3 – Область печатной платы с элементами малой плотности:

*a* – при  $U = 100$  кэВ,  $I = 1$  мА,  $t = 40$  с; *б* – при  $U = 140$  кэВ,  $I = 2$  мА,  $t = 40$  с;  
*в* – при  $U = 180$  кэВ,  $I = 3$  мА,  $t = 40$  с

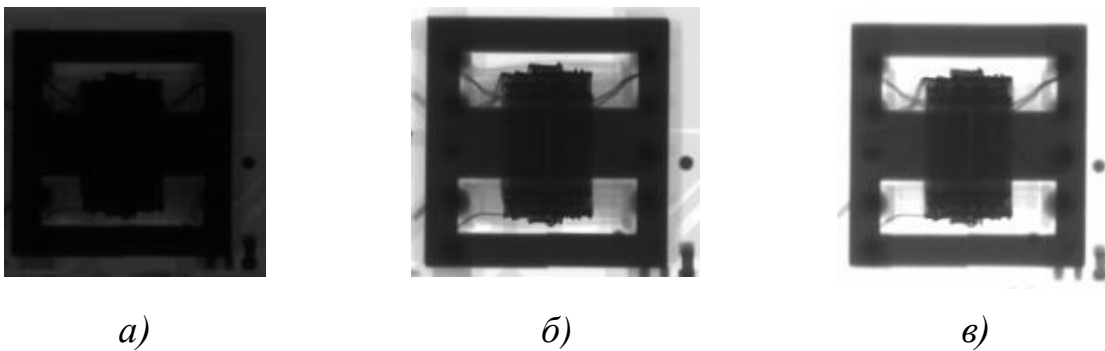


Рисунок 3.4 – Трансформатор:

*a* – при  $U = 100$  кэВ,  $I = 1$  мА,  $t = 40$  с; *б* – при  $U = 140$  кэВ,  $I = 2$  мА,  $t = 40$  с;  
*в* – при  $U = 180$  кэВ,  $I = 3$  мА,  $t = 40$  с

В ходе вычислительных экспериментов проанализированы следующие субполосные свойства РИ (рис. 3.3, 3.4):

- зависимость сосредоточенности  $C_m$  долей энергии (3.14) от заданного количества частотных субинтервалов  $R_1 R_2$ ;
- сосредоточенность  $C_m$  долей энергии (3.14) при различных значениях доли суммарной энергии;
- влияние разрешения анализируемого изображения на распределение долей энергии изображения по подобластям пространственных частот;
- зависимость сосредоточенности  $C_m$  от типа элемента на изображении и режима работы источника рентгеновского излучения;

- доля энергии РИ, необходимая для отнесения объектов разных типов к соответствующим классам.

Полученные результаты (табл. 3.3 и 3.4) позволили сделать следующие выводы [71].

Таблица 3.3 – Значения сосредоточенности  $C_m$  долей энергии и количества частотных интервалов  $l_m$ , содержащих энергию  $m = 0,999$ , в зависимости от количества частотных субинтервалов  $R_1R_2$

Тип исследуемого элемента (разрешение)	Режим источника U(кВ)/ I(мА)/t(с)	Число частотных субинтервалов $R_1R_2$							
		8×8		10×10		16×16		32×32	
		T	C	T	C	T	C	T	C
Трансформатор (1200x1239)	100/1/40	10	0,156	13	0,13	23	0,144	53	0,052
	140/2/40	10	0,156	13	0,13	22	0,138	52	0,051
	180/3/40	9	0,141	9	0,141	20	0,125	47	0,046
Трансформатор (155x160)	100/1/40	18	0,281	27	0,27	64	0,25	252	0,246
	140/2/40	18	0,281	26	0,26	59	0,23	233	0,228
	180/3/40	17	0,266	23	0,23	52	0,203	202	0,197
Плата с мелкими деталями (2080x1141)	100/1/40	5	0,078	6	0,06	11	0,043	31	0,03
	140/2/40	4	0,063	6	0,06	10	0,039	26	0,025
	180/3/40	4	0,063	5	0,05	9	0,035	23	0,023
Плата с мелкими деталями (160x103)	100/1/40	29	0,453	45	0,45	113	0,441	447	0,437
	140/2/40	28	0,438	42	0,42	105	0,41	414	0,404
	180/3/40	23	0,359	34	0,34	83	0,324	324	0,316

Таблица 3.4 – Значения сосредоточенности  $C_m$  для заданной доли энергии изображения

Тип исследуемого элемента	Режим источника U(кВ)/ I(мА)/t(с)	Сосредоточенность заданных долей энергии изображения (16×16 частотных субинтервалов)						
		0,999	0,998	0,997	0,996	0,995	0,994	0,993
Трансформатор	100/1/40	0,25	0,18	0,148	0,137	0,129	0,121	0,117
	140/2/40	0,231	0,168	0,145	0,133	0,125	0,121	0,113
	180/3/40	0,203	0,148	0,137	0,125	0,117	0,109	0,102
Плата с мелкими деталями	100/1/40	0,441	0,336	0,281	0,25	0,227	0,211	0,195
	140/2/40	0,41	0,309	0,258	0,231	0,207	0,195	0,184
	180/3/40	0,324	0,234	0,199	0,18	0,168	0,152	0,141

Число частотных субинтервалов существенно влияет на применимость метода субполосного анализа (табл. 3.3): чем больше число частотных субинтервалов, тем больше разрешение метода. Для исследуемых РИ при

большом значении энергии необходимо не менее 16 частотных субинтервалов, чтобы обеспечить необходимое разрешение одного изображения от другого. Увеличение числа частотных субинтервалов до 32 дает некоторое увеличение точности определения доли информационных субинтервалов, но при этом существенно повышается вычислительная сложность.

Исследование пространственного разрешения изображения показало (табл. 3.3), что оно не оказывает влияния на тенденцию изменения распределения долей энергии изображения по подобластям пространственных частот. Это позволяет использовать для анализа сжатые изображения, тем самым снижая вычислительную сложность.

Выбор значения доли энергии исследуемого изображения оказывает прямое влияние на разрешение метода (табл. 3.4). Значения частотной концентрации (сосредоточенности) энергии меньше 0,995 дают результат, не позволяющий разрешить друг от друга объекты разных типов (разного уровня неоднородности).

Изображения функциональных элементов разных типов, полученные при одном режиме просвечивания и том же детекторе (в табл. 3.3 и 3.4 выделено цветом), имеют разные значения сосредоточенности  $C_m$  долей энергии (3.14), что позволяет их классифицировать. Следует отметить, что разные элементы (области)  $G_{ji}$  РИ, полученные в одинаковых условиях, имеют различающуюся субъективную оценку качества (рис. 3.3 (в) – изображение размытое, пересвеченное; рис. 3.4 (в) – изображение четкое, пригодное к расшифровке), соответствующую определенному значению (диапазону значений) сосредоточенности  $C_m$ .

Реализация метода анализа качества  $M_{AQ}$  (2.11) по сосредоточенности  $C_m$  долей энергии (3.14) потребовала проведения дополнительных исследований, а именно:

- субъективных оценок качества областей РИ ЭМ и возможности их анализа на предмет определения дефектов;

- распределения долей энергии изображения по подобластям пространственных частот (3.10);
- сосредоточенности  $C_m$  долей энергии (3.14);
- взаимосвязи субъективных оценок качества областей рентгеновского изображения и сосредоточенности  $C_m$  долей энергии.

Аналізу подлежал ряд РИ нескольких ЭМ, полученных при различных значениях параметров рентгеновского излучения (напряжения и тока рентгеновской трубки). Далее для большей наглядности представлены результаты исследования импульсного блока питания ПЭВМ (приложение А). При анализе указанного ЭМ была проведена его разметка на области, соответствующие различным уровням неоднородности (рис. 3.5), и экспертная оценка качества каждой из них (табл.3.5).

При выборе метода получения экспертных оценок при проведении третьего этапа экспериментов учитывалось следующее. Эксперты, являющиеся сотрудниками отдела контроля качества готовых изделий, имеют, как правило, хорошую математическую подготовку и знания в области неразрушающих методов контроля, однако, имеют разный уровень знаний относительно методик неразрушающего рентгеновского контроля и построения соответствующих систем. Поэтому была введена оценка значимости каждого эксперта, определяемая по самооценке и взаимооценке, выставляемой членами экспертной группы друг другу по пятибалльной шкале.

Условная оценка значимости экспертов рассчитывалась следующим образом [72]:

$$K_{э,i} = 0,4K_{сам,i} + 0,6 \frac{\sum_{j=1}^J K_{вз,ij}}{J-1}, \quad (3.15)$$

где:  $K_{э,i}$  – оценка значимости  $i$ -го эксперта;  $K_{сам,i}$  – самооценка эксперта;  $K_{вз,ij}$  – взаимооценка  $i$ -го эксперта  $j$ -м экспертом;  $J$  – общее количество экспертов.

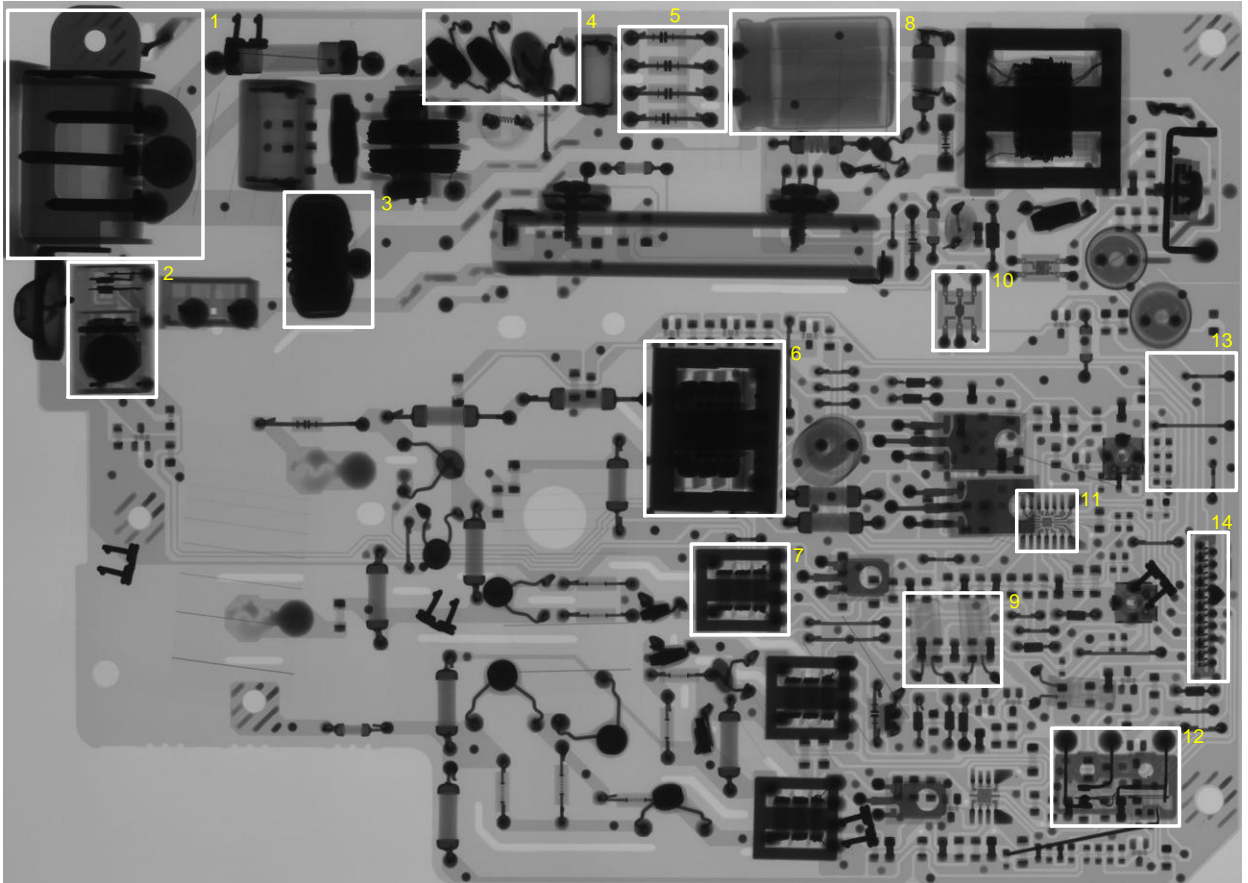


Рисунок 3.5 – Исследуемое ЭМ с размеченными областями  
(РИ получено при  $U_1^{\wedge} = 160$  кэВ,  $i_1^{\wedge} = 2$  мА)

Экспертам последовательно предлагались размеченные элементы каждого из РИ исследуемого ЭМ. Для определения качества области РИ экспертами применялась прямая оценка с помощью числовых значений на шкале  $[0, 5]$  по следующим правилам:

- от 0 до 2 (включительно), если дефекты на предъявляемом РИ не распознаваемы;
- от 2 до 4, если дефекты на предъявляемом РИ трудно распознаваемы;
- от 4 (включительно) до 5, если дефекты на предъявляемом РИ хорошо распознаваемы.

Таблица 3.5 – Экспертные оценки качества размеченных областей РИ

$U^A/i^A$ (кВ/мА)	Номер элемента						
	1	2	3	4	5	6	7
80/1	1,25	1,75	1,5	1,5	2	1,75	1,75
80/2	1,5	1,5	1,25	1,25	1,5	1,5	1,5
80/3	1,75	1,75	1,75	1,5	2,75	2	1,75
100/1	1,5	1,5	1,25	1,25	2	1,5	1,5
100/2	2	2	1,25	1,25	3	1,75	1,75
100/3	2,25	2,25	1,5	2,5	3,5	1,75	2
120/1	1,75	1,75	1,5	1,5	2,25	1,5	1,75
120/2	2,25	2,75	1,75	2,25	3,5	2	1,75
120/3	2	3,5	2,25	4	4,25	3	3,5
140/1	2	2,25	1,5	1,75	2,75	1,75	2
140/2	4,25	3,25	2,25	2,25	4,5	2	3,75
140/3	4,5	3,5	2,5	4	4,5	3,75	3,75
160/1	2,5	2	1,5	2,75	3,5	2	1,75
160/2	4,25	3,5	2,75	4,5	4,5	3,75	3,5
160/3	4,5	4,25	3,75	4,25	3	3,75	3,25
180/1	2,75	1,75	1,75	2,25	3,25	2	2
180/2	4,25	3,25	3,25	4,75	3,75	3	3,5
180/3	3,75	4	3,75	4,5	1,75	3,75	4,5
$U^A/i^A$	Номер элемента						
	8	9	10	11	12	13	14
80/1	2	2	2	2	2	1,5	2
80/2	1,75	1,75	2,25	1,75	1,75	2,75	1,75
80/3	1,75	3	2,75	2	1,75	3,5	2
100/1	1,75	2,5	2,25	1,75	2	2,25	1,75
100/2	2,75	3,25	3	1,5	2	3,75	1,75
100/3	2,5	3,25	2,5	3,25	3,25	4	3,5
120/1	2	2	2,5	1,75	1,25	2,25	2,25
120/2	3,25	3,75	3,75	3,75	3,75	4,5	3,75
120/3	4	4,5	4,5	4,5	4,75	3,5	3,75
140/1	2,25	3	2,75	2	2	3,75	1,75
140/2	4	4,75	4,75	3,25	3,75	3,5	3,75
140/3	5	3	4	3,75	4,75	1,5	3,5
160/1	3,75	3,5	3,75	3,75	3,75	4,25	3,5
160/2	4,75	4,75	4,5	4,5	4,5	1,75	4,75
160/3	3,5	2	2,75	4,25	4,25	1,75	4,25
180/1	3,75	3,75	3,75	3,75	3,5	4,5	3,5
180/2	3,5	3,5	4,25	4,5	4,5	2	4
180/3	2	1,5	3	2,5	4	1,75	4

Примечание: \* – значения анодного напряжения приведены в кВ, а анодного тока – в мА

2	– дефекты на изображении не распознаваемы;
3,5	– дефекты на изображении трудно распознаваемы;
4	– дефекты на изображении хорошо распознаваемы.

Обработка результатов экспертных оценок проводилась с учетом значимости  $K_{э,i}$  эксперта. Так оценки качества  $Q_{э,i}$  (табл. 3.5) для каждого  $i$ -го элемента подсчитывались по формуле:



$$Q_{\varepsilon,i} = \frac{1}{J} \sum_{k=1}^J K_{\varepsilon,k} Q_i^{(k)}, \quad (3.16)$$

где:  $Q_i^{(k)}$  – оценка качества рассматриваемой области, данная  $k$ -м экспертом;  
 $K_{\varepsilon,k}$  – значимость  $k$ -го эксперта.

Полученные результаты (табл. 3.5) подтверждают тот факт, что для анализа на дефекты всех функциональных элементов (областей неоднородностей) ЭМ одного РИ (режима просвечивания) не существует. Однако решение указанной задачи может быть достигнуто за счет анализа субполосных свойств РИ. В соответствии с результатами вычислительных экспериментов в последующих исследованиях выбраны: количество подобластей пространственных частот  $R_1 = 16, R_2 = 16$  и значение доли суммарной энергии  $m = 0,99$ .

Распределения долей энергии РИ, полученных при  $U_1^A = 160$  кВ,  $i_1^A = 2$  мА (рис. 3.5) и  $U_1^A = 80$  кВ,  $i_1^A = 2$  мА (рис. А.1), по подобластям пространственных частот показывают, что с ухудшением качества анализа РИ значения их долей энергий резко убывают с увеличением номеров  $r_1$  и  $r_2$  подобластей пространственных частот. В таблице 3.6 отображены результаты вычисления сосредоточенности долей энергии размеченных областей (элементов) анализируемого РИ (рис. 3.5).

Сравнение полученных результатов с экспертными оценками (табл. 3.5) показало, что величина сосредоточенности  $C_{0,99}$  долей энергии может служить количественной мерой, характеризующей степень размытости (четкости) РИ, однако должна учитывать гипотезу о том, что изображение, воспринимаемое субъективно как оптимальное, имеет распределение яркостей его элементов по нормальному закону [55, 66]. Последняя нашла свое отражение при анализе распределения яркостей по размеченным областям (элементам) РИ (табл. 3.7).

Результаты такого анализа позволяют сделать вывод о том, что для анализа дефектов области  $G_{ji}$ ,  $j = \overline{1...N}$ ,  $i = \overline{1...O_j}$ , средняя яркость ее элементов

(пикселов) должна лежать вблизи некоторого среднего (по всем элементам РИ) значения и обладать требуемой четкостью.

Таблица 3.6 – Сосредоточенность долей энергии размеченных областей РИ

$U^A/i^A$ (кВ/мА)	Номер элемента						
	1	2	3	4	5	6	7
80/1	0,1016	0.1289	0.1328	0.1133	0.1328	0.1523	0.1836
80/2	0.1055	0.1328	0.1289	0.1094	0.1250	0.1445	0.1641
80/3	0.1016	0.1328	0.1367	0.1172	0.1250	0.1445	0.1563
100/1	0.0938	0.1250	0.1289	0.1094	0.1211	0.1445	0.1484
100/2	0.0938	0.1328	0.1328	0.1133	0.1211	0.1367	0.1445
100/3	0.1016	0.1250	0.1328	0.1094	0.1211	0.1406	0.1563
120/1	0.0859	0.1328	0.1172	0.1055	0.1133	0.1406	0.1484
120/2	0.0859	0.1172	0.1250	0.1055	0.1133	0.1289	0.1445
120/3	0.0898	0.1250	0.1289	0.1055	0.1133	0.1289	0.1445
140/1	0.0859	0.1211	0.1250	0.1016	0.1094	0.1250	0.1367
140/2	0.0820	0.1250	0.1172	0.1133	0.1094	0.1250	0.1367
140/3	0.0820	0.1250	0.1250	0.1133	0.1094	0.1250	0.1406
160/1	0.0820	0.1172	0.1133	0.0977	0.1094	0.1250	0.1367
160/2	0.0820	0.1133	0.1250	0.0977	0.1055	0.1250	0.1406
160/3	0.0703	0.1094	0.1289	0.1094	0.0977	0.1211	0.1289
180/1	0.0781	0.1172	0.1211	0.0938	0.1055	0.1250	0.1367
180/2	0.0781	0.1172	0.1211	0.1055	0.1016	0.1211	0.1367
180/3	0.0625	0.1094	0.1250	0.1094	0.0859	0.1094	0.1172
$U^A/i^A$	Номер элемента						
	8	9	10	11	12	13	14
80/1	0.1016	0.1211	0.1484	0.1680	0.1602	0.0859	0.1797
80/2	0.1094	0.1211	0.1406	0.1797	0.1484	0.0859	0.1602
80/3	0.1055	0.1172	0.1563	0.1758	0.1563	0.0859	0.1680
100/1	0.0938	0.1133	0.1328	0.1797	0.1563	0.0859	0.1641
100/2	0.0938	0.1133	0.1367	0.1680	0.1445	0.0859	0.1523
100/3	0.0977	0.1133	0.1445	0.1680	0.1445	0.0820	0.1563
120/1	0.0938	0.1055	0.1289	0.1563	0.1367	0.0781	0.1641
120/2	0.0938	0.1055	0.1328	0.1563	0.1367	0.0781	0.1563
120/3	0.0898	0.1055	0.1289	0.1484	0.1328	0.0820	0.1523
140/1	0.0859	0.1055	0.1211	0.1445	0.1328	0.0859	0.1602
140/2	0.0859	0.0977	0.1250	0.1563	0.1289	0.0781	0.1484
140/3	0.0781	0.0977	0.1250	0.1641	0.1289	0.0742	0.1523
160/1	0.0859	0.0977	0.1250	0.1406	0.1289	0.0820	0.1445
160/2	0.0859	0.0977	0.1211	0.1445	0.1289	0.0742	0.1406
160/3	0.0625	0.0859	0.1133	0.1250	0.1172	0.0703	0.1367
180/1	0.0898	0.0977	0.1250	0.1406	0.1211	0.0742	0.1367
180/2	0.0742	0.0898	0.1211	0.1367	0.1211	0.0703	0.1289
180/3	0.0508	0.0781	0.0977	0.1094	0.1055	0.0625	0.1328

Таблица 3.7 – Средняя яркость размеченных областей (элементов) РИ

$U^A/i^A$ (кВ/мА)	Номер элемента							
	1	2	3	4	5	6	7	8
80/1	10.2256	22.1943	9.4986	15.0968	21.5325	6.3140	8.5638	13.1412
80/2	21.9482	46.6261	21.9483	33.2995	45.9489	14.0434	17.6528	27.9668
80/3	35.5162	73.2488	30.9236	50.1852	70.6926	21.1071	29.5944	44.1229
100/1	16.9843	34.4355	15.8952	24.1405	33.5437	9.5043	15.7894	21.6836
100/2	38.5658	77.4532	33.1134	53.6874	75.9787	23.9756	35.0716	51.2553
100/3	58.6666	117.3786	50.1364	82.4570	113.8242	35.1549	49.8813	76.9593
120/1	25.5371	48.3541	24.2584	34.9898	48.2502	15.1671	22.1877	31.1119
120/2	63.8804	115.5277	53.9021	84.3851	113.8970	37.2613	52.6117	81.1432
120/3	89.0254	172.5865	73.7929	125.5073	170.1367	59.2273	78.7448	120.7200
140/1	34.2909	33.5744	29.5555	45.8263	62.6483	23.5857	32.3758	46.2646
140/2	84.9248	79.0827	73.7690	108.2838	149.4232	55.2379	74.8602	105.0317
140/3	117.7594	112.1618	101.2198	154.9964	202.8424	76.1454	104.2017	155.0424
160/1	44.4885	79.0488	42.1699	59.3133	77.5511	29.1722	40.3189	58.2466
160/2	105.3988	185.7722	85.5308	137.4690	185.4004	65.8544	89.2836	136.3360
160/3	136.4161	214.0555	104.1777	172.8439	215.8400	89.2101	126.0379	191.2691
180/1	50.3705	88.0975	42.0473	66.0005	88.0359	32.3463	43.6057	63.9381
180/2	123.4676	205.9586	103.5958	158.9570	207.1801	81.8852	109.4009	161.8604
180/3	154.3790	158.4958	109.7874	177.3002	224.6519	108.4009	145.9497	217.4498
$U^A/i^A$	Номер элемента						Среднее по элементам	Среднее по изображению
	9	10	11	12	13	14		
80/1	20.9104	21.2286	18.6740	15.0351	25.7989	15.6031	15,9869	22.1943
80/2	43.6457	44.5876	36.9180	31.1339	54.2860	35.5816	33,9705	46.6261
80/3	70.6209	66.5283	58.6084	48.9759	85.4736	54.3856	52,8560	73.2488
100/1	33.1851	34.2446	27.5180	23.8851	40.2688	25.2817	25,4543	34.4355
100/2	73.9489	74.7072	64.5748	54.6916	90.4125	60.5077	57,7103	77.4532
100/3	112.0571	109.6640	98.8141	83.5743	136.4103	87.2775	86,5900	117.3786
120/1	47.9406	46.8919	41.3558	35.9125	55.5860	35.7733	36,6655	48.3541
120/2	114.5330	110.1360	99.4439	84.3069	134.3671	85.4245	87,9157	115.5277
120/3	171.8632	169.4515	152.2645	126.1028	199.3793	132.1534	131,4968	172.5865
140/1	63.7886	62.4842	56.6853	48.2024	69.2142	48.0463	46,8959	63.6773
140/2	153.2737	150.4137	129.1165	110.3715	173.6186	118.0390	111,8176	151.4572
140/3	211.9333	202.4436	175.7742	162.0269	236.0765	160.2615	155,2061	203.0196
160/1	79.1074	76.3594	69.9080	60.5168	86.2667	62.1891	61,7612	79.0488
160/2	188.4439	181.8904	166.0931	142.7770	213.9791	147.9859	145,1582	185.7722
160/3	228.5300	219.6503	214.3028	188.4510	241.7881	182.7719	180,3817	214.0555
180/1	89.1728	85.4379	77.6054	69.9298	99.8043	72.2221	69,1867	88.0975
180/2	217.6574	205.0422	197.3558	167.1613	237.7850	171.2836	167,7565	205.9586
180/3	235.2077	233.7415	233.4284	205.1139	245.7659	195.0659	188,9099	220.3891

Следовательно, в качестве количественного показателя качества области РИ ЭМ может быть использована величина:

$$Q_{\text{кол},ji} = \frac{\bar{I}_{G_{ji}}}{C_{G_{ji}}}, \quad (3.17)$$

где:  $\bar{I}_{G_{ji}}$  – средняя яркость области  $G_{ji}$ ;  $C_{G_{ji}}$  – сосредоточенность долей энергии области  $G_{ji}$  при значении доли суммарной энергии  $m = 0,99$ . О инвариантности сосредоточенности  $C_{0,99}$  долей энергии РИ ЭМ к яркости  $\bar{I}_j$  его элементов свидетельствуют данные, приведенные в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Параметры излучения вне объекта контроля

$U^A/i^A$ (кВ/мА)	$J'' \lambda$ , отн. ед.	$\bar{I}_j$	$C_{0,99}$	$Q_{\text{кол.}}$
80/1	1,76	35,21	0,0391	900,51
80/2	3,69	73,72	0,0273	2700,37
80/3	5,77	115,44	0,0273	4228,57
100/1	2,60	51,91	0,0273	1901,47
100/2	5,77	115,33	0,0273	4224,54
100/3	8,80	175,96	0,0273	6445,42
120/1	3,55	71,07	0,0273	2603,30
120/2	8,33	166,51	0,0234	7115,81
120/3	12,42	248,45	0,0273	9100,73
140/1	4,54	90,71	0,0273	3322,71
140/2	10,71	214,11	0,0273	7842,86
140/3	12,70	254	0,0273	9304,03
160/1	5,55	110,97	0,0273	4064,84
160/2	12,66	253,29	0,0273	9278,02
160/3	12,70	254	0,0234	10854,70
180/1	6,05	121	0,0273	4432,23
180/2	12,70	254	0,0234	10854,70
180/3	12,70	254	0,0273	9304,03

В таблице 3.9 отображены результаты вычисления показателя (3.17) для размеченных областей (элементов) анализируемого РИ (рис. 3.5).

