

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ COMPUTER SIMULATION HISTORY

УДК 621.386

DOI:10.18413/2411-3808-2018-45-1-93-102

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ИНФОРМАЦИИ

THE MODELING OF SYSTEMS OF NON-DESTRUCTIVE CONTROL OF ELECTRONIC MODULES BASED ON THE INFORMATION THEORY

А.А. Осипенко¹, О.О. Басов²
A.A. Osipenko¹, O.O. Basov²

¹) Федеральное государственное казённое военное образовательное учреждение высшего образования «Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации», Россия, 302034, г. Орёл, ул. Приборостроительная, 35

²) Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики», Россия, 197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

¹) Federal state military educational institution of higher professional education "Academy of the Federal security service of the Russian Federation", 35 Priborostroitel'naya St, Orel, 302034, Russia

²) Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, 49 Kronverkskiy prospekt, St. Petersburg, 197101, Russia
E-mail: rjaya_oska@rambler.ru, oobasov@mail.ru

Аннотация

В работе определены общие принципы выбора видов и характера источников информации для систем неразрушающего контроля электронных модулей на основе теории информации. Установлено, что наибольшее число типов дефектов позволяет определить комбинированная система оптического и рентгеновского контроля. При этом изображения оптического диапазона имеют строго predetermined число типов дефектов (до 64%) и предоставляют некоторую априорную информацию о дефектах, которые могут быть определены на рентгеновских изображениях. Предложено характеризовать отличия рентгеновских изображений, полученных при различных режимах работы оборудования, от изображения оптического диапазона значениями условных энтропий. Для проверки эффективности применения мер различия для обнаружения дефектов электронных модулей проведен вычислительный эксперимент, в ходе которого установлено, что точность выявления дефектов на рентгеновских изображениях составляет от 83,3%.

Abstract

The general principles of a choice of information source types and character for the systems of non-destructive control of electronic modules based on the information theory are defined in the paper. It is established that combined system of optical and x-ray control allows to define the greatest number of defect types. The images of optical range have strictly predetermined number of defect types (up to 64%) and provide some priori information on defects which can be defined on x-ray images. It is offered to characterize the differences of the x-ray images from the image of an optical range by values of conditional entropy received at various operating modes of the equipment. Computing experiment has been made for the purpose of efficiency check of disparity measure using for detection of defects of electronic module. It is established that the accuracy of defect detection on x-ray images is from 83,3%.



Ключевые слова: электронный модуль, неразрушающий контроль, ценность информации, вероятность обнаружения дефектов, обработка изображения.

Keywords: electronic module, non-destructive control, value of information, probability of defect detection, image processing.

Введение

В условиях возрастания сложности и неоднородности контролируемых электронных модулей (ЭМ) основной целью функционирования систем неразрушающего контроля [ГОСТ 18353-79] является обнаружение всех возможных типов дефектов [Калинченко, 2012; ГОСТ Р 56251-2014; Осипенко, 2017]. С точки зрения теории ценности информации [Коган, 1969] данная цель – это конечный эффект, ради достижения которого эта информация используется: чем больше типов дефектов обнаружено, тем больше ценность информации. Целью исследования является установление общих принципов выбора видов и характера источников информации для систем неразрушающего контроля ЭМ, в частности, выбор функциональных построений и изображений различных спектральных диапазонов, имеющих наиболее благоприятные информационные характеристики.

Моделирование системы неразрушающего контроля

Необходимой предпосылкой решения задачи определения максимального количества дефектов, стоящей перед системой неразрушающего контроля ЭМ, является получение и переработка некоторого минимально необходимого количества изображений, полученных в различных спектральных диапазонах, например, оптическом и рентгеновском [Миллер, 2014; Осипенко, 2017].

В данном случае одной из простейших моделей системы неразрушающего контроля может служить та, в которой цель C – обнаружение всех дефектов, можно достичь различными путями $C_j (1 \leq j \leq n)$, общее количество которых n известно, а вероятности достижения цели по различным путям $\varphi(c_j)$ априори неизвестны.

Под путем c_j будем понимать процесс обработки изображения ЭМ, полученного одним из методов неразрушающего контроля, с целью определения всех возможных типов дефектов на нем. Тогда под вероятностью $\varphi(c_j)$ следует понимать вероятность обнаружения всех возможных типов дефектов на изображении.

