

УДК 621.315.54
 Шифр специальности ВАК 2.4.3, 2.4.2.

КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ КОНТАКТОВ И КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

В статье рассматриваются методологические и методические вопросы контроля состояния контактов и контактных соединений (далее — КС) при эксплуатации электроустановок. Выполнен анализ нормативных требований по тепловому контролю состояния контактов и КС. Проведен анализ применения тепловизионного контроля и термоиндикаторного контроля для оценки состояния контактов и КС при эксплуатации электроустановок.

АВТОРЫ:

М.Ю. Львов, д. т. н.,
 АО «ОЭК», LvovMY@uneco.ru

Ю.Н. Львов, д. т. н.,
 Н.Л. Новиков, д. т. н.,
 АО «Россети Научно-технический центр»

А.В. Лесив,
 Е.Е. Серебрянников, к. ф.-м. н.,
 ООО «ТермоЭлектрика»

Введение

Одним из актуальных вопросов обеспечения надежности при эксплуатации электроустановок распределительных электрических сетей является контроль состояния контактов и КС электрооборудования и ЛЭП. Своевременное выявление развития дефектов контактов и КС в процессе эксплуатации позволяет предотвратить развитие аварийных ситуаций, которые могут приводить к повреждению оборудования, возгораниям и пожарам.

Состояние контактов и КС в процессе эксплуатации электроустановок в значительной степени определяется значением переходного контактного сопротивления. В процессе эксплуатации под влиянием различных факторов возможно увеличение переходного контактного сопротивления в силу ряда причин:

- ослабление нажима и уменьшение площади контактирования;
- возникновение на контакте оксидной пленки или нагара;
- разрушение поверхности металла из-за агрессивного воздействия химических веществ, электрохимического окисления и пр.

Увеличение переходного сопротивления приводит к повышенному на-

греву контакта (КС) при прохождении через него электрического тока. При этом нагрев выше установленных допустимых температур приводит к оплавлению и отгоранию контакта (КС), повреждению изоляции, возгораниям и пожарам в электроустановках.

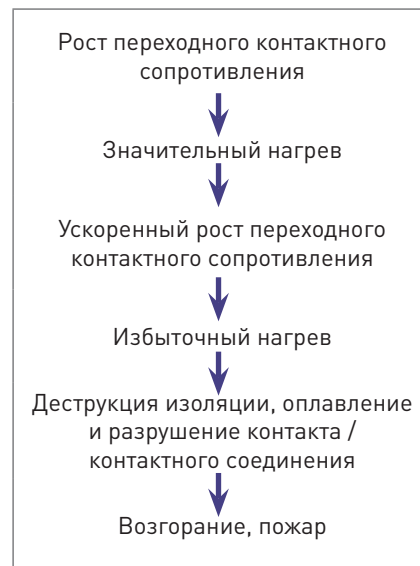
На рисунке 1 приведена диаграмма развития повреждения контакта (КС) в процессе эксплуатации электроустановок.

Требования к контактам и КС при проектировании и производстве электро-технического оборудования и электротехнических устройств приведены в соответствующих ГОСТах. Правила приемки и методики испытаний КС установлены в ГОСТ 17441-84 [1].

При эксплуатации электроустановок задача контроля состояния контактов и КС заключается в своевременном выявлении их дефектов, которые могут привести к повреждению оборудования. В соответствии с требованиями РД «Объем и нормы испытаний электрооборудования» [2] прямой замер переходного контактного сопротивления при эксплуатации электроустановок производится только для болтовых КС неизолированных проводов ВЛ напряжением 35 кВ и выше, а также для шин и то-

ДИАГРАММА РАЗВИТИЯ ПОВРЕЖДЕНИЯ КОНТАКТА (КС) В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

Рис. 1



копроводов на номинальный ток 1000 А и более, КС шин ОРУ напряжением 35 кВ и выше.

Нормативные требования по контролю состояния контактов и КС

Предельные значения температур нагрева для различных контактов и КС приведены в различных ГОСТах и РД «Объем и нормы испытаний электрооборудования» [2]. Наибольшие допустимые значения температуры нагрева отличаются для различных материалов и видов контактов и КС. В таблице 1 систематизированы требования нормативных документов в части установленных наибольших допустимых значений температур нагрева для различных контактов и КС, применяемых в электрооборудовании и ЛЭП, находящихся при эксплуатации в воздушной среде.

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

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

Основным методом контроля состояния контактов и КС в процессе эксплуатации электроустановок является тепловой контроль. К достоинствам теплового контроля следует отнести возможность выявления дефектов контактов и КС без отключения оборудования и ЛЭП.

Физическое объяснение нагрева контакта (КС) под действием электрического тока заключается в том, что электроны, упорядоченно двигаясь под действием электрического поля в проводнике, сталкиваются с атомами металла и передают им часть своей кинетической энергии, которая трансформируется в тепло. Количество выделяемого проводником тепла Q на рассматриваемом участке цепи за время t подчиняется закону Джоуля — Ленца, который дает количественную оценку теплового действия электрического тока:

$$Q = I^2 R t \tag{1}$$

Формула (1) является интегральным представлением закона Джоуля — Ленца и справедлива при постоянной силе тока и однородном по длине проводника сопротивлении, которое также не изменяется во времени. Нагрев участка цепи при прохождении по нему электрического тока будет продолжаться до тех пор, пока выделяемое тепло в единицу времени не сравняется со скоростью теплоотдачи, которая может быть описана с помощью эмпирического закона Ньютона — Рихмана:

$$C(dT/dt) = a(T - T_{окр.}), \tag{2}$$

где C — полная теплоемкость проводника;

T — температура проводника;

$T_{окр.}$ — температура окружающей среды.

a — эмпирический коэффициент теплоотдачи со всей поверхности проводника.

Формула (2) справедлива, если внутренняя теплопроводность намного больше, чем коэффициент теплоотдачи, внутри и на поверхности устанавливается почти однородная температура.

Равенство скорости нагрева и скорости теплоотдачи

$$dQ/dt = C(dT/dt)$$

приводит к установлению стационарной температуры проводника T , которая подчиняется соотношению:

$$I^2 R = a(T - T_{окр.}). \tag{3}$$

Из соотношения (3) следует, что превышение температуры проводника над температурой окружающей среды прямо пропорционально квадрату силы тока. То есть отношение квадрата силы тока I_1 к квадрату I_2 будет пропорционально отношению превышений температуры участка цепи при прохождении по нему этих токов:

$$I_1^2 / I_2^2 = (T_1 - T_{окр.}) / (T_2 - T_{окр.}). \tag{4}$$

Данное соотношение является ключевым для методов теплового контроля, так как позволяет рассчитать температуру нагрева контакта (КС) при значении силы тока, отличном от того, при котором было произведено измерение температуры.

В соответствии с [2] предусмотрен тепловизионный контроль контактов и КС электрооборудования и ЛЭП. Для осуществления тепловизионного

Ключевые слова:
 #контакт; #контактное соединение; #тепловой контроль; #тепловизионный контроль; #термоиндикаторный контроль.

ДОПУСТИМЫЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА КОНТАКТОВ И КС ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ КЛАССА НАПРЯЖЕНИЯ ВЫШЕ 1000 В

Таблица 1

п/п	Элементы (узлы) ЭУ	Наибольшее допустимое (предельное) значение		Нормативный документ, устанавливающий значения температур*
		Наибольшая допустимая температура нагрева, °С	Превышение температуры, °С (ΔТ ном)	
1.	Контакты из меди и медных сплавов коммутационных аппаратов, в т. ч.: втычные контакты выкатных элементов ячеек КРУ и КТП (выкатные выключатели, выкатные предохранители, выкатные ТН, выкатные ТСН, выкатные разъединители), внутренние контакты выключателей:			ГОСТ 8024-90
	- Без покрытия	75	35	
	- С накладными серебряными пластинами	120	80	
	- С покрытием серебром или никелем	105	65	
	- С покрытием серебром толщиной не менее 24 мкм, стыковые	120	80	
- С покрытием оловом	90	50		
2.	КС аппаратных выводов электрооборудования (на аппаратных зажимах) из меди, алюминия и их сплавов, предназначенные для соединения с внешними проводниками электрических цепей:			ГОСТ 8024-90; РД 34.45-51.300-97
	- Без покрытия	90	50	
- С покрытием оловом, серебром или никелем	105	65		
3.	КС (кроме сварных и паяных) сборных и соединительных шин в различных узлах, шин с выводами аппаратов, аппаратных выводов электрооборудования с внешними проводниками электрических цепей, выключателей (в узлах согласно таблице Д.2), воздушных проводов (неизолированных и изолированных):			ГОСТ 8024-90; РД 34.45-51.300-97
	- Из меди, алюминия и их сплавов:			
	- без покрытий;	90	50	
	- с покрытием оловом;	105	65	
	- с покрытием серебром или никелем	115	75	
- Из алюминия и его сплавов с покрытием серебром или никелем	115	75		
4.	КС из меди и ее сплавов на аппаратных зажимах вводов конденсаторного типа, вводов с твердой изоляцией 110–220 кВ, предназначенных для трансформаторов (автотрансформаторов), реакторов, масляных выключателей, линейных вводов, а также трансформаторных вводов с твердой изоляцией на номинальное напряжение 110 кВ:			ГОСТ 10693-81
	- Без покрытия оловом	80	45	
	- С покрытием оловом	100	65	
5.	Контакты и КС предохранителей переменного тока на напряжение 6 кВ и выше			ГОСТ 2213-79 РД 34.45-51.300-97
	- Пружинные контакты из меди и медных сплавов:			
	- без покрытия;	75	35	
	- с покрытием серебром или никелем;	105	65	
	- с покрытием оловом	95	55	
	- КС (в т. ч. нажатие болтами или винтами) из меди, алюминия и их сплавов, включая выводы предохранителя:			
	- без покрытия;	90	50	
	- с покрытием серебром или никелем;	115	75	
	- с покрытием оловом	105	65	
	- Металлические части, используемые как пружины:			
- из меди;	75	35		
- из фосфористой бронзы и аналогичных ей сплавов	105	65		

* Примечание:
 – ГОСТ 8024-90. Аппараты и электротехнические устройства переменного тока на напряжение свыше 1000 В. Москва: Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам, 1990.
 – ГОСТ 10693-81. Вводы конденсаторные герметичные на номинальные напряжения 110 кВ и выше. Общие технические условия. Москва: Государственный комитет СССР по стандартам, 1989.
 – ГОСТ 2213-79. Предохранители переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие технические условия. Москва: Издательство стандартов, 1979.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДОПУСТИМЫХ ТЕМПЕРАТУР НАГРЕВА ДЛЯ КОНТАКТОВ (КС) ТОКОВЕДУЩИХ ЧАСТЕЙ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК КЛАССА НАПРЯЖЕНИЯ ВЫШЕ 1000 ВОЛЬТ В РАЗНЫХ СТРАНАХ

Таблица 2

Элементы (узлы) ЭУ	Наибольшая допустимая температура нагрева, °С		
	Россия	Страны Европы	США
Контакты из меди и медных сплавов коммутационных аппаратов:			
без покрытия в воздухе	75 ^(a)	75 ^(e)	75 ^(f)
с накладными серебряными пластинами в воздухе	120 ^(a)	---	---
с покрытием серебром или никелем в воздухе	105 ^(a)	105 ^(e)	105 ^(f)
с покрытием серебром толщиной не менее 24 мкм в воздухе	120 ^(a)	---	---
с покрытием оловом в воздухе	90 ^(a)	90 ^(e)	105 ^(f)
Контактные соединения аппаратных выводов электрооборудования (на аппаратных зажимах) из меди, алюминия и их сплавов, предназначенные для соединения с внешними проводниками электрических цепей:			
без покрытия	90 ^(a, b)	90 ^(e)	90 ^(f)
с покрытием оловом, серебром или никелем	105 ^(a, b)	105 ^(e)	105 ^(f)
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:			
из меди, алюминия и их сплавов:			
без покрытий	90 ^(a, b)	90 ^(e)	90 ^(f)
с покрытием оловом	105 ^(a, b)	105 ^(e)	105 ^(f)
с покрытием серебром или никелем	115 ^(a, b)	115 ^(e)	115 ^(f)
из алюминия и его сплавов с покрытием серебром или никелем	115 ^(a, b)	---	105 ^(f)

Обозначения:
 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.

– по температуре превышения, при токах нагрузки $(0,6-1)I_{ном}$;
 – по избыточной температуре, при токах нагрузки $(0,3-0,6)I_{ном}$.
 При этом определено: температура превышения (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. Также указывается, что тепловизионный контроль электрооборудования и токоведущих частей

контроля контактов и КС применяются тепловизоры. В ПАО «Россети» с 2017 года действует стандарт организации СТО 34.01-23.1-001-2017 [3], в котором требования по проведению тепловизионного контроля контактов и КС повторяют требования [2].

Тепловизионный контроль позволяет определять температуру нагрева контактов (КС) на момент проведения измерений. При обнаружении факта достижения наибольшего допустимого значения температуры нагрева контакта (КС) в соответствии с требованиями [2] следует констатировать наличие аварийного дефекта контакта (КС), что соответственно требует принятия мер по его устранению. Максимальный нагрев контакта (КС) будет происходить при максимальной нагрузке электроустановки и максимальной температуре окружающего воздуха. Поскольку значения нагрузочного тока и температуры окружающей среды меняются при эксплуатации электроустановки, эти параметры должны обязательно учитываться при проведении тепловизионного контроля.