На основе сопоставления экспертных оценок (табл. 3.5) и количественных показателей  $Q_{\text{кол.}ji}$  (табл. 3.9) могут быть сформулированы следующие правила принятия решения о том, что область  $G_{ji}$  соответствует требуемому качеству, т.е.

$$G_{ji} = G_{ji}^O:$$

- дефекты на предъявляемом РИ не распознаваемы, если  $Q_{\text{кол.}ji} < 450$  или

$$Q_{\text{кол.}ji} > 2500;$$

- дефекты на предъявляемом РИ трудно распознаваемы, если  $450 \leq Q_{\text{кол},ji} < 1000$  или  $2000 < Q_{\text{кол},ji} \leq 2500$ ;

- дефекты на предъявляемом РИ хорошо распознаваемы, если  $1000 \leq Q_{\text{кол},ji} \leq 2000$ .

Таблица 3.9 – Количественный показатель качества размеченных областей (элементов) РИ

$U^A/i^A$ (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: ячейки таблицы подкрашены аналогично таблице 3.5

С их учетом количественные показатели  $Q_{\text{кол},ji}$  (табл. 3.9) могут быть преобразованы к  $Q'_{\text{кол},ji}$  (табл. 3.10). Тогда достоверность выбора показателя (3.17) для оценки качества областей  $G_{ji}$  может быть подтверждена расчетом коэффициента корреляции показателей экспертной (табл. 3.5) и количественной (табл. 3.10) оценок:

$$CORR = \frac{\sum_{i=1}^{14} (Q_{\text{э},i} - \overline{Q_{\text{э}}})(Q'_{\text{кол},i} - \overline{Q'_{\text{кол}}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{14} (Q_{\text{э},i} - \overline{Q_{\text{э}}})^2 \sum_{i=1}^{14} (Q'_{\text{кол},i} - \overline{Q'_{\text{кол}}})^2}}, \quad (3.18)$$

где:  $Q_{\text{э},i}$  и  $Q'_{\text{кол},i}$  – экспертный и количественный показатели качества области  $G_{ji}$   $j$ -го изображения;  $\overline{Q_{\text{э}}}$  и  $\overline{Q'_{\text{кол}}}$  – средние значения экспертного и количественного показателей качества на множестве функциональных элементов ЭМ, полученных при различных режимах.

Для рассматриваемого случая  $CORR = 0,8932$ , что свидетельствует о высокой степени корреляции введенного количественного показателя качества (3.17) и оценок, сформированных экспертами.

На основе полученных данных логический предикат (2.15) можно определить как:

$$P G_{ji} = \begin{cases} TRUE, & \text{если } 1000 \leq Q_{\text{кол},ji} \leq 2000; \\ FALSE, & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (3.19)$$

при "жестком" решении или

$$P G_{ji} = \begin{cases} TRUE, & \text{если } 450 \leq Q_{\text{кол},ji} \leq 2500; \\ FALSE, & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (3.20)$$

при "мягком" решении.

Таблица 3.10 – Приведенный количественный показатель качества размеченных областей (элементов) РИ

$U^A/i^A$ (кВ/мА)	Номер элемента						
	1	2	3	4	5	6	7
80/1	1	1	1	1	1	1	1
80/2	1	1	1	1	1	1	1
80/3	1	1	1	1	2	1	1
100/1	1	1	1	1	1	1	1
100/2	1	1	1	2	2	1	1
100/3	2	2	1	2	2	1	1
120/1	1	1	1	1	1	1	1
120/2	2	2	1	2	3	1	1
120/3	1	2	2	3	3	2	2
140/1	1	1	1	2	2	1	1
140/2	3	2	2	2	3	1	2
140/3	3	2	2	3	3	2	2
160/1	2	1	1	2	2	1	1
160/2	3	2	2	3	3	2	2
160/3	3	3	2	3	2	2	2
180/1	2	1	1	2	2	1	1
180/2	3	3	2	3	3	2	2
180/3	2	3	2	3	1	2	3
$U^A/i^A$	Номер элемента						
	8	9	10	11	12	13	14
80/1	1	1	1	1	1	1	1
80/2	1	1	1	1	1	2	1
80/3	1	2	1	1	1	2	1
100/1	1	1	1	1	1	2	1
100/2	2	2	2	1	1	3	1
100/3	2	2	2	2	2	3	2
120/1	1	2	1	1	1	2	1
120/2	2	3	2	2	2	3	2
120/3	3	3	3	3	2	2	2
140/1	2	2	2	1	1	2	1
140/2	3	3	3	2	2	2	2
140/3	3	2	3	3	3	1	3
160/1	2	2	2	2	2	3	1
160/2	3	3	3	3	3	1	3
160/3	1	1	3	3	3	1	3
180/1	2	2	2	2	2	3	2
180/2	2	2	3	3	3	1	3
180/3	1	1	2	2	3	1	3

Примечание:

1
2
3

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

### 3.1.5 Формирование рентгеновского мультиизображения электронного модуля

После получения всех сегментов изображения ЭМ с требуемым значением показателя качества производится формирование (восстановление) мультиизображения  $I^Q(x, y)$ , используя соответствующий метод  $M_V$  (2.8).

Формирование мультиизображения  $I^Q(x, y)$  требует проведения операции "сшивки" сегментов. Применение алгоритмов "сшивки" сегментов изображения зависит от наличия априорной информации о геометрии зон перекрытия сегментов, наличии искажений и т.д. Основываясь на анализе литературы [51, 73-77] можно выделить следующие этапы в алгоритмах "сшивки" сегментов изображения:

- предварительная обработка сшиваемых сегментов. На данном этапе производится исправление геометрических искажений (при их наличии), выравнивание освещенности, перевод цветных изображений в оттенки серого;

- координатная привязка сшиваемых сегментов, алгоритмы реализации которой основаны на анализе:

- контуров объектов изображения;

- структуры изображения (по координатам особых точек, по вычислению характеристики схожести: усредненный модуль разности яркостей пикселей или коэффициент корреляции);

- постобработка границ.

Для устранения краевых эффектов, неизбежно возникающих при объединении в одну область любых двух соседних подобластей  $G_{gi}$  и  $G_{ht}$  ( $g, h = \overline{1...j}$ ;  $i, t = \overline{1...O_j}$ ) различных РИ, в исследовании использовано выравнивание гистограмм. Применение модифицированного метода гистограммных преобразований объясняется его относительной простотой и высокой эффективностью и заключается в преобразовании значений пикселей (рис. 3.6) области  $G^Q$  (2.14) таким образом, чтобы гистограмма яркостей пикселей результирующего мультиизображения приблизительно соответствовала



некоторой предопределенной гистограмме [49, 78-80]. В качестве таковой выбрана гистограмма  $hist$ , являющаяся усреднением локальных гистограмм отдельных областей  $G_{ji}^o$  РИ ( $j = \overline{1...N}$ ).

Характеристика передачи  $T$  уровней яркости области  $G^o$  в уровни яркости результирующего рентгеновского мультиизображения выбирается путем минимизации функции

$$F(s) = |c_1(T(s)) - c_0(s)|, \quad (3.21)$$

где:  $c_1$  – сумма значений заданной гистограммы  $hist$  для всех дискретных уровней яркости, меньших, либо равных  $s$ ;  $c_0$  – сумма всех пикселей полутонового изображения  $I^o(x, y)$  с яркостью, меньше, либо равной  $s$ .

При минимизации (3.21) на функцию  $T$  накладываются следующие ограничения:  $T$  должна быть монотонной, и  $c_1(T(s))$  не должно превышать  $c_0(a)$  более чем на половину количества точек с яркостью  $a$ .

Решение задачи (3.21) при данных ограничениях позволяет получить рентгеновское мультиизображение в виде  $I^o = T(a)$  (рис. 3.7).

Сформированное рентгеновское мультиизображение исследуемого ЭМ может быть подвержено анализу с целью выявления дефектов.

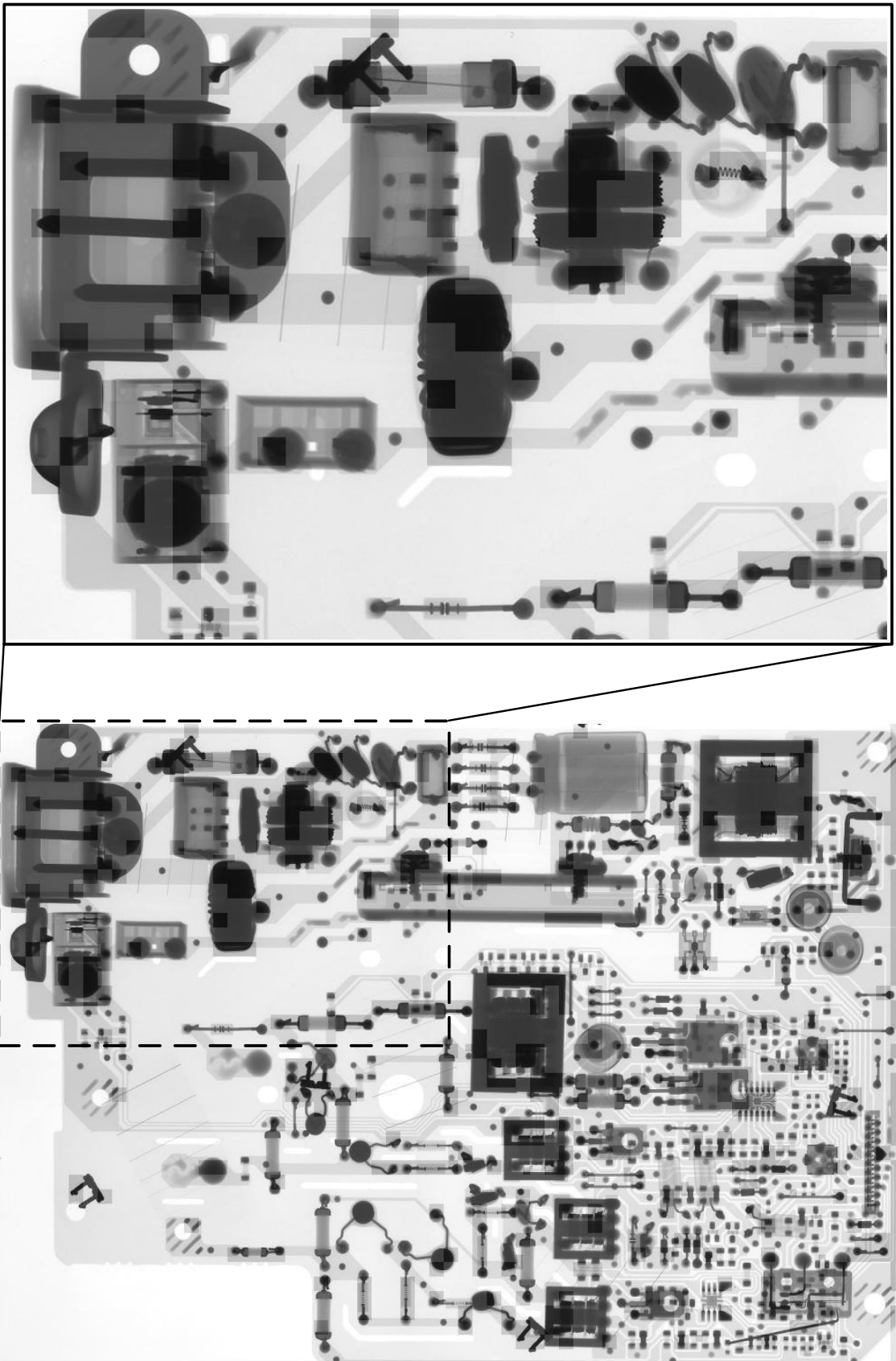


Рисунок 3.6 – Область  $G^0$  (внизу) и ее увеличенный фрагмент (вверху)

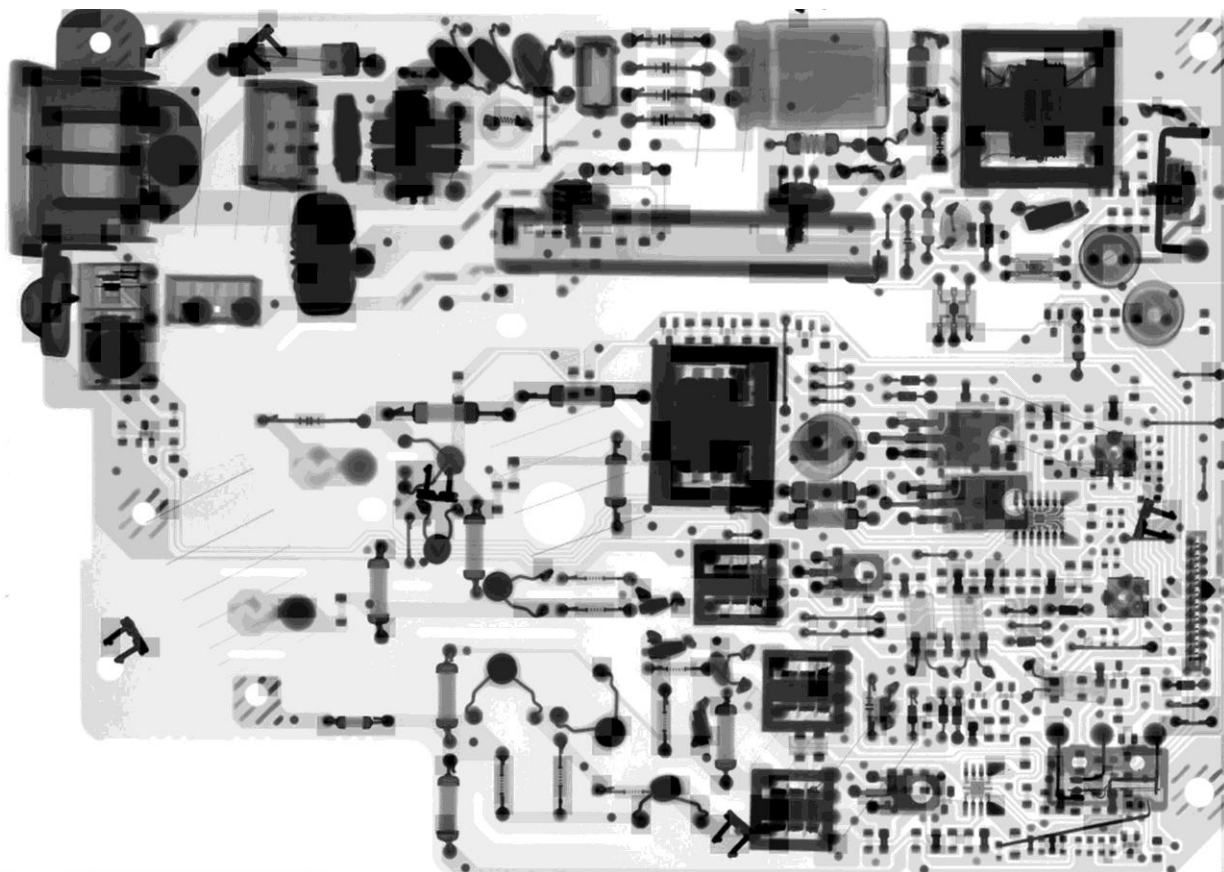


Рисунок 3.7 – Рентгеновское мультиизображение исследуемого ЭМ

## 3.2 Методика мультиэнергетической рентгенографии

### 3.2.1 Метод мультиэнергетической рентгенографии

В медицине известен метод двухэнергетической рентгенографии [81, 82], согласно которого из двух изображений, сделанных при разных анодных напряжениях на рентгеновской трубке, путем субтракции получают изображения мягких и костных тканей. Указанный метод также получил распространение для выявления опасных вложений в ручной клади и багаже [83].

Для исследования возможности повышения точности разделения веществ с близкими эффективными атомными номерами в [84] был предложен метод трехэнергетической рентгенографии, где решение поставленной задачи осуществлялось двумя способами:

1) используя энергоселективные свойства трех линеек детекторов, за одно сканирование формируется три изображения ОК в различных энергетических диапазонах при одном выбранном анодном напряжении источника рентгеновского излучения. Достоинством этого способа можно считать высокую скорость получения изображений, недостатком – существенное перекрытие энергетических диапазонов при получении изображения;

2) используя высокую точность позиционирования механизма перемещения ОК последовательно получают три изображения ОК при трех различных анодных напряжениях и при различных условиях фильтрации с последующим совмещением трех изображений, полученных в трех энергетических диапазонах. В этом случае достигается лучшее энергетическое разделение.

Опираясь на известные методы рентгенографии, нашедшие применение в других областях, была решена задача по разработке методики мультиэнергетической рентгенографии, позволяющей расширить возможности цифровой рентгенографии на электронного модуля, повысить оперативность рентгеновского неразрушающего контроля. Ее сущность сводится к решению задачи выбора команд  $C_k(U^A, i^A) = M_{VC}(G_{ji}^{\bar{O}})$  источнику рентгеновского излучения.

### 3.2.2 Основные этапы методики мультиэнергетической рентгенографии

Для получения  $N$  РИ одного ЭМ необходимо устанавливать параметры источника  $C_j(U^A, i^A)$  так, чтобы на его выходе для каждого  $k$ -го изображения формировалось рентгеновское излучение с интенсивностью  $J_j^И(\lambda)$  (2.2) такое, что:

$$J_j^И(\lambda) \rightarrow J_{k,n}^{OK} \rightarrow D_D \rightarrow D_I \rightarrow I_j(x, y) \rightarrow G_{ji} \rightarrow G_{ji}^O, \quad (3.22)$$

т.е. обеспечивалось формирование областей (сегментов) изображения  $G_{ji}^Q$ , для которых выполняются условия п. 2.3.

Данная задача в рамках разработанного метода мультэнергетической рентгенографии, новизна которого защищена патентом на изобретение [85], решается путем реализации следующих шагов [86].

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  $\{C_j(U^A, i^A)\}, j = \overline{1...N}$  ИРИ на основе анализа зависимости значений  $Q_{кол}$  от режима работы ИРИ.
4. Формирование первого (опорного) РИ ЭМ.
5. Выбор набора команд  $\{C_j(U^A, i^A)\}, j = \overline{1...N}$  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 мультэнергетической рентгенографии.

Шаги 1-3 являются предварительными и реализуются только на этапе автоматизации ЦС НРК ЭМ, для которой не установлена зависимость вида (2.1).

### 3.2.3 Средства реализации методики мультэнергетической рентгенографии

В существующих ЦС НРК интенсивность  $J^H(\lambda)$  излучения задается регулировкой высоковольтного анодного напряжения  $U^A$  и анодного тока  $i^A$  в блоке управления высоковольтным модулем по командам, поступающим с пульта управления или от управляющей ЭВМ. Основным недостатком существующего управления ЦС НРК является его невысокая точность, так как длина волны и интенсивность потока излучения  $J^H(\lambda)$  рентгеновской трубки нелинейно зависят

от ее анодного напряжения и тока, причем на эти зависимости, в свою очередь, влияет температура нагрева рентгеновской лампы.

Для устранения данного недостатка и реализации первого этапа методики мультэнергетической рентгенографии предложено ввести в контур регулирования источника рентгеновского излучения звено обратной связи на основе датчика (детектора) рентгеновского излучения (рис. 3.8), новизна которого защищена патентом на изобретение [87]. В качестве приемника излучения в этом датчике применен фотодиод, снабженный металлическим экраном, установленным для защиты схемы от излучения большой мощности, и триггер Шмитта с нелинейной цепью обратной связи, содержащей сопротивление  $R_{OC}$  и полевой транзистор в диодном включении. При сравнительной простоте построения такой фотодатчик обеспечивает линейное преобразование потока излучения  $\Phi_j$  в частоту  $f_x$  выходных импульсов за счет цепи отрицательной обратной импульсной связи.

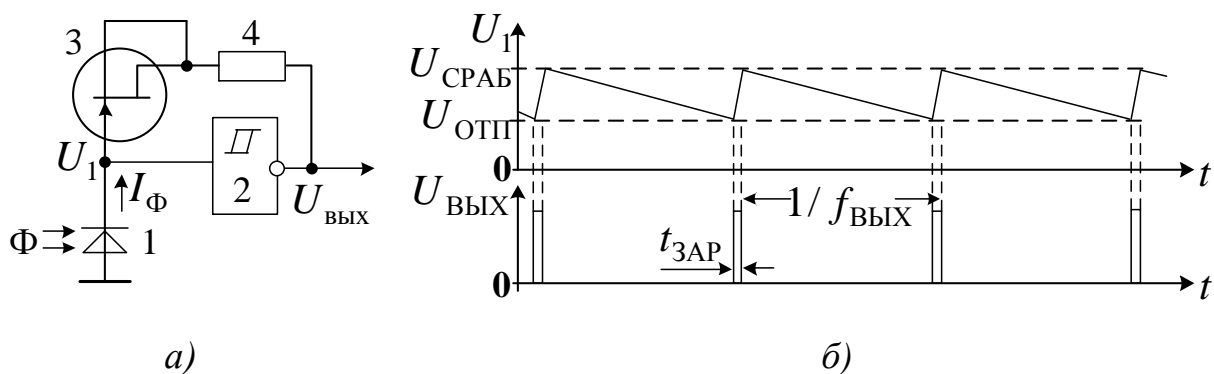


Рисунок 3.8 – Микро мощный датчик рентгеновского излучения:  
 а – принципиальная электрическая схема; б – временные диаграммы работы

Принцип действия детектора рентгеновского излучения основан на медленном заряде собственной емкости  $C_d$  фотодиода в зоне гистерезиса  $\Delta U_{\Gamma}$  триггера Шмитта фототоком  $I_{\Phi} = \Phi_j S_{\lambda}$ , прямо пропорциональным измеряемому потоку излучения  $\Phi_j$  и световой чувствительности  $S_{\lambda}$  фотодиода, с последующим быстрым разрядом емкости фотодиода до исходного уровня током обратной

связи. Если пренебречь длительностью времени разряда  $t_{\text{РАЗ}}$  емкости  $C_{\text{Д}}$  фотодиода по сравнению с временем ее заряда  $t_{\text{ЗАР}}$ , то при выполнении неравенства  $t_{\text{ЗАР}} \gg t_{\text{РАЗ}}$ , частота выходных импульсов определяется соотношением:

$$f_x \approx \frac{I_{\Phi}}{\Delta U_{\Gamma} C_{\text{Д}}} \approx \frac{\Phi_J S_{\lambda}}{\Delta U_{\Gamma} C_{\text{Д}}} = \Phi_J K_{\Phi}, \quad (3.23)$$

где  $K_{\Phi} = S_{\lambda} / \Delta U_{\Gamma} C_{\text{Д}}$  – коэффициент преобразования фотодетектора.

