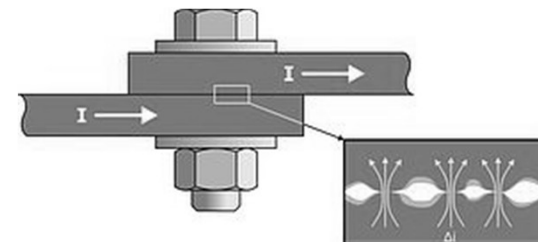


Оценка состояния контактов и контактных соединений электрооборудования с помощью термоиндикаторов

Алексей Валерьевич Лесив
ООО «ТермоЭлектрика»

Причины развития дефектов контактов и контактных соединений

- Возникновение оксидной пленки на поверхности контакта
- Уменьшение площади контактирования из-за ослабления нажима



Рост переходного
контактного сопротивления



Рост температуры
контакта



Ускорение процесса
окисления и/или
ослабления контакта



**ОТКАЗ
ИЛИ
ВОЗГОРАНИЕ!**

Развитие дефектов контактов и контактных соединений определяется ростом переходного контактного сопротивления.

На энергообъектах предусмотрен обязательный контроль состояния контактов и контактных соединений.

РД 34.45-51.300-97 «Объём и нормы испытаний электрооборудования»:

- указано требование о проведении тепловизионного контроля контактов и контактных соединений;
- приведена методика оценки теплового состояния контактов и контактных соединений;
- установлены нормируемые наибольшие допустимые значения температур нагрева контактов и контактных соединений;
- установлены требования по периодичности проведения тепловизионного контроля.

ОБЪЕМ

И НОРМЫ
ИСПЫТАНИЙ
ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ
РД 34.45-51.300-97

БЕЗОПАСНОСТЬ ТРУДА РОССИИ



Контролируемые узлы	Наибольшее допустимое значение	
	температура нагрева, °С	превышение температуры, °С
1. Контакты из меди и медных сплавов: - без покрытий, в воздухе - с покрытием серебром или никелем, в воздухе - с покрытием оловом, в воздухе	75 105 90	35 65 50
2. Аппаратные выводы из меди, алюминия и их сплавов, предназначенные для соединения с внешними проводниками электрических цепей: - без покрытия - с покрытием оловом, серебром или никелем	90 105	50 65
3. Болтовые контактные соединения из меди, алюминия и их сплавов: - без покрытия, в воздухе - с покрытием оловом, в воздухе	90 105	50 65

Критерием наличия аварийного дефекта контакта и контактного соединения является превышение наибольшей допустимой температуры.

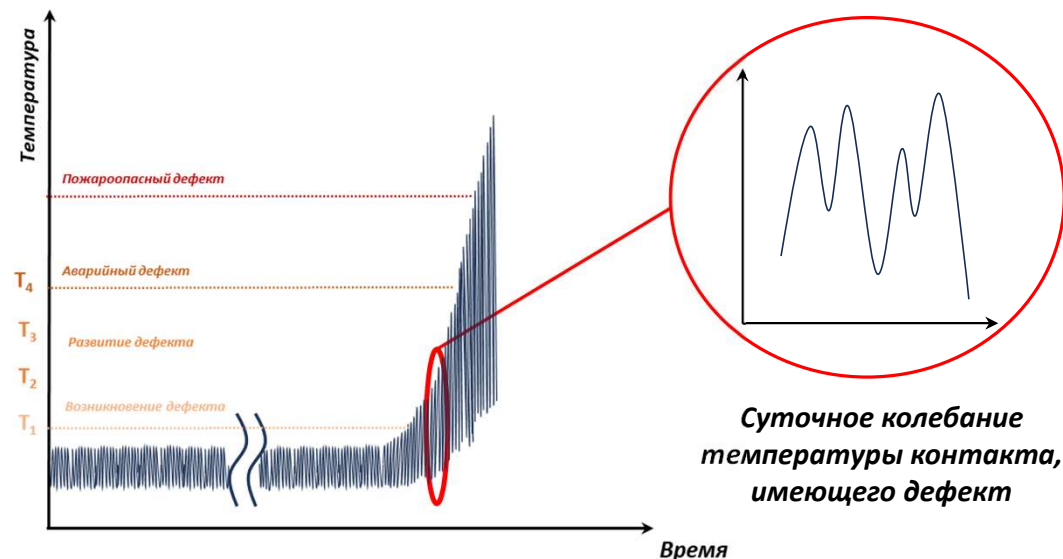
- Позволяет определить температуру нагрева контактного соединения в момент осмотра при текущем токе нагрузки
- Чтобы провести оценку состояния контактов и контактных соединений при тепловизионном контроле необходимо **рассчитать температуру контролируемого узла при номинальном токе нагрузки и максимальной температуре**
- При измерении температуры тепловизором необходимо учитывать: коэффициент излучения поверхности, угол обзора, параметры окружающей среды и пр.

