

Ю. И. ПЛОТНИКОВ

# Точность и достоверность контроля при тепловизионном диагностировании оборудования электрифицированных линий

*Повышение надежности и эффективности электрооборудования железных дорог в значительной степени зависит от научно обоснованного перехода к стратегии технического обслуживания и ремонта оборудования по его фактическому состоянию. Особенно актуальной эта проблема становится в связи с тем, что в настоящий период значительная часть электрооборудования выработала свой ресурс на 60–70% и более. С другой стороны, обновление парка оборудования связано с внедрением новых технических средств и систем с высокой степенью автоматизации, не предусматривающих в отдельных случаях их непосредственного оперативного технического обслуживания. Тепловизионное диагностирование устройств тягового электроснабжения, обладающее рядом преимуществ, в последнее время находит все большее применение на сети ОАО «РЖД».*

Этот дистанционный, бесконтактный и высокопроизводительный метод позволяет получать наглядную диагностическую информацию в реальном масштабе времени как в статических, так и в динамических режимах тепловизионной съемки. Постоянное совершенствование аппаратных и программных средств получения и обработки тепловизионной информации о состоянии элементов контактной сети и тяговых подстанций способствует дальнейшему росту мобильности, степени автоматизации и производительности процесса диагностирования [1, 2]. Применение метода регламентировано отраслевым руководящим документом «Объем и нормы испытаний электрооборудования» [3].

## Оценка влияния достоверности контроля на эффективность эксплуатации оборудования

Успех решения задачи обслуживания и ремонта оборудования системы тягового электроснабжения по фактическому состоянию существенно зависит от

точности и достоверности контроля параметров объекта диагностирования. Под достоверностью контроля  $D$  понимается степень объективного отображения результатами контроля действительного технического состояния оборудования.

Достоверность оценки технического состояния неразрывно связана с так называемыми ошибками первого и второго рода. В первом случае (при «риске изготовителя») исправное оборудование может быть принято за неисправное. Эта ошибка вызвана неоправданными затратами, связанными с выводом фактически исправного оборудования из действия или с ограничением режимов его эксплуатации, последующим осмотром, ремонтом или заменой. Во втором случае (при «риске заказчика») неисправное оборудование может быть принято за исправное.

Последствия эксплуатации фактически дефектного оборудования и связанные с этим затраты могут быть самыми серьезными. Примером может служить обрыв контактного провода вследствие его износа, отжига и т. п. В общем случае при повышении достоверности контроля (снижении рисков заказчика и изготовителя) снижаются суммарные затраты от последствий ошибочного контроля.

Однако повышение достоверности связано и с неизбежными затратами на изготовление (закупку) соответствующих аппаратных средств измерения и вычислительной техники, разработку программного обеспечения, проведение научно-исследовательских и конструкторских работ и т. д. Таким образом, суммарные затраты условного ресурса (например, финансовые), связанные с повышением достоверности контроля, можно представить в виде выражения

$$C = C_0 + C_k, \quad (1)$$

где  $C_0$  и  $C_k$  — затраты соответственно на эксплуатацию объекта диагностирования и на систему контроля. В общем случае достоверность контроля  $D$  лежит в пределах от нуля до 1 ( $0 \leq D \leq 1$ ). При  $D$ , стремящемся к нулю ( $D \rightarrow 0$ ),  $C_0$  стремится к максимальному значению, а  $C_k$  — к минимальному. В свою оче-

редь, при  $D \rightarrow 1$   $C_3$  стремится к минимуму, а  $C_k$  — к максимуму (бесконечности).

Поскольку с ростом достоверности контроля  $D$  затраты  $C_3$  снижаются, а затраты  $C_k$  увеличиваются, то функция  $C = f(D)$  имеет экстремум, а именно минимум, которому соответствует оптимальное значение  $D_0$ . На рис. 1 представлена графическая интерпретация качественной зависимости  $C = f(D)$ . Для количественной оценки зависимости суммарных финансовых затрат (1) от достоверности контроля и оценки оптимального значения  $D_0$  необходимо иметь соответствующие статистические данные о зависимостях  $C_3 = f_1(D)$  и  $C_k = f_2(D)$  применительно к конкретным объекту контроля и системе диагностирования. В общем случае функции  $f_1$  и  $f_2$  можно аппроксимировать квадратичными зависимостями. В этом случае количественная оценка суммарных затрат (1) является чисто технической задачей, которая при необходимости может быть практически решена с помощью метода наименьших квадратов и технико-экономической статистической информации.

### Основные диагностические показатели, используемые при тепловизионных обследованиях электрооборудования

В руководстве «Объем и нормы испытаний электрооборудования» оценка технического состояния широкого спектра оборудования при тепловизионных обследованиях в основном сводится к контролю разности температур. При этом контролируются следующие диагностические показатели:

1. Превышение температуры поверхности объекта диагностирования  $t_{\text{п}}$  над температурой окружающего воздуха  $t_{\text{в}}$

$$\Delta t = t_{\text{п}} - t_{\text{в}}; \quad (2)$$

2. Избыточная температура при оценке состояния аналогичного оборудования, находящегося под напряжением различных фаз А и Б,

$$\Delta t_{\text{изб}} = \Delta t_{\text{А}} - \Delta t_{\text{Б}} = t_{\text{А}} - t_{\text{Б}}; \quad (3)$$

3. Коэффициент дефектности

$$K_d = \Delta t_{\text{кс}} / \Delta t_{\text{пр}}, \quad (4)$$

где  $\Delta t_{\text{кс}}$ ,  $\Delta t_{\text{пр}}$  — превышение температуры в месте контактного соединения и провода над температурой воздуха на расстоянии не ближе 1 м от соединения.

В зависимости от величин  $\Delta t$ ,  $\Delta t_{\text{изб}}$ ,  $K_d$  и токовой нагрузки электрооборудования принимают решения о техническом состоянии объекта и его соответствующем обслуживании и ремонте.