Для того чтобы задачу решить наиболее целесообразным способом, получаемая информация должна позволить определить значения $\varphi(c_j)$ на путях c_j и выбрать тот путь, на котором величина $\varphi(c_j)$ наибольшая.

Ценность информации I_i от источника Y тем выше, чем больше вероятность обнаружения дефектов при ее использовании. Следует иметь в виду, что и без получения информации вероятность обнаружения дефектов $\Phi(C)$ не равна нулю, ибо и при случайном (произвольном) выборе пути c_j цель C может быть достигнута. Исходя из сказанного, в качестве меры ценности информации примем величину разности Z_i между вероятностями обнаружения дефектов при отсутствии информации $\Phi(C)$ и при получении i -го сообщения, т.е. величина

$$Z_i = \Phi_i(C) - \Phi(C). \quad (1)$$

Величина Z_i в принципе может быть отрицательной, что отражает получение ложной информации (дезинформации) о дефекте, в дальнейшем будем предполагать, что получаемая информация истинна, и тогда всегда $Z_i > 0$.



Вероятность достижения цели при случайном выборе одного из путей c_j равна:

$$\Phi(C) = \sum_{j=1}^n P_j \varphi(c_j), \tag{2}$$

где P_j – вероятность выбора j -го пути c_j .

До получения информации эта вероятность имеет некоторое априорное распределение. Естественно допустить, что при полном отсутствии априорной информации выбор различных путей равновероятен

$$P_j = \frac{1}{n} = const,$$

тогда

$$\Phi(C) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \varphi(c_j), \tag{3}$$

т.е. вероятность обнаружения дефектов при отсутствии информации равна среднему значению $\varphi(c_j)$ по всем n путям.

Получение информации I_{ij} от i -го источника о j -м пути меняет распределение вероятностей P_j . Это апостериорное распределение в значительной мере определяется субъективными факторами, проявляющимися в решении, принимаемом оператором при анализе полученных изображений или закладываемом им в поведение системы неразрушающего контроля при проведении оптического и рентгеновского методов контроля ЭМ. Поэтому полная формализация поведения системы при получении информации затруднительна. Тем не менее, в ряде типичных случаев можно констатировать некоторые общие тенденции изменения распределения P_j .

I. Каждое отдельное i -е изображение, полученное одним из методов неразрушающего рентгеновского контроля, дает информацию I_{ij} о значении $\varphi(c_j)$ только на одном j -м пути и не содержит никакой информации об остальных $(n-1)$ путях; следовательно, выбор любого из этих $(n-1)$ путей равновероятен. Тогда

$$\Phi_i^I(C) = P_j \varphi(c_j) + \frac{1-P_j}{n-1} \left[\sum_{k=1}^{j-1} \varphi(c_k) + \sum_{k=j+1}^n \varphi(c_k) \right]. \tag{4}$$

Естественно считать, что в этом случае выбор пути c_j тем более вероятен, чем больше вероятность $\varphi(c_j)$, с которой можно ожидать достижения цели C , судя по информации, полученной от источника y_i . Зависимость P_j от $\varphi(c_j)$ представляет собой неубывающую функцию, лежащую в пределах $[0,1]$. Если в качестве ее аппроксимации принять удобную для расчетов функцию

$$P_j = [\varphi(c_j)]^r \quad (r > 0),$$

то характеристика ценности i -го сообщения о j -м пути получается в виде (рис. 1)

$$Z_{ij}^I = [\varphi(c_j)]^{r+1} + \frac{1-[\varphi(c_j)]^r}{n-1} \left[\sum_{k=1}^{j-1} \varphi(c_k) + \sum_{k=j+1}^n \varphi(c_k) \right] - \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \varphi(c_k). \tag{5}$$

