

**МЕТОДИ І СИСТЕМИ ОПТИЧНО-ЕЛЕКТРОННОЇ ТА ЦИФРОВОЇ  
ОБРОБКИ СИГНАЛІВ**

УДК 621.384.3

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫХОДНОГО СИГНАЛА ТЕПЛОВИЗОРА ПРИ  
КОНТРОЛЕ ПЕРЕГРЕВА ПРОВОДА КОНТАКТНЫХ СЕТЕЙ ЖЕЛЕЗНЫХ  
ДОРОГ***Кучеренко О. К., Рыжков Н. А.**Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический  
институт имени Игоря Сикорского», г. Киев, Украина**E-mail: [oleg.kucherenko@gmail.com](mailto:oleg.kucherenko@gmail.com), [anciento1331@gmail.com](mailto:anciento1331@gmail.com)*

*В статье приведены результаты исследования по изменению отношения сигнал/шум при контроле мест перегрева провода контактных сетей железных дорог тепловизионным методом. Исследования проведены с учетом возможных средних температур провода для зон умеренного климатического пояса и допустимых значений его перегрева.*

*Для реализации тепловизионного метода взяты два типа тепловизионных камер с различными апертурами объективов и параметров микроболометрических матриц.*

**Ключевые слова:** *износ провода контактной сети, допустимая температура перегрева, тепловизионный метод контроля.*

**Введение**

Безопасность эксплуатации железнодорожного транспорта связана с необходимостью контроля износа провода контактных сетей при трении о токоприемник. Вследствие непрерывного трения провод подвергается износу, изменяется профиль его поперечного сечения. Мониторинг должен проводиться бесконтактным методом, так как провод находится под высоким напряжением (порядка 30 кВ).

Для решения этой задачи применялся ряд методов. Так в работах [1-3] рассмотрена возможность применения теневых методов, основной недостаток которых состоит в необходимости расположения источника освещения и фотоприемника по разные стороны объекта. В работе [4-7] предлагается использовать метод структурного освещения, а также лазерной проекционной системы для автоматического дистанционного контроля геометрии и дефектов контактных проводов. При указанных авторами возможностях этого метода реализация его связана с применением сложной оптико-механической части устройства, что оказывает влияние на точность измерения и надежность эксплуатации в реальных условиях.

Очевидным является тот факт, что при износе контактного провода уменьшается площадь его поперечного сечения, а это, в свою очередь, вызывает перегрев провода в местах износа. В большинстве стран Европейского Союза для

перегревов токоведущих частей приняты следующие нормы:

**1-я категория** – перегрев менее 5<sup>0</sup>С - узел следует держать под контролем и подвергнуть техническому обслуживанию при следующей проверке;

**2-я категория** – перегрев 5 - 30<sup>0</sup>С (развитый перегрев) -ремонт провода в ближайшее время с учетом нагрузки;

**3-я категория** – перегрев более 30<sup>0</sup>С (острый перегрев)- немедленный ремонт с учетом нагрузки.

**Постановка задачи**

Актуальной является задача определения параметров выходного сигнала тепловизора при контроле мест перегрева провода контактных сетей железных дорог. При этом необходимо учитывать ряд основных факторов:

- коэффициент теплового излучения (КТИ) провода контактной сети;
- среднюю температуру провода контактной сети обусловленную зоной климатического пояса;
- допустимую величину перегрева участков провода контактной сети;
- расстояние между проводом контактной сети и тепловизором;
- температурную чувствительность тепловизора;
- характеристики оптической системы тепловизора и параметры микроболометрической матрицы;

- ряд других менее важных факторов.

Исследования проводились для реальных конструктивных параметров системы измерения температуры провода контактной сети с применением двух типов тепловизоров.

