

Примеры анализа термограмм при диагностике цифровых кинопроекторов

А.А. Белоусов (Санкт-Петербург, Россия)
info@baltech.ru

доктор технических наук, профессор СПбГУКИТ

Р.А. Романов

кандидат технических наук, директор по маркетингу и сбыту ООО «Балтех»

Р.П. Филимонов

доктор физико-математических наук, профессор СПбГУКИТ

В статье рассматриваются проблемы анализа термограмм визуальными методами, а также методами математической статистики.

Материалы и методы

Метод дисперсионного анализа, интервальное оценивание, математический расчет произведен в программе Mathcad, анализ термограмм выполнен в программе «Протон-Эксперт»

Ключевые слова

диагностика, термограмма, обработка изображений

Examples of thermal image analysis during diagnostics of digital cine-projectors

Authors

Aleksandr A. Belousov (Saint-Petersburg, Russia)

doctor of Engineering Science, professor SPbGUKiT

Roman A. Romanov

phD in Engineering Science, Sales and Marketing Manager of Baltech Ltd.

Ruslan P. Filimonov

doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor SPbGUKiT

Abstract

The article is concerned with problems of thermal image analysis by visual methods and methods of mathematical statistics.

Современный уровень развития технологий на предприятиях киноиндустрии предъявляет высокие требования к обеспечению надежности и безопасности ее объектов и, в частности, аудиовизуальной проекционной аппаратуры, то есть кинопроекторов и вспомогательного к ним оборудования. Одно из основных направлений решения проблемы надежности и безопасности заключается в своевременной профилактике работающей аппаратуры, основанной на использовании эффективных средств технической диагностики и неразрушающего контроля.

Техническая диагностика — это установление и изучение признаков, характеризующих наличие дефектов в узлах аудиовизуальной аппаратуры для предсказания возможных отклонений в режимах их работы [1].

В настоящее время наиболее распространенными методами диагностики, применяемыми для определения технического состояния аудиовизуальной аппаратуры являются вибродиагностика и вибромониторинг, акустико-эмиссионная диагностика, анализ токов и электроимпульсное тестирование, тепловидение и термография, трибодиагностика и ультразвуковая дефектоскопия. Суть методов технической диагностики заключается в оценке и прогнозе текущего состояния объекта по результатам прямых или косвенных измерений параметров состояния или диагностических признаков. Чтобы оценить техническое состояние объекта необходимо знать не только фактические значения параметров, но и соответствующие им нормируемые значения. Модуль разности между нормируемым $\Theta_{норм}$ и фактическим $\Theta_{факт}$ значениями называется диагностическим симптомом. Основная сложность в определении критичности диагностического симптома заключается в отсутствии, в большинстве, норм или эталонов исследуемых параметров (например, порога температур), а также в отсутствие функциональных зависимостей характеристик объекта от диагностических признаков.

Принимая во внимание, что диагностические оценки любого метода имеют ограниченную достоверность, можно сделать вывод, что для повышения надежности диагностики применительно к аудиовизуальной технике целесообразно использовать одновременно две или более диагностических методики (например, вибродиагностика и термография) или несколько разных научных методик одного направления технической диагностики.

В современной мировой киноиндустрии сегодня практически полностью осуществлен переход на цифровую аппаратуру, в которой значительно снизилось количество механических деталей и увеличилось число электрических элементов, что резко повысило значимость и приоритет тепловизионных методов диагностики.

Преимуществами тепловизионной диагностики при анализе аудиовизуальной техники являются:

- возможность дистанционного контроля в рабочем режиме аппаратуры в операторской при проведении киносеанса;
- безопасность персонала при проведении измерений;
- бесконтактный контроль, не требующий отключения киноаппаратуры;
- большой объем выполняемых в единицу времени диагностических операций;
- возможность определения дефектов кино техники на ранней стадии их развития;
- малые трудозатраты на производство измерений;
- достоверность, точность и наглядность получаемых сведений и отчетов.