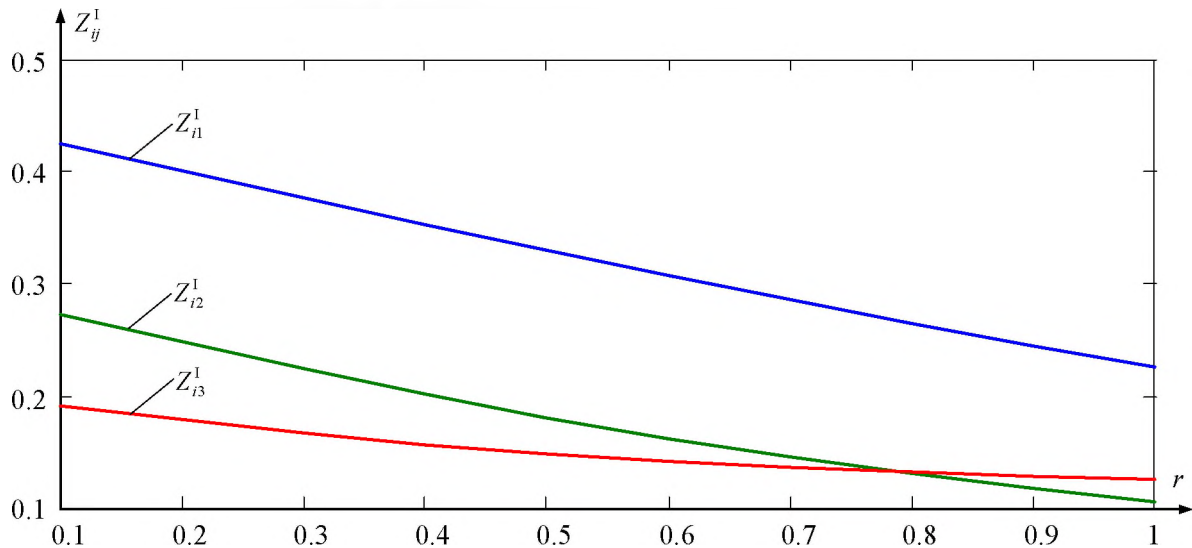


Рис. 1. Ценность информации при анализе отдельных изображений ЭМ, полученных одним из методов неразрушающего контроля

Fig. 1. The value of information in the analysis of separate images of electronic modules received by one of the non-destructive control method

Если даже на j -м пути $\varphi(c_j) = 0$, то и в этом случае $Z_i > 0$, поскольку величина выбора этого пути P_j и, следовательно, этот заведомо бесперспективный путь из дальнейшего поведения системы исключается.

II. Применение мультэнергетической рентгенографии [Григоров и др., 2015; Григоров, 2015] позволяет сформировать мультиизображение, которое дает информацию I_i о значениях $\varphi(c_j)$ на всех n путях.

В этом случае, естественно, необходимо выбрать тот путь, для которого величина $\varphi(c_j)$ максимальна, тогда $\Phi_i^{II}(C) = \varphi_{\max}(c_j)$. При этом характеристика ценности информации будет определяться следующим образом (рис. 2)

$$Z_i^{II}(C) = \varphi_{\max}(c_j) - \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \varphi(c_k). \quad (6)$$

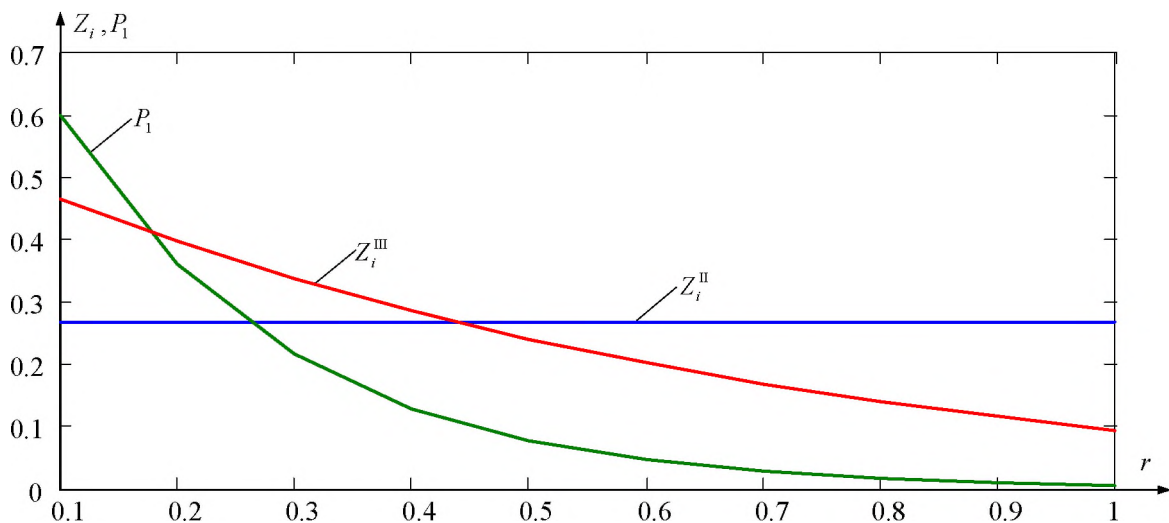


Рис. 2. Ценность информации при анализе мультиизображения ЭМ

Fig. 2. The value of information in the analysis of multiimage of electronic module



