

# Применение термоиндикаторов для контроля состояния контактов и контактных соединений при эксплуатации электрооборудования

- Львов М. Ю.<sup>1</sup>, доктор техн. наук, АО “ОЭК”, Москва
- Никитина С. Д., АО “ОЭК”, Москва
- Лесив А. В., ООО “ТермоЭлектрика”, Москва

Предложена методология применения термоиндикаторов для контроля состояния контактов и контактных соединений электрооборудования. Рассмотрены принципы оценки теплового состояния контактов и контактных соединений в соответствии с действующими нормативными требованиями. На основе выполненных исследований и обобщения опыта применения термоиндикаторов разработаны принципы их выбора и методология контроля состояний контактов и контактных соединений с помощью термоиндикаторов.

**Ключевые слова:** контакт, контактное соединение, термоиндикатор, тепловой контроль.

Одним из актуальных вопросов эксплуатации электроустановок является контроль состояния контактов и контактных соединений электрооборудования.

Состояние контактов и контактных соединений определяется, в первую очередь, значением переходного контактного сопротивления. В процессе эксплуатации под влиянием различных факторов возможно увеличение переходного контактного сопротивления вследствие уменьшения площади контакта из-за ослабления нажима или усилия прижатия, возникновения оксидной плёнки или нагара из-за окисления металла на воздухе, коррозии металла из-за агрессивного воздействия химических веществ, электрохимического окисления, некачественной сварки или пайки контактного соединения и пр.

Рост переходного контактного сопротивления приводит к увеличению выделения тепла и избыточному нагреву контакта (контактного соединения). При нагреве выше установленных наибольших допустимых температур может происходить оплавление и отгорание контакта (контактного соединения), повреждение изоляции, возгорание, пожар. Своевременное выявление дефектов контактов и контактных соединений позволяет предотвратить развитие аварийных ситуаций.

Значения наибольших допустимых температур контактов и контактных соединений различаются в зависимости от материала и вида контакта (контактного соединения). Предельные значения температур приведены в различных ГОСТ.

В соответствии с РД “Объём и нормы испытаний электрооборудования” [1] установлены требования по проведению тепловизионного контроля контактов и контактных соединений электрообо-

рудования. Для осуществления тепловизионного контроля рекомендовано применять тепловизоры.

В соответствии с требованиями [1], а также РД “Основные положения методики инфракрасной диагностики электрооборудования и ВЛ” [2] для проведения тепловизионного контроля контактов и контактных соединений установлены две методики оценки состояния (в зависимости от номинального тока нагрузки –  $I_{ном}$ ), а именно:

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

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

При этом указывается, что тепловизионный контроль электрооборудования и токоведущих частей при токах нагрузки  $0,3I_{ном}$  и ниже не способствует выявлению дефектов на ранней стадии их развития.

Согласно [1, 2], 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 расчёта отношения рабочего тока нагрузки электрооборудования к номинальному ( $I_{раб}/I_{ном}$ );

3) в зависимости от значений тока нагрузки и температуры окружающего воздуха оценка теплового состояния контакта (контактного соединения) осуществляется расчётным путём по температуре превышения либо по избыточной температуре.

При этом, в соответствии с РД “Объём и нормы испытаний электрооборудования” [1], определено:

превышение температуры – разность между измеренной температурой нагрева и температурой окружающего воздуха;

<sup>1</sup> Львов Михаил Юрьевич: LvovMY@uneco.ru

избыточная температура – превышение измеренной температуры контролируемого узла над температурой аналогичных узлов других фаз, находящихся в одинаковых условиях.

Учёт тока нагрузки необходим, чтобы своевременно выявить контакты (контактные соединения), которые на момент осмотра могут иметь температуру ниже наибольшей допустимой, но с ростом тока нагрузки нагреться выше установленных предельных значений.

