

Методы контроля и выявления пожароопасных дефектов контактов и контактных соединений при эксплуатации электроустановок

- Львов М. Ю.¹, доктор техн. наук, АО “ОЭК”, Москва
- Никитина С. Д., АО “ОЭК”, Москва
- Львов Ю. Н., доктор техн. наук, АО “НТЦ ФСК ЕЭС”, Москва
- Лесив А. В., ООО “ТермоЭлектрика”, Москва
- Серебрянников Е. Е., канд. физ.-мат. наук, МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва
- Рябиков А. И., ФГБУ ВНИИПО МЧС России, Москва
- Назаров А. А., ФГБУ ВНИИПО МЧС России, Москва

Рассматриваются методы контроля состояния контактов и контактных соединений с применением тепловизионного и термоиндикаторного контроля. Выполнен анализ критериев, используемых для выявления аварийных дефектов контактов и контактных соединений по результатам теплового контроля в процессе эксплуатации электроустановок. На основе результатов исследований выполнена оценка условий развития пожароопасных дефектов контактов и контактных соединений при эксплуатации электроустановок.

Ключевые слова: контакты, контактные соединения, тепловой контроль, тепловизионный контроль, термоиндикаторный контроль.

Проблема обеспечения пожарной безопасности при эксплуатации электроустановок – актуальна и требует особого внимания. Любое электрооборудование, находящееся под напряжением, потенциально представляет пожарную опасность. Одной из причин возникновения пожаров на промышленных объектах является нарушение правил устройства и эксплуатации электроустановок и электрооборудования.

На рис. 1 приведено распределение числа пожаров в России на промышленных объектах, включая складские здания и сооружения. Приведённый анализ показывает высокую долю пожаров по причине нарушения правил устройства и эксплуатации (НПУиЭ) электроустановок и электрооборудования.

Одной из причин, приводящих к возгораниям и пожарам в электроустановках, является возникновение и развитие дефектов контактов и контактных соединений. Своевременное выявление дефектов контактов и контактных соединений в процессе эксплуатации электроустановок позволяет предотвратить развитие аварийных ситуаций, которые могут вызывать повреждения оборудования, возгорания и пожары.

Требования к контактам и контактным соединениям при проектировании и производстве электротехнического оборудования и электротехнических устройств приведены в соответствующих ГОСТ.

Правила приёмки и методики испытаний контактных соединений установлены в ГОСТ 17441-84 [1], в соответствии с которым определяется начальное электрическое сопротивление, проводятся испытания на нагревание номинальным (длительно-допустимым) током, испытания на надёжность и прогнозирование среднего срока службы.

В России наибольшие допустимые значения температур нагрева для различных контактов и контактных соединений в процессе эксплуатации электроустановок определены в различных стандартах: ГОСТ 2585-81, ГОСТ 10434-82, ГОСТ 26346-84, ГОСТ 6815-79, ГОСТ 32397-2020, ГОСТ 403-73 и др. и РД “Объём и нормы испытаний электрооборудования” [2]. При этом следует отметить, что установленные наибольшие допустимые значения температуры нагрева отличаются для различных материалов и видов контактов и контактных соединений.

В зарубежных странах также различными стандартами нормируются наибольшие допустимые значения температуры нагрева контактов (контактных соединений) электроустановок.

В табл. 1 приведён сравнительный анализ значений наибольших допустимых температур для контактов (контактных соединений) токоведущих

¹ Львов Михаил Юрьевич: LvovMY@uneco.ru

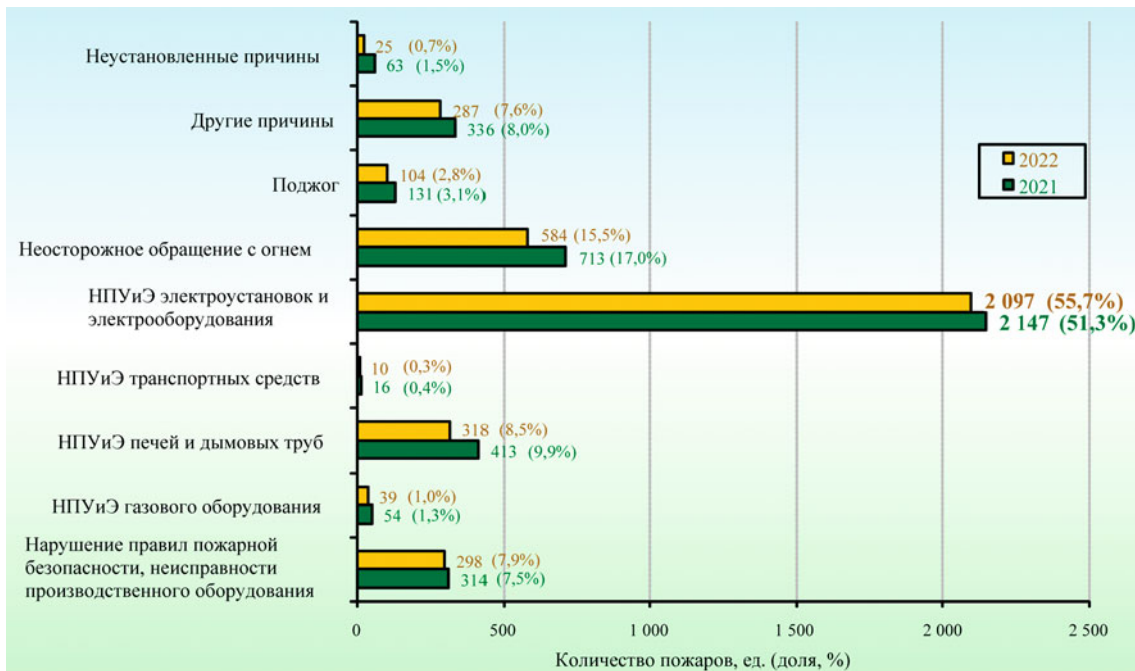


Рис. 1. Распределение числа пожаров в России на промышленных объектах за 2021 – 2022 гг. по причинам пожаров

частей электроустановок класса напряжения выше 1000 В в разных странах, который показывает, что установленные значения наибольших допустимых температур нагрева контактов (контактных соединений) практически совпадают.

