

---

---

## ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ, ВЕЩЕСТВ, МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

### INSTRUMENTS AND METHODS FOR MONITORING THE NATURAL ENVIRONMENT, SUBSTANCES, MATERIALS AND PRODUCTS

---

---

УДК 519.876.5

DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-3-210-222

#### ТЕСТИРОВАНИЕ ИК-СЕНСОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕРАТОРА ЭТАЛОННЫХ ТЕПЛОВЫХ СИГНАЛОВ

Е. В. ЛАРКИН<sup>1</sup>, Д. В. ТИТОВ<sup>2</sup>, Т. А. АКИМЕНКО<sup>1\*</sup>, Т. А. ШИРАБАКИНА<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Тульский государственный университет, Тула, Россия

\*[tantan72@mail.ru](mailto:tantan72@mail.ru)

<sup>2</sup>Юго-Западный государственный университет, Курск, Россия

**Аннотация.** Исследуются методы тестирования ИК-сенсоров, широко применяемых как источник информации об окружающей среде в различных отраслях народного хозяйства. Показано, что вследствие преобразования сенсором информативных параметров наблюдаемой сцены возможны потери информации на выходе прибора. Определены условия, при которых потерь информации не происходит, и три общих случая передачи информативных параметров с потерями. Разработана структура тестирующей системы, основным элементом которой является запатентованный генератор эталонных тестовых сигналов, позволяющий оценивать такие информативные параметры, как теплосигнальная характеристика, дисторсия, разрешающая способность. Теплосигнальная характеристика строится в результате сканирования нагреваемых пластин, статистической обработки результатов измерений и аппроксимации результатов статистической обработки линейной зависимостью. Дисторсия оценивается по результатам измерения координат ИК-светодиодов на сцене генератора эталонных тестовых сигналов. Разрешающая способность оценивается по результатам построения поверхности значений выходного сигнала ИК-сенсора при сканировании тепловыделяющих пластин. Для каждого случая предлагается соответствующая методика оценивания.

**Ключевые слова:** инфракрасный сенсор, генератор тепловых сигналов, информативные параметры, потери информации, теплосигнальная характеристика, дисторсия, разрешающая способность

**Ссылка для цитирования:** Ларкин Е. В., Титов Д. В., Акименко Т. А., Ширабакина Т. А. Тестирование ИК-сенсоров с использованием генератора эталонных тепловых сигналов // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 3. С. 210—222. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-3-210-222.

#### TESTING OF IR SENSORS USING A REFERENCE THERMAL SIGNAL GENERATOR

E. V. Larkin<sup>1</sup>, D. V. Titov<sup>2</sup>, T. A. Akimenko<sup>1\*</sup>, T. A. Shirabakina<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Tula State University, Tula, Russia

\*[tantan72@mail.ru](mailto:tantan72@mail.ru)

<sup>2</sup>Southwest State University, Kursk, Russia

**Abstract.** Methods for testing IR sensors, which are widely used as a source of information about the environment in various sectors of the national economy, are being investigated. It is shown that due to the transformation of the informative parameters of the observed scene by the sensor, information loss at the output of the device is possible. Conditions are derived under which there is no loss of information, and three general cases of transmission of informative parameters with losses are specified. The structure of the testing system is developed, the main element of which is a patented generator of reference test signals, which makes it possible to evaluate such informative parameters as a thermal signal characteristic, distortion, and resolution. The heat signal characteristic is built as a result of heated plates scanning, statistical processing of measurement data, and approximation of the results of statistical processing by a linear dependence. Distortion is inferred from results of measuring the IR LEDs coordinates in the scene created with the

reference test signals generator. The resolution is estimated based on the results of constructing the surface of values of the output signal of the IR sensor when scanning the heat-generating plates. For each case, an appropriate assessment methodology is proposed.

**Keywords:** infrared sensor, thermal signal generator, informative parameters, information loss, heat signal characteristic, distortion, resolution

**For citation:** Larkin E. V., Titov D. V., Akimenko T. A., Shirabakina T. A. Testing of IR sensors using a reference thermal signal generator. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 3. P. 210—222 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-3-210-222.

**Введение.** Системы наблюдения сцен, работающие в инфракрасном (ИК) диапазоне, в настоящее время широко используются в различных отраслях народного хозяйства [1—4]. Основным преимуществом подобных систем является возможность работы в сложных эксплуатационных условиях, таких как недостаточное освещение объектов наблюдения в видимом диапазоне электромагнитных излучений, повышенная влажность, туман, задымленность. В качестве элемента, преобразующего электромагнитное излучение в образ сцены, в подобных системах применяются ИК-сенсоры, формирующие видеосигнал, передаваемый на пункт наблюдения и управления, где полученная информация воспринимается и интерпретируется человеком-оператором или системой искусственного интеллекта. Эффективность функционирования рассматриваемых систем во многом определяется техническими характеристиками ИК-сенсоров, которые должны оставаться стабильно высокими длительное время в широком диапазоне условий наблюдения сцены, поскольку информацию, утраченную на этапе первичного формирования теплового образа сцены, путем дальнейшей цифровой обработки изображений восстановить затруднительно.

Верификация сенсоров осуществляется системой тестирования, создающей тестовые ИК-образы сцен, позволяющие проводить измерение и оценку параметров основных узлов и блоков ИК-сенсора и сенсора в целом [5—8]. Подобный подход, основанный на создании эталонных тестовых сигналов, широко применяется в телевидении, при микрофильмировании и сканировании документов [9—13] и в других информационных системах. Однако контроль основных параметров ИК-сенсоров имеет свою специфику, связанную с тем, что тест-объект должен генерировать, а не преобразовывать тепловые образы эталонной сцены, что представляет собой известные технические трудности.

Таким образом, наличие потребности в создании информационно-измерительной системы, обеспечивающей оценку качества ИК-сенсоров, и отсутствие общей теории анализа и расчета параметров подобных систем объясняет необходимость и актуальность проведенных исследований.