Для этого величину превышения температуры  $\Delta t$  (2) пересчитывают на номинальную токовую нагрузку оборудования, квадрат которой прямо пропор-

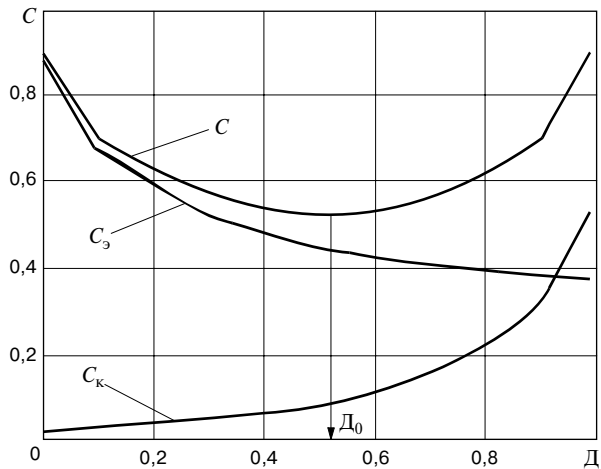


Рис. 1. Качественная зависимость затрат на контроль и эксплуатацию объекта от достоверности контроля:  
 $C_k$  — затраты на систему контроля;  $C_3$  — затраты на эксплуатацию объекта;  $C$  — суммарные затраты;  $D_0$  — оптимальное значение достоверности контроля

ционален величине  $\Delta t$ . Полученное значение превышения температуры на номинальной нагрузке  $\Delta t_{\text{ном}}$  сравнивают с наибольшим допустимым значением, принимаемым для соответствующего оборудования по таблице ПЗ.1, содержащейся в источнике [3]:

$$\Delta t_{\text{ном}} < \Delta t_{\text{доп}}.$$

В случае выполнения неравенства контактное соединение считается исправным. В противном случае необходимо проведение соответствующего технического обслуживания или ремонта.

Избыточную температуру  $\Delta t_{\text{изб}}$  (3) пересчитывают на 50 %-ную токовую нагрузку с получением значения  $\Delta t_{0,5}$ . При этом в соответствии с [3] различают следующие области по степени неисправности:

- $5 \leq \Delta t_{0,5} \leq 10$  °С — начальная степень неисправности, которую следует держать под контролем и принимать меры по ее устранению во время проведения ремонта, запланированного по графику;
- $10 < \Delta t_{0,5} \leq 30$  °С — развившийся дефект, для которого необходимо принять меры по устранению при ближайшем выводе электрооборудования из работы;
- $\Delta t_{0,5} > 30$  °С — аварийный дефект, требующий немедленного устранения.

При оценке теплового состояния токоведущих частей по коэффициенту дефектности  $K_d$  различают следующие степени неисправности:

- $1 < K_d < 1,2$  — начальная степень неисправности, которую следует держать под контролем;
- $1,2 \leq K_d \leq 1,5$  — развившийся дефект, требующий принятия мер по устранению при ближайшем выводе электрооборудования из работы;
- $K_d > 1,5$  — аварийный дефект, требующий немедленного устранения.

Формулы (2) — (4) и приведенные выше неравенства содержат разности температур, которые на

практике по абсолютной величине имеют достаточно малые значения — от нескольких градусов до нескольких десятых его долей. Так, для трансформаторов тока и напряжения температуры фарфоровых покрышек, измеренные в соответствующих зонах трех фаз, не должны отличаться между собой более чем на  $0,3^\circ\text{C}$  [3]. Диагностические показатели (2) — (4) представляют собой величины косвенных измерений, т. е. являются функциями непосредственно измеренных параметров — температуры поверхностей диагностируемых объектов и окружающего воздуха.

### Влияние малой разности параметров на точность диагностических показателей

При проведении тепловизионного контроля оценке методической погрешности (включающей погрешности косвенных измерений параметров) уделяется недостаточно внимания. То же самое можно сказать и о методических рекомендациях, а также о нормах по тепловизионным обследованиям электрооборудования [3]. Вместе с тем метрологический аспект в процедуре диагностирования играет важную роль и требует более подробного рассмотрения.

Уравнение взаимосвязи диагностического показателя  $Y$  как величины косвенного измерения и соответствующих параметров прямого измерения представим в следующем виде:

$$Y = F(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_m), \quad i = 1, \dots, m, \quad (5)$$

где  $x_i$  —  $i$ -й параметр непосредственного измерения;  $m$  — общее число параметров непосредственного измерения.

Среднеквадратическая относительная погрешность диагностического показателя как величины косвенного измерения определяется по формуле [4]:

$$\sigma_y^2 = \sum_{i=1}^m k_i^2 \sigma_i^2, \quad (6)$$

где  $k_i = \frac{\partial Y}{\partial x_i} \frac{x_i}{Y}$  — коэффициент влияния  $i$ -го параметра непосредственного измерения  $x_i$  на диагностический показатель  $Y$ ;  $\sigma_i$  — среднеквадратическая относительная погрешность измерения параметра  $x_i$ .

Для иллюстрации влияния малой разности параметров на погрешность оценки диагностических показателей рассмотрим простой пример:

$$Y = \Delta x = x_1 - x_2. \quad (7)$$

Формулы для коэффициентов влияния параметров  $x_1$  и  $x_2$  на показатель  $Y$  соответственно имеют вид:

$$k_1 = x_1/\Delta x, \quad k_2 = -x_2/\Delta x. \quad (8)$$

При  $x_1 = 10$ ,  $x_2 = 9$ ,  $\Delta x = 1$ ,  $\sigma_1 = \sigma_2 = 1\%$  в соответствии с (6) получим

$$\sigma_y = \sqrt{10^2 + 9^2} = 13,45\%,$$

а при  $x_1 = 100$ ,  $x_2 = 99$ ,  $\Delta x = 1$ ,  $\sigma_1 = \sigma_2 = 1\%$  уже будем иметь

$$\sigma_y = 140,72\%.$$

Погрешности малой разности параметров по сравнению с погрешностями параметров непосредственного измерения увеличились более чем в 13 и 140 раз!

Рассмотренные примеры подтверждают известное простое правило приближенной оценки погрешности малой разности параметров: относительная погрешность разности примерно во столько раз больше относительных погрешностей каждого из параметров, во сколько раз разность параметров меньше каждого из них.

### Оценка точности тепловизионных диагностических показателей электрооборудования

Используя уравнения (2) и (6), запишем выражение для оценки погрешности, получаемой при измерении превышения температуры поверхности объекта:

$$\sigma_{\Delta} = \left[ \left( \frac{t_{\text{п}}}{\Delta t} \sigma_{t_{\text{п}}} \right)^2 + \left( \frac{t_{\text{в}}}{\Delta t} \sigma_{t_{\text{в}}} \right)^2 \right]^{0,5}, \quad (9)$$

где  $\sigma_{t_{\text{п}}}$  и  $\sigma_{t_{\text{в}}}$  — среднеквадратические относительные погрешности измерения температуры соответственно диагностируемой поверхности и воздуха.