Основным методом контроля состояния контактов и контактных соединений в процессе эксплуатации электроустановок является тепловой контроль. При этом применяют как неконтактные, так и контактные методы теплового контроля.

Неконтактный метод теплового контроля – метод неразрушающего контроля, основанный на регистрации температуры при отсутствии непосредственного контакта чувствительного элемента теплового дефектоскопа с поверхностью объекта контроля. В практике эксплуатации электроустановок применяют тепловизионный метод теплового контроля, основанный на регистрации тепловизором инфракрасного излучения.

Контактный метод теплового контроля – метод неразрушающего контроля, основанный на регистрации температуры при непосредственном контакте чувствительного элемента теплового дефектоскопа с поверхностью контроля. В практике эксплуатации электроустановок применяют термоиндикаторный метод теплового контроля. Метод основан на необратимом изменении цвета термоиндикаторной наклейки при достижении заданной пороговой температуры нагрева. При этом термоиндикаторная наклейка располагается на поверхности контролируемого узла.

Состояние контактов и контактных соединений в значительной степени определяется значением переходного контактного сопротивления. В

процессе эксплуатации возможно увеличение переходного контактного сопротивления в силу ряда причин: ослабление нажима и уменьшение площади контактирования, возникновение на контакте оксидной плёнки или нагара, разрушение поверхности металла из-за агрессивного воздействия химических веществ, электрохимического окисления и пр.

Рост переходного контактного сопротивления в процессе эксплуатации электроустановок приводит к избыточному нагреву контакта (контактного соединения) при прохождении через него электрического тока, что в свою очередь приводит к ускоренному росту переходного контактного сопротивления и дальнейшему нагреву. В итоге, развитие дефекта контакта (контактного соединения) приводит к деструкции изоляции, оплавлению и разрушению контакта (контактного соединения), возникновению возгорания и пожару в электроустановке.

Нагрев контакта (контактного соединения) зависит не только от степени ухудшения переходного сопротивления, но 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. Поскольку значения нагрузочного тока и температура окружающего воздуха изменяются при эксплуатации электроустановки, эти параметры должны обязательно учитываться при проведении теплового контроля контактов (контактных соединений).

Объективным критерием, имеющим детерминированную диагностическую ценность для оценки состояния контактов (контактных соединений), является значение температуры нагрева контакта (контактного соединения) в период максимальной нагрузки электроустановки при максимальной температуре окружающего воздуха.

В соответствии с требованиями РД “Объём и нормы испытаний электрооборудования” [2], нагрев контакта (контактного соединения) выше установленного наибольшего допустимого значения температуры нагрева классифицируется как “аварийный дефект”, который требует немедленного устранения. При этом установлены требования по проведению тепловизионного контроля контактов (контактных соединений) и определена периодичность контроля для электрооборудования распределительных устройств, а именно: для напряжения 35 кВ и ниже – 1 раз в 3 года, для напряжения 110 – 220 кВ – 1 раз в 2 года, для напряжения 330 – 750 кВ – ежегодно.

Следует подчеркнуть, что тепловизионный контроль позволяет обнаружить факт 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.

В связи с этим методология тепловизионного контроля контактов и контактных соединений, установленная в соответствии с [2], подразумевает:

1. Выявление контактов (контактных соединений), которые на момент проведения тепловизионного контроля имеют температуру нагрева выше установленной наибольшей допустимой.

2. Выявление контактов (контактных соединений), которые на момент проведения тепловизионного контроля имеют температуру нагрева ниже установленной наибольшей допустимой, но при увеличении тока нагрузки электроустановки и температуры окружающего воздуха могут нагреться до температуры выше наибольшего допустимого значения. При этом вывод о возможности

Т а б л и ц а 1

Сравнительный анализ допустимых температур нагрева для контактов (контактных соединений) токоведущих частей электроустановок класса напряжения выше 1000 В

Элемент (узел) электроустановки	Наибольшая допустимая температура нагрева, °С		
	Россия (по ГОСТ 8024-90 и РД 34.45-51.300-97)	Европа (по IEC 62271-1:2007)	США (по IEEE Std C37.04-1999)
Контакт из меди и медных сплавов коммутационных аппаратов (в воздухе): без покрытия с накладными серебряными пластинами с покрытием серебром или никелем с покрытием серебром толщиной не менее 24 мкм с покрытием оловом	75*	75	75
	120*	–	–
	105*	105	105
	120*	–	–
	90*	90	105
Контактное соединение аппаратных выводов электрооборудования (на аппаратных зажимах) из меди, алюминия и их сплавов, предназначенные для соединения с внешними проводниками электрических цепей: без покрытия с покрытием оловом, серебром или никелем	90	90	90
	105	105	105
Контактное соединение (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: из меди, алюминия и их сплавов: без покрытий с покрытием оловом с покрытием серебром или никелем из алюминия и его сплавов с покрытием серебром или никелем	90	90	90
	105	105	105
	115	115	115
	115	–	105

* Только по ГОСТ 8024-90.

Примечание. ГОСТ 8024-90 “Аппараты и электротехнические устройства переменного тока на напряжение свыше 1000 В”, РД 34.45-51.300-97 “Объём и нормы испытаний электрооборудования”, IEC 62271-1: 2007 “High-voltage switchgear and controlgear – Part 1: Common specifications”, IEEE Std C37.04-1999 “IEEE Standard Rating Structure for AC High-Voltage Circuit Breakers”.