**Общая структура системы.** Для оценки потерь информации в ИК-сенсоре используется цифровая тестирующая информационно-измерительная система, общая структура которой показана на рис. 1 [14, 15]. В тестирующей системе эталонный тестовый сигнал, включающий информативные признаки  $x^1, \dots, x^m, \dots, x^M$ , поступает с наблюдаемой реальным и виртуальным ИК-сенсорами сцены. В реальном приборе преобразование сигнала  $\varphi(x^1, \dots, x^m, \dots, x^M)$  осуществляется узлами и блоками на физическом уровне, вследствие чего формируются реальные вторичные информативные признаки  $X_R^1, \dots, X_R^m, \dots, X_R^M$ . В виртуальном приборе на основе информативных признаков  $x^1, \dots, x^m, \dots, x^M$  формируются желаемые значения вторичных информативных признаков  $X_V^1, \dots, X_V^m, \dots, X_V^M$ , которые соответствуют идеально настроенному сенсору. Нормы разностей виртуальных и реальных вторичных признаков

сравниваются с допустимыми значениями  $\|X_R^m - X_V^m\| < \varepsilon_m, 1 \leq m \leq M$ , и если неравенство выполняется для всех информативных параметров, то ИК-сенсор считается пригодным к эксплуатации. Если не выполняется хотя бы одно неравенство, то требуется настройка прибора.

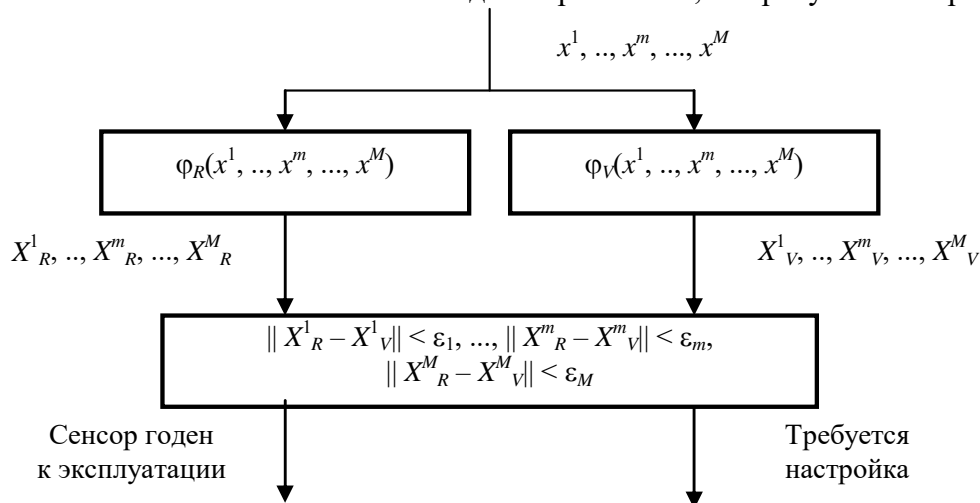


Рис. 1

Преобразование информативных параметров техническими средствами ИК-сенсоров поясняется рис. 2, где применены следующие обозначения:  $x$  — значение параметра в относительных единицах, формируемое наблюдаемой сценой,  $0 \leq x \leq 1$ ,  $X$  — значение информативного параметра, формируемое на выходе ИК-сенсора.

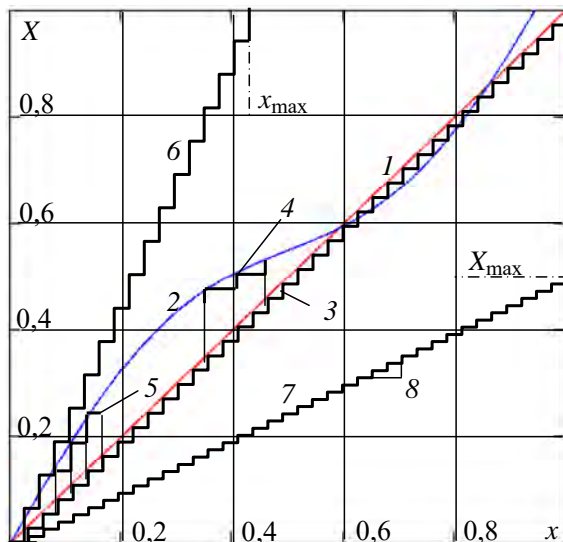


Рис. 2.

В системе без информационных потерь  $X = x$ , и эта зависимость представляется на рис. 2 прямой 1, имеющей угол наклона  $45^\circ$ . В системе с потерями зависимость выходного значения параметра от исходного значения определяется в виде  $X = \varphi(x)$  (кривая 2).

Диапазон  $0 \leq x \leq 1$  может быть разбит на  $K$  равных отрезков, при этом линейная зависимость  $X = x$  представляется ступенчатой линией 3, которая описывается выражением

$$X = K^{-1} \cdot \sum_{k=1}^{K-1} \eta(x - K^{-1} \cdot k), \quad (1)$$

где  $\eta(\dots)$  — единичная функция Хевисайда.

Текущий угол наклона кривой  $X = \varphi(x)$  определяется производной  $\alpha = \arctg\left(\frac{d\varphi(x)}{dx}\right)$  и может быть как меньше, так и больше  $45^\circ$  (участки 4 и 5 соответственно). Ступенчатая линия, описываемая зависимостью (1), с интервалами, равными  $K^{-1}$ , заменяется ступеньками с интервалами, большими, чем  $K^{-1}$ , на участке 4 — по параметру  $x$ , а на участке 5 — по параметру  $X$ .

Каждому отрезку величиной  $K^{-1}$  в соответствие может быть поставлена вероятностная мера согласно гистограмме

$$h_x = \begin{bmatrix} x_0 & x_1 & \dots & x_k & \dots & x_{K-1} \\ p_0 & p_1 & \dots & p_k & \dots & p_{K-1} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где  $K^{-1} \cdot (k-1) \leq x_k \leq K^{-1} \cdot k$ ;  $p_k$  — вероятность появления параметра  $x$  со значением  $x_k$ ; вероятности  $p_k$  не коррелированы между собой;  $\sum_{k=0}^{K-1} p_k = 1$ .

Количество информации, которое несет в себе параметр  $x$ , определяется зависимостью [16]

$$H_x = \sum_{k=0}^{K-1} -p_k \cdot \log p_k. \quad (3)$$

Очевидно, что в системе без потерь информации  $H_x = H_X$ , а следовательно,

$$h_X = \begin{bmatrix} X_0 & X_1 & \dots & X_k & \dots & X_{K-1} \\ p_0 & p_1 & \dots & p_k & \dots & p_{K-1} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где  $K^{-1} \cdot (k-1) \leq X_k \leq K^{-1} \cdot k$ ;  $p_k$  — вероятность появления параметра  $X$  со значением  $X_k$ .