Контроль по температуре превышения ($I_{\text{раб.}} > 0,6I_{\text{ном}}$)

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

Контроль по избыточной температуре ($I_{\text{раб.}} > 0,3I_{\text{ном}}$)

$$T_{\text{деф.}} > T_{\text{окр.}} + (30 \text{ } ^\circ\text{C}) \times \left(\frac{I_{\text{раб.}}}{0,5I_{\text{ном.}}} \right)^2$$



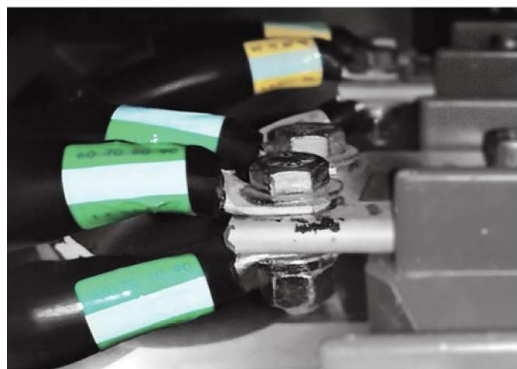
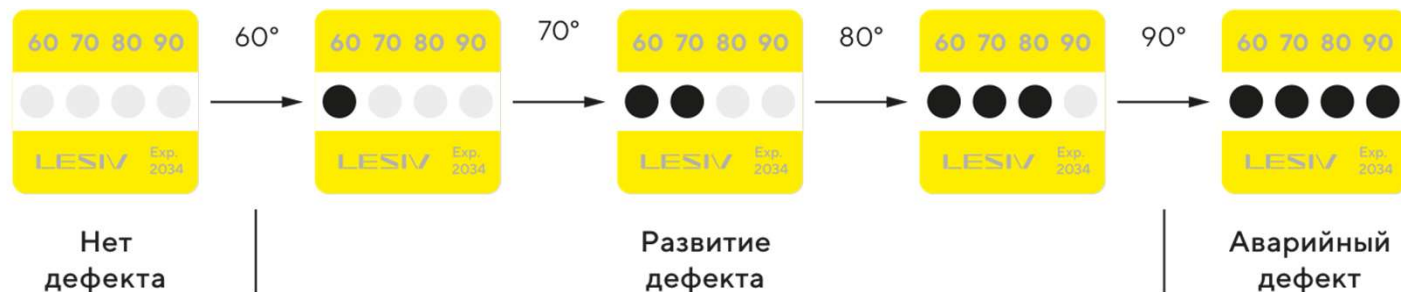
Тепловизор позволяет определить температуру контакта или контактного соединения только при токе нагрузки в момент измерения.

Измерения, проведенные с помощью тепловизора, позволяют получить информацию о температуре контакта только на момент осмотра при существующем токе нагрузки.






	ANSI/NETA MTS		Standard for Infrared Inspection of Electrical Systems & Rotating Equipment		Electrical Power Equipment Maintenance and Testing (Paul Gill)	NFPA 70B Standard for Electrical Equipment Maintenance	РД 153-34.0-20.363-99	
	США, Канада, Европа, страны латинской Америки		США		Международный справочник	США, страны латинской Америки	Российская Федерация	
Используемые методики								
Обобщенные рекомендуемые действия	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 или приведенная к $I_{ном}$)	Избыточная температура (не зависит от тока нагрузки)	Температура превышения, (приведенная к $I_{ном}$)	Температура превышения, (приведенная к $0.5 I_{ном}$)
Профилактические меры должны быть приняты во время следующего периода технического обслуживания.	от 1 до 10°C	от 1 до 3°C	от 1 до 10°C	от 1 до 3°C	0°C–10°C	от 1 до 3°C	---	---
Требуются профилактические меры, если позволяет график.	от 11 до 20°C	от 4 до 15°C	от 11 до 20°C	от 4 до 15°C	10°C–20°C	от 4 до 15°C	от 10 до 20°C	от 5 до 10°C
Профилактические меры требуются как можно скорее.	от 21 до 40°C	---	от 21 до 40°C	---	20°C–40°C	---	от 20 до 40°C	от 10 до 30°C
Профилактические меры требуются немедленно.	> 40 °C	> 15 °C	> 40 °C	> 15 °C	> 40 °C * > 30 °C **	> 15 °C	> 40 °C	> 30 °C

