

ОТЗЫВ

официального оппонента д.т.н., профессора Подмастерьева Константина Валентиновича на диссертационную работу Григорова Михаила Сергеевича на тему "Математическое и программно-техническое обеспечение неразрушающего рентгеновского контроля электронных модулей", представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий

1. Актуальность темы диссертации

Безопасность сложных технических систем непосредственно зависит от качества используемых в этих системах электронных модулей (ЭМ). Это определяет строгие требования к производству ЭМ по обеспечению стабильных характеристик в соответствии с конструкторской документацией, техническими условиями и требованиями ГОСТ Р ИСО 9001-2011. Обеспечение данных требований достигается, в том числе, за счет контроля состояния ЭМ, проводимого на различных стадиях производства.

Основными методами контроля ЭМ являются неразрушающие методы. При этом оценка состояния изделий, для которых проверка иным способом невозможна или малоэффективна в виду применения традиционных методов диагностики и локализации дефектов, возможна только с использованием неразрушающего рентгеновского контроля (НРК). Современная промышленность широко использует специализированные установки рентгеновского контроля, основанные на радиационном методе прошедшего излучения. При этом достоверность диагностирования и локализации дефектов, которыми занимается специалист, а также время, затрачиваемое на проведение анализа качества ЭМ со сложной многослойной структурой, во многом определяются техническими характеристиками применяемых систем рентгеновского контроля, степенью их автоматизации и, как следствие, качеством формируемых ими рентгеновских изображений внутренней структуры ЭМ.

Анализируя факторы, влияющие на качество рентгеновских изображений и время их формирования, соискатель логично раскладывает проблему на две взаимоувязанные задачи, первая из которых заключается в формировании минимального набора рентгеновских изображений ЭМ, обеспечивающего визуализацию внутренней структуры всех функциональных элементов ЭМ с разным коэффициентом линейного ослабления рентгеновского излучения, а вторая – в контроле качества рентгеновских изображений ЭМ.

Представленный в диссертации анализ состояния вопроса по обем задачам убедительно иллюстрирует, что применяемые системы рентгеновского контроля и используемые в них средства автоматизации не обеспечивают возможность реализации автоматизированного определения качества рентгеновского изображения ЭМ и выбора необходимого режима экспозиции для получения качественного изображения. Это предполагает задействование человека, что существенно снижает оперативность проведения контроля ЭМ, которая весьма важна в условиях увеличения количества подлежащих контролю ЭМ, обусловленного, с одной стороны, увеличением производства ЭМ, а с другой стороны, необходимостью выявления контрафактной продукции.



В этой связи оппонируем работа, направленная на научное обоснование и разработку методов формирования, обработки и анализа рентгеновских изображений, автоматизацию этих методов и разработку реализующего их программно-технического комплекса НРК, обеспечивающих повышение оперативности НРК при заданной точности определения дефектов ЭМ, является, несомненно, актуальной.

2. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

На основании изучения материалов диссертации мной проведен анализ степени обоснованности представленных в работе положений, выводов и рекомендаций. Обобщая информацию по каждому из них, и анализируя материал в соответствии с логикой его рассмотрения в диссертации, отмечаю следующее.

1. В работе проведен подробный анализ нормативной и законодательной базы, обеспечивающей контроль ЭМ на различных стадиях производства. Проанализировано и определено место рентгеновского контроля в системе неразрушающих методов контроля, определены особенности проведения НРК ЭМ. Также проанализированы технологии получения рентгеновских изображений, реализованные в системах НРК различных типов. Предложена классификация цифровых систем НРК, приведен их сравнительный анализ и выявлены основные недостатки, влияющие на оперативность контроля. Анализ выполнен квалифицированно с привлечением большого количества нормативных и научных публикаций, как отечественных, так и зарубежных ученых.

Автором проанализированы показатели эффективности процесса функционирования подсистем НРК. Результаты проведенного анализа позволили соискателю сделать вывод, что при обеспечении требуемого целевого эффекта наибольшее влияние на эффективность системы НРК оказывают характеристики системы, влияющие на время преобразования скрытого радиационного изображения в цифровое рентгеновское $t_{\text{ПР}}$, время анализа цифрового рентгеновского изображения на соответствие требованиям по избранному критерию качества $t_{\text{АК}}$, а также время анализа для принятия решения о наличии дефектов $t_{\text{АД}}$. Также приведены результаты оценочного экспериментального исследования затрат времени на проведение НРК 150-ти ЭМ различных типов на установке "Калан-4У" со сканером DuerrNDTCR-43, которые позволили автору сделать обоснованный вывод о том, что повышение сложности ЭМ существенно увеличивает продолжительность НРК, при этом параметры $t_{\text{АК}}$ и $t_{\text{АД}}$ характеризуются высокой трудоемкостью и во многом зависят от квалификации специалиста. Это приводит к существенному увеличению времени НРК ЭМ и завышенному расходу ресурса системы НРК.