Методология тепловизионного контроля, установленная в соответствии с [2, 3], подразумевает не только выявление на момент проведения тепловизионного контроля контактов и КС, которые имеют температуру нагрева выше установленной наибольшей допустимой, но и выявление контактов и КС, 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 (КС) применяются соответствующие методики оценки их состояния в зависимости от номинального тока нагрузки ($I_{ном}$) на момент измерений, а именно:

КРИТЕРИИ НАЛИЧИЯ ДЕФЕКТОВ КОНТАКТОВ И КС ДЛЯ МЕТОДОВ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРЕВЫШЕНИЯ И ИЗБЫТОЧНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРИ ТЕПЛОВИЗИОННОМ КОНТРОЛЕ В РАЗЛИЧНЫХ СТРАНАХ

Таблица 3

Используемые методики	Standard ANSI/NETA MTS		Standard for Infrared Inspection of Electrical Systems & Rotating Equipment		Standard MIL-STD-2194(SH)	Electrical Power Equipment Maintenance and Testing (Paul Gill)	Standard for Electrical Equipment Maintenance NFPA 70B	РД 34.45-51.300-97 Объем и нормы испытаний электрооборудования		РД 153-34.0-20.363-99 Основные положения методики инфракрасной диагностики электрооборудования и ЛЭП	
	США, Канада, страны Европы, страны Латинской Америки		США		США	Международный справочник	США, страны Латинской Америки	Российская Федерация		Российская Федерация	
	Температура превышения не зависит от тока нагрузки	Избыточная температура не зависит от тока нагрузки	Температура превышения, приведенная к I _{ном}	Избыточная температура, приведенная к I _{ном}	Температура превышения не зависит от тока нагрузки	Температура превышения не зависит от тока нагрузки или приведенная к I _{ном}	Избыточная температура не зависит от тока нагрузки	Температура превышения, приведенная к I _{ном}	Избыточная температура, приведенная к 0,5I _{ном}	Температура превышения, приведенная к I _{ном}	Избыточная температура, приведенная к 0,5I _{ном}
Профилактические меры должны быть приняты во время следующего технического обслуживания	1 °С – 10 °С	1 °С – 3 °С	1 °С – 10 °С	1 °С – 3 °С	10 °С – 25 °С	0 °С – 10 °С	1 °С – 3 °С	---	---	---	---
Требуются профилактические меры по запланированному графику / держать под контролем	11 °С – 20 °С	4 °С – 15 °С	11 °С – 20 °С	4 °С – 15 °С	25 °С – 40 °С	10 °С – 20 °С	4 °С – 15 °С	---	5 °С – 10 °С	10 °С – 20 °С	5 °С – 10 °С
Профилактические меры требуются в ближайшее время / как можно скорее	21 °С – 40 °С	---	21 °С – 40 °С	---	40 °С – 70 °С	20 °С – 40 °С	---	---	10 °С – 30 °С	20 °С – 40 °С	10 °С – 30 °С
Профилактические меры требуются немедленно (аварийный дефект)	> 40 °С	> 15 °С	> 40 °С	> 15 °С	> 70 °С	> 40 °С	> 15 °С	35 °С – 80 °С в зависимости от типа контакта / контактного соединения	> 30 °С	≥ 40 °С	> 30 °С

при токах нагрузки 0,3I_{ном} и ниже не способствует выявлению дефектов.

Таким образом, методология оценки состояния контактов и КС с применением тепловизора предполагает следующую последовательность действий:

1. Определение температуры нагрева контакта (контактного соединения).

- Измерение силы тока в цепи на момент проведения тепловизионного контроля для расчета отношения рабочего тока нагрузки электрооборудования к номинальному (I_{раб}/I_{ном}).
- В зависимости от значений тока нагрузки на момент проведения измерений оценка теплового состояния контакта (КС) осуществляется расчетным путем по температуре превышения, либо по избыточной температуре.

Если на момент проведения тепловизионного контроля ток нагрузки превышает 0,6I_{ном}, то вычисляют температуру превышения и осуществляют пересчет превышения измеренного значения температуры к нормируемому при номинальной нагрузке, исходя из соотношения:

$$\Delta T_{ном} / \Delta T_{раб} = (I_{ном} / I_{раб})^2, \quad (5)$$

где ΔT_{ном} — превышение температуры при I_{ном};

ΔT_{раб} — превышение температуры при рабочем токе нагрузки I_{раб}.

Полученное значение превышения температуры ΔT_{ном} сравнивают с наибольшим допустимым значением превышения температуры.

Если на момент проведения тепловизионного контроля ток нагрузки находится в диапазоне (0,3 – 0,6)I_{ном}, оценка степени развития дефекта производится по избыточной температуре. В качестве норматива используется значение избыточной температуры, пересчитанное на 0,5I_{ном}. Для пересчета используется следующее соотношение:

$$\Delta T_{0,5} / \Delta T_{раб} = (0,5I_{ном} / I_{раб})^2, \quad (6)$$

где ΔT_{0,5} — избыточная температура при токе нагрузки 0,5I_{ном};

ΔT_{раб} — избыточная температура при рабочем токе нагрузки I_{раб}.

В этом случае вывод о наличии возможного дефекта контакта (контактного соединения) делается, исходя из сравнения температур идентичных контактов (КС) различных участков цепи, на которых условно считается, что все вышеперечисленные факторы (обдув, теплорассеяние и т.п.) воздействуют одинаково (как правило, сравнение температур соседних фаз). В качестве критериев для оценки состояния контактов и КС установлены следующие диапазоны значений избыточной температуры [2, 3]: (5–10) °С — начальная степень неисправности; (10–30) °С — развившийся дефект; более 30 °С — аварийный дефект.

В таблице 3 приведены результаты сравнительного анализа требований, применяемых в различных странах, для оценки состояния контактов и КС по результатам тепловизионного контроля и критерии оценки состояния по избыточной температуре и по температуре превышения.

КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ КОНТАКТОВ И КС ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ТЕПЛОВИЗИОННОГО КОНТРОЛЯ

Таблица 4

РД 34.45-51.300-97 «Объем и нормы испытаний электрооборудования» [2]	«Требования к объему и нормам испытаний электрооборудования» (проект) [4]
I _{нагрузки} = (0,6–1)I _{ном} — оценка по температуре превышения	I _{нагрузки} = (0,6–1)I _{ном} — оценка по температуре превышения
I _{нагрузки} = (0,3–0,6)I _{ном} — оценка по избыточной температуре в пересчете на 0,5I _{ном} : – (5–10) °С — начальная степень неисправности; – (10–30) °С — развившийся дефект; – более 30 °С — аварийный дефект	I _{нагрузки} = (0,3–0,6)I _{ном} — оценка по избыточной температуре в пересчете на 0,5I _{ном} : – до 30 °С — начальная степень неисправности; – более 30 °С — развившийся дефект
I _{нагрузки} < 0,3 I _{ном} — контроль неэффективен.	I _{нагрузки} < 0,3 I _{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.	Аварийный дефект — достижение установленных наибольших допустимых значений температуры нагрева или достижение наибольшего допустимого значения превышения температуры.

В настоящее время в разработанном Минэнерго России проекте «Требования к объему и нормам испытаний электрооборудования» [4], прошедших публичные обсуждения, указываются измененные критерии при оценке состояния контактов и КС, по сравнению с действующими требованиями [2]. В таблице 4 приведен сравнительный анализ изменений критериев оценки состояния контактов и КС по результатам тепловизионного контроля.

