

# Развитие и повышение эффективности теплового контроля контактов и контактных соединений при эксплуатации электроустановок распределительных электрических сетей



По материалам VIII Международной научно-технической конференции  
«Развитие и повышение надежности распределительных электрических сетей»

**Одним из актуальных вопросов обеспечения эксплуатационной надежности электроустановок распределительных электрических сетей является контроль состояния контактов и контактных соединений электрооборудования и ЛЭП.**

**Львов М.Ю.,**

д.т.н., директор по технической политике и аудиту АО «ОЭК»

**С**остояние контактов и контактных соединений в процессе эксплуатации электроустановок в значительной степени определяется значением переходного контактного сопротивления. В процессе эксплуатации под влиянием различных факторов возможно увеличение переходного контактного сопротивления вследствие ослабления нажима или усилия прижатия, возникновения оксидной пленки или нагара из-за окисления металла, коррозии металла и др.

Рост переходного контактного сопротивления приводит к выделению тепла и избыточному нагреву контакта (контактного соединения).

На рисунке 1 приведена схема развития дефектов контакта (контактного соединения).

В практике эксплуатации электроустановок для контроля состояния контактов и контактных соединений, находящихся в воздушной среде и доступных для контроля в процессе эксплуатации, широко применяется тепловой контроль их состояния. В соответствии с РД «Объем и нормы испытаний электрооборудования» установлены требования по проведению тепловизионного контроля контактов и контактных соединений. Для осуществления тепловизионного контроля рекомендовано применять тепловизоры.

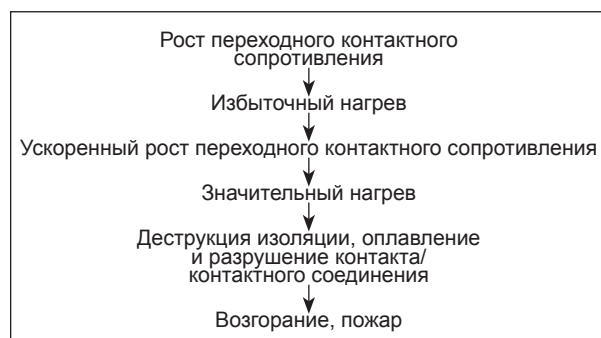


Рис. 1. Диаграмма развития дефекта контакта (контактного соединения)

Предельные значения температур нагрева для различных контактов и контактных соединений приведены в различных ГОСТах и РД «Объем и нормы испытаний электрооборудования». В таблице 1 приведены предельные допустимые температуры нагрева и предельные температуры превышения для различных контактов и контактных соединений в соответствии с установленными требованиями.

Таким образом, при обнаружении факта достижения наибольшего допустимого значения температуры нагрева контакта (контактного соединения) следует констатировать наличие аварийного дефекта контакта (контактного соединения), что соответственно требует принятия мер по его устранению.

Задача контроля контактов и контактных соединений — своевременное выявление наличия дефектов контактов (контактных соединений). При этом следует подчеркнуть, что возникновение недопустимого нагрева контакта (контактного соединения) зависит как от степени ухудшения переходного сопротивления контакта (контактного соединения), так и от значения протекающего тока, зависящего от нагрузки электроустановки, а также от температуры окружающего воздуха. Максимальный нагрев контакта (контактного соединения) будет происходить при максимальной нагрузке электроустановки и максимальной температуре окружающего воздуха.

Методология тепловизионного контроля контактов и контактных соединений, установленная в соответствии с РД «Объем и нормы испытаний электрооборудования», а также РД «Основные положения методики инфракрасной диагностики электрооборудования и ВЛ», подразумевает не только выявление на момент проведения тепловизионного контроля контактов (контактных соединений), которые имеют температуру нагрева выше установленной наибольшей допустимой, но и выявление контактов (контактных соеди-

Табл. 1. Требования по контролю состояния контактов и контактных соединений

Контролируемые узлы	Наибольшее допустимое значение	
	Температура нагрева, °С	Превышение температуры, °С
<b>Контакты из меди и медных сплавов:</b>		
– без покрытий, в воздухе	75	35
– с накладными серебряными пластинами, в воздухе	120	80
– с покрытием серебром или никелем, в воздухе	105	65
– с покрытием серебром толщиной не менее 24 мкм	120	80
– с покрытием оловом, в воздухе	90	50
<b>Аппаратные выводы из меди, алюминия и их сплавов, предназначенные для соединения с внешними проводниками электрических цепей:</b>		
– без покрытия	90	50
– с покрытием оловом, серебром или никелем	105	65
<b>Болтовые контактные соединения из меди, алюминия и их сплавов:</b>		
– без покрытия, в воздухе	90	50
– с покрытием оловом, в воздухе	105	65
– с покрытием серебром или никелем, в воздухе	115	75

нений), которые на момент проведения измерений имеют температуру нагрева ниже установленной наибольшей допустимой, но при увеличении тока нагрузки электроустановки могут достичь установленных наибольших допустимых значений.