возникновения аварийного дефекта контакта (контактного соединения) в процессе дальнейшей эксплуатации электроустановки делается на основании оценки значений температуры превышения (разность между измеренной температурой нагрева и температурой окружающего воздуха) либо на основании оценки избыточной температуры (превышение измеренной температуры контролируемого узла над температурой аналогичных узлов других фаз, находящихся в одинаковых условиях).

С этой целью при проведении тепловизионного контроля контактов (контактных соединений) применяются соответствующие методики оценки состояния в зависимости от значения тока нагрузки электроустановки на момент измерений, а именно [2]:

по температуре превышения – при токах нагрузки $(0,6 \div 1)I_{\text{ном}}$;

по избыточной температуре – при токах нагрузки $(0,3 \div 0,6)I_{\text{ном}}$,

где $I_{\text{ном}}$ – номинальный ток нагрузки.

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

1. Измерение температуры контролируемого элемента (контакта, контактного соединения).

2. Измерение силы тока в цепи на момент проведения тепловизионного контроля для расчёта отношения рабочего тока нагрузки электрооборудования к номинальному ($I_{\text{раб}}/I_{\text{ном}}$).

3. В зависимости от значений тока нагрузки на момент проведения измерений оценка теплового состояния контакта (контактного соединения) осуществляется расчётным путём по температуре превышения либо по избыточной температуре.

4. При токах нагрузки электрооборудования $(0,6 \div 1)I_{\text{ном}}$ производится сравнение расчётного значения превышения температуры при номинальном токе ($\Delta T_{\text{ном}}$) с установленным наибольшим допустимым значением превышения температуры для соответствующего вида и типа контакта (контактного соединения). При превышении установленного значения дефект классифицируется как “аварийный дефект”.

5. При токах нагрузки $(0,3 \div 0,6)I_{\text{ном}}$ производится сравнение расчётного значения избыточной температуры ($\Delta T_{0,5}$) при токе нагрузки $0,5I_{\text{ном}}$ с установленными критериями. При значении избыточной температуры $\Delta T_{0,5}$ более 30°C дефект классифицируется как аварийный.

6. При токах нагрузки $0,3I_{\text{ном}}$ и ниже тепловизионный контроль неэффективен.

Следует отметить, что применение тепловизионного контроля для оценки состояния контактов (контактных соединений) имеет многолетний опыт использования в практике эксплуатации как в России, так и в других странах. При этом приме-

няются различные критерии для выявления аварийных дефектов контактов (контактных соединений).

В табл. 2 приведён сравнительный анализ применяемых в различных стандартах критериев для выявления “аварийных дефектов” контактов (контактных соединений) по результатам тепловизионного контроля с использованием определения избыточной температуры и температуры превышения.

Результаты, приведенные в табл. 2, показывают значительные различия применяемых критериев для выявления “аварийных дефектов” контактов и контактных соединений как по температуре превышения, так и по избыточной температуре. Как показывают результаты исследований и накопленный опыт использования тепловизионного контроля контактов (контактных соединений), это связано с отсутствием достаточно обоснованных критериев для оценки состояния контактов (контактных соединений) как по температуре превышения, так и по избыточной температуре, а также с попыткой решения следующей проблемы: с одной стороны, попытаться не пропустить развитие аварийного дефекта контакта (контактного соединения), с другой стороны избежать ложных отбраковок контактов (контактных соединений), которые на самом деле являются исправными.

Как известно, тепловизор регистрирует инфракрасное излучение, по результатам которого определяется поверхностная температура контролируемого элемента. При этом полученные результаты в значительной степени зависят от целого ряда факторов: угла обзора, размера объекта, состояния поверхности объекта, разнице между температурой нагрева контролируемого элемента и температурой окружающего воздуха и др., в том числе, в значительной мере от выбора коэффициента излучательной способности контролируемого объекта при проведении тепловизионного контроля. Следует отметить, что коэффициент излучения не только отличается для различных материалов, но и существенно отличается для разных состояний поверхности.

При установленной фиксированной настройке тепловизора по коэффициенту излучения при контроле теплового нагрева контактов (контактных соединений) в зависимости от материала и состояния поверхности контакта (контактного соединения) будут фиксироваться существенно различные значения температуры нагрева. Также следует отметить, что значения коэффициента излучения для одних и тех же материалов может значительно меняться во времени из-за протекания реакций окисления поверхностей контактов (контактных соединений) на воздухе. При этом, как известно, чем ниже разница между температурой измеряемого объекта и температурой окружающего воздуха и чем ниже коэффициент излучения, тем сильнее

погрешность определения температуры контакта (контактного соединения) с применением тепловизора.

Проблемы в достоверности оценки состояния контактов (контактных соединений) по результатам тепловизионного контроля связаны не только с точностью определения температуры нагрева контактов (контактных соединений), но и со значением тока нагрузки и с точностью определения тока нагрузки электроустановки на момент проведения измерений:

чем ниже нагрузка электроустановки на момент тепловизионного контроля, тем ниже диагностическая ценность применения тепловизионного контроля для оценки состояния контактов (контактных соединений);

относительно небольшая ошибка в измерениях значения тока нагрузки электроустановки на момент проведения тепловизионного контроля вносит существенную ошибку в результаты оценки состояния контактов (контактных соединений) при определении температуры превышения и избыточной температуры, приведённых к нормируемым значениям нагрузки;

совокупность погрешностей и неточностей в определении температуры нагрева контакта (контактного соединения) и значения нагрузки элек-

троустановки на момент измерений могут приводить к совершенно недостоверной оценке состояния контактов (контактных соединений);

выявление возможного развития аварийного дефекта при токах нагрузки $0,6I_{\text{ном}}$ и ниже расчётным путём по избыточной температуре практически не имеет диагностической ценности и в ряде стандартов вообще не используется;

при разнице в температуре контакта (контактного соединения) по сравнению с температурой окружающего воздуха менее 20°C и коэффициенте излучения поверхности контакта (контактного соединения) ниже $0,7$, как правило, нецелесообразно считать тепловизионный контроль эффективным методом для достоверной оценки состояния контактов (контактных соединений).