Большинство объектов аудиовизуальной техники, находящихся в эксплуатации, теоретически не рассчитаны и практически не апробированы на всевозможные аномальные нагрузки и продолжительно не испытаны при выпуске с заводов, т.к. у производителей отсутствуют методики ресурсных испытаний. Поэтому в эксплуатации приходится с помощью методов технической диагностики решать две основные задачи:

- выявлять развивающиеся дефекты, которые появляются после обычных эксплуатационных воздействий и естественного износа;
- определять остаточный ресурс или возможность надежной работы без капитального ремонта.

В связи с тем, что отсутствуют методики тепловизионной диагностики кинопроекторов и вспомогательного оборудования, в первую очередь, необходимо исследовать характерные и возможные виды дефектов аппаратуры для выбора оптимального метода диагностики.

В качестве основных объектов для разработки методов получения и анализа термограмм аудиовизуальной техники следует принять его операторскую и непосредственное основное и вспомогательное оборудование для кинопроектора: кинопроекторы и поддерживающие их вспомогательные системы охлаждения, электроснабжения, управления. Обязательно необходимо принять во внимание окружающую среду, в которой работают объекты исследования (температура, влажность, вибрацию), которая может меняться в зависимости от отопительного сезона в помещениях. Далее будут приведены примеры диагностики цифрового кинопроектора и вспомогательного к нему оборудования.

В тепловых методах неразрушающего контроля используется тепловая энергия, распространяющаяся в объекте контроля или отраженная от него. Температурное поле поверхности объекта является источником информации об особенностях процесса теплопередачи, которые, в свою

очередь, зависят от наличия внутренних или наружных дефектов. Под дефектом при этом понимаются всевозможные отклонения физических свойств объекта контроля от нормы или наличия мест локального перегрева (охлаждения). Места перегрева и охлаждения называют «температурными пятнами».

Ключевой характеристикой температурного поля, являющейся индикатором дефектности, служит величина локального температурного перепада. Координаты места перепада, его рельеф или, иными словами, топология температурного поля и его величина в градусах являются функцией большего числа факторов. Эффективность диагностики определяется, в первую очередь, точностью средств измерения теплового поля, достоверностью и информативностью регистрируемой теплограммы.

Для реализации технологии экспериментальных измерений, в которых важна чувствительность и качество изображения теплограмм, следует применять тепловизоры на основе микрополупроводников на оксиде ванадия или аморфном кремнии со следующими техническими характеристиками:

- измеряемый температурный диапазон не уже чем от $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+350\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- точность отображения температуры во всем измеряемом диапазоне не менее $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ при $30\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- метрологическая погрешность не более 3%;
- разрешение не хуже чем 120×160 пикселей;
- спектральный диапазон — $7,5\text{--}14\text{ мкм}$;
- сопряжение с персональным компьютером, обеспечивающим сохранение не менее 1500 теплограмм для последующего анализа и статической обработки.

Тепловизионные методы еще не применялись широко для диагностики объектов киноиндустрии ни в России, ни в зарубежных странах. Большое преимущество этих методов состоит в том, что можно проводить диагностику оборудования находящегося в работе, что не нарушает и не прекращает процесс работы оборудования.

В современных тепловизорах диагностическая информация выводится в виде изображения на экран ЖК дисплея. Процедуру, обеспечивающую такое представление, называют визуализацией. Визуализированному изображению во многих случаях требуется придать дополнительно такие качества, благодаря которым его восприятие человеком было бы по возможности более комфортным. Часто бывает полезным подчеркнуть, усилить какие-то черты, особенности, нюансы наблюдаемой картины с целью улучшения его субъективного восприятия.

Последнее — субъективность восприятия — сильно усложняет применение формализованного подхода к достижению данных целей. Поэтому при обработке изображений для визуализации получили распространение эмпирические методы, в которых часто отсутствуют строгие математические критерии оптимальности. Их заменяют качественные представления о целесообразности той или иной обработки, опирающейся на субъективные оценки результатов.

Однако качеством субъективного восприятия изображения можно управлять,

если опираться на законы зрительного восприятия. Двумя ключевыми характеристиками изображения определяющими качество его субъективного восприятия в отсутствие шумов, являются его средняя яркость \bar{B}_0 и контраст K_{ij} . Изменяя указанные характеристики изображения в процессе его предварительной обработки, можно в широких пределах регулировать качество зрительного восприятия изображения.

