

**УДК 681.2:620.1, 614.84**

*Е.М. Прохоренко, канд. физ.-мат. наук, В.Ф. Клепиков, член-кор. НАН Украины, доктор физ.-мат. наук, профессор, В.В. Литвиненко, доктор техн. наук, Институт электрофизики и радиационных технологий НАН Украины, А.И. Морозов, канд. тех. наук, доцент, О.В. Кулаков, канд. тех. наук, доцент, НУГЗУ*

## **ТЕПЛОВИЗИОННЫЙ КОНТРОЛЬ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ**

Рассмотрено применение инфракрасной (ИК) радиометрии для контроля электрооборудования электрических станций для выявления аварийных режимов работы. Представлены результаты тепловизионного обследования электрооборудования Змиевской ТЭС, при котором были обнаружены дефекты, которые могут привести к отказу оборудования

**Ключевые слова:** авария, ИК-радиометрия, изолятор

**Постановка проблемы.** Обеспечение защиты населения и территорий в случае угрозы и возникновения чрезвычайной ситуации (ЧС), обеспечение гарантированного уровня безопасности личности, общества и государства являются одной из задач Государственной политики в сфере гражданской защиты [1].

Одним из видов ЧС техногенного характера являются аварии в электроэнергетических системах (по классификатору [2] код аварии 10700) и на электрических станциях (например, код аварии на теплоэлектростанции по классификатору [2] - 10730).

Резонансная каскадная авария в электроэнергетической системе произошла 24-25 мая 2005 года в г. Москва (Российская Федерация) на трансформаторной подстанции "Чагино", которая обеспечивает электрической энергией, в том числе, нефтеперерабатывающий завод в Капотне. Часть оборудования была повреждена, вследствие чего увеличилась нагрузка на исправные трансформаторы. Утром 25 мая потребление электроэнергии начало возрастать, и не выдержали уже не только трансформаторы подстанции "Чагино", но и подстанции "Очаково". С 11 утра 25 мая 2005 года началось масштабное каскадное отключение электроподстанций [3]. В результате аварии возникла опасность для жизни людей (остановился метрополитен), было повреждено дорогое основное оборудование, нарушено функционирование важных элементов коммунального хозяйства.

Таким образом, предупреждение аварий в электроэнергетических системах и на электрических станциях является актуальной задачей.

**Анализ последних достижений и публикаций.** Для предупреждения аварийных режимов работы необходимо контролировать состояние электрооборудования. Существуют различные методы контроля: акустические, ультразвуковые, магнитные и другие. Одним из современных и эффективных является метод ИК-радиометрии [4]. Метод дистанционный (диагностика проводится без отключения и вывода из работы оборудования), неразрушающий (контроль осуществляется на расстоянии без демонтажа оборудования) и безопасный для персонала. Как диагностический прибор используется тепловизионный приемник (тепловизор). Объектом контроля является электрооборудование, в котором возможно выделение тепла при его работе: силовые трансформаторы, выключатели, прерыватели, маслонаполненное оборудование, разрядники, ограничители напряжений, предохранители и т.д. По методике тепловизионной диагностики электрооборудования опубликован ряд работ, например [5, 6].

Тепловизионный метод базируется на фиксации инфракрасного излучения с обследуемой поверхности. Возможность применения этого метода основана на том, что значительное количество различных дефектов электрооборудования сопровождается изменением температуры, и как следствие, изменением уровня ИК-излучения, которое может быть зафиксировано тепловизионными приемниками.

Интенсивность излучения тела связана с температурой поверхности. В соответствии с законами излучения и поглощения тепловой энергии (Закон Вина) плотность теплового потока определяется по формуле:

$$F_{\lambda_2-\lambda_1} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_{\lambda} \cdot \frac{dR_{\text{ч.т.}}(\lambda, T)}{d\lambda} \cdot S \cdot d\lambda, [\text{Вт}], \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  – коэффициент излучения поверхности,  $S$  – площадь поверхности,  $dR_{\text{ч.т.}}(\lambda, T)/d\lambda$  – спектральная плотность излучения черного тела. Формула (1) является сложной для практического применения. Для её упрощения проинтегрируем (1) по всем длинам волн и получим закон Стефана-Больцмана, который показывает полную энергетическую светимость объекта:

$$W_{\lambda} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \cdot \cos \alpha, \quad (2)$$

