

**А. Г. Верхогляд, И. В. Плеханова, Л. В. Финогенов,  
И. В. Борисова, П. Г. Попов**

*(Новосибирск)*

### **МЕТОД РАСПОЗНАВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЦИФРОВЫХ КОДОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Анализируется метод распознавания цифрового кода, нанесенного с помощью лазера на цилиндрическую поверхность заглушки тепловыделяющего элемента. Метод распознавания основан на представлении (кодировании) каждой точки изображения направлением доминирующей ориентации ее локальной окрестности. Закодированное изображение сравнивается с набором эталонов. Значение распознаваемого символа определяется тем эталоном, с которым получено максимальное количество совпадений. Представлено устройство считывания кода, выполненное на основе ПЗС-камеры и кольцевого осветителя. Приведены экспериментальные результаты, подтверждающие работоспособность и надежность метода распознавания.

**Введение.** В настоящее время в поточном производстве тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) для атомных энергетических комплексов используется буквенно-цифровая маркировка изделий, необходимая для организации сквозного технологического процесса и отслеживания ТВЭЛ на всех стадиях эксплуатации. Считывание информации с поверхности изделий в процессе изготовления и эксплуатации производится визуально.

Сложность задачи автоматического распознавания связана с рядом особенностей как самого носителя информации, так и используемого технологического процесса нанесения кода. Кодовая информация наносится на ТВЭЛ с некоторой погрешностью. Кроме того, в процессе производства ТВЭЛ подвергается различным видам обработки: приварке заглушки, химическому травлению и покрытию, лакированию и т. д. Данные особенности производства изделий приводят к значительному изменению параметров и характеристик считываемых с поверхности ТВЭЛ изображений. Поэтому существует необходимость в разработке и внедрении в производство ТВЭЛ алгоритмов распознавания кодовой информации, устойчивых к воздействию производственных факторов. Их использование позволит автоматизировать процесс считывания кодов и повысить достоверность информации.

В предлагаемой работе рассматривается задача распознавания цифрового кода на цилиндрической поверхности заглушки ТВЭЛ, нанесенного лазерным излучением. Количество цифр, их размер и расстояние между ними были постоянными для серии изображений. Однако даже в одной серии изображения существенно отличались яркостно-контрастными характери-

стиками. Для избавления от яркостной зависимости было использовано описание изображения локальными анизотропными признаками (ЛАП) [1].

**Метод распознавания символьного изображения.** Множество элементов изображения, непосредственно окружающую рассматриваемую точку, будем называть локальной окрестностью. Основой метода локальных анизотропных признаков является разделение окрестностей изображения на условные группы (классы) в зависимости от их доминирующей ориентации. Доминирующая ориентация окрестности определяется анизотропией ее энергетического фурье-спектра.

Анализируемые графические символы (цифры) состоят из отрезков прямых линий, нанесенных под углами 0, 45, 90, 135° к вертикали. Для описания этих символов достаточно разделить окрестности на четыре анизотропных класса, соответствующих вертикальной, горизонтальной и диагональным ориентациям в плоскости координат (различие между восходящим и нисходящим перепадами яркости не вводится).

Кроме участков с графическими символами на изображении присутствует шумовой фон, окрестности которого не имеют четко выраженной анизотропии спектра, их доминирующая ориентация может меняться под воздействием шумов. Поэтому будем рассматривать такие окрестности как изотропные и выделим их в отдельный, пятый, класс.

Для определения доминирующей ориентации находится спектр Фурье каждой локальной окрестности и анализируются суммы элементов энергетического спектра в четырех направлениях, составляющих углы 0, 45, 90, 135° с вертикалью. Направление, в котором энергия максимальна, определяет доминирующую ориентацию локальной окрестности и называется локальным анизотропным признаком изображения. Таким образом, окрестности изображения делятся на четыре анизотропных класса. Классы нумеруются (нумерация может быть произвольной), и номер класса окрестности рассматриваемой точки изображения принимается в качестве признака этой точки.

Для выделения изотропных окрестностей используется следующий критерий:

$$\begin{aligned} E_n/E_m < Q & - \text{анизотропность;} \\ E_n/E_m \geq Q & - \text{изотропность,} \end{aligned} \tag{1}$$

где  $E_m$  и  $E_n$  – суммы элементов энергетического спектра в направлении с максимальной энергией и в перпендикулярном направлении соответственно;  $Q$  – порог анизотропности.