Среднюю яркость можно определить, абстрагируясь от смыслового содержания изображения и рассматривая последнее как набор яркостей, отдельных пикселей, образующих выборку независимых случайных элементов:

$$\{B\}_k = B_1, B_2, \dots, B_n, k = 1, \dots, n \quad (1)$$

наблюдаемых с вероятностями P_1, P_2, \dots, P_n .

Тогда в случае дискретности случайных величин средняя яркость есть

$$\bar{B}_0 = \sum_{i=1}^n P_i B_i \quad (2)$$

В том случае, когда известна плотность $f(B)$ случайной величины B , (2) принимает вид

$$\bar{B}_0 = \int_0^{B_{\max}} B f(B) dB \quad (3)$$

Средняя яркость есть однородная функция первой степени от своих аргументов, т.е. для любого параметра $x > 0$ имеет место равенство:

$$\bar{B}_0(xB_1, xB_2, \dots, xB_n) = x\bar{B}_0(B_1, B_2, \dots, B_n) \quad (4)$$

Это означает, что если яркость каждого пикселя (элемента) изменится в x раз, то и средняя яркость всего изображения также изменится в x раз. Под контрастом принято понимать различное количественное восприятие двух частей изображения, видимых одновременно или последовательно. Если B_i и B_j яркости двух частей изображения, то контраст K_{ij}

$$K_{ij} = \frac{B_i^{2\gamma} - B_j^{2\gamma}}{B_i^{2\gamma} + B_j^{2\gamma}} \quad (5)$$

где γ — параметр, характеризующий физиологический уровень реакции зрительной системы на яркостный сигнал.

Для человека $\gamma \approx 0,4$ и поэтому в формуле (5) в

$$K_{ij} = \frac{B_i - B_j}{B_i + B_j}, -1 \leq K_{ij} \leq +1 \quad (6)$$

Следует пояснить, что формула (6) действует, когда имеет место многоградационное изображение, в котором уровни яркости образуются смежными элементами изображения. Кроме того можно показать [2], что в сложном сюжетном изображении формирование контраста осуществляется относительно среднего уровня яркости \bar{B}_0 .

Важным свойством контраста является его константность, т.е. сохраняемость неизменным при линейных преобразованиях яркости исходного сюжетного изображения. В этом легко убедиться, если в (6) подставить выражения для преобразованных

Keywords

diagnostics, hierarchy analysis method, thermography

References

1. Klyuev V.V., Sosnin F.R. *Nondestructive inspection and diagnostics*— M.: Mashinostroenie, 2003. — p.106.
2. Nesteruk V.F., Sokolova V.A. *Problems of the theory of subject image perception and of quantitative estimation of their contrast. Optics-mechanical industry.* — L.: 1980. — № 5. — p. 11-13.
3. Miroshnikov M.M., Nesteruk V.F. *Development of iconics methodology and its structural schemes// Transactions of Vavilov's State Optical Institute 1982, v. 57, n. 185, p. 7-13*
4. Nesteruk V.F. *Further development of methodological bases of iconics // Transactions of Vavilov's State Optical Institute. 1987. v. 64. n. 198. p. 5-11.*
5. Ventsel E.S., Ovcharov E.A. *Probability theory*— M.: Nauka, p.1969. — 364.
6. Nesteruk V.F. *Optimal non-linear contrast - statistical image conversion and estimation of its efficiency. Optics-mechanical industry.* — L.: 1981. — № 11. — P. 9-11.
7. Gnedenko B.V. *Course of probability theory* — M.: Publishers of Physico-Mathematical Literature, 1961. — P. 406.
8. Amosova N.N., Kuklin B.A. and others. *Probabilistic branches of mathematics under the editorship of Maximova Yu.D.* — Spb: Publisher Ivan Fedorov, 2001. — p.592 .
9. Bol'shev L.N., Smirnov V.I. *Tables of mathematical statistics.* — M.: Nauka, 1983. — p. 416 .