В соответствии с требованиями [1, 2], если на момент проведения диагностики нагрузка в сети превышает  $0,6I_{\text{ном}}$ , то:

вычисляют температуру превышения диагностируемого элемента (разницу между температурой окружающего воздуха и температурой элемента);

определяют ток нагрузки;

рассчитывают температуру превышения при номинальной нагрузке, исходя из соотношения:

$$\frac{\Delta T_{\text{ном}}}{\Delta T_{\text{раб}}} = \left( \frac{I_{\text{ном}}}{I_{\text{раб}}} \right)^2, \quad (1)$$

где  $\Delta T_{\text{ном}}$  – превышение температуры при  $I_{\text{ном}}$ ;  $\Delta T_{\text{раб}}$  – превышение температуры при рабочем токе нагрузки  $I_{\text{раб}}$ ;  $I_{\text{ном}}$  – номинальный ток электрооборудования;  $I_{\text{раб}}$  – рабочий ток на момент контроля;

сравнивают полученное значение с допустимыми температурами нагрева для указанных контролируемых узлов в соответствии установленными требованиями РД [1].

Если на момент проведения тепловизионного обследования ток нагрузки находится в диапазоне  $(0,3 \div 0,6)I_{\text{ном}}$ , количество тепла, выделяемое на контакте (контактном соединении), является незначительным и влияние таких факторов, как теплорассеяние, обдув, теплоизоляционные свойства изоляции и прочее, становится доминирующим. Поэтому использование формулы (1) может приводить к большим ошибкам. В этом случае вывод о наличии возможного дефекта контакта (контактного соединения) в соответствии с требованиями [1, 2] делается исходя из сравнения температур идентичных контактов (контактных соединений) различных участков цепи, т.е. таких участков, на которых все перечисленные факторы (обдув, теплорассеяние и т.п.) воздействуют одинаково (как правило, сравнение температур соседних фаз).

Оценка степени развития дефекта производится на основании сравнения избыточных температур (разниц температур превышения) в соответствии с соотношением:

$$\frac{\Delta T_{0,5}}{\Delta T_{\text{раб}}} = \left( \frac{0,5I_{\text{ном}}}{I_{\text{раб}}} \right)^2, \quad (2)$$

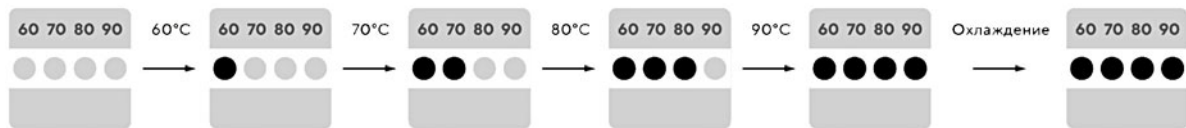
где  $\Delta T_{0,5}$  – избыточные температуры при  $0,5I_{\text{ном}}$ ;  $\Delta T_{\text{раб}}$  – превышение температуры при рабочем токе нагрузки  $I_{\text{раб}}$ ;  $I_{\text{ном}}$  – номинальный ток нагрузки электрооборудования;  $I_{\text{раб}}$  – рабочий ток на момент контроля.

Задача контроля контактов и контактных соединений – своевременное выявление 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.

Несмотря на эффективность применения тепловизоров для осуществления тепловизионной диагностики контактов и контактных соединений, данный метод является достаточно трудоёмким, требует применения специального оборудования и специально подготовленного персонала. Кроме того, не все участки электрической цепи и электроустановок являются доступными для проведения тепловизионного контроля, оценка состояния контакта (контактного соединения) производится по результатам оценки температуры, полученным только в момент выполнения измерений. При этом, в соответствии с требованиями РД “Объем и нормы испытаний электрооборудования” [1], периодичность проведения тепловизионного контроля для электрооборудования распределительных устройств на напряжение 35 кВ и ниже составляет 1 раз в 3 года, а на напряжение 110 – 220 кВ – 1 раз в 2 года.