Для преобразования частоты  $f_x$  выходных импульсов детектора излучения в цифровой код  $N_x$  разработана следующая схема преобразователя (рис. 3.9). В этом преобразователе реализован принцип цифрового измерения частоты, согласно которому число выходных импульсов детектора излучения суммируется в счетчике на постоянном интервале измерения  $T_{\text{ИЗМ}} = \text{const}$ , в конце которого на выходах счетчика формируется код:

$$N_x = f_x T_{\text{ИЗМ}} = \Phi_J K_{\Phi} T_{\text{ИЗМ}}, \quad (3.24)$$

прямо пропорциональный измеряемому потоку рентгеновского излучения  $\Phi_J$ .

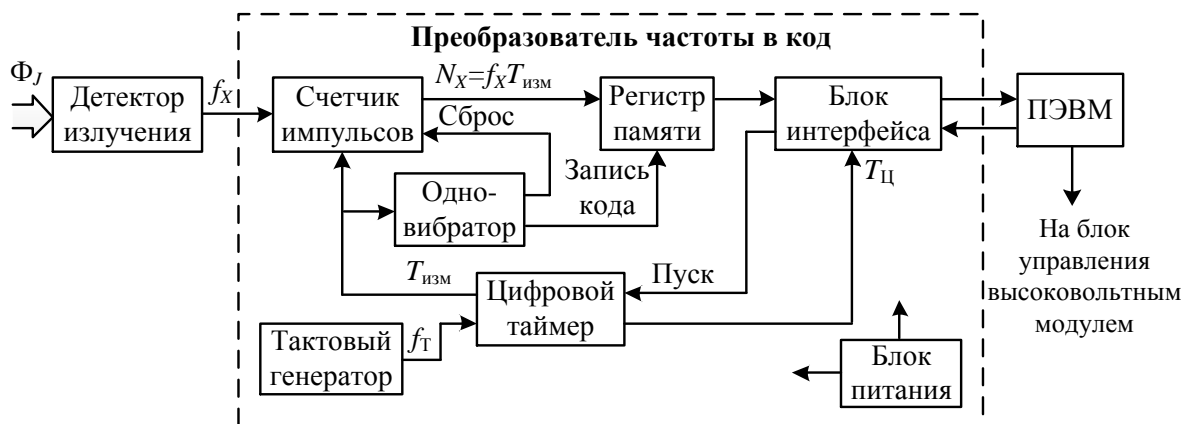


Рисунок 3.9 – Структурная схема преобразователя частоты импульсов в цифровой код

В схеме преобразователя частоты в код (рис. 3.6) применены цифровой таймер с номинальной емкостью счета  $N_{\text{НОМ}}$  и кварцевый генератор импульсов высокой тактовой частоты  $f_T \gg f_X$ , служащие для формирования такта измерения постоянной длительности, составляющей  $T_{\text{ИЗМ}} = N_{\text{НОМ}}/f_T = 0,1 \dots 0,5$  с.

Выбор длительности такта измерения, равной целому числу периодов частоты 50 Гц, позволяет значительно ослабить влияние помех промышленной частоты на результат преобразования фототока. Процесс заполнения интервала  $T_{\text{ИЗМ}}$  импульсами измеряемой частоты  $f_X$  эквивалентен ее интегрированию на данном участке времени, что приводит к значительному (в сотни раз) ослаблению влияния периодических помех на результат измерения [88].

В схеме преобразователя частоты в цифровой код используются регистр памяти, служащий для запоминания выходного кода  $N_X$  в конце такта измерения  $T_{\text{ИЗМ}}$ , и блок интерфейса для связи с управляющей ЭВМ. Блок интерфейса преобразует параллельный цифровой код, снимаемый с выходов регистра памяти, в последовательный код, который передается на ЭВМ по линии связи. Соответствующие команды для регулирования и установки анодного напряжения и тока в высоковольтном источнике анодного напряжения поступают от ЭВМ на блок управления высоковольтным модулем, обеспечивающим гальваническое разделение выходов ЭВМ от высоковольтных электрических цепей.

Измерение потока излучения  $\Phi_j$  начинается при подаче импульса "Пуск" от ПЭВМ, который поступает через блок интерфейса на управляющий вход цифрового таймера. При этом цифровой таймер формирует импульс заданной длительности  $T_{\text{ИЗМ}}$ , поступающий на вход "Разрешение счета" счетчика, в течение которого выходные импульсы датчика излучения частоты  $f_X$  суммируются в счетчике и непрерывно увеличивают значение его выходного кода. По окончании интервала измерения  $T_{\text{ИЗМ}}$ , т. е. по срезу импульса, на выходе цифрового таймера срабатывает одновибратор и формирует короткий импульс, который поступает на С-вход записи регистра памяти и на R-вход сброса счетчика. По фронту этого импульса выходной код  $N_X$  счетчика записывается в регистр памяти, после чего



высоким уровнем этого импульса выполняется сброс счетчика, при котором все его выходы устанавливаются в нулевое состояние. После окончания такта измерения  $T_{\text{изм}}$  подается сигнал от цифрового таймера на ЭВМ через блок интерфейса, который является сигналом разрешения на считывание полученного значения выходного кода и его запись в память ЭВМ.

Для повышения точности управления интенсивностью потока рентгеновского излучения в устройстве выполняется автоматическая аддитивная коррекция погрешности от влияния темнового тока  $I_{\text{фт}}$  фотодиода. Особенность работы ЦС НРК заключается в том, что рентгеновский источник из-за большой рассеиваемой мощности работает в периодическом режиме. При этом формирование высокого напряжения на аноде рентгеновской лампы выполняется на коротком интервале времени, не превышающем 8 с, в течение которого формируется рентгенограмма ОК, после чего напряжение на рентгеновской лампе отключается. Циклы измерения и остановки лампы задаются командами ЭВМ, что позволяет измерять темновой ток  $I_{\text{фт}}$  фотодиода в детекторе излучения и формировать начальный код  $N_{\text{нач}} = I_{\text{фт}} T_{\text{изм}} / \Delta U_{\Gamma} C_{\text{д}}$ , который автоматически вычитается из последующих результатов измерения потока рентгеновского излучения при работе ЦС НРК в активном режиме. Такая цифровая коррекция результатов преобразования позволяет практически исключить влияние темнового тока фотодиода на точность детектора излучения в широком температурном диапазоне.

Введение предложенного звена обратной связи в состав ЦС НРК позволяет установить зависимость интенсивности от параметров источника рентгеновского излучения рентгеновской трубки при значительно высокой точности ее установки.

При реализации опытного образца устройства использовались цифровые КМОП микросхемы серии К561: в детекторе излучения в генераторе тактовых импульсов и в одновибраторе применены микросхемы триггера Шмитта типа К561ТЛ1, в счетчике импульсов и таймере использовались микросхемы типа

К561ИЕ11, К561ИЕ8, а регистр памяти собран на микросхемах К561ИР9, и т. п. При изготовлении промышленной партии преобразователь частоты в код можно реализовать на простом микроконтроллере, а в канале связи с ЭВМ использовать стандартную микросхему приемопередатчика типа *USB*.

С использованием опытного образца устройства (рисунок 3.8) был проведен натурный эксперимент по установлению искомой зависимости интенсивности  $J^И(\lambda)$  рентгеновского излучения от анодного напряжения  $U^A$  и анодного тока  $i^A$  (табл.3.8) для автономной просвечивающей полнокадровой рентгеновской установки "Калан-4У" и сканирующей системы НРК "Вид-ЭП" на базе сканера DuerrNDT CR-43 с управляющей ЭВМ In Win (процессор: Intel Core i5-2300 CPU 2,8 ГГц; ОЗУ: 8 Гб).

Для обеспечения большей точности установки заданной интенсивности рентгеновского излучения при реализации метода мультиэнергетической рентгенографии использована кубическая интерполяция полученных значений (рис. 3.10) [86].

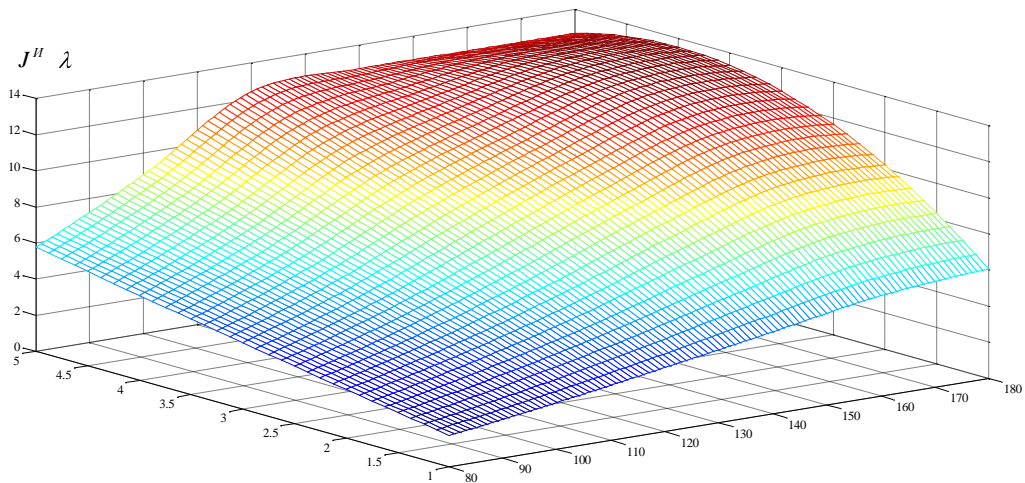


Рисунок 3.10 – Зависимость интенсивности рентгеновского излучения от параметров рентгеновского источника

Аналогичным образом может быть установлена искомая зависимость (2.1) для любого источника рентгеновского излучения. Она позволяет сформировать

набор команд  $\{C_j(U^A, i^A)\}, j = \overline{1...N}$  обеспечивающих получение области  $G^Q$  (2.14).

### 3.2.4 Анализ результатов экспериментов

Формирование набора команд  $\{C_j(U^A, i^A)\}, j = \overline{1...N}$  необходимого для реализации второго этапа методики мультиэнергетической рентгенографии, может быть основано на анализе зависимости количественного показателя качества  $Q_{\text{кол},ji}$  вне объекта контроля (табл. 3.8), упорядоченного в порядке возрастания, от режима работы (рис. 3.11).

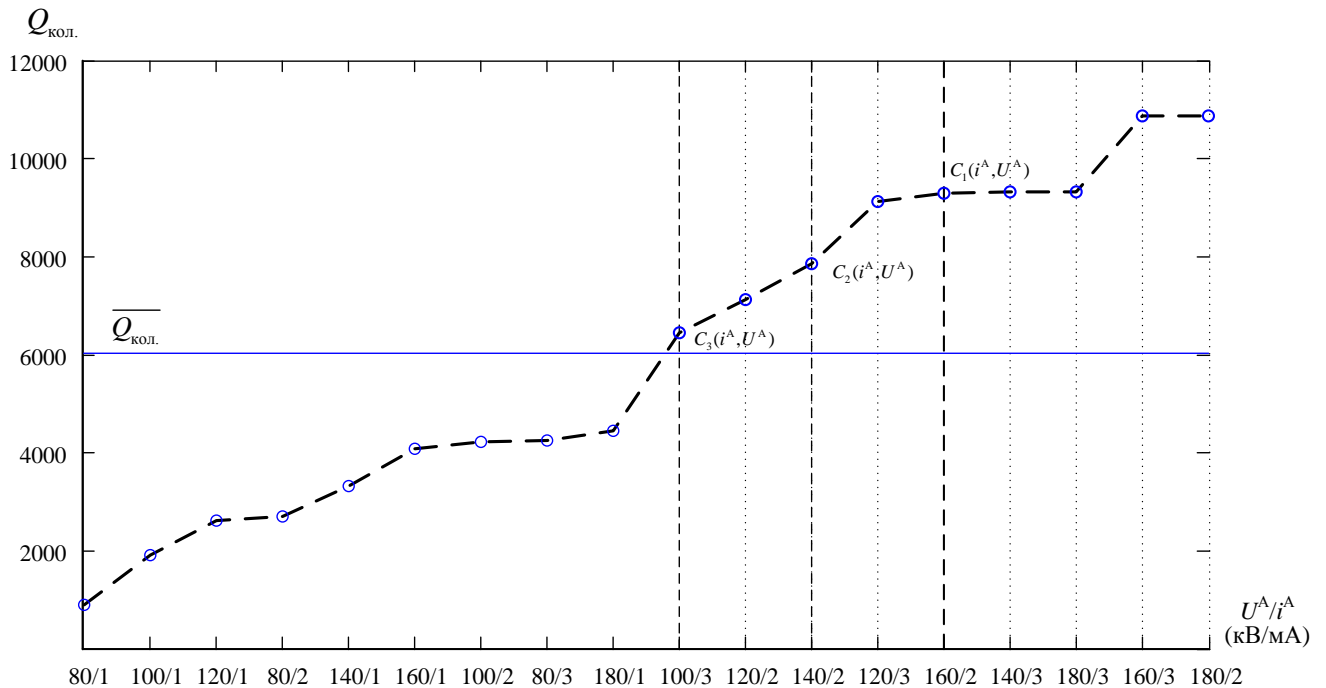


Рисунок 3.11 – Зависимость интенсивности рентгеновского излучения от режима работы рентгеновского источника

Сопоставление полученной зависимости (рис. 3.11) с результатами экспертной оценки (табл. 3.5) позволило сделать ряд важных выводов.

1. В качестве "рабочих" следует выбирать такие режимы работы рентгеновского излучателя (параметры  $(U^A, i^A)$ ), 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 излучателя.

2. Для формирования опорного РИ следует использовать "средний" режим работы рентгеновского излучателя, попавший в диапазон рабочих. В рассматриваемом случае такой режим формируется командой  $C_1(160,2)$ , т.е. рентгеновский излучатель работает при следующих параметрах:  $U_1^A = 160$  кВ,  $i_1^A = 2$  мА.

3. В предположении, что источник рентгеновского излучения питается переменным (пульсирующим) анодным напряжением  $U^A$  и через него протекает переменный (пульсирующий) анодный ток  $i^A$ , получение РИ следует осуществлять в моменты времени действия анодных напряжения и тока, соответствующих значениям из "рабочего" диапазона режимов функционирования. Так, для рассматриваемого случая (рис. 3.11), моменты формирования команд  $\{C_j(U^A, i^A)\}, j = \overline{1...N}$  представлены на рисунке 3.12.

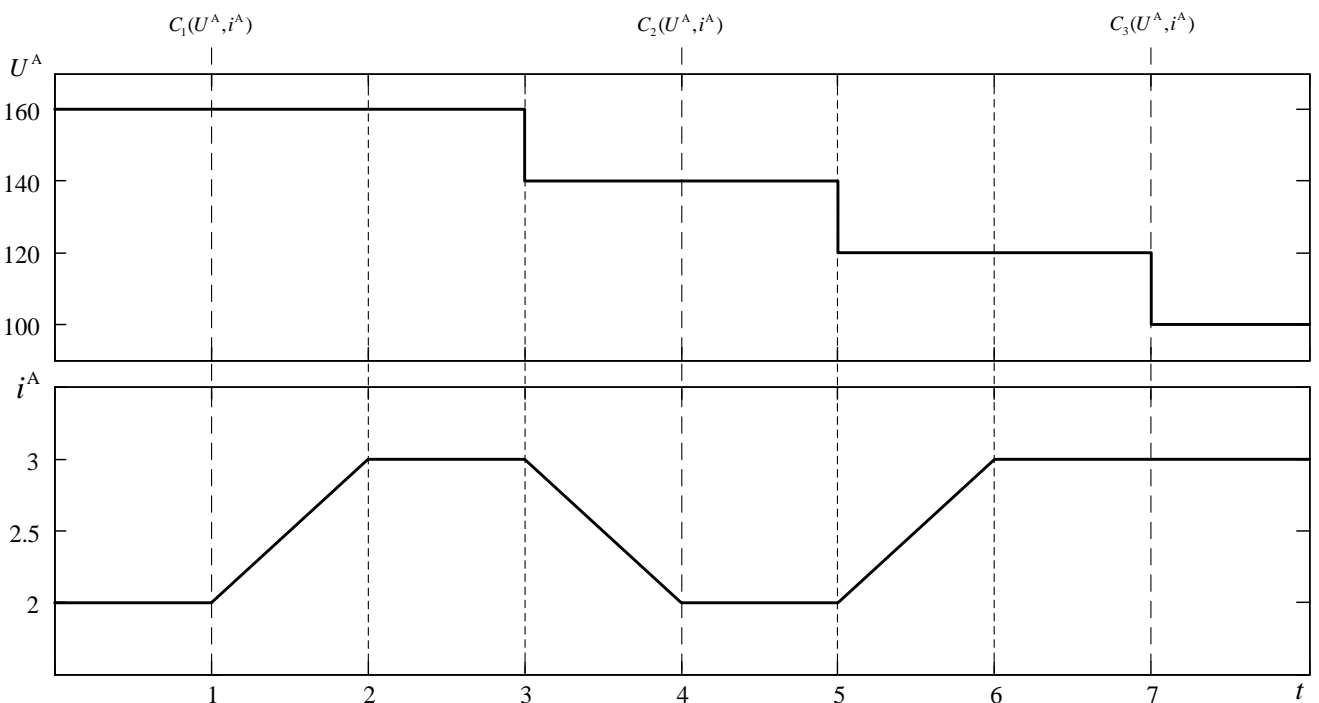


Рисунок 3.12 – Формирование команд источнику рентгеновского излучения

Указанные выводы подтверждаются данными, приведенными в таблице 3.5 и полученными для других ЭМ. В рассматриваемом случае (для ЭМ, представленном на рисунке 3.5) достаточным для получения области  $G^{\varrho}$  (2.14) является формирование трех команд:  $C_1(160;2)$ ,  $C_2(140;2)$ ,  $C_3(100;3)$  (рис. 3.12).

Формирование рентгеновских изображений на основе последовательного выбора команд источнику рентгеновского излучения (третий этап методики) производится с использованием переменного (пульсирующего) анодного напряжения  $U^A$  и переменного (пульсирующего) анодного тока  $i^A$ .

Если источник рентгеновского излучения работает при постоянной силе тока  $i^A$  и постоянном, не меняющемся во времени напряжении  $U^A$ , то кривая распределения плотности интенсивности в спектре излучения в каждый момент времени отвечает кривой  $U_1^A$  (рис. 2.2).

Если же источник рентгеновского излучения будет работать при постоянной силе тока  $i^A$  той же величины, что и в первом случае, но при пульсирующем анодном напряжении, то распределение интенсивности в спектре излучения, отвечающее кривой  $U_1^A$  будет только в один момент времени, когда меняющееся напряжение достигнет своего максимума ( $U_{\max}^A = U_1^A$ ). Во все другие моменты напряжение будет ниже, и, следовательно, кривые распределения интенсивности излучения будут иные (кривые  $U_2^A$  и  $U_3^A$ ), имеющие большую минимальную длину волны и меньшую интенсивность полного излучения. Поэтому в случае пульсирующего напряжения кривая распределения интенсивности в спектре излучения будет меняться во времени. Минимальная длина волны будет такая же, как и в случае постоянного напряжения ( $U^A = U_{\max}^A$ ), но максимум интенсивности будет сдвинут в сторону больших длин волн, и интенсивность всего спектра излучения станет меньше.

Из кривых распределения плотности интенсивности в спектре излучения при различных силах тока  $i^A$  (рисунок 2.3) видно, что с увеличением тока

увеличивается интенсивность каждой длины волны спектра во столько раз, во сколько раз возрос ток. Форма кривой распределения интенсивности остается неизменной, а длина волны, отвечающая максимуму интенсивности, сохраняет свое значение.

При одновременном изменении анодных напряжения  $U^A$  и тока  $i^A$  (рис. 3.12) увеличивается "время жизни" источника рентгеновского излучения и обеспечивается более точная установка интенсивности  $J^И(\lambda)$  рентгеновского излучения с заданной длиной волны, о чем свидетельствуют результаты оценки интенсивности излучения (рис. 3.10).

Описанные в п.п. 3.2.3-3.2.4 процедуры составляют сущность этапов разработанной методики мультиэнергетической рентгенографии, по результатам выполнения которых получен набор РИ ЭМ. Далее на основе разработанного метода формирования рентгеновского мультиизображения ЭМ формируется область  $G^0$  (2.14), удовлетворяющая условиям п. 2.3 (рис. 3.6).

### 3.3 Выводы по третьей главе

1. Разработан метод формирования рентгеновского мультиизображения электронного модуля, основанный на разделении и слиянии областей набора его рентгеновских изображений и отличающийся использованием одного квадродерева для различных изображений из указанного набора и логического предиката на основе показателя качества области рентгеновского изображения электронного модуля, вычисляемого как отношение средней яркости области к сосредоточенности заданной доли энергии по ее подобластям пространственных частот.

2. Для выбранного показателя произведены вычислительные эксперименты, позволяющие определить его характеристики, требуемые для проведения оценки качества области рентгеновского изображения, а также влияющие на вычислительную сложность.

3. Проанализирована и определена взаимосвязь (корреляция) субъективных (экспертных) оценок качества областей рентгеновского изображения и отношения средней яркости анализируемой области изображения к сосредоточенности долей энергии для данной области. Коэффициент корреляции экспертных и количественных оценок качества области рентгеновского изображения составил  $CORR = 0,8932$ .

4. Разработана методика мультэнергетической рентгенографии, позволяющая получить набор рентгеновских изображений электронного модуля в моменты действия переменного анодного тока и напряжения, определяемые командами источнику рентгеновского излучения, и отличающаяся процедурами получения зависимости интенсивности рентгеновского излучения от параметров его источника и формирования команд данному источнику при обеспечении минимального числа рентгеновских изображений.

## 4 ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО РЕНТГЕНОВСКОГО КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ

Структурно-функциональная модель, метод и методика, представленные в главах 2 и 3, реализованы в комплексе программно-аппаратных средств [87, 89-91], программные модули которого разработаны на основе принципов объектно-ориентированного программирования на языке C++ с использованием методов открытых библиотек цифровой обработки изображений OpenCV в операционной системе семейства Microsoft Windows.

### 4.1 Программно-технический комплекс неразрушающего рентгеновского контроля электронных модулей

В данном разделе представлен программно-технический комплекс НРК ЭМ (рис. 4.1), в состав которого введены подсистемы мониторинга интенсивности излучения (МИИ), мультэнергетической рентгенографии (МЭРГ) и анализа рентгеновских мультиизображений (АРМИ), а также модуль формирования рентгеновского мультиизображения.

Подсистема МИИ позволяет выполнить считывание цифрового кода с преобразователя частоты в код при поступлении на апертуру входа микромощного 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 предназначена для формирования РИ контролируемого ЭМ и позволяет осуществить управление ИРИ и сформировать рентгеновское мультиизображение ЭМ. В диалоговом окне устройства вывода отображается текущее состояние ИРИ, его параметры, задание на проведение НРК.