где  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$  – постоянная Стефана-Больцмана,  $T$  – температура на поверхности объекта в градусах Кельвина,  $\alpha$  – угол наблюдения (угол между тепловизором и нормалью к плоскости исследуемого объекта). Анализ выражения (2) показывает, что температура, полученная на термограммах тепловизора, может отличаться от реальной температуры на некоторый коэффициент. На величину этого коэффициента влияет

несколько параметров: коэффициент излучения поверхности, угол наблюдения, форма поверхности наблюдаемого объекта и т. д. Коэффициент излучения зависит от состояния поверхности. Шероховатость или зеркальность, наличие ржавчины, окалины, масляных пятен существенно изменяют величину  $\epsilon$  и соответственно, повышают или понижают значение температуры на термограммах. На зеркальных участках измеренная температура более низкая. На шероховатых, ржавых, с масляными пятнами наблюдаемая температура выше, чем реальная. С увеличением угла наблюдения, измеряемая температура изменяется в сторону понижения. Поверхности с одинаковой температурой, но отличающей кривизной, на термограмме имеют различное температурное поле. Зависимость полученной температуры от угла наблюдения и от кривизны объекта связана с характеристиками распределения ИК-излучения в пространстве.

Проведение тепловизионного контроля проводится с целью решения нескольких взаимосвязанных задач: выявление дефектов, определение степени их опасности (в том числе пожарной для, например, маслonaполненного оборудования), контроль развития нарушений, выдача заключения по очередности проведения ремонтных работ. Обнаружение зон с аномальным повышением температуры проводится как визуально, так и аппаратно. При визуальном способе производится просмотр термограмм с выделением температурных нарушений. При машинно-аппаратном способе – компьютерная обработка результатов путем сравнения с опорными снимками или анализ поля градиентов температур. Как в первом, так и во втором случаях при обнаружении зон с повышенной температурой необходимо проведение дополнительного анализа для выявления причин нагрева. Для повышения эффективности контроля целесообразно применять эти два метода последовательно. При обнаружении термоаномалий следует выяснить причины нагрева и определить связано это с дефектом, или это наводки. Наводки могут быть вызваны такими причинами как неоднородность коэффициента излучения, нагрев от внешних источников тепла, отражение тепловых потоков. Поэтому следует провести дополнительные обследования другими методами, для оценки каждого дефекта. При подтверждении, что обнаруженная аномалия является дефектом, а не наводкой, необходимо произвести оценку ее опасности.

Для количественной оценки дефектов используется несколько показателей:

1) превышение температуры  $\Delta t_{i\delta} = t_{\delta} - t_{\delta}$ , где  $t_{\delta}$  – температура в точке дефекта,  $t_{\delta}$  – температура воздуха;

2) избыточная температура  $\Delta t_{\text{эцá}} = t_{\text{á}} - t_{\text{é}}$  (по сравнению с аналогичными исправными узлами), где  $t_{\text{э}}$  – температура точки на исправном блоке, которая сходна с дефектной;

3) коэффициент дефектности  $K_{\text{á}} = \frac{\Delta t_{\text{íð}}}{\Delta t_{\text{э}}}$ , где  $\Delta t_{\text{э}} = t_{\text{э}} - t_{\text{á}}$ ,  $t_{\text{э}}$  – контрольная температура на оборудовании в точке где нет влияния дефекта.

Рассматривая величину превышения температур  $\Delta t_{\text{íð}}$  необходимо значение температуры, полученное в зоне дефекта, пересчитать в значение при номинальной токовой нагрузке и сравнить его с предельно допустимой температурой, которая указана в паспортных данных на электрооборудование. В случае превышения следует предпринять меры по устранению дефекта.

Для избыточной температуры  $\Delta t_{\text{эцá}}$  и коэффициента дефектности  $K_{\text{á}}$  по степени опасности неисправности различают следующие области:

а)  $5^{\circ}\text{C} < \Delta t_{\text{эцá}} < 10^{\circ}\text{C}$ ;  $1 < K_{\text{á}} < 1,2$  – дефект в начальной стадии неисправности;

б)  $10^{\circ}\text{C} < \Delta t_{\text{эцá}} < 30^{\circ}\text{C}$ ;  $1,2 < K_{\text{á}} < 1,5$  – развившийся дефект;

в)  $30^{\circ}\text{C} < \Delta t_{\text{эцá}}$ ;  $1,5 < K_{\text{á}}$  – аварийный дефект.