В качестве иллюстрации приведённых тезисов можно рассмотреть типичный пример вычислений избыточной температуры при токе нагрузки $0,4I_{\text{ном}}$ и истинном значении температур контактных соединений для двух фаз – 20 и 30°C соответственно. В этом случае избыточная температура равна 10°C , а приведённая к $0,5 I_{\text{ном}}$ избыточная температура составляет

$$\Delta T_{0,5} = 10 \left(\frac{0,5 I_{\text{ном}}}{0,4 I_{\text{ном}}} \right)^2 = 15,6^{\circ}\text{C}. \quad (1)$$

Т а б л и ц а 2

Критерии, применяемые для выявления дефектов аварийных контактов (контактных соединений) по результатам тепловизионного контроля с использованием определения избыточной температуры и температуры превышения

Стандарт	Страна применения	Критерий выявления	
		По температуре превышения	По избыточной температуре
РД 34.45-51.300-97 “Объём и нормы испытаний электрооборудования”	Россия	Температура превышения, приведённая к $I_{\text{ном}}$, $35 - 80^{\circ}\text{C}$ в зависимости от типа и материала контакта (контактного соединения)	Избыточная температура, приведённая к $0,5I_{\text{ном}}$, $>30^{\circ}\text{C}$
РД 153-34.0-20.363-99 “Основные положения методики инфракрасной диагностики электрооборудования и ЛЭП”	Россия	Температура превышения, приведённая к $I_{\text{ном}}$, $\geq 40^{\circ}\text{C}$	Избыточная температура, приведённая к $0,5I_{\text{ном}}$, $>30^{\circ}\text{C}$
“Требования к объёму и нормам испытаний электрооборудования” (проект)*	Россия	Температура превышения, приведённая к $I_{\text{ном}}$, $35 - 80^{\circ}\text{C}$ в зависимости от типа и материала контакта (контактного соединения)	Не применяется
Standard for Electrical Equipment Maintenance NFPA70B	США, страны Латинской Америки	Не применяется	Избыточная температура $>15^{\circ}\text{C}$ не зависит от тока нагрузки
Electrical Power Equipment Maintenance and Testing (Paul Gill)	Международный справочник	Температура превышения, приведённая к $I_{\text{ном}}$, $>40^{\circ}\text{C}$ или не зависит от тока нагрузки	Не применяется
Standard for Infrared Inspection of Electrical Systems & Rotating Equipment	США	Температура превышения, приведённая к $I_{\text{ном}}$, $>40^{\circ}\text{C}$	Избыточная температура, приведённая к $I_{\text{ном}}$, $>15^{\circ}\text{C}$
Standard ANSI/NETA MTS	США, Канада, Европа, страны Латинской Америки	Температура превышения $>40^{\circ}\text{C}$ не зависит от тока нагрузки	Избыточная температура $>15^{\circ}\text{C}$ не зависит от тока нагрузки
Standard MIL-STD-2194(SH)	США	Температура превышения $>70^{\circ}\text{C}$ не зависит от тока нагрузки	Не применяется

* Разработанный Минэнерго России проект требований к обеспечению надёжности электроэнергетических систем, надёжности и безопасности объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок “Требования к объёму и нормам испытаний электрооборудования”, прошедший публичные обсуждения [3].

Если предположить, что ошибка в определении температуры тепловизором составляет всего 2° , а ток нагрузки между фазами отличается на $\pm 5\%I_{\text{НОМ}}$, то разница между максимальным и минимальным значением избыточной температуры, приведённом к току нагрузки $0,5I_{\text{НОМ}}$, будет равна

$$\begin{aligned} \Delta T_{0,5}^{\text{МАКС}} - \Delta T_{0,5}^{\text{МИН}} &= 12 \left(\frac{0,5I_{\text{НОМ}}}{0,35I_{\text{НОМ}}} \right)^2 - \\ &- 8 \left(\frac{0,5I_{\text{НОМ}}}{0,45I_{\text{НОМ}}} \right)^2 = 14,6^\circ\text{C}. \end{aligned} \quad (2)$$

Таким образом, относительная ошибка определения избыточной температуры в данном случае будет лежать в диапазоне от -36 до $+57\%$.

Фактически, применение тепловизионного контроля для оценки состояния контактов (контактных соединений) имеет достаточно ограниченную диагностическую ценность [4]. Достоверный вывод о наличии аварийного дефекта контакта (контактного соединения) можно сделать только, если на момент проведения тепловизионного контроля обнаруживается температура контакта (контактного соединения), превышающая установленное наибольшее допустимое значение температуры нагрева.

Если на момент проведения тепловизионного контроля контактов (контактных соединений) не зафиксированы превышения наибольших допустимых значений температур нагрева, то получить достоверную оценку состояния контакта (контактного соединения) с использованием оценок по превышению температуры и по избыточной температуре достаточно проблематично.

Оценка состояния контакта (контактного соединения) с применением тепловизионного контроля по температуре превышения, при условии обеспечения достоверности измерений, наличия достоверных значений максимальной нагрузки и нагрузки электроустановки в момент измерений, фактически может иметь положительную диагностическую ценность только, если на момент измерений нагрузка электроустановки составляет более $0,6I_{\text{НОМ}}$. Если на момент проведения тепловизионного обследования ток нагрузки находится в диапазоне $0,6I_{\text{НОМ}}$ и ниже, количество тепла, выделяемое на контакте (контактном соединении), является незначительным и влияние таких факторов, как теплорассеяние, обдув, теплоизоляционные свойства материалов, становятся доминирующими [5]. При этом, ошибка в определении температуры нагрева контакта (контактного соединения) и тока нагрузки всего на несколько процентов может приводить к совершенно неправильной оценке состояния, а именно квалифицировать аварийный контакт (контактное соединение) как исправный и, наоборот, квалифицировать исправный контакт (контактное соединение) как аварийный.