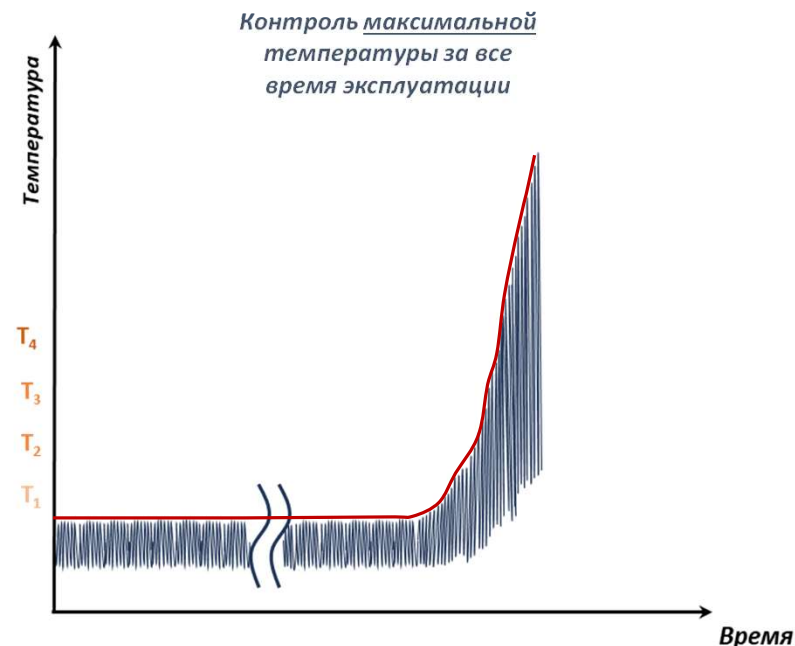
При тепловизионном контроле используются расчетные методики оценки состояния, позволяющие предсказать максимальную температуру нагрева в процессе эксплуатации.

Термоиндикаторы – это наклейки из композиционного материала, которые необратимо меняют цвет при нагревании до заданной температуры.



Термоиндикатор непрерывно контролирует температуру контактов и позволяет выявлять дефекты при осмотрах и техническом обслуживании.

Состояние термоиндикатора	$I_{\max} < 0,5I_{\text{ном}}$	$I_{\max} = 0,5-0,75I_{\text{ном}}$	$I_{\max} = 0,75-0,9I_{\text{ном}}$	$I_{\max} > 0,9I_{\text{ном}}$
	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)			

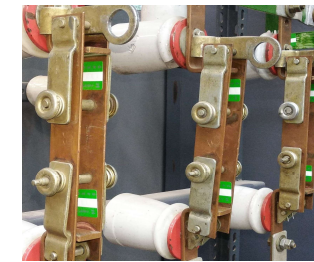


Использование необратимых термоиндикаторов позволяет проводить оценку состояния контактов и контактных соединений.

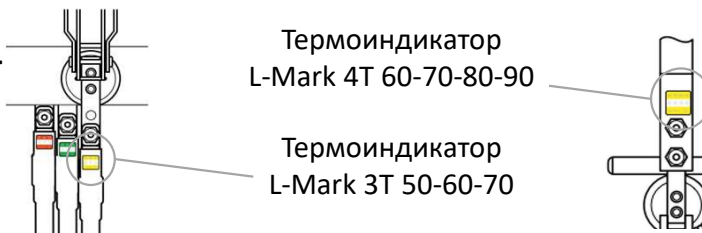
**Контакты
коммутационных
аппаратов до и выше
1000 В**