С этой целью при проведении тепловизионного контроля контактов (контактных соединений) применяются соответствующие расчетные методики оценки состояния, а именно:

- по температуре превышения, при токах нагрузки  $(0,6-1)I_{ном}$ ,
- по избыточной температуре, при токах нагрузки  $(0,3-0,6)I_{ном}$ , где  $I_{ном}$  — номинальный ток нагрузки. При этом определено:
- превышение температуры (разность между измеренной температурой нагрева и температурой окружающего воздуха);
- избыточная температура (превышение измеренной температуры контролируемого узла над температурой аналогичных узлов других фаз, находящихся в одинаковых условиях).

Методология оценки состояния контактов и контактных соединений с применением тепловизора предполагает следующую последовательность действий:

- 1) измерение температуры диагностируемого элемента (контакта, контактного соединения);
- 2) измерение силы тока в цепи для расчета отношения рабочего тока нагрузки электрооборудования к номинальному ( $I_{раб} / I_{ном}$ );
- 3) в зависимости от значений тока нагрузки на момент проведения измерений оценка теплового состояния контакта (контактного соединения) осуществляется расчетным путем по температуре превышения, либо по избыточной температуре.

На рисунке 2 приведен график оценки состояния контактов (контактных соединений) при тепловизионном контроле.

В таблице 2 приведен сравнительный анализ значений наибольших допустимых температур для контактов (контактных соединений) токоведущих частей электроустановок класса напряжения выше 1000 В в разных странах. Приведенный анализ показывает, что установленные значения наибольших допустимых температур нагрева контактов (контактных соединений) практически совпадают.

В таблице 3 приведены результаты сравнительного анализа требований, установленных и применяемых в различных странах к критериям оценки состояния контактов (контактных соединений) по результатам тепловизионного контроля. Приведенный анализ показывает их существенные различия как по избыточной температуре, так и по температуре превышения.

В настоящее время в разработанном Минэнерго России проекте Требований к обеспечению надежности электроэнергетических систем, надежности и безопасности объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок «Требования к объему и нормам испытаний электрооборудования», прошедших публичные обсуждения, указываются измененные критерии при оценке состояния контактов и контактных соединений по избыточной температуре.

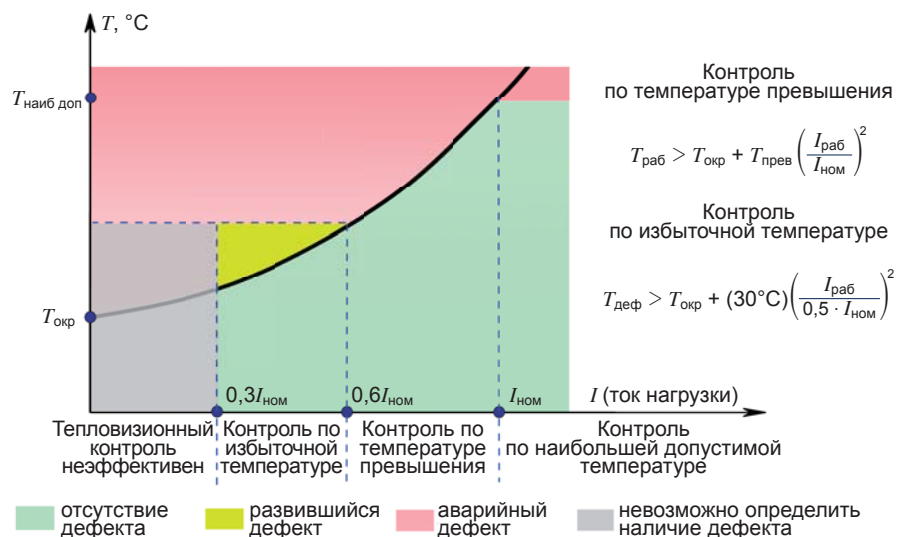


Рис. 2. Тепловизионный контроль контактов и контактных соединений

Табл. 2. Наибольшие допустимые температуры для контактов (контактных соединений) токоведущих частей электроустановок класса напряжения выше 1000 В в разных странах