Как отмечалось, объективным критерием, имеющим детерминированную диагностическую ценность для оценки состояния контактов (контактных соединений), является значение температуры нагрева контакта (контактного соединения), а критерием наличия “аварийного дефекта” – превышение установленного наибольшего допустимого значения температуры нагрева контакта (контактного соединения). При этом максимальный нагрев контакта (контактного соединения) будет происходить при максимальной нагрузке электроустановки и максимальной температуре окружающего воздуха.

Следует подчеркнуть принципиальную разницу контроля состояния контактов (контактных соединений) с помощью тепловизионного и термоиндикаторного контроля [4]. Тепловизионный контроль позволяет определить температуру нагрева контакта (контактного соединения) при существующем токе нагрузки электроустановки и температуре окружающего воздуха на момент измерений. Термоиндикатор, за счёт непрерывности контроля теплового состояния и необратимости срабатывания, позволяет зафиксировать факт достижения (либо не достижения) установленных пороговых значений температур, которые достигались в любой момент эксплуатации электроустановки до ее осмотра, в том числе в период максимальной нагрузки электроустановки и максимальной температуре окружающего воздуха.

Следует подчеркнуть, что в соответствии с требованиями п. 499 “Правил технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации” [6] 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 контроль состояния контактов (контактных соединений) при проведении каждого визуального осмотра электроустановки оперативным персоналом без использования средств измерений.

Для целей оценки состояния контактов и контактных соединений при эксплуатации электроустановок применяются необратимые многотемпературные термоиндикаторы плавления [7]. Термоиндикатор – это специальная наклейка, изготовленная из композиционного материала, изменяющая цвет при достижении заданной температуры. При этом значение пороговой температуры срабатывания термоиндикатора (изменение цвета при достижении определённой температуры) задаётся

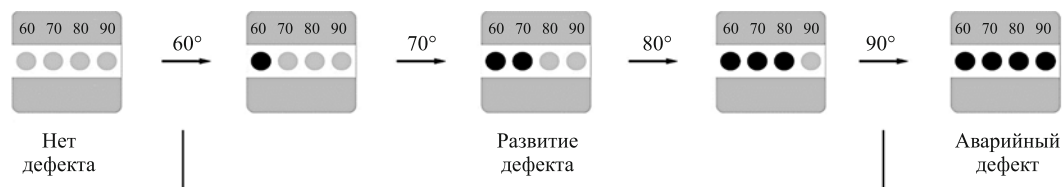


Рис. 2. Принцип работы и применения необратимых термоиндикаторных наклеек для оценки состояния контактов (контактных соединений)

при изготовлении. В России в практике эксплуатации электроустановок закрытых распределительных устройств (ЗРУ), как правило, применяются четырёхдиапазонные термоиндикаторные наклейки [5, 7]. Использование таких термоиндикаторных наклеек является наиболее оптимальным и позволяет определить не только факт наличия аварийного дефекта контакта (контактного соединения), но и оценить степень развития дефекта.

На рис. 2 приведена схема, поясняющая принцип работы необратимых термоиндикаторных наклеек и методология оценки состояния контактов (контактных соединений) по результатам осмотра.

Непрерывность контроля теплового состояния и необратимость срабатывания термоиндикатора позволяют установить факт достижения (либо не достижения) наибольшей допустимой температуры нагрева за всё время эксплуатации электроустановки, и тем самым обеспечивается детерминированная диагностическая ценность данного метода. Это является одним из ключевых факторов целесообразности и эффективности применения термоиндикаторов для контроля состояния контактов и контактных соединений.

Наличие срабатывания всех пороговых значений термоиндикатора однозначно свидетельствует

о наличии аварийного дефекта контакта (контактного соединения), т.е. о достижении установленной наибольшей температуры нагрева. При этом температура срабатывания верхнего порогового значения термоиндикатора выбирается с учётом установленного в [2] значения наибольшей допустимой температуры нагрева для соответствующего контакта (контактного соединения).

Современные термоиндикаторы, предлагаемые предприятиями-изготовителями, имеют точность срабатывания заданной температуры $\pm 2^\circ\text{C}$, что является достаточным для обеспечения достоверности выявления аварийных дефектов контактов (контактных соединений), а заявленный срок службы термоиндикаторов составляет 10 лет [7].

В настоящее время в системе нормативно-технических документов, действующих в электроэнергетике, отсутствуют единые методические указания по применению термоиндикаторного контроля для оценки состояния контактов (контактных соединений). Вместе с тем, на основании накопленного опыта применения термоиндикаторов в период 2020 – 2023 гг., в ряде крупных энергетических и промышленных компаний России были разработаны и введены в действие стандарты организаций (СТО), регламентирующие приме-

Т а б л и ц а 3

Рекомендуемые контролируемые диапазоны температур термоиндикатора в зависимости от установленных допустимых значений температуры нагрева, вида и типа контролируемых контактов (контактных соединений) в воздухе

Контролируемый узел	Наибольшее допустимое значение температуры нагрева, °C	Контролируемый диапазон температур термоиндикатора, °C
Контакт из меди и медных сплавов: без покрытий с накладными серебряными пластинами с покрытием серебром или никелем с покрытием серебром не менее 24 мкм с покрытием оловом	75	50 – 60 – 70 – 80
	120	70 – 90 – 100 – 120
	105	60 – 80 – 90 – 110
	120	70 – 90 – 100 – 120
	90	60 – 70 – 80 – 90
Аппаратные выводы из меди, алюминия и их сплавов, предназначенные для соединения с внешними проводниками: без покрытия с покрытием оловом, серебром или никелем	90	60 – 70 – 80 – 90
	105	60 – 80 – 90 – 110
Болтовые контактные соединения из меди, алюминия и их сплавов: без покрытия с покрытием оловом с покрытием серебром или никелем	90	60 – 70 – 80 – 90
	105	60 – 80 – 90 – 110
	115	70 – 90 – 100 – 120

