

УДК 004.056:004.932

Концепция автоматизированной системы специального рентгеновского контроля технических средств

Власов К. А., Усатилов С. В.

Постановка задачи: необходимость расширения возможностей существующих программно-аппаратных комплексов по автоматизации и повышению достоверности, производительности и оперативности проведения трудоёмких и требующих достаточно высокой квалификации персонала операций по обнаружению, идентификации и локализации электронных устройств негласного получения информации (закладочных устройств) актуализирует вопросы разработки автоматизированной системы (АС) специального рентгеновского контроля, и одной из первых стадий разработки является создание концепции АС. Обнаружение закладочных устройств осуществляется в результате сравнения и выявления различий имеющихся рентгеновских снимков типовых блоков технических средств (ТС) с реально наблюдаемыми изображениями различных объектов контроля из одной партии ТС. **Цель работы:** синтез структуры и разработка математической модели АС специального рентгеновского контроля при проведении специальных проверок технических средств, размещаемых на различных объектах информатизации. **Используемые методы:** системный анализ процесса обработки рентгенограмм партии ТС при специальных проверках; моделирование и алгоритмизация методами компьютерного зрения и теории оптимизации для обнаружения структурных различий растровых изображений рентгенограмм. **Новизна:** предложена концепция АС, повышающая достоверность и оперативность проведения операций по обнаружению, идентификации и локализации закладочных устройств. Построена математическая модель этапа сравнения рентгеновских снимков объектов контроля из партии ТС и эталонных рентгенограмм, а также этапа выявления различий и выделения аномалий разности эталонного изображения и снимка из партии ТС. **Результат:** проведена алгоритмизация подсистемы совмещения изображений эталонных рентгенограмм и объектов контроля, с модулями сегментации изображений, аффинных преобразований; и подсистемы обнаружения структурных различий растровых изображений рентгенограмм, с модулями оценки разности и классификации «шум/закладка» различий. **Практическая значимость:** выполнена программная реализация алгоритмов подсистемы совмещения и подсистемы выявления различий рентгенограмм для обнаружения, идентификации и локализации закладочных устройств. Представленное решение предлагается реализовать в виде математического обеспечения перспективной АС специального рентгеновского контроля.

Ключевые слова: электронные устройства негласного получения информации, закладочное устройство, автоматизированная система, специальный рентгеновский контроль, аффинные преобразования, генетический алгоритм, сегментация изображений, совмещение изображений и классификация различий, структурные различия растровых изображений.

Актуальность

Для повышения производительности, достоверности и оперативности проведения специальных проверок технических средств (ТС) при специальном рентгеновском контроле, в последнее время всё чаще используются автоматизи-

Библиографическая ссылка на статью:

Власов К. А., Усатилов С. В. Концепция автоматизированной системы специального рентгеновского контроля технических средств // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 5. С. 180-198. DOI: 10.24412/2410-9916-2021-5-180-198

Reference for citation:

Vlasov K. A., Usatikov S. V. The Concept of an Automated System for Special X-ray Control of Technical Equipment. *Systems of Control, Communication and Security*, 2021, no. 5, pp. 180-198 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2021-5-180-198

зированные программно-аппаратные комплексы, которые позволяют при анализе рентгенограмм автоматизировать весьма трудоёмкие и требующие достаточно высокой квалификации персонала операции по обнаружению, идентификации и локализации электронных устройств негласного получения информации – закладочных устройств (ЗУ) [1-7]. При определённых успехах в решении близкой задачи разработки методов эффективного поиска и идентификации модулей радиоканала на кристалле интегральных микросхем [5-6], отечественное специальное программное обеспечение (СПО) разрабатывается в ситуации, когда выявление ЗУ осуществляется в результате сравнения и выявления различий имеющихся рентгеновских снимков (растровых изображений) типовых блоков (или печатных плат) с реально наблюдаемыми изображениями различных объектов контроля из одной партии ТС. Один объект проверяется отдельно и условно принимается за эталон, у которого точно отсутствуют ЗУ, а последующие объекты уже сравнивают с эталоном. Простого попиксельного сличения изображений недостаточно из-за того, что снимки не обязательно должны быть одинаковыми, так как при просвечивании разных ТС возможны следующие искажения: перемещение, сдвиг, поворот, растяжение, сужение и зеркальное отображение. В связи с этим для исследуемого объекта предварительно проводят аффинные преобразования. Возможны случаи, когда на снимке расположено несколько объектов наблюдения, - тогда приходится работать с каждым объектом отдельно. Эти операции требуют значительных временных ресурсов, что может быть критично, когда партия ТС состоит из большого количества образцов.

Из существующих программно-аппаратных комплексов известен «X-Vizor» (ООО "Ньюком-НДТ") [8], предназначенный для цифровой и компьютерной радиографии и зарегистрированный в Едином реестре российских программ для электронных вычислительных машин и баз данных. Включает автоматизированное выделение сварных швов, встроенную систему автоматизированного поиска и определения параметров дефектов технологических трубопроводов, и их отбраковку в соответствии с нормативными документами. Эти ведомственные нормативные документы исчерпывающе определяют параметры, по которым устанавливаются дефекты трубопроводов. Известен также «X-Ray Анализ» (ООО «ИНФОСЕКЬЮР», ЗАО НПЦ Фирма «НЕЛК») [9], предназначенный для хранения и систематизации эталонных оцифрованных рентгеновских изображений (рентгенограмм) объектов контроля и электронной компонентной базы, а также для проведения сравнительного анализа рентгенограмм по отношению к эталонным. Возможности СПО «X-Ray Анализ» предусматривают только использование цифровых алгоритмов обработки рентгеновских изображений для контрастирования изображения, низкочастотной и высокочастотной фильтрации, сшивки рентгеновских изображений, масштабирования по реперным точкам и сравнительного анализа по отношению к эталонным. Такой функциональности СПО недостаточно для автоматизации, с целью повышения достоверности и производительности, процесса обнаружения ЗУ при проведении специальных проверок ТС. Кроме того, целью автоматизации является также повышение вероятности выявления новых неизвестных ЗУ [3-7], без

известных демаскирующих признаков наличия ЗУ типа несоответствия топологии разводки, несоответствия изображений кристаллов и т.п.

Таким образом, аналитический обзор современных методов специального рентгеновского контроля электронных устройств негласного получения информации показывает необходимость разработки автоматизированной системы (АС) выявления на рентгеновских снимках ЗУ при проведении специальных проверок ТС, размещаемых на различных объектах информатизации.

Постановка задачи синтеза структуры автоматизированной системы

Необходимо разработать концепцию АС, расширяющей возможности существующих программно-аппаратных комплексов по автоматизации трудоёмких и требующих достаточно высокой квалификации персонала операций по обнаружению, идентификации и локализации ЗУ. Концепция включает построение математической модели этапа визуального сравнения рентгеновских снимков объектов контроля из партии ТС и эталонных рентгенограмм, а также этапа выявления различий и выделения аномалий разности эталонного изображения и снимка из партии ТС. Необходима алгоритмизация указанных этапов для программной реализации подсистемы сегментации изображений, совмещения изображений эталонных рентгенограмм и объектов контроля партии ТС, подсистемы выявления структурных различий и выделения аномалий разности эталонного изображения и снимка из партии ТС.

Из обоснования необходимости создания АС, требования к АС и требования пользователя к АС [1-2], следует необходимость функционирования подсистем (рис. 1-3):

- сегментации/бинаризации;
- совмещения изображений;
- выявления структурных различий между изображениями эталона и образцов партии ТС;
- классификации найденных различий и выявление вероятных ЗУ.

Для повышения достоверности и производительности специальных проверок формируется библиотека эталонных рентгенограмм типовых элементов ТС.

Подсистема совмещения изображений эталона с объектами контроля

В модуле сегментации растровые изображения (в оттенках серого) эталона и объектов контроля на рентгенограммах представляют собой пиксельные матрицы $\{L_{ij}, 0 \leq i \leq I-1, 0 \leq j \leq J-1\}$, где яркость пикселя $L=0,3R+0,59G+0,11B$ при аддитивной цветовой модели R (красный), G (зеленый) и B (синий), каждый из цветов в пределах от 0 до 255. Размеры изображения (I – ширина, J – высота) в пикселях будем считать одинаковыми для всей партии ТС и эталона.