Результаты, приведенные в таблицах 3 и 4, показывают значительные различия применяемых критериев для оценки состояния контактов и КС как по температуре превышения, так и по избыточной температуре. Это связано в первую очередь с отсутствием достаточно обоснованных критериев для выявления аварийных дефектов контактов (КС) по температуре превышения и избыточной температуре, а также с попыткой решения следующей проблемы: с одной

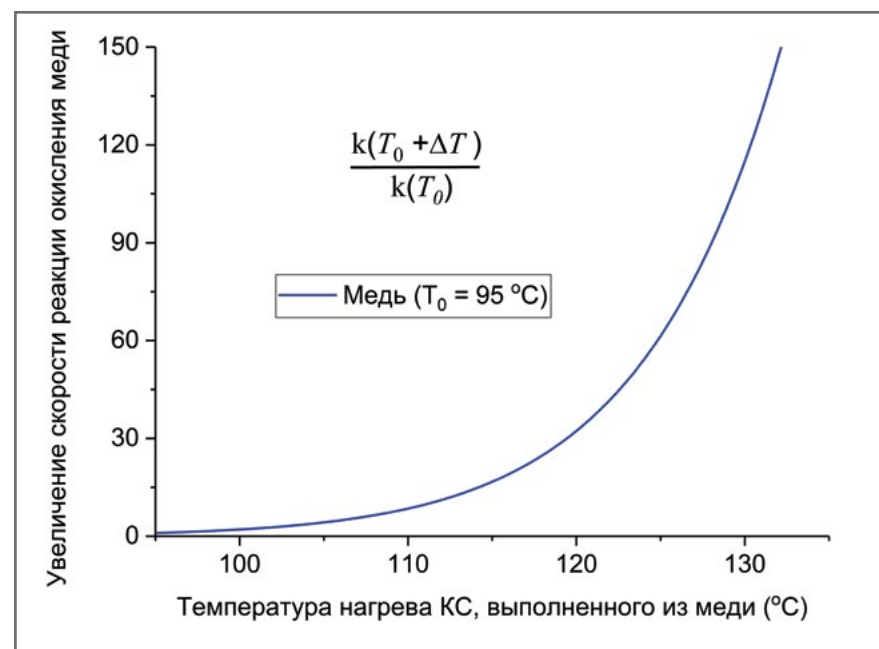
стороны, попытаться не пропустить развитие аварийного дефекта, с другой стороны, избежать ложных отбраковок контактов (КС), которые на самом деле являются исправными.

Как указано выше, в соответствии с требованиями [2] при проведении теплового контроля состояния контактов и КС применяется понятие «аварийный дефект». В этой связи следует подчеркнуть, что 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 ГОСТ Р 27.102-2021 [5] определено понятие «дефект» — каждое отдельное несоответствие объекта требованиям, установленным в документации. При этом понятие «аварийный дефект» не применяется.

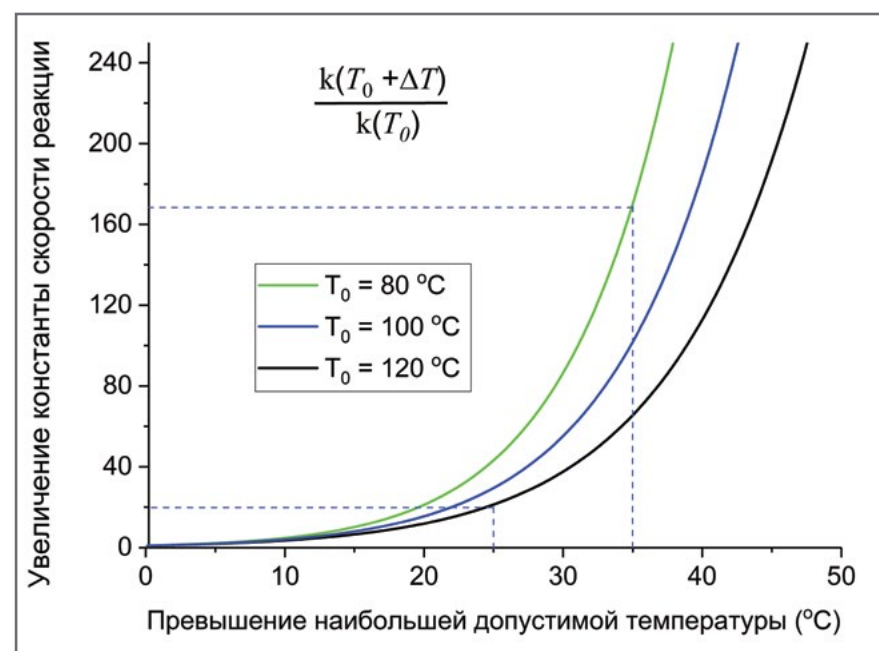
ЗАВИСИМОСТЬ ОТНОСИТЕЛЬНОГО УВЕЛИЧЕНИЯ КОНСТАНТЫ СКОРОСТИ РЕАКЦИИ ОКИСЛЕНИЯ МЕДНОГО КОНТАКТА (КС) ПРИ РОСТЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА ВЫШЕ УСТАНОВЛЕННОГО ЗНАЧЕНИЯ ДОПУСТИМОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА КОНТАКТА (КС)

Рис. 2



ЗАВИСИМОСТЬ ОТНОСИТЕЛЬНОГО УВЕЛИЧЕНИЯ КОНСТАНТЫ СКОРОСТИ РЕАКЦИИ ОКИСЛЕНИЯ КОНТАКТОВ (КС) ПРИ ПРЕВЫШЕНИИ НАИБОЛЬШЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА

Рис. 3



Вместе с тем, классификацию дефекта контакта (КС) при его развитии как «аварийный дефект» в значительной степени можно считать оправданным и целесообразным. Однако необходимо правильно интерпретировать понятие «аварийный дефект» контакта (КС). Достаточно часто в практике эксплуатации электроустановок бытует мнение, что достижение значения установленной наибольшей допустимой температуры нагрева для контакта (КС), которое классифицируется как «аварийный дефект», требует немедленного устранения, т.к. иначе возникнет возгорание и пожар в электроустановке.

Необходимо подчеркнуть, что достижение установленного значения наибольшей допустимой температуры нагрева контакта (КС) следует рассматривать как признак наличия дефекта, который может привести к повреждению оборудования при его дальнейшем развитии. Однако достижение установленного значения наибольшей допустимой температуры нагрева контакта (КС) не является пожароопасным нагревом и не приводит к немедленному возгоранию. Важно еще раз отметить, что рост переходного контактного сопротивления приводит к избыточному нагреву контакта (КС) при прохождении через него электрического тока. При этом переходное сопротивление очень чувствительно к окислению поверхности, поскольку все окислы металлов являются диэлектриками.

Пожароопасным нагревом следует считать нагрев контакта (КС) до температуры, при которой скорость развития дефекта резко ускоряется, что может привести к дальнейшему росту температуры нагрева, приводящей к разрушению изоляции, при этом скорость развития дефекта становится непредсказуемой и может стать причиной возгорания и пожара в электроустановке. Увеличение переходного контактного сопротивления при росте температуры выше

допустимой происходит из-за ускоренного развития окисления поверхности металлического проводника.

Исходя из химических свойств металлов, законов химической кинетики с учетом нормируемых значений температур возникновения термической деструкции изоляции и оболочек проводов и кабелей, можно сделать оценку температуры пожароопасного нагрева контакта (КС). Скорость окисления поверхности контактов (КС) и, как следствие, скорость роста переходного контактного сопротивления происходит в соответствии с уравнением Аррениуса, которое устанавливает экспоненциальную зависимость константы скорости k химической реакции от температуры:

$$k(T) = A \cdot e^{-\frac{E_a}{RT}}, \quad (7)$$

где A — предэкспоненциальный множитель;

E_a — энергия активации;

R — газовая постоянная;

T — абсолютная температура.