Таким образом, формируется псевдоизображение, каждая точка которого кодируется номером класса окрестности, и распознавание производится именно на таких псевдоизображениях. На рис. 1, *a* показано исходное яркостное изображение, а на рис. 1, *b* соответствующее ему псевдоизображение (размер локальной окрестности 4 × 4, изотропные окрестности показаны белым цветом).

Геометрические размеры цифр, нанесенных на поверхность ТВЭЛ, предполагаются постоянными для серии изображений, что позволяет использовать в качестве эталонов синтезированные изображения (цифры от 0 до 9, совпадающие по размерам и написанию с анализируемыми кодами). Подготовленные эталоны также кодируются по методу ЛАП.

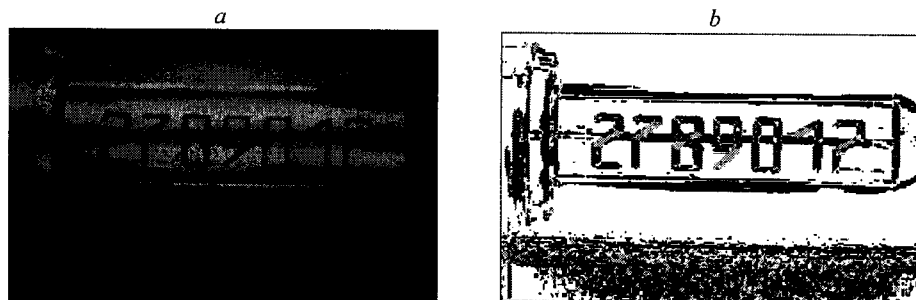


Рис. 1

Для сравнения двух изображений, закодированных локальными анизотропными признаками, требуется задание меры близости. Само описание изображений произвольно выбранными условными числами свидетельствует в пользу поэлементного сравнения (компарации), так как какие-либо преобразования таких описаний не имеют смысла [1]. Проведем сравнение изображения и эталона, при этом размер эталона должен быть существенно больше размера окрестности и меньше размера изображения. При сравнении закодированных изображения и эталона в режиме двухкоординатного сканирования формируется компарационная матрица (КМ) [2]. Значение элемента КМ – это количество поэлементных совпадений эталона с текущим фрагментом изображения, иными словами, количество точек, в которых у эталона и фрагмента изображения совпали признаки (номера классов окрестностей). Когда эталон сравнивается с фрагментом фона, количество совпадений случайно. Предположим, что классы признаков равновероятны, тогда значения фоновых элементов КМ имеют биномиальное распределение и вероятность совпадения классов окрестностей в  $M$  точках определяется как

$$P(M, W, p) = \binom{W}{M} p^M q^{W-M}, \quad (2)$$

где  $W$  – размер фрагментов;  $p$  – вероятность совпадения классов в точке;  $q$  – вероятность несовпадения;  $p + q = 1$ .

Особенностью задачи является наличие шумового фона, составляющего большую часть изображения. Конечно, этот фон выделяется в изотропный класс, но присутствие большого количества изотропных окрестностей нарушает равновероятность классов. Поэтому первичная стадия обработки заключается в разделении всех окрестностей исходного изображения на изотропные и анизотропные и последующем разделении анизотропных окрестностей на классы. Для разделения окрестностей на изотропные и анизотропные используется шумовой эталон. В данном случае это цифровая реализация белого шума, размер эталона  $16 \times 16$  элементов.

Для определения порога анизотропности  $Q$  в автоматическом режиме используется эффект отскока [3]. При пороге  $Q = 1$  класс изотропных окрестностей отсутствует и распределение (2) имеет максимум в точке  $W$ . При  $Q < 1$  начинает формироваться класс изотропных окрестностей, а пик распределения смещается влево по оси  $M$ . Когда классы окрестностей становятся равновероятными, максимум распределения достигает точки с координатой  $W/2$ . Значение порога, при котором это происходит, обозначим  $Q_0$  и назовем