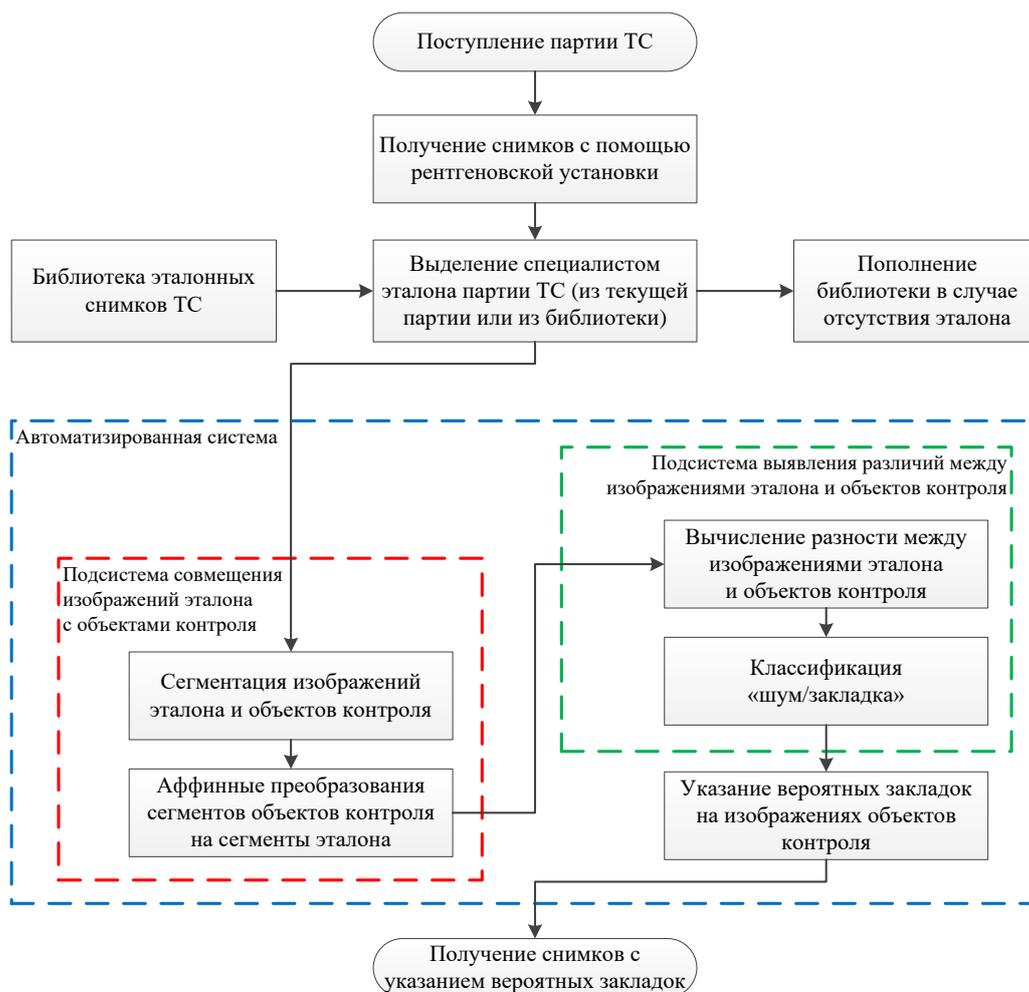


Рис. 1. Общая схема автоматизированной системы специального рентгеновского контроля

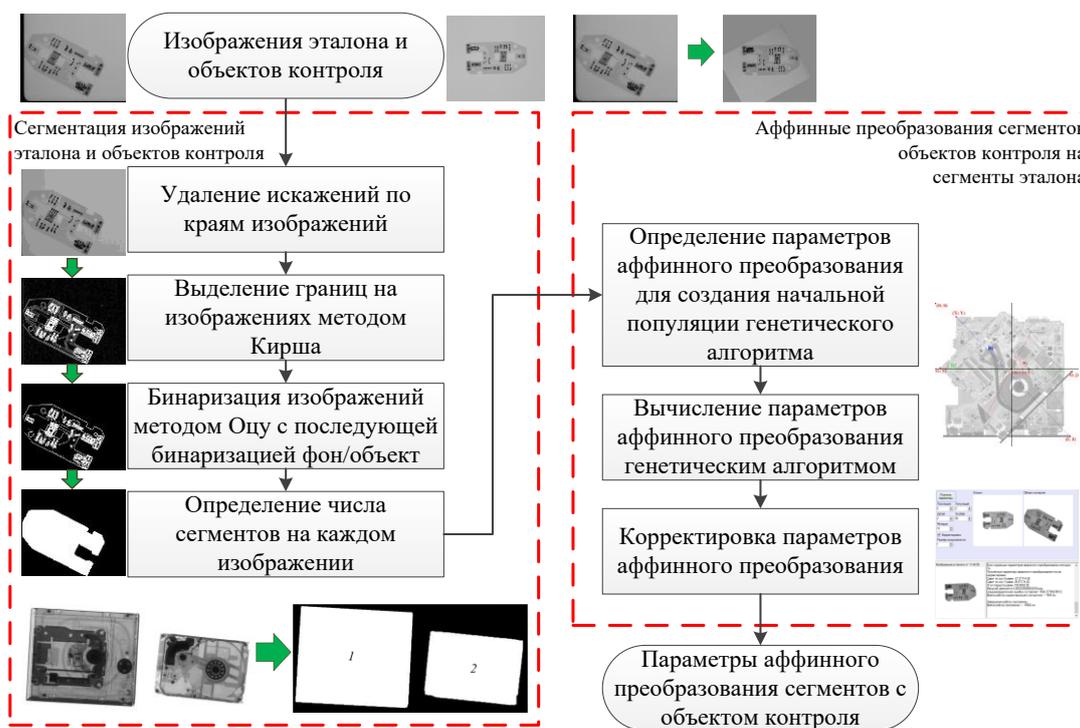


Рис. 2. Схема подсистемы совмещения изображений эталона с объектами контроля

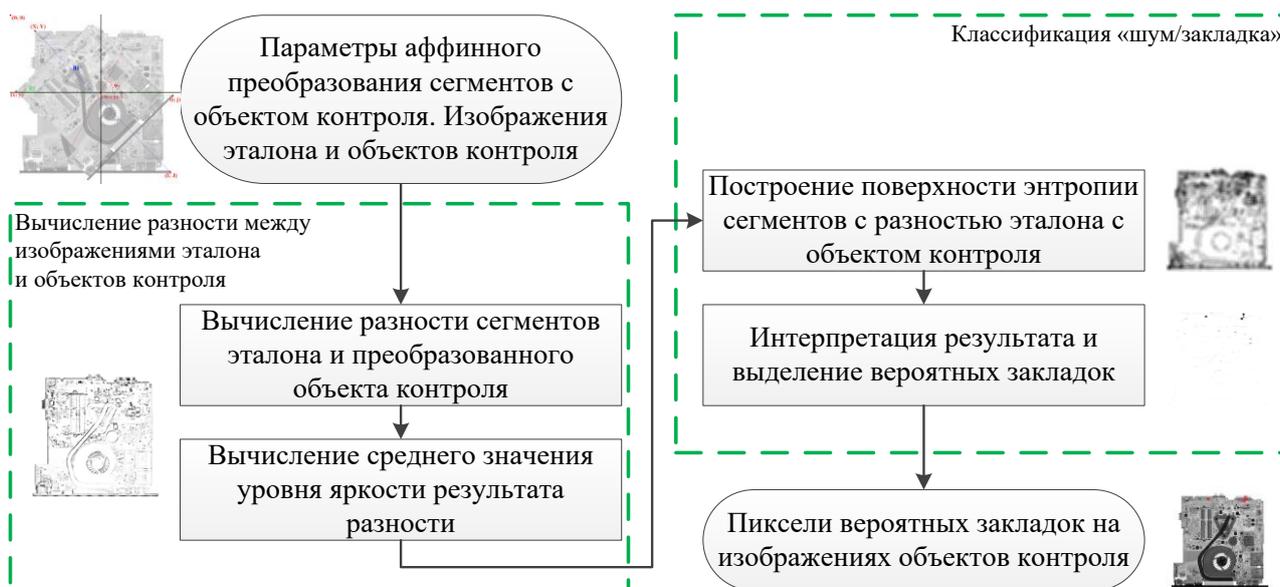


Рис. 3. Схема подсистемы выявления различий между изображениями эталона и объектов контроля

Задача сегментации изображения на связные области с полосами засвечивания Lz , фоном Lf , а также от одного до s объектов Ld_1, \dots, Ld_s заключается в построении бинарной матрицы $\{W_{ij}, 0 \leq i \leq I-1, 0 \leq j \leq J-1\}$:

$$W_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{если } L_{ij} \in Lz \text{ или } L_{ij} \in Lf, \\ 1, & \text{если } L_{ij} \in Ld_1, \text{ или } \dots, L_{ij} \in Ld_s. \end{cases} \quad (1)$$

Сегментация выполняется сначала расчетом среднего значения уровня яркости изображения:

$$C = \frac{1}{I \cdot J} \sum_{i=0}^{I-1} \sum_{j=0}^{J-1} L_{ij}. \quad (2)$$

Затем производится расчет бинарной матрицы искаженных пикселей Wz пороговым методом:

$$Wz_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } L_{ij} \geq 0,5C, \\ 0, & \text{если } L_{ij} < 0,5C. \end{cases} \quad (3)$$

Этим обнуляются те пиксели растрового изображения, которые соответствуют основным чёрным полосам засветки Lz , но останутся края пленки и уголок. Их также нужно обнулить, присвоив 0 нескольким строкам или столбцам, граничащим с краем плёнки.