Элементы (узлы) ЭУ	Наибольшая допустимая температура нагрева, °С		
	Россия	Европа	США
<b>Контакты из меди и медных сплавов коммутационных аппаратов</b>			
без покрытия, в воздухе	75 <sup>a</sup>	75 <sup>e</sup>	75 <sup>f</sup>
с накладными серебряными пластинами, в воздухе	120 <sup>a</sup>	—	—
с покрытием серебром или никелем, в воздухе	105 <sup>a</sup>	105 <sup>e</sup>	105 <sup>f</sup>
с покрытием серебром толщиной не менее 24 мкм, в воздухе, стыковые	120 <sup>a</sup>	—	—
с покрытием оловом, в воздухе	90 <sup>a</sup>	90 <sup>e</sup>	105 <sup>f</sup>
<b>Контактные соединения аппаратных выводов электрооборудования (на аппаратных зажимах) из меди, алюминия и их сплавов, предназначенные для соединения с внешними проводниками электрических цепей</b>			
без покрытия	90 <sup>a, b</sup>	90 <sup>e</sup>	90 <sup>f</sup>
с покрытием оловом, серебром или никелем	105 <sup>a, b</sup>	105 <sup>e</sup>	105 <sup>f</sup>
<b>Контактные соединения (кроме сварных и паяных) сборных и соединительных шин в различных узлах, шин с выводами аппаратов, аппаратных выводов электрооборудования с внешними проводниками электрических цепей, выключателей, воздушных проводов</b>			
из меди, алюминия и их сплавов:			
без покрытий	90 <sup>a, b</sup>	90 <sup>e</sup>	90 <sup>f</sup>
с покрытием оловом	105 <sup>a, b</sup>	105 <sup>e</sup>	105 <sup>f</sup>
с покрытием серебром или никелем	115 <sup>a, b</sup>	115 <sup>e</sup>	115 <sup>f</sup>
из алюминия и его сплавов с покрытием серебром или никелем	115 <sup>a, b</sup>	—	105 <sup>f</sup>

a — ГОСТ 8024-90. Аппараты и электротехнические устройства переменного тока на напряжение свыше 1000 В

b — РД 34.45-51.300-97. Объем и нормы испытаний электрооборудования

e — IEC 62271-1:2007. High-voltage switchgear and controlgear – Part 1: Common specifications

f — IEEE Std C37.04-1999. IEEE Standard Rating Structure for AC High-Voltage Circuit Breakers

Табл. 3. Критерии наличия дефектов контактов и контактных соединений для методов измерения температуры превышения и избыточной температуры, принятые в различных странах

Используемые методики	ANSI/NETA MTS		Standard for Infrared Inspection of Electrical Systems & Rotating Equipment		Военный стандарт MIL-STD-2194(SH)	Electrical Power Equipment Maintenance and Testing (Paul Gill)	NFPA 70B Standard for Electrical Equipment Maintenance	РД 34.45-51.300-97 «Объем и нормы испытаний электрооборудования»	
	США, Канада, Европа, страны Латинской Америки		США		Судостроение США	Международный справочник	США, страны Латинской Америки	Российская Федерация	
	Температура превышения (не зависит от тока нагрузки)	Избыточная температура (не зависит от тока нагрузки)	Температура превышения, (приведенная к I <sub>ном</sub> )	Избыточная температура (приведенная к I <sub>ном</sub> )	Температура превышения (не зависит от тока нагрузки)	Температура превышения (не зависит от тока нагрузки или приведенная к I <sub>ном</sub> )	Избыточная температура (не зависит от тока нагрузки)	Температура превышения, (приведенная к I <sub>ном</sub> )	Избыточная температура, (приведенная к 0,5I <sub>ном</sub> )
Профилактические меры должны быть приняты во время следующего периода технического обслуживания	от 1°С до 10°С	от 1°С до 3°С	от 1°С до 10°С	от 1°С до 3°С	от 10°С до 25°С	0–10°С	от 1°С до 3°С	—	—
Требуются профилактические меры, если позволяет график	от 11°С до 20°С	от 4°С до 15°С	от 11°С до 20°С	от 4°С до 15°С	от 25°С до 40°С	10–20°С	от 4°С до 15°С	от 10°С до 20°С	от 5°С до 10°С
Профилактические меры требуются как можно скорее	от 21°С до 40°С	—	от 21°С до 40°С	—	от 40°С до 70°С	20–40°С	—	от 20°С до 40°С	от 10°С до 30°С
Профилактические меры требуются немедленно (аварийный дефект)	> 40°С	> 15°С	> 40°С	> 15°С	> 70°С	> 40°С	> 15°С	> 40°С	> 30°С