К недостатку данного подхода следует отнести отсутствие механизмов определения значений $\varphi(c_j)$, даже при небольшом числе путей. Как правило [Григоров, Басов, 2015], характеристики отдельных изображений, участвующих в формировании мультиизображения, определяются экспертным путем отдельно для каждого образца ЭМ. При этом не гарантируется определение всех его дефектов, которые возможно определить на изображениях одного спектрального диапазона.

III. Как показано в [Осипенко, 2017], наибольшее число типов дефектов позволяет определить комбинированная система оптического и рентгеновского контроля. При этом изображения оптического диапазона имеют строго predetermined число типов дефектов и предоставляют некоторую априорную информацию о дефектах, которые могут быть определены на рентгеновских изображениях. В описанных условиях можно утверждать, что совмещенное изображение оптического и рентгеновского диапазонов дает информацию I_i о значениях $\varphi(c_j)$ на $M (M < n)$ из n путях и не содержит информации об остальных $(n - M)$ путях; выбор любого из этих $(n - M)$ путей равновероятен. Тогда

$$\Phi_i^{III}(C) = \sum_{j=1}^M P_j \varphi(c_j) + \frac{1}{n-M} \sum_{k=M+1}^n P_k \varphi(c_k). \quad (7)$$

В данном случае пути достижения цели различаются видом и характером источника информации, в частности, диапазоном и условиями (режимом) получения соответствующих изображений.

С учетом того, что $P_j = [\varphi(c_j)]^r (r > 0)$ характеристика ценности информации i -го изображения о j -м пути получается в виде (рис. 3)

$$Z_i^{III} = \sum_{j=1}^M [\varphi(c_j)]^{r+1} + \frac{1}{n-M} \sum_{k=M+1}^n [\varphi(c_k)]^{r+1} - \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \varphi(c_k). \quad (8)$$

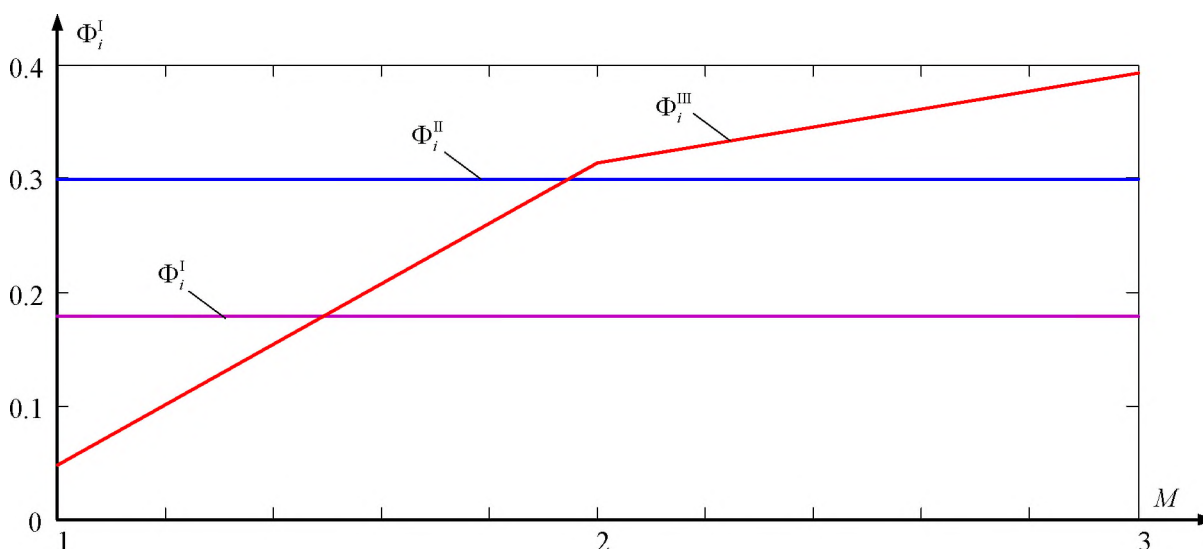


Рис. 3. Вероятность достижения цели от числа используемых путей
 Fig. 3. The probability of goal achievement from the number of used paths