Для отделения фона Lf требуется определить все граничные точки объектов Ld_1, \dots, Ld_s . Наиболее подходящим оказался метод Кирша [10-11], который границы выделяет максимально контрастно без какого-либо размытия. Затем бинарная матрица Wf фона определяется методом Оцу [11-12]. Итоговая искомая матрица состоит из элементов $W_{ij} = Wz_{ij} \cdot Wf_{ij}$.

В модуле аффинных преобразований (рис. 2) сегментов Vd_1, \dots, Vd_s объектов контроля на сегменты Ed_1, \dots, Ed_s эталона происходит совмещение изображений объектов контроля и эталона. При совмещении изображений происходит пространственное выравнивание парных сегментов Vd_1, \dots, Vd_s с сегментами

Ed_1, \dots, Ed_s так, что для каждой точки первого изображения (объект наблюдения) ищется преобразование, которое ставит в соответствие точку на втором изображении (эталон). Большинство существующих методов направлены на поиск параметров линейного преобразования (подобия, аффинного), однако некоторые приложения содержат и нелинейные преобразования (проективное, полиномиальное, эластичное). В данной работе рассматриваются аффинные преобразования на плоскости [13-15], рис. 4:

$$\begin{aligned} X &= b \left(\left(i - \frac{I}{2} \right) \cos \varphi - \left(j - \frac{J}{2} \right) \sin \varphi \right) + a_1 + \frac{I}{2}, \\ Y &= b \left(\left(i - \frac{I}{2} \right) \sin \varphi + \left(j - \frac{J}{2} \right) \cos \varphi \right) + a_2 + \frac{J}{2}, \end{aligned} \quad (4)$$

где: i, j – координаты пикселей каждого из сегментов с объектами контроля; X, Y – преобразованные координаты, от которых требуется максимальное совпадение с координатами соответствующих пикселей сегментов эталона. Это максимально возможное совпадение должно быть обеспечено поиском оптимальных значений параметров a_1 – коэффициент перемещения образца по оси абсцисс; a_2 – коэффициент перемещения образца по оси ординат; b – коэффициент масштабирования общего снимка по двум осям; φ – угол поворота общего снимка.

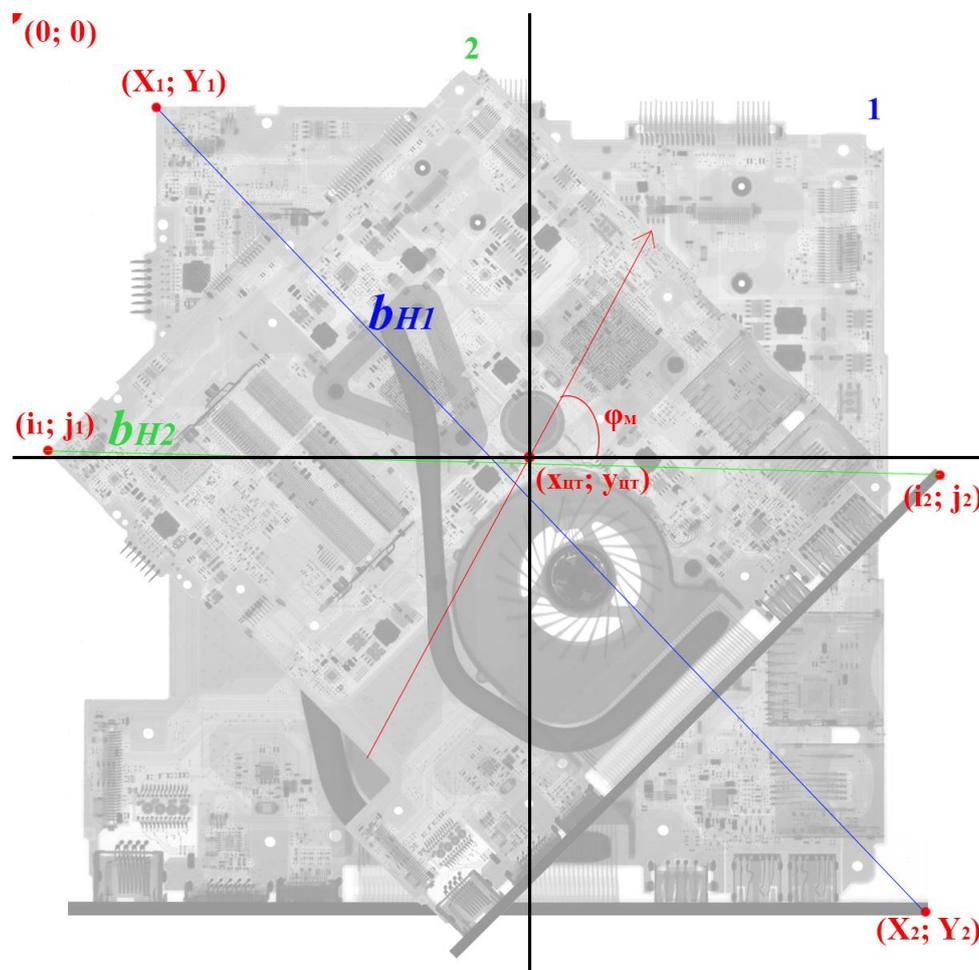


Рис. 4. Пример поиска параметров аффинного преобразования:
1 – эталон, 2 – объект контроля

Отметим, что координаты (X, Y) в общем случае не попадают в узлы дискретной сетки, и это является источником неустранимых ошибок интерполяции: возникает задача нахождения соответствующего значения яркости узлов дискретной сетки по известным яркостям точек (X, Y) . Чаще всего она решается с помощью методов двумерной интерполяции: прямоугольная, билинейная, бикубическая [14]. В данной работе используется бикубическая интерполяция, и далее ниже под (X, Y) понимаются интерполированные координаты.

В результате аффинного преобразования (4) и интерполяции каждого из сегментов Vd_1, \dots, Vd_s бинарная матрица рентгенограммы объекта контроля W_{ij} перейдет в бинарную $Win(a_1, a_2, b, \varphi)_{XY}$, а пиксельная матрица V_{ij} рентгенограммы объекта контроля в оттенках серого перейдет в $Vin(a_1, a_2, b, \varphi)_{XY}$. От матриц $Win(a_1, a_2, b, \varphi)_{XY}$ и $Vin(a_1, a_2, b, \varphi)_{XY}$ требуется максимальное возможное совпадение с соответствующими эталонными матрицами Wet_{XY} и E_{XY} пикселей сегментов эталона. Для решения задачи совмещения изображения необходимо решить оптимизационную задачу поиска параметров a_1, a_2, b, φ , которые доставляют экстремумы следующим целевым функциям (функциям фитнеса):

$$FW(a_1, a_2, b, \varphi) = \frac{1}{I \cdot J} \sum_{i=0}^{I-1} \sum_{j=0}^{J-1} Win(a_1, a_2, b, \varphi)_{ij} \cdot Wet_{ij} \rightarrow \max_{a_1, a_2, b, \varphi} \quad (5)$$

$$F(a_1, a_2, b, \varphi) = \frac{1}{I \cdot J} \sum_{i=0}^{I-1} \sum_{j=0}^{J-1} (Vin(a_1, a_2, b, \varphi)_{ij} - E_{ij})^2 \rightarrow \min_{a_1, a_2, b, \varphi} \quad (6)$$

Иными словами, требуется найти такие параметры a_1, a_2, b, φ , при которых наложение сегмента объекта контроля на сегмент эталона будет максимально точным, в идеале с совпадающими пикселями. Целевая функция (5) обеспечивает высокую скорость поиска параметров a_1, a_2, b, φ , но из-за бинаризации изображений не учитывается внутренняя структура объекта контроля, что может привести к грубым ошибкам. Поэтому требуется дополнительная корректировка параметров сдвига a_1, a_2 и угла поворота φ через поиск минимума целевой функции (6).

Решение задачи оптимизации осуществляется с помощью генетического алгоритма [16-17], вид которого показан на рис. 5. В теории генетических алгоритмов используется биологическая терминология в упрощенном виде:

- особь – совокупность хромосом (значений параметров целевой функции);
- популяция – совокупность (множество) особей;
- хромосома – решение рассматриваемой проблемы, носитель наследственной информации;
- приспособленность особи – значение функции фитнеса (5) или (6) для данного набора хромосом;
- селекция – выбор особей с наилучшей приспособленностью для воспроизводства (сортировка по значению целевой функции);
- кроссовер (скрещивание) – получение генотипа потомка по двум родительским особям;
- мутация – случайное изменение хромосом в особи.