Термоиндикатор
L-Mark 4T 50-60-70-80

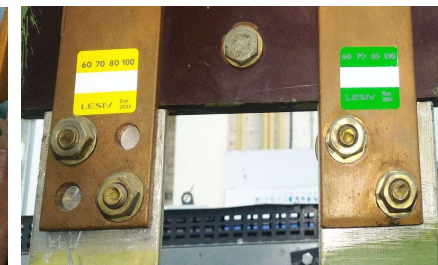


**Кабельные наконечники
концевых кабельных муфт
и контактные соединения
сборных
присоединительных шин**



Термоиндикатор
L-Mark 4T 60-70-80-90

Термоиндикатор
L-Mark 3T 50-60-70



**Контакты плавких
предохранителей
до и выше 1000 В**



Термоиндикатор
L-Mark 4T 50-60-70-80

Термоиндикатор
L-Mark 3T 50-70-80

Термоиндикатор
L-Mark 3T 50-70-80

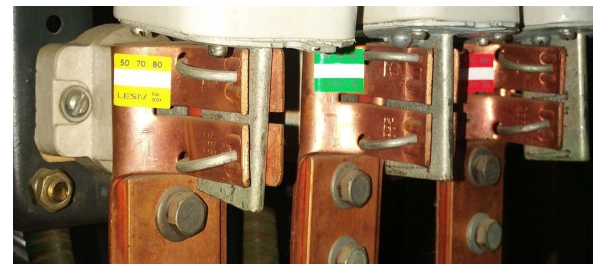

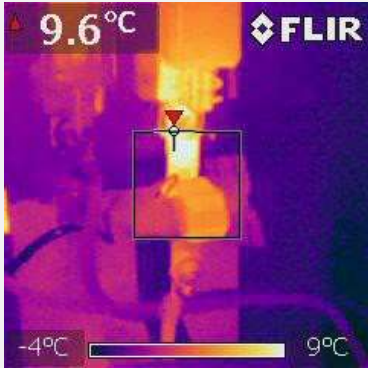


Фото сработавшего термоиндикатора	Фото тепловизионного контроля	Термоиндикаторный контроль	Тепловизионный контроль
Контролируемый элемент - болтовые контактные соединения из сплава алюминия			
		<p>Оценка состояния контактного соединения с помощью термоиндикаторов: 4 точки изменили цвет - аварийный дефект</p>	<p>Наибольшая нормируемая избыточная температура, пересчитанная для $0,3 I_{ном}$ в случае развившегося дефекта: 4-11 °С;</p> <p>Максимальная температура, зарегистрированная по результатам ТВК: +9.6 °С. Максимальная температура исправного контактного соединения (зеленая фаза), зарегистрированная по результатам ТВК: ≈ 0 °С;</p> <p>Температура окруж. воздуха в момент осмотра: - 7 °С; Ток нагрузки на контактное соединение в момент осмотра: 31 А ($0,3 I_{ном}$)</p> <p>Расчетная избыточная температура: 16,6°С;</p> <p>Оценка состояния КС по результатам ТВК: Развившийся дефект</p> <p>Оценка состояния по РД: Развившийся дефект</p>

Тепловизионный контроль позволяет эффективно выявлять дефекты при нагрузке оборудования выше $0,6 I_{ном}$

Диагностическая ценность методов теплового контроля определяется отношением количества выявляемых дефектов к общему количеству существующих дефектов.

Отсутствие дефектов

Наличие дефектов

$$Z_{D_1} = \log_2 \frac{P(T_{\text{прив.}} < T_{\text{наиб. доп.}} / D_1)}{P(T_{\text{прив.}} < T_{\text{наиб. доп.}})}$$

$$Z_{D_2} = \log_2 \frac{P(T_{\text{прив.}} > T_{\text{наиб. доп.}} / D_2)}{P(T_{\text{прив.}} > T_{\text{наиб. доп.}})}$$

ТВК: $Z_{D_1} = -0.01 < 0$

$Z_{D_2} = 1.7 > 0$

ТИН: $Z_{D_1} = 0.02 > 0$

$Z_{D_2} = 0.02 > 0$

В настоящее время в эксплуатации на энергетических объектах РФ находится более 5 млн термоиндикаторов. На примере распределительных сетей на объектах АО "ОЭК" анализ сравнения выявляемости дефектов различных методов теплового контроля показал, что с помощью термоиндикаторов удается выявлять **более чем в 3 раза** больше дефектов, чем с помощью тепловизионного обследования.