Обоснованность данного вывод с учетом выше изложенного не вызывает сомнения.

2. На основе проведенных обзоров и классификаций соискателем разработана концептуальная модель существующих систем неразрушающего рентгеновского контроля электронных модулей и проведен ее анализ, который 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.

Приведенный в работе обширный анализ состояния вопроса, конструктивных особенностей и специфичности условий применения систем НРК послужил основой для предложенной соискателем структурно-функциональной модели системы НРК ЭМ, а результаты моделирования – для обоснования сформулированных требований к методу формирования рентгеновского мультиизображения и методике мультиэнергетической рентгенографии.

3. Важным результатом диссертационной работы является выбор показателя качества области рентгеновского изображения электронного модуля - отношения средней яркости анализируемой области изображения к сосредоточенности долей энергии для данной области. Для решения задачи выбора критерия соискателем проведен анализ известных работ в области оценки качества изображений, определены показатели качества, имеющие наибольшую корреляцию с субъективными оценками качества изображений, что является существенным для рентгеновских изображений, анализируемых экспертом на предмет наличия дефектов.

Следует отметить, что соискатель предложил новый показатель качества рентгеновского изображения, основанный на анализе четкости изображения и его яркостной характеристики. Соискателем произведены вычислительные эксперименты, позволившие определить характеристики выбранного показателя, требуемые для проведения оценки качества области рентгеновского изображения, а также влияющие на вычислительную сложность. 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. Для этого соискателем проведена экспертная оценка качества области рентгеновского изображения силами группы сотрудников рентгенологической лаборатории с использованием известной методики, учитывающей значимость эксперта. Результаты вычисления коэффициента корреляции экспертных оценок и выбранного показателя качества области рентгеновского изображения (коэффициент корреляции 0,89) показали высокую степень корреляции сравниваемых параметров

С учетом вышеизложенного использование отношения средней яркости анализируемой области изображения к сосредоточенности долей энергии для данной области в виде показателя качества рентгеновского изображения электронного модуля можно считать обоснованным.

4. Для повышения оперативности НРК ЭМ в работе предлагается применить метод формирования рентгеновского мультиизображения ЭМ, базирующийся на сегментации изображений на основе разделения и слияния областей, который соблюдает ограничения по числу рентгеновских изображений одного ЭМ и минимуму затрат на сегментацию.

Автором проведены теоретические исследования возможности автоматического формирования единого изображения ЭМ из сегментов требуемого качества, полученных из набора рентгеновских изображений ЭМ, сформированных при разных параметрах источника рентгеновского излучения. При этом 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; 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 областей, для которых показатель качества имеет требуемое значение на предыдущих РИ. Данный научный результат реализован в разработанном новом программном обеспечении, новизна которого подтверждается свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015618185.

С учетом изложенного научный результат, изложенный в п. 3 выводов по диссертации, заключающийся в том, что 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, можно считать обоснованным.

5. Для решения задачи формирования минимального набора рентгеновских изображений ЭМ, который требуется для обеспечения визуализации внутренней структуры всех функциональных элементов ЭМ, обладающих разным коэффициентом линейного ослабления рентгеновского излучения, опираясь на известные методы рентгенографии, нашедшие применение в других областях, соискателем была разработана методика мультиэнергетической рентгенографии, позволяющая расширить возможности цифровой рентгенографии на исследования внутренней структуры ЭМ и повысить оперативность НРК. Данная методика применима в рамках метода мультиэнергетической рентгенографии, новизна которого защищена патентом на изобретение № 2559167.

В существующих цифровых системах НРК интенсивность $J^И(\lambda)$ 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 цифровой системой НРК является его невысокая точность, так как длина волны и интенсивность потока излучения $J^И(\lambda)$ рентгеновской трубки нелинейно зависят от ее анодного напряжения и тока. Для устранения данного недостатка и установления зависимости интенсивности рентгеновского излучения от параметров источника предложено ввести в контур регулирования источника звено обратной связи на основе датчика (детектора) рентгеновского излучения, новизна которого защищена патентом на изобретение № 2558283, и использовать кубическую интерполяцию полученных значений. Данный результат является новым.

Процедуры формирования набора команд источнику рентгеновского излучения (ИРИ) на основе анализа зависимости значений показателя качества от режима работы ИРИ, выбора набора команд, обеспечивающих получение областей изображений с требуемым качеством, формирования РИ в моменты действия анодных напряжения и тока, соответствующих командам из сформированного набора, на основе метода мультиэнергетической рентгенографии, также

являются новыми результатами, полученными соискателем при разработке методики мультиэнергетической рентгенографии.