#### Модель расчета соотношения сигнал/шум для приемника

Разностный поток излучения  $\Delta\Phi_{\text{пор}}$ , соответствующий пороговой температурной чувствительности микроболометрической матрицы  $\Delta T_{\text{пор}}$  при измеряемой температуре  $T_1$  и температуре  $T_2 = T_1 + \Delta T_{\text{пор}}$ , приходящаяся на один пиксель матрицы, определяется по формуле:

$$\Delta\Phi_{\text{пор}} = (L_{\Delta\lambda}(T_2) - L_{\Delta\lambda}(T_1)) \cdot \tau_{\Delta\lambda} \cdot S_{\text{эф}} \cdot \Delta\omega, \quad (1)$$

где  $L_{\Delta\lambda}(T_2)$  и  $L_{\Delta\lambda}(T_1)$  - энергетическая яркость провода контактной сети для спектрального интервала  $\Delta\lambda = 8-14$  мкм и для абсолютных температур  $T_2$  и  $T_1$ ;

$\tau_{\Delta\lambda}$  - коэффициент пропускания объектива тепловизионной камеры;

$S_{\text{эф}}$  - площадь пикселя микроболометрической матрицы;

$\Delta\omega = \pi D / 4(f')$  - эффективная телесная апертура объектива тепловизионной камеры:  $D$  - диаметр входного зрачка,  $f'$  - фокусное расстояние объектива.

Энергетическая яркость провода контактной сети для спектрального интервала  $\Delta\lambda = 8-14$  мкм и для абсолютных температур  $T_2$  и  $T_1$  определяется соотношениями

$$\begin{aligned} L_{\Delta\lambda}(T_1) &= M_{\Delta\lambda}(T_1) / \pi, \\ L_{\Delta\lambda}(T_2) &= M_{\Delta\lambda}(T_2) / \pi, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $M_{\Delta\lambda}(T_2)$  и  $M_{\Delta\lambda}(T_1)$  - энергетическая светимость провода контактной сети в спектральном интервале  $\Delta\lambda = 8-14$  мкм для абсолютных температур  $T_2$  и  $T_1$ .

Энергетические светимости провода контактной сети определяются соотношениями

$$\begin{aligned} M_{\Delta\lambda}(T_2) &= \varepsilon_T \cdot r_{\lambda}(T_2) \cdot \Delta\lambda; \\ M_{\Delta\lambda}(T_1) &= \varepsilon_T \cdot r_{\lambda}(T_1) \cdot \Delta\lambda, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\varepsilon_T$  - коэффициент излучения материала провода контактной сети;

$r_{\lambda}(T_2)$  и  $r_{\lambda}(T_1)$  - суммарная спектральная плотность излучения абсолютно чёрного тела для спектрального интервала  $\Delta\lambda = 8-14$  мкм и для абсолютных температур  $T_2$  и  $T_1$ , определяемая по формулам Планка

$$\begin{aligned} r_{\lambda}(T_2) &= \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5 \cdot \left( e^{\frac{c_2}{\lambda T_2}} - 1 \right)} d\lambda; \\ r_{\lambda}(T_1) &= \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5 \cdot \left( e^{\frac{c_2}{\lambda T_1}} - 1 \right)} d\lambda, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $c_1 = 2\pi c_0^2 h = 3,7415 \cdot 10^{-16}$  - первая постоянная в формуле Планка;

$c_2 = \frac{c_0 h}{k} = 1,43880 \cdot 10^{-2}$  м·К - вторая постоянная в формуле Планка, связанные с константами:

$c_0$  - скорость света в вакууме;  $h$  - постоянная Планка;  $k$  - постоянная Больцмана.

Энергетическую светимость провода контактной сети при температурах  $T_2$  и  $T_1$  в заданном спектральном диапазоне можно определить из соотношений [8]

$$\begin{aligned} M_{\Delta\lambda}(T_2) &= \varepsilon_T \cdot \sigma \cdot T_2^4 (z_{\lambda}(x_{\lambda_2}) - z_{\lambda}(x_{\lambda_1})) \\ M_{\Delta\lambda}(T_1) &= \varepsilon_T \cdot \sigma \cdot T_1^4 (z_{\lambda}(x_{\lambda_2}) - z_{\lambda}(x_{\lambda_1})) \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\sigma$  - постоянная Стефана-Больцмана;  $\varepsilon_T$  - коэффициент теплового излучения провода контактной сети;

$T_2$  и  $T_1$  - абсолютные температуры провода контактной сети для указанных ранее условий;

$z_{\lambda}(x_{\lambda}) = \frac{M_{0-\lambda}}{M_{0-\infty}}$  - относительные значения энергетической светимости абсолютно черного тела для безразмерных относительных значений длин волн  $x_{\lambda_2}$  и  $x_{\lambda_1}$ .