Табл. 4. Критерии оценки состояния контактов и контактных соединений по результатам тепловизионного контроля

РД 34.45-51.300-97 «Объем и нормы испытаний электрооборудования»	«Требования к объему и нормам испытаний электрооборудования» (проект)
$I_{\text{нагрузки}} = (0,6-1)I_{\text{ном}}$ — оценка по температуре превышения	$I_{\text{нагрузки}} = (0,6-1)I_{\text{ном}}$ — оценка по температуре превышения
$I_{\text{нагрузки}} = (0,3-0,6)I_{\text{ном}}$ — оценка по избыточной температуре в пересчете на $0,5I_{\text{ном}}$ : – (5–10)°С — начальная степень неисправности – (10–30)°С — развившийся дефект – более 30°С — аварийный дефект	$I_{\text{нагрузки}} = (0,3-0,6)I_{\text{ном}}$ — оценка по избыточной температуре в пересчете на $0,5I_{\text{ном}}$ : – до 30°С — начальная степень неисправности – более 30°С — развившийся дефект
$I_{\text{нагрузки}} < 0,3I_{\text{ном}}$ — контроль неэффективен. Аварийный дефект — достижение установленных наибольших допустимых значений температуры нагрева или достижение наибольшего допустимого значения превышения температуры, или достижение избыточной температуры более 30°С	$I_{\text{нагрузки}} < 0,3I_{\text{ном}}$ — контроль неэффективен. Аварийный дефект — достижение установленных наибольших допустимых значений температуры нагрева или достижение наибольшего допустимого значения превышения температуры

В таблице 4 приведен сравнительный анализ предлагаемых изменений критериев оценки состояния контактов и контактных соединений по результатам тепловизионного контроля.

Результаты исследований и обобщения опыта применения тепловизионного контроля состояния контактов и контактных соединений показывают:

- отсутствие достаточно обоснованных критериев для выявления аварийных дефектов по температуре превышения и избыточной температуре;
- выявление возможного развития аварийного дефекта при токах нагрузки  $0,6I_{\text{ном}}$  и ниже расчетным путем по избыточной температуре практически не имеет диагностической ценности;
- если на момент проведения тепловизионного обследования ток нагрузки находится в диапазоне ниже  $0,6I_{\text{ном}}$ , количество тепла, выделяемое на контакте (контактном соединении), является незначительным и влияние таких факторов, как теплорассеяние, обдув, теплоизоляционные свойства материалов, становится доминирующим;
- тепловизионный контроль обнаружит факт наличия достижения максимальной температуры нагрева контакта (контактного соединения) при эксплуатации электроустановки лишь в том случае, если на момент измерений ток нагрузки и температура окружающего воздуха будут максимальными.

Следует также отметить, что в соответствии с требованиями РД «Объем и нормы испытаний электрооборудования» периодичность проведения тепловизионного контроля для электрооборудования распределительных устройств на напряжение 35 кВ и ниже составляет 1 раз в 3 года. При этом развитие дефектов контактов и контактных соединений до перехода в аварийный дефект может развиваться быстрее, чем установленный срок периодичности тепловизионного контроля.

В практике эксплуатации наряду с применением бесконтактного тепловизионного контроля с применением тепловизора (рисунок 3) в последние годы развивается применение контактного термоиндикаторного контроля с применением необратимых термоиндикаторных наклеек (рисунок 4).

Достоинствами применения термоиндикаторов являются:

- непрерывный контроль температуры контакта (контактного соединения);

- контроль труднодоступных или недоступных для тепловизионного обследования элементов;
- возможность проведения визуального осмотра термоиндикаторов оперативным персоналом и оперативно-ремонтным персоналом при осмотрах и техническом обслуживании электроустановок;
- оценка состояния контакта (контактного соединения) и выявление наличия и развития дефектов контактов и контактных соединений проводится по результатам визуальной оценки срабатывания термоиндикатора.

Следует подчеркнуть, что в соответствии с требованиями п. 499 Правил технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации установлена периодичность осмотра оборудования распределительных устройств без отключения от сети. На объектах с постоянным дежурным персоналом — не реже 1 раза в сутки, на объектах без постоянного дежурного персонала — не реже 1 раза в месяц, для трансформаторных и распределительных пунктов — не реже 1 раза в 6 месяцев. Также в зависимости от ряда факторов устанавливаются требования по проведению внеочередных осмотров. Таким образом, применение термоиндикаторов позволяет осуществлять визуальный контроль состояния контактов (контактных соединений) при проведении осмотров оперативным персоналом.