Потери информации заключаются в уменьшении значения энтропии информативного параметра  $H_X$  на выходе ИК-сенсора по сравнению со значением энтропии информативного параметра, формируемого наблюдаемой сценой. Эти потери могут возникать по одной из следующих причин:

- сокращение области определения функции  $X = \varphi(x)$ ;
- сокращение области значений функции  $X = \varphi(x)$  (линия 7);
- отклонение функции  $X = \varphi(x)$  от линейного вида (участки 4, 5 ступенчатого представления кривой).

Случай „а“ иллюстрируется ступенчатой линией 6. Энтропии параметра  $x$  в областях определения  $0 \leq x \leq 1$  и  $0 \leq x \leq x_{\max} < 1$  равны, соответственно,

$$H_x = \sum_{k=0}^{\tilde{K}} -p_k \cdot \log p_k,$$

где

$$\tilde{K} = \begin{cases} K, & \text{если } 0 \leq x \leq 1; \\ \lceil K \cdot x_{\max} \rceil, & \text{если } 0 \leq x \leq x_{\max} < 1, \end{cases}$$

здесь  $\lceil \dots \rceil$  — округление до ближайшего целого в большую сторону.

Естественно, что  $H_x(0 \leq x \leq 1) > H_x(0 \leq x \leq x_{\max} < 1)$ , и информационные потери для этого случая могут быть оценены как

$$\Delta H_a = H_x(0 \leq x \leq 1) - H_x(0 \leq x \leq x_{\max} < 1) = \sum_{k=0}^{\tilde{K}} -p_k \cdot \log p_k. \quad (5)$$

Для оценки потерь информации в случаях „b“ и „с“ покажем, что если  $J$  стоящих подряд значений информативного параметра, например с  $k$ -го по  $(k+J-1)$ -й, информационной системой преобразуются в одно значение (участок 4 на кривой 2 и замена нескольких ступенек одной ступенькой 8 на линии 7), то в системе имеются потери информации.

Действительно, количество информации, содержащейся в параметре, формируемом наблюдаемой сценой, в этом случае равно

$$H_{x,J} = \sum_{j=0}^{J-1} (-p_{k+j}) \log p_{k+j}. \quad (6)$$

Все значения информативного параметра преобразуются в одно значение, формируемое на выходе информационной системы, энтропия которого оценивается как

$$H_{X,J} = \left[ -\sum_{j=0}^{J-1} p_{k+j} \right] \log \left[ \sum_{j=0}^{J-1} p_{k+j} \right]. \quad (7)$$

Положительная разность энтропий (6) и (7) означает наличие информационных потерь [15]

$$\Delta H_J = H_{x,J} - H_{X,J} = \sum_{j=0}^{J-1} p_{k+j} \cdot \log \left[ \frac{1}{p_{k+j}} \sum_{l=0}^{J-1} (p_{k+l}) \right]. \quad (8)$$

Выражение, стоящее под знаком логарифма в правой части (8), больше нуля, так как сумма вероятностей больше одной из вероятностей суммы. Следовательно, потери информации в системе в рассматриваемом случае имеются.

Как следует из рис. 2, в случае „b“, представленном ступенчатой линией 7, на каждые  $J$  отсчетов параметра  $x$  приходится один отсчет параметра  $X$  (участок 8). Потери информации в этом случае составляют

$$\Delta H_b = \sum_{n=1}^{]K/J]} \Delta H_{J(n)}, \quad (9)$$

где  $\Delta H_{J(n)}$  — оценка потерь информации на  $n$ -м участке ступенчатой зависимости, в общем случае разная для различных участков вследствие возможных различий вероятностей на этих участках.

Случай „с“ представлен рис. 3, где показаны все возможные варианты отображения информативного параметра  $x$ , формируемого сценой, в информативный параметр  $X$  ИК-сенсора.

Для удобства случаи отображения упорядочены следующим образом. Отрезки с  $x_0$  по  $x_{k-1}$  соответствуют дискретному представлению участков кривой  $X = \varphi(x)$ , на которых  $X \cong x$ , и отображаются в отрезки с  $X_0$  по  $X_{k-1}$ . Отображение отрезков с  $x_k$  по  $x_{l-1}$  при дискретном представлении кривой  $X = \varphi(x)$  соответствует случаю, когда  $\frac{d\varphi(x)}{dx} < 1$ . Отрезки

отображаются подмножествами отрезков  $x$  в единственный отрезок  $X$  таким образом, что подмножество  $\{x_k, \dots, x_{k+j(k)-1}, \dots, x_{k+J(k)-1}\}$  отображается в  $X_k, \dots$ , а подмножество  $\{x_{l-J(l-1)-1}, \dots, x_{l-j(l-1)-1}, \dots, x_{l-1}\}$  отображается в  $X_{l-1}$ . Отображение отрезков с  $x_l$  по  $x_{K-1}$  при

дискретном представлении кривой  $X = \varphi(x)$  соответствует случаю, когда  $\frac{d\varphi(x)}{dx} > 1$ . Отрезки отображаются в подмножества отрезков таким образом, что  $x_l$  отображается в подмножество

$\{X_l, \dots, X_{l+j(l)-1}, \dots, x_{l+J(l)-1}\}, \dots$ , а  $x_{K-1}$  отображается в подмножество  $\{X_{K-J(K-1)-1}, \dots, X_{K-j(K-1)-1}, \dots, X_{K-1}\}$ .