Параметры  $x_{\lambda_2}$  и  $x_{\lambda_1}$  равны

$$x_{\lambda_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_m}; \quad x_{\lambda_2} = \frac{\lambda_2}{\lambda_m}, \quad (6)$$

где  $\lambda_m$  определяется из закона Вина;  $\lambda_m = 2898 / T_{1,2}$

При проведении мониторинга провода контактной сети определялся разностный поток излучения  $\Delta\Phi_{\text{изм}}$ , обусловленный перегревом провода в местах износа в плоскости изображения объектива тепловизионной камеры. Этот поток зависит от средней температуры провода  $T_3$ , определяемый температурой окружающей среды, и температуры  $T_4$ , вызванной перегревом провода.

Примем  $T_4 = T_3 + \Delta T_{\text{изм}}$ , тогда  $\Delta\Phi_{\text{изм}}$  равно:

$$\Delta\Phi_{\text{изм}} = [L_{\Delta\lambda}(T_4) - L_{\Delta\lambda}(T_3)] \cdot \tau_{\Delta\lambda} \cdot S_{\text{эф}} \cdot \Delta\omega \cdot \tau_{\text{атм}}, \quad (7)$$

где  $L_{\Delta\lambda}(T_4)$  и  $L_{\Delta\lambda}(T_3)$  - энергетическая яркость провода контактной сети для спектрального интервала  $\Delta\lambda = 8-14$  мкм и для абсолютных температур  $T_4$  и  $T_3$ ;

$\tau_{\Delta\lambda}$  - коэффициент пропускания объектива тепловизионной камеры;

$\tau_{\text{атм}}$  - коэффициент пропускания атмосферы;

$S_{\text{эф}}$  - площадь поверхности провода контактной сети в поле зрения объектива тепловизионной камеры.

Энергетические яркости  $L_{\Delta\lambda}(T_4)$  и  $L_{\Delta\lambda}(T_3)$  определяются на основании соотношений, аналогичных соотношениям (2) - (6) для новых значений температур  $T_4$  и  $T_3$ .

Поток  $\Delta\Phi_{\text{изм}}$  обуславливает облученность в изображении провода контактной сети на поверхности чувствительных элементов микроболометрической матрицы равную:

$$E(\Delta T_{\text{изм}}) = \Delta\Phi_{\text{изм}} / S', \quad (8)$$

где  $S'$  - площадь изображения участка провода контактной сети, построенного объективом тепловизионной камеры на поверхности чувствительных элементов микроболометрической матрицы.

Значение  $S'$  зависят от увеличения объектива тепловизионной камеры  $\beta$  и площади поверхности контактного провода в поле зрения объектива тепловизионной камеры.

Увеличение  $\beta$  с учетом большого расстояния  $d$  от входного зрачка объектива до провода приближенно можно определить из соотношения

$$\beta = f' / d. \quad (9)$$

Приняв допущение, что распределение облученности в изображении провода контактной сети равномерно, определим разностный поток излучения, обусловленный перегревом участка провода контактной сети вследствие его износа, приходящийся на один пиксель микроболометрической матрицы по формуле

$$\Delta\Phi_{\text{пик.изм.}} = E(\Delta T_{\text{изм}}) \cdot S, \quad (10)$$

где  $S$  - площадь пикселя микроболометрической матрицы с учетом расстояния между пикселями.