Выражение для приближенной оценки погрешности измерения коэффициента дефектности  $K_d$  (4) имеет вид

$$\sigma_K \approx (1 + 1/K_d^2)^{0,5} \sigma_{\Delta}. \quad (10)$$

Формула выведена из выражения (9) с учетом формулы (4) и допущения о равенстве погрешностей измерения тепловизором температуры поверхности контактного соединения  $t_k$  и температуры провода  $t_{\text{пр}}$ .

Для оценки количественных значений погрешностей (9) и (10) примем относительную допустимую погрешность измерения температуры поверхности  $3\sigma_{t_{\text{п}}} = 2\%$  (что обеспечивается современными тепловизионными камерами — например, ТН7102), а относительную допустимую погрешность измерения температуры воздуха  $3\sigma_{t_{\text{в}}} = 1\%$  (обеспечивается, например, стеклянным термометром типа ТС100). Тогда относительная среднеквадратическая погрешность измерения температуры поверхности объекта с помощью тепловизора

$$\sigma_{t_{\text{п}}} = 2/3 = 0,67\%, \quad (11)$$

а соответствующая погрешность измерения температуры воздуха

$$\sigma_{t_{\text{в}}} = 1/3 = 0,33\%. \quad (12)$$

На рис. 2 и 3 представлены результаты расчетов погрешностей  $\sigma_{\Delta}$  и  $\sigma_K$  в виде графиков соответственно для превышения температуры поверхности  $\Delta t$  и коэффициента дефектности  $K_d$ . Расчеты произведены для различных значений температуры воздуха  $t_B$  с учетом собственных величин диагностических параметров  $\Delta t$  и  $K_d$ .

Анализ графиков на рис. 2 показывает, что при  $\Delta t = \text{const}$  погрешность превышения температуры  $\sigma_{\Delta}$  практически линейно увеличивается с ростом абсолютного значения температуры воздуха  $|t_B|$  от 0 до 40 °С. Если  $t_B = 0$ , погрешность косвенного измерения  $\sigma_{\Delta} = \sigma_{t_n} = 0,67\%$ . При  $\Delta t = 5\text{ °С}$  с ростом температуры воздуха от 0 до 40 °С погрешность измерения  $\Delta t$  увеличивается почти в 10 раз: от 0,67 до 6,5 %, а при  $\Delta t = 1\text{ °С}$  увеличивается почти в 50 раз: с 0,67 до 29 %. В случае анализа малых значений превышения температуры, например для  $\Delta t = 0,1\text{ °С}$ , погрешность измерения  $\sigma_{\Delta}$  уже при  $|t_B| = 5\text{ °С}$  составляет более 30 %. Если же  $|t_B| > 20\text{ °С}$ , то погрешность составит  $\sigma_{\Delta} > 140\%$ ! Физическую сущность графиков, приведенных на рис. 2, поясняет выражение (9) для погрешности измерения  $\sigma_{\Delta}$  и соответствующих коэффициентов влияния  $k_i$ .

Анализ графиков зависимости погрешностей коэффициента дефектности  $\sigma_K$  от величин  $K_d$  и  $t_B$ , представленных на рис. 3, показывает, что характер изменения  $\sigma_K$  соответствует графикам для  $\sigma_{\Delta}$ , представленным на рис. 2. Погрешность измерения  $\sigma_K$  увеличивается практически линейно с ростом абсолютной величины  $|t_B|$ . На рис. 3 представлены семейства кривых: для  $K_d = 1,2$  и  $1,5$  соответственно при  $\Delta t_{\text{кк}} = 0,5; 1$  и  $5\text{ °С}$ . При  $t_B = 0\text{ °С}$  погрешность косвенного измерения  $\sigma_K = \sigma_{t_{\text{кк}}} = 0,67\%$  для всех значений  $\Delta t_{\text{кк}}$  и  $K_d$ . При  $\Delta t_{\text{кк}} = 5\text{ °С}$  с ростом  $|t_B|$  от 0 до 40 °С погрешность  $\sigma_K$  в зависимости от величины  $K_d$  увеличивается от 0,67 до 7 – 9 %, т. е. примерно в 10 – 13 раз. При  $\Delta t_{\text{кк}} = 0,5\text{ °С}$  и  $|t_B| = 40\text{ °С}$  величина  $\sigma_K$  увеличивается от 0,67 до 60 – 90 % соответственно для  $K_d = 1,5$  и  $1,2$ , т. е. возрастает практически в 90 – 135 раз! Причиной этого также является влияние погрешности малой разности температур  $\Delta t$ .

### Оценка влияния погрешности измерения диагностических параметров на достоверность контроля Д

Оценку технического состояния электрооборудования и принятие решения о техническом обслуживании и ремонте производят исходя из сравнения диагностических параметров (2) – (4) с их допустимыми значениями. Определим достоверность контроля Д как вероятность принятия правильного решения о техническом состоянии электрооборудова-

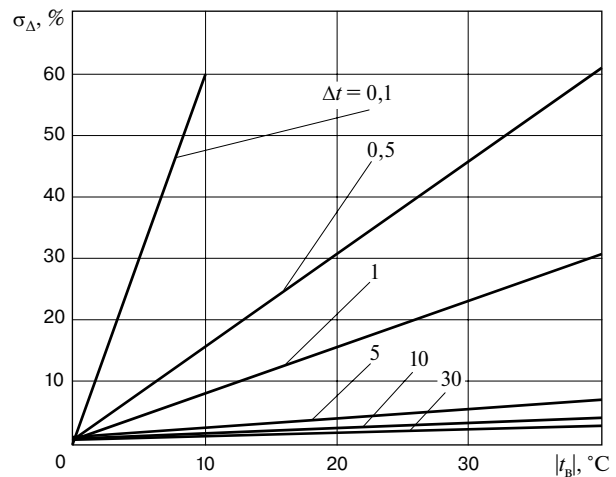


Рис. 2. Зависимость погрешности измерения  $\sigma_{\Delta}$  от величины  $\Delta t$  и абсолютного значения температуры воздуха  $|t_B|$

ния по результатам контроля, зависящую от вероятности нахождения диагностических параметров в поле допустимых значений,

$$D \cong P(Y_n < Y < Y_b), \tag{13}$$

где  $P(Y_n < Y < Y_b)$  — вероятность нахождения диагностического параметра  $Y$  в поле допуска;  $Y_b, Y_n$  — верхнее и нижнее граничные значения диагностического параметра.