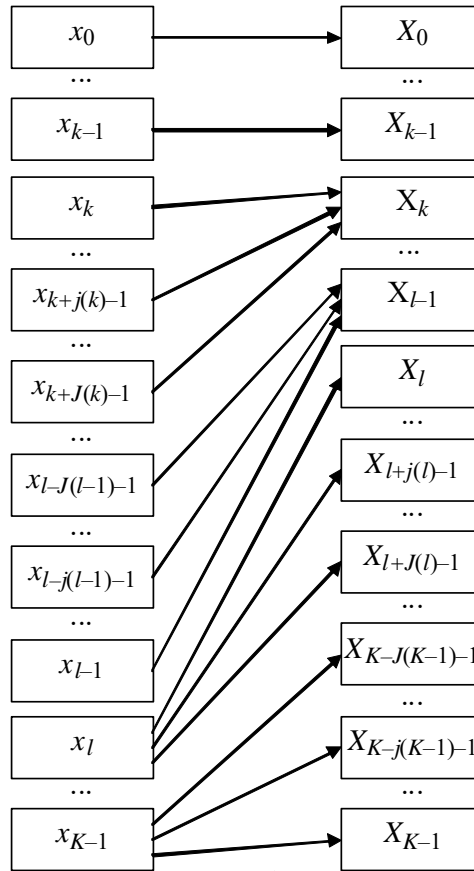


Рис. 3

Потери информации при отображении информативного параметра на отрезках с  $x_0$  по  $x_{k-1}$  равны нулю (см. рис. 3). При отображении информативного параметра отрезков с  $x_l$  по  $x_{K-1}$  каждый из указанных отрезков представляется одним единственным элементом подмножеств  $\{X_l, \dots, X_{l+j(l)-1}, \dots, x_{l+J(l)-1}\}, \{X_{K-J(K-1)-1}, \dots, X_{K-j(K-1)-1}, \dots, X_{K-1}\}$ . Именно этот элемент представляет информативный параметр на выходе ИК-сенсора. Вероятности появления в сообщении других элементов множества равны нулю, поэтому потерь информации в этом смысле не происходит, т.е.  $x_l, \dots, x_{K-1}$  отображаются в  $\tilde{X}_l, \dots, \tilde{X}_{K-1}$ , где  $\tilde{X}_l \in \{X_l, \dots, X_{l+j(l)-1}, \dots, x_{l+J(l)-1}\}, \dots, \tilde{X}_{K-1} \in \{X_{K-J(K-1)-1}, \dots, X_{K-j(K-1)-1}, \dots, X_{K-1}\}$ .

Таким образом, потери информации для случая „с“ полностью определяются потерями информации на участках, где  $\frac{d\varphi(x)}{dx} < 1$ , и равны

$$\Delta H_c = \sum_{i=k}^{l-1} \Delta H_{J(i)}, \tag{10}$$

где  $\Delta H_{J(i)}$  — потери информации при замене подмножества отрезков  $\{x_i, \dots, x_{i+j(i)-1}, \dots, x_{i+J(i)-1}\}$  отрезком  $X_i$ , определяемые по зависимости (8).

**Техническая реализация тестирующей системы.** Информативными параметрами ИК-сенсоров, подлежащими тестированию, являются теплосигнальная характеристика, дисторсия и разрешающая способность. Для оценки потерь, возникающих на выходе ИК-сенсоров при преобразованиях перечисленных информативных параметров, предлагается использовать генератор эталонных тепловых сигналов (ГЭТС), структурная схема которого приведена на рис. 4 [8], где генератор представлен в системе координат  $yOz$ , связанной со сценой и расположенной в предметной плоскости объектива ИК-сенсора. В состав ГЭТС входят:  $1$  — пластины из токопроводящего материала, на которые установлены датчики  $2$  температуры  $t_1^\circ, t_2^\circ$ , а сами пластины размещены на охлаждающих элементах  $3$ ; инфракрасные светодиоды  $4_1—4_8$ , размещенные по краям наблюдаемой сцены; блок управления  $5$ , на который подаются сигналы  $t_1^\circ, t_2^\circ$ . С блока управления  $5$  подаются управляющие сигналы  $u_{11}, u_{12}, u_{21}, u_{22}$  на токопроводящие пластины  $1$ , охлаждающие элементы  $3$  и инфракрасные светодиоды  $4_1—4_8$ . Токопроводящие пластины расположены под углом  $\alpha$  друг к другу, что позволяет измерять пространственное разрешение ИК-сенсора.

При тестировании ГЭТС сканируется сенсором, на выходе которого формируется цифровой образ сцены, представляющий собой факсимильную цифровую модель изображения (ФЦМИ)  $V = [v_{i(y),i(z)}]$ , где  $i(y), i(z)$  — индексы ФЦМИ, обозначающие номера строк и столбцов матрицы и привязанные к пространственным координатам  $y$  и  $z$  соответственно. Потери информации оцениваются по результатам анализа ФЦМИ.

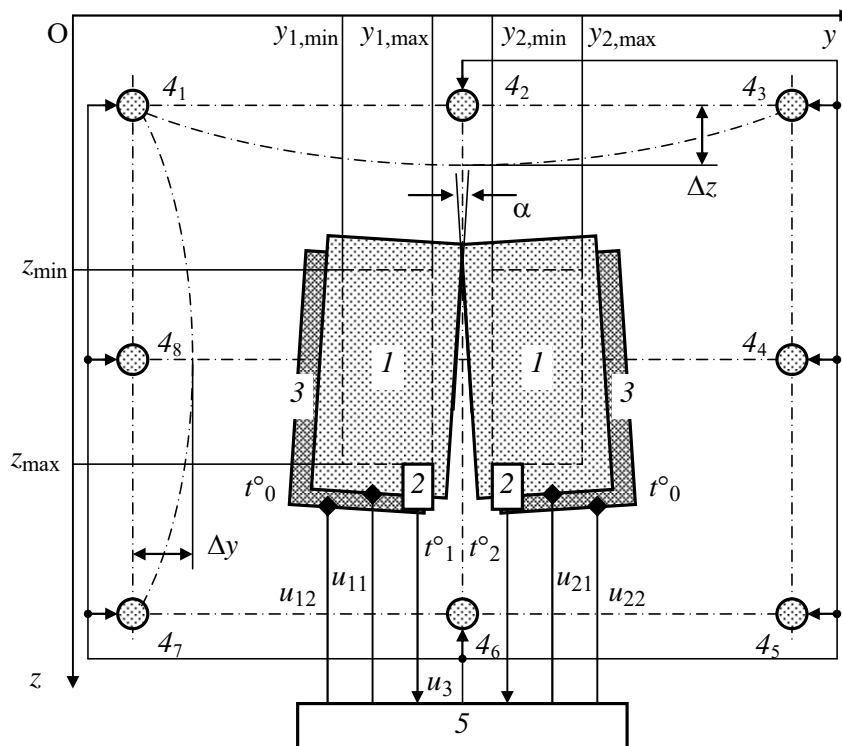


Рис. 4

Теплосигнальная характеристика ИК-сенсора, т.е. зависимость  $v(t^\circ)$ , с использованием ГЭТС измеряется следующим образом. На охлаждающие элементы  $3$  с блока управления  $5$  подаются сигналы  $u_{12}, u_{22}$ , в результате чего эти элементы создают необходимую фоновую температуру  $t_0^\circ$ , относительно которой блок управления  $5$ , используя в качестве обратной связи показания  $t_1^\circ, t_2^\circ$  датчиков  $2$ , устанавливает заданные значения температуры  $t^\circ(1), \dots, t^\circ(n), \dots, t^\circ(N)$