В этой связи следует отметить, что периодичность проведения контроля состояния контактов и контактных соединений должна учитывать возможное время развития дефекта. Накопленный опыт эксплуатации и обобщение результатов проведения тепловизионных обследований показывает, что развитие дефектов контактов и контактных соединений до перехода в аварийный дефект может происходить быстрее, чем установленный срок периодичности тепловизионного контроля. При этом очевидно, что проведение данных работ с учащённой периодичностью ведёт к увеличению эксплуатационных затрат.

В последнее время в энергетических компаниях достаточно активно развивается применение термоиндикаторов для оценки состояния контактов и контактных соединений [3]. В то же время следует отметить рост предложений от предприятий-изготовителей как в нашей стране, так и за рубежом по видам и номенклатуре термоиндикаторов, в первую очередь термоиндикаторных наклеек. Вместе с тем, в настоящее время в системе действующих нормативно-технических документов отсутствуют какие-либо указания и методические рекомендации по оценке состояния контактов



**Рис. 1. Принцип работы необратимых многотемпературных термоиндикаторных наклеек**

и контактных соединений электрооборудования с применением термоиндикаторов.

Различают два типа термоиндикаторов: обратимые (изменяющие окраску только в нагретом состоянии и возвращающие исходный цвет при охлаждении) и необратимые (изменяющие окраску после превышения заданной температуры и сохраняющие её после охлаждения). Для целей оценки состояния контактов и контактных соединений при эксплуатации электроустановок (контроля факта превышения температуры) используются только необратимые термоиндикаторы плавления. Такие индикаторы выполнены в форме наклеек, покрытых плавким веществом преимущественно белого цвета. При достижении заданной температуры термочувствительное вещество расплавляется и впитывается в полимерное связующее. Это приводит к цветовому переходу: “белый” (исходное вещество) – “прозрачный” (твёрдый раствор термочувствительного вещества в полимере). В результате срабатывания белый цвет наклейки заменяется рисунком подложки, находящимся под термочувствительным материалом.

Необратимые термоиндикаторные наклейки могут быть выполнены в одностепенном и многотемпературном вариантах.

На рис. 1 представлен принцип работы многотемпературных термоиндикаторных наклеек.

Очевидны достоинства применения термоиндикаторов:

- непрерывный контроль температуры контакта (контактного соединения) без использования специальных средств измерений;

- контроль труднодоступных или недоступных для тепловизора элементов;

- возможность проведения визуального осмотра оперативным персоналом и оперативно-ремонтным персоналом при осмотрах электроустановок;

- выявление наличия и развития дефектов контактов и контактных соединений путём визуальной оценки срабатывания термоиндикатора (изменение цвета) или несрабатывания термоиндикатора (отсутствие изменения цвета);

- возможность сравнения теплового состояния контактов (контактных соединений) разных фаз электрооборудования при проведении визуального осмотра термоиндикаторов оперативным и оперативно-ремонтным персоналом.

В соответствии с п. 1.4 РД “Объём и нормы испытаний электрооборудования” [1], техническое состояние электрооборудования определяется не только путём сравнения результатов конкретных

испытаний с нормируемыми значениями, но и по совокупности результатов всех проведённых испытаний, осмотров и данных эксплуатации. При этом выход значений параметров за установленные границы (предельные значения) следует рассматривать как признак наличия дефектов, которые могут привести к отказу оборудования.

Как указывалось ранее, соответствующими ГОСТ и РД “Объём и нормы испытаний электрооборудования” [1] установлены допустимые температуры нагрева контактов и контактных соединений, значения которых различаются в зависимости от материала контакта (контактного соединения). Также [1] устанавливает наибольшие допустимые значения превышения температуры.

В табл. 1 приведены наибольшие допустимые значения температуры нагрева и температуры превышения для различных контактов и контактных соединений в соответствии с установленными требованиями.

Применение одностепенного термоиндикатора, наклеенного на соответствующий узел, при визуальном осмотре по факту его срабатывания (изменения цвета) позволяет однозначно установить факт достижения наибольшей допустимой температуры нагрева контакта (контактного соединения). При этом необходимо лишь подобрать термоиндикатор с соответствующей температурой срабатывания.