Степень развития дефекта предполагает как использование различных приемов для приостановки его развития, так и работы по его ликвидации. В случае начальной стадии а): есть возможность продлить эксплуатацию оборудования, но необходимо увеличить количество его проверок для контроля развития нарушения. При ситуации, описанной в пункте б) следует уменьшить, как фактическую, так и номинальную нагрузку и в ближайшее время выполнить ремонтные работы. Самым серьезным является аварийное состояние – случай в). Электрооборудование следует вывести из эксплуатации и произвести его ремонт или замену.

**Постановка задачи и ее решение.** Целью работы является разработка методики применения ИК-методов контроля электрооборудования электрических станций для выявления их аварийных режимов работы на примере Змиевской ТЭС.

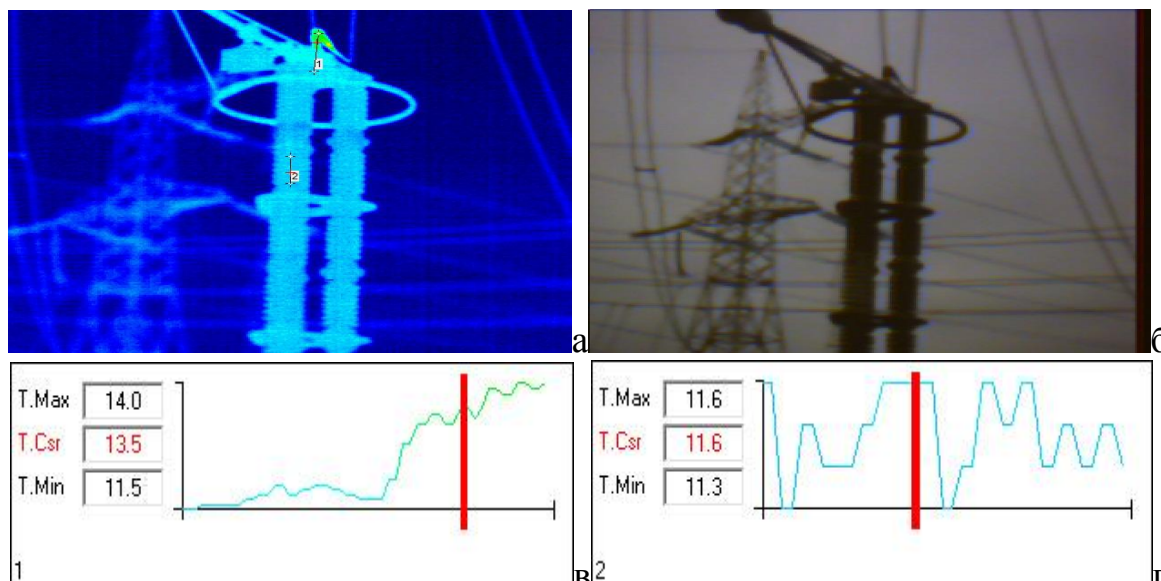
Для тепловизионного контроля использовался тепловизор Ti-814 фирмы LAND Instruments International Ltd, на основе неохлаждаемой болометрической матрицы (320×240) элементов с параметрами: спектральный диапазон длин волн 7,5÷14 мкм; температурная чувствительность при 30°C - 0,08 °C; пространственное разрешение 1,3 мрад; поле зрения 23°×17°; диапазон измеряемых температур от (–20)°C до (+1500)°C.