Скорость окисления поверхности резко возрастает при превышении установленного наибольшего допустимого значения температуры нагрева. Относительное увеличение константы скорости окисления при превышении температуры определяется зависимостью:

$$\frac{k(T_0 + \Delta T)}{k(T_0)} = \frac{e^{-\frac{E_a}{R(T_0 + \Delta T)}}}{e^{-\frac{E_a}{RT_0}}}, \quad (8)$$

где T_0 — наибольшая допустимая температура;

ΔT — превышение наибольшей допустимой температуры.

На рисунке 2 приведена зависимость относительного увеличения константы скорости реакции окисления медного контактного соединения

при росте температуры нагрева контакта (КС). Для контактного соединения Cu-Cu при достижении температуры нагрева в интервале (115–125) °C наблюдается резкое ускорение скорости реакции окисления меди. Аналогичные зависимости имеют место также для КС, выполненных из других материалов, имеющих близкие к меди значения энергии активации и имеющие различия по установленным значениям наибольшей допустимой температуры нагрева.

На рисунке 3 приведена зависимость относительного увеличения константы скорости реакции окисления контактов (КС) из различных материалов, наиболее часто применяемых в электроустановках, при превышении наибольшей температуры нагрева.

Приведенная зависимость показывает, что при превышении установленной допустимой температуры нагрева контакта (КС) на 25–35 °C резко возрастает скорость реакции окисления, как следствие происходит значительное увеличение переходного сопротивления контакта (КС) 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 (КС) до установленного наибольшего допустимого значения температуры нагрева необходимо провести ревизию контакта (КС) для устранения дефекта, т.к. в дальнейшем при превышении наибольшего допустимого значения температуры нагрева на 25–35 °C будут создаваться условия для развития пожароопасного дефекта контакта (КС).

Контроль температуры нагрева контактов и КС с применением тепловизора

На первый взгляд кажется, что определение температуры нагрева кон-

такта (КС) с помощью тепловизора является достаточно тривиальной задачей. Однако это далеко не так, и, как известно, результаты измерений в значительной степени зависят от целого ряда факторов, в том числе от значения коэффициента излучения контролируемого объекта. Следует отметить, что при проведении тепловизионного контроля контактов и КС важно правильно выбирать коэффициент излучения измеряемого объекта: завышенный коэффициент излучения приведет к завышенным показаниям температуры нагрева; заниженный коэффициент излучения приведет к заниженным показаниям температуры нагрева.

Как известно, тепловизор не измеряет температуру, а регистрирует инфракрасное излучение, по результатам которого определяется поверхностная температура контролируемого элемента. Современные тепловизоры определяют температуру на основании закона Стефана — Больцмана для реальных тел, согласно которому суммарный тепловой поток с единицы поверхности прямо пропорционален коэффициенту излучения, умноженному на температуру в четвертой степени:

$$\Phi = \epsilon_T \sigma T^4,$$

где Φ — суммарный тепловой поток [Вт/м²];

σ — постоянная Стефана — Больцмана;

T — абсолютная температура тела;

ϵ_T — коэффициент излучения.

Соответственно ошибка, связанная с неправильным выбором коэффициента излучения, согласно указанной формуле будет определяться соотношением:

$$\Delta T \approx -\frac{T}{4\epsilon_T} \Delta \epsilon_T,$$

ЗНАЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПОВЕРХНОСТЕЙ

Таблица 5

Материал с учетом особенности состояния поверхности	Коэффициент излучения*
Алюминий сильно окисленный	0,20
Алюминий не окисленный	0,02–0,3
Алюминий блестящий укатанный	0,04
Алюминий отполированный	0,09
Медь окисленная	0,76
Медь желтая, окисленная	0,61
Медь укатанная	0,64
Медь слегка потемневшая	0,04
Медь отполированная	0,03

* Значения коэффициентов излучения могут меняться в зависимости от температуры нагрева поверхности.

где ΔT — ошибка измерения температуры (отклонение измеренного значения от действительного);

$\Delta \epsilon_r$ — ошибка коэффициента излучения.

Из приведенного соотношения можно, например, показать, что для поверхности с коэффициентом излучения 0,9 и температурой, равной 50 °С, выбор коэффициента излучения, равного 0,7, приведет к занижению измеряемой температуры примерно на 20 °С.

Следует отметить, что коэффициент излучения не только отличается для различных материалов, но и зависит от состояния поверхности. В таблице 5 приведены коэффициенты излучения некоторых материалов с учетом особенностей состояния поверхности.

Приведенные значения показывают существенную разницу коэффициентов излучения, значения которых зависят не только от материала изготовления, но и от состояния поверх-

ности. Таким образом, при установленной фиксированной настройке тепловизора по коэффициенту излучения при контроле теплового нагрева контактов (КС) в зависимости от материала и состояния поверхности контакта (КС) могут фиксироваться существенно различные значения температуры нагрева. При этом сопоставление значений температур нагрева при обследовании контактов (КС) для разных фаз при настройке тепловизора на один и тот же коэффициент излучения для окисленных и не окисленных контактов (КС) демонстрирует значительные различия.

Как известно, чем меньше разница между температурой нагрева контролируемого объекта и температурой окружающего воздуха и чем ниже коэффициент излучения поверхности контролируемого объекта, тем выше погрешность определения температуры нагрева с помощью тепловизора. Следует отметить, что в соответствии с рекомендациями ГОСТ Р 54852-2021 [6] термографирование (тепловизионное обследование) не рекомендуется проводить, если значение коэффици-

ента излучения обследуемой поверхности меньше 0,7. Также в данном ГОСТе указывается, что при необходимости термографирования поверхностей с коэффициентом излучения ниже 0,7 рекомендуется до термографирования повысить их коэффициент излучения путем окрашивания, чернения и др. способами.

Анализируя требования данного ГОСТа, а также накопленный опыт тепловизионного контроля контактов и КС электроустановок, следует отметить, что значение коэффициента излучения для различных участков также будет различаться и может иметь очень существенные различия по значениям коэффициентов излучения. Так, например, при тепловизионном контроле болтового контактного соединения в термограмме будут отображаться поверхности контакта, болта, гайки, провода, изоляции провода. При этом все они имеют различные коэффициенты излучения поверхности, зависящие не только от материала изготовления, но и от состояния поверхности. В соответствии с [6] методическая погрешность, связанная с неоднородностью коэффициента излучения различных участков термограммы, оценивается по формуле:

$$\Delta T \approx - (T - T_0) \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon_0},$$

где ΔT — методическая погрешность отображаемой температуры, °С;

T — отображаемая в данной точке абсолютная температура, К;

T_0 — абсолютная температура отраженного излучения, К;

ϵ_0 — коэффициент излучения для базового участка;

$\Delta \epsilon$ — отклонения коэффициента излучения от базового значения.

Данная формула позволяет оценивать отклонение температуры с точностью около 20% при изменении

$$|T - T_0| < 10K; \frac{|\Delta \epsilon|}{\epsilon} < 0,15.$$

Как показано в [7], коэффициент излучения, а значит, и результат определения температуры с помощью тепловизора зависит также от угла обзора, под которым производится измерение. На рисунке 4 представлены зависимости коэффициента излучения от угла обзора для диэлектрика и проводника.