Отношение сигнал/шум для цифрового выхода микроболометрической матрицы с учётом порогового потока излучения для одного пикселя определяется соотношением:

$$\rho = \frac{\Delta\Phi_{\text{пик.изм.}}}{\Delta\Phi_{\text{пор}}}. \quad (11)$$

### Проведенные расчеты и их анализ

Для анализа выходного сигнала были взяты две тепловизионные камеры:

1- Iridium 640/100 со следующими характеристиками: апертура объектива- 1,0; фокусное расстояние - 100мм; коэффициент пропускания  $\tau$  - 0,6; размеры матрицы 640\*480 пикс; площадь пикселя  $S$  -  $625 \cdot 10^{-12}$  м<sup>2</sup>; пороговая температурная чувствительность - 0,06 К при частоте 50Гц [9];

2 - Tau2 640 со следующими характеристиками: апертура объектива - 1,0; фокусное расстояние - 75 мм;  $\tau$  - 0,6; размеры матрицы 640\*480 пикс.; площадь пикселя  $S$  -  $289 \cdot 10^{-12}$  м<sup>2</sup>; пороговая температурная чувствительность - 0,06 К при частоте 50 Гц [10].

Расчеты проводились для значений средних температур  $T_3$  соответствующих поясу умеренного климата:  $T_1 = 263\text{K}; 273\text{K}; 283\text{K}; 293\text{K}; 303\text{K}; 313\text{K}$  и допустимых температур перегрева  $\Delta T_{\text{изм}}$  провода контактной сети вследствие износа

$$\Delta T_{\text{изм}} = 5\text{K}; 10\text{K}; 15\text{K}; 20\text{K}; 25\text{K}; 30\text{K}.$$

Предполагалось, что провод контактной сети расположен на расстоянии 1500 мм от тепловизионной камеры, при этом  $S_{\text{эф}} = 14,4 \cdot 10^3$  мм<sup>2</sup>  $\varepsilon_r$  - 0.6 (окисленная медь).

Анализ проводился с применением программы MathCAD. В таблицах 1, 2 приведены результаты расчета  $\rho$  в указанном диапазоне средних температур  $T_3$  и температуре перегрева провода контактной сети  $\Delta T_{\text{изм}} = 10$  К для указанных типов тепловизоров.

Таблица 1. Зависимость  $\rho$  от  $T_3$  при  $\Delta T_{\text{изм}} = 10$  К для тепловизора Iridium 640/100

параметр	$T_3, \text{K}$					
	263	273	283	293	303	313
$\Delta\Phi_{\text{пор}}, \text{Вт}$	2.2162197 *10 <sup>-11</sup>	2.5888743 *10 <sup>-11</sup>	2.951536 *10 <sup>-11</sup>	3.3844261 *10 <sup>-11</sup>	3.812181 *10 <sup>-11</sup>	4.2353557 *10 <sup>-11</sup>
$\Delta\Phi_{\text{пик.изм.}}, \text{Вт}$	1.532264 *10 <sup>-6</sup>	1.786154 *10 <sup>-6</sup>	2.032508 *10 <sup>-6</sup>	2.326486 *10 <sup>-6</sup>	2.616126 *10 <sup>-6</sup>	2.902002 *10 <sup>-6</sup>
$\rho$	6.913864 *10 <sup>4</sup>	6.899347 *10 <sup>4</sup>	6.886273 *10 <sup>4</sup>	6.874094 *10 <sup>4</sup>	6.862544 *10 <sup>4</sup>	6.85185 *10 <sup>4</sup>

Таблиця 2. Зависимость  $\rho$  от  $T_3$  при  $\Delta T_{\text{изм}} = 10\text{K}$  для тепловизора Tau2 640

параметр	$T_3, \text{K}$					
	263	273	283	293	303	313
$\Delta\Phi_{\text{пор}}$	1.02478 $\cdot 10^{-11}$	1.197095 $\cdot 10^{-11}$	1.36479 $\cdot 10^{-11}$	1.564959 $\cdot 10^{-11}$	1.762752 $\cdot 10^{-11}$	1.958428 $\cdot 10^{-11}$
$\Delta\Phi_{\text{пик.изм.}}$	1.563375 $\cdot 10^{-6}$	1.82242 $\cdot 10^{-6}$	2.073776 $\cdot 10^{-6}$	2.373723 $\cdot 10^{-6}$	2.669244 $\cdot 10^{-6}$	2.960924 $\cdot 10^{-6}$
$\rho$	1.525572 $\cdot 10^5$	1.522368 $\cdot 10^5$	1.519484 $\cdot 10^5$	1.516796 $\cdot 10^5$	1.514248 $\cdot 10^5$	1.511888 $\cdot 10^5$

Зависимость  $\rho$  от  $\Delta T_{\text{изм}}$  для  $T_3 = 263\text{K}$  и  $313\text{K}$  при применении тепловизора «Iridium 640/100» приведена на графике рис. 1, а для тепловизора «Tau2 640» на графике рис. 2.