		<p>Контролируемый элемент: болтовое контактное соединение из сплава меди и алюминия Наибольшая нормируемая допустимая температура нагрева для болтового контактного соединения из сплава меди и алюминия: 90°C Установлен термоиндикатор со шкалой температур: 60 70 80 90°C Результаты контроля Максимальная температура, зафиксированная термоиндикатором: 90°C – «аварийный дефект» Максимальная температура, зарегистрированная тепловизором: 9,6°C Температура окружающего воздуха в момент контроля: 7°C Температура превышения: 16,6°C Ток нагрузки на момент осмотра: $0,3I_{ном}$ Максимальная температура соседнего контактного соединения (зелёная фаза): 0°C Избыточная температура: 9,6°C Расчётная избыточная температура, приведённая к $0,5I_{ном}$: 26°C <i>Оценка состояния контактного соединения:</i> по РД 34.45-51.300-97 [2] -- «развившийся дефект», в соответствии с «Требованиями к объёму и нормам...» [3] -- «начальная степень неисправности»</p>
		<p>Контролируемый элемент: болтовое контактное соединение из сплава меди и алюминия Наибольшая нормируемая допустимая температура нагрева для болтового контактного соединения из сплава меди и алюминия: 90°C Установлен термоиндикатор со шкалой температур: 60 70 80 90°C Результаты контроля Максимальная температура, зафиксированная термоиндикатором: 90°C – «аварийный дефект» Максимальная температура, зарегистрированная тепловизором: 72,1°C Температура окружающего воздуха в момент контроля: 7°C Ток нагрузки на момент осмотра: $0,6I_{ном}$ Температура превышения: 79,1°C Наибольшее допустимое значение превышения температуры для болтового контактного соединения из сплава алюминия: 50°C <i>Оценка состояния контактного соединения по РД 34.45-51.300-97 [2]</i> «аварийный дефект»</p>
		<p>Контролируемый элемент: болтовое контактное соединение из сплава меди и алюминия Наибольшая нормируемая допустимая температура нагрева для болтового контактного соединения из сплава меди и алюминия: 90°C Установлен термоиндикатор со шкалой температур: 60 70 80 90°C Результаты контроля Максимальная температура, зафиксированная термоиндикатором: 90°C «аварийный дефект» Максимальная температура, зарегистрированная тепловизором: 20,3°C Температура окружающего воздуха в момент контроля: 7°C Температура превышения: 27,3°C Ток нагрузки на момент осмотра: $0,26I_{ном}$ <i>Оценка состояния контактного соединения:</i> по РД 34.45-51.300-97 [2] не может быть выполнена, так как ток нагрузки на момент осмотра менее $0,3I_{ном}$ в соответствии с «Требованиями к объёму и нормам...» [3] «начальная степень неисправности»</p>
		<p>Контролируемый элемент: болтовое контактное соединение из сплава алюминия Наибольшая нормируемая допустимая температура нагрева для болтового контактного соединения из сплава алюминия: 90°C Установлен термоиндикатор со шкалой температур: 60 70 80 90°C Результаты контроля Максимальная температура, зафиксированная термоиндикатором: 90°C «аварийный дефект» Максимальная температура, зарегистрированная тепловизором: 18°C Температура окружающего воздуха в момент контроля: 7°C Температура превышения: 25°C Ток нагрузки на момент осмотра: $0,2I_{ном}$ <i>Оценка состояния контактного соединения по РД 34.45-51.300-97 [2]</i> не может быть выполнена, так как ток нагрузки на момент осмотра менее $0,3I_{ном}$</p>

Рис. 3. Примеры сравнительного анализа применения термоиндикаторного и тепловизионного контроля для оценки состояния контактов и контактных соединений

нение термоиндикаторного контроля для оценки состояния контактов и контактных соединений [7]. Результаты исследований и обобщение накопленного опыта применения термоиндикаторного контроля позволили стандартизировать требования к выбору оптимальных контролируемых диапазонов температур термоиндикаторов. В табл. 3 приведены рекомендуемые контролируемые диапазоны температур термоиндикатора в зависимости от установленных допустимых значений температуры нагрева, вида и типа контролируемых контактов (контактных соединений).

С целью проведения сравнительного анализа применения термоиндикаторного и тепловизионного контроля для оценки состояния контактов (контактных соединений) на четырёх трансформаторных подстанциях (ТП 10/0,4 кВ) и трёх распределительных устройств пунктов питания наружного освещения (ПП НО 0,4 кВ) был установлен 901 термоиндикатор. Через три месяца эксплуатации проведён визуальный осмотр и тепловизионный контроль контактов и контактных соединений. В табл. 4 приведены результаты сравнительного анализа применения термоиндикаторного и

тепловизионного контроля оценки состояния контактов и контактных соединений.

Из результатов, приведённых в табл. 4, следует, что тепловизионный контроль позволил выявить 48% дефектных контактов и контактных соединений, находящихся в эксплуатации. При этом по результатам тепловизионного контроля выявлено только 28 % общего количества выявленных по результатам термоиндикаторного контроля аварийных дефектов контактов (контактных соединений).

Основными причинами относительно низкой эффективности применения тепловизионного контроля для выявления аварийных дефектов контактов (контактных соединений) являются:

относительно низкие нагрузки электроустановок на момент проведения тепловизионного контроля (менее $0,6I_{ном}$);

наличие нагрузок электроустановок на момент тепловизионного контроля ниже $0,3I_{ном}$, когда тепловизионный контроль неэффективен;

низкая диагностическая ценность применения избыточной температуры для оценки состояния контактов (контактных соединений);

влияние различных факторов и погрешностей на оценку состояния контактов (контактных соединений) по избыточной температуре и температуре превышения.