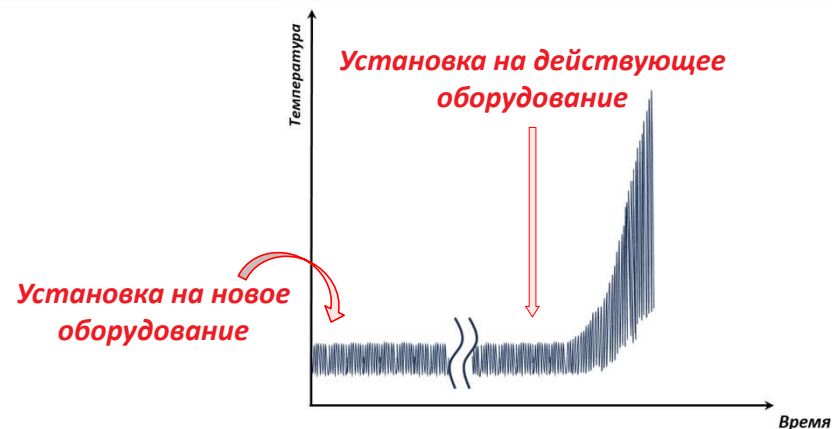
Оценка состояния контактов и контактных соединений с помощью термоиндикаторов имеет независимую диагностическую ценность.

Тип оборудования	Периодичность осмотра оборудования	Осмотр при техническом обслуживании	Осмотр при проведении ремонтных работ
ПС с дежурным персоналом	Не реже 1 раза в сутки	+	+
ПС без дежурного персонала	Не реже 1 раза в месяц	+	+
ТП, РП	Не реже 1 раза в 6 месяцев	+	+

п.499 Правил технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации

Периодичность визуального осмотра электроустановок достаточна для своевременного выявления дефектов с помощью термоиндикаторов.

Вероятность развития дефектов, а следовательно, и необходимость своевременного их выявления на действующем оборудовании существенно выше, чем на новом.



Специалистами ПАО «Россети Московский регион» разработана технология монтажа термоиндикаторов на различные типы контактных соединений электроустановок 0,4-10 кВ под напряжением.



Проведено внедрение таких работ, а также оценка их трудоемкости и эффективности. Разработаны технологические карты проведения работ по установке термоиндикаторов под напряжением.

В качестве объекта для установки термоиндикаторов под напряжением были выбраны РУ 0,4 кВ, ТП 6-10 кВ

Впервые в России!

- Увеличение переходного контактного сопротивления при росте температуры выше наибольшей допустимой связано с развитием процесса окисления поверхности металлического проводника
- Скорость окисления поверхности контактов (контактных соединений) 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:

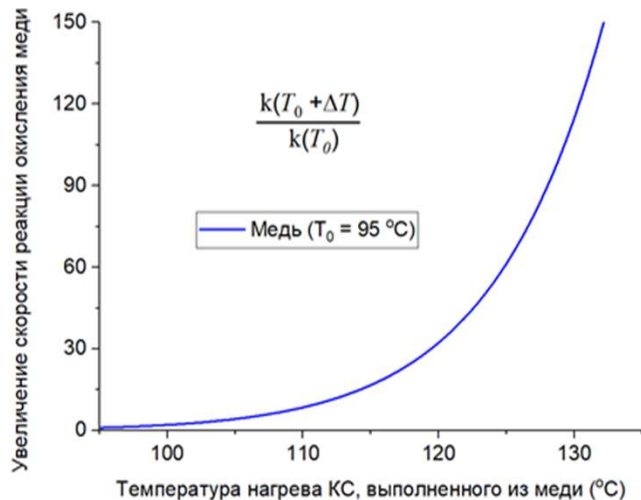
$$k(T) = A \cdot e^{-\frac{E_a}{RT}},$$

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

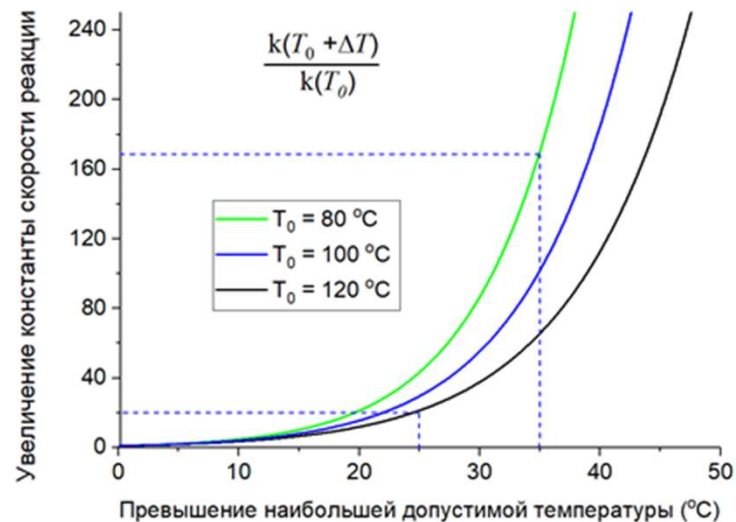
- Скорость окисления поверхности резко возрастает при превышении установленного наибольшего допустимого значения температуры нагрева. Относительное увеличение константы скорости окисления при превышении температуры определяется зависимостью:

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

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



Зависимость относительного увеличения константы скорости реакции окисления медного контакта (контактного соединения) при росте температуры нагрева выше установленного значения допустимой температуры нагрева



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

При превышении установленной допустимой температуры контакта на 25-35 °C резко возрастает скорость реакции окисления и происходит значительное увеличение переходного сопротивления контакта.

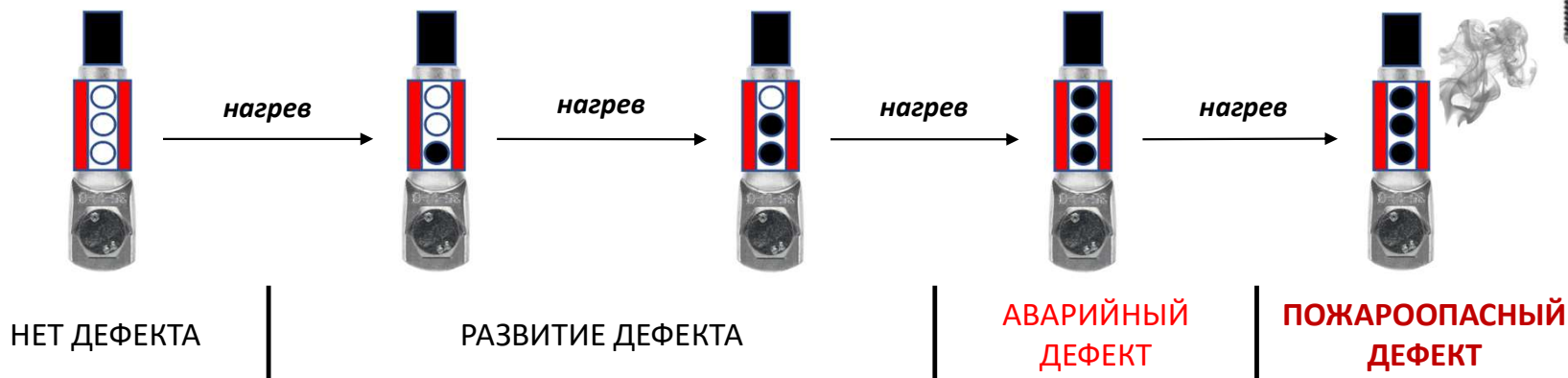
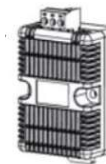
КРИТЕРИИ ОБНАРУЖЕНИЯ «АВАРИЙНОГО ДЕФЕКТА» И «ПОЖАРООПАСНОГО ДЕФЕКТА» КОНТАКТОВ И КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ТЕРМОИНДИКАТОРНОМ КОНТРОЛЕ

Контролируемые узлы (контакты/контактные соединения в воздухе)	Наибольшее допустимое значение температуры нагрева, °С	Температура пожароопасного нагрева, °С	Контролируемый диапазон температур термоиндикатора, °С
Контакты из меди и медных сплавов: - без покрытий - с накладными серебряными пластинами - с покрытием серебром или никелем - с покрытием оловом	75 120 105 90	105 150 135 120	50-60-70-80-120 70-90-100-120-150 60-80-90-110-140 60-70-80-90-120
Аппаратные выводы из меди, алюминия и их сплавов, предназначенные для соединения с внешними проводниками: - без покрытия - с покрытием оловом, серебром или никелем	90 105	120 135	60-70-80-90-120 60-80-90-110-140
Болтовые контактные соединения из меди, алюминия и их сплавов: - без покрытия - с покрытием оловом - с покрытием серебром или никелем	90 105 115	120 135 145	60-70-80-90-120 60-80-90-110-140 70-90-100-120-150

«Аварийный дефект» - достижение наибольшего допустимого значения температуры нагрева - признак наличия дефекта, который при дальнейшем развитии может привести к возникновению «пожароопасного дефекта».