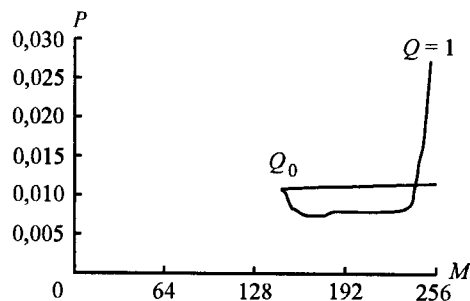


Рис. 2

точкой отскока. Дальнейшее уменьшение порога  $Q$  приводит к преобладанию изотропных окрестностей, и максимум начинает смещаться вправо по оси  $M$  вплоть до  $W$  при  $Q=0$ . Для того чтобы найти точку отскока для конкретного изображения и заданного эталона, необходимо построить кривую смещения максимума вероятности совпадения классов для разных порогов  $Q$ .

На рис. 2 показан график отскока для изображения, приведенного на рис. 1,  $a$ , и шумового эталона. Полученный порог анизотропности  $Q_0$  использован при кодировании изображения (см. рис. 1,  $b$ ).

**Распознавание цифрового кода.** Поскольку положение строки символов (цифрового кода) в кадре априорно неизвестно, сначала производился поиск зоны распознавания, т. е. такого фрагмента изображения, в котором содержится максимальное количество анизотропных окрестностей.

Распознавание производилось путем сравнения отдельных участков зоны распознавания с предварительно сформированными эталонами (цифрами от 0 до 9) и подсчетом количества поэлементных совпадений. Значение распознаваемого символа определялось тем эталоном, с которым было получено максимальное количество совпадений. Кроме того, для повышения достоверности результатов вводился статистический контроль: символ считался прочитанным, если полученное количество совпадений было выше фонового уровня. Фоновый уровень определялся исходя из вероятности попадания значения элемента КМ в «хвост» биномиального распределения:

$$P(x \leq A) \approx 0,5 + \Phi_0 \left( \frac{A - 0,5 - Wp}{\sqrt{Wpq}} \right), \quad (3)$$

где

$$\Phi_0(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-t^2/2} dt.$$

В частности, для  $W = 256$ ,  $p = 1/5$  и  $A = 70$  имеем  $P(x \leq A) = 0,9987$ . Статистический контроль аналогично применялся ко всей строке символов.

При использовании пяти классов ЛАП среднее значение фоновых элементов КМ в 2,5 раза меньше, чем при бинарной корреляции, а дисперсия фоновых элементов КМ уменьшается более чем в 1,5 раза.

Зона распознавания выбиралась шире, чем строка символов, и описанная процедура распознавания проводилась несколько раз со смещением по горизонтали. Для выбора окончательного результата насчитывалась сумма  $S$  сов-

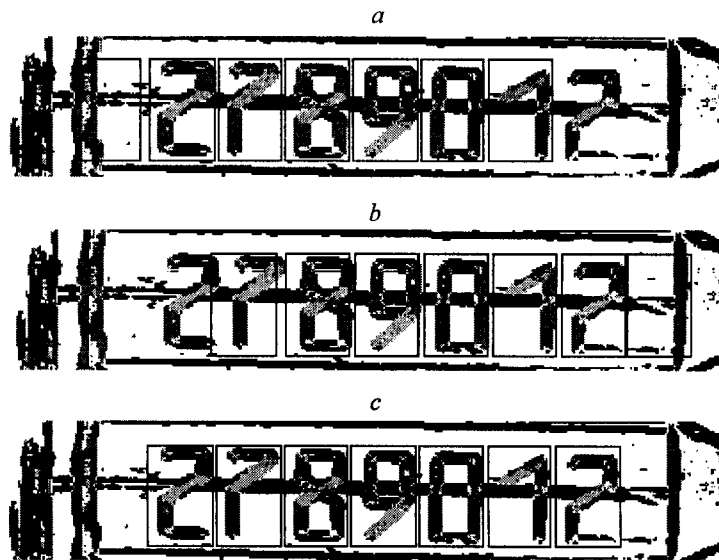


Рис. 3

падений с эталоном для всех символов и выбирался результат с максимальной суммой. Результаты распознавания показаны на рис. 3:  $S = 8086$ , прочитано символов 7278901 (*a*);  $S = 7477$ , прочитано символов 7890121 (*b*);  $S = 8291$ , прочитано символов 2789012 (*c*).