участков  $[y_{1,\min} \leq i(y) \leq y_{1,\max}, z_{\min} \leq i(z) \leq z_{\max}]$ ,  $[y_{2,\min} \leq i(y) \leq y_{2,\max}, z_{\min} \leq i(z) \leq z_{\max}]$ , выделенных на рис. 4 штрихпунктирной линией. По результатам измерения определяются математическое ожидание и дисперсия значений пикселей по зависимостям [17]

$$\begin{aligned} \tilde{v}(n) = & \left\{ [i(y_{1,\max}) - i(y_{1,\min}) + 1] [i(z_{\max}) - i(z_{\min}) + 1] + \right. \\ & \left. + [i(y_{1,\max}) - i(y_{1,\min}) + 1] [i(z_{\max}) - i(z_{\min}) + 1] \right\}^{-1} \times \\ & \times \left[ \sum_{i(y)=i(y_{1,\min})}^{i(y_{1,\max})} \sum_{i(z)=i(z_{\min})}^{i(z_{\max})} v_{i(y),i(z)}(n) + \sum_{i(y)=i(y_{2,\min})}^{i(y_{2,\max})} \sum_{i(z)=i(z_{\min})}^{i(z_{\max})} v_{i(y),i(z)}(n) \right]; \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} D(n) = & \left\{ [i(y_{1,\max}) - i(y_{1,\min}) + 1] [i(z_{\max}) - i(z_{\min}) + 1] + \right. \\ & \left. + [i(y_{1,\max}) - i(y_{1,\min}) + 1] [i(z_{\max}) - i(z_{\min}) + 1] - 1 \right\}^{-1} \times \\ & \times \left\{ \sum_{i(y)=i(y_{1,\min})}^{i(y_{1,\max})} \sum_{i(z)=i(z_{\min})}^{i(z_{\max})} [v_{i(y),i(z)}(n) - \tilde{v}(n)]^2 + \right. \\ & \left. + \sum_{i(y)=i(y_{2,\min})}^{i(y_{2,\max})} \sum_{i(z)=i(z_{\min})}^{i(z_{\max})} [v_{i(y),i(z)}(n) - \tilde{v}(n)]^2 \right\}, \end{aligned} \quad (12)$$

где  $i(y)$ ,  $i(z)$  — дискретные координаты, соответствующие аналоговым координатам  $y$  и  $z$ ;  $i(y_{1,\min})$  и  $i(y_{1,\max})$  — минимальное и максимальное значения дискретной координаты, соответствующие аналоговым координатам  $y_{1,\min}$  и  $y_{1,\max}$  левой нагреваемой пластины;  $i(y_{2,\min})$  и  $i(y_{2,\max})$  — минимальное и максимальное значения дискретной координаты, соответствующие аналоговым координатам  $y_{2,\min}$  и  $y_{2,\max}$  правой нагреваемой пластины;  $i(z_{\min})$  и  $i(z_{\max})$  — минимальное и максимальное значения дискретной координаты, соответствующие аналоговым координатам  $z_{\min}$  и  $z_{\max}$  нагреваемых пластин.

В случае если хотя бы для одного значения  $t^\circ(n)$  не выполняется неравенство  $\sqrt{D(n)} < \varepsilon_1$ , где  $\varepsilon_1$  — наибольшее допустимое среднеквадратическое отклонение результатов измерения температуры, ИК-сенсор считается не прошедшим тестовую проверку.

В результате проведения тестовых испытаний ИК-сенсора для разных температур нагрева пластин  $l$  формируются два массива данных: массив температур  $[t^\circ(1), \dots, t^\circ(n), \dots, t^\circ(N)]$ , для которых проводилось тестирование, и массив значений  $[\tilde{v}(1), \dots, \tilde{v}(n), \dots, \tilde{v}(N)]$  по результатам измерения температур сенсором. В случае если в ИК-сенсоре реализована логарифмическая теплосигнальная характеристика, то массив температур должен быть преобразован в массив логарифмов температур следующим образом:

$$\begin{aligned} [t^\circ(1), \dots, t^\circ(n), \dots, t^\circ(N)] & \rightarrow \left[ \ln \frac{t^\circ(1)}{t_0^\circ}, \dots, \ln \frac{t^\circ(n)}{t_0^\circ}, \dots, \ln \frac{t^\circ(N)}{t_0^\circ} \right] = \\ & = [\tilde{t}^\circ(1), \dots, \tilde{t}^\circ(n), \dots, \tilde{t}^\circ(N)]. \end{aligned} \quad (13)$$

В случае если шкала является пропорциональной, то

$$[t^\circ(1), \dots, t^\circ(n), \dots, t^\circ(N)] = [\tilde{t}^\circ(1), \dots, \tilde{t}^\circ(n), \dots, \tilde{t}^\circ(N)]. \quad (14)$$



Сглаживание экспериментальной зависимости  $\tilde{v}(\tilde{t}^\circ)$  по методу наименьших квадратов [18, 19] дает

$$\tilde{v} = a\tilde{t}^\circ + b, \quad (15)$$

где

$$a = \frac{N \sum_{n=1}^N \tilde{t}^\circ(n) \tilde{v}(n) - \sum_{n=1}^N \tilde{t}^\circ(n) \sum_{n=1}^N \tilde{v}(n)}{n \sum_{n=1}^N [\tilde{t}^\circ(n)]^2 - \left( \sum_{n=1}^N \tilde{t}^\circ(n) \right)^2},$$

$$b = \frac{\sum_{n=1}^N [\tilde{t}^\circ(n)]^2 \sum_{n=1}^N \tilde{v}(n) - \sum_{n=1}^N \tilde{t}^\circ(n) \sum_{n=1}^N \tilde{t}^\circ(n) \tilde{v}(n)}{n \sum_{n=1}^N [\tilde{t}^\circ(n)]^2 - \left( \sum_{n=1}^N \tilde{t}^\circ(n) \right)^2}.$$