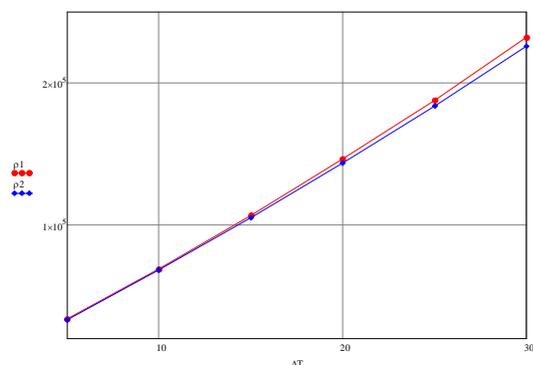


Рис. 1. Зависимость  $\rho$  от  $\Delta T_{\text{изм}}$  для тепловизора «Iridium 640/100», где  $\rho_1$  при  $T_3 = 263\text{K}$  и  $\rho_2$  при  $T_3 = 313\text{K}$

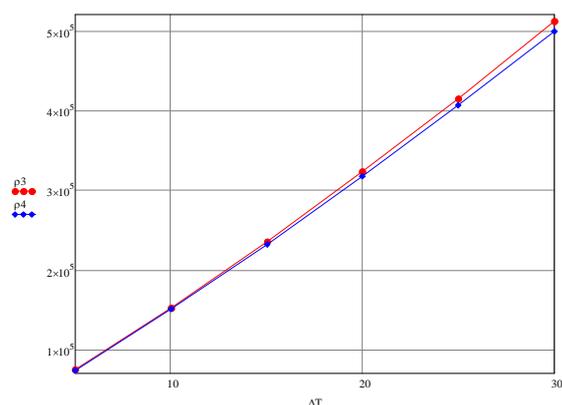


Рис. 2. Зависимость  $\rho$  от  $\Delta T_{\text{изм}}$  для тепловизора «Tau2 640», где  $\rho_3$  при  $T_3 = 263\text{K}$  и  $\rho_4$  при  $T_3 = 313\text{K}$

### Выводы

1. Как видно из таблиц 1 и 2  $\rho$  незначительно меняется в зависимости от  $T_3$ . Это изменение сопоставимо с геометрическим шумом микроболометрической матрицы, который

обуславливает изменение  $\Delta\Phi_{\text{пор}}$  в диапазоне 4% от расчетного значения. Для других значений  $\Delta T_{\text{изм}}$  зависимость  $\rho$  от  $T_3$  носит аналогичный характер.

2. Как следует из графиков приведенных на рисунках зависимость  $\rho$  от  $\Delta T_{\text{изм}}$  мало отличается от линейной. Разница в значениях  $\rho_3$  и  $\rho_4$  начинает превышать 1% для  $\Delta T_{\text{изм}} > 15\text{K}$ .

3. При одинаковых значениях  $\Delta T_{\text{изм}}$  отношение сигнал/шум для тепловизора «Tau2 640» более чем в два раза превышает это отношение для тепловизора «Iridium 640/100».

Проведенные исследования необходимы при проектировании тепловизионной системы контроля мест перегрева повода контактной сети железнодорожного транспорта. В частности, это важно при разработке градуировочной шкалы измеряющего тепловизора. Дальнейшие исследования будут направлены на анализ погрешностей метода и разработку системы слежения за изменением положения повода контактной сети.