Для проведения тепловизионного контроля электрооборудования были подобраны условия, максимально удовлетворяющие требованиям ИК съемки. Контроль проводился в пасмурную, безветренную погоду, при отсутствии атмосферных осадков. Внешняя температура была равна  $9,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $282,2\text{ K}$ ). Оборудование находилось в стационарном тепловом режиме, т.е. проработало под нагрузкой значительный промежуток времени. Эти условия оптимальны так как: пасмурная погода, позволяет избежать различных наводок, неравномерного нагрева поверхности вызванного солнечной радиацией; при отсутствии ветра ИК-излучение одинаково, как с выпуклых, что с вогнутых элементов; в интервале внешних температур  $260\div 320\text{ K}$  минимальны погрешности точности измерения тепловизионной техникой; работа оборудования под нагрузкой свидетельствует о том, что все тепловые процессы, вызванные включением (выключением) питания стабилизировались и находятся в состоянии термодинамического равновесия и наиболее точно отражают температурные изменения.

Изучались точки крепления контактов на стойках изоляторов в зонах 4 и 8 энергоблоков. Было обнаружено несколько точек с повышенной температурой.

Результаты измерений для изолятора возле 8 энергоблока приведены на рис. 1. На рис. 1,а приведена термограмма стойки изолятора. В его верхней части в зоне крепления контакта, была обнаружена точка с повышенной температурой. На термограмме она отличается как более светлая точка. На рис. 1,б дано видимое изображение того же изолятора. Видно, что обнаружить дефект визуально не представляется возможным. На рис. 1,г приведен график изменения температуры по сечению 2, проходящему по телу изолятора. Температура изменяется в диапазоне от  $11,3^{\circ}\text{C}$  до  $11,6^{\circ}\text{C}$ . Изменения температуры малы и вызваны ребристой формой поверхности изолятора. На рис. 1,в приведен график изменения температуры по сечению 1, которое сначала проходит по телу изолятора, а затем через точку закрепления контактного провода, где обнаружен повышенный нагрев. На корпусе изолятора температура постоянна и равна  $11,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Это свидетельствует о том, что тело изолятора не имеет дефектов и он работоспособен. В точке контакта температура возрастает до величины  $14^{\circ}\text{C}$ . Превышение температуры  $\Delta t_{\text{ид}} = 3^{\circ}\text{C}$ .

Обследование других изоляторов показало, что везде, кроме аномальной точки, температура в контактной зоне равна температуре на теле. Т.е. избыточная температура равна превышению температуры  $\Delta t_{\text{еца}} = \Delta t_{\text{ид}}$  и, соответственно, коэффициент дефектности  $K_{\text{д}} = 1$ . Можно сделать вывод о том, что дефект находится в начальной стадии развития, и продолжать эксплуатацию оборудования можно. Контроль изолятора необходимо производить не 1 раз в 6 месяцев [6, 7], а чаще.



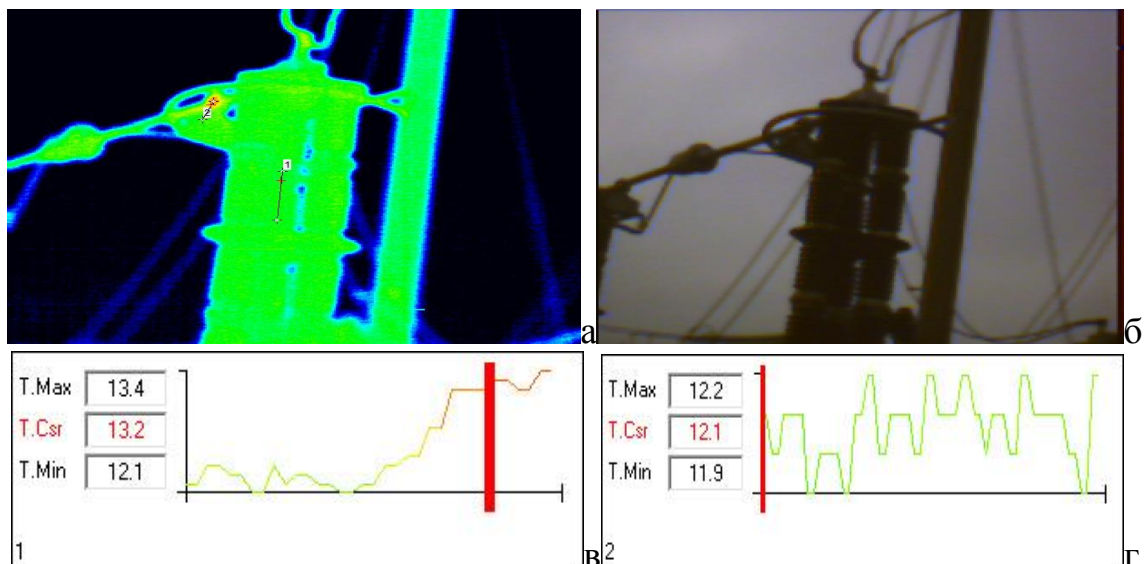
а) термограмма, б) оптический диапазон, в) график температур по сечению 1, г) график температур по сечению 2