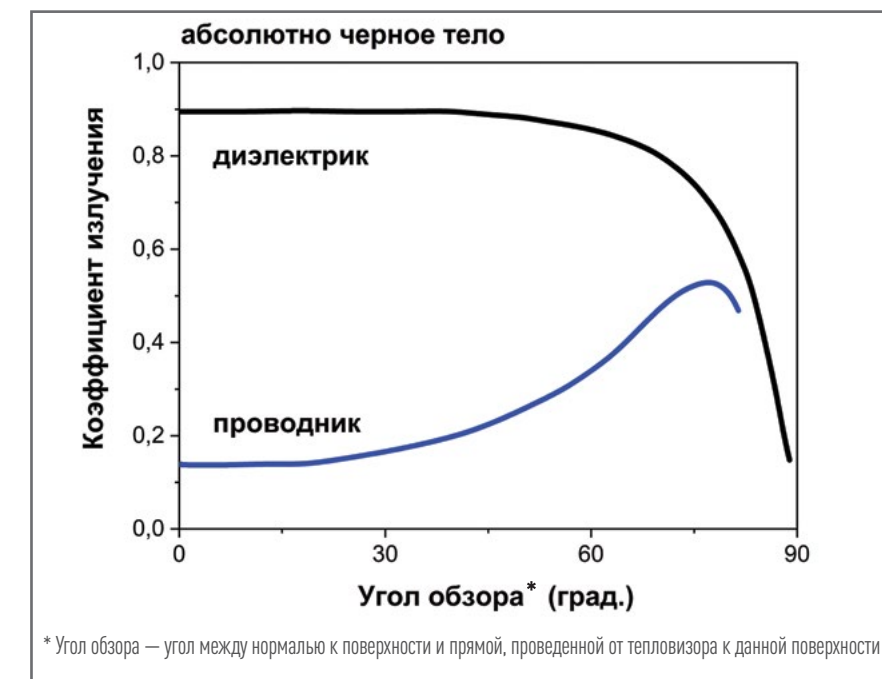
Поскольку при проведении тепловизионного контроля в электроустановках угол осмотра поверхностей многих элементов может отличаться, в том числе в силу конструктивных особенностей расположения элементов, это также оказывает влияние на коэффициент излучения контролируемого элемента и приводит еще одну погрешность в определении температуры нагрева контакта (КС) с помощью тепловизора.

Проблемы достоверности оценки состояния контактов и КС по результатам тепловизионного контроля связаны не только с вопросами определения их температуры нагрева с помощью тепловизора, но и зависят от значений и точности определения тока нагрузки электроустановки на момент проведения измерений. В этой связи необходимо подчеркнуть, что:

- чем ниже нагрузка электроустановки на момент тепловизионного контроля, тем ниже диагностическая ценность применения тепловизионного контроля для оценки состояния контактов и КС;
- относительно небольшая ошибка в измерениях значения тока нагрузки электроустановки на момент проведения тепловизионного контроля может вносить существенную ошибку в результаты оценки состояния контактов и КС при определении температуры превышения и избыточной температуры, приведенных к нормируемым значениям тока нагрузки;

ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ УГЛА ОБЗОРА ОТНОСИТЕЛЬНО ПОВЕРХНОСТИ НАБЛЮДАЕМОГО ОБЪЕКТА ДЛЯ ДИЭЛЕКТРИКОВ (ЧЕРНАЯ КРИВАЯ) И ПРОВОДНИКОВ (СИНЯЯ КРИВАЯ)

Рис. 4



* Угол обзора — угол между нормалью к поверхности и прямой, проведенной от тепловизора к данной поверхности

– совокупность погрешностей в определении температуры нагрева контакта (КС) и значения нагрузки электроустановки на момент измерений могут приводить к совершенно недостоверной оценке состояния контактов и КС.

Так, например, при расчете избыточной температуры при токе нагрузки $0,5 I_{ном}$ ($\Delta T_{0,5}$), определяемой с использованием установленной зависимости [6], необходимо определить значение избыточной температуры при рабочем токе нагрузки ($\Delta T_{раб}$), номинальный ток нагрузки ($I_{ном}$) и рабочий ток нагрузки ($I_{раб}$) на момент проведения тепловизионного контроля. При значениях тока нагрузки электроустановки $0,6 I_{ном}$, температуре контакта (КС) 70 °С, при ошибке в определении истинной температуры нагрева контакта (КС) на 2 °С и ошибке в измерениях тока нагрузки на 5%, ошибка в оценке избыточной

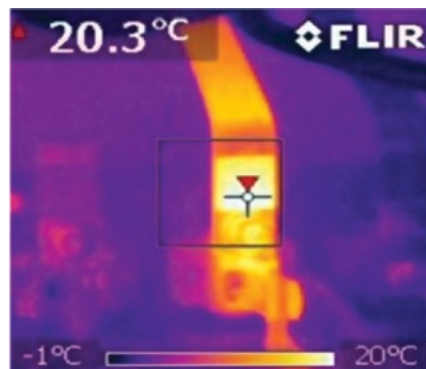
температуры $\Delta T_{0,5}$ будет составлять 50%. Соответственно, при значениях тока нагрузки электроустановки $0,4 I_{ном}$ ошибка в оценке избыточной температуры $\Delta T_{0,5}$ будет составлять 100%, а при значениях тока нагрузки электроустановки $0,3 I_{ном}$ ошибка в оценке избыточной температуры $\Delta T_{0,5}$ будет составлять 150%.

Ошибка в оценке нормируемой избыточной температуры при ошибке в определении температуры нагрева контакта (КС) и тока нагрузки всего на несколько процентов может давать совершенно неправильную оценку состояния, а именно — квалифицировать аварийный контакт (КС) как исправный и, наоборот, квалифицировать исправный контакт (КС) как аварийный.

В этой связи следует отметить, что в ряде стандартов по тепловизионному контролю, применяемых

БЕСКОНТАКТНЫЙ ТЕПЛОВИЗИОННЫЙ КОНТРОЛЬ

Рис. 5



в зарубежных странах, оценка состояния контактов (КС) по избыточной температуре вообще не применяется (см. таблицу 3), а в соответствии с [4] (см. таблицу 4) предусматривается исключение применения оценки избыточной температуры, определяемой по результатам тепловизионного контроля, для выявления аварийных дефектов контактов (КС).

Применение тепловизионного контроля для оценки состояния контактов и КС имеет ограниченную диагностическую ценность. Если на момент проведения тепловизионного контроля обнаруживается температура контакта (КС), превышающая установленное наибольшее допустимое значение температуры нагрева, то при определении и подтверждении достоверности полученных результатов измерений, которые зависят от множества факторов, можно сделать вывод о наличии аварийного дефекта. Однако, если на момент проведения тепловизионного контроля контактов и КС не зафиксированы превышения наибольших допустимых значений температур нагрева, то получить достоверную оценку состояния контакта (КС) с использованием расчетных соотношений по превышению температуры и по избыточной температуре может оказаться достаточно проблематич-

КОНТАКТНЫЙ ТЕРМОИНДИКАТОРНЫЙ КОНТРОЛЬ

Рис. 6



но, а во многих случаях — практически невозможно.