Из данных табл. 1 видно, что диапазон значений наибольших допустимых температур для контактов и контактных соединений в зависимости от применяемых материалов находится в пределах 75 – 120°C. Современные термоиндикаторы, предлагаемые предприятиями-изготовителями, имеют точность срабатывания заданной температуры  $\pm 2^\circ\text{C}$ , что является достаточным для констатации факта наличия дефекта контакта (контактного соединения) при их применении.

Как указывалось ранее, нагрев контакта (контактного соединения) в процессе эксплуатации обусловлен не только значением переходного сопротивления, которое может увеличиваться в процессе эксплуатации из-за воздействия различных факторов, но также зависит от протекающего тока нагрузки. Очевидно, что ток нагрузки электроустановки в процессе эксплуатации может меняться, а наибольший нагрев контакта (контактного соединения) будет происходить при максимальном токе нагрузки.

Таким образом, применение термоиндикаторов для фиксации факта достижения контактом (контактным соединением) наибольшего допустимого значения температуры в процессе эксплуатации электроустановки имеет несомненные преимущества по сравнению с тепловизором, а именно:

*термоиндикатор* фиксирует и “запоминает” достижение максимальной установленной температуры в любой момент эксплуатации (если она достигалась), и, в силу необратимости термоиндикатора, при визуальном осмотре электроустановки данный факт будет зафиксирован;

*тепловизор* обнаружит факт наличия достижения максимальной температуры нагрева лишь в том случае, если на момент измерений ток нагрузки будет максимальным. В противном случае, оценку возможности достижения контактом (контактным соединением) наибольшей допустимой температуры можно провести только расчётным путём с применением соотношений (1) или (2) в зависимости от тока нагрузки в момент измерений.

Преимущество необратимых многотемпературных термоиндикаторов заключается в том, что они позволяют определить не только факт достижения одной установленной наибольшей допустимой температуры, но и зафиксировать определённый диапазон температур, до которого нагревался контакт (контактное соединение) в период между осмотрами, по факту срабатывания. Тер-

моиндикаторы также позволяют оценить, что температура контакта (контактного соединения) не достигала определённых установленных значений за весь период эксплуатации электроустановки до её осмотра, в том числе при любых значениях тока нагрузки который мог меняться в процессе эксплуатации. При этом фиксация срабатывания термоиндикаторной наклейки сохраняется постоянно.

В соответствии с требованиями п. 499 Правил технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации [4] 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.

Применение термоиндикаторов позволяет проводить оценку теплового состояния контактов (контактных соединений), в том числе в недоступных для тепловизионного обследования местах при осмотре контактов (контактных соединений),

**Т а б л и ц а 1**

**Допустимые температуры нагрева**

Контролируемые узлы	Наибольшее допустимое значение	
	температуры нагрева, °С	превышения температуры, °С
Контакты из меди и медных сплавов: без покрытий, в воздухе с накладными серебряными пластинами, в воздухе с покрытием серебром или никелем, в воздухе с покрытием серебром толщиной не менее 24 мкм с покрытием оловом, в воздухе	75	35
	120	80
	105	65
	120	80
	90	50
Аппаратные выводы из меди, алюминия и их сплавов, предназначенные для соединения с внешними проводниками электрических цепей: без покрытия с покрытием оловом, серебром или никелем	90	50
	105	65
Болтовые контактные соединения из меди, алюминия и их сплавов: без покрытия, в воздухе с покрытием оловом, в воздухе с покрытием серебром или никелем, в воздухе	90	50
	105	65
	115	75
Предохранители переменного тока на напряжение 3 кВ и выше: соединения из меди, алюминия и их сплавов в воздухе без покрытий/с покрытием оловом: с разъемным контактным соединением, осуществляемым пружинами с разборным соединением (нажатие болтами или винтами), в том числе выводы предохранителя металлические части, используемые как пружины из меди из фосфористой бронзы и аналогичных сплавов	75/95	35/55
	90/105	50/65
	75	35
	105	65

проведении работ по техническому обслуживанию и ремонту оборудования, проводимых в соответствии с требованиями Правил организации технического обслуживания и ремонтов объектов энергетики [5].