Анализ зависимости вероятности достижения цели C от числа «используемых» оператором изображений (рис. 3) позволяет сделать вывод о том, что при заданной вероятности выбора $P_j (r = 0,1)$ j -го пути (путей) вероятность $\Phi_i(C)$ достижения цели функционирования комбинированной системы оптического и рентгеновского контроля



возрастает с увеличением M . При этом первый путь связан с получением изображения видимого диапазона, а последующие пути – с анализом рентгеновских изображений ЭМ.

При этом систему надо строить так, чтобы источники и пути обработки информации приносили информацию о тех путях c_j , которые обеспечивают максимизацию $\Phi_i(C)$.

В этой связи особый интерес представляет разработка подхода к определению вероятности достижения цели по различным путям $\varphi(c_j)$. Определить вероятность обнаружения всех возможных типов дефектов на изображении по «классической» формуле теории вероятности

$$P(A) = \frac{m_A}{n},$$

где m_A – число случаев, благоприятных событию A ; n – общее число случаев; не возможно, так как при ее подсчете опыт, в результате которого может появиться интересующее нас событие (обнаружение максимального числа дефектов) не будет обладать симметрией возможных исходов, т.е. исходы события не будут равновероятными [Вентцель, 2000]. Причина заключается в том, что качество полученных изображений одного и того же ЭМ может отличаться друг от друга в зависимости от режимов работы оборудования (используемый спектральный диапазон, условия получения изображений и т.п.), а соответственно, нет симметрии участвующих в опытах объектов (полученных изображений).

Предполагается, что процесс обнаружения дефектов как событие обладает какой-то степенью объективной возможности, которая при многократном повторении соответствующих опытов будет отражаться в относительной частоте событий. Под опытом будем понимать предъявление полученного изображения для анализа с целью обнаружения дефектов. Такой подход применим для определения вероятности $\varphi(c_1)$ обнаружения всех возможных типов дефектов на изображении видимого диапазона, так как предполагается анализ одного такого изображения. Ее оценивание производилось в ходе проведения вычислительного эксперимента на 1762 изображениях размером 1280×800 пикселей, полученных в результате автоматической оптической инспекции различных ЭМ с дефектами нанесения паяльной пасты, компонентов и паянных соединений:

$$\varphi(c_1) = \frac{M_D}{n} = 0,64, \quad (9)$$

где n – число произведенных опытов; M_D – число опытов, в которых обнаружено максимальное число дефектов. В соответствии с [Осипенко, 2017] максимальное число дефектов, определяемых на изображении видимого диапазона, составляет 24.

Таким образом, вероятность достижения цели системы неразрушающего контроля (обнаружение всех дефектов) по одному ($n=1$) пути $\varphi(c_1)$ (только при проведении оптической инспекции) составляет 0,64. Выявление дефектов на рентгеновских изображениях увеличит вероятность достижения цели, однако представленный подход не может быть использован для определения вероятности достижения цели по путям $\varphi(c_j)$, ($2 \leq j \leq n$) При большом числе опытов возрастает количество изображений, предъявляемых оператору для анализа дефектов, что также обуславливает высокую сложность решаемой задачи и увеличивает степень субъективизма при получении результатов.

Выходом из сложившейся ситуации может служить сравнение пар изображений видимого и рентгеновского диапазонов на основе некоторой меры, позволяющей получить количественную характеристику различия сравниваемых изображений,



определяющую вероятность обнаружения всех возможных типов дефектов на рентгеновском изображении.