Вычисление параметров аффинного преобразования производится согласно общей схеме работы генетического алгоритма, представленной рис. 5. Оно продолжается до тех пор, пока не будет найдено решение задачи или не пройдено определенное количество поколений. Затем по такой же схеме проводится корректировка найденных параметров.

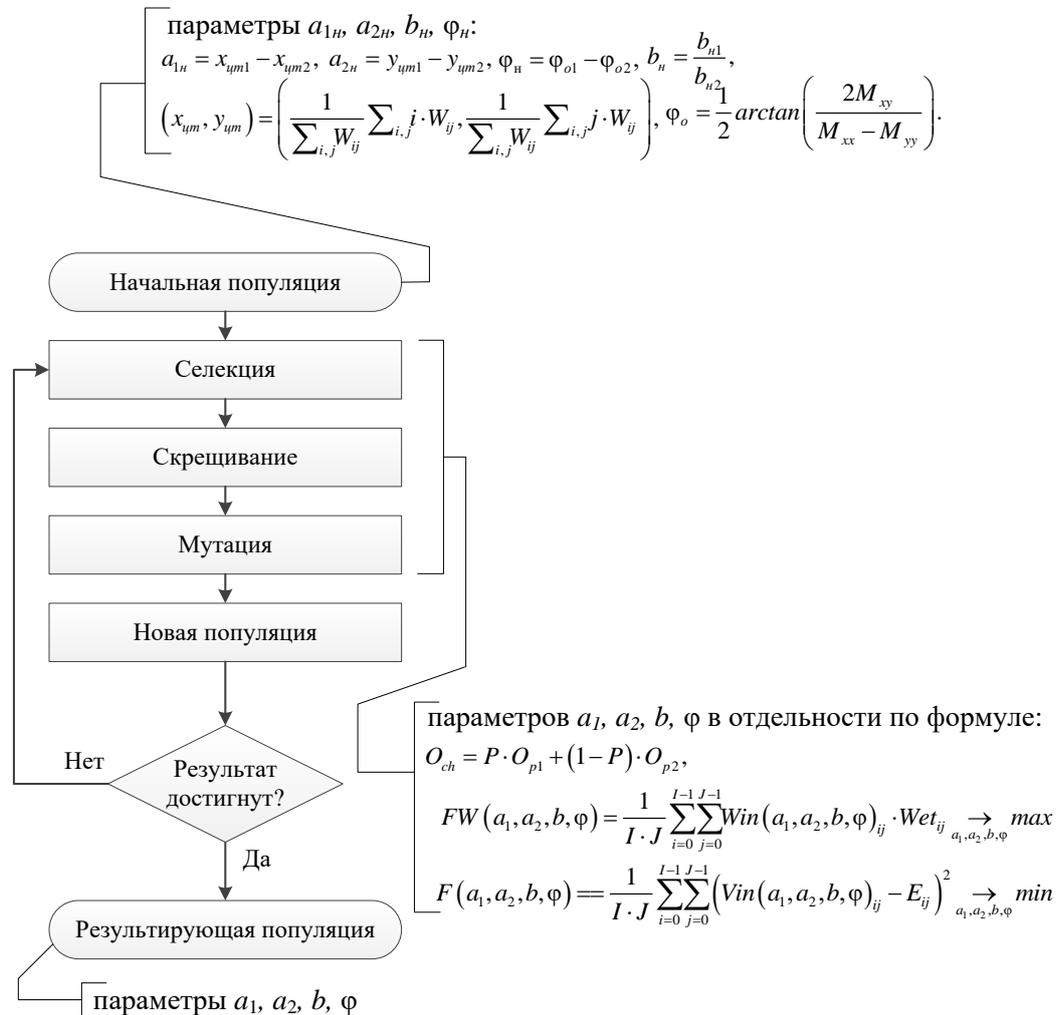


Рис. 5. Общая схема работы генетического алгоритма

Для генерации начальной популяции необходимо создать определенное количество возможных особей (начальную популяцию) со значениями, распределенных в окрестности приближенных параметров $a_{1n}, a_{2n}, b_n, \varphi_n$.

Приближенные значения a_{1n}, a_{2n} можно вычислить путем разности координат центров тяжести $x_{цм}, y_{цм}$ изображений эталона и объекта контроля:

$$a_{1n} = x_{цм1} - x_{цм2}, \tag{7}$$

$$a_{2n} = y_{цм1} - y_{цм2}, \tag{8}$$

где: $x_{цм1}, y_{цм1}$ – координаты центра тяжести изображения эталона; $x_{цм2}, y_{цм2}$ – координаты центра тяжести изображения объекта контроля.

Координаты x_{um} , y_{um} для каждого изображения вычисляются следующим образом:

$$(x_{um}, y_{um}) = \left(\frac{1}{\sum_{i,j} W_{ij}} \sum_{i,j} i \cdot W_{ij}, \frac{1}{\sum_{i,j} W_{ij}} \sum_{i,j} j \cdot W_{ij} \right). \quad (9)$$

Угол поворота φ_n вычисляется из разности ориентаций главных осей момента инерции изображений эталона и объекта контроля:

$$\varphi_n = \varphi_{o1} - \varphi_{o2}, \quad (10)$$

где: φ_{o1} – угол ориентации главной оси момента инерции изображения эталона; φ_{o2} – угол ориентации главной оси момента инерции изображения объекта контроля.

Угол ориентации φ_o для каждого изображения вычисляется по формуле:

$$\varphi_o = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{2M_{xy}}{M_{xx} - M_{yy}} \right), \quad (11)$$

где: M_{xx} – центральный момент второго порядка по строке; M_{yy} – центральный момент второго порядка по столбцу; M_{xy} – смешанный центральный момент второго порядка.

Центральные моменты второго порядка M_{xx} , M_{yy} , M_{xy} вычисляются следующим образом:

$$\{M_{xx}, M_{yy}, M_{xy}\} = \frac{1}{\sum_{i,j} W_{ij}} \left\{ \sum_{i,j} (i - x_{um})^2 W_{ij}, \sum_{i,j} (j - y_{um})^2 W_{ij}, \sum_{i,j} (i - x_{um})(j - y_{um}) W_{ij} \right\}. \quad (12)$$

Значение масштабирования b_n определяется по отношению наибольших диагоналей (максимальное расстояние между любыми двумя точками, принадлежащих области наблюдения) изображений эталона и объекта контроля:

$$b_n = \frac{b_{n1}}{b_{n2}}, \quad (13)$$

где: b_{n1} – наибольшая диагональ изображения эталона; b_{n2} – наибольшая диагональ изображения объекта контроля.

На этапе вычисления параметров аффинного преобразования после создания начальной популяции или нового поколения требуется вычислить для каждой особи приспособленность по (5). Затем производится сортировка особей от наибольшего значения к наименьшему и селекция. На этапе корректировки параметров a_1 , a_2 , φ приспособленность особи вычисляется по формуле (6), и в этом случае сортировка уже производится от наименьшего значения к наибольшему.

Текущее поколение дает новое потомство. На этом этапе каждая особь популяции скрещивается с произвольной особью популяции, входящей в число 20 % лучших, по каждому из параметров a_1 , a_2 , b , φ в отдельности по формуле:

$$O_{ch} = P \cdot O_{p1} + (1 - P) \cdot O_{p2}, \quad (14)$$

где P – случайное число с плавающей точкой в пределах от 0 до 1; O_{p1} , O_{p2} – скрещиваемые параметры родительских хромосом; O_{ch} – результирующий параметр дочерней хромосомы. Более приспособленные особи имеют

большой шанс к воспроизводству, а «слабые» особи постепенно «отмирают». Таким образом, происходит процесс эволюции.

На этапе мутации с некоторой вероятностью происходит изменение хромосом особи в зависимости от её приспособленности. Чем хуже приспособленность, тем сильнее мутация. Полезные изменения, приводящие к увеличению приспособленности особи, дают свое потомство, в то время как «бесполезные» изменения «отмирают». После скрещивания и мутации высчитывается целевая функция для каждой особи потомка, и в следующее поколение новой популяции переходят лучшие 25 % родительских особей и 75 % дочерних особей.

Пример работы подсистемы совмещения предлагаемой АС специального рентгеновского контроля при проведении специальных проверок ТС представлен рис. 6. Как видно, в данном примере преобразованный объект контроля полностью соответствует эталонному изображению.