**Устройство автоматического считывания символьной информации.**

Структурная схема устройства считывания кода приведена на рис. 4. Устройство состоит из электронной части и оптико-механического блока. Электронная часть содержит: контроллер ПЗС-камеры I; контроллер управления оптико-механическим блоком III, связанный через последовательный порт II с управляющей ЭВМ; стабилизатор напряжения IV; шаговый двигатель V; датчик угла поворота системы сканирования поверхности VI; датчик поступления ТВЭЛ VII и датчик положения кодовой поверхности (10). Оптико-механический блок устройства считывания включает следующие основные

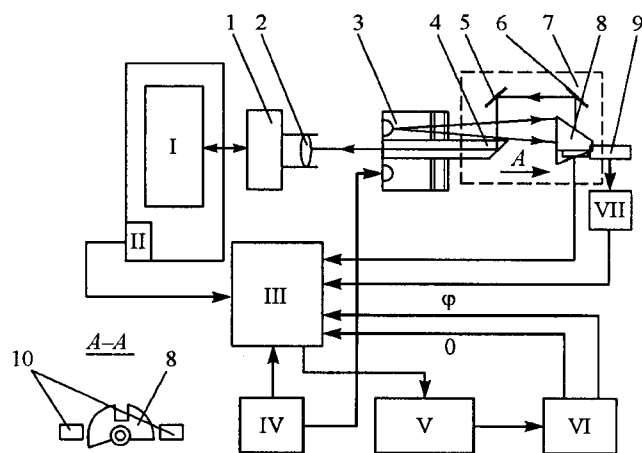


Рис. 4



Рис. 5

части: ПЗС-камеру (1); объектив «Юпитер-8, 50/2» (2); осветитель (3); оптический тракт ввода изображения (поворотный блок зеркал (7), включающий в себя систему зеркал (4–6) и конический рассеиватель света (8)).

Все сборочные единицы опико-механического блока размещаются в корпусе, который закрепляется на линии посредством специального кронштейна. Считывающее устройство работает в следующем порядке: ТВЭЛ (9) в линии пода-

ется на позицию считывания. С датчика поступления ТВЭЛ сигнал воспринимается контроллером управления опико-механического блока. Контроллер вырабатывает сигнал для управления драйвером электродвигателя, и начинается вращение поворотного блока зеркал по часовой стрелке до момента срабатывания датчика азимутального положения кода. В момент срабатывания датчика происходит остановка поворотного блока. Блок остается неподвижным в течение времени считывания изображения кода ПЗС-камерой (изображение символьного кода дано на рис. 5, при этом ТВЭЛ ориентирован случайным образом). Далее, по сигналу контроллера включается привод, поворотный блок поворачивается против часовой стрелки на угол  $180^\circ$ , и считывается изображение поверхности с противоположной стороны ТВЭЛ. По окончании считывания изображения поворотный блок зеркал по сигналу контроллера возвращается в исходное положение вращением по часовой стрелке. С этого момента цикл работы устройства считается законченным и оно готово к следующему циклу.

**Экспериментальные результаты.** Экспериментальные исследования проводились на реальных ТВЭЛ. Устройство считывания (рис. 6) монтировалось на фрагменте поточной линии. Имитировалась подача изделия на измерительную позицию до определенного упора. После срабатывания датчика поступления ТВЭЛ оптическая система считывала символьный код с одной стороны цилиндрической поверхности, затем двигатель осуществлял поворот зеркальной системы на угол  $180^\circ$ , и проводилось оптическое считывание символьного кода с противоположной стороны цилиндрической поверхно-

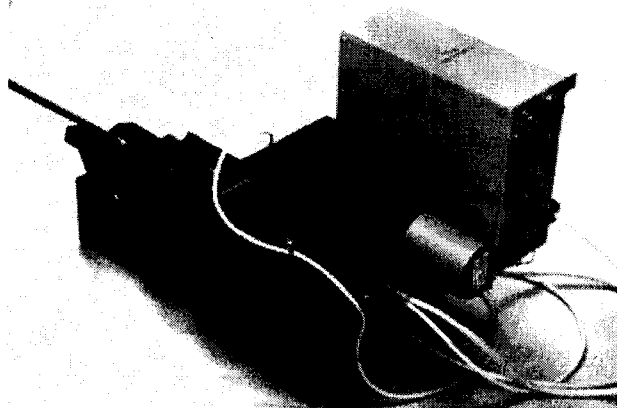


Рис. 6

Количество образцов кодов	Цвет цилиндрической поверхности ТВЭЛ	$T_-, \text{ мс}$	$T_+, \text{ мс}$	$\Delta T, \text{ мс}$	Количество сбоев	$T_*, \text{ мс}$
12	Серый	320	380	60	0	350
14	Сиреневый	260	300	40	1	280
12	Зеленый	340	370	30	3	355