яркостей β_i и β_j . Действительно,

$$K_{ij} = \frac{\beta_i - \beta_j}{\beta_i + \beta_j} = \frac{x\beta_i - x\beta_j}{x\beta_i + x\beta_j} = \frac{\beta_i - \beta_j}{\beta_i + \beta_j} = K_{ij} \quad (7)$$

Фундаментальным вопросом диагностики и, в частности, анализа малоконтрастных объектов, является вопрос о поиске нелинейных преобразований, повышающих контраст визуализированного изображения. В серии работ [2–4] авторами было предложено оригинальное решение в форме алгоритма, позволяющего регулировать контраст исходного в широком диапазоне.

Отправной точкой этого решения является задача нахождения такого алгоритма (преобразования), которое превращает гистограмму (функцию распределения) $F(\beta)$ исходного изображения в заданную функцию распределения $\Phi(\beta)$ преобразованного изображения. В общем виде это поэлементное преобразование «точка в точку» или преобразование тоновоспроизведения

$$\beta_i = \varphi(B_i) \quad (8)$$

Из теории преобразования случайных величин регулярными функциями известно [5], что преобразование $Z_i = F(B_i)$ преобразует совокупность случайных величин (с.в.) β_i с распределением $F(\beta)$ в случайные величины Z_i , равномерно распределенные на интервале [0,1]. Далее равномерное распределение с.в. с помощью второго преобразования $\beta_i = \Phi^{-1}(Z_i)$ переводится в распределение яркостей β_i с заданной на интервале $[0, \infty]$ функцией распределения $\Phi(\beta)$. В результате последовательного выполнения двух преобразований мы получаем общее выражение для нелинейного статистического оператора преобразования в виде

$$\beta_i = \varphi(B_i) = \Phi^{-1}(F(B_i)) \quad (9)$$

где $\Phi^{-1}(\bullet)$ — функция, обратная искомому распределению $\Phi(\bullet)$.

Далее удобно воспользоваться выражением для контраста преобразованного изображения β_i , предложенного в [2],

$$K(\beta_i) = \int_0^{\infty} \frac{\beta_i^2 - \beta_0^2}{\beta_i^2 + \beta_0^2} \eta(\beta) d\beta, \quad (10)$$

где β_0 — средняя яркость, а $\eta(\beta)$ — гистограмма (плотность) преобразованного изображения.

Если теперь записать $\eta(\beta)$ в виде преобразования Смирнова от исходного изображения и учесть (9), то можно показать, что (10) приводится к эквивалентному виду

$$K(\beta_i) = \int_0^1 \frac{(\Phi^{-1}(x))^2 - \beta_0^2}{(\Phi^{-1}(x))^2 + \beta_0^2} dx \quad (11)$$

Из (11) следует, что контраст преобразованного изображения определяется только видом функции распределения $\Phi(x)$. Следовательно, для того чтобы изменять контраст исходного изображения, необходимо подобрать различные распределения $\Phi(x)$. Однако, было бы значительно удобнее иметь одно зависящее от параметра распределение, меняя параметр которого, можно было бы регулировать контраст преобразованного

изображения относительно исходного. Эта задача была решена в работе [6], где было показано, что таким распределение может быть выражено бета-распределение, плотность которого имеет вид $f(x) = \delta x^{\delta-1}$, а интегральная функция распределения $\Phi(x) = x^\delta$. Поскольку обратная функция $\Phi^{-1}(y) = x = y^{1/\delta}$, то подставляя этот результат в (11), получим

$$K(\delta) = \int_0^1 \frac{x^{2\delta} - \left(\frac{\delta}{\delta+1}\right)^2}{x^{2\delta} + \left(\frac{\delta}{\delta+1}\right)^2} dx \quad (12)$$

Опираясь на результат (12) нетрудно показать, что имеют место следующие результаты:

$$K\left(\frac{1}{3}\right) = 0,7206; \quad K\left(\frac{1}{2}\right) = 0,6366;$$

$$K(1) = 0,4640; \quad K(2) = 0,3011.$$

Таким образом показано, что контраст преобразованного изображения не зависит от сюжета исходного изображения, его гистограммы и контраста, а является характеристикой вида нелинейного статистического преобразования и в зависимости от величины параметра δ может служить мерой его эффективности.