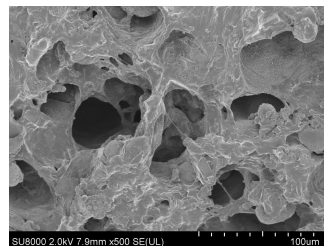
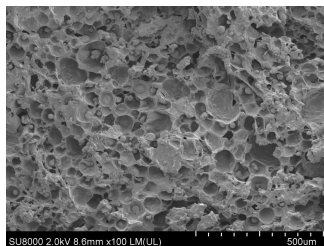
«Пожароопасный дефект» - достижение температуры пожароопасного нагрева - скорость развития дефекта становится непредсказуемой и приводит к возникновению условий для возгорания и пожара в электроустановке.

Принцип работы термоактивируемых газовыделяющих наклеек



При нагреве выше пожароопасной температуры наклейка выделяет сигнальный газ, который фиксируется датчиком

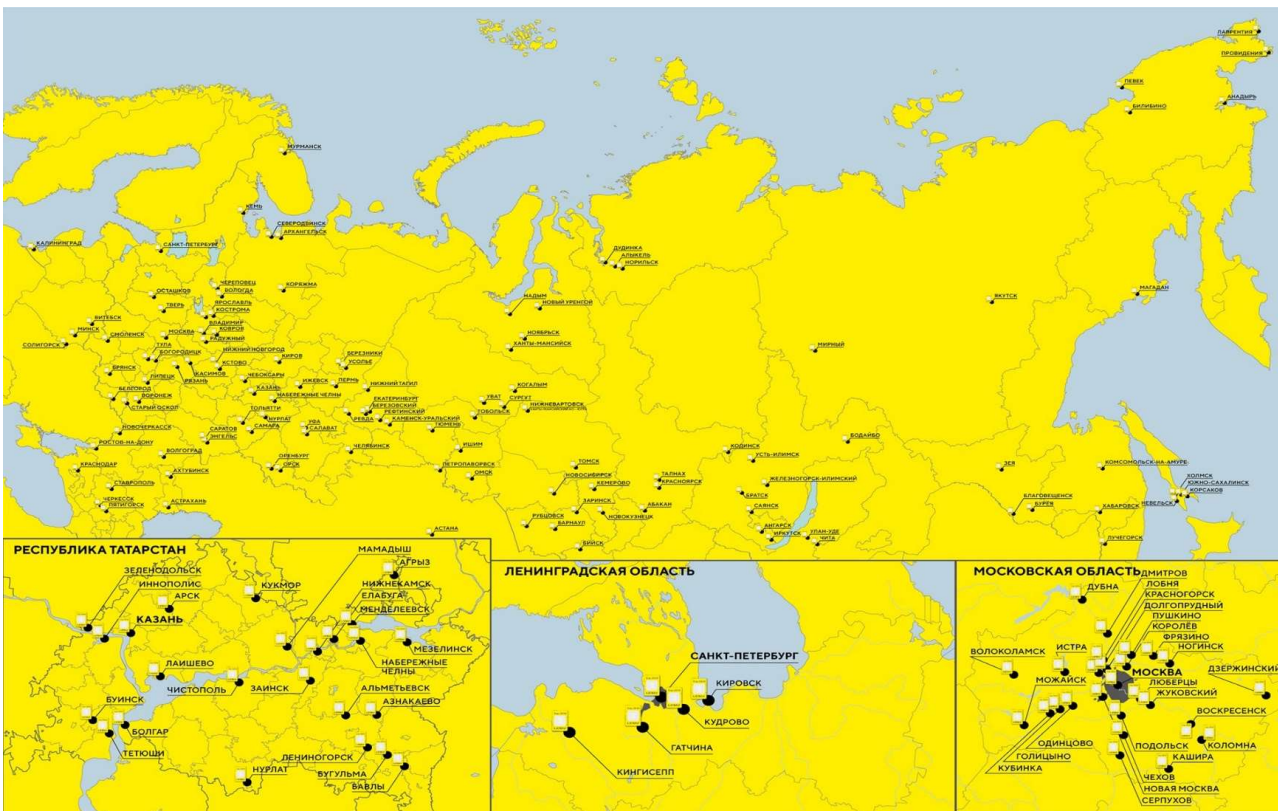
Работа наклеек обеспечивается особой микроструктурой термочувствительного материала в исходном состоянии и его необратимым разрушением при нагреве.