Как отмечалось выше, максимальный нагрев контакта (контактного соединения) будет происходить при максимальной нагрузке электроустановки и максимальной температуре окружающего воздуха. В этой связи подчеркнем, что термоиндикатор за счет непрерывности контроля теплового состояния и необратимости срабатывания позволяет при визуальном осмотре зафиксировать факт достижения (либо не достиже-

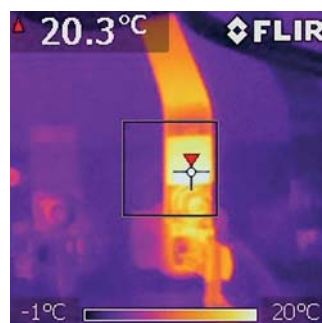


Рис. 3. Бесконтактный тепловизионный контроль



Рис. 4. Контактный термоиндикаторный контроль

**Табл. 5. Диапазоны контролируемых температур для выбора пороговых значений термоиндикатора при его применении в зависимости от установленных наибольших значений температуры нагрева контакта (контактного соединения)**

Контролируемые узлы (контакты/контактные соединения в воздухе)	Наибольшее допустимое значение температуры нагрева, °С	Контролируемый диапазон температур термоиндикатора, °С
<b>Контакты из меди и медных сплавов:</b> – без покрытий – с накладными серебряными пластинами – с покрытием серебром или никелем – с покрытием серебром не менее 24 мкм – с покрытием оловом	75 120 105 120 90	50–60–70–80 70–90–100–120 60–80–90–110 70–90–100–120 60–70–80–90
<b>Аппаратные выводы из меди, алюминия и их сплавов, предназначенные для соединения с внешними проводниками:</b> – без покрытия – с покрытием оловом, серебром или никелем	90 105	60–70–80–90 60–80–90–110
<b>Болтовые контактные соединения из меди, алюминия и их сплавов:</b> – без покрытия – с покрытием оловом – с покрытием серебром или никелем	90 105 115	60–70–80–90 60–80–90–110 70–90–100–120

ния) установленных пороговых значений температур, которые достигались в любой момент эксплуатации электроустановки до предыдущего осмотра. Это является одним из значимых факторов целесообразности и эффективности применения термоиндикаторов для контроля состояния контактов и контактных соединений при эксплуатации электроустановок.

Следует также отметить:

- температура срабатывания верхнего порогового значения термоиндикатора должна соответствовать установленной наибольшей допустимой температуре нагрева контакта (контактного соединения);
- наличие срабатывания всех пороговых значений свидетельствует о наличии аварийного дефекта;
- при срабатывании термоиндикатора в 1–3 диапазоне температур при наличии данных о максимальной нагрузке с момента предыдущего осмотра можно оценить степень развития дефекта;

– при визуальном осмотре термоиндикаторов целесообразно дополнительно проводить сравнение состояния термоиндикаторов с соседними фазами.

Как отмечалось выше, максимальный нагрев контакта (контактного соединения) будет происходить при максимальной нагрузке электроустановки и максимальной температуре окружающего воздуха. В этой связи подчеркнем, что термоиндикатор за счет непрерывности контроля теплового состояния и необратимости срабатывания позволяет при визуальном осмотре зафиксировать факт достижения (либо не достижения) установленных пороговых значений температур, которые достигались в любой момент эксплуатации электроустановки до предыдущего осмотра. Это является одним из значимых факторов целесообразности и эффективности

применения термоиндикаторов для контроля состояния контактов и контактных соединений при эксплуатации электроустановок (таблица 5).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Повышение эффективности своевременного обнаружения развития дефектов контактов и контактных соединений обеспечивает повышение надежности и безопасности эксплуатации электроустановок, снижает риск возгораний и пожаров.

Тепловой контроль контактов и контактных соединений с применением термоиндикаторных наклеек позволяет осуществлять контроль их состояния без применения специальных средств измерений и при этом реализовывать методологию оценки состояния контактов и контактных соединений в соответствии с установленными требованиями «Объем и нормы испытаний электрооборудования».

Метод теплового контроля контактов и контактных соединений с применением многотемпературных термоиндикаторных наклеек обладает достаточной детерминированной диагностической ценностью для оценки состояния контактов и контактных соединений и позволяет повысить достоверность выявления аварийных дефектов.

Результаты исследований и накопленный опыт эксплуатации позволяет в достаточной степени оптимизировать и стандартизировать выбор и применение термоиндикаторов для оценки состояния контактов и контактных соединений в процессе эксплуатации. **Р**



Стенд ООО «ТермоЭлектрика» на Технической выставке «ЭЭПиР»