Косвенно измеряемые диагностические параметры  $Y$  являются случайными величинами вследствие случайного характера непосредственно измеряемых параметров  $x_i$  ( $i = 1, \dots, m$ ). Следуя центральной предельной теореме теории вероятности, примем нормальный закон распределения параметров и соответствующих погрешностей измерения. Вероятность нахождения нормально распределенной случайной величины  $Y$  в поле допуска определяется выражением [4]:

$$P(Y_n < Y < Y_b) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{Z_n}^{Z_b} \exp(-z^2) dz \tag{14}$$

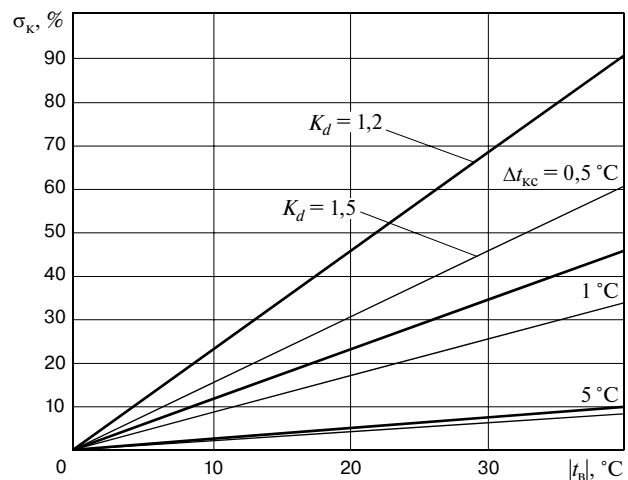


Рис. 3. Зависимость погрешности измерения  $\sigma_K$  от величины  $K_d$  и абсолютного значения температуры воздуха  $|t_B|$

или

$$P(Y_H < Y < Y_B) = 0,5[\Phi(Z_B) - \Phi(Z_H)], \quad (15)$$

где  $\Phi$  — функция Лапласа. Приведенные значения диагностического параметра для верхней ( $Z_B$ ) и нижней ( $Z_H$ ) границ поля допуска определяются с помощью выражений

$$\begin{aligned} Z_B &= (Y_B - Y_{cp}) / (\sqrt{2} \sigma_y), \\ Z_H &= (Y_{cp} - Y_H) / (\sqrt{2} \sigma_y), \end{aligned} \quad (16)$$

где  $Y_{cp}$ ,  $\sigma_y$  — соответственно среднее значение и оценка среднеквадратического отклонения диагностического параметра  $Y$ . При симметричном поле допуска приведенные значения диагностического параметра  $Z_B = Z_H$  и представляют собой величину, нормированную относительно  $\sigma_y$ . Для одностороннего поля допуска типа  $Y > Y_{гр}$  соответствующая вероятность нахождения параметра  $Y$  в поле допуска определяется с помощью выражения

$$P(Y > Y_{гр}) = P(Y_{гр} < Y < +\infty) = 0,5[1 - \Phi(Z_{гр})]. \quad (17)$$

Анализ функции Лапласа показывает, что вероятность нахождения случайной величины  $Y$  в поле допуска тем выше, чем шире граница интервала ( $Y_B - Y_H$ ) и меньше дисперсия  $\sigma_y^2$ . При фиксированном граничном интервале ( $Y_B - Y_H$ ) вероятность попадания в него случайной величины  $Y$  тем больше, чем меньше соответствующее значение  $\sigma_y$ . Другими словами, с учетом (13), достоверность контроля тем выше, чем выше точность измерения. Значение функции Лапласа увеличивается от 0 до 1 при изменении  $Z$  от 0 до  $+\infty$ . Однако уже при  $Z = 0,5$  величина  $\Phi(Z) \cong 0,52$ ; при  $Z = 1$   $\Phi(Z) \cong 0,84$ ; при  $Z = 2$   $\Phi(Z) \cong 0,995$ , а при  $Z = 3$   $\Phi(Z) \cong 1$  [4].

Анализ выражений (16), (17) и табличных значений функции Лапласа показывает, что для одностороннего поля допуска можно получить аналитическое выражение в явном виде, определяющее требования к точности измерения диагностического параметра  $Y$ , в свою очередь обеспечивающей заданную достоверность контроля. Так, для  $D \geq 80\%$  и при ограничении  $Y > Y_{гр}$  требования по точности измерения следующие:

$$\sigma_y \leq \frac{100}{0,6 \cdot \sqrt{2}} \left(1 - \frac{Y_{гр}}{Y}\right), \% \quad (18)$$

где  $Y_{гр}$ ,  $Y$  — соответственно граничное и текущее значения диагностического параметра.

Для обеспечения  $D \geq 95\%$  необходимо, чтобы точность измерения  $Y$  была не хуже

$$\sigma_y \leq \frac{100}{1,17 \cdot \sqrt{2}} \left(1 - \frac{Y_{гр}}{Y}\right), \% \quad (19)$$

При этом для повышения достоверности контроля с 80 до 95 % точность оценки  $\sigma_y$  необходимо увеличить практически в 2 раза.

Полученные выражения (18) и (19) целесообразно использовать и для выбора граничных значений диагностических параметров  $Y_{гр}$  при известной точности их измерения  $\sigma_y$  и заданной достоверности постановки диагноза  $D$ .