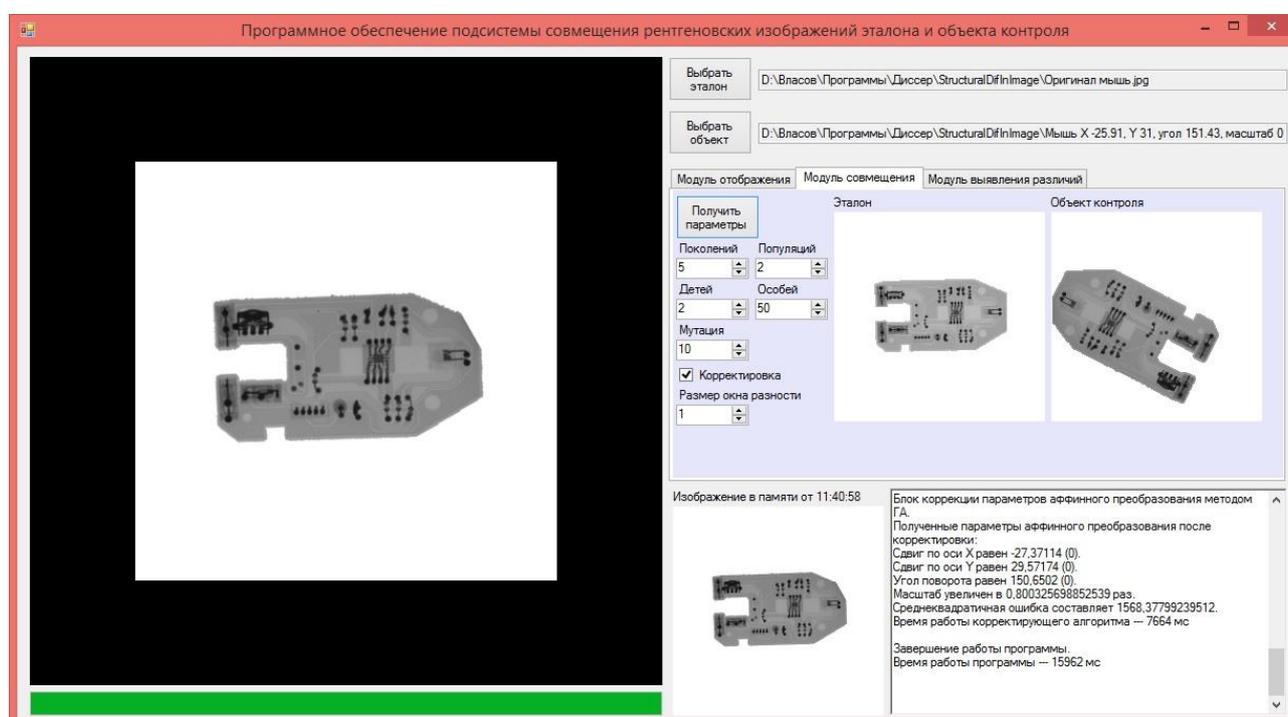


Рис. 6. Главное окно программы с результатом проведения аффинных преобразований

Подсистема выявления структурных различий между изображениями эталона и объектов контроля

После совмещения двух изображений необходимо решить задачу поиска различий двух изображений на наличие ЗУ, то есть решить задачу локализации на изображениях изменений, произошедших вследствие появления или исчезновения объектов в наблюдаемой сцене. При этом важно, чтобы алгоритм, решающий эту задачу, выявлял структурные различия. Под различиями здесь понимаются существенные изменения цветности, исчезновения или изменения формы объектов. При этом изменения освещенности объектов структурными различиями не считаются [18-19].

Входными данными для подсистемы являются два полутоновых изображения (E эталон и Vin объект контроля). Предполагается, что они геометрически выровнены и имеют одинаковый размер в пикселях (аффинные преобразования объекта контроля проведены корректно). Геометрическая выравненность означает, что каждый пиксель соответствует одной и той же области на обоих изображениях. Основными подходами к решению этой задачи являются методы попиксельного анализа, не учитывающие специфику объектов; методы, основанные на анализе контуров объектов и методы, основанные на текстурной классификации [19-21]. В данной работе рассматриваются методы попиксельного анализа.

При наличии ЗУ изображающие их пиксели окажутся среди ненулевых элементов матрицы разности между изображениями эталона и объектов контроля – в частности, попиксельной разности Rp для каждого из сегментов Ed_1, \dots, Ed_s :

$$Rp_{ij} = |Vin(a_1, a_2, b, \varphi)_{ij} - E_{ij}|, \quad (15)$$

Но среди ненулевых по (15) элементов Rp также содержится «шум» из-за ошибок интерполяции после аффинных преобразований и ошибок совмещения (из-за неточностей определения границ фона и пр.), причём яркость «шумов» может быть настолько высокой, что вероятные ЗУ не выделяются на фоне шумов. Поэтому необходимо решить следующую задачу бинарной классификации «шум/закладка».

Пусть множество описаний объектов S и признаков пространство состоит из элементов матрицы разности $\{R_{ij}, 0 \leq i \leq I-1, 0 \leq j \leq J-1\}$ между изображениями E эталона и Vin объектов контроля. Множество номеров (или наименований) классов $K = \{\text{ЗУ, ошибки интерполяции и совмещения}\} = \{1, 0\}$ вместе с S образует вероятностное пространство с элементарными исходами $S \times K$. Существует неизвестная целевая зависимость — неизвестная вероятностная мера P : σ -алгебра $S \times K \rightarrow R$ (множество вещественных чисел), оцениваемая по указаниям экспертов, проводящих специальные проверки ТС. Одна из трудностей в том, что эта оценка P не может быть проведена по ведомственным нормативным документам (по демаскирующим признакам ЗУ и др.), исчерпывающе определяющим конечную обучающую выборку наблюдений, сгенерированную согласно этой вероятностной мере P . Возможно указание только общих черт P на каждом из классов «ЗУ»=1 и «ошибки интерполяции и совмещения»=0: таких, как хаотичность пикселей «шума» и определённая упорядоченность «ЗУ». Требуется построить алгоритм $ALG: S \rightarrow K$, способный классифицировать произвольный $el \in S$ (т.е. указать номер или наименование класса, к которому относится данный элемент $el \in \{R_{ij}, 0 \leq i \leq I-1, 0 \leq j \leq J-1\}$).

Решение задачи классификации предлагается проводить на основе следующей разновидности метода окна Парзена-Розенблатта [19-22]. Матрица разности имеет вид:

$$R_{ij} = \frac{1}{(2r+1)^2} \sum_{m=i-r}^{m=i+r} \sum_{n=j-r}^{n=j+r} |Vin(a_1, a_2, b, \varphi)_{mn} - E_{mn}|. \quad (16)$$

Расчет ведется не по отдельно взятым пикселям, а по окну (ядру) с радиусом r вокруг точек изображений $i \in [r; a - r - 1]$, $j \in [r; b - r - 1]$. Отметим, что $(2r + 1)^2$ равняется количеству пикселей, попавших в рассматриваемое окно. Размер окна (полосы пропускания) определяется либо по эмпирическому правилу для выбора полосы пропускания, либо методами подключаемых выборочных функций или функций перекрёстной валидации. Для (16) целесообразно применять контрастирование, лучше выделяющее аномалии в разностном изображении:

$$R_{ij} = \left(col \cdot \frac{R_{ij}}{Cr} \right)^d, \quad (17)$$

где $Cr = \frac{1}{I \cdot J} \sum_{i=0}^{I-1} \sum_{j=0}^{J-1} R_{ij}$ – среднее значение уровня яркости точек матрицы R , col – коэффициент влияния цвета; d – степень усиления. Значения констант col и d подбираются эмпирически.