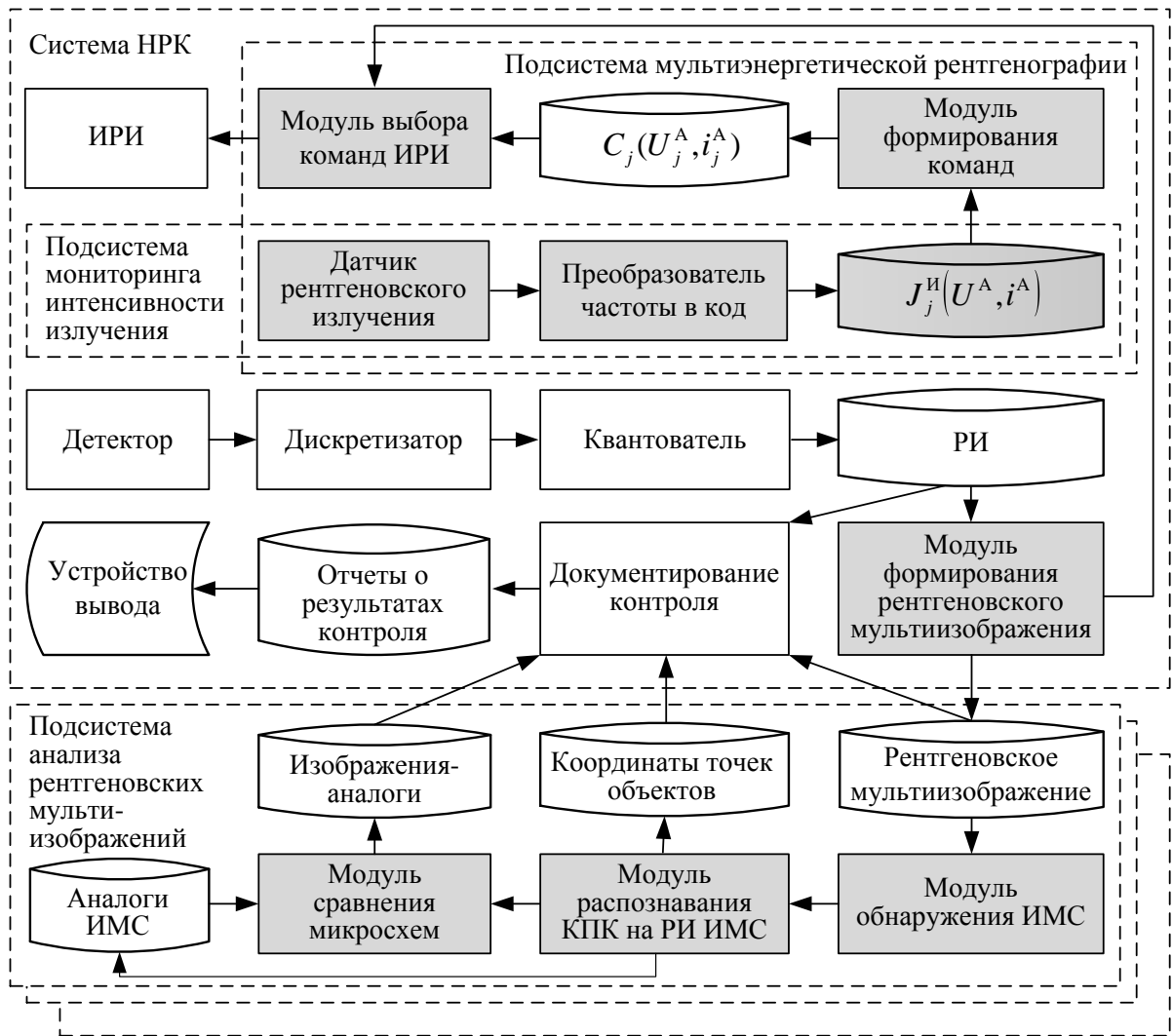


Рисунок 4.1 – Схема взаимодействия элементов программно-технического комплекса НРК ЭМ

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

Процесс обработки РИ начинается с сегментации, по результатам которой данные о сегментах поступают для выполнения различных операций с изображением. В зависимости от выбора программы контроля оператором возникают события, инициирующие запуск процедур: выбора команды ИРИ,

формирования мультиизображения или оценки качества сегментов РИ. Выбор команды ИРИ производится на основе:

- профиля формирования мультиизображения известного ЭМ;
- 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 произвести 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.

Обобщенные данные о функциях, выполняемых программными модулями комплекса, приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Функции программных модулей комплекса в различных режимах работы системы НРК ЭМ

Модули	Режимы работы	
	Контроль известного ЭМ	Контроль нового (неизвестного) ЭМ
МИРИ	Мониторинг интенсивности рентгеновского излучения	Вычисление зависимостей интенсивности излучения от параметров источника излучения
Модуль формирования рентгеновского мультиизображения:	Загрузка профиля формирования рентгеновского мультиизображения	
- сегментация рентгеновского изображения	Сегментация путем наложения координатной маски	Выделение объектов на изображении
- оценка качества сегментов рентгеновского изображения		Классификация сегментов по критерию качества
- формирование рентгеновского мультиизображения	1. Сшивка сегментов требуемого качества в мультиизображение. 2. Создание профиля формирования мультиизображения.	
- выбор команды источнику рентгеновского излучения	Формирование набора команд на основе профиля формирования рентгеновского мультиизображения	Формирование набора команд на основе результатов оценки качества сегментов изображения
АРМИ	1. Выделение контролируемого объекта.	1. Обнаружение ИМС.
		2. Обнаружение точечных объектов. 3. Поиск аналогов в базе данных. 4. Сравнение ИМС с аналогом.
Документирование контроля	Формирование отчета по результатам контроля	

Для реализации различных режимов работы системы НРК ЭМ разработан алгоритм выбора текущего режима (рис. 4.2).

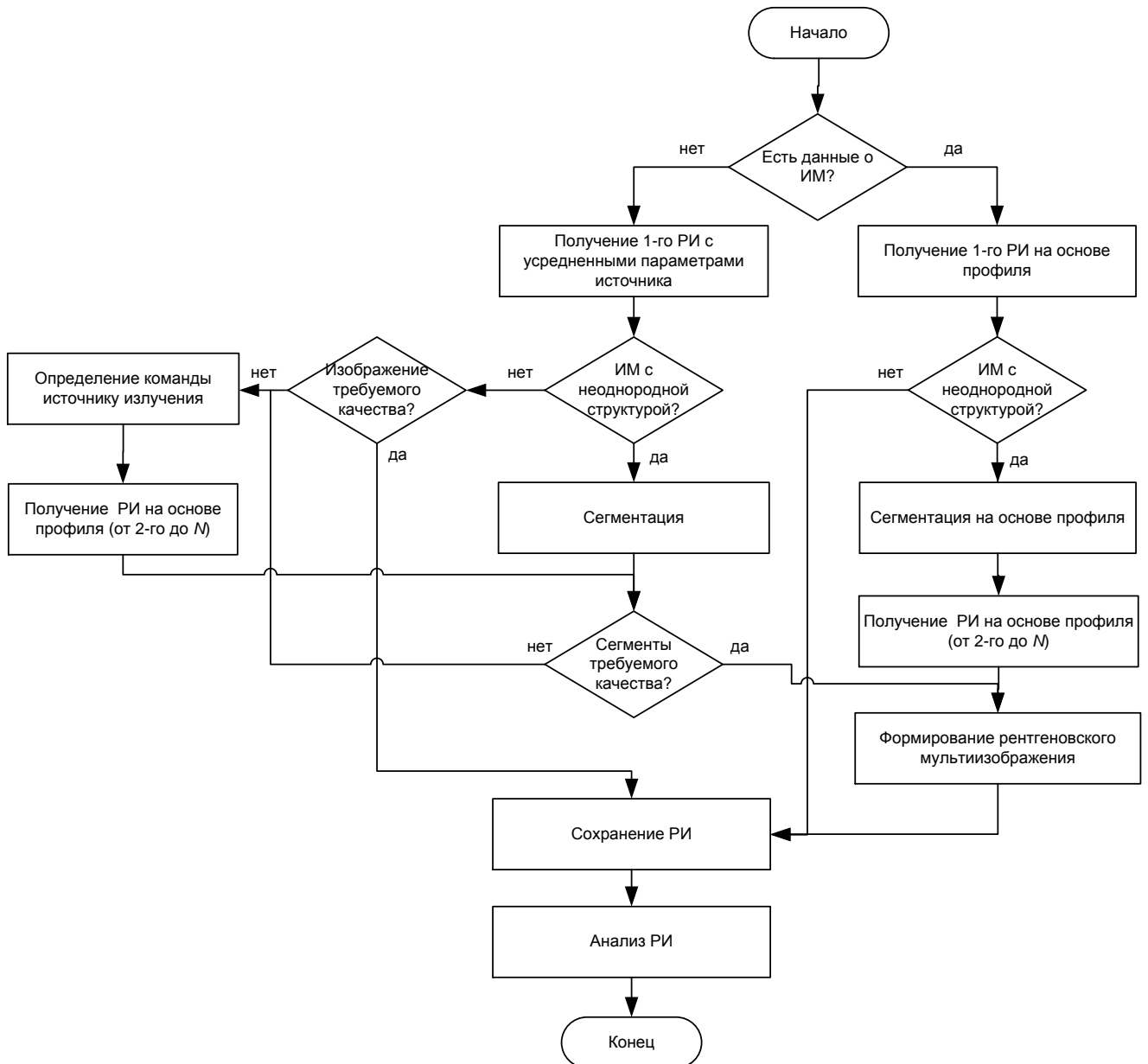


Рисунок 4.2 – Алгоритм выбора текущего режима работы системы НРК ЭМ

#### 4.2 Комплекс алгоритмов автоматизации анализа рентгеновских изображений электронных модулей

Объем процедур (алгоритмов), применяемых для анализа рентгеновских изображений на наличие дефектов ЭМ, напрямую зависит от постановки задачи НРК. В исследовании рассматриваются задачи обнаружения различия однотипных ИМС по геометрии расположения их КПК и определение дефекта

"качество разварки соединительного проводника кристалл-рамка" путем сравнения РИ исследуемой ИМС с эталонной.

#### 4.2.1 Алгоритм автоматизированного распознавания областей расположения интегральных микросхем на рентгеновских изображениях

Процедуре распознавания КПК ИМС предшествует процедура выделения области интереса – области на изображении, в которой расположена ИМС. Для поиска микросхем на изображении воспользуемся закономерностями, выявленными для присутствующих на рентгеновском изображении ИМС:

1. Расположение монтируемых элементов подчинено некоторому закону. Элемент не может располагаться в произвольном месте. Он занимает определенную точку в сетке-массиве возможных точек. Иначе говоря, все элементы на печатной плате расположены друг относительно друга, либо параллельно, либо перпендикулярно, либо под углом, кратным  $45^\circ$ .

2. Микросхема имеет ряд контактов, расположенных равномерно вдоль двух противоположных или всех четырех сторон корпуса ИМС.

3. ИМС имеет осевую симметрию.

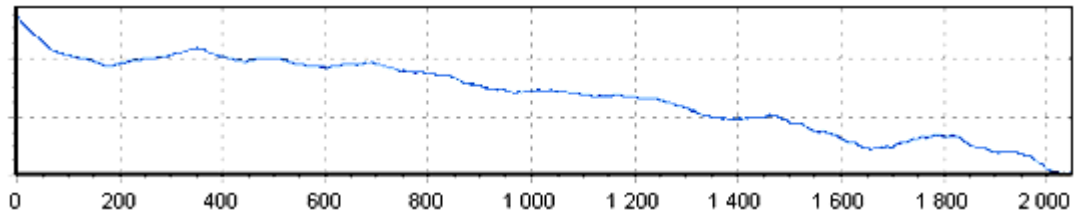
Первая закономерность позволяет ограничить задачу поиска ИМС на изображении, т.е. не следует искать всевозможные варианты поворота ИМС на изображении, достаточно предположить, что ИМС расположена горизонтально, т.е. ее ось симметрии параллельна верхней границе изображения. Остальные случаи (вертикального расположения и расположения под углом  $45^\circ$ ) мы можем охватить за счет поворота исходного изображения на соответствующий угол и последующего анализа изображения, как в случае с горизонтальным изображением.

Вторая закономерность позволяет сформулировать гипотезу о том, что ряд периодически расположенных контактов ИМС на РИ даст периодическое изменение яркости изображения вдоль горизонтальной линии, проведенной через эти контакты. Одним из подходов к поиску таких периодических изменений

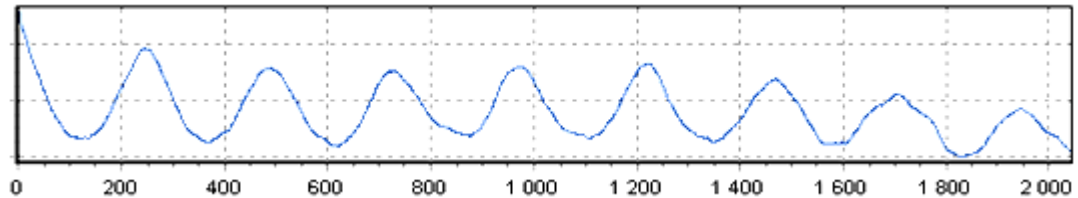
является анализ спектрограммы изображения. Периодическое изменение яркости даст отклик в спектральном представлении функции яркости изображения вдоль этой линии от координаты  $x$ . Таким образом, анализируя спектральное представление функции яркости вдоль горизонтальной линии изображения, полученное, например, с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ) [92], можно сделать вывод о том, присутствуют ли на этой линии периодические изменения яркости. В свою очередь, наличие таких периодических изменений косвенно свидетельствует о наличии ряда контактов микросхемы на этой линии.

Однако проведенные исследования на наборе изображений печатных плат, полученных с помощью системы НРК "ВИД-ЭП", показали, что спектрограмма техногенного изображения получается сильно зашумленной, в результате не удастся сформировать четкий критерий автоматического выявления наличия периодических изменений яркости и значения периода. Причиной этого является тот факт, что анализ спектра в первую очередь ориентирован на поиск гармонических колебаний, однако изменение яркости техногенных изображений носит скачкообразный характер и по своим характеристикам ближе к прямоугольным и импульсным сигналам. Как известно [93], для прямоугольных импульсов энергия сигнала "размыта" по вторичным гармоникам, что затрудняет обнаружение их наличия и периода.

Еще одним подходом к поиску периодических изменений яркости является анализ автокорреляционной функции (АКФ) [94]. Проведенные исследования показали, что АКФ позволяет выявить наличие и периодичность изменений яркости с большей достоверностью, чем анализ спектра. Однако построение АКФ является вычислительно более сложной задачей, чем построение спектрограммы с использованием БПФ [50, 94]. Ниже приведен пример АКФ для яркости изображения вдоль горизонтальной линии, не принадлежащей области расположения контактов микросхемы (рис. 4.3, а), и принадлежащей области расположения контактов микросхемы (рис. 4.3, б).



а)



б)

Рисунок 4.3 – Сравнение АКФ на различных участках изображения:

- а) АКФ вне области расположения контактов ИМС  
 б) АКФ в области расположения контактов ИМС

Таким образом, при нахождении области расположения ИМС целесообразно использовать анализ АКФ яркости изображения вдоль горизонтальной оси.

Исходя из вышесказанного, алгоритм автоматизированного распознавания областей расположения ИМС на РИ можно представить следующим образом.

Вход: матрица яркостей рентгеновского изображения ЭМ.

Выход: выделенная область расположения ИМС на РИ ЭМ.

Процесс:

1. Задать шаг сетки. Чем больше шаг, тем выше скорость работы алгоритма, но меньше точность определения области. Эмпирически было установлено, что для имеющегося набора изображений шаг сетки должен быть от 10 до 45.

2. Задать начальную координату  $y = 0$ .

3. Получить вектор значений яркости изображения  $m(x)$  вдоль горизонтальной линии с координатой  $y$ .

4. Определить наличие и значение периодических колебаний яркости в векторе  $m(x)$ , для чего:

4.1. Рассчитать значения автокорреляционной функции:

$$\text{ACF}(\tau) = \sum_{x=0}^{W-1} m(x) \cdot m(x + \tau), \quad (4.1)$$

где:  $W$  – ширина изображения;  $\tau$  изменяется от 0 до  $W$ .

4.2. Сгладить значения автокорреляционной функции методом арифметического скользящего среднего (однородным усредняющим фильтром) [50] для ослабления случайных импульсов, являющихся следствием шумов на изображении:

$$g\text{ACF}(\tau) = \frac{1}{wS} \sum_{i=0}^{wS} \text{ACF}(\tau + i), \quad (4.2)$$

где  $wS$  – размер окна сглаживания, который выбирается равным пяти. Данное значение было получено на основе проведенных испытаний на наборе тестовых изображений.

4.3. Вычислить дифференциал сглаженной АКФ:

$$d\text{ACF}(\tau) = g\text{ACF}(\tau + 1) - g\text{ACF}(\tau). \quad (4.3)$$

4.4. Найти точки перегиба сглаженной АКФ путем поиска точек  $\tau$ , в которых  $d\text{ACF}(\tau)$  меняет знак на противоположный. При этом при смене знака с положительного на отрицательный занести значение  $\tau$  в вектор пиков  $P$ , а при смене знака с отрицательного на положительный занести значение  $\tau$  в вектор впадин  $V$ .

4.5. Если число пиков меньше 3, то для координаты  $u$  задать отсутствие признака периода, а значение периода задать равным 0. Перейти к пункту 5 алгоритма.

4.6. Создать вектор периодов пиков  $wP$ , в который занести расстояние  $\Delta\tau$  от текущего пика до следующего:

$$wP_i = P_{i+1} - P_i. \quad (4.4)$$



4.7. Создать вектор периодов впадин  $wV$ , в который занести расстояние  $\Delta\tau$  от текущего пика до следующего:

$$wV_i = V_{i+1} - V_i \quad (4.5)$$

4.8. Построить полигон частот распределения  $\Delta\tau$  по вектору периодов пиков  $wP$  и вектору периодов впадин  $wV$ .

4.9. Определить медиану  $\Delta\tau$ .

4.10. Исключить из векторов  $wP$  и  $wV$  значения, отличающиеся более чем на 10% от  $\Delta\tau$ .

4.11. Если размер любого из векторов  $wP$  или  $wV$  меньше 3, то выдать отрицательный результат о наличии колебаний в векторе  $m(x)$ . Перейти к шагу 5 алгоритма.

4.12. Выдать положительный результат о наличии периодических колебаний в векторе  $m(x)$ , в качестве значения периода колебаний вернуть среднее арифметическое значений вектора  $wP$ .

5. Если результат шага 4 положительный, то записать для координаты  $y$  значение периода колебаний, присвоить этому значению удельный вес, равный шагу сетки, деленному на высоту изображения.

6. Увеличить координату  $y$  на шаг сетки.

7. Повторять пункты 3 – 6, пока  $y$  меньше высоты изображения.

8. Для каждого записанного значения периода координаты определить начало и конец области наличия периодических колебаний и запомнить их. Определение области наличия периодических колебаний проводится методом бинарного поиска начала и конца отрезка, дающего относительный максимум пика в спектрограмме вектора  $m(x)$  на частоте, равной периоду.

9. Для каждого записанного значения периода координаты определить кластеры, содержащие периоды, близкие друг к другу.

10. Для каждого кластера определить минимальное значение  $y - T$  и максимальное значение  $y - B$ .

11. Для каждого кластера определить средневзвешенное значение начала  $L$  и конца  $R$  отрезка наличия периодических колебаний.

12. Для каждого кластера построить прямоугольную область наличия микросхемы, используя в качестве левого верхнего угла координаты  $L$  и  $T$ , а в качестве правого нижнего угла - координаты  $R$  и  $B$ .

#### 4.2.2 Алгоритм распознавания контактных площадок кристаллов интегральных микросхем на рентгеновских изображениях

Для определения правильности расположения КПК ИМС необходимо решить задачу их распознавания на рентгеновском изображении (мультиизображении). При этом следует учитывать их следующие характеристики, определяющие условия реализации разработанного алгоритма:

- анализируемые изображения могут включать в себя большое количество элементов печатной платы, на которой расположена анализируемая ИМС, что требует определения рабочей области распознавания;

- изображения кристаллов ИМС могут иметь различную ориентацию в плоскости, различную яркость элементов, наложение изображений других элементов печатных плат, что требует применения различных видов фильтрации;

- КПК ИМС не имеют четкой геометрической формы, при этом, исходя из опыта наблюдений, наиболее близкой формой можно признать окружность, что обуславливает постановку задачи обнаружения на изображении кристалла ИМС фигур близких по контуру к окружности;

- на РИ ИМС могут быть другие элементы печатной платы, совпадающие по яркости и размерам с искомыми элементами, или, наоборот, искомые элементы могут иметь яркость близкую к фону. Поэтому существует вероятность возникновения ошибок распознавания контактных площадок, как в сторону ошибочного распознавания контактной площадки там, где ее нет (ошибка второго рода), так и в сторону пропуска контактной площадки (ошибка первого рода).

Исходя из вышесказанного, алгоритм распознавания КПК ИМС на РИ ЭМ можно представить следующим образом.

Вход: матрица яркостей рентгеновского изображения ЭМ.

Выход: выделенная область расположения ИМС на РИ ЭМ.

Процесс:

1. Определить рабочую область распознавания. Выполняется оператором или с помощью алгоритма автоматизированного распознавания областей расположения ИМС на рентгеновских изображениях (см. п. 4.2.1).

2. Произвести предварительную обработку изображения, для чего:

2.1. Выполнить процедуру бинаризации изображения с использованием адаптивного порогового преобразования с маской размером  $(m \cdot n = 3 \cdot 3)$  [95]. Среднее значение яркости вычисляется для центрального пикселя маски  $W_{ij}$ , содержащей значения яркости исходного изображения в покрытой маской локальной области изображения, по следующему выражению [96]:

$$\bar{w} = \frac{1}{m \cdot n} \cdot \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n W_{ij} . \quad (4.6)$$

2.2. Чтобы размыть вкрапления, т.е. найти области аналогичной яркости и объединить их [97] - выполнить процедуру наращивания. Результат достигается путем вычисления максимального значения яркости пикселя, перекрываемого "ядром"  $B$  (компактное множество малого размера и простой формы) при его "скольжении" над изображением  $A$ , которое описывается функцией  $f$ , и заменой этим максимальным значением значения яркости пикселя, лежащего под опорной точкой [97], т.е.:

$$(f \oplus B)(x) = \max_{y \in B} \{f(x - y)\} . \quad (4.7)$$

2.3. Чтобы объединить области изображения, разделенные шумом - выполнить процедуру эрозии [97]:

$$(fOB)(x) = \min_{y \in B} \{f(x + y)\}. \quad (4.8)$$

2.4. Для устранения специфических дефектов изображения (дефекты сканирования, царапины, пыль и т.д.) выполнить процедуру размытия (сглаживания), используя "размытие по Гауссу" [96]:

$$G(u, v) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-r^2/(2\sigma^2)}, \quad (4.9)$$

где:  $r$  – радиус размытия ( $r^2 = u^2 + v^2$ );  $u$  – ширина фильтра;  $v$  – высота фильтра;  $\sigma$  – стандартное отклонение распределения Гаусса.

2.5. Выполнить процедуру пороговой фильтрации за счет применения бинарного порогового фильтра [95].

3. Произвести сегментацию изображения [50, 98], для чего:

3.1. Произвести разделение изображения на части с помощью применения процедуры обнаружения контуров, основанной на определении перепадов яркости, используя известный отслеживающий алгоритм, который называется "алгоритм обхода контура" или "алгоритм жука" [99].

3.2. Произвести разделение изображения на однородные области с учетом заранее выбранных критериев (поиск окружностей ограниченного размера). Характер ограничений определяется допустимыми размерами областей контактных площадок на РИ.

3.3. Определить площадь  $S$  элемента изображения, описанного исследуемым контуром.

3.4. Определить периметр  $P$  контура элемента изображения.

3.5. Если выполняется условие:  $0,055 \leq S/P^2 \leq 0,092$ , то исследуемый контур близок по форме к окружности (предлагаемый диапазон значений определен экспериментально).

4. Определить координаты центра КПК ИМС путем построения прямоугольника, описывающего обнаруженный контур, и нахождения его центра.

5. Для анализа и коррекции результатов вывести оператору рентгеновское изображение ИМС с нанесенными на него окружностями в местах предполагаемого расположения КПК.

6. После завершения процедуры коррекции сохранить координаты КПК, полученные для исследуемого изображения, в базу данных.

#### 4.2.3 Алгоритм сравнения рентгеновских изображений интегральных микросхем с аналогами из базы данных

При разработке алгоритма сравнения РИ ИМС с аналогами из базы данных учитывались следующие условия:

- сравнение производится по значениям координат, полученным по результатам распознавания КПК ИМС (см. п. 4.2.2);

- координаты КПК ИМС – это координаты точки, расположение которой может определяться как по результатам автоматического распознавания, так и посредством установки точки оператором вручную. Это обуславливает относительную точность определения координат точки в некоторой области;

- изображения ИМС могут быть получены из различных источников, т.е. могут быть повернуты на произвольный угол и иметь различный масштаб;

- алгоритм сравнения должен учитывать возможные ошибки распознавания КПК ИМС, выражающиеся в отсутствии одной или нескольких точек на исследуемом образце изображения ИМС.