Рис. 1 - Результаты измерений для изолятора возле 8 энергоблока

Результаты измерений для изолятора возле 4 энергоблока приведены на рис. 2. Изучение графика изменения температуры по сечению 1 (рис. 2,в) показывает, что превышение температуры составляет всего  $\Delta t_{\text{до}} = 1,3^{\circ}\text{C}$ , что свидетельствует о слабой степени развития дефекта.

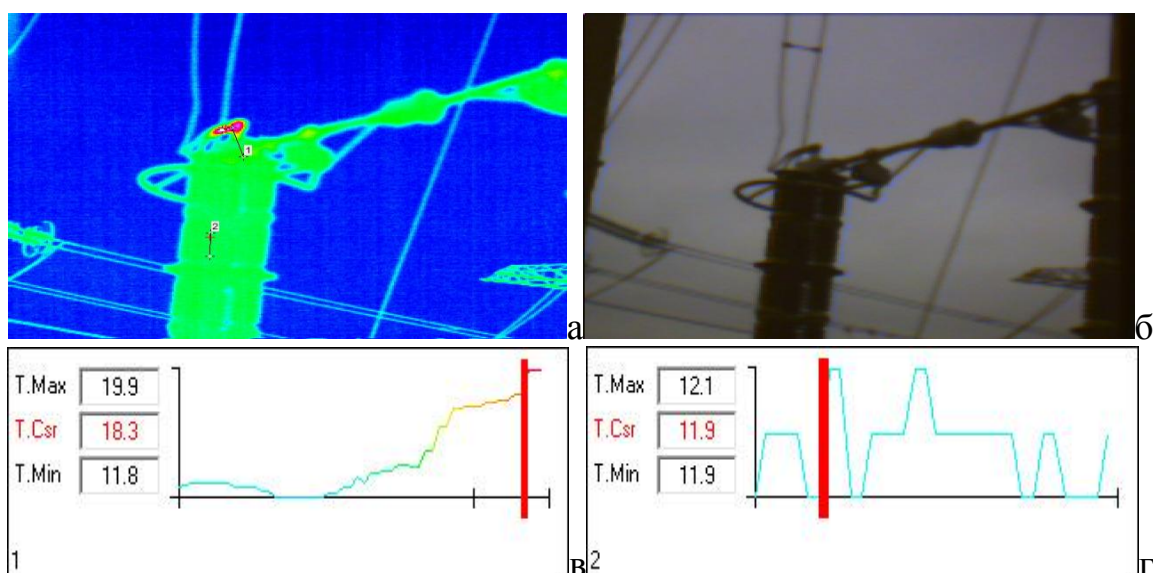
Через 2 месяца было проведено контрольное обследование электрооборудования. Для соблюдения чистоты эксперимента работы выполнялись тем же тепловизором и при погодных условиях, близких к начальным. Тепловизионная проверка изолятора возле 4 энергоблока зафиксировала стабильную величину его температуры в зоне верхней контактной группы, что свидетельствует о незначительности дефекта и отсутствии его развития.

Результаты повторных измерений для изолятора возле 8 энергоблока приведены на рис. 3. На фотографии рис. 3,б отклонения не видны (т.е. обнаружить дефект визуально невозможно). Изучение рис. 3,а показало наличие в зоне контакта области с повышенной температурой. Для более детального изучения и наглядности снимки были выполнены под другим углом. Цвет тела изолятора везде однороден, что свидетельствует об отсутствии термоаномалий. На рис. 3,г приведен график изменения температуры по сечению 2. Температура по сечению одинакова. Наблюдаемые скачки связаны с округлой формой элементов изолятора.