Для иллюстрации приведенной выше методики оценки достоверности и точности контроля параметров электрооборудования рассмотрим в качестве примера оценку состояния трансформатора тока по данным тепловизионных обследований. В соответствии с [3] температуры фарфоровых покрышек, измеренные в аналогичных зонах трех фаз, не должны отличаться между собой более чем на  $0,3^\circ\text{C}$ . Примем в качестве исходной информации следующие значения параметров: температура воздуха  $t_b = 30^\circ\text{C}$ ; избыточная температура покрышки фазы А над температурой покрышки фазы В (диагностический параметр  $Y$ )  $\Delta t_{изб} = 0,4^\circ\text{C}$ ; граничное значение  $(\Delta t_{изб})_{гр} = 0,3^\circ\text{C}$ . С помощью графиков, представленных на рис. 2, используя интерполяцию и экстраполяцию, определяем  $\sigma_y = 50\%$ . На основании выражений (13), (16) и (17) оцениваем достоверность

$$\begin{aligned} D &\cong 0,5\{1 - \Phi[(0,3 - 0,4) / (\sqrt{2} \cdot 0,5 \cdot 0,4)]\} = \\ &= 0,5[1 - \Phi(0,354)] = 68,9\% \end{aligned}$$

Полученная оценка достоверности говорит о том, что из 100 принимаемых решений о техническом состоянии трансформатора тока по результатам тепловизионного контроля более 30 (!) решений будут ошибочными. Для практической эксплуатации электрооборудования такие результаты контроля явно неприемлемы. (По зарубежным и отечественным данным, приемлемые значения  $D$  превышают 75 – 80 % в зависимости от специфики объекта диагностирования и системы контроля.) Основная причина низкой достоверности — недостаточная точность измерения избыточной температуры  $\Delta t_{изб}$ . Оценим необходимую точность измерения избыточной температуры  $\Delta t_{изб}$  для обеспечения достоверности  $D = 95\%$ . Для этого воспользуемся выражением (19). Получим

$$\sigma_y = \frac{100}{1,17 \cdot \sqrt{2}} \left(1 - \frac{0,3}{0,4}\right) = 15,15\%.$$

Таким образом, точность косвенного измерения  $\sigma_y$  необходимо увеличить более чем в 3 раза.

Для обеспечения точности оценки  $\sigma_y = 15,5\%$  самым простым решением является проведение тепловизионных обследований трансформаторов тока при температуре воздуха  $t_b$  не более  $+5$  и не менее  $-5^\circ\text{C}$ . В этом случае в соответствии с графиками рис. 2 для  $\Delta t = 0,4^\circ\text{C}$ , величины  $|t_b| = 5^\circ\text{C}$  и погрешностей непосредственного измерения  $\sigma_{тп} = 0,67\%$  и  $\sigma_{тв} = 0,33\%$  погрешность оценки малой разности параметров  $\Delta t_{изб}$  составит  $\sigma_y \leq 15,5\%$ .

### Примеры оценки достоверности контроля параметров тепловизионного диагностирования оборудования контактной сети и тяговых подстанций

На рис. 4 представлены видео- и тепловизионное изображения поперечного электрического соединителя контактной подвески на участке Яйва — Березники Свердловской железной дороги между опорами 505 и 507 [2]. Съемка проводилась 28.06.02 из вагона-лаборатории испытаний контактной сети (ВИКС) при движении со скоростью 23 км/ч и температуре воздуха  $t_{в} = 13^{\circ}\text{C}$ . На термограмме явно выделяется зажим поперечного соединителя с повышенной температурой. В нижней части термограммы представлен график распределения температуры вдоль горизонтальной линии, выполненный в масштабе, который соответствует цветной шкале температур.

В левом нижнем углу рис. 4, б показаны координаты перекрестия курсора и соответствующая максимальная температура зажима  $t_{кз} = +16,5^{\circ}\text{C}$ .

Обработка термограммы по приведенным выше алгоритмам показывает, что для данного контактного соединения  $K_d = 1,89$ ,  $\sigma_k = 7\%$ . Достоверность контроля  $D = 98\%$ . Так как  $K_d > 1,5$ , по результатам контроля должно приниматься решение о наличии аварийного дефекта. При фактическом осмотре данного элемента контактной подвески на месте эксплуатационным персоналом Свердловской железной дороги сделано следующее заключение: «Визуально обнаружено изменение цвета проводов соединителя, свидетельствующее об их перегреве». Зажим соединителя заменен.

На рис. 5 представлена термограмма стыкового зажима несущего троса на перегоне Бисертский завод — Контуганово в районе опор 205 — 203. ВИКС двигался в сцепке с отдельным электровозом со скоростью 70 км/ч в морозную солнечную погоду при  $t_{в} = -24^{\circ}\text{C}$ . На термограмме отчетливо просматривается указанный зажим. В правой части рисунка представлены результаты цифровой обработки термограммы в виде графика изменения температуры по прямой, проведенной через район зажима по несущему тросу. Анализ распределения температуры по длине несущего троса в районе стыкового зажима показывает, что максимум  $t_{в} = -14^{\circ}\text{C}$  приходится на зажим. Имеет место характерный пик температуры. Расчеты показывают, что при  $K_d = 1,9$  (больше, чем 1,5) величина  $\sigma_k = 10\%$ , достоверность  $D = 98 \div 99\%$ . По результатам контроля и диагностирования зажим классифицируется как дефектный с необходимостью его замены. При его снятии и визуальном осмотре обнаружены следы поджога. Зажим несущего троса заменен.

На рис. 6 представлены видео- и инфракрасное изображения обвода усиливающего провода в рай-

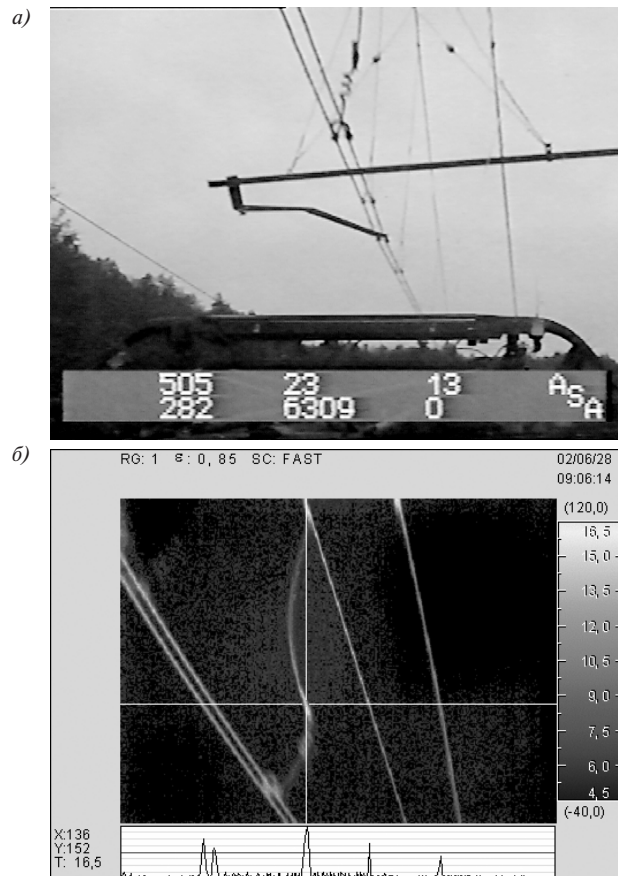


Рис. 4. Изображения поперечного электрического соединителя контактной подвески, опоры 505 — 507:  
а — видеоизображение; б — тепловизионное изображение