Исходя из вышесказанного, алгоритм сравнения РИ ИМС с аналогами из базы данных можно представить следующим образом.

Вход: два набора координат (А, В) КПК (точек).

Выход: коэффициент подобия исследуемой ИМС и ИМС-эталона.

Процесс:

1. Произвести сравнение количества точек в множествах А и В.

Если:  $n_A - n_B = 0$ , т.е. количество точек в сравниваемых множествах равно, то перейти к выполнению п. 2 алгоритма. Если приведенное равенство не выполняется, то перейти к выполнению п. 7.

2. Определить среднюю точку множества. Примеры множеств точек  $A(A_1, \dots, A_5)$ ,  $B(B_1, \dots, B_5)$  и их средних точек ( $срA$  и  $срB$ ) приведены на рисунке 4.4. Номера точек выбраны произвольно.

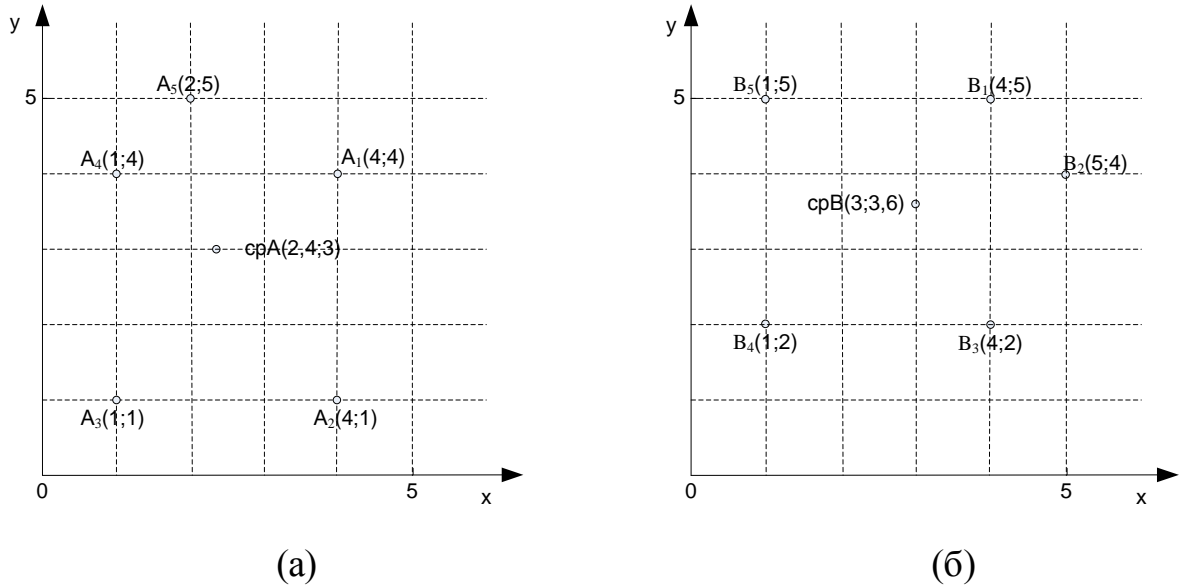


Рисунок 4.4 – Множество координат КПК ИМС и его средняя точка:

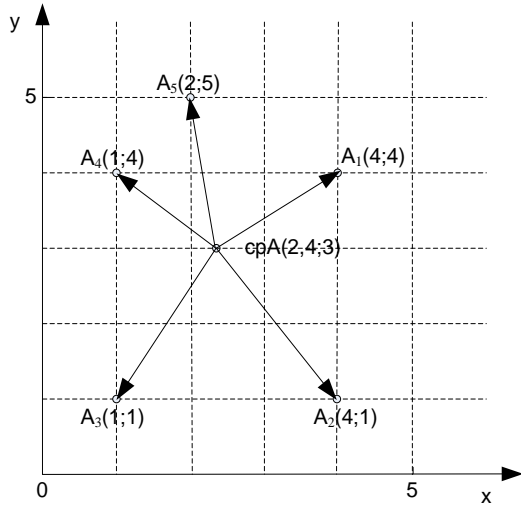
а) исследуемая ИМС (множество А)

б) ИМС-эталон (множество В)

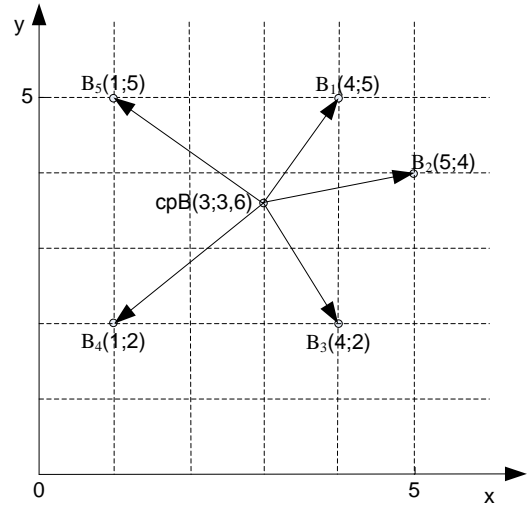
3. Построить векторы от средней точки на КПК. Длины полученных векторов – это один из параметров, по которому будет производиться сравнение двух множеств. Результат построения векторов представлен на рисунке 4.5.

4. Произвести нормализацию векторов от средней точки на КПК<sup>3</sup>, для чего выбирается вектор с максимальной длиной (для множества А – это вектор, соединяющий точки  $срA$  и  $A_2$  (рис. 4.5)), и его длина принимается за 1. Для остальных векторов их длины делятся на длину вектора  $(срA; A_2)$ . В результате длины всех векторов принимают значения от 0 до 1, инвариантные к масштабу изображения.

<sup>3</sup> Нормализация вектора – это преобразование заданного вектора в вектор в том же направлении (то есть в коллинеарный, параллельный вектор), но с единичной длиной.



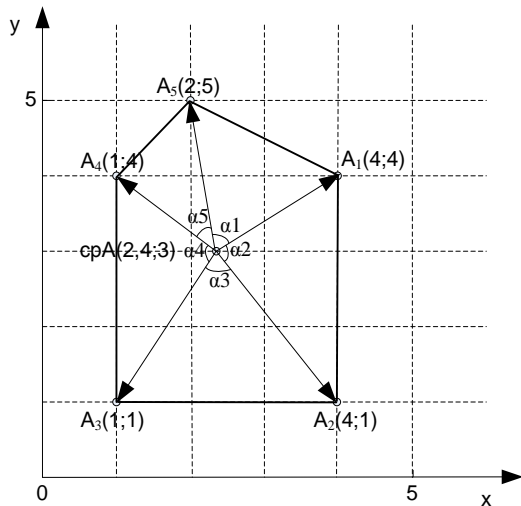
(а)



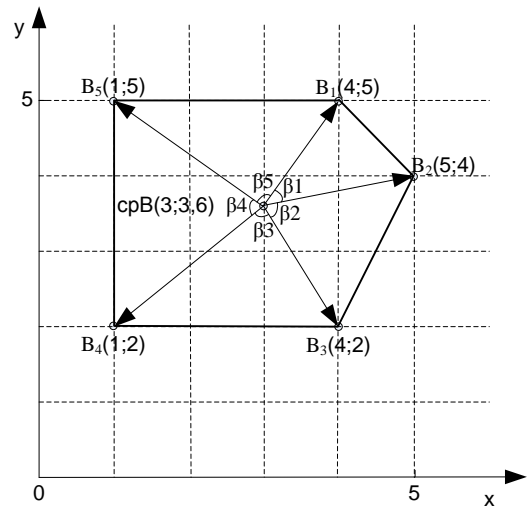
(б)

Рисунок 4.5 – Результат построения векторов от средней точки на КПК:  
 а) исследуемая ИМС (множество А)  
 б) ИМС-эталон (множество В)

5. Определить углы между векторами (рис. 4.6). Углы между векторами – это второй из параметров, по которому будет производиться сравнение двух множеств. Для их определения необходимо найти углы соответствующих треугольников, сторонами которых являются векторы. Углам присваиваются



(а)



(б)

Рисунок 4.6 – Углы между векторами:  
 а) исследуемая ИМС (множество А)  
 б) ИМС-эталон (множество В)

соответствующие обозначения.

6. Определить значение коэффициента подобия ИМС:

$$K_n = \prod_{i=1}^{NN} K_i, \quad (4.11)$$

где:  $NN$  – количество точек (КПК);  $K_i$  – коэффициенты подобия векторов множества А векторам множества В:

$$K_i = \frac{\alpha_N \cdot \beta_N}{(\max(\alpha_N, \beta_N))^2} \cdot \frac{lA_N \cdot lB_N}{(\max(lA_N, lB_N))^2}, \quad (4.12)$$

где:  $lA_N$ ,  $lB_N$  – длины векторов сравниваемых множеств;  $\alpha_N$ ,  $\beta_N$  – углы соответствующих смежных векторов.

6.1. Провести сравнение множеств, начиная с "первых" векторов, т.е. коэффициент подобия  $K_1$  векторов  $A_1$  и  $B_1$  вычисляется по выражению (4.12), а по результатам последовательного сравнения параметров всех векторов сравниваемых множеств по формуле (4.11) вычисляется коэффициент подобия исследуемой ИМС и ИМС-эталона.

6.2. Произвести смещение на единицу номера вектора в множестве В и вычисление соответствующих коэффициентов подобия (4.12) векторов  $A_N$  и  $B_{N+1}$ . По формуле (4.11) вычислить коэффициент подобия исследуемой ИМС (А) и ИМС-эталона (В).

После вычисления всех вариантов сравнения векторов множеств А и В (их количество обозначается  $j$ ) получен набор коэффициентов подобия ИМС (А) и ИМС (В)  $K_{nj}$ .

6.3. Определить максимальный коэффициент подобия ИМС из множества  $K_{nj}$  ( $K_{n \max}$ ), который принять за искомый коэффициент подобия ИМС (А) и ИМС (В).



7. Определить значение коэффициента подобия для множеств с неравным количеством точек, для чего:

7.1. Последовательно произвести исключение по одной точке из множества, в котором точек больше. Получается несколько множеств с различным набором точек. Например, из множества В (рис. 4.4 б) получится пять множеств:  $V_1, \dots, V_5$ , в каждом из которых будет исключена одна точка (для  $V_1$  – это точка  $V_1$ ).

7.2. Для каждого полученного множества произвести выполнение действий согласно п.п. 2-6 данного алгоритма. В результате будет получен набор коэффициентов подобия ИМС для разных сочетаний точек  $K_{n \max BN}$ .

7.3. Определить максимальный коэффициент подобия ИМС из множества  $K_{n \max BN}$ , который принять за искомый коэффициент подобия ИМС (А) и ИМС (В).

8. Вывести значение максимального коэффициента подобия  $K_{\max}$ .

#### 4.2.4 Алгоритм поиска аналогов интегральных микросхем в базе данных

Алгоритм поиска аналогов интегральных микросхем в базе данных можно представить следующим образом.

Вход: наборы координат КПК ИМС в базе данных.

Выход: список аналогов анализируемой ИМС с коэффициентом подобия выше требуемого.

Процесс:

1. Произвести выборку из таблицы *ContactPlate* базы данных координат КПК эталонной ИМС. Координаты записываются в промежуточный текстовый файл с именем "1". Формат файла имеет вид  $\langle \text{координата } x \rangle \langle \text{координата } y \rangle$ .

2. Произвести выборку из таблицы *IMS\_Analiz* базы данных тех ИМС, которые удовлетворяют критерию:

$$|CountContacts - CountContacts^*| \leq d, \quad (4.13)$$

где:  $CountContacts$  – количество КПК ИМС;  $CountContacts^*$  – количество КПК эталонной ИМС;  $d$  – допустимый разброс:  $0 \leq d \leq 3$ .

3. Координаты КПК очередной ИМС, выбранной на шаге 2, сохранить в промежуточный текстовый файл с именем "2", имеющий тот же формат, что и "1".

4. Вызвать внешний модуль сравнения координат, реализующий алгоритм, представленный в п. 4.2.3. При этом в качестве параметров командной строки ему передаются имена файлов "1" и "2".

5. Коэффициент подобия двух сравниваемых ИМС записать в стандартный выходной поток.

6. Записать результат сравнения в таблицу  $IMS\_Compare\_Result$  базы данных.

7. Шаги 3–6 повторить для всех ИМС, выбранных на шаге 2.

8. Вывести информацию о коэффициентах подобия тех ИМС, для которых выполнено неравенство  $K_{п} \geq K_{тр}$ , где:  $K_{п}$  – коэффициент подобия анализируемой ИМС и ИМС, изображение которой хранится в базе данных;  $K_{тр}$  – требуемый коэффициент подобия, значение которого задает пользователь.

Алгоритмы, представленные в п. 4.2, реализованы в виде программ для ЭВМ, защищены свидетельствами о государственной регистрации и входят в состав разработанного программно-аппаратного комплекса (рис. 4.1).

#### 4.3 Экспериментальное исследование разработанного программно-технического комплекса

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 DuerrNDT CR-43 с управляющей ЭВМ In Win (процессор: Intel Core i5-2300 CPU 2,8 ГГц; ОЗУ: 8 Гб)) до и после внедрения разработанного математического и программно-технического обеспечения.

Для определения степени достижения цели исследования оценивалась точность распознавания следующих дефектов ЭМ: качество разварки соединительного проводника кристалл-рамка (автоматизированный анализ), состояние печатных проводников и смещение выводов (в "ручном" режиме).

#### 4.3.1 Оценка точности обнаружения контактных площадок кристаллов интегральных микросхем

В ходе статистических испытаний оценивалась точность обнаружения КПК на пятидесяти тестовых РИ ИМС, удовлетворяющих требованиям по чувствительности контроля. Чувствительность контроля определялась с помощью проволочных эталонов чувствительности согласно ГОСТ 7512-82 [100].

В качестве критерия точности обнаружения КПК использовалось значение средней абсолютной ошибки (1.2) [39].

По результатам испытаний на тестовой выборке РИ ИМС значение средней абсолютной ошибки составило  $MAPE = 4,8\%$ , что соответствует высокой точности обнаружения КПК ИМС.

#### 4.3.2 Оценка работы системы неразрушающего рентгеновского контроля

Оценка влияния предложенного математического и программно-технического обеспечения на оперативность проведения НРК (табл. 4.2) проводилась на выборке из 150 ЭМ различных типов. При этом в исследуемой выборке присутствовали ЭМ с различным количеством уровней неоднородностей, распределенных следующим образом: один уровень (ИМС) – 50 шт.; три уровня (печатные платы импульсного блока питания ЭВМ) – 50 шт.; четыре уровня (системные платы ЭВМ) – 50 шт.

Результаты экспериментов показали, что 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 (1.4) – приблизительно в 3 раза (табл. 4.2), за счет автоматизации процедур оценки качества изображений, формирования команд ИРИ, формирования и анализа рентгеновского мультиизображения контролируемого ЭМ.

Таблица 4.2 – Результаты эксперимента по оценке временных параметров НРК ЭМ

№ п/п	Показатель	Значения показателя без использования средств автоматизации, мин.			Значения показателя с использованием предложенных средств автоматизации, мин.		
		Min	Max	Mean	Min	Max	Mean
1	Совокупное время выполнения процедур подготовительных этапов, $t_{\Pi}$	5	5	5	5	5	5
2	Время запоминания информации в виде скрытого изображения, $t_{\text{C}}$	0,7	1,5	1	0,7	1,5	1
3	Время преобразования скрытого изображения в цифровое, $t_{\text{ПР}}$	8	8	8	8	8	8
4	Время анализа цифрового изображения на соответствие требованиям по избранному критерию качества, $t_{\text{AK}}$	0,5	25	17	0,5	7	1
5	Время анализа для принятия решения о наличии дефектов, $t_{\text{AD}}$	1	50	32	0,5	1,5	1
6	Общее время контроля, $T_{\text{K}}$	33,9	173,5	125,5	33,4	63,5	39

При этом естественным образом увеличивается потребность в вычислительном ресурсе, но результаты экспериментов показывают, что применение современной офисной ПЭВМ позволяет решать поставленные вычислительные задачи за короткое время, которое на порядок меньше, чем время, затрачиваемое на проведение тех же процедур с помощью оператора НРК.

Значительному снижению вычислительных затрат способствует предварительный расчет и хранение в памяти значений субполосных матриц  $A_{r_1}$  и  $A_{r_2}$ , значения элементов которых определяются выражениями (2.18) и (2.19) соответственно, для всех возможных размеров областей  $G_{ji}$ ,  $j = \overline{1...N}$ ,  $i = \overline{1...O_j}$ . При использовании разработанного итерационного метода сегментации РИ субполосные матрицы имеют размерность, кратную степени числа 2, а, следовательно, их общее число фиксировано (максимальным приведенным размером РИ). Очевидно, что в данном случае незначительно возрастают требования к объему памяти, необходимой для хранения указанных результатов расчета.

В процессе работы программного комплекса заполняется база данных с профилями формирования мультиизображений проверяемых ЭМ, что позволит при проведении контроля аналогичных образцов в большей степени сократить время на проведение отдельных операций, а также исключить воздействие "человеческого фактора" на достижение целевого эффекта системы НРК.

#### 4.4 Выводы по четвертой главе

1. Разработанные математическое и программно-техническое обеспечение реализованы в виде единого комплекса НРК ЭМ. Комплекс включает в себя подсистему мониторинга интенсивности рентгеновского излучения; систему неразрушающего рентгеновского контроля, содержащую подсистему мультиэнергетической рентгенографии; подсистему анализа рентгеновских мультиизображений.

2. Для подсистемы анализа рентгеновских мультиизображений, решающей задачи обнаружения различия однотипных ИМС по геометрии расположения контактных площадок кристалла ИМС и определения дефекта "качество разварки соединительного проводника кристалл-рамка", предложены алгоритмы автоматизированного распознавания областей расположения интегральных

микросхем на рентгеновских изображениях; распознавания контактных площадок кристаллов интегральных микросхем на рентгеновских изображениях; сравнения рентгеновских изображений интегральных микросхем с аналогами из базы данных; поиска аналогов интегральных микросхем в базе данных.

3. Проведены эксперименты по оценке функционирования разработанного программного-технического комплекса. Результаты показали, что применение предложенных математического и программно-технического обеспечения позволяет существенно (до трех раз) сократить временные затраты на проведение НРК.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 мультэнергетической 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.

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

6. 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.

7. 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.



## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АКФ	- автокорреляционная функция
АРМИ	- анализ рентгеновских мультиизображений
БПФ	- быстрое преобразования Фурье
ГРП	- газоразрядные преобразователи
ИМС	- интегральная микросхема
ИРИ	- источник рентгеновского излучения
КМОП	- комплементарная структура металл-оксид-проводник
КПК	- контактная площадка кристалла
ЛКО	- линейный коэффициент ослабления
МИИ	- мониторинг интенсивности излучения
МЭРГ	- мультиэнергетическая рентгенография
НРК	- неразрушающий рентгеновский контроль
ОК	- объект контроля
ПЗС	- прибор с зарядовой связью
РИ	- рентгеновское изображение
ФЭ	- функциональный элемент
ЦС	- цифровая система
ЭМ	- электронный модуль

## СПИСОК ТЕРМИНОВ

**3D-модель (томограмма):** визуализированная модель объекта контроля, полученная путем реконструкции изображения из набора его рентгеновских изображений, полученных при неизменяемых параметрах источника излучения в разных положениях объекта контроля относительно подсистемы "источник-детектор".

**Качество рентгеновского изображения:** критерий пригодности изображения объекта контроля к обнаружению дефектов (расшифровке).

**Количественный показатель качества изображения:** показатель, определяемый на основе использования математических методов.

**Концептуальная модель:** модель, определяющая структуру моделируемой системы, свойства ее элементов и причинно-следственные связи, присущие системе.

**Методы анализа рентгеновских изображений:** набор операций, направленный на обнаружение дефектов и документирование результатов неразрушающего рентгеновского контроля.

**Методы обработки рентгеновских изображений:** набор операций, направленный на улучшение качества сформированных изображений.

**Мультиэнергетическая рентгенография:** процесс получения рентгеновского изображения, при котором производят ряд снимков при разных значениях анодного напряжения и анодного тока; обработкой снимков получают результирующее изображение, на котором для всех функциональных элементов (узлов) электронного модуля обеспечено требуемое значение избранного показателя качества.

**Рентгеновское мультиизображение:** цифровое рентгеновское изображение, сформированное из сегментов набора рентгеновских изображений, полученных при различных параметрах источника излучения, при которых для всех функциональных элементов (узлов) электронного модуля обеспечено требуемое значение избранного показателя качества.

**Сегментация:** разделение изображения на составные части и объекты.

**Субъективный показатель качества изображения:** показатель, определяемый на основе экспертных оценок.

**Уровень неоднородности:** группа функциональных элементов электронного модуля, имеющих близкие значения линейного коэффициента ослабления рентгеновского излучения, для которых требуется один общий режим рентгеновской экспозиции, обеспечивающий получение рентгеновского изображения требуемого качества.

**Функциональный элемент электронного модуля:** элемент электронного модуля, имеющий законченную форму и определенное предназначение.

**Цифровое рентгеновское изображение:** двумерный сигнал, с которым проведены операции дискретизации и квантования, предназначенный для обработки на ЭВМ и визуального восприятия человеком.

**Электронный модуль:** конструктивно и функционально законченное радиоэлектронное устройство (изделие и его составные части, в основу функционирования которых положены принципы радиотехники и электроники) или радиоэлектронный функциональный узел, выполненное (выполненный) в модульном или магистрально-модульном исполнении с обеспечением конструктивной, электрической, информационной совместимости и взаимозаменяемости.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ЖЭР-2014. Справочник предприятий электронной отрасли России [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.elcp.ru/catalog>.
2. Приказ Министерства промышленности и энергетики РФ от 7 августа 2007 г. № 311 "Об утверждении Стратегии развития электронной промышленности России на период до 2025 года" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/91853>.
3. ГОСТ Р 52003-2003. Уровни разукрупнения радиоэлектронных средств. Термины и определения. – М.: ФГУП "Стандартинформ", 2003. – IV, 7 с.
4. ГОСТ Р 53429-2009. Платы печатные. Основные параметры конструкции. – М.: ФГУП "Стандартинформ", 2010. – III, 7 с.
5. ГОСТ Р 53432 - 2009. Платы печатные. Общие технические требования к производству. – М.: ФГУП "Стандартинформ", 2010. – III, 15 с.
6. ГОСТ 54844-2011. Микросхемы интегральные. Основные размеры. – М.: ФГУП "Стандартинформ", 2014. – 65 с.
7. ГОСТ 11630-84. Приборы полупроводниковые. Общие технические условия. – М.: Издательство стандартов, 1986. – 40 с.
8. ГОСТ 18725-83. Микросхемы интегральные. Общие технические условия. – М.: Издательство стандартов, 1991. – 35 с.
9. ГОСТ 20215-84. Диоды полупроводниковые сверхвысокочастотные. Общие технические условия. – М.: Издательство стандартов, 1988. – 21 с.
10. ГОСТ 25467-82. Изделия электронной техники. Классификация по условиям применения и требования по стойкости к внешним воздействующим факторам. – М.: Издательство стандартов, 1988. – 7 с.
11. ГОСТ 28623-90. Приборы полупроводниковые. Часть 10. Общие технические условия на дискретные приборы и интегральные микросхемы. – М.: ФГУП "Стандартинформ", 2005. – 25 с.

12. ГОСТ Р 50044-2009. Изделия электронной техники для поверхностного монтажа радиоэлектронной аппаратуры. Требования к конструктивной совместимости. – М.: ФГУП "Стандартинформ", 2011. – 69 с.

13. ГОСТ ISO 9001-2011. Системы менеджмента качества. Требования. – М.: ФГУП "Стандартинформ", 2012. – V, 27 с.

14. Миллер, Д. Возможности и перспективы АОИ и рентгеновского контроля. / Д. Миллер // Производство электроники, 2014. - №3. – С. 124-127.

15. Семенов, Ю.Г. Технология полупроводниковых приборов и электронных модулей . В 10 кн.: Учеб. пособие для ПТУ. Кн. 10. Контроль качества / Ю.Г. Семенов – М.: Высш. шк., 1990. – 111 с.: ил.

16. Калинин, Н.П. Атлас дефектов паяных соединений: учебное пособие/Н.П. Калинин, М.О. Викторова. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 83 с.