Фактически оценка состояния контакта и КС с использованием тепловизионного контроля по температуре превышения, при условии обеспечения достоверности измерений, наличия достоверных значений максимальной нагрузки и нагрузки электроустановки в момент измерений, может иметь положительную диагностическую ценность, как правило, только если на момент измерений нагрузка электроустановки составляет более 0,6 от номинального тока ($0,6I_{ном}$). Если на момент проведения тепловизионного контроля ток нагрузки находится в диапазоне ниже $0,6I_{ном}$, то количество тепла, выделяемое на контакте (КС), является незначительным и влияние таких факторов, как теплорассеяние, обдув, теплоизоляционные свойства материалов, становятся доминирующими.

Также необходимо отметить, что при разнице в температуре нагрева контакта (КС) по сравнению с температурой окружающего воздуха менее 20°C и коэффициента излучения поверхности контакта (КС) ниже 0,7 достоверность оценки состояния контактов (КС) по результатам тепловизионного контроля резко снижается.

Объективным критерием, имеющим детерминированную диагностическую ценность для оценки состояния контактов (КС), является значение температуры нагрева контакта (КС) в период максимальной нагрузки электроустановки при максимальной температуре окружающего воздуха. Тепловизионный контроль обнаружит факт наличия достижения максимальной температуры нагрева контакта (КС) при эксплуатации электроустановки лишь в том случае, если на момент измерений ток нагрузки и температура окружающего воздуха будут максимальными.

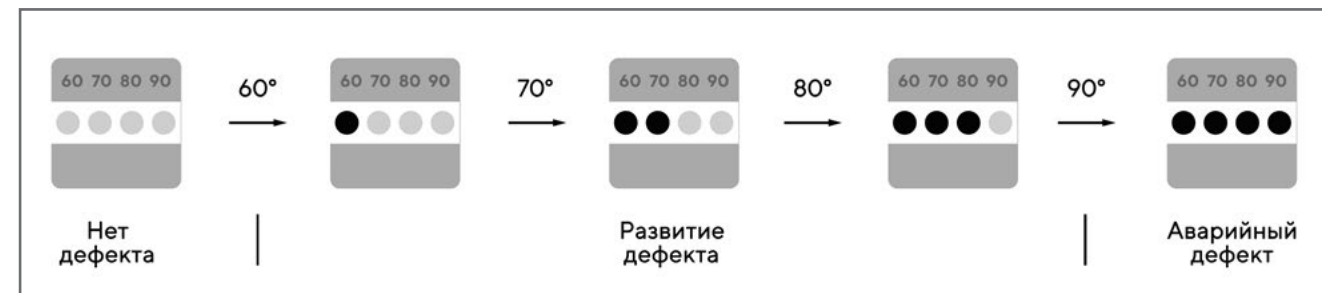
Следует также отметить, что применение тепловизионного контроля для оценки состояния контактов и КС при эксплуатации электроустановок требует применения специального оборудования, специально подготовленного персонала. Данный метод является достаточно трудоемким, кроме того, далеко не все участки электрической цепи и узлы электроустановок являются доступными для проведения тепловизионного контроля, выполняемого под рабочим напряжением. Также следует отметить, что развитие дефектов контактов и КС до перехода в аварийный дефект может происходить быстрее, чем установленный срок периодичности тепловизионного контроля.

В практике эксплуатации электроустановок наряду с применением тепловизионного контроля (рис. 5) в последние годы активно развивается применение контактного термоиндикаторного контроля с применением необратимых термоиндикаторных наклеек (рис. 6).

Термоиндикатор — это специальная наклейка, изготовленная из композиционного материала и изменяющая цвет при достижении заданной температуры. При этом пороговое значение срабатывания термоиндикатора (изменение цвета при дости-

ПРИНЦИП РАБОТЫ НЕОБРАТИМЫХ ТЕРМОИНДИКАТОРНЫХ НАКЛЕЕК

Рис. 7



жении определенной температуры) обеспечивается при изготовлении. 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 ее после охлаждения).

Для целей оценки состояния контактов и КС используются только необратимые многотемпературные термоиндикаторы плавления [8, 9]. При этом результаты исследований и накопленный опыт применения термоиндикаторов показывает, что для оценки состояния контактов и КС наиболее оптимальным является применение четырехтемпературного термоиндикатора.

На рисунке 7 приведена схема, поясняющая принцип работы необратимых термоиндикаторных наклеек и методология оценки состояния контактов и КС по результатам осмотра.

На рисунке 8 приведены примеры применения термоиндикаторных наклеек для контроля состояния контактов и КС при эксплуатации электроустановок.

Достоинствами применения термоиндикаторов являются:

- непрерывный контроль температуры контакта (КС);

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

Следует подчеркнуть, что в соответствии с требованиями [10] 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 могут проводиться внеочередные осмотры. Применение термоиндикаторов позволяет осуществлять визуальный контроль состояния контактов (КС) при проведении осмотров электроустановок оперативным персоналом без применения средств измерений.

Термоиндикатор за счет непрерывности контроля температуры и необратимости срабатывания позволяет зафиксировать факт достижения (либо

недостижения) установленных пороговых значений температур в любой момент эксплуатации электроустановки, в том числе при максимальной нагрузке и максимальной температуре окружающего воздуха. Это фактически позволяет обеспечивать детерминированную диагностическую ценность данного метода и является одним из ключевых факторов целесообразности и эффективности применения термоиндикаторов для контроля состояния контактов и КС при эксплуатации электроустановок.

При применении термоиндикаторов для оценки состояния контактов и КС следует отметить [8, 9]:

- температура срабатывания верхнего порогового значения термоиндикатора должна выбираться с учетом установленной наибольшей допустимой температуры нагрева контакта (КС);
- наличие срабатывания всех пороговых значений термоиндикатора однозначно свидетельствует о наличии аварийного дефекта контакта (КС), т.к. свидетельствует о достижении установленной наибольшей температуры нагрева;
- при срабатывании термоиндикатора в 1–3 диапазоне возможно оценить степень развития дефекта контакта (КС).

В таблице 6 приведены рекомендуемые диапазоны контролируемых температур для выбора пороговых

ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕРМОИНДИКАТОРНЫХ НАКЛЕЕК

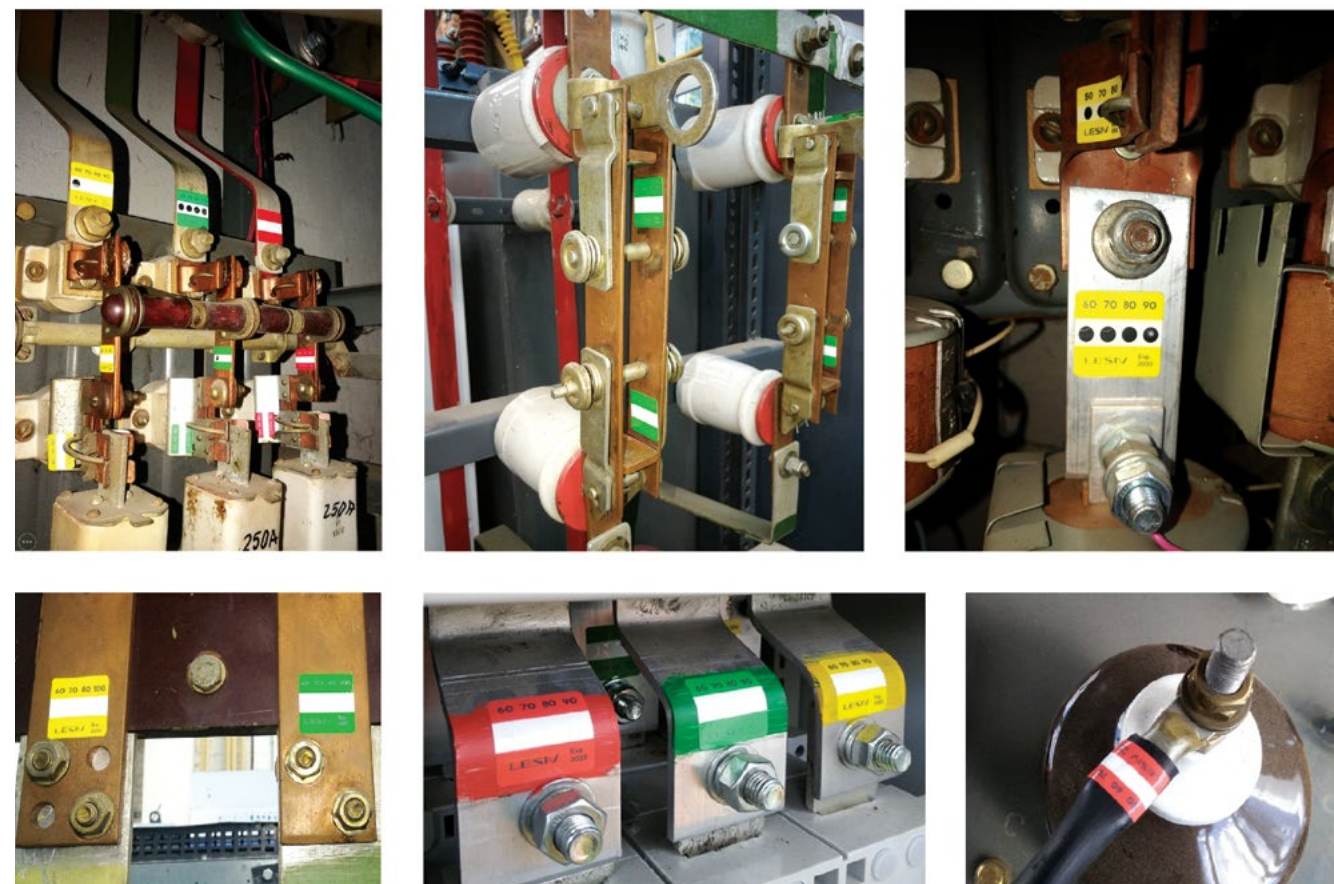


Рис. 8

значений термоиндикатора при его применении в зависимости от установленных нормируемых наибольших значений температуры нагрева контакта (КС) [9].

Из таблицы 6 видно, что диапазон значений наибольших допустимых температур для контактов и КС в зависимости от применяемых материалов находится в пределах 75–120 °С.

Современные термоиндикаторы, предлагаемые предприятиями-изготовителями, имеют точность срабатывания заданной температуры ± 2 °С, что является достаточным для констатации факта наличия дефекта контакта (КС) при их применении.

Выводы

1. Объективным критерием, имеющим детерминированную диагностическую ценность для оценки состояния контактов и КС, является значение температуры нагрева контакта (КС) в период максимальной нагрузки электроустановки при максимальной температуре окружающего воздуха.
2. Тепловизионный контроль обнаружит факт наличия достижения максимальной температуры нагрева контакта (КС) при эксплуатации электроустановки лишь в том случае, если на момент измерений ток нагрузки и тем-

пература окружающего воздуха будут максимальными.

3. Достоверность оценки состояния контактов и КС по результатам тепловизионного контроля связана не только с влиянием различных факторов при определении температуры нагрева с помощью тепловизора, но и зависит от значений и точности определения тока нагрузки электроустановки на момент проведения измерений.
4. Оценка состояния контакта (КС) по температуре превышения, при условии обеспечения досто-

верности измерений, наличия значений максимальной нагрузки и нагрузки электроустановки в момент измерений, может иметь положительную диагностическую ценность, как правило, если на момент измерений нагрузка электроустановки составляет более 0,6 от значения номинального тока.

5. Оценка состояния контакта (КС) по избыточной температуре практически не обладает диагностической ценностью для обнаружения аварийного состояния контакта (КС).
6. Термоиндикатор за счет непрерывности контроля температуры нагрева и необратимости срабатывания позволяет зафиксировать факт достижения (либо недостижения) установленных пороговых значений температур нагрева контакта (КС) в любой момент эксплуатации, при этом зафиксировать пороговое значение температуры в период максимальной нагрузки электроустановки при максимальной температуре окружающего воздуха.
7. Термоиндикаторный контроль контактов и КС с применением термоиндикаторных наклеек позволяет осуществлять контроль их состояния при каждом визуальном осмотре без применения специальных средств измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 17441-84. Соединения контактные электрические. Правила приемки и методы испытаний. М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1984.
2. Объем и нормы испытаний электрооборудования: РД 34.45-51.300-97. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 1998.
3. СТО ПАО «Россети» 34.01-23.1-001-2017 «Объем и нормы испытаний электрооборудо-

РЕКОМЕНДУЕМЫЕ ДИАПАЗОНЫ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ТЕМПЕРАТУР ДЛЯ ВЫБОРА ПОРОГОВЫХ ЗНАЧЕНИЙ ТЕРМОИНДИКАТОРА

Таблица 6

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

4. Требования к обеспечению надежности электроэнергетических систем, надежности и безопасности объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок «Требования к объему и нормам испытаний электрооборудования» (проект). URL: <https://regulation.gov.ru/projects#npa=113525> (дата обращения: 25.09.2023).
5. ГОСТ Р 27.102-2021. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определение. М.: Российский институт стандартизации, 2021.
6. ГОСТ Р 54852-2021. Здания и сооружения. Метод тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций. М.: Российский институт стандартизации, 2021.
7. Glavaš H., Józsa L., Barić T. Infrared thermography in energy audit of electrical installations., Technical Gazette. 2016. № 23 (5). P. 1533–1539.

8. Львов М.Ю., Никитина С.Д., Лесив А.В. Применение термоиндикаторов для контроля состояния контактов и контактных соединений при эксплуатации электрооборудования // Электрические станции. 2023. № 2. С. 44–51.
9. Львов М.Ю., Никитина С.Д., Львов Ю.Н., Лесив А.В. О стандартизации требований к термоиндикаторному контролю состояния контактов и контактных соединений при эксплуатации электроустановок // Энергия единой сети. 2023. № 1 (68). С. 67–74.
10. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. Утв. Приказом Минэнерго России от 4.10.2022 № 1070.

Для цитирования: Львов М.Ю., Львов Ю.Н., Новиков Н.Л., Лесив А.В., Серебрянников Е.Е. Контроль состояния контактов и контактных соединений при эксплуатации электроустановок распределительных электрических сетей // Энергия единой сети. 2024. № 1 (72). С.12–25