оне опоры 81А перегона у станции Расик Свердловской железной дороги. Съемка проводилась 28.06.02 с ВИКС на скорости 65 км/ч при  $t_{в} = 12^{\circ}\text{C}$  в условиях небольшого дождя. Максимальная температура контактного соединения  $t_{кз} = 13,6^{\circ}\text{C}$ , коэффициент дефектности  $K_d = 1,6$  и оценка погрешности  $\sigma_k = 13\%$ . В соответствии с [3] должно приниматься решение о замене дефектного зажима. Однако проверка экс-

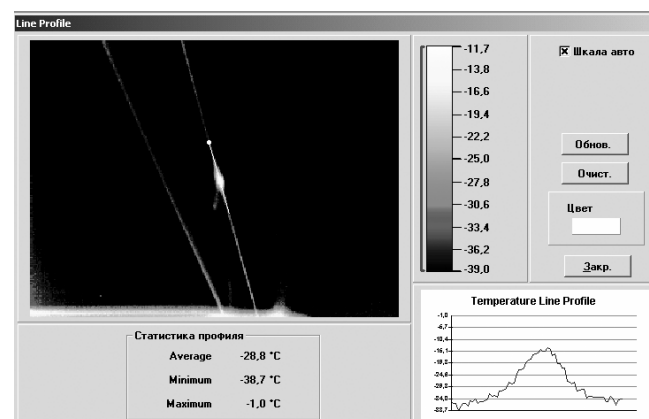


Рис. 5. Изменение температуры по длине несущего троса в районе стыкового зажима контактной подвески, опоры 205 — 203 (в нижней части рисунка видна верхняя часть токоприемника ВИКС)

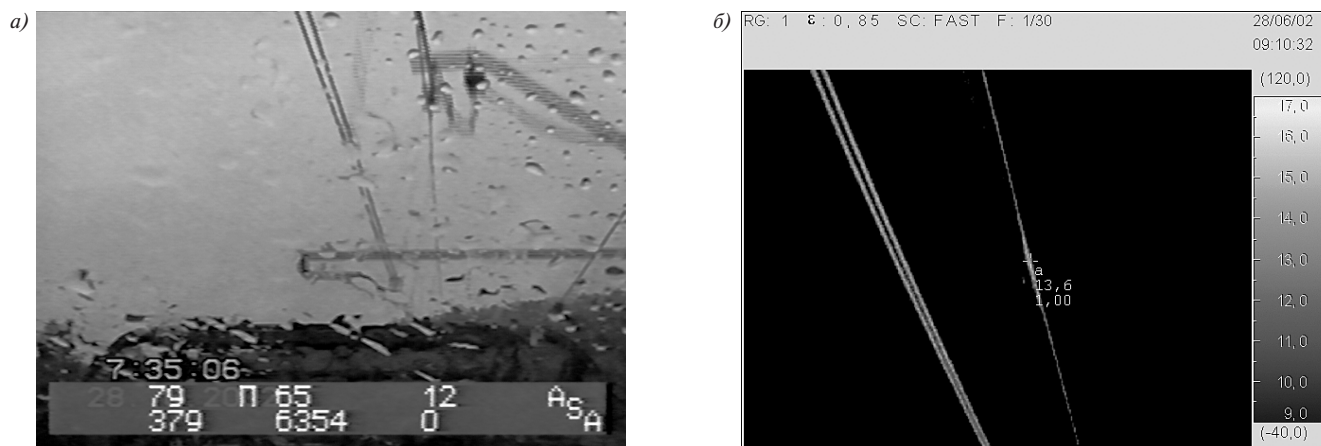


Рис. 6. Обвод усиливающего провода, опора 81А перегона у станции Расик:  
а — видеозображение; б — термограмма

плуатационным персоналом на месте показала, что при осмотре дефект не обнаружен.

Произведем расчет достоверности контроля для данного примера. В соответствии с (17) имеем

$$D \cong \{1 - \Phi[(1,5 - 1,6)/(0,13 \cdot 1,6 \cdot \sqrt{2})]\} / 2 \cong (1 + 0,35) / 2 = 0,675.$$

Именно относительно низкой достоверностью в 67,5 %, главным образом, можно объяснить указанное ложное заключение (риск изготовителя), когда фактически исправный элемент контактной сети признан неисправным. Необходимо отметить, что при проведении испытаний диагностической системы в ходе тепловизионных обследований контактной сети Свердловской железной дороги на базе ВИКС в июне 2002 г. по этой же причине из девяти обнаруженных системой дефектов три оказались ложными [2].

На рис. 7 представлена термограмма и диагностическая информация о состоянии гирлянды из трех фарфоровых подвесных изоляторов ПФ-70Ж, установленных на опоре №13 контактной сети напряжением 27,5 кВ на перегоне ЭЧ-21 Московской железной дороги. Съемка проводилась 27.06.03 с ВИКС

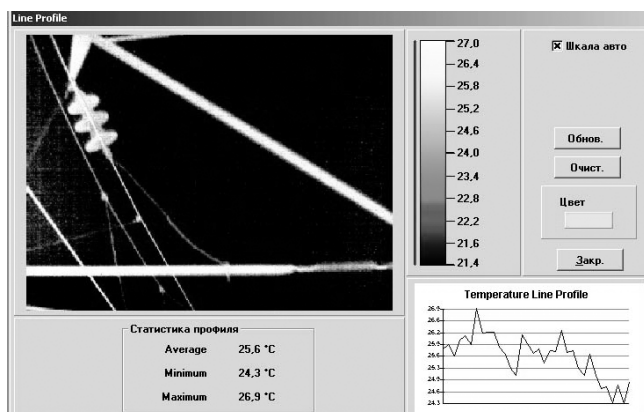


Рис. 7. Тепловизионное изображение гирлянды из трех изоляторов ПФ-70Ж (27,5 кВ) и график изменения температуры по оси гирлянды в направлении от земли к фазе. Нижний изолятор — «нулевой»

при его движении со скоростью 40 км/ч и температуре воздуха +23 °С. В соответствии с планом специального эксперимента нижний изолятор предварительно был зашунтирован перемычкой.