17. Бернад, Д. Использование последних технологических достижений для рентгеновского контроля электронных изделий / Д. Бернад, К. Брайнт // Технологии в электронной промышленности. - 2012. - № 2. - С. 16-21.

18. Мазуров, А.И. Последние достижения в цифровой рентгенотехнике / А.И. Мазуров // Медицинская техника. - 2010. - № 5 (263). - С. 10-14.

19. Гафт, С. Рентгеновский контроль – мощное средство для диагностики и локализации дефектов современных печатных узлов / С. Гафт // Компоненты и технологии. - 2004. - № 7. - С. 182-183.

20. ГОСТ 18353-79. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1979. – 12 с.

21. Лебедев, М.Б. Анализ современного состояния и развития систем цифровой рентгенографии / М.Б. Лебедев, О.А. Сидуленко, В.А. Удод // Известия Томского политехнического университета. - 2008. - Т.312. - № 2. - С.47-55.

22. Белова, И.Б. Цифровые технологии получения рентгеновского изображения: принцип формирования и типы (обзор литературы) / И.Б. Белова, В.М. Китаев // Медицинская визуализация. - 2000. - № 1. - С.33–40.

23. Багаев, К.А. Цифровая радиография, обзор технологий и зарубежных стандартов / К.А. Багаев // Экспозиция. Нефть. Газ. - 2012. - № 7. - С.11-13.
24. Багаев, К.А. Системы оцифровки рентгеновских пленок при радиографическом контроле промышленных объектов / К.А. Багаев, А.И. Улудинцева // Экспозиция. Нефть. Газ. - 2013. - № 1 (26). - С.54-56.
25. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 1: В 2 кн. Кн. 1. Ф.Р. Соснин. Визуальный и измерительный контроль. Кн. 2. Ф.Р. Соснин. Радиационный контроль. – 2-е изд., испр. - М.: Машиностроение, 2008. - 560 с.: ил.
26. Борисов, А.А. О двух технологиях построения цифровых приемников рентгеновских изображений / А.А. Борисов и др. // Медицинская техника. - 2006. - №5. - С.7-10.
27. Майоров, А.А. Компьютерная радиография с использованием флуоресцентных запоминающих пластин – что это такое? / А.А. Майоров // В мире неразрушающего контроля. - 2004. - № 3. - С.42-43.
28. Литвинов, А. Высокое качество изображения. Последнее поколение детекторов рентгеновского излучения "SID-A50" / А. Литвинов // Технологии в электронной промышленности. - 2011. - № 6. - С.44-47.
29. Майоров, А.А. Цифровые технологии в радиационном контроле / А.А. Майоров // В мире неразрушающего контроля. - 2009. - № 3 (45). - С.5-12.
30. Клюев, В.В. Современные средства и методы цифровой радиационной дефектоскопии / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин // В мире неразрушающего контроля. -2002. - № 4 (18). - С.52-56.
31. Бернад, Д. Критерии выбора рентгеновской трубки // Технологии в электронной промышленности. - 2010. - № 4. - С. 38-43.
32. Шмаков, М. Выбор системы рентгеновского контроля. Взгляд технолога // Технологии в электронной промышленности. - 2006. - № 4. - С. 60-68.
33. 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.

34. Блинов, Н.Н. (мл.) Исследование параметров сканирующих рентгеновских систем. / Н.Н. Блинов (мл.) и др. // Медицинская техника. - 2004. - №5. - С. 8-11.

35. Алхимов, Ю.В. Преобразователи рентгеновского излучения с газовым усилением: учебное пособие / Ю.В. Алхимов, В.К. Кулешов // Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. - 284 с.

36. Григоров, М.С. Классификация цифровых систем неразрушающего рентгеновского контроля изделий микроэлектроники. / М.С. Григоров. // Труды СПИИРАН. - 2014. - №4(35) – С. 94-108.

37. Рувинова, Э. Рентгеновский контроль качества печатных узлов. / Э. Рувинова. // Электроника: Наука, Технология, Бизнес, 2001. - № 6. – С. 35-39.

38. Петухов, Г.Б. Основы теории эффективности целенаправленных процессов. Ч. 1. Методология, методы, модели. – МО СССР, 1989. – 663 с.

39. Маделунг, Э. Математический аппарат физики. – М.: Наука, 1968. – 620 с.

40. 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.

41. Кобзарь, А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. - 816 с. - ISBN 5-9221-0707-0.

42. Гурский, Е. И. Теория вероятностей с элементами математической статистики. Учеб. пособие для ВТУЗов. – М.: Высшая школа, 1971. – 328 с. : ил.

43. 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.

44. Хараджа, Ф.Н. Общий курс рентгенотехники. / Ф.Н. Хараджа. – М. : Энергия, 1966. - 568 с.
45. ГОСТ 20426-82. Контроль неразрушающий. Методы дефектоскопии радиационные. Область применения. – М. : Государственный комитет СССР по стандартам, 1983. – 23 с.
46. Инструкция по эксплуатации рентгеновского аппарата РАП-220. – М.: ООО "Фотон", 2005. – 33 с.
47. Григоров, М.С. Применение мультэнергетической 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>.
48. Ярославский, Л.П. Введение в цифровую обработку изображений. / Л.П. Ярославский. – М.: Сов. радио, 1979. – 312 с.
49. Претт, У. Цифровая обработка изображений: Пер. с англ. – М.: Мир, 1982, кн. 1. – 312 с.
50. Госалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2012. – 1104 с.
51. Программный комплекс Дидаб4 (Описание и инструкция оператора) / Лаборатория технических средств неразрушающего контроля (МИРЭА). – 2014. – 80 с.
52. Григоров, М.С. Структурно-функциональная модель системы неразрушающего рентгеновского контроля изделий микроэлектроники с неоднородной структурой [Электронный ресурс]. / 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/82>.



53. Система Phiplastic [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.phiplastic.com/x-ray\\_inspection\\_ru.html](http://www.phiplastic.com/x-ray_inspection_ru.html).
54. 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.
55. Монич, Ю.И. Оценки качества для анализа цифровых изображений. / Ю.И. Монич, В.В. Старовойтов. // Искусственный интеллект. – 2008. – № 4. – С. 376–386.
56. Константинова, Е.В. Проверка основных положений референтной концепции фотографического тоновоспроизведения / Е.В. Константинова, А.В. Редько, Р.П. Филимонов // Оптич. ж. – 2001. – Т. 68. - № 6. - С. 35-40.
57. Netravali A.N. Picture Coding: A Review / A.N. Netravali, J.O. Limb // Proceedings of the IEEE. – 1980. – Vol. 68. - № 3. – P. 366-406.
58. Обработка изображений при помощи цифровых вычислительных машин: Пер. с англ. / Под ред. Г. Эндрюса и Л. Инло. – М.: Мир, 1973. – 204 с.
59. Претт, У.К. Методы передачи изображений. Сокращение избыточности. / У.К. Претт, [и др.]: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1983. – 264 с.
60. Макаров, А.О. Алгоритмы увеличения пространственного разрешения и обработки мультиспектральных спутниковых изображений: Дис... канд. техн. наук: 05.13.01 / А.О. Макаров. – Минск, 2006. – 156 с.
61. Wang, Z. Image quality assessment: From error visibility to structural similarity // IEEE transaction on Image Processing. – 2004. – Vol. 13, № 4. – P. 309-312.
62. Троицкий, И.Н. Статистическая теория томографии. – М.: Радио и связь, 1986. – 304 с.
63. Вычислительная оптика: Справочник. / М.М. Русинов и др. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1984. – 423 с.
64. Цуккерман, И.И. Пути повышения информационной емкости в телевидении // Успехи научной фотографии. – 1985. – Т. XXIII. – С. 58-62.

65. Wang, X. Blind Image Quality Assessment for Measuring Image Blur / X. Wang, B. Tian, C. Liang, D. Shi // Congress on Image and Signal Processing, 2008.
66. Журавель, И.М. Краткий курс теории обработки изображений. / Консультационный центр MATLAB компании Softline [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://Matlab.exponenta.ru/imageprocess/index.php>.
67. Жилияков, Е.Г. Метод определения точных значений долей энергии изображений в заданных частотных интервалах / Е.Г. Жилияков, А.А. Черноморец, И.В. Лысенко // Вопросы радиоэлектроники. Сер. РЛТ. – 2013. – вып. 4. – С. 115-123.
68. Черноморец, А.А. О частотной концентрации энергии изображений / А.А. Черноморец, В.А. Голощапова, И.В. Лысенко, Е.В. Болгова // Научные ведомости БелГУ. Сер. История. Политология. Экономика. Информатика. – 2011. – №1(96). – вып.17/1. – С.146-151.
69. Жилияков, Е.Г. О субполосных свойствах изображений / Е.Г. Жилияков, А.А. Черноморец, А.С. Белов, Е.В. Болгова // Научные ведомости БелГУ. Сер. История. Политология. Экономика. Информатика. – 2013. – №8(151). – вып.26/1. – С.175-182.
70. Черноморец, А.А. Метод анализа распределения энергий изображений по заданным частотным интервалам / А.А. Черноморец, О.Н. Иванов // Научные ведомости БелГУ. Сер. История. Политология. Экономика. Информатика. – 2010. – №19(90). – вып.16/1. – С.161-166.
71. Григоров, М. С. Анализ распределения энергии рентгеновского изображения по частотным интервалам. / М. С. Григоров, О. О. Басов. // Научные технологии и инновации: сб. докладов Юбилейной Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 60-летию БГТУ им. В. Г. Шухова. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2014. – Ч.6. – С. 160-165.
72. Современный эксперимент: подготовка, проведение, анализ результатов / В. Г. Блохин, О. П. Глудкин, А. И. Гуров, М. А. Ханин; под ред. О.П. Глудкина. – М.: Радио и связь, 1997. – 232 с.

73. Силантьев, Р.В. Сшивка цифровых перекрывающихся изображений без использования навигационной информации в задачах мониторинга. / Р.В. Силантьев // Автоматика, электроника и средства связи: Вестник инженерной школы ДВФУ, 2012. - № 2 (11) – С. 89-93.

74. Толстая, Е.В. Способы и алгоритмы трансформации цифровых изображений на основе анализа и обработки метаданных при подготовке к фотопечати: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01 / Толстая Екатерина Витальевна. - Рязань, 2011. – 19 с.

75. Чахлов, С.В. Метод сшивки рентгеновских изображений / С.В. Чахлов, М.Б. Лебедев, Е.Ю. Усачев // Контроль. Диагностика. – 2006. - №2. – С. 34-40.

76. Рыжиков, А.С. Оперативное формирование обзорных изображений по данным аэрофотосъемки. / А.С. Рыжиков, А.Е. Кузнецов / Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2014. - Т. 11. № 4. - С. 321–328.

77. Агапова, Е.А. Разработка алгоритма сшивки цифровых микроскопических изображений биомедицинских препаратов [Электронный ресурс]. / Е.А. Агапова, Д.А. Добролюбова. // Молодежный научно-технический вестник ФС77-51038 – Режим доступа: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/735585.html>.

78. Павлидис, Т. Алгоритмы машинной графики и обработки изображений. - М.: Радио и связь, 1986. – 400 с.

79. Форсайт, Д. Компьютерное зрение. Современный подход: пер. с англ. / Д. Форсайт, Ж. Понс - М.: Вильямс, 2004. - 928 с.

80. Harpreet S. Robust video mosaicing through topology inference and local to global alignment / S. Harpreet, S. Hsu, R. Kumar // Proc. of the European Conf. on Computer Vision. Princeton, 1998. - Vol. 2. - P. 103-118.

81. Jens Rieke, et al., Clinical results of Csl-detector-based dual-exposure dual energy in chest radiography // Eur Radiol (2003) 13. P. 2577–2582.

82. Тарасов, А.И. Биэнергетическая цифровая рентгенография. / А.И. Тарасов, С.М. Владыкин // Медицинская визуализация. – 2005. - №2. – С. 134-137.

83. Macdonald, R. Design and implementation of a dual-energy X-ray imaging system for organic material detection in airport security application // Proc.SPIE. - 2001. – 4301 – P. 31-41.

84. Рыжиков, В.Д. Трехэнергетическая цифровая радиография для разделения веществ с малым эффективным атомным номером. / В.Д. Рыжиков и др. // Вісник НТУ «ХП», - 2013. № 34 (1007). – С. 43-51.

85. Заявка на изобретение № 2014124658. Способ мультиэнергетической рентгенографии / М.С. Григоров, О.О. Басов, Д.А. Гуляйкин, Р.С. Шитов (РФ). – заявлено 17.06.2014.

86. 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.

87. Заявка на изобретение № 2014120114. Микромощный фотодатчик с частотным выходом / М.С. Григоров, Ю.Б. Иванов (РФ). – заявлено 19.05.2014.

88. Орнатский, П.П. Автоматические измерения и приборы. – Киев; Высш.шк., 1988. – 486 с.

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

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

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

92. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров. / Г. Корн, Т. Корн. - М.: Издательство "Наука", 1974. - 832 с.: ил.

93. Бронштейн, И. Н. Справочник по математике / И. Н. Бронштейн, Семендяев К. А. - М.: ГИТТЛ, 1955. - 608 с.
94. Баскаков, С.И. Радиотехнические цепи и сигналы - М. : Высшая школа, 2-е издание. – 446 с.
95. Грузман, И.С. Цифровая обработка изображений в информационных системах: учебное пособие / И.С. Грузман [и др.] – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 352 с.
96. Стругайло, В.В. Обзор методов фильтрации и сегментации цифровых изображений – М. : Научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. Наука и образование, 2012. – С. 270-281.
97. OpenCV шаг за шагом. Обработка изображения - морфологические преобразования [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://robocraft.ru/blog/computervision/319.html>.
98. Шапиро, Л. Компьютерное зрение / Л. Шапиро, Дж. Стокман – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. – 752 с.
99. Выделение и описание контуров [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://wiki.technicalvision.ru/index.php/Выделение\\_и\\_описание\\_контуров](http://wiki.technicalvision.ru/index.php/Выделение_и_описание_контуров).
100. ГОСТ 7512-82. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Радиографический метод. – Взамен ГОСТ 7512-75; Введ. 1984 01 01. – М. : Издательство стандартов, 2004. – 18 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