Вероятностная модель связи между изображениями может быть получена на основе теоретико-информационного подхода [Gallager, 1968]. Пусть значения яркости на сравниваемых изображениях в точке с координатами (x, y) описываются дискретными случайными переменными $O(x, y)$ и $R(x, y)$ со значениями o и r , квантованными на конечное число уровней K и L соответственно. Поскольку изображения O и R отображают один и тот же ЭМ, то существует связь между переменными $O(x, y)$ и $R(x, y)$. Тогда возможно использование следующей модели [Escolano, 2009]:

$$R(Tr(x, y)) = F(O(x, y)) + \eta(x, y),$$

где Tr – преобразование координат; F – функция преобразования яркости, моделирующая связь между двумя изображениями объекта в двух спектральных диапазонах; $\eta(x, y)$ – случайная переменная, моделирующая дефекты. Для совмещенных изображений ЭМ $R(Tr(x, y)) = R(x, y)$.

В отличие от задачи совмещения изображений в решаемой задаче требуется мера, позволяющая выделить объекты на изображении R , отсутствующие на O . Это означает, что мера должна включать составляющие, обусловленные только объектами изображения R , которых нет на O , и не учитывать составляющие тех объектов на O , которых нет на R . Желательно, чтобы мера вычислялась на основе двумерных распределений, что позволит эффективнее использовать взаимосвязь анализируемой пары изображений.

Предлагается характеризовать отличия изображения R от O значениями условных энтропий $H(R|O)$ и $H(O|R)$. В работе [Gallager, 1968] условная энтропия для дискретной системы определяется следующим образом:

$$H(R|O) = - \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L p(r_l, o_k) \log[p(r_l | o_k)] = - \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L p(r_l, o_k) \log \left[\frac{p(r_l, o_k)}{p(o_k)} \right], \quad (10)$$

$$H(O|R) = - \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L p(r_l, o_k) \log[p(o_k | r_l)] = - \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L p(r_l, o_k) \log \left[\frac{p(r_l, o_k)}{p(r_l)} \right], \quad (11)$$

где $p(o_k)$, $p(r_l)$ и $p(r_l, o_k)$ – вероятности появления уровней o_k и r_l и их совместная вероятность; $p(r_l | o_k)$ и $p(o_k | r_l)$ – соответствующие условные вероятности.

Условная энтропия (10) и (11) неотрицательна и аддитивна. Дополнительные условия, при которых $H(R|O)$ и $H(O|R)$ выполняют функции меры различия, сформулированы и доказаны в [Мурашов, 2012]. Так условная энтропия (10) является мерой отличия рентгеновского изображения R от изображения O оптического диапазона в случае, когда

$$p(o_k) = p(r_l, o_k), k = 1, \dots, K; l = 1, \dots, L, \quad (12)$$

или

$$p(o_k) > p(r_l, o_k); p(r_l) = p(r_l, o_l), k = 1, \dots, K; l = 1, \dots, L. \quad (13)$$

Если выполняется условие (13), то $H(R|O) > 0$ и величина (10) зависит от соотношения величин $p(r_l, o_k)$ и $p(o_k)$. Это означает, что на рентгеновском изображении R имеется M объектов G_l^R , каждый из которых характеризуется l -м уровнем серого, $l = 1, \dots, M$, а на изображении O оптического диапазона имеется L объектов G_k^O k -го уровня серого, $M \leq L \leq K$. Границы M объектов на R при наложении совпадают с границами M объектов на O , т.е. $G_l^R = G_k^O, k = l = 1, \dots, M$. Кроме того, имеются объекты G_l^R такие, что $G_l^R \cap G_k^O = G_l^R < G_k^O$ для некоторых $k > M, l > M$, характеризующие дефекты, выявленные на рентгеновском изображении R .



Условная энтропия (11) является мерой отличия рентгеновского изображения R от изображения O оптического диапазона [Мурашов, 2012] в случае, когда

$$p(r_l) = p(r_l, o_k), k = 1, \dots, K; l = 1, \dots, L \quad (14)$$

или

$$\exists r_o : p(r_l) > p(r_o, o_k); p(r_o) = \sum_{l=1}^J p(r_o, o_l), l = 1, \dots, J; J \leq L. \quad (15)$$

Если выполняются условия (13) и (15), то $H(O|R) >$, что соответствует случаю, когда на R имеется объект G_o^R такой, что $G_o^R \cap G_l^O \neq \forall l, l = 1, \dots, K$. Условие $p(r_l) = p(r_l, o_l)$ в (13) исключает появление в $H(R|O)$ составляющей, вносимой объектами G_l^R на R .