В руководстве [3] термический критерий оценки состояния изоляторов формально не определен. В связи с этим в качестве диагностического параметра оценки состояния изоляторов использовалась максимальная по абсолютной величине избыточная температура изоляторов относительно средней температуры изоляторов в гирлянде:

$$|\Delta t_{\text{изб}}| = \max |t_i - t_{\text{ср}}|, \quad i = 1, \dots, n, \quad (20)$$

где  $|t_i - t_{\text{ср}}|$  — максимальное по абсолютной величине отклонение температуры  $i$ -го изолятора от среднего значения температуры изоляторов в гирлянде;  $t_{\text{ср}}$  — средняя температура гирлянды и  $n$  — число изоляторов в гирлянде.

Анализ графика на рис. 7 показывает, что максимальное по абсолютной величине значение избыточной температуры (20) соответствует нижнему изолятору в гирлянде  $\Delta t_{\text{изб}} = 1,3$  °С. Поскольку граничные значения для  $|\Delta t_{\text{изб}}|$  не определены, покажем в качестве примера, как произвести их оценку с использованием выражения (18). Оценка погрешности избыточной температуры с использованием графиков на рис. 2 дает  $\sigma_{\Delta} = 20$  %. При  $|\Delta t_{\text{изб}}| = 1,3$  °С и  $D = 80$  % получим

$$\Delta t_{\text{изб}}^{\text{гр}} = \Delta t_{\text{изб}} \left( 1 - \frac{0,6 \cdot \sqrt{2} \cdot 20}{100} \right) = 1,08 \text{ °C}. \quad (21)$$

Таким образом, поскольку  $\Delta t_{\text{изб}} = 1,3$ , т. е. больше, чем 1,08, с достоверностью 80 % можно считать, что нижний изолятор в гирлянде, представленный на рис. 7, дефектный.

На рис. 8 представлена термограмма шинного разъединителя ШР 110 (линия С54, фаза А) распределительного устройства РУ-110 кВ. Тепловизионная съемка проводилась с помощью камеры ТН7102 1 июля 2003 г. путем обхода тяговой подстанции

ЭЧЭ-11 (станция Камарчага) Красноярской железной дороги. Температура воздуха  $t_{в} = +25^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{кс} = 34,3^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{п} = 32^{\circ}\text{C}$  и  $K_d = 1,38$ . Поскольку  $1,2 < K_d < 1,5$  и оценка  $\sigma_k = 5\%$ , расчетная достоверность контроля составляет  $D = 97\%$ . В соответствии с рекомендациями [3] принимается решение о наличии развивающегося дефекта. При непосредственном осмотре были выявлены следы поджога и коррозии ножей разъединителя, которые впоследствии были заменены.

На рис. 9 представлена тепловизионная диагностическая информация о техническом состоянии контактных соединений для трех фаз высоковольтного выключателя РУ-27,5 кВ. Съемка проводилась 03.07.03 на тяговой подстанции ЭЧЭ-13 (станция Камала) Красноярской железной дороги с помощью тепловизионной камеры ТН7102. Температура воздуха во время измерений была  $t_{в} = 18^{\circ}\text{C}$ , избыточная температура контакта фазы В по сравнению с фазами А и С составляла  $\Delta t_{изб} = 5,7^{\circ}\text{C}$  при нагрузке 55%, погрешность измерения  $\sigma_{\Delta} = 4\%$ . Так как  $5 < \Delta t_{изб} < 10^{\circ}\text{C}$ , то в соответствии с [3] принимается решение о наличии начальной стадии дефекта. Расчеты показывают, что достоверность контроля в этом случае достаточно низкая и составляет  $D = 74\%$ . Сведения о фактическом состоянии данного электрооборудования отсутствуют.

Приведенные выше примеры подтверждают работоспособность и практическую значимость изложенной методики, с помощью которой оцениваются точность и достоверность контроля электрооборудования на железных дорогах.

### Основные направления и выводы по совершенствованию методики и средств диагностирования электрооборудования по инфракрасному излучению

Исходя из проведенного выше краткого анализа методики, следует выделить следующие основные пути для ее дальнейшего совершенствования и повышения эффективности использования мобильной системы тепловизионного диагностирования электрооборудования.

1. Исходя из уже имеющегося 2 – 3-летнего опыта тепловизионных обследований контактной сети и тяговых подстанций, наличия соответствующего статистического материала необходимо с использованием представленной выше методики провести тщательный критический анализ достигнутой точности и достоверности контроля тепловизионных диагностических параметров оборудования. В наибольшей степени это касается дифференцированной оценки числа обнаруженных фактических и ложных дефектов оборудования.

2. Целесообразно проводить тепловизионные обследования по возможности на режимах наибольшей

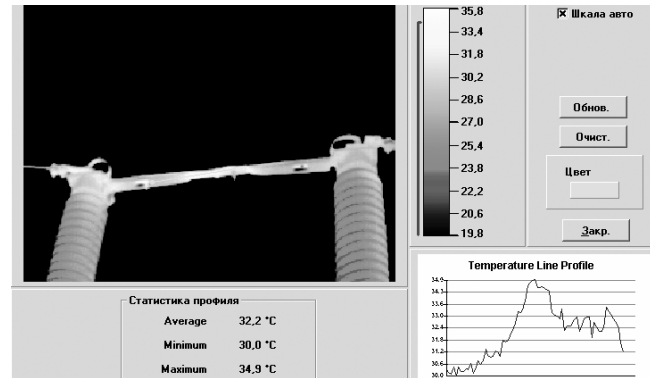


Рис. 8. Тепловизионное изображение разъединителя ШР 110 распределительного устройства РУ-110 кВ

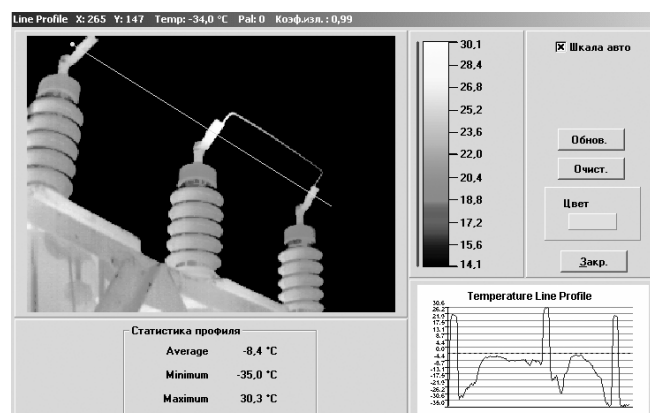


Рис. 9. Тепловизионное изображение высоковольтного выключателя распределительного устройства РУ-27,5 кВ. Перегрев контактов фазы В ( $t_{кс} = 30,3^{\circ}\text{C}$ )

мощности работы оборудования, что обеспечивает превышение температуры поверхностей диагностируемого оборудования  $\Delta t$  на максимально возможную величину и тем самым снижает влияние погрешности малых разностей параметров. Для этого следует использовать штатные режимы работы оборудования и создавать дополнительную нагрузку с помощью специальных нагрузочных устройств. Например, для более эффективного тепловизионного обследования арматуры контактной сети в ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО» предусматривается использование модуля резисторов общей мощностью около 1 МВт, установленного на специальной платформе в сцепке с ВИКС и локомотивом.