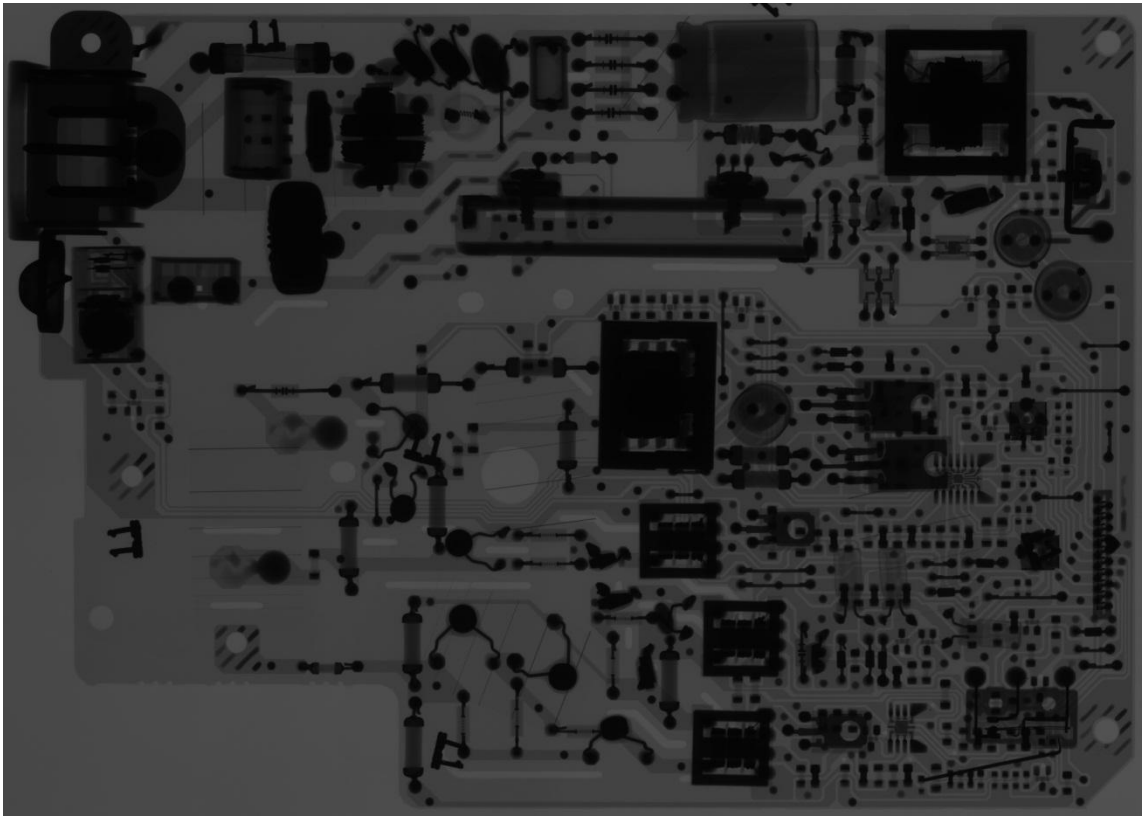


Рисунок А 1 – Режим просвечивания:  $U = 80$  кВ,  $I = 2$  мА,  $t = 40$  с

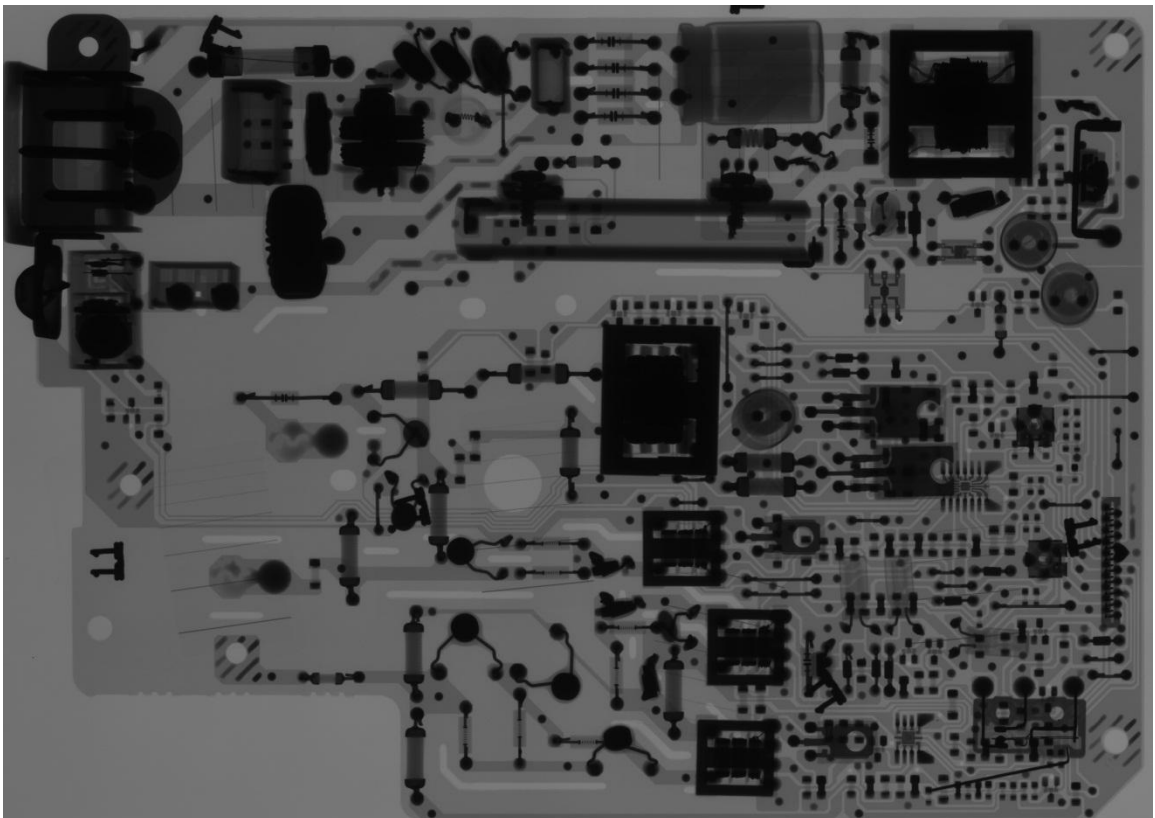


Рисунок А 2 – Режим просвечивания:  $U = 80$  кВ,  $I = 3$  мА,  $t = 40$  с

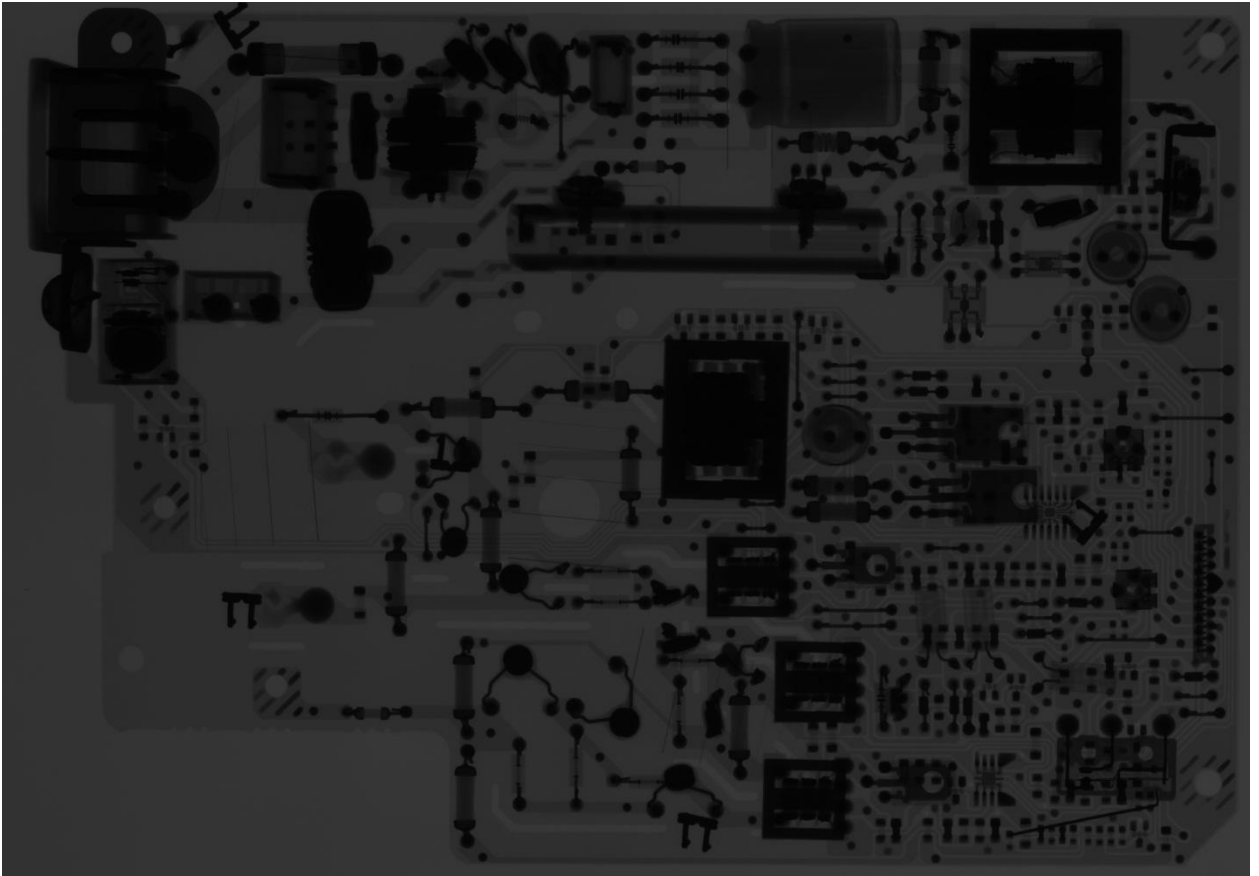


Рисунок А 3 – Режим просвечивания:  $U = 100$  кВ,  $I = 1$  мА,  $t = 40$  с

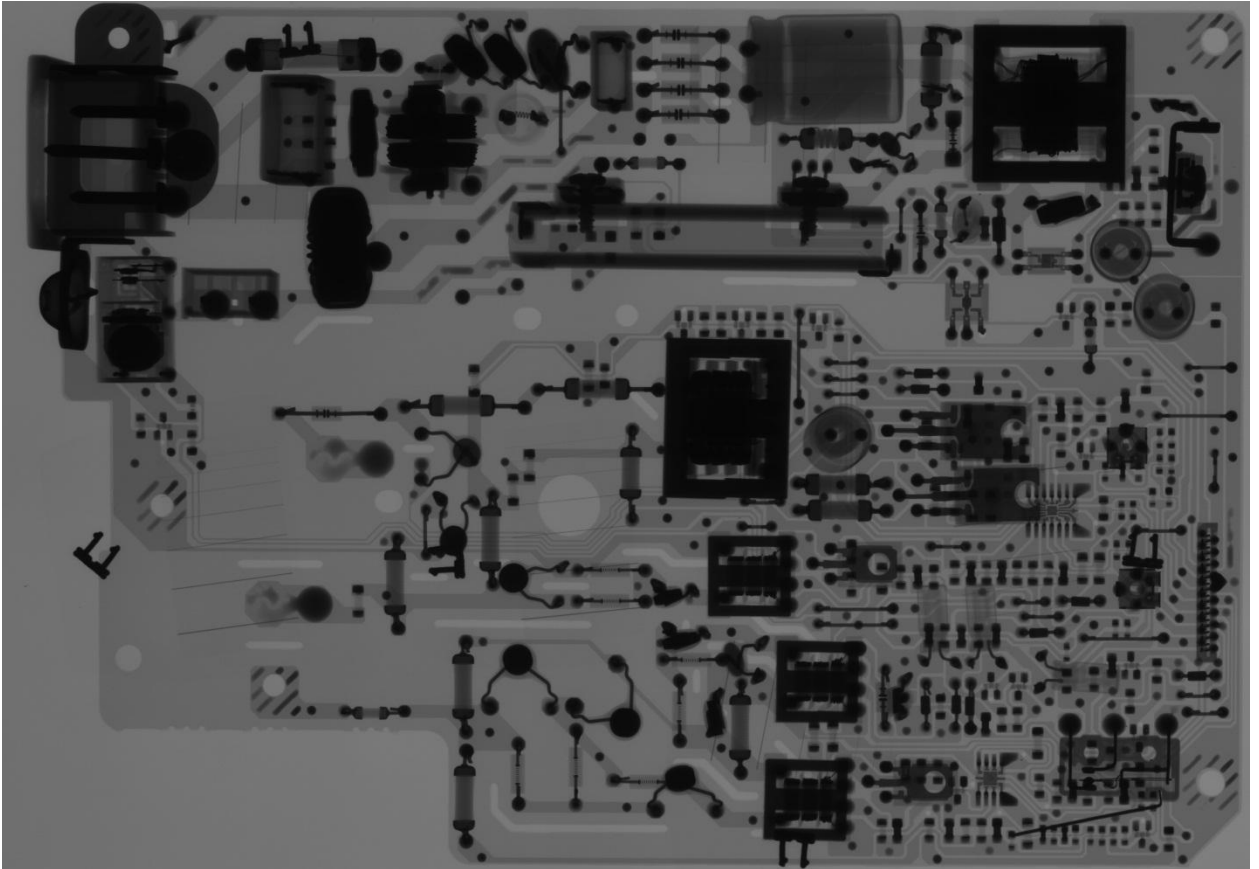


Рисунок А 4 – Режим просвечивания:  $U = 100$  кВ,  $I = 2$  мА,  $t = 40$  с

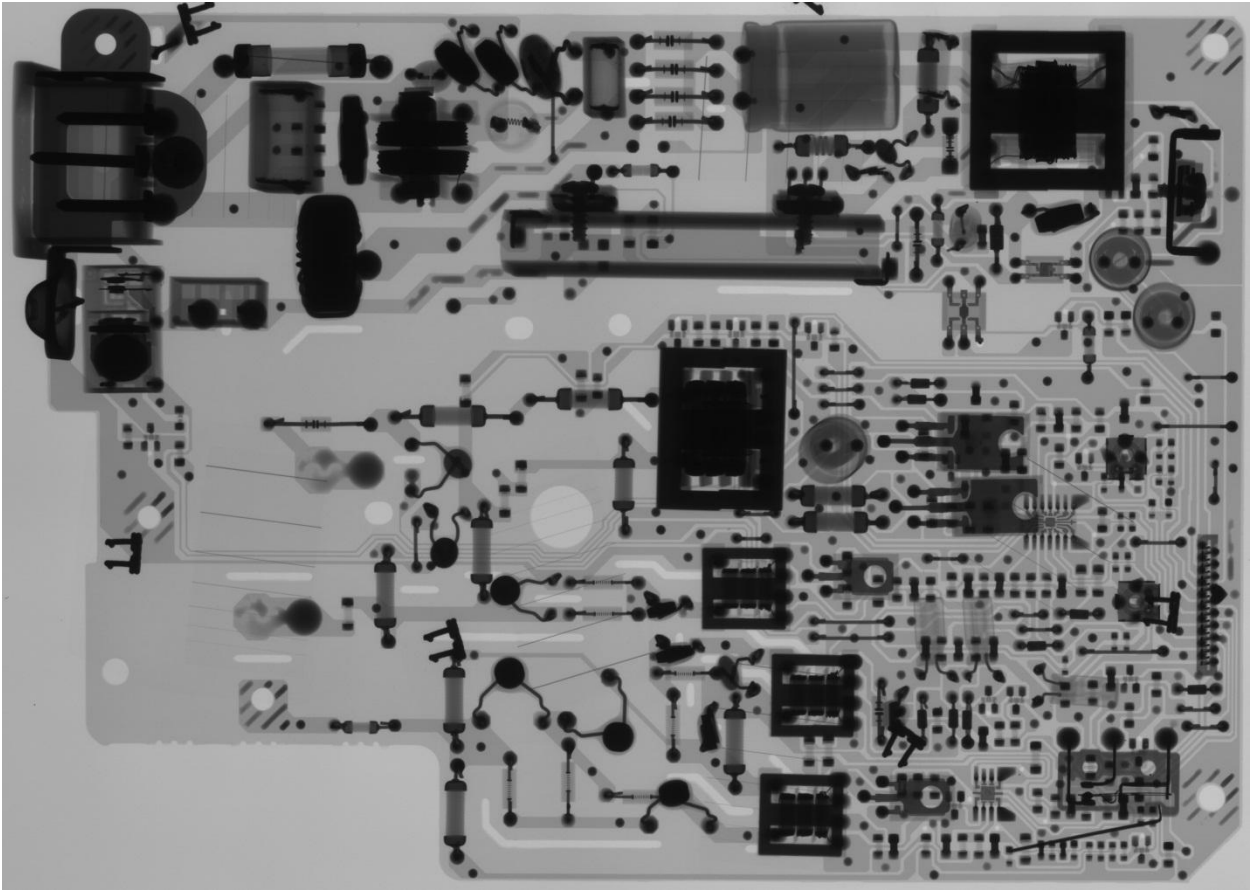


Рисунок А 5 – Режим просвечивания:  $U = 100$  кВ,  $I = 3$  мА,  $t = 40$  с

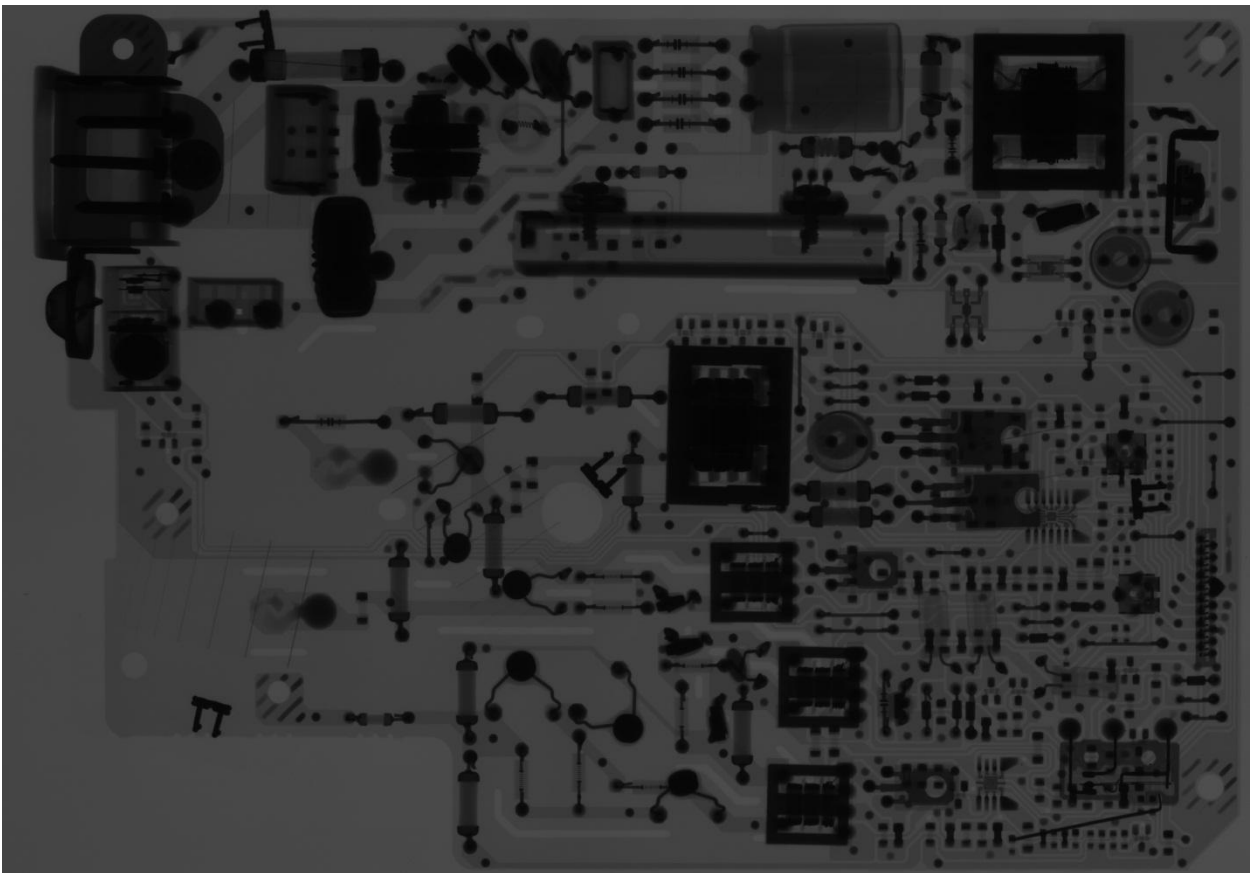


Рисунок А 6 – Режим просвечивания:  $U = 120$  кВ,  $I = 1$  мА,  $t = 40$  с



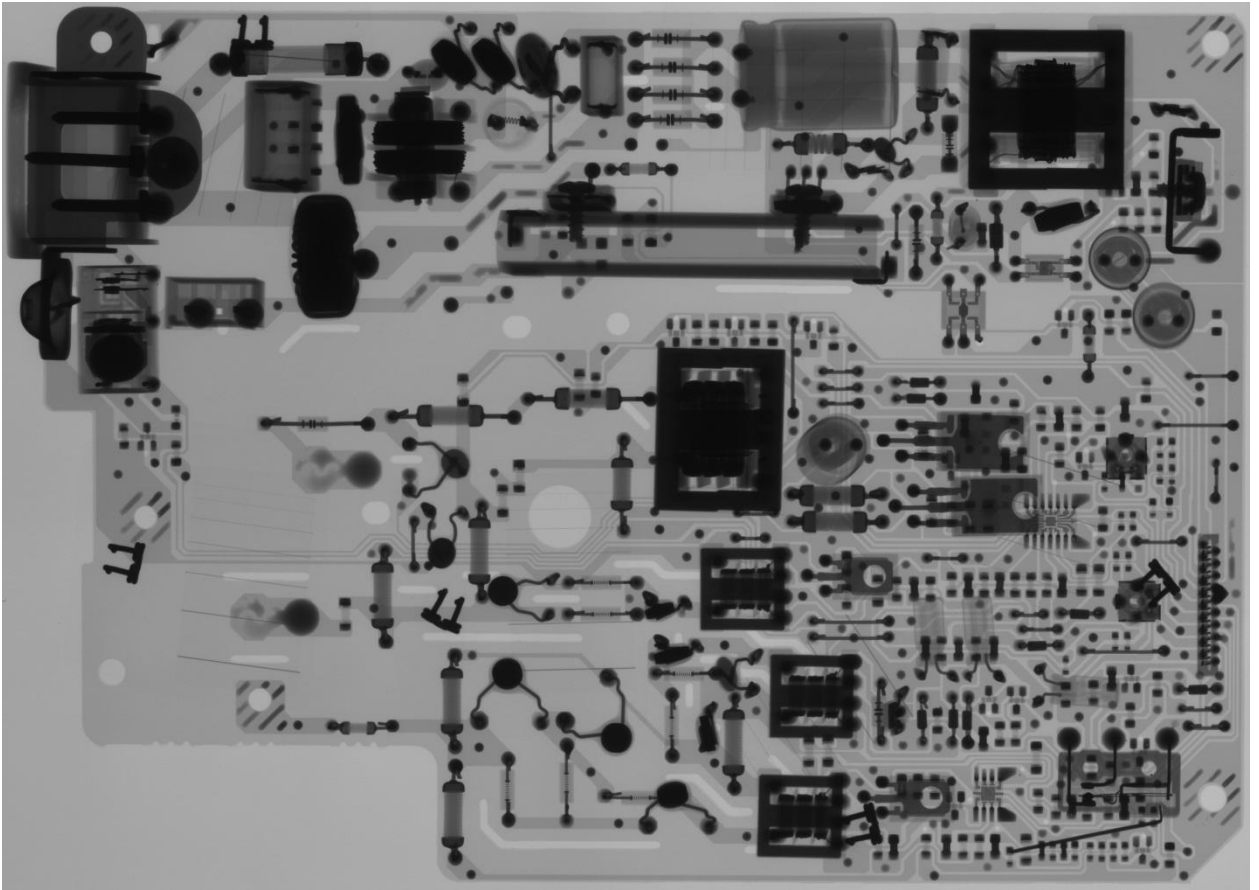


Рисунок А 7 – Режим просвечивания:  $U = 120$  кВ,  $I = 2$  мА,  $t = 40$  с

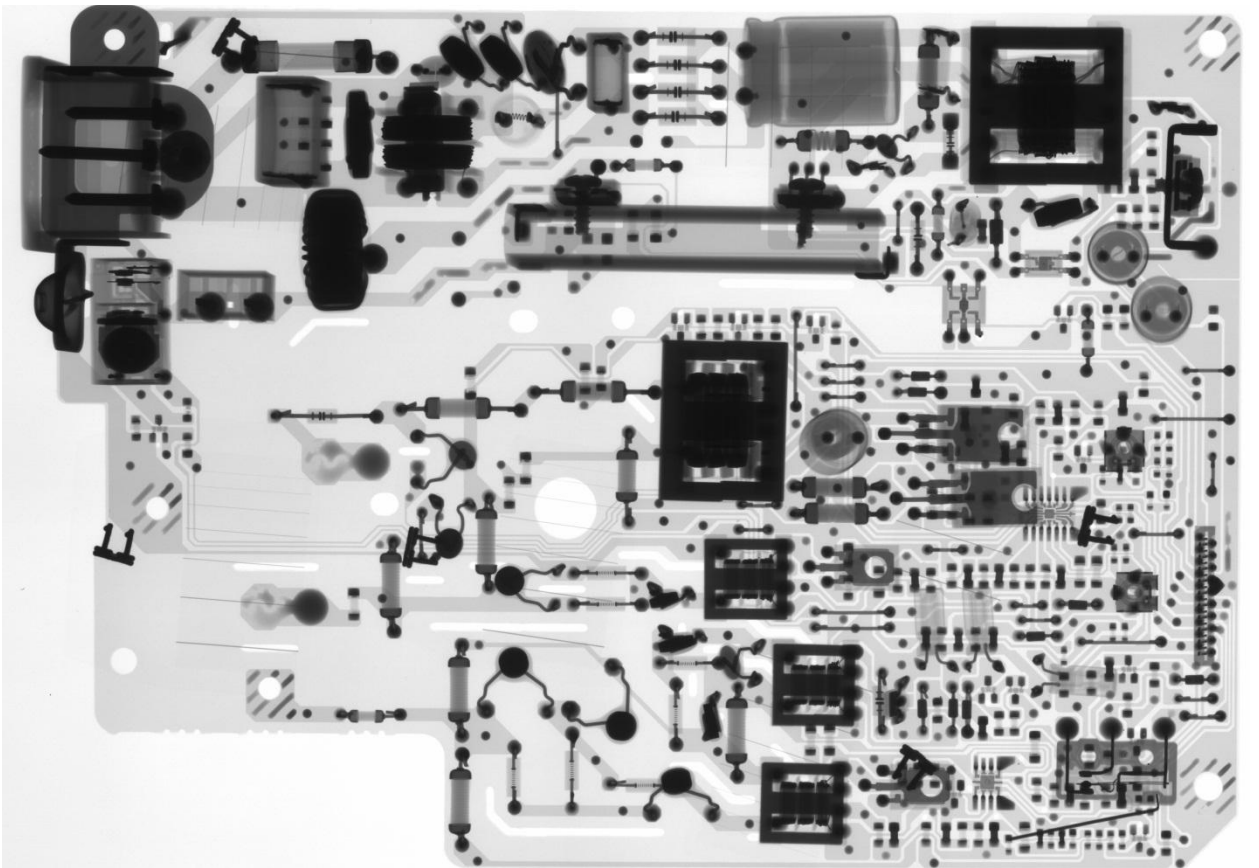


Рисунок А 8 – Режим просвечивания:  $U = 120$  кВ,  $I = 3$  мА,  $t = 40$  с

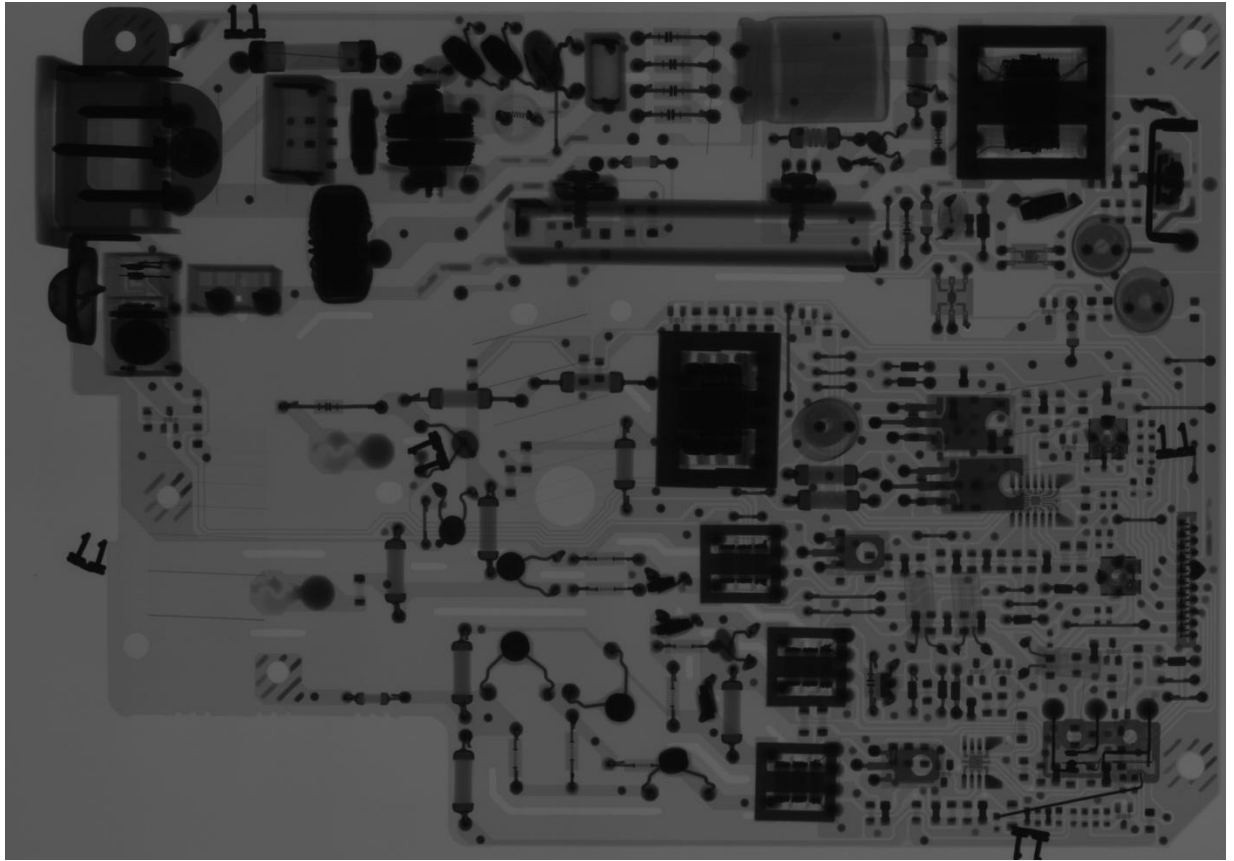