Сенсор считается не прошедшим тестовую проверку, если  $\|a - a_s\| < \varepsilon_2$ , где  $a$  и  $a_s$  — соответственно эталонное и измеренное значения коэффициента передачи,  $\varepsilon_2$  — наибольшее допустимое отклонение коэффициента передачи от эталонного значения. Также сенсор считается непригодным для эксплуатации, если ошибка аппроксимации  $\tilde{v}(\tilde{t}^\circ)$  прямой (15) больше порогового значения, а именно

$$\sum_{n=1}^N \|\tilde{v}(n) - a\tilde{t}^\circ(n) - b\| > \varepsilon_3,$$

где  $\|\dots\| = (\dots)^2$ ,  $\varepsilon_3$  — максимально допустимая ошибка аппроксимации теплосигнальной характеристики.

*Дисторсия* ИК-сенсора определяется по отклонению центров тепловых образов инфракрасных светодиодов  $4_1$ — $4_8$  от прямых, соединяющих центры образов угловых светодиодов. Для этого с блока управления 5 подается сигнал  $u_3$ , включающий все светодиоды. Сцена сканируется, и формируется ФЦМИ, на которой имеются только тепловые образы фона и светодиодов. Далее ФЦМИ подвергается бинаризации и фильтрации медианным фильтром [20, 21], в результате чего формируется бинарный образ светодиода,  $j$ -я строка которого состоит из цепочки единиц с индексами  $i_{\min}(j) \leq i(j) \leq i_{\max}(j)$ . Аналогично  $i$ -й столбец бинарного образа светодиода включает цепочки единиц с индексами  $j_{\min}(i) \leq j(i) \leq j_{\max}(i)$ . Весь образ вписывается в прямоугольник с координатами  $I_{\min} \leq i \leq I_{\max}$ ,  $J_{\min} \leq j \leq J_{\max}$ , где  $I_{\min} = \min_j [i_{\min}(j)]$ ,  $I_{\max} = \max_j [i_{\max}(j)]$ ,  $J_{\min} = \min_i [j_{\min}(i)]$ ,  $J_{\max} = \max_i [j_{\max}(i)]$ . Общее количество пикселей, формирующих образ светодиода, равно

$$N_\Sigma = \sum_{j=J_{\min}}^{J_{\max}} \{i_{\max}(j) - i_{\min}(j) + 1\}.$$

Координаты центра бинарного образа светодиода определяются как координаты его центра масс следующим образом:

$$y^* = \frac{1}{N_\Sigma} \sum_{i=I_{\min}}^{I_{\max}} i \cdot \frac{j_{\max}(i) + j_{\min}(i)}{2} \cdot \{j_{\max}(i) - j_{\min}(i) + 1\}, \quad (16)$$

$$z^* = \frac{1}{N_{\Sigma}} \sum_{j=J_{\min}}^{J_{\max}} j \cdot \frac{i_{\max}(j) + i_{\min}(j)}{2} \cdot \{i_{\max}(j) - i_{\min}(j) + 1\}. \quad (17)$$

После определения центров тепловых образов светодиодов производится проверка условий

$$\varepsilon_{4.2} > \left\| \frac{z_1^* + z_3^*}{2} - z_2^* \right\|; \varepsilon_{4.4} > \left\| \frac{y_3^* + y_5^*}{2} - y_4^* \right\|; \varepsilon_{4.6} > \left\| \frac{z_5^* + z_7^*}{2} - z_6^* \right\|; \varepsilon_{4.8} > \left\| \frac{y_1^* + y_7^*}{2} - y_8^* \right\|, \quad (18)$$

где  $\varepsilon_{4.m}$ ,  $m = 2, 4, 6$ , — максимально допустимое расстояние от центра образа  $m$ -го светодиода до линии, проходящей через центры образов  $(m-1)$ -го и  $(m+1)$ -го светодиодов;  $\varepsilon_{4.8}$  — максимально допустимое расстояние от центра образа восьмого светодиода до линии, проходящей через центры образов седьмого и первого светодиодов;  $y_m^*$ ,  $z_m^*$ ,  $m = 1, \dots, 8$ , — координаты центра бинарного образа  $m$ -го светодиода.

При невыполнении хотя бы одного из условий (18) ИК-сенсор считается непригодным к эксплуатации.

Контроль разрешающей способности ИК-сенсора иллюстрируется рис. 5, где показано, что сигнал  $v(y, z)$ , в безразмерных единицах, формируется на выходе прибора при сканировании участка сцены, состоящей из двух токопроводящих пластин, развернутых друг относительно друга на малый угол  $\alpha$ . Пластины нагреваются до некоторой температуры, по которой на выходе сенсора формируется сигнал  $v_{\max} = 1$ . Вследствие того, что оптико-электронная подсистема сенсора является пространственным фильтром [22], сигнал на его выходе может быть описан выражением

$$v(y, z) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi\beta}} \left\{ \int_{-\infty}^y \exp\left[-\frac{(\xi - \alpha z)^2}{2\beta}\right] d\xi - \int_{-\infty}^y \exp\left[-\frac{(\xi + \alpha z)^2}{2\beta}\right] d\xi \right\}, \quad (19)$$

где  $\beta$  — параметр, определяющий полосу пропускания фильтра и зависящий от частотно-контрастной характеристики оптической системы ИК-сенсора;  $\alpha \rightarrow 0$  — угол разворота пластин;  $\xi$  — вспомогательная переменная.