3. Необходимо учитывать влияние температуры воздуха  $t_{в}$  на точность и достоверность контроля диагностических показателей. Если при постановке диагноза исходить из анализа ожидаемых значений в районе  $\Delta t < 1^{\circ}\text{C}$ , то для обеспечения погрешности  $\sigma_{\Delta} < 10\%$  тепловизионные обследования целесообразно проводить при температуре воздуха  $|t_{в}| < 12^{\circ}\text{C}$ . В случае невыполнения этого условия следует учитывать, что вероятность принятия правильного решения о техническом состоянии соответствующего

электрооборудования по результатам контроля может быть низкой и составит не более 55 – 60 %.

4. Следует всячески стремиться к снижению инструментальной погрешности измерения температур поверхности  $t_n$  и воздуха  $t_b$ . Особенно это актуально для малых значений  $\Delta t$  при диагностировании изоляторов, трансформаторов тока, выявлении неисправного электрооборудования на самых ранних стадиях развития дефектов. Для этого следует использовать новейшие тепловизионные камеры типа TN7102 компании Nec San-ei (Япония — США) с объективом двукратного оптического увеличения, частотой дискретизации 60 Гц, обеспечивающие точность оценки температуры до 0,08 °С и выше. Для измерения температуры воздуха целесообразно применять образцовые малоинерционные термодпары с вторичным электронным показывающим прибором, учитывающим коррекцию от воздействия вынужденной конвекции воздуха при движении ВИКС.

5. Наряду с методической и инструментальной погрешностями измерения следует снижать случайную составляющую погрешности за счет проведения многократных измерений параметров, эффективной вероятностной обработки статистической информации с оценкой метрологической надежности (достоверности) результатов контроля. Современные вычислительные средства, особенно с двухядерными сопроцессорами типа Pt IY 3200/2\*1024/800S775, вполне обеспечивают эту задачу при движении ВИКС и тепловизионной обработке информации в реальном масштабе времени.

6. При назначении допусков на диагностические параметры необходимо учитывать ожидаемую вероятность попадания в их поле соответствующих получаемых результатов и точность измерения, что определяет в конечном счете достоверность и правильность принятия решений о соответствующем техническом обслуживании или ремонте.

7. Необходимо непрерывно совершенствовать алгоритмическое и программное обеспечение тепловизионной диагностической системы. С целью минимизации погрешностей измерения и повышения достоверности контроля автором разрабатываются алгоритмы расчета параметров тепловизионного диагностирования с использованием метода малых отклонений. На базе использования методов анализа размерностей, физических аналогий и термоэлектрического подобия совершенствуется структура тепловизионных диагностических параметров, минимизирующая влияние малой разности температур на точность и достоверность контроля и повышающая чувствительность метода тепловизионного диагностирования.

8. Используя опыт зарубежных специалистов, следует существенно повысить возможности тепловизионного метода диагностирования электрооборудова-

ния на базе получения и анализа диагностической информации одновременно в видимом, инфракрасном и ультрафиолетовом диапазонах спектра электромагнитного излучения [5, 6]. Такой комплексный метод диагностирования, который основан на обработке информации, имеющей единую физическую природу и общность математического описания, позволит расширить номенклатуру диагностируемого электрооборудования, повысить достоверность, чувствительность и глубину поиска дефектов.

9. Наряду с разработкой и совершенствованием методики и программно-аппаратных средств, а также с проведением соответствующих НИОКР в области тепловизионных систем диагностирования необходимо повышать организационно-технический уровень тепловизионных обследований, совершенствовать организацию использования ВИКС с учетом повышения коэффициента технической готовности контактной сети, а также улучшать подготовку персонала ВИКС, соответствующих специалистов ЭЧ и службы Э.

10. Целесообразно использовать предложенную методику обоснования точности и достоверности контроля для оценки эффективности других диагностических систем, установленных на ВИКС и связанных с измерениями малых перемещений, колебаний и других малых отклонений параметров различной физической природы (например, малых колебаний проводов контактной подвески, незначительных перемещений ВИКС и его отдельных элементов и т. п.).

11. Реализация перечисленных выше основных направлений и мероприятий по обеспечению точности и достоверности тепловизионного диагностирования направлена на дальнейшее повышение надежности, безопасности и эффективности оборудования электрифицированных железных дорог при одновременном снижении финансовых, трудовых, временных и иных сопутствующих ресурсов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Контроль электротехнических установок с помощью инфракрасной термографии // Железные дороги мира. 2005. №1. С. 51 – 54.
2. Компьютеризированная тепловизионная система диагностирования арматуры контактной сети / А. М. Василянский, Ю. И. Плотников, В. П. Герасимов и др. // Железные дороги мира. 2003. № 12. С. 37 – 43.
3. РД 34.45-51.300-97. Объем и нормы испытаний электрооборудования. М.: НЦ ЭНАС, 2001. 256 с.
4. Селиванов М. Н., Фридман А. Э., Кудряшова Ж. Ф. Качество измерений: Метрологическая справочная книга. Л.: Лениздат, 1987. 295 с.
5. Перспективы создания компьютеризированной системы диагностирования изоляторов контактной сети по ультрафиолетовому излучению / Ю. И. Плотников, Д. А. Скороходов, В. П. Герасимов и др. // Железные дороги мира. 2004. № 7. С. 50 – 53.
6. Plotnikov Y., Vikhrov M. The results of application DayCor camera on Railways of Russia / UV Inspection User's Group Meeting May 05, Charlotte, North-Carolina USA, May, 2005, с. 33 – 34.