На рис. 3 приведены примеры сравнительного анализа применения термоиндикаторного и тепловизионного контроля для оценки состояния контактов и контактных соединений.

Как было указано, в соответствии с требованиями РД “Объём и нормы испытаний электрооборудования” [2] при проведении теплового контроля состояния контактов (контактных соединений) используется понятие “аварийный дефект”. При этом основная концепция [2] заключается в следующем: выход значений параметров за установленные границы (предельно допустимые значения) следует рассматривать как признак наличия дефектов, которые могут привести к отказу оборудования. Также отметим, что в соответствии с

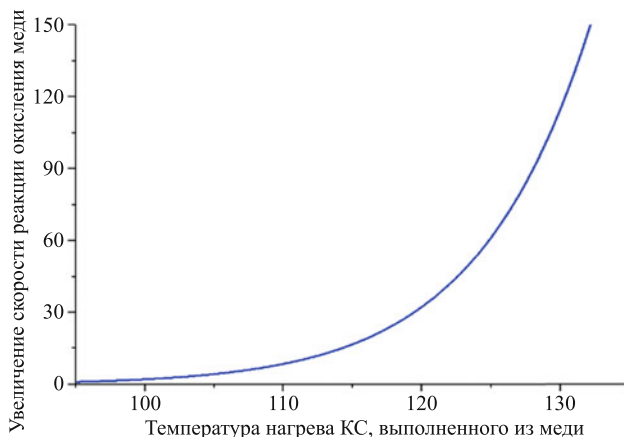


Рис. 4. Зависимость относительного увеличения константы скорости реакции окисления медного контакта (контактного соединения) при росте температуры нагрева выше установленного значения допустимой температуры нагрева контакта (контактного соединения): $T_0 = 95^\circ\text{C}$

ГОСТ Р 27.102-2021 “Надёжность в технике. Надёжность объекта. Термины и определения” [8] определено понятие дефект – каждое отдельное несоответствие объекта требованиям, установленным в документации. При этом понятие “аварийный дефект” не применяется и не регламентируется.

Вместе с тем классификация дефекта контакта (контактного соединения) при его развитии как “аварийный дефект” в значительной степени можно считать оправданным и целесообразным. Однако в этой связи необходимо правильно интерпретировать понятие “аварийный дефект” контакта (контактного соединения). Достаточно часто в практике эксплуатации электроустановок бытует мнение, что достижение значения установленной наибольшей допустимой температуры нагрева или достижение наибольшего допустимого значения превышения температуры для контакта (контактного соединения), которое классифицируется как “аварийный дефект”, требует немедленного устранения, так как иначе возникнут возгорания и пожар в электроустановке.

Т а б л и ц а 4

Результаты сравнительного анализа применения термоиндикаторного и тепловизионного контроля для оценки состояния контактов/контактных соединений

Параметр	Метод контроля	
	Термоиндикаторный контроль	Тепловизионный контроль
Число контактов (контактных соединений), шт.: контролируемых	901	901
выявленных дефектных	Аварийных – 13, развившихся – 6, на начальной степени развития – 7	Аварийных – 4, развившихся – 1, на начальной степени развития – 2
Удельное количество выявленных контактов (контактных соединений), %:		
дефектных	2,9	1,4
аварийных дефектных	1,4	0,4

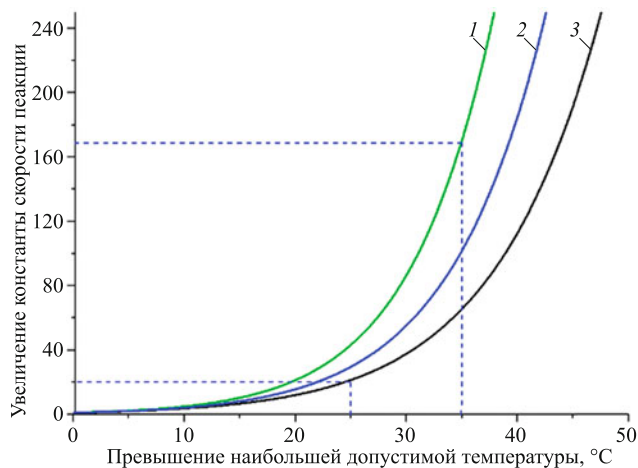


Рис. 5. Зависимость относительного увеличения константы скорости реакции окисления контактов (контактных соединений) при превышении наибольшей температуры нагрева:

1 – $T_0 = 80^\circ\text{C}$ (медь и алюминий); 2 – $T_0 = 100^\circ\text{C}$ (олово); 3 – $T_0 = 120^\circ\text{C}$ (серебро или никель)

В этой связи необходимо подчеркнуть, что достижение установленного значения наибольшей допустимой температуры нагрева контакта (контактного соединения) следует рассматривать как признак наличия дефекта, который может привести к отказу оборудования при его дальнейшем развитии. Однако достижение установленного значения наибольшей допустимой температуры нагрева контакта (контактного соединения) не является пожароопасным нагревом и не приводит к немедленному возгоранию.

Увеличение переходного контактного сопротивления при росте температуры выше наибольшей допустимой связано с развитием процесса окисления поверхности металлического проводника. Важно отметить, что скорость окисления металлов и, как следствие, скорость роста переходного контактного сопротивления в соответствии с законом Арениуса экспоненциально зависит от температуры. Пожароопасным нагревом следует считать нагрев контакта (контактного соединения) до значения температуры выше установленной допустимой температуры нагрева, при которой скорость развития дефекта резко ускоряется. При достижении пожароопасного нагрева скорость развития дефекта становится не предсказуемой, что и приводит к деструкции изоляции, возникновению электрической дуги, оплавлению контакта (контактного соединения) и, в конечном счёте, к возгоранию и пожару в электроустановке.

Температура пожароопасного нагрева контакта (контактного соединения) зависит от ряда факторов, таких как химические свойства металлов, законов химической кинетики с учётом существующих нормируемых значений температур термической деструкции изоляции и оболочек проводов и кабелей.