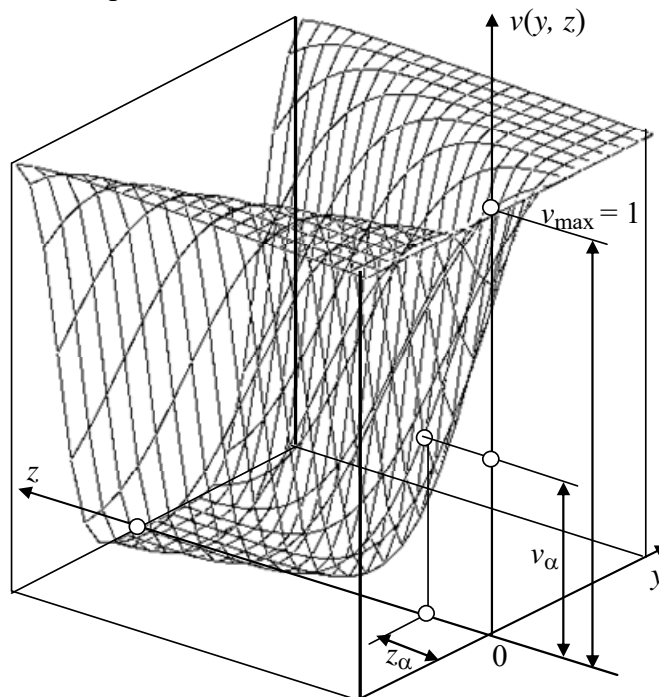


Рис. 5

Функция (19) позволяет оценивать изменение разрешения ИК-сенсора при изменении координаты  $z$ . При  $z \rightarrow 0$  и  $y = 0$  сигнал  $v(y, z) \rightarrow 1$  (нулевое разрешение); при  $z \rightarrow \infty$  и  $y = 0$  сигнал  $v(y, z) \rightarrow 0$  (максимальное разрешение). Информационные потери в данном случае возникают вследствие сокращения динамического диапазона параметра  $v(y, z)$ . Очевидно, что значение  $v_\alpha$  функции (19) при некоторой критической величине  $z_\alpha$  может характеризовать граничную разрешающую способность сенсора.

Из вышеизложенного следует, что при контроле разрешающей способности необходимо сканировать тест-объект в направлении  $y$ , перпендикулярном осевой линии расположения токопроводящих пластин  $I$  для различных значений координаты  $z$  (см. рис. 4). При каждом сканировании в точке расположения осевой линии необходимо определять значение функции (19). При появлении значения функции, равного  $v_\alpha$ , необходимо определять  $z_\alpha$ , при котором это произошло. Если  $z_\alpha > \varepsilon_5$ , где  $\varepsilon_5$  — граничное расстояние от точки с нулевым разрешением до точки с критическим разрешением, то требуется настройка сенсора, в противном случае ИК-сенсор годен к эксплуатации.

**Заключение.** Предложен подход к тестированию сенсоров, работающих в ИК-диапазоне, основанный на физической генерации теплового тестового сигнала и оценке потерь, возникающих при формировании ИК-сенсором образа тест-объекта. Показано, что при линейной зависимости информативных параметров сигнала, получаемого на выходе прибора, от параметров сигнала, генерируемого наблюдаемой сценой, потерь информации не происходит. При нелинейной зависимости возникают потери, величину которых можно оценить при соответствующей цифровой обработке выходного сигнала сенсора.

Дальнейшие исследования в этой области могут быть направлены на создание системы автоматического контроля параметров ИК-сенсоров.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алеев Р. М., Иванов В. П., Овсянников В. А. Основы теории анализа и синтеза воздушной тепловизионной аппаратуры. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 2000. 252 с.
2. Основы инфракрасной термографии / А. В. Афонин, Р. К. Ньюпорт и др.; Под ред. Р. К. Ньюпорта, А. И. Таджибаева. СПб: Изд-во ПЭИПК, 2004. 240 с.
3. Бугаенко А. Г., Белозеров А. Ф., Митряйкин В. И. Опытный учебно-тренировочный и научный центр по тепловидению // Оптич. вестн.: Бюл. оптического общества им. Д. С. Рождественского. 2002. № 105. С. 8—11.
4. Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г. Инфракрасные системы „смотрящего“ типа. М.: Логос, 2004. 444 с.
5. Моделирование и оценка современных тепловизионных приборов / В. П. Иванов, В. И. Курт, В. А. Овсянников, В. Л. Филиппов. Казань: Отечество, 2006. 594 с.
6. Балоев В. А., Курт В. И., Щипунов А. Н. Направления совершенствования отраслевой системы метрологического обеспечения инфракрасных оптико-электронных приборов // Оптич. журн. 2007. Т. 74, № 3. С. 5—13.
7. Пат. 191285 РФ. Устройство тестирования разрешения тепловизоров по контрасту / Т. А. Акименко, Е. В. Ларкин, О. А. Лучанский, Е. В. Филиппова. Оpubл. 01.08.2019. Бюл. № 22.
8. Акименко Т. А., Филиппова Е. В. Исследование статических характеристик и пространственной динамики тепловизионной системы наблюдения // Изв. ТулГУ. Сер. Технические науки. 2018. № 9. С. 497—500.
9. Испытательные таблицы для измерения качества цифрового и аналогового телевизионного вещания // Журн. „625“. 1999. № 8. С. 36—42.
10. Boiangiu C. A., Dvornic A. I. Methods of bitonal image conversion for modern and classic documents // WSEAS Trans. on Computers. 2008. Vol. 7, N 7. P. 1081—1090.

11. ISO 12653-1:2000. Electronic imaging — Test target for the black-and-white scanning of office documents. Part 1: Characteristics.
12. ISO 12653-2:2000. Electronic imaging — Test target for the black-and-white scanning of office documents. Part 2: Method of use.
13. ISO 12653-3:2014. Electronic imaging — Test target for scanning of office documents. Part 3: Test target for use in lower resolution applications.
14. Testing Image Synthesis for Skanners Verification / E. Larkin, V. Kotov, N. Kotova, A. Privalov // 2nd Intern. Ural Conf. on Measurements (URALCON). Chelyabinsk, Russia: South Ural State University, 2017. P. 221—226.
15. Larkin E. V., Kotov V. V., Kotova N. A., Privalov A. N. Method of Estimation of Scanning System Quality // 10th Intern. Conf. on Machine Vision (ICMV): Proc. of SPIE. 2018. Vol. 10696. Article Number: UNSP 106962N.
16. Gray R. M. Entropy and Information Theory. Springer. 2011. 409 p.
17. Jaynes E. T. Probability Theory: The Logic of Science / Ed. G. L. Bretthorst. Cambridge Univ. Press, 2003. 753 p.
18. Maronna R. M., Victor J., Yohai V. J. Robust functional linear regression based on splines // Computational Statistics & Data Analysis. 2013. Vol. 65. P. 46—55.
19. Muler N., Yohai V. J. Robust estimation for vector autoregressive models // Computational Statistics & Data Analysis. 2013. Vol. 65. P. 68—79.
20. Gonzalez R. C., Woods R. E. Digital Image Processing. Prentice Hall Publ., 2002. 1040 p.
21. Методы компьютерной обработки изображений / Под ред. В. А. Сойфера. М.: Физматлит, 2003. 784 с.
22. Papoulis A. Systems and Transforms with Applications in Optics. NY: McGraw-Hill Book Co., 1968. 474 p.