Нелинейное контрастирование термограмм улучшает их визуальное восприятие. Оно, в зависимости от классов исследуемых объектов, может быть использовано как до, так и после обработки термограмм по другим более сложным статистическим алгоритмам.

Большинство факторов, влияющих на надежность аудиовизуальной техники, является случайными, поэтому многие параметры аппаратуры носят вероятностный характер и для их определения и анализа необходимо использовать математически аппарат теории вероятностей и математической статистики.

В ряде случаев важным диагностическим критерием могут быть верхняя и нижняя границы температуры, достигаемые рассматриваемым объектом. Определение величины допустимого интервала, гарантирующего отсутствие дефекта рассматриваемого объекта, может быть произведено на основе теории интервального оценивания [7].

Интервальной оценкой (с вероятностью β) математического ожидания m нормально распределенной случайной величины X по выборочному среднему \bar{x} при неизвестном среднеквадратическом отклонении σ и выборке объема n служит доверительный интервал

$$\bar{x} - \frac{t_{\beta} S}{\sqrt{n}} < m < \bar{x} + \frac{t_{\beta} S}{\sqrt{n}} \quad (13)$$

где S — выборочное среднее квадратичное отклонение, а t_{β} находится из таблицы распределения Стюдента по значению доверительной вероятности β и числу степеней свободы $V=n-1$.

Большой перечень диагностических процедур связан с выявлением внутри группы однотипных элементов (в математической терминологии факторов) наличия одного или нескольких дефектных. Вероятная формулировка рассматриваемой задачи хорошо известна и сводится к следующему. Имеется K элементов, каждый из которых характеризуется выборкой x_1, x_2, \dots, x_n объема n из нормальной совокупности с

общей дисперсией D , но, возможно, с различными математическими ожиданиями (м.о.) $m_i, i=1,2,\dots,k$. Проверяется нулевая гипотеза H_0 о равенстве м.о. всех элементов $m_1=m_2=\dots=m_k$, что свидетельствует об отсутствии дефектных элементов. Альтернатива H_1 состоит в различии м.о. диагностируемых элементов $m_i \neq m_2 = \dots = m_k$, что говорит о появлении дефектных объектов. Решение этой задачи приводит к методу дисперсионного анализа, основанного на критерии Р.Фишера [8]. В качестве критерия значимости выбирается отношение двух оценок дисперсий

$$F_{\text{exp}} = \frac{k(n-1)\theta_1}{(k-1)\theta_2} \quad (14)$$

где числитель — оценка дисперсии групповых средних или факторов, а знаменатель есть оценка составляющей общей дисперсии D . F_{exp} — критерий (14) является случайной величиной, распределенной по закону Фишера-Снедекора с $V_1 = k - 1$ и $V_2 = k(n - 1)$ числом степеней свободы. Из таблиц математической статистики [9] находится граничное значение F_{α} , соответствующее уровню значимости α и степеням свободы V_1 и V_2 . Правила проверки гипотез заключается в следующем: гипотеза H_0 принимается, если $F_{\text{exp}} \leq F_{\alpha}$ и отвергается, если $F_{\text{exp}} > F_{\alpha}$.

К настоящему времени в фирме ВАЛТЕСН накоплен большой объем экспериментальных данных, полученных в ходе диагностики цифровых кинопроекторов с помощью аппаратно-программного термографического диагностического комплекса. Выполнено более 2000 экспериментальных измерений термограмм. С помощью процедуры сбора данных происходит накопление базы данных, выполняется расчет диагностических признаков, формируется единая классифицирующая диагностическая функция и сравнивается ее значение с эталонными образцами всего объекта и его отдельных узлов. Измеренные диагностические признаки сохраняются в базе данных и служат для процедуры прогнозирования изменения технического состояния аудиовизуальной техники во времени. Путем применения методов преобразования и анализа термограмм дефектных (не годных) и бездефектных (годных) объектов и их узлов были выполнены расчеты для определения их технического состояния в момент измерения. Для идентификации объектов исследования были сделаны фотографии элементов кинокомплексов и их экспериментальные термограммы, обработанные на компьютере с помощью программного обеспечения «Протон-Эксперт». Приведем несколько примеров.