Соискателем проведена апробация разработанной методики на базе ЗАО "Научприбор" (г.Орел).

Таким образом, обоснованность результата, изложенного в п. 4 выводов по диссертации, заключающегося в том, что разработана методика мультиэнергетической 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, не вызывает сомнения.

6. Для реализации предложенных структурно-функциональной модели системы НРК, метода формирования рентгеновского мультиизображения ЭМ и методики мультиэнергетической рентгенографии соискателем разработан программно-технический комплекс, в который введены новые подсистемы мониторинга интенсивности излучения, мультиэнергетической рентгенографии и анализа рентгеновских мультиизображений, а также модуль формирования рентгеновского мультиизображения. Введенные подсистемы и модуль реализованы с помощью оригинального программного обеспечения, имеющего соответствующие свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Работоспособность разработанного программно-технического комплекса для повышения оперативности проведения НРК ЭМ различной сложности и обеспечении требуемой точности обнаружения дефектов подтверждается результатами экспериментов и актом от ООО "Забтехсервис" (г. Чита).

Таким образом, данное положение также может быть признано обоснованным.

3. Достоверность и новизна

Достоверность приведенных в диссертации результатов обусловлена корректным использованием общепринятых элементов теории информации, теории множеств, методов цифровой обработки изображений, статистического и корреляционного анализа, сегментации изображений, экспертных оценок. Кроме того, представлены акты о положительных результатах апробации и внедрения результатов исследования в ООО "Забтехсервис" (г. Чита), при разработке малодозовых рентгеновских установок в ЗАО "Научприбор" (г. Орел), а также в учебном процессе Академии ФСО России (г. Орел).

Новизна результатов исследований подтверждается приоритетными публикациями по рассмотренным вопросам, в том числе в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (4 работы). Результаты работы докладывались на многих профильных научно-технических конференциях и семинарах, в том числе международных (9 докладов, подтвержденных публикацией материалов). Новизна полученных на основе исследований технических решений подтверждается двумя патентами Российской Федерации на изобретение и четырьмя свидетельствами о регистрации программ для ЭВМ.

4. Замечания

В качестве замечаний по работе следует отметить следующее.

1. Приведенная в первой главе диссертационной работы классификация цифровых систем неразрушающего контроля электронных модулей с точки зрения цели проводимого исследования является избыточной, при этом в прямую не отражая возможности указанных систем к автоматизации.

2. Вывод о том, что наибольшее влияние на оперативность контроля оказывают значения $t_{ПР}$, $t_{АК}$ и $t_{АД}$, формулируемый соискателем на основании экспертного метода (стр. 31 диссертации), выглядит декларативным, поскольку не подтверждается какими-либо цифровыми данными.

3. Не в явном виде прослеживается взаимосвязь и отличия известной концептуальной модели системы неразрушающего контроля ЭМ и ее структурно-функциональной модели, разработанной соискателем.

4. Приведенный анализ показателей качества изображения и произведенный по его результатам выбор показателя для оценки качества рентгеновских изображений ЭМ не сопровождается пояснением в графической форме, что затрудняет понимание критерия выбора.

5. При обосновании количественного показателя качества области рентгеновского изображения (п. 3.1.4 диссертации) соискатель использует экспертные оценки, рассчитываемые с учетом значимости каждого эксперта. При этом, однако, в диссертации отсутствует информация о численном составе экспертной группы, о квалификации экспертов, значениях оценок их значимости и о степени согласованности мнений экспертов в группе (коэффициенте конкордации), что затрудняет определение корректности полученных экспертных оценок.

6. В главе 4 представлен алгоритм, реализующий задачу распознавания правильности расположения контактных площадок кристалла на основе использования автокорреляционной функции. При этом обоснованность решения этой задачи в рамках исследования не представлена.

7. В качестве пункта научной новизны соискатель указывает на разработанный программно-технический комплекс, обеспечивающий автоматизированный выбор режимов работы источника рентгеновского излучения, формирование единого мультиизображения и его анализ на наличие дефектов электронных модулей. На наш взгляд этот важный результат, являющийся технической реализацией других научных результатов, в большей степени соответствует практической значимости диссертационной работы.

5. Заключение о соответствии диссертации критериям Положения о присуждении ученых степеней

Указанные замечания не снижают общей положительной оценки уровня выполненной работы.

Текст диссертации "Математическое и программно-техническое обеспечение неразрушающего рентгеновского контроля электронных модулей" логически разбит на главы (4 главы), изложен лаконично. Используются общепринятые термины и определения. Графические материалы четко отображают результаты исследований. На используемые заимствованные материалы приведены необходимые ссылки. Диссертация обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, и свидетельствует о личном вкладе автора в науку. Предложенные авто-