Далее необходимо осуществить энтропийное кодирование изображений, а именно вычислить карту локальной энтропии для пиксельной матрицы разностного изображения R . Для этого матрица R разбивается на i - j -окна, а окна на ячейки x - y ; кроме того, выделяется $NS+1$ штук k -промежутков оттенков серого LS_k , где $k \in [0; NS]$: $LS_k = [k \cdot Cr; (k+1) \cdot Cr]$, $LS_N = [NS \cdot Cr; 255]$; или в случае присутствия в разностном изображении отрицательных значений:

$$LS_0 = [-255; -NS \cdot Cr], \quad LS_k = [-(k+1) \cdot Cr; -k \cdot Cr], \text{ если } k < NS, \quad LS_N = [-Cr; 0], \\ LS_{N+1} = [0; Cr], \quad LS_k = [k \cdot Cr; (k+1) \cdot Cr], \text{ если } k > NS, \quad LS_{2k+1} = [NS \cdot Cr; 255].$$

Задаётся размер окна (полосы пропускания): размер ячейки в пикселях $q = 2n + 1$, где $n = 1, 2, 3$ и т.д.; количество ячеек в ряду окна $z = 2n - 1$, где $n = 1, 2, 3$ и т.д. Особое внимание на нечетность представленных параметров. Это было сделано для того, чтобы пиксель с координатами (i, j) находился ровно в центре окна, тогда энтропия вокруг пикселя будет высчитываться корректно. На основе параметров q и z вычисляется радиус окна $u = (qz - 1) / 2$ с центром в точке (i, j) и общее количество пикселей в окне $N = (qz)^2$. Затем вычисляется количество пикселей $n_{(ij)xyk}$ того или иного промежутка LS_k в ячейке с координатами (x, y) выбранного окна с центром в точке (i, j) и радиусом u :

$$n_{(ij)xyk} = \sum_{x=0}^{x=z-1} \sum_{y=0}^{y=z-1} \sum_{m=i-u+qx}^{m=i-u+q(x+1)-1} \sum_{n=j-u+qy}^{n=j-u+q(y+1)-1} \begin{cases} 1 \text{ при } R_{mn} \in LS_k \\ 0 \text{ при } R_{mn} \notin LS_k \end{cases} \quad (18)$$

Зная распределение пикселей по яркости, можно рассчитать вероятность $P_{(ij)xyk}$ появления того или иного оттенка серого LS_k в ячейке с координатами (x, y) выбранного окна с центром в точке (i, j) и радиусом u : $P_{(ij)xyk} = n_{(ij)xyk} / N$. Теперь можно рассчитать значение энтропии H_{ij} в окне с центром в точке (i, j) и радиусом u :

$$H_{ij} = - \sum_{x=0}^{x=z-1} \sum_{y=0}^{y=z-1-k} \sum_{k=0}^{k=K} p_{(ij)xyk} \cdot \ln(p_{(ij)xyk}). \quad (19)$$

Для визуализации поверхности энтропии в виде изображения (карты линий уровня), «цвет» L_{ε} энтропии в каждой точке изображения нормируется от 0 до 255.

$$L_{\varepsilon ij} = 255 \frac{H_{ij} - H_{min}}{H_{max} - H_{min}}, \quad (20)$$

где H_{max}, H_{min} – максимальное и минимальное значения энтропии во всём разностном изображении.

Например, количество ячеек в ряду окна $z = 5$, размера ячейки $q = 3$, количество промежутков оттенков серого $S_k K = 10$, радиус окна разности $r = 3$. Изображение карты энтропии представлено на рис. 7.

Так как рис. 7 представлен в негативе, то можно сделать вывод, что чем цвет светлее, тем меньше значение энтропии, а чем темнее, тем больше значение энтропии. Аномалии принимают однозначный черный цвет, так как энтропия в этих местах максимальна, поэтому для выделения этих зон на фоне шумов у разностного изображения R вычитаем значения энтропии согласно построенной карте (расчет ведется по всем точкам $i \in [r; a-r-1], j \in [r; b-r-1]$): $R_{ij} = 2R_{ij} - (255 - L_{\varepsilon ij})$. Если $R_{ij} < 0$, тогда этому пикселю присвоится значение 0 (черный цвет). Следует обратить внимание, что предыдущее значение разностного изображения R удваивается, так как в противном случае карта энтропии стирает все аномалии. Чтобы увидеть результат разности (убирается практически весь шум, а аномалии плохо видны) достаточно применить контрастирование по (17) или выполнить бинаризацию методом Оцу. Затем полученные аномалии выделяются на изображении объекта контроля. Результат представлен на рис. 8.

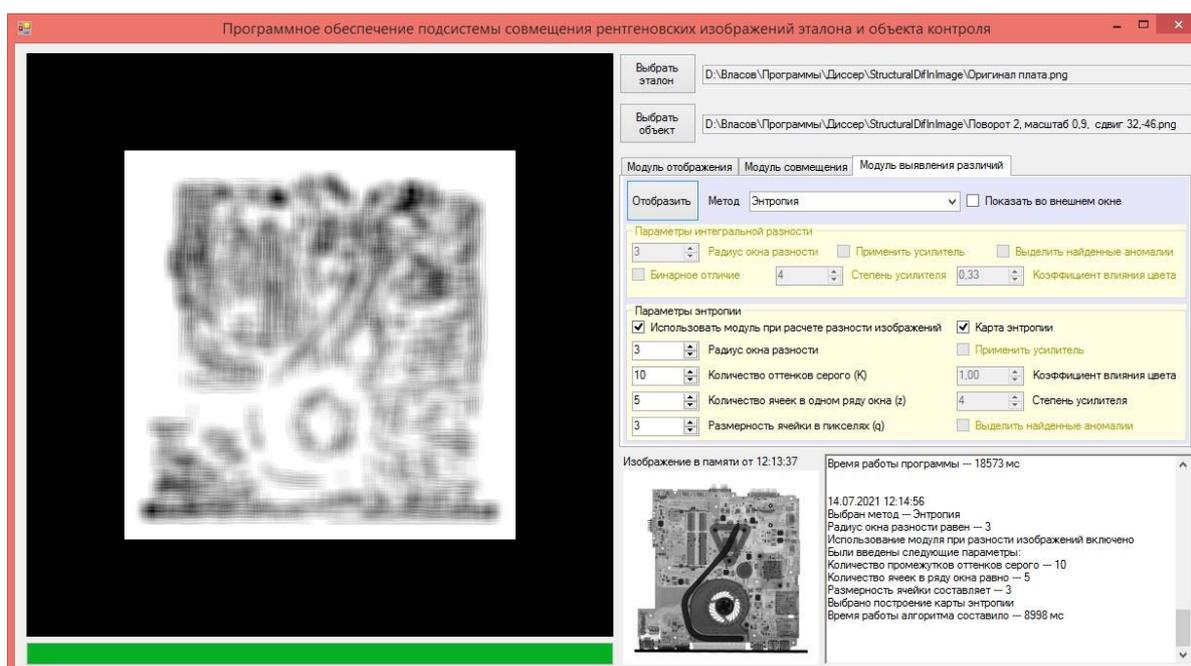


Рис. 7. Карта энтропии при расчете разностного изображения по (16)

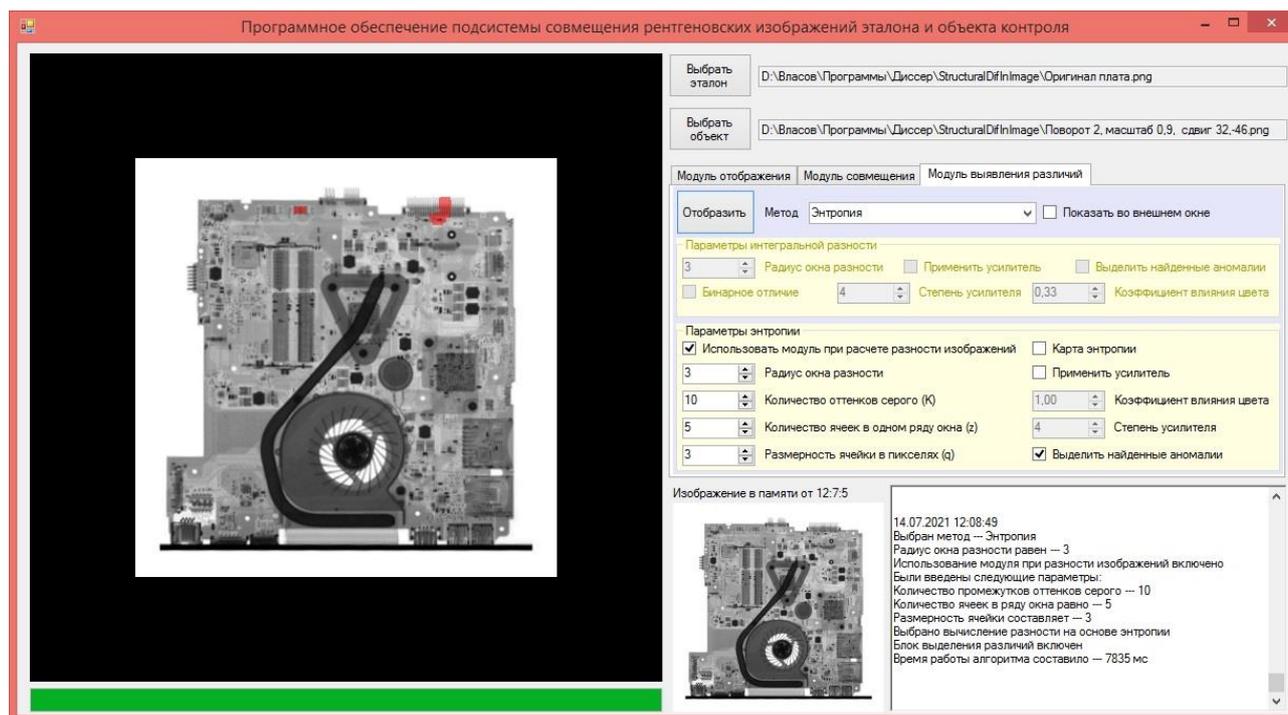


Рис. 8. Выявление структурных различий между изображениями эталона и объекта – в окне слева ЗУ выделены красным цветом

Выводы

Представленная концепция АС специального рентгеновского контроля при проведении специальных проверок технических средств, размещаемых на различных объектах информатизации, включает математическую модель подсистемы совмещения изображений эталонных рентгенограмм и объектов контроля и подсистемы обнаружения структурных различий растровых изображений рентгенограмм. На этой основе планируется разработка математического обеспечения АС, расширяющей возможности существующих программно-аппаратных комплексов по автоматизации и повышению достоверности, производительности и оперативности проведения трудоёмких и требующих достаточно высокой квалификации персонала операций по обнаружению, идентификации и локализации электронных устройств негласного получения информации (закладочных устройств).