Как указывалось, при выполнении тепловизионной диагностики контактов и контактных соединений с использованием тепловизора, чтобы сделать вывод о наличии развивающегося дефекта, недостаточно только информации о зафиксированном значении температуры нагрева контакта (контактного соединения). Методология тепловизионного контроля контактов и контактных соединений, установленная в соответствии с РД [1], 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 соединений), которые на момент проведения измерений имеют температуру нагрева ниже установленной наибольшей допустимой, но при увеличении тока нагрузки электроустановки могут достичь установленных наибольших допустимых значений. Для этого применяются соответствующие расчётные соотношения (1) или (2) в зависимости от значений тока нагрузки на момент проведения измерений. Кроме того, для диагностирования состояния контактов (контактных соединений) при проведении тепловизионного обследования необходимо учитывать температуру окружающего воздуха, так как очевидно, что один и тот же контакт будет иметь разную температуру нагрева при разной температуре окружающего воздуха.

Выбор температурного диапазона срабатывания многотемпературного термоиндикатора, а также методика оценки состояния контакта (контактного соединения) при срабатывании индикатора (при изменении окраски на соответствующем температурном диапазоне) являются неотъемлемыми элементами для возможности оценки состояния контакта (контактного соединения) при визуальном осмотре термоиндикатора.

Для оценки состояния контактов и контактных соединений необходимо минимально контролировать две температуры: нижнюю, недостижение которой должно свидетельствовать об исправном состоянии контакта (контактного соединения), и

верхнюю, соответствующую наличию аварийного состояния контакта (контактного соединения), которая определяется наибольшей допустимой температурой нагрева.

Отсутствие срабатывания нижнего порогового значения термоиндикатора должно свидетельствовать об отсутствии развития дефекта контакта (контактного соединения), а именно, что при увеличении нагрузки электроустановки вплоть до номинальной, контакт (контактное соединение) не должен переходить в аварийное состояние. Для оценки такой пороговой температуры, свидетельствующей об отсутствии развития дефекта контакта (контактного соединения), целесообразно использовать критерии оценки для обнаружения развития дефектов по значениям превышения температуры и по значениям избыточной температуры, приведённым в РД [1].

В результате преобразований соотношения (1) получена зависимость для расчёта температуры контакта (контактного соединения), позволяющая оценить развитие аварийного дефекта контакта (контактного соединения)  $T_d$  по температуре превышения для  $I_{\text{раб}} \geq 0,6I_{\text{ном}}$ :

$$T_d > T_{\text{окр}} + T_{\text{прев. ном}} \left( \frac{I_{\text{раб}}}{I_{\text{ном}}} \right)^2, \quad (3)$$

где  $T_{\text{окр}}$  – температура окружающего воздуха;  $T_{\text{прев. ном}}$  – нормированное наибольшее допустимое значение температуры превышения при номинальном токе нагрузки в соответствии с табл. 1;  $I_{\text{ном}}$  – номинальный ток нагрузки;  $I_{\text{раб}}$  – рабочий ток нагрузки.

Выполненные расчёты с использованием зависимости (3) показывают, что температура контактов (контактных соединений), имеющих развивающийся дефект, оцениваемая по установленным наибольшим допустимым значениям превышения температуры при токах нагрузки более  $0,6I_{\text{ном}}$  при максимальной температуре окружающего воздуха  $40^\circ\text{C}$  (что характерно для большинства эксплуатируемых электроустановок) для контактов (контактных соединений) в соответствии с табл. 1, превышает  $52^\circ\text{C}$ . Таким образом, недостижение контактом (контактным соединением) температуры нагрева, равной значению  $T_d$ , можно считать, как правило, достаточным критерием для оценки