сти. В начале каждой измерительной операции система автоматически устанавливалась в нулевое положение.

Одним из основных параметров, влияющих на надежность распознавания, является время накопления ПЗС-камеры. Поэтому экспериментально определялся максимально возможный диапазон времени накопления  $\Delta T = T_+ - T_-$ , в котором происходило устойчивое распознавание кода для каждого из представленных образцов ТВЭЛ, где  $T_+$  – верхний предел времени накопления и  $T_-$  – нижний предел времени накопления (все временные параметры в миллисекундах).

Всего представлено 38 различных образцов цифровых кодов, нанесенных на две противоположные цилиндрические поверхности ТВЭЛ. Поверхности ТВЭЛ отличались цветом, что обусловлено технологическими особенностями процесса анодирования. Достоверно было прочитано 87 % всех представленных образцов. Неправильное считывание зафиксировано на изделиях, имеющих размеры кодов, близкие к предельным, а также сиреневый или зеленый цвет поверхности. У образцов серого цвета сбоев при считывании не наблюдалось.

Для каждой группы ТВЭЛ, имеющих разный цвет цилиндрической поверхности, экспериментально выбирался оптимальный диапазон распознавания  $\Delta T$  и допустимые значения нижнего ( $T_-$ ) и верхнего ( $T_+$ ) пределов времени накопления ПЗС-камеры. Далее, рассчитывалось рабочее время накопления  $T_* = T_- + \Delta T/2$ . Расчетное рабочее время накопления  $T_*$  является рекомендуемым параметром для ПЗС-камеры. Полученные результаты приведены в таблице.

Исследования показали, что для корректного считывания символьной информации максимально допустимые отклонения геометрических параметров цифровых кодов от эталонных не должны превышать 20 %, а также необходимо производить настройку режимов ПЗС-камеры для образцов с разными цветовыми оттенками поверхностей.

**Заключение.** Проанализирован метод локальных анизотропных признаков для распознавания символьного изображения, нанесенного с помощью лазера на цилиндрическую поверхность заглушки тепловыделяющих элементов, и предложено устройство, в котором этот метод реализован. Аппаратная часть устройства осуществляет автоматический поиск информативной зоны на поверхности ТВЭЛ и передачу изображения в память ЭВМ. Обработка полученной информации включает следующие основные этапы:

- кодирование изображений локальными анизотропными признаками (пять классов);
- поиск в кадре зоны распознавания;
- распознавание отдельных цифр путем сравнения фрагментов изображения с эталонами;
- окончательное распознавание строки символов.

Экспериментальные исследования продемонстрировали работоспособность метода ЛАП для автоматического поиска и распознавания символического изображения. Необходимо отметить, что для повышения надежности метода необходимо придерживаться достаточно жестких требований нанесения цифровой информации на поверхность ТВЭЛ, а также подбирать режимы работы устройства в зависимости от технологических особенностей процесса изготовления контролируемых образцов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов П. Г. Локальные анизотропные признаки изображений // Оптический журнал. 1994. № 2. С. 36.
2. Плеханова И. В., Финогенов Л. В., Борисова И. В., Попов П. Г. Распознавание символов на цилиндрических поверхностях методом локальных анизотропных признаков // Автометрия. 2001. № 6. С. 80.
3. Попов П. Г., Борисова И. В. Практическое применение эффекта «отскока» в обработке изображений // Оптический журнал. 1999. № 4. С. 94.

*Конструкторско-технологический институт  
научного приборостроения СО РАН,  
Сибирский НИИ оптических систем,  
E-mail: finog@tdisie.nsc.ru*

*Поступила в редакцию  
6 мая 2003 г.*