Элементами новизны представленного решения является алгоритмизация модулей сегментации изображений, аффинных преобразований; модуля выделения аномалий разности эталонного изображения и снимка из партии ТС; и классификации «шум/закладка».

Для оценки эффективности и демонстрации работы АС специального рентгеновского контроля ТС на основе предлагаемого математического обеспечения реализован программный модуль, способный на выполнение автоматического аффинного преобразования и проведения совмещения изображений эталона и объекта контроля для классификации полученных различий рентгенограмм и выявления ЗУ. В дальнейшем планируется реализовать представленное решение в виде математического обеспечения перспективной АС специального

рентгеновского контроля, с проведением вычислительного эксперимента по оценке эффективности, точности и скорости проведения операций по обнаружению, идентификации и локализации ЗУ при проведении специальных проверок партий ТС, размещаемых на различных объектах информатизации.

Литература

1. Хорев А. А. Техническая защита информации. Т.1: Технические каналы утечки информации. – М.: НПЦ "Аналитика", 2008. – 436 с.
2. Давыдов А. Е., Максимов Р. В., Савицкий О. К. Защита и безопасность ведомственных интегрированных инфокоммуникационных систем – М.: ОАО Воентелеком, 2015. – 520 с.
3. Courtland R., 3D X-ray tech for easy reverse engineering of ICs // IEEE Spectrum. 2017. Vol. 54. № 5. P. 11-12. doi:10.1109/MSPEC.2017.7906884.
4. Swierczynski P., Fyrbiak M., Paar C., Huriaux C., Tessier R. Protecting against Cryptographic Trojans in FPGAs // 23rd IEEE Annual International Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines. – Canada, Vancouver, 2015. P. 151-154. doi:10.1109/FCCM.2015.55.
5. Лучинин В. В., Гасников А. О. Анализ возможных методов поиска и идентификации блока радиоканала на кристалле интегральной микросхемы // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2012. № 8. С. 14-19.
6. Лучинин В. В. Эволюция вакуумной электроники. Микро- и наноразмерные системы и технологии // Нано- и микросистемная техника. 2019. Т. 21. № 2. С. 67-72. doi: 10.17587/nmst.21.67-72.
7. Филиппов А. С. Разработка методики по выявлению электронных устройств негласного получения информации, использующих узлы и блоки средств беспроводной связи // Концепции современного образования: новации в системе научного знания. Сборник научных трудов. – Казань, 2020. – С. 301-306.
8. Программа для получения и обработки рентгеновских изображений X-Vizor // Общество с ограниченной ответственностью "Ньюком-НДТ" [Электронный ресурс]. 29.04.2016. – URL: <https://newcom-ndt.ru/x-vizor> (дата обращения: 22.09.2021).
9. X-RAY Анализ. Комплект для анализа рентгеновских снимков технических средств, прошедших специальную проверку // Закрытое акционерное общество Научно-производственный центр Фирма «НЕЛК» [Электронный ресурс]. 26.09.2018. – URL: https://nelk.ru/catalog/tehnicheskie_sredstva_poiska_kanalov_utechki_informatsii/sredstva_spetsialnogo_rentgenovskogo_kontrolya/x-ray-analiz/ (дата обращения: 22.02.2021).
10. Джо К. О., Гергет О. М. Методы и алгоритмы сегментации изображений // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2020. № 2 (8). 2020. С. 11-16. doi: 10.30987/2658-6436-2020-2-11-16.
11. Хаустов П. А. Алгоритмы распознавания рукописных символов на основе построения структурных моделей // Компьютерная оптика. 2017. № 1. Т. 41. С. 67-78. doi: 10.18287/2412-6179-2017-41-1-67-78.
12. Захарова А. М., Сиволобов С. В. Исследование методов Оцу и Брэдли для бинаризации изображения печатной платы // Интеллектуальные

информационные системы. Труды Международной научно-практической конференции. В 2-х частях. – Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2018. – С. 60-64.

13. Красник Е. В., Трушлякова В. В. Применение аффинного преобразования для совмещения совокупности растровых изображений слоев интегральной схемы // Известия Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета ЛЭТИ. Серия «Физика твёрдого тела». 2008. № 3. С. 19-25.

14. Нгуен В. Ч., Тропченко А. А. Анализ методов интерполяции в задачах реконструкции изображений // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2017. № 3. С. 170-181.

15. Мамедов Р. К., Алиев Т. Ч., Муталлимова А. С. Распознавание бинарных изображений объектов, подвергнутых аффинным преобразованиям // Информационные технологии. 2016. Т. 22. № 10. С. 754-757.

16. Mikhalev A. S., Rouban A. I. Global optimization on set of mixed variables: continuous and discrete with unordered possible values // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. doi: 10.1088/1757-899X/122/1/012024.

17. Мараев В. С., Беззубенко Е. А., Черкашин Д. А., Михалев А. С. Исследование эффективности генетического алгоритма с различными методами селекции, типами кроссовера и стратегиями формирования поколений при поиске экстремумов функций // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2017. № 2 (17). С. 12.

18. Костоусов В. Б., Перевалов Д. С. Морфологический проектор в метрике L_0 и задача локализации структурных различий изображений // Труды института математики и механики УРО РАН. 2017. Т. 23. № 1. С. 171-187.

19. Сирота А. А., Донских А. О., Акимов А. В., Минаков Д. А. Смешанные ядерные оценки многомерных распределений и их применение в задачах машинного обучения для классификации биологических объектов на основе спектральных измерений // Компьютерная оптика. 2019. Т. 43. № 4. С. 677-691. doi: 10.18287/2412-6179-2019-43-4-677-691.

20. Воронов С. В., Воронов И. В. Сокращение вычислительных затрат при оценке энтропии цифровых изображений // Радиоэлектронная техника. 2015. № 1 (7). С. 110-113.

21. Куликов В. Б. Анализ методов идентификации законов распределения случайных величин и процессов. Новые методы идентификации на основе алгоритмов регуляризации // Cloud of science. 2019. Т. 6. № 4. С. 565-589.

22. Румянцев А. А., Бикмуратов Ф. М., Пашин Н. П., Голованов Р. А. Оценка энтропии фрагментов рентгеновских изображений легких // Инженерный вестник Дона. 2019. № 9 (60). С. 23.

References

1. Horev A. A. *Tehnicheskaja zashhita informacii. Tehnicheskie kanaly utechki informacii* [Technical Protection of Information. Technical Channels of Information Leakage]. Moscow, 2008. 436 p. (in Russian).

2. Davydov A. E., Maksimov R. V., Savickij O. K. *Zashhita i bezopasnost' vedomstvennyh integrirovannyh infokommunikacionnyh system* [Protection and

security of departmental integrated infocommunication systems]. Moscow, 2015. 520 p. (in Russian).

3. Courtland R. 3D X-ray tech for easy reverse engineering of ICs. *IEEE Spectrum*, May 2017, vol. 54, no. 5, pp. 11-12. doi: 10.1109/MSPEC.2017.7906884.

4. Swierczynski P., Fyrbiak M., Paar C., Huriaux C., Tessier R. Protecting against Cryptographic Trojans in FPGAs. *IEEE 23rd Annual International Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines*, Vancouver, BC, Canada, 2015, pp. 151-154. doi:10.1109/FCCM.2015.55.

5. Luchinin V. V., Gasnikov A. O. Analysis of the Possible Methods for Search and Identification of the Unit Crystal Radio Channel on the Integrated Circuits. *Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University*, 2012, no. 8, pp. 14-19 (in Russian).

6. Luchinin V. V. Evolution of Vacuum Electronics Micro and Nanoscale Systems and Technologies. *Nano and Microsystems Technology Journal*, 2019, vol. 21, no. 2, pp. 67-72. doi:10.17587/nmst.21.67-72. doi:10.17587/nmst.21.67-72 (in Russian).