**Т а б л и ц а 2**

**Определение степени развития дефектов по избыточной температуре**

Степень развития дефекта по избыточной температуре	Избыточная температура (разница температур превышения) при различных токах нагрузки, °C				
	$I = 0,3I_{\text{ном}}$	$I = 0,35I_{\text{ном}}$	$I = 0,4I_{\text{ном}}$	$I = 0,45I_{\text{ном}}$	$I = 0,5I_{\text{ном}}$
Начальная степень неисправности	2 – 4	2 – 5	3 – 6	4 – 8	5 – 10
Развившийся дефект	4 – 11	5 – 15	6 – 19	8 – 24	10 – 30
Аварийный дефект	Более 11	Более 15	Более 19	Более 24	Более 30

отсутствия развития дефекта контакта (контактного соединения), что также подтверждается накопленным опытом эксплуатации.

Следует отметить, что приведённые в табл. 1 значения допустимых температур для различных видов контактов (контактных соединений) показывают, что диапазон наибольших допустимых значений температур нагрева лежит в диапазоне 75 – 120°C, а соответствующее наибольшее допустимое значение превышения температур – в диапазоне 35 – 80°C. При этом для каждого конкретного вида контакта (контактного соединения), как следует из данных табл. 1, наибольшее допустимое значение превышения температуры на 40°C ниже наибольшего допустимого значения температуры нагрева контакта (контактного соединения).

В соответствии с расчётами, выполненными на основании зависимости (3), диапазон температур контактов (контактных соединений), имеющих развивающийся дефект, оцениваемый по установленным наибольшим допустимым значениям превышения температуры при токах нагрузки более  $0,6I_{\text{ном}}$ , составляет 52 – 69°C.

Таким образом, в зависимости от вида контакта (контактного соединения) диапазон нижней температуры срабатывания термоиндикатора с точностью срабатывания заданной температуры  $\pm 2^\circ\text{C}$ , что является достаточным для констатации факта наличия развития дефекта контакта (контактного соединения), целесообразно определить в диапазоне 50 – 70°C. Поскольку значения верхней и нижней контролируемой температуры для контакта (контактного соединения) значительно различаются, целесообразно контролировать промежуточные значения температур, позволяющие оценить степень развития дефекта, а также динамику развития дефекта во времени.

На основании проведённого анализа и накопленного опыта эксплуатации термоиндикаторов, представляется наиболее целесообразным проводить контроль состояния контактов (контактных соединений) по четырём температурам. Также стоит отметить, что предлагаемые разными предприятиями-изготовителями термоиндикаторы с четырьмя температурами срабатывания изготавливаются и предлагаются в различных вариантах исполнения.

Результаты проведённых исследований и обобщение опыта эксплуатации по тепловому контролю состояния контактов и контактных соединений позволяют оптимизировать выбор контролируемых диапазонов температур при применении термоиндикаторов в зависимости от установленных значений наибольшей допустимой температуры нагрева при токе нагрузке  $I > 0,5I_{\text{ном}}$ .

Значения контролируемых с помощью термоиндикатора температур контактов (контактных соединений) в зависимости от наибольшей допустимой температуры нагрева приведены далее.

Наибольшая допустимая температура нагрева, °C	Контролируемые термоиндикатором температуры, °C
80	50 – 60 – 70 – 80
85	60 – 70 – 80 – 90
90	
95	60 – 70 – 80 – 100
100	
105	60 – 80 – 90 – 110
110	
115	70 – 90 – 100 – 120
120	

В соответствии с рекомендациями РД [1], оценка теплового состояния контактов и контактных соединений в зависимости от условий работы электроустановки может производиться не только по превышению наибольшего допустимого значения температуры нагрева и значениям превышения температуры контролируемого узла, но и путём сравнения измеренных значений температуры с температурой аналогичных узлов других фаз, находящихся в одинаковых условиях. При этом, как уже отмечалось, в соответствии с [1], при эксплуатации электроустановки при токах нагрузки  $(0,3 \div 0,6)I_{\text{ном}}$  оценка наличия и развития дефекта контакта (контактного соединения) может быть определена расчётным путём по избыточной температуре с использованием зависимости (2).