Вычислительный эксперимент

Для проверки эффективности применения мер (10) и (11) для обнаружения дефектов ЭМ проведен вычислительный эксперимент, в ходе которого использовались рентгеновские изображения [Ежова, 2011; Осипенко и др., 2017; Игнатенкова и др., 2017], различающиеся условиями (режимом) их получения. Оценивание вероятностей производилось в окнах размером от 7×7 до 11×11 , а вычисление локальных значений условных энтропий – в окнах от 3×3 до 5×5 пикселей. Результаты обнаружения дефектов для различных ЭМ и сравнение их с результатами анализа, проведенного экспертом, представлены в таблице 1.

Таблица 1
Table 1

Результаты обнаружения дефектов для различных электронных модулей
Results of defect detection for the various electronic modules

Тип исследуемого ЭМ (разрешение изображения)	Условия получения рентгеновского изображения			Число дефектов, обнаруженных		Точность обнаружения
	анодное напряжение, кэВ	ток анода, мА	время экспозиции, с	экспертом	на основе мер (8) и (9)	
Печатная плата с крупными деталями (1200 × 1239)	100	1	40	22	22	100 %
	140	2	40	24	22	91,7 %
	180	3	40	23	22	95,7 %
Печатная плата с крупными деталями (155 × 160)	100	1	40	17	16	94,1 %
	140	2	40	18	15	83,3 %
	180	3	40	16	15	93,8 %
Печатная плата с мелкими деталями (2080 × 1141)	100	1	40	44	42	95,5 %
	140	2	40	52	49	94,2 %
	180	3	40	48	46	95,8 %
Печатная плата с мелкими деталями (160 × 103)	100	1	40	21	20	95,2 %
	140	2	40	22	19	86,4 %
	180	3	40	18	17	94,4 %

Заключение

Представленные в таблице 1 данные указывают на возможность использования условных вероятностей $H(R|O)$ и $H(O|R)$ в качестве вероятности $\varphi(c_j)$, ($2 \leq j \leq n$) обнаружения всех возможных типов дефектов на j -м рентгеновском изображении. Для визуализации выявленных дефектов ЭМ на рентгеновском изображении целесообразно использовать рассмотренные условные энтропии, вычисляемые в некоторой окрестности каждого пиксела анализируемых рентгеновских изображений с необходимым числом



уровней квантования полутонов [Rajwade, 2006]. Размеры окрестности и число уровней квантования выбираются таким образом, чтобы получить корректные оценки вероятностей и обеспечить выполнение условий (12) и (13) и приемлемую точность локализации различий.

Таким образом, подход на основе теории ценности информации [Коган, 1981] и теоретико-информационный подход [Gallager, 1968] могут быть использованы для моделирования систем неразрушающего контроля электронных модулей с целью выявления их дефектов.