### Литература

- Pilipovich V., Esman A., Kuleshev V. Devices for measuring diameter of moving objects. Instruments and Control Systems. 1990; 3.
- Svendrovsky A. Diameter calculations of contactless XY measurers. Scientific and technical problems of instrument making and mechanical engineering; 2005.
- Fedorov E., Goldshtain A., Svendrovsky A., Redko V. Measuring the diameter and eccentricity of the electric cable on the basis of inductive optical method. Science of the Tomsk Polytechnic University. 2010; 2.
- Voronin A, Sirotinin V, Sheviakov S, Fedorov U. Fast laser diagnostics system of contact wire "Iznos". Science and transport. 2012;(3). Available at: [http://www.rostransport.com/science\\_transport/pdf/3/52-53.pdf](http://www.rostransport.com/science_transport/pdf/3/52-53.pdf)
- Gorshkov D., Stupicky V. Modern methods of definition of deterioration of the contact wire. Irkutsk railway transport university. 2017;5:85-89.

6. Skibicki J., Bartłomiejczyk M. The new version of contact-less method for localisation of catenary contact wire – theoretical assumption. PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY [Internet]. 2013;89:100-104. Available from: <http://www.pe.org.pl/articles/2013/7/23.pdf>
7. Zapuskalov V.G., Maslov A.I., Arbuzov E.V., Petrenko E.O., Mushkarov A.S. Mobile complex for control of dynamic parameters of trolley wire of electrified railway. Kontrol'. Diagnostika [Testing. Diagnostics]. 2002. No 7. S. 16-18
8. Kriksunov L., Usoltsev I. Infrared systems for detection, direction finding and automatic tracking of moving targets. 1st ed. Washington: Joint Publications Research Service; 1978.
9. [Internet]. Detector Catalogue OKB Astron. [cited 10 January 2017]. Available from: [http://astrohn.ru/files/Catalogue\\_Detector.pdf](http://astrohn.ru/files/Catalogue_Detector.pdf)
10. FLIR Systems I. [www.flir.com/404.cfm](http://www.flir.com/404.cfm) [Internet]. Flir.com. 2017 [cited 10 January 2017]. Available from: <http://www.flir.com/cores/display/id=54717>

УДК 621.384.3

**О. К. Кучеренко, Н. А. Рыжков**

*Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, м. Київ, Україна*

### ВИЗНАЧЕННЯ ВИХІДНОГО СИГНАЛУ ТЕПЛОВІЗОРА ПРИ ЗДІЙСНЕННІ КОНТРОЛЮ ПЕРЕГРІВУ ДРОТУ КОНТАКТНИХ МЕРЕЖ ЗАЛІЗНИЦЬ

У статті наведені результати дослідження по зміні ставлення сигнал / шум при контролі місць перегріву проводу контактних мереж залізниць тепловізійним методом. Дослідження проведені з урахуванням можливих середніх температур дроти для зон помірного кліматичного поясу і допустимих значень його перегріву.

Для реалізації тепловізійного методу взяті два типи тепловізійних камер з різними апертурами об'єктивів і параметрів мікроболометричних матриць.

Подальші дослідження будуть спрямовані на аналіз похибок методу та розробку системи стеження за зміною положення дроту контактної мережі.

**Ключові слова:** знос дроту контактної мережі, допустима температура перегріву, тепловізійний метод контролю.

**O. K. Kucherenko, N. A. Ryzhkov**

*National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine*

### DETERMINATION OF THE OUTPUT SIGNAL OF THE THERMAL IMAGER WHEN CONTROLLING THE OVERHEATING OF THE WIRE OF THE RAILROAD CONTACT NETS

The article presents the results of a study on the change in the signal-to-noise ratio when controlling the places of overheating of the wire of the railroad contact networks by the thermal imaging method.

The studies were carried out taking into account the possible average temperature of the wire for the zones of the temperate climatic zone and the permissible values of its overheating.

Realize the thermal imaging method, two types of thermal imaging cameras with different apertures of objectives and parameters of micro bolometric matrices are taken.

The carried out researches are necessary at designing of the thermal imaging system of the control of places of an overheat of an occasion of a contact network of a railway transportation. In particular, this is important in the development of the calibration scale of the measuring imager. Further research will be aimed at analyzing the errors of the method and developing a tracking system for changing the position of the wire of the contact network.

**Keywords:** wear of the wire of the contact network; Allowable temperature of overheating; Thermal imaging control method.

*Надійшла до редакції  
12 січня 2017 року*

*Рецензовано  
26 січня 2017 року*

© Кучеренко О. К., Рыжков Н. А., 2017