а) термограмма, б) оптический диапазон, в) график температур по сечению 1,  
г) график температур по сечению 2

Рис. 2 - Результаты измерений для изолятора возле 4 энергоблока



а) термограмма, б) оптический диапазон, в) график температур по сечению 1,  
г) график температур по сечению 2

Рис. 3 - Результаты повторных измерений для изолятора возле 8 энергоблока

Для проверки изменения теплового состояния в зоне нагрева, проанализируем график изменения температуры по сечению 1 (рис. 3,в). Первая часть графика – плато, соответствующее изменению температуры по телу изолятора. На второй части наблюдается температурный рост. Температура в зоне контакта превышает температуру в этой же точке, полученную во время первого обследования, на  $5^{\circ}\text{C}$ , что существенно для столь короткого промежутка времени. Превышение температуры

$\Delta t_{\text{до}} = 8,1 \text{ } ^\circ\text{C}$ , коэффициент дефектности  $K_{\text{д}} > 1.2$ . Дефект перешел из начальной стадии в развитую, и вероятность отказа (аварии) существенно повысилась. Динамика изменения нагрева свидетельствует о быстром развитии дефекта и необходимости проведения ремонтных работ.

При выполнении ремонта выяснилось, что причиной нагрева служило неплотное соединение контактной головки с изолятором. Величина люфта составляла 0,5 мм.

**Выводы.** На примере Змиевской ТЭС разработана методика применения тепловизионных методов контроля электрооборудования электрических станций для выявления их аварийных режимов работы.

Применение тепловизионных методов позволяет обнаружить дефект или повреждение, проследить временную и пространственную динамику его развития, оценить степень его опасности (в том числе пожарной для маслонепоненного оборудования), рекомендовать очередность выполнения ремонтных работ и контролировать их качество.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Про правові засади цивільного захисту: Закон України від 24 червня 2004 року зі змінами. м. Київ. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.zakon.rada.gov.ua>.

2. Державний класифікатор надзвичайних ситуацій: ДК 019-2001. – [Чинний від 01-03-2002]. – Київ: Держстандарт України, 2002. – 19 с. – (Державний класифікатор України).

3. Год «Чагино». РАО «ЕЭС» попыталось исправить видимые технические ошибки в московской энергосистеме // Газета «Время новостей». 25 мая 2006 года.

4. Вавилов В.П. Тепловые методы неразрушающего контроля. Справочник. / В. П. Вавилов. – М.: Машиностроение. – 1991. – 240с.

5. Клепиков В.Ф. Применение методики тепловизионного контроля при противопожарном обследовании оборудования тепловых электростанций./ В.Ф. Клепиков, Е.М Прохоренко, А.М. Баранов, А.И. Морозов // Проблемы пожарной безопасности. – 2011. – №29. – с.75-83.

6. Основные положения методики инфракрасной диагностики электрооборудования и ВЛ: РД 153.–34.0-20.363-99. – Москва: Минэнерго, 1999. – 58 с. – (Руководящий документ Минэнерго Российской Федерации).

7. Протипожежний захист енергетичних підприємств, окремих об'єктів та енергоагрегатів. Інструкція з проектування та експлуатації: НАПБ 05.028. – Київ – 2004. – 68 с. – (Нормативний акт пожежної безпеки України).



**Е.М. Прохоренко, В.Ф. Клепиков, В.В. Литвиненко, А.И. Морозов, О.В. Кулаков. Тепловизионный контроль электрооборудования электрических станций для выявления их аварийных режимов работы**

Рассмотрено применение инфракрасной (ИК) радиометрии для контроля электрооборудования электрических станций с целью выявления их аварийных режимов работы. Представлены результаты тепловизионного обследования электрооборудования Змиевской ТЭС, при котором были обнаружены дефекты, которые могут привести к отказу оборудования

**Ключевые слова: авария, ИК-радиометрия, изолятор**

**E.M. Prohorenko, V.F. Klepikov, V.V. Litvinenko, A.I. Morozov, O.V. Kulakov. The infra-red control of electrical equipment of the electric stations for the exposure of their malfunctions of work**

Application of infra-red (IR) radiometry for the control of electrical equipment of the electric stations with the purpose of exposure of their malfunctions of work is considered. The results of infra-red control of the electrical equipment Zmievskey TES, at which defects which can result in the refusal of equipment were found out, are presented

**Keywords: failure, IR- control, insulator**