Выполненный анализ установленных в [1] критериев оценки состояния контактов и контактных соединений по избыточной температуре с применением зависимости (2) позволяет определить значения избыточных температур для определения степени развития дефектов при различных токах нагрузки (табл. 2).

Проведённый анализ позволяет определить зависимость для расчёта температуры контакта (контактного соединения), имеющего аварийный дефект, по избыточной температуре для  $I_{\text{раб}} = (0,3 \div 0,5)I_{\text{ном}}$ :

$$T_{\text{авар}} > T_{\text{окр}} + 30 \left( \frac{I_{\text{раб}}}{0,5I_{\text{ном}}} \right)^2, \quad (4)$$

где  $T_{\text{авар}}$  – температура контакта (контактного соединения), имеющего аварийный дефект;  $T_{\text{окр}}$  – температура окружающего воздуха;  $I_{\text{ном}}$  – номинальный ток нагрузки;  $I_{\text{раб}}$  – рабочий ток нагрузки.

В выражении (4) принимается, что температура исправного контакта равна температуре окружающего воздуха (учитывая, что в данном случае рассматривается  $I_{\text{раб}} \leq 0,5I_{\text{ном}}$ ), а коэффициент 30 соответствует минимальному значению избыточной температуры аварийного дефекта контакта (контактного соединения) 30°C при токе нагрузке  $0,5I_{\text{ном}}$  согласно РД [1].

Из анализа зависимости (4) следует, что минимальная температура аварийных контактов или

контактных соединений при токах нагрузки  $I_{\text{раб}} = (0,3 \div 0,5)I_{\text{ном}}$  и максимальной температуре окружающего воздуха 40°C (что характерно для большинства эксплуатируемых электроустановок) для применяемых контактов (контактных соединений) превышает 50°C.

Следует обратить внимание на то, что значение избыточной температуры более 30°C, которое может указывать на развитие аварийного дефекта в соответствии с [1], носит оценочный характер и не имеет достаточного обоснования, что отмечается на основе накопленного опыта эксплуатации по результатам отбраковки контактов по данному критерию. В настоящее время в разработанном Минэнерго России проекте Требований к обеспечению надёжности электроэнергетических систем, надёжности и безопасности объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок “Требования к объёму и нормам испытаний электрооборудования”, прошедшего публичные обсуждения [6], предлагаются изменённые критерии при оценке состояния контактов и контактных соединений по избыточной температуре и токе нагрузки  $0,5I_{\text{ном}}$ , а именно:

избыточная температура до 30°C – начальная степень неисправности;

избыточная температура более 30°C – развившийся дефект.

При этом указывается, что о наличии аварийного дефекта свидетельствует достижение установленных наибольших допустимых значений температуры нагрева контактов (контактных соединений) или достижение наибольшего допусти-

мого значения превышения температуры. Вместе с тем установленные значения указанных допустимых температур нагрева повторяют значения, указанные в действующем в настоящее время РД “Объём и нормы испытаний электрооборудования” [1].

Результаты проведённых исследований и накопленный опыт эксплуатации и применения термоиндикаторов для контроля состояния контактов и контактных соединений электроустановок позволяет построить методологию оценки состояния контактов (контактных соединений) по результатам визуальной оценки состояния термоиндикаторов (табл. 3).

При оценке состояния контактов (контактных соединений) по результатам визуального осмотра термоиндикаторов нужно отметить:

температура срабатывания верхнего порогового значения термоиндикатора должна соответствовать установленной наибольшей допустимой температуре нагрева контакта (контактного соединения);

наличие срабатывания всех пороговых значений термоиндикатора однозначно свидетельствует о наличии аварийного дефекта контакта (контактного соединения), так как максимальное (четвёртое) пороговое значение срабатывания термоиндикатора свидетельствует о достижении установленной наибольшей температуры нагрева;

при визуальном осмотре термоиндикаторов целесообразно проводить сравнение состояния термоиндикаторов с соседними фазами;