Экспериментальные и расчетные данные были разбиты на несколько групп. Для объектов, чувствительных к превышению пороговых значений температуры в ходе эксплуатации и слабо визуализируемых (коммутаторы, усилители, кинопроцессор, блоки питания) целесообразно использовать интервальное оценивание. Для этих элементов дефект развивается резко. В силу этого необходимо рассчитывать доверительные границы, чтобы оперативно определять момент, когда температура объекта превышает граничные значения. Расчет эксперимента и термограмма рис.1 приведены далее.

По данным независимых измерений ($n=9$) найдено среднее арифметическое $\bar{x}=40,2$ °C и выборочное среднеквадратичное отклонение $S=4,1$ °C. Задаваясь значением доверительной вероятности $\beta = 0,995$ ($\alpha = 1 - \beta = 0,005$), находим сначала по таблице распределения Стьюдента с $V = n - 1 = 8$ и $\alpha = 0,005$ значение $t_{\beta} = 3,83$ и потом по формуле (14) величину доверительного интервала

$$\varepsilon_{\beta} = \frac{t_{\beta} S}{\sqrt{n}} = \frac{3,83 \cdot 4,1}{3} = 5,234$$

| | X1 | X2 | X3 | X4 | X5 | X6 | |
|---|------|------|------|------|------|------|------|
| 1 | 37,2 | 37,9 | 42,2 | 39,0 | 40,3 | 45,0 | 40,3 |
| 2 | 37,1 | 40,0 | 44,4 | 43,5 | 28,4 | 31,4 | 37,5 |
| 3 | 40,8 | 37,5 | 35,2 | 40,4 | 43,0 | 41,2 | 39,7 |
| 4 | 40,0 | 36,9 | 38,4 | 37,3 | 39,5 | 44,0 | 39,4 |

Таб. 1

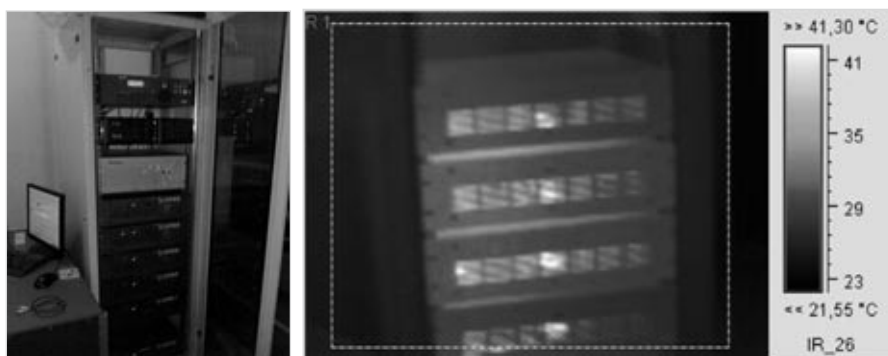


Рис. 1 — Фотография и термограмма кинопроцессора для расчета эксперимента с интервальным оцениванием



Рис. 2 — Фотография и термограммы электроавтомата

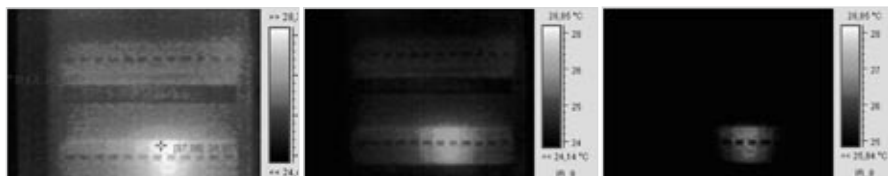


Рис. 3 — Повышения контраста термограммы электроавтомата

следовательно, границы температурного интервала $40,2-5,234 < t < 40,2+5,234$ ограничены значениями $34,966 < t < 45,434$.