**Сведения об авторах**

- Евгений Васильевич Ларкин** — д-р техн. наук, профессор; Тульский государственный университет, кафедра робототехники и автоматизации производства; заведующий кафедрой; E-mail: elarkin@mail.ru
- Дмитрий Витальевич Титов** — д-р техн. наук, доцент; Юго-Западный государственный университет, кафедра вычислительной техники; профессор; E-mail: titov.swsu@gmail.com
- Татьяна Алексеевна Акименко** — канд. техн. наук, доцент; Тульский государственный университет, кафедра робототехники и автоматизации производства; E-mail: tantan72@mail.ru
- Тамара Александровна Шибакина** — канд. техн. наук, профессор; Юго-Западный государственный университет, кафедра вычислительной техники; профессор; E-mail: tas\_06@mail.ru

Поступила в редакцию 26.07.22; одобрена после рецензирования 10.08.22; принята к публикации 25.01.23.

**REFERENCES**

1. Aleev P.M., Ivanov V.P., Ovsyannikov V.A. *Osnovy teorii analiza i sinteza vozduшной teplovizionnoy apparatury* (Fundamentals of the Theory of Analysis and Synthesis of Airborne Thermal Imaging Equipment), Kazan, 2000, 252 p. (in Russ.)
2. Afonin A.V., Newport R.K. et al. *Osnovy infrakrasnoy termografii* (Fundamentals of Infrared Thermography), St. Petersburg, 2004, 240 p. (in Russ.)
3. Bugayenko A.G., Belozеров A.F., Mityraykin V.I. *Opticheskiy vestnik, D.S. Rozhdestvenskiy Optical Society*, 2002, no. 105, pp. 8–11. (in Russ.)
4. Tarasov V.V., Yakushenkov Yu.G. *Infrakrasnyye sistemy "smotryashchego" tipa* (Infrared Systems of "Looking" Type), Moscow, 2004, 444 p. (in Russ.)
5. Ivanov V.P., Kurt V.I., Ovsyannikov V.A., Filippov V.L. *Modelirovaniye i otsenka sovremennykh teplovizionnykh priborov* (Modeling and Evaluation of Modern Thermal Imaging Devices), Kazan, 2006, 594 p. (in Russ.)
6. Baloev V.A., Kurt V.I., Shchipunov A.N. *Journal of Optical Technology*, 2007, no. 3(74), pp. 152–158.
7. Patent RU 191285, *Ustroystvo testirovaniya razresheniya teplovizorov po kontrastu* (Device for Testing the Resolution of Thermal Imagers by Contrast), T.A. Akimenko, E.V. Larkin, O.A. Luchansky, E.V. Filippova, Published 01.08.2019, Bulletin 22. (in Russ.)
8. Akimenko T.A., Filippova E.V. *News of the Tula State University. Technical sciences*, 2018, no. 9, pp. 497–500. (in Russ.)
9. Dvorkovich A.V., Dvorkovich V.P., Makarov D.G., Novinsky N.B., Sokolov A.Yu. 625, 1999, no. 8, pp. 36–42. (in Russ.)

10. Boiangiu C.A., Dvornic A.I. *WSEAS Transactions on Computers*, 2008, no. 7(7), pp. 1081–1090.
11. ISO 12653-1:2000, *Electronic imaging - Test target for the black-and-white scanning of office documents. Part 1: Characteristics*.
12. ISO 12653-2:2000, *Electronic imaging - Test target for the black-and-white scanning of office documents. Part 2: Method of use*.
13. ISO 12653-3:2014, *Electronic imaging - Test target for scanning of office documents. Part 3: Test target for use in lower resolution applications*.
14. Larkin E., Kotov V., Kotova N., Privalov A. *2nd International Ural Conference on Measurements (URALCON)*, South Ural State University, Chelyabinsk, 2017, pp. 221–226.
15. Larkin E., Kotov V., Kotova N., Privalov A. *10th International Conference on Machine Vision (ICMV)*, Proceedings of SPIE, 2018, vol. 10696, article number UNSP 106962N.
16. Gray R.M. *Entropy and Information Theory*, Springer, 2011, 409 p.
17. Jaynes E.T. *Probability theory: The logic of science*, Cambridge University Press, 2003, 753 p.
18. Maronna R.M., Victor J., Yohai V.J. *Computational Statistics & Data Analysis*, 2013, vol. 65, pp. 46–55.
19. Muler N., Yohai V.J. *Computational Statistics & Data Analysis*, 2013, vol. 65, pp. 68–79.
20. Gonzalez R.C., Woods R.E. *Digital Image Processing*, Prentice Hall, 2002, 1040 p.
21. Gashnikov M.V., Glumov N.I., Ilyasova N.Yu. et al. *Metody komp'yuternoy obrabotki izobrazheniy* (Computer Image Processing Methods), Moscow, 2003, 784 p. (in Russ.)
22. Papoulis A. *Systems and transforms with applications in optics*, NY, McGraw-Hill Book Co., 1968, 474 p.

#### **Data on authors**

- |                              |  |
|------------------------------|--|
| <b>Evgeny V. Larkin</b>      | — Dr. Sci., Professor; Tula State University, Department of Robotics and Automation; Head of the Department; E-mail: elarkin@mail.ru     |
| <b>Dmitry V. Titov</b>       | — Dr. Sci., Associate Professor; Southwest State University, Department of Computer Engineering; Professor; E-mail: titov.swsu@gmail.com |
| <b>Tatiana A. Akimenko</b>   | — PhD, Associate Professor; Tula State University, Department of Robotics and Automation; E-mail: tantan72@mail.ru                       |
| <b>Tamara A. Shirabakina</b> | — PhD, Professor; Southwest State University, Department of Computer Engineering; Professor; E-mail: tas_06@mail.ru                      |

Received 26.07.22; approved after reviewing 10.08.22; accepted for publication 25.01.23.