при срабатывании термоиндикатора в 1–3 диапазоне температур при наличии данных о мак-

**Т а б л и ц а 3**

**Оценка состояния контактов и контактных соединений при применении термоиндикаторов**

Состояние термоиндикатора*	$I_{\text{макс}} < 0,5I_{\text{ном}}$	$I_{\text{макс}} = (0,5 \div 0,75)I_{\text{ном}}$	$I_{\text{макс}} = (0,75 \div 0,9)I_{\text{ном}}$	$I_{\text{макс}} > 0,9I_{\text{ном}}$
	Отсутствие дефекта			
	Развившийся дефект	Начальная степень развития дефекта		
	Развившийся дефект		Начальная степень развития дефекта	
	Развившийся дефект			Начальная степень развития дефекта
	Аварийный дефект (достижение наибольшей допустимой температуры нагрева)			

\* Диапазон температур срабатывания термоиндикатора выбирается в зависимости от установленной наибольшей допустимой температуры нагрева контакта (контактного соединения) в соответствии с данными, приведёнными ранее.



**Рис. 2. Примеры установки и срабатывания термоиндикаторов**

симальной нагрузке и максимальной температуре окружающего воздуха в период до предыдущего осмотра возможно получить численную оценку степени развития дефекта с применением зависимости (1), а при необходимости провести внеочередной контроль с помощью тепловизора.

Следует также отметить, что максимальный нагрев контакта (контактного соединения) будет происходить при максимальной нагрузке электроустановки и максимальной температуре окружающего воздуха. В этой связи подчеркнем, что термоиндикатор за счёт непрерывности контроля теплового состояния и необратимости срабатывания позволяет при визуальном осмотре зафиксировать факт достижения установленных пороговых значений, которые достигались в любой момент до предыдущего осмотра. Это является одним из значимых факторов целесообразности и эффективности применения термоиндикаторов для контроля состояния контактов и контактных соединений, так как оценка состояния контактов (контактных соединений) с использованием тепловизоров производится по результатам измерения температур только на момент обследования.

На рис. 2 приведены примеры установки и срабатывания термоиндикаторов для контроля состояния контактов (контактных соединений) электроустановок.

## Выводы

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

2. Тепловой контроль контактов и контактных соединений с применением термоиндикаторных наклеек позволяет осуществлять контроль их состояния без использования специальных средств измерений, при этом реализовывать методологию оценки состояния контактов и контактных соединений в соответствии с требованиями РД 34.15-51.300-97 «Объём и нормы испытаний электрооборудования».

3. Применение термоиндикаторов позволяет обеспечить эффективный контроль состояния контактов и контактных соединений за счёт непрерывного контроля теплового состояния и наличия необратимости срабатывания установленных пороговых значений, определяемых по результатам визуального осмотра.

## Список литературы

1. *Объём и нормы испытаний электрооборудования* [Текст]: РД 34.45-51.300 – 97. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 1998.
2. *Основные положения методики инфракрасной диагностики электрооборудования и ВЛ* [Текст]: РД 153-34.0-20.363-99. – М.: РАО «ЕЭС России», 1999.
3. *Иноземцев, В. Е.* Оценка состояния контактов и контактных соединений электрооборудования и ЛЭП с применением термоиндикаторов [Текст] / В. Е. Иноземцев, М. Ю. Львов, А. В. Лесив // *Электроэнергия. Передача и распределение.* – 2022. – № 5 (74). – С. 102 – 108.
4. *Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации* [Текст]: утв. приказом Минэнерго России от 4.10.2022 № 1070.
5. *Правила организации технического обслуживания и ремонта объектов электроэнергетики* [Текст]: утв. приказом Минэнерго России от 25.10.2017 № 1013.
6. *Требования к обеспечению надёжности электроэнергетических систем, надёжности и безопасности объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок «Требования к объёму и нормам испытаний электрооборудования» (проект)* [Электронный ресурс]. – (<https://regulation.gov.ru/projects#npa=113525>).