Рисунок А 9 – Режим просвечивания:  $U = 140$  кВ,  $I = 1$  мА,  $t = 40$  с

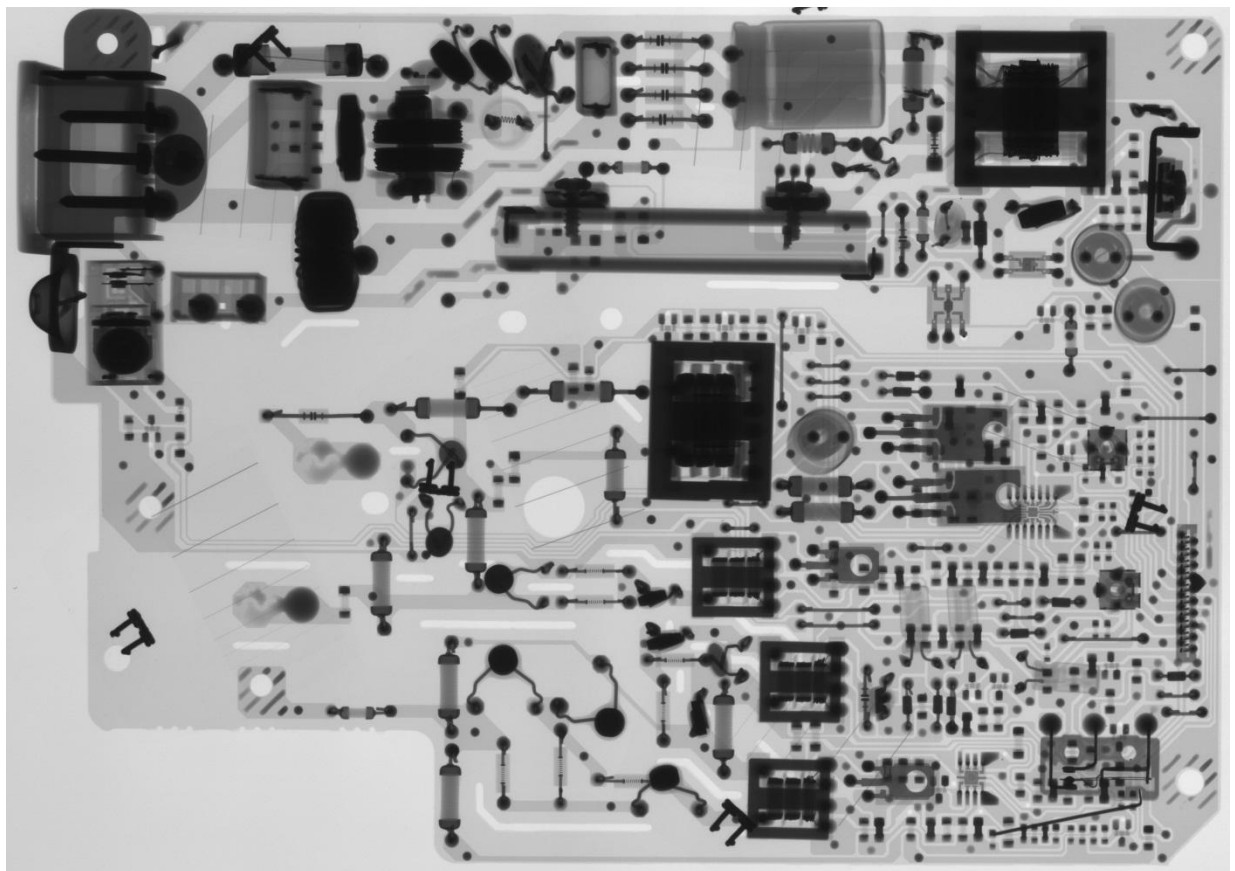


Рисунок А 10 – Режим просвечивания:  $U = 140$  кВ,  $I = 2$  мА,  $t = 40$  с

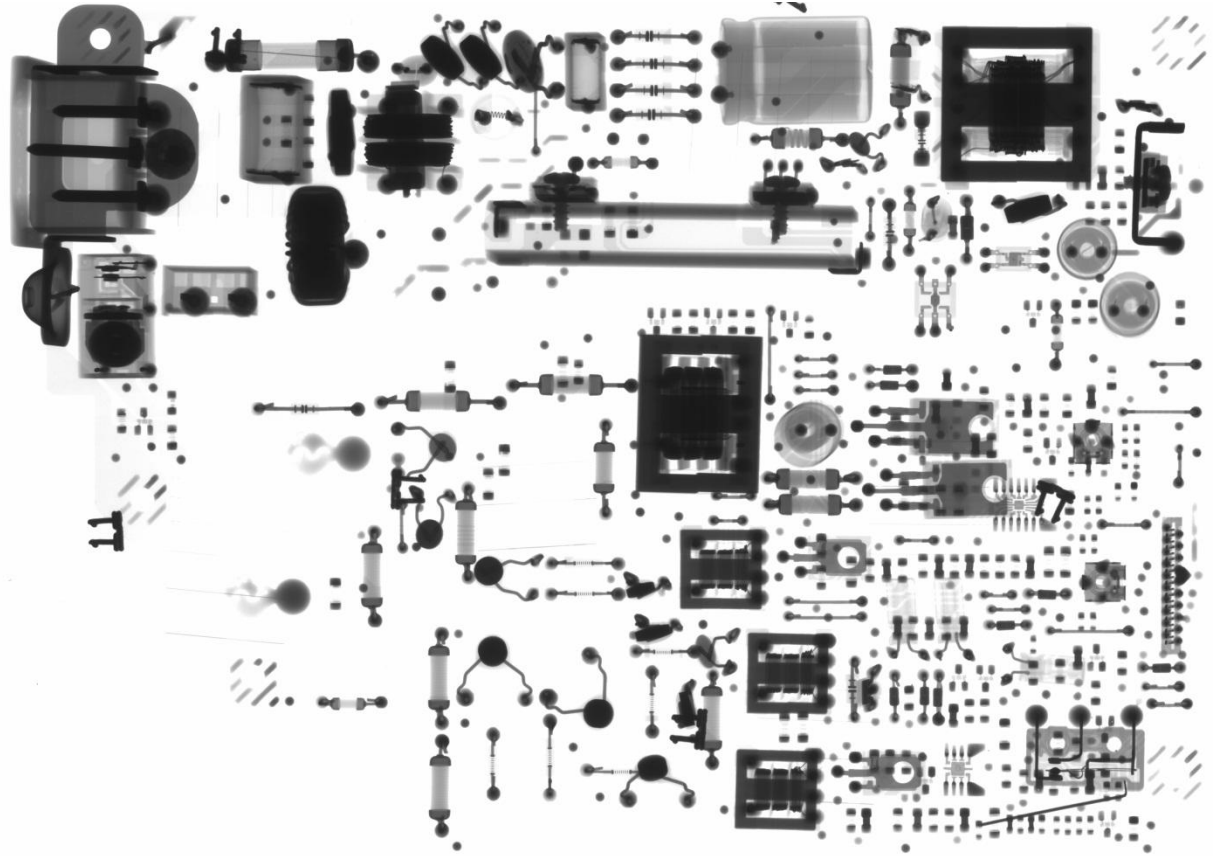


Рисунок А 11 – Режим просвечивания:  $U = 140$  кВ,  $I = 3$  мА,  $t = 40$  с

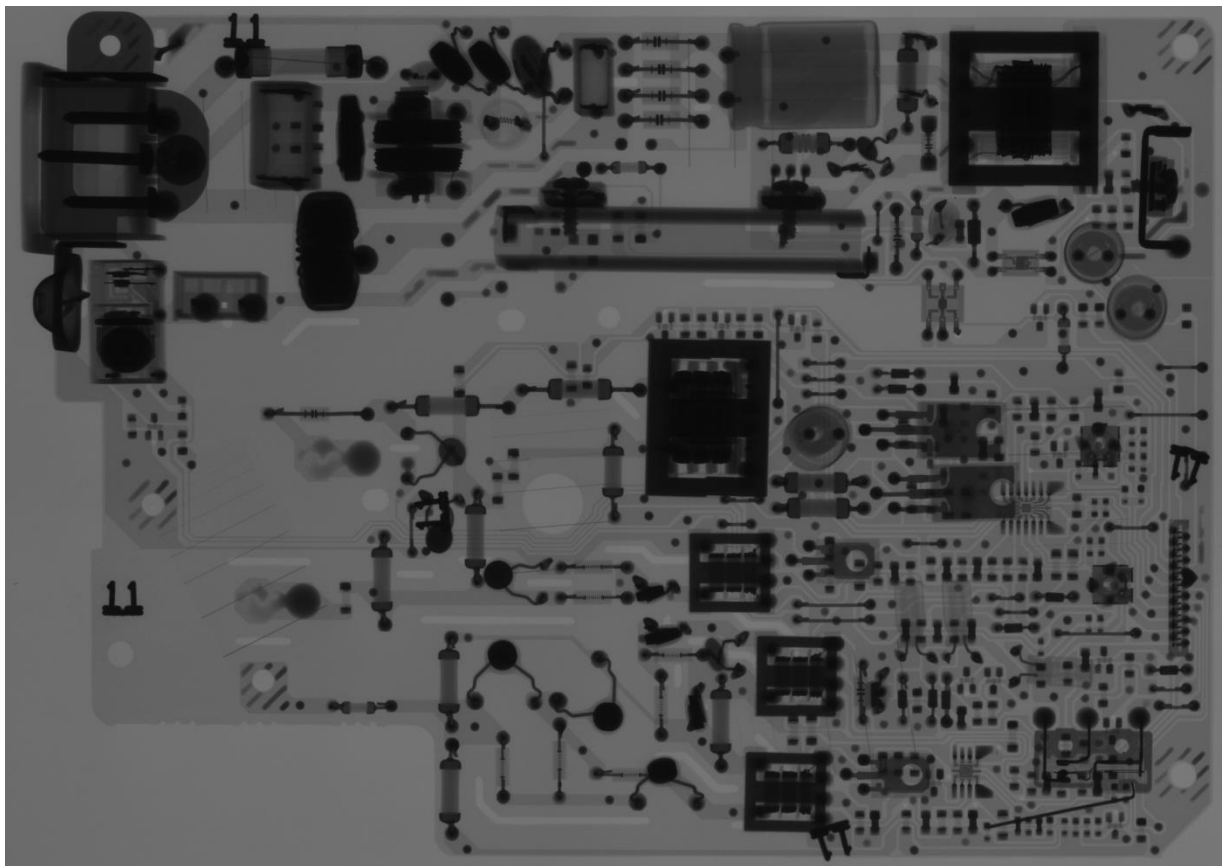


Рисунок А 12 – Режим просвечивания:  $U = 160$  кВ,  $I = 1$  мА,  $t = 40$  с

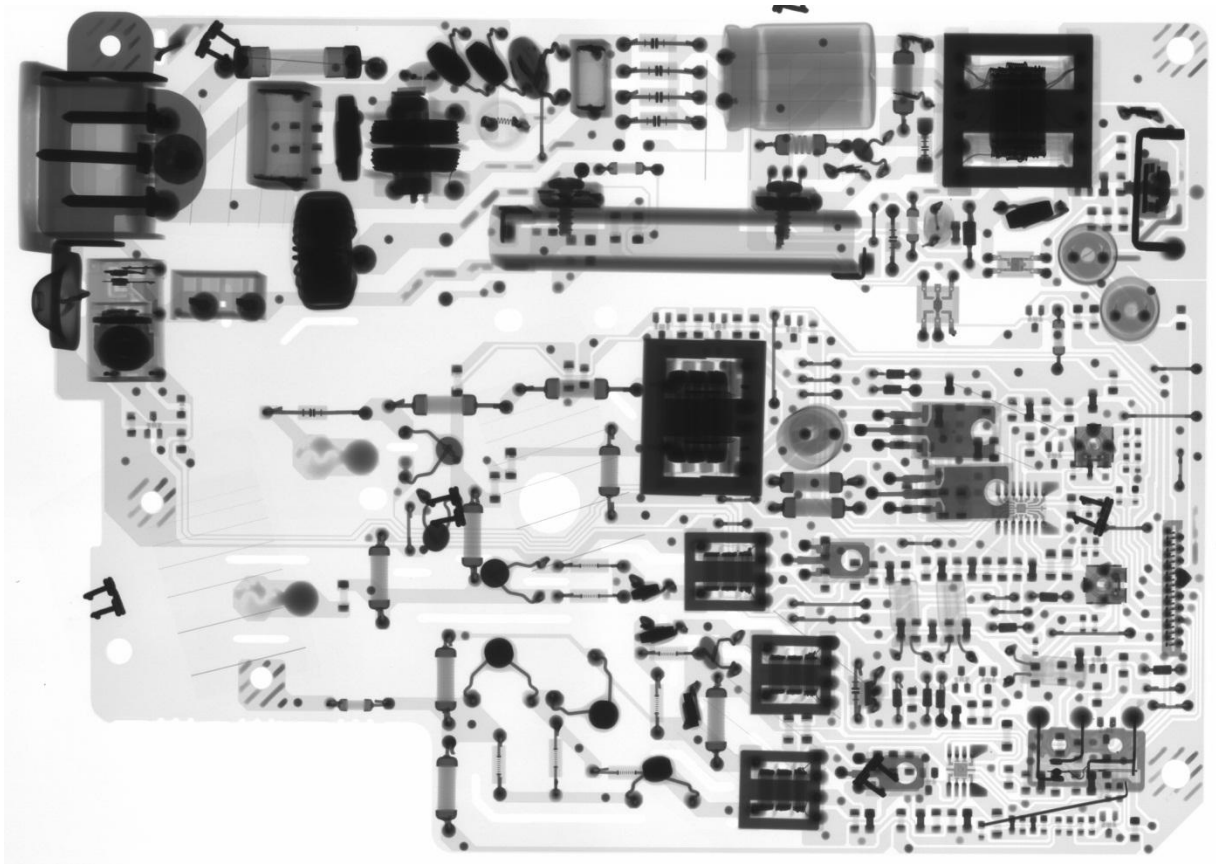


Рисунок А 13 – Режим просвечивания:  $U = 160$  кВ,  $I = 2$  мА,  $t = 40$  с

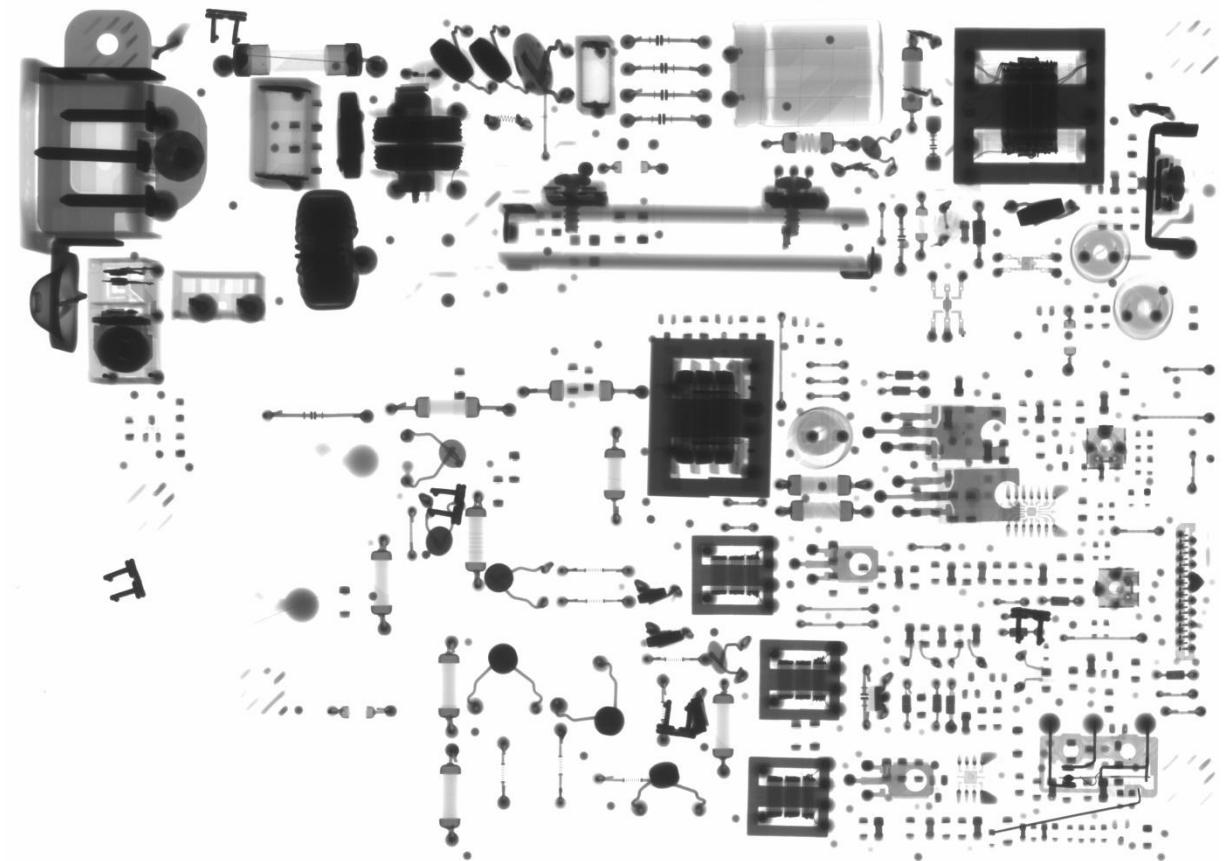


Рисунок А 14 – Режим просвечивания:  $U = 160$  кВ,  $I = 3$  мА,  $t = 40$  с

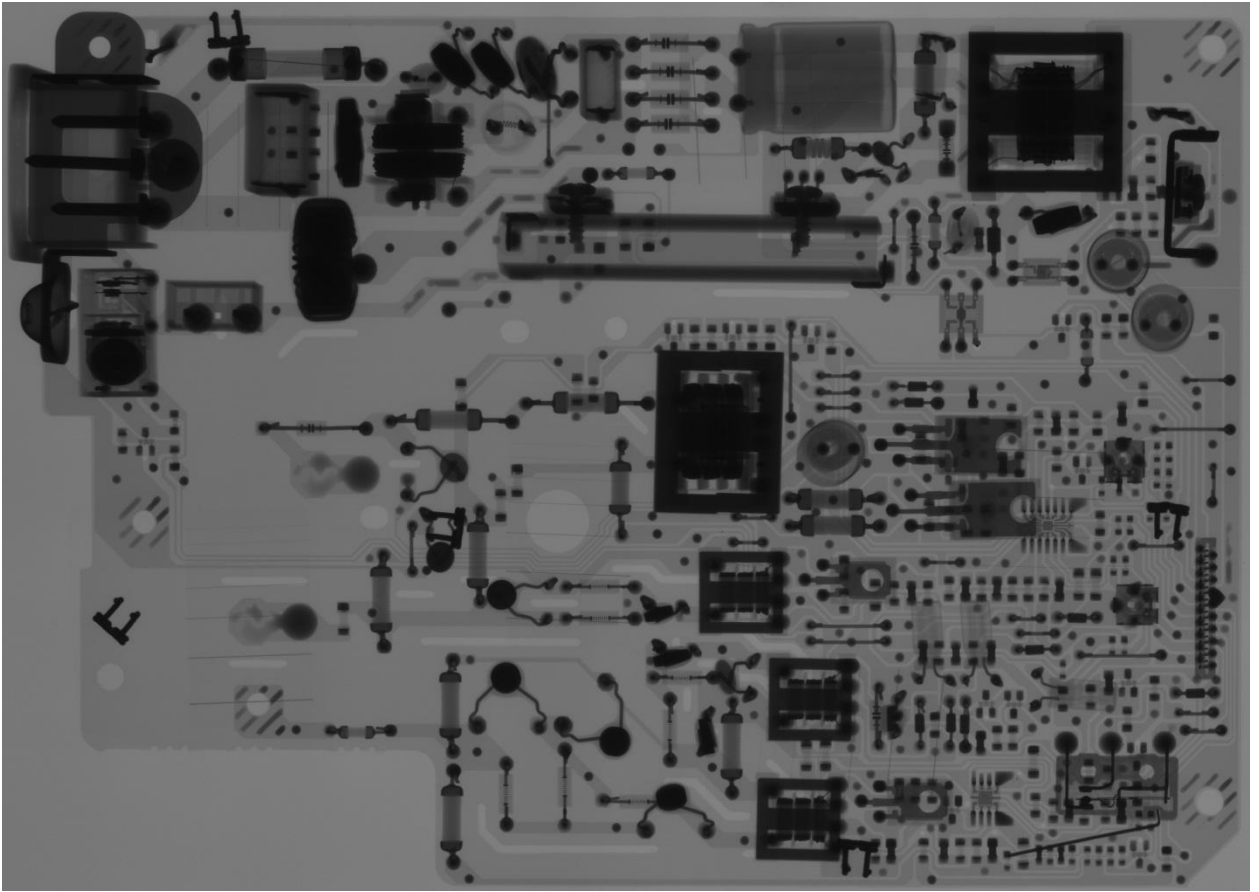


Рисунок А 15 – Режим просвечивания:  $U = 180$  кВ,  $I = 1$  мА,  $t = 40$  с

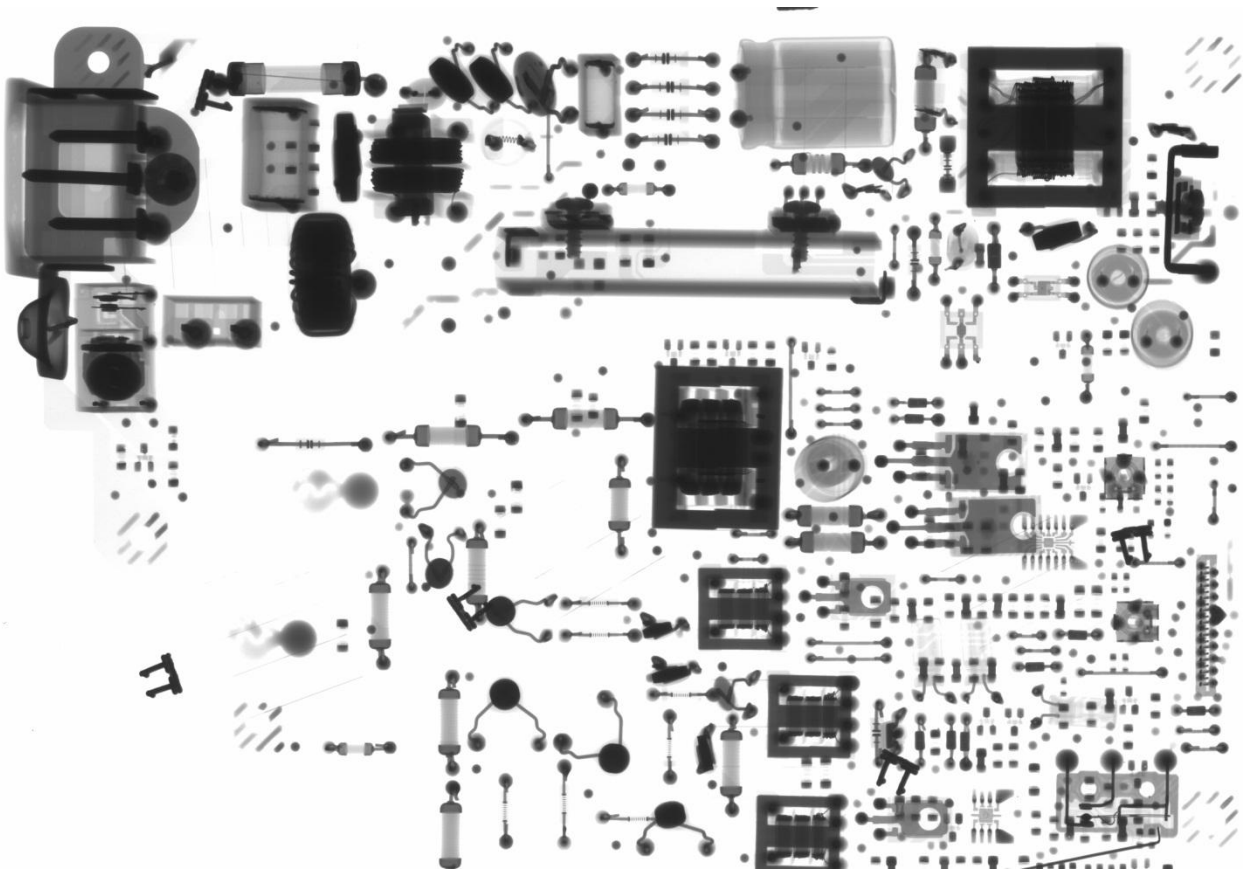


Рисунок А 16 – Режим просвечивания:  $U = 180$  кВ,  $I = 2$  мА,  $t = 40$  с

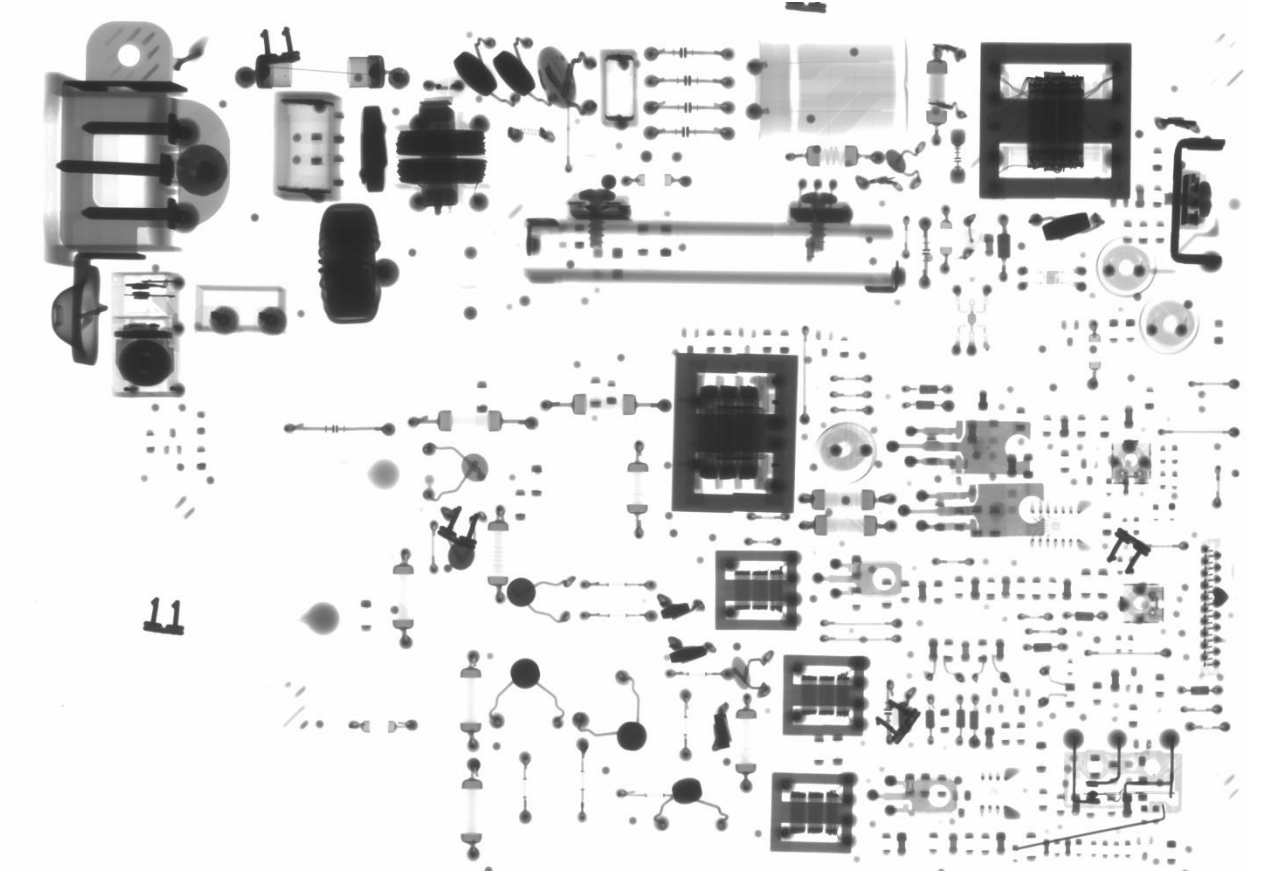


Рисунок А 17 – Режим просвечивания:  $U = 180 \text{ кВ}$ ,  $I = 3 \text{ мА}$ ,  $t = 40 \text{ с}$