Скорость окисления поверхности контактов (контактных соединений) и, как следствие, скорость роста переходного контактного сопротивления происходит в соответствии с уравнением Арениуса, которое устанавливает экспоненциальную зависимость константы скорости k химической реакции от температуры

$$k(T) = A e^{-\frac{E_a}{RT}},$$

где A – предэкспоненциальный множитель; E_a – энергия активации; R – газовая постоянная; T – абсолютная температура.

Скорость окисления поверхности контакта (контактного соединения) резко возрастает при превышении установленного наибольшего допустимого значения температуры нагрева. Относительное увеличение константы скорости окисления при превышении температуры определяется зависимостью

$$\frac{k(T_0 + \Delta T)}{k(T_0)} = \frac{e^{-\frac{E_a}{R(T_0 + \Delta T)}}}{e^{-\frac{E_a}{RT_0}}},$$

где T_0 – наибольшая допустимая температура; ΔT – превышение наибольшей допустимой температуры.

На рис. 4 приведена зависимость относительного увеличения константы скорости реакции окисления медного контактного соединения при росте температуры нагрева. Согласно графику для контактного сопротивления Cu-Cu, при достижении температуры нагрева контактного соединения значений температур в интервале $115 - 125^\circ\text{C}$ наблюдается резкое ускорение скорости реакции окисления меди. Аналогичные зависимости имеют место также для контактных соединений, выполненных из других материалов, имеющих близкие к меди значения энергии активации и имеющие различия по установленным значениям наибольшей допустимой температуры нагрева.

На рис. 5 показана зависимость относительного увеличения константы скорости реакции окисления контактов (контактных соединений) из различных материалов, наиболее часто применяемых в электроустановках, при превышении наибольшей температуры нагрева.

Приведенная зависимость показывает, что при превышении установленной допустимой температуры контакта (контактного соединения) на $25 - 35^\circ\text{C}$ резко возрастает скорость реакции окисления, как следствие происходит значительное увеличение переходного сопротивления контакта (контактного соединения) и создаются условия для возникновения пожароопасного нагрева, который в дальнейшем может привести к возгоранию и пожару в электроустановке.

Таким образом, при обнаружении температуры нагрева контакта (контактного соединения) установленного наибольшего допустимого значения температуры нагрева необходимо в плановом порядке запланировать ревизию контакта (контактного соединения) для устранения “аварийного дефекта”, так как в дальнейшем при превышении наибольшего допустимого значения температуры нагрева на 25 – 35°C будут создаваться условия для развития пожароопасного дефекта контакта (контактного соединения).

Выводы

1. Объективным критерием, имеющим детерминированную диагностическую ценность для оценки состояния контактов (контактных соединений), является значение температуры нагрева контакта (контактного соединения) в период максимальной нагрузки электроустановки при максимальной температуре окружающего воздуха.

2. При нагреве контактов (контактных соединений) до температуры, превышающей наибольшее допустимое значение на 25 – 35°C, создаются условия для возникновения пожароопасного дефекта.

3. Зависимость точности определения тепловизором температуры нагрева контролируемых объектов от большого количества факторов и погрешностей, а также зависимость эффективности применения тепловизионного контроля от тока нагрузки электроустановки и точности её определения на момент проведения измерений, в значительной степени ограничивают диагностическую ценность применения тепловизионного контроля для оценки состояния контактов и контактных соединений.

4. Тепловизионный контроль обнаружит достижение 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.

5. Термоиндикатор за счёт непрерывности контроля теплового состояния и необратимости сра-

батывания позволяет зафиксировать факт достижения (либо не достижения) установленных пороговых значений температур нагрева контакта (контактного соединения) в любой момент эксплуатации, в том числе в период максимальной нагрузки электроустановки при максимальной температуре окружающего воздуха.

6. Термоиндикаторный контроль с применением термоиндикаторных наклеек позволяет осуществлять оценку состояния контактов и контактных соединений при каждом визуальном осмотре без использования специальных средств измерений.

Соблюдение этических норм

У авторов нет соответствующих финансовых или нефинансовых интересов.

Список литературы

1. *Соединения контактные электрические. Правила приемки и методы испытаний* [Текст]: ГОСТ 17441–84. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1984.
2. *Объём и нормы испытаний электрооборудования* [Текст]: РД 34.45-51.300 – 97. – М.: Изд-во НИЦ ЭНАС, 1998.
3. *Требования к объёму и нормам испытаний электрооборудования (проект)* [Электронный ресурс]. – М.: Минэнерго России. – (<https://regulation.gov.ru/projects#npa=113525>).
4. *Львов, М. Ю.* Развитие и повышение эффективности теплового контроля контактов и контактных соединений при эксплуатации электроустановок распределительных электрических сетей [Текст] / М. Ю. Львов // *Электроэнергия. Передача и распределение.* – 2023. – № 4(79). – С. 136 – 140.
5. *Львов, М. Ю.* Применение термоиндикаторов для контроля состояния контактов и контактных соединений при эксплуатации электрооборудования [Текст] / М. Ю. Львов, С. Д. Никитина, А. В. Лесив // *Электрические станции.* – 2023. – № 2. – С. 44 – 51.
6. *Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации* [Текст]: утв. приказом Минэнерго России от 4.10.2022 № 1070.
7. *Львов, М. Ю.* О стандартизации требований к термоиндикаторному контролю состояния контактов и контактных соединений при эксплуатации электроустановок [Текст] / М. Ю. Львов, С. Д. Никитина, Ю. Н. Львов, А. В. Лесив // *Энергия единой сети.* – 2023. – № 1(68). – С. 67 – 74.
8. *Надёжность в технике. Надёжность объекта. Термины и определения* [Текст]: ГОСТ Р 27.102-2021. – М.: Российский институт стандартизации, 2021.