Микрофотографии
микропористого материала наклейки, поры которого заполнены сигнальным газом, в исходном состоянии.

Принцип работы термоактивируемых газовыделяющих наклеек реализован в системе «ТермоСенсор».





82 субъекта РФ

5,9 млн термоиндикаторов в эксплуатации

Более 3092 выявленных дефектов, каждый из которых мог привести к пожару

СТО 34.01-12-002-2023 (ПАО "РОССЕТИ")

СТО РусГидро 02.02.146-2023

СТО 76561356-29-004-2023 (АО "ОЭК")

СТО ИНТИ М.130.1-2023

Методические рекомендации МЧС России

Положение ПАО «ФСК ЕЭС» «О единой технической политике в электросетевом комплексе»:
 «2.1.7.13. В распределительных устройствах 0,4-20 кВ ПС, ТП, РП рекомендуется применять термоиндикаторы для периодического контроля температурного режима электротехнического оборудования.»

ВИЗУАЛЬНЫЙ
термоиндикаторный контроль

ОТ 40 ДО 300 РУБ./ОДИН ЭЛЕМЕНТ

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ
термоиндикаторный контроль

ОТ 12 700 ДО 36 000 РУБ. НА 1 ЯЧЕЙКУ КРУ

СТОИМОСТЬ ОСНАЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

Термоиндикаторы: от 12 до 20 т. руб.

ТермоСенсор: от 150 до 300 т. руб.

РП/РТП



Термоиндикаторы: от 70 до 90 т. руб.

ТермоСенсор: от 800 до 1 800 т. руб.

ПС 35-220 кВ



Термоиндикаторы: от 200 до 600 т. руб.

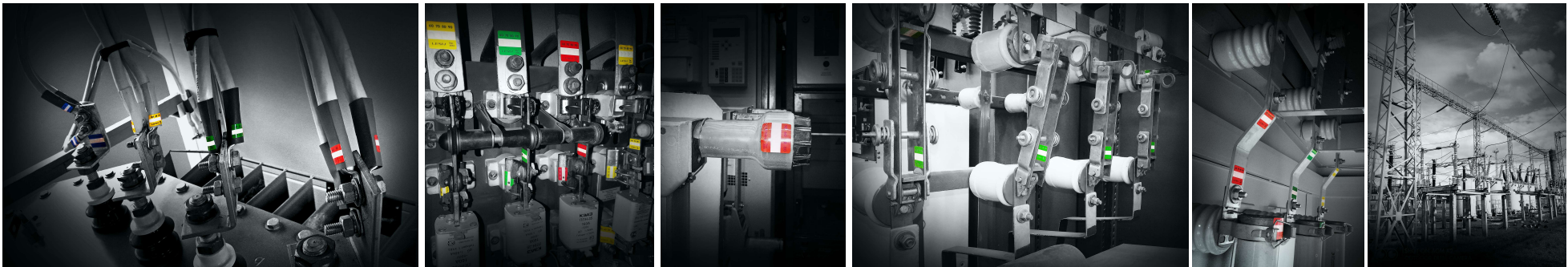
ТермоСенсор: от 2 100 до 5 000 т. руб.

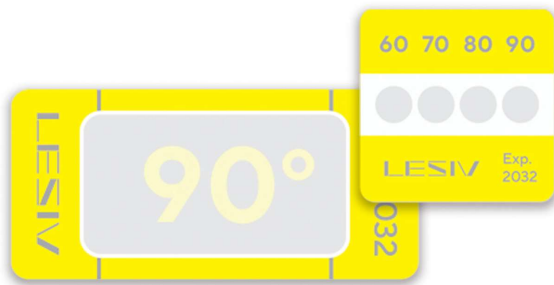
ТЭЦ/ГРЭС



Самое доступное решение в России и мире.

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 °С, создаются условия для возникновения «пожароопасного дефекта».**
3. **Применение термоиндикаторного контроля позволяет при визуальном осмотре проводить оценку состояния контактов и контактных соединений и классифицировать возникновение «аварийного дефекта» или развитие «пожароопасного дефекта».**





СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

ООО «ТермоЭлектрика»
www.thermoelectrica.com
+7 (499) 130-62-30
info@thermoelectrica.com