7. Filippov A. S. Razrabotka metodiki po vyjavleniju jelektronnyh ustrojstv neglasnogo poluchenija informacii, ispol'zujushhikh uzly i bloki sredstv besprovodnoj svyazi [Development of a Methodology for Identifying Electronic Devices for Secretly Obtaining Information Using Nodes and Blocks of Wireless Communication Means]. *Koncepcii sovremennogo obrazovaniya: novacii v sisteme nauchnogo znaniya. Sbornik nauchnyh trudov*. Kazan, 2020, pp. 301-306 (in Russian).

8. Programma dlja poluchenija i obrabotki rentgenovskih izobrazhenij X-Vizor [Program for Obtaining and Processing X-ray Images X-Vizor]. LLC «N'jukom-NDT». Available at: <https://newcom-ndt.ru/x-vizor 476070> (accessed 22.02.2021).

9. X-RAY Analiz. Komplekt dlja analiza rentgenovskih snimkov tehniceskikh sredstv, proshedshih special'nuju proverku. Zakrytoe akcionerное obshhestvo Nauchno-proizvodstvennyj centr Firma «NELK» [CJSC Scientific and Production Center Firm «NELK»]. Available at: https://nelk.ru/catalog/tehnicheskie_sredstva_poiska_kanalov_utechki_informatsii/sredstva_spetsialnogo_rentgenovskogo_kontrolya/x-ray-analiz/ (accessed: 22.02.2021).

10. Joe K. O., Gerget O. M. Methods and Algorithms for Image Segmentation. *Automation and Modeling in Design and Management*, 2020, no. 2 (8), pp. 11-16 (in Russian). doi: 10.30987/2658-6436-2020-2-11-16.

11. Haustov P. A. Algorithms for Handwritten Character Recognition Based on Constructing Structural Models. *Computer optics*, 2017, vol. 41, no. 1, pp. 67-78 (in Russian). doi: 10.18287/2412-6179-2017-41-1-67-78.

12. Zaharova A. M., Sivolobov S. V. Issledovanie metodov Ocu i Brjedli dlja binarizacii izobrazhenija pechatnoj platy [Investigation of Otsu and Bradley Methods for the Image Binarization of a Printed Circuit Board]. *Intellektual'nye informacionnye sistemy. Trudy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii*, 2018, pp. 60-64 (in Russian).

13. Krasnik E. V., Trushljakova V. V. Primenenie affinnogo preobrazovaniya dlja sovmeshhenija sovokupnosti rastrovnyh izobrazhenij sloev integral'noj shemy. *Izvestiya SPbGETU «LETI». «Fizika tvjordogo tela»*, 2008, no. 3, pp. 19-25 (in Russian).

14. Nguen V. Ch., Tropchenko A. A. Analiz metodov interpoljicii v zadachah rekonstrukcii izobrazhenij. *Science and Education: Scientific Publication Science and Education of the Bauman MSTU*, 2017, no. 3, pp. 170-181 (in Russian).

15. Mamedov R. G., Aliyev T. Ch., Mutallimova A. S. Recognition of Binary Images of the Objects Suffered to Affine Transformations. *Information Technologies*, 2016, vol. 22, no. 10, pp. 754-757 (in Russian).

16. Mikhalev A. S., Rouban A. I. Global Optimization on Set of Mixed Variables: Continuous and Discrete with Unordered Possible Values. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016. doi: 10.1088/1757-899X/122/1/012024.

17. Maraev V. S., Bezzubenko E. A., Cherkashin D. A., Mihalev A. S. Research of the Efficiency of the Genetic Algorithm With Various Methods of Selection, Crossover Types and Strategies of Formation of Generations in Searching of Extremums of Test Functions. *Modeling, Optimization and Information Technology*, 2017, vol. 5, no. 2 (17), p. 12 (in Russian).

18. Kostousov V. B., Perevalov D. S. Morphological Projector in the L_0 Metric and the Problem of Localization of Structural Differences Between Images. *Trudy Instituta Matematiki i Mekhaniki UrO RAN*, 2017, vol. 23, no. 1, p. 171-187 (in Russian).

19. Sirota A. A., Donskih A. O., Akimov A. V., Minakov D. A. Multivariate Mixed Kernel Density Estimators and their Application in Machine Learning for Classification of Biological Objects Based on Spectral Measurements. *Computer optics*, 2019, vol. 43, no. 4, pp. 677-691. doi: 10.18287/2412-6179-2019-43-4-677-691 (in Russian).

20. Voronov S. V., Voronov I. V. Sokrashhenie vychislitel'nyh zatrat pri ocenke jentropii cifrovyyh izobrazhenij [Reduction of Computational Costs in Estimating the Entropy of Digital Images]. *Radiotekhnika*, 2015, no. 1 (7), pp. 110-113 (in Russian).

21. Kulikov V. B. A Review of Methods for the Identification of Distribution Laws of the Random Variables and Processes. The New Identification Methods Based on Regularization Algorithms. *Cloud of science*, 2019, vol. 6, no. 4, pp. 565-589 (in Russian).

22. Rumjancev A. A., Bikmuratov F. M., Pashin N. P., Golovanov R. A. Evaluation of the Entropy of Fragments of X-ray Images of the Lungs. *Engineering journal of Don*, 2019, no. 9 (60), p.23 (in Russian).

Статья поступила 24 февраля 2021 г.

Информация об авторах

Власов Константин Александрович – старший научный сотрудник Научно-исследовательского центра. Краснодарское высшее военное училище имени генерала армии С.М. Штеменко. Область научных интересов: информационная безопасность; компьютерное зрение. E-mail: meavit@yandex.ru

Усатигов Сергей Васильевич – доктор физико-математических наук, доцент. Профессор кафедры средств и систем передачи и обработки информации. Краснодарское высшее военное училище имени генерала армии

С.М. Штеменко. Область научных интересов: математическое моделирование.
E-mail: SV@Usatikov.com
Адрес: 350063, Россия, г. Краснодар, ул. Красина, д. 4.

The Concept of an Automated System for Special X-ray Control of Technical Equipment

K. A. Vlasov, S. V. Usatikov

Formulation of the problem: the need to expand the capabilities of existing software and hardware systems for automation and increase the reliability, productivity and efficiency of labor-intensive and requiring sufficiently high qualifications of personnel operations for the detection, identification and localization of electronic devices for secretly obtaining information (bug-sweep) actualizes the development of an automated system (AS) special X-ray inspection, and one of the first stages of development is the creation of the concept of the AS. The detection of bug-sweep is carried out as a result of comparing and revealing the differences between the available X-ray images of typical blocks of technical means (TM) with actually observed images of various objects of control from one batch of vehicles. **Purpose:** the synthesis of the structure and the development of a mathematical model of the AS for special X-ray control during special checks of technical means placed at various objects of informatization. **Methods:** system analysis of the process of processing X-ray images of a vehicle batch during special checks; modeling and algorithmization by computer vision methods and optimization theory for detecting structural differences in raster images of radiographs. **Novelty:** the concept of an automated system is proposed, which increases the reliability and efficiency of operations to detect, identify and localize bug-sweep. A mathematical model has been built for the stage of comparing X-ray images of control objects from the vehicle batch and reference X-ray patterns, as well as the stage for identifying differences and identifying anomalies in the difference between the reference image and the image from the vehicle batch. **Result:** Algorithmization of the subsystem for combining images of reference radiographs and objects of control, with modules for image segmentation, affine transformations was carried out; and subsystems for detecting structural differences in raster images of radiographs, with modules for evaluating differences and classifying "error noise / bug-sweep" differences. **Practical relevance:** the software implementation of the algorithms of the matching subsystem and the subsystem for detecting differences in radiographs for the detection, identification and localization of bug-sweep has been performed. The presented solution is proposed to be implemented in the form of software for a promising AS of special X-ray inspection.

Key words: electronic devices for secret information acquisition, bug-sweep, automated system, special X-ray control, affine transformations, genetic algorithm, image segmentation, image alignment and classification of differences, structural differences in raster images.

Information about Authors

Konstantin Aleksandrovich Vlasov – Senior Researcher at the Research Center. Krasnodar Higher Military School named after general of the army S.M. Shtemenko. Fields of research: information security; computer vision. E-mail: meavit@yandex.ru

Sergey Vasilievich Usatikov – Dr. habil. of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor. Professor of the Department of Means and Systems of Information Transmission and Processing. Krasnodar Higher Military School named after general of the army S.M. Shtemenko. Field of research: mathematical modeling. E-mail: SV@Usatikov.com

Address: 350063, Russia, Krasnodar, st. Krasin, 4.