Список литературы References

1. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. 2000. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. М., Высш.шк., 480.
Ventcel E.S., Ovcharov L.A. 2000. Teoriya veroyatnostej i ejo inzhenernye prilozhenija [Probability theory and its engineering application]. Moscow, Visshaya shkola, 480. (in Russian)
2. Григоров М.С. 2015. Математическое и программно-техническое обеспечение неразрушающего рентгеновского контроля электронных модулей. Автореф. дис. ... канд. тех. наук. Санкт-Петербург, 20.
Grigorov M.S. Matematicheskoe i programmno-tehnicheskoe obespechenie nerazrushajushogo rentgenovskogo kontrolja jelektronnyh modulej [Mathematical and program-technical support of non-destructive x-ray control of electronic modules]. Abstract. dis. ... cand. tech. sciences. Sankt-Peterburg, 20. (in Russian)
3. Григоров М.С., Басов О.О. 2015. Метод формирования рентгеновского мультиизображения изделия микроэлектроники с неоднородной структурой. Научные ведомости БелГУ. (2): 89–94.
Grigorov M.S., Basov O.O. 2015. Method of formation of the x-ray multiimage of a product of microelectronics with heterogeneous structure. Belgorod State University Scientific bulletin. (2): 89–94. (in Russian)
4. Григоров М.С., Иванов Б.Р., Басов О.О., Игнатенкова О.А. 2016. Повышение оперативности неразрушающего рентгеновского контроля электронных модулей. Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. (57): 129–139.
Grigorov M.S., Ivanov B.R., Basov O.O., Ignatenkova O.A. 2016. Increase of efficiency of non-destructive x-ray control of electronic modules. Vestnik of Ryazan State Radio Engineering University. (57): 129–139. (in Russian)
5. ГОСТ 18353-79. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. Дата введения 01.07.1980.
GOST 18353-79. Nondestructive control. Classification of types and methods. Date of introduction 01.07.1980. (in Russian)
6. ГОСТ Р 56251-2014. Платы печатные. Классификация дефектов. Дата введения 01.06.2015.
GOST R 56251-2014. Printed circuit boards. Classification of defects. Date of introduction 01.06.2015. (in Russian)
7. Ежова К.В. 2011. Моделирование и обработка изображений. СПб., НИУ ИТМО, 93.
Ezhova K.V. 2011. Modelirovanie i obrabotka izobrazhenij [Modelling and processing of images]. Saint Petersburg, University ITMO, 93. (in Russian)
8. Игнатенкова О.А., Григоров М.С., Осипенко А.А., Басов О.О. 2017. Анализатор качества изображений. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017614271.
Ignatenkova O.A., Grigorov M.S., Osipenko A.A., Basov O.O. The analyzer of image quality. The certificate of the state registration of the computer program № 2017614271. (in Russian)
9. Калинин Н.П. 2012. Атлас дефектов паяных соединений. Томск, Изд-во Томского политехнического университета, 83.
Kalinchenko N.P. 2012. Atlas defektov pajanyh soedinenij [The atlas of defects of soldered connections]. Tomsk, The publishing house of National Research Tomsk Polytechnic University, 83. (in Russian)
10. Коган И.М. 1981. Прикладная теория информации. М., Радио и связь, 216.



- Kogan I.M. 1981. *Prikladnaja teorija informacii* [The applied information theory]. Moscow, Radio and communication, 216. (in Russian)
11. Миллер Д. 2014. Возможности и перспективы АОИ и рентгеновского контроля. *Производство электроники*, (3): 124–127.
- Miller D. 2014. Possibilities and prospects of the automatic optical and x-ray control, *Proizvodstvo jelektroniki*, (3): 124–127. (in Russian)
12. Мурашов Д.М. 2012. Комбинированный подход к локализации различий многомодальных изображений. *Информ. и её примен.*, 6 (1): 122–131.
- Murashov D.M. 2012. The combined approach to localization of differences of multimodal images. *Inform.and ejo primen.*, 6 (1): 122–131. (in Russian)
13. Осипенко А.А., Игнатенкова О.А., Григоров М.С., Басов О.О. 2017. Обоснование необходимости совместного применения автоматической оптической инспекции и неразрушающего рентгеновского контроля электронных модулей. *Научный результат. Информационные технологии*, 2 (2): 3–8.
- Osipenko A.A., Ignatenkova O.A., Grigorov M.S., Basov O.O. 2017. Justification for need of combined use of automatic optical inspection and non-destructive x-ray control of electronic modules. *Research result. Information technology*, 2 (2): 3–8. (in Russian)
14. Осипенко А.А., Игнатенкова О.А., Григоров М.С., Басов О.О., Полетаев А.В. 2017. База данных эталонных изображений электронных модулей и их функциональных элементов. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2017620778.
- Osipenko A.A., Ignatenkova O.A., Grigorov M.S., Basov O.O., Poletaev A.V. 2017. Database of reference images of electronic modules and their functional elements. The certificate of the state registration of a database № 2017620778.
15. AOI programming with EasyPro3D. Available at: <http://www.viscom.com/europe/products/software/>.
16. Escolano F., Suau P., Bonev B. 2009. *Information theory in computer vision and pattern recognition*. London, Springer-Verlag.
17. Gallager R.G. 1968. *Information theory and reliable communication*. New York, J. Wiley Inc.
18. Rajwade A., Banerjee A., Rangarajan A. 2006. Continuous image representations avoid the histogram binning problem in mutual information based image registration. *IEEE Symposium (International) on Biomedical Imaging (ISBI) Proceedings*: 840–843.
19. Viscom auxiliary modules. Available at: <http://www.viscom.com/europe/products/software/>.
20. X7056RS. In-line X-ray and optical inspection for electronic assemblies. Available at: <http://www.viscom.com/europe/products/software/>.