Как следует из данных термограммы рис. 1 все значения температуры попадают в рассчитанный интервал, следовательно, диагностируемый объект в норме.

Для объектов однородных по функциям, со слабо визуализируемыми тепловыми пятнами (автоматы, платы и их элементы) удобно применение дисперсионного анализа. Дефект, развиваясь во времени, нарастает медленно. В силу этого возникает необходимость

локализации дефекта на его начальной стадии. С этой целью производится статистическая обработка группы однотипных узлов (кинопроектор, кинопроцессор, медиаплеер, компьютер) которая позволяет выявить методом проверки гипотез один или несколько выпадающих элементов. Диагностируем ячейки автомата распределительного щита. В ходе эксперимента сделано шесть ($n=6$) измерений температуры на четырех ($m=4$) однотипных элементах, т.е. общее число измерений $N=24$ представлено в виде матрицы (табл. 1).

Конкурирующие гипотезы проверяются с помощью стандартной процедуры программы Mathcad, встроенной в программно-вычислительный комплекс «Протон-Эксперт» (разработчик компания «Балтех»). Вводя в качестве исходных данных табл. 1, в результате вычислений найдем значения $\Theta_1 = 13,5$ и $\Theta_2 = 48,7$ и согласно (14) $F_{np} = 2,353$.

Задаваясь уровнем значимости $\alpha = 0,005$ и числами степеней свободы $V_1 = k - 1$ и $V_2 = k(n - 1)$, находим граничное значение критерия Фишера $F_{теор} = 2,353$. Так как $F_{np} > F_{теор}$, то нулевая гипотеза о бездефектности элементов отклоняется.

Однако, в силу конструктивных особенностей анализируемого узла у всех подобных автоматов есть более нагретая зона, но обычно этот участок в норме, поэтому только с помощью одной статистической обработки определить дефектный элемент и его локализацию, как правило, не удастся (см. рис. 2). Если же исходную термограмму подвергнуть дополнительной операции повышения контраста (рис. 3), то достаточно четко визуализируется место дефекта и координаты дефектного узла.

Итоги

Приведенные примеры ясно свидетельствуют о целесообразности применения тепловизионных методов диагностики цифровой аудиовизуальной техники с целью повышения ее качества и надежности.

Выводы

1. Для проведения диагностики и достоверного анализа термограмм необходимо выбирать многофункциональный программно-аппаратный комплекс.
2. При проведении экспериментов для улучшения визуализации термограмм необходимо привлекать методы обработки изображений, а также интервальное оценивание объекта исследования.
3. Для повышения качества средней яркости изображения и его контраста во время эксперимента проводилось нелинейное преобразование.
4. Для определения технического состояния многокритериальных объектов целесообразно применение дисперсионного анализа.

Список использованной литературы

1. Ключев В.В., Соснин Ф.Р. Неразрушающий контроль и диагностика. – М.: Машиностроение, 2003. – 106 с.
2. Нестерук В.Ф., Соколова В.А. Вопросы теории восприятия сюжетных изображений и количественная оценка их контраста. ОМП. – Л.: 1980. – № 5. – С. 11-13.
3. Мирошников М.М., Нестерук В.Ф. Развитие методики иконки и ее структурной схемы // Труды Государственного оптического института им. С.И. Вавилова, 1982, т. 57, в. 185, с. 7-13
4. Нестерук В.Ф. Дальнейшее развитие методологических основ иконки // Труды ГОИ. 1987. т. 64. В. 198. С. 5–11.
5. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1969. – 364 с.
6. Нестерук В.Ф. Оптимальное нелинейное контрастно-статистическое преобразование изображений и оценка его эффективности. ОМП. – Л.: 1981. – № 11. – С. 9-11.
7. Гнеденко Б.В. Курс теории вероятностей. – М.: Изд-во Физико-математической литературы, 1961. – С. 406.
8. Амосова Н.Н., Куклин Б.А. и др. Вероятностные разделы математики / под ред. Максимова Ю.Д. – СПб: Изд-во Иван Федоров, 2001. – 592 с.
9. Большев Л.Н., Смирнов В.И. Таблицы математической статистики. – М.: Наука, 1983. – 416 с.