

Методы и критерии обнаружения пожароопасных дефектов контактов и контактных соединений при эксплуатации электроустановок распределительных электрических сетей



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

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

Львов М.Ю.,

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

Состояние контактов и контактных соединений в процессе эксплуатации электроустановок в значительной степени определяется значением переходного контактного сопротивления. В процессе эксплуатации под влиянием различных факторов возможно увеличение переходного контактного сопротивления 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.

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

Нагрев контакта (контактного соединения) зависит не только от степени ухудшения переходного сопротивления, но и от значения протекающего тока, зависящего, в свою очередь, от нагрузки электроустановки, а также от температуры окружающего воздуха. Максимальный нагрев контакта (контактного соединения) будет происходить при максимальной нагрузке электроустановки и максимальной температуре окружающего воздуха.

Наибольшие допустимые значения температур нагрева для различных контактов и контактных соединений в процессе эксплуатации электроустановок приведены в различных ГОСТах и РД «Объем и нормы испытаний электрооборудования» [1]. Наибольшие допустимые значения температуры нагрева отличаются для различных материалов и видов контактов и контактных соединений [2].

В соответствии с РД «Объем и нормы испытаний электрооборудования» [1] в процессе эксплуатации электроустановок предусмотрен тепловизионный контроль контактов и контактных соединений электрооборудования и ЛЭП с применением тепловизоров. В ПАО «Россети» с 2017 года действует стандарт организации СТО 34.01-23.1-001-2017 «Объем и нормы испытаний электро-

ДИАГНОСТИКА И МОНИТОРИНГ



оборудования» [3], в котором требования по проведению тепловизионного контроля контактов и контактных соединений повторяют требования [1].

Тепловизионный контроль позволяет определять температуру нагрева контактов (контактных соединений) на момент проведения измерений. При обнаружении факта достижения наибольшего допустимого значения температуры нагрева контакта (контактного соединения) в соответствии с требованиями [1] следует констатировать наличие «аварийного дефекта».

Методология тепловизионного контроля, установленная в соответствии с [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.

С этой целью при проведении тепловизионного контроля контактов (контактных соединений) применяются соответствующие расчетные соотношения для оценки их состояния в зависимости от тока нагрузки электроустановки на момент измерений, а именно:

- оценка по температуре превышения при токах нагрузки $(0,6-1)I_{ном}$;
- оценка по избыточной температуре при токах нагрузки $(0,3-0,6)I_{ном}$.

Также указывается, что тепловизионный контроль электрооборудования и токоведущих частей при токах нагрузки $0,3I_{ном}$ и ниже не способствует выявлению дефектов.

В таблице 1 приведен сравнительный анализ применяемых в различных стандартах крите-

риев для выявления «аварийных дефектов» контактов (контактных соединений) по результатам тепловизионного контроля с использованием определения избыточной температуры и температуры превышения [2].

Результаты, приведенные в таблице 1, показывают значительные различия применяемых критериев для выявления «аварийных дефектов» контактов и контактных соединений по результатам тепловизионного контроля. Это связано с отсутствием достаточно обоснованных критериев для оценки состояния контактов (контактных соединений) как по температуре превышения, так и по избыточной температуре, а также с попыткой решения следующей проблемы: с одной стороны, попытаться не пропустить развитие аварийного дефекта, с другой стороны, избежать ложных отбраковок контактов (контактных соединений), которые на самом деле являются исправными.

Как известно, тепловизор не измеряет температуру, а регистри-

Табл. 1. Критерии для выявления «аварийных дефектов» контактов (контактных соединений)

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

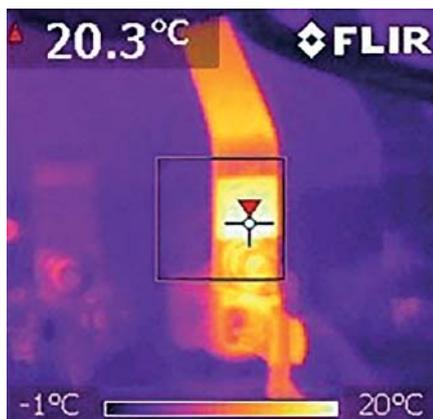


Рис. 1. Бесконтактный тепловизионный контроль

рует инфракрасное излучение, по результатам которого определяется поверхностная температура контролируемого элемента. При проведении тепловизионного контроля контактов (контактных соединений) 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 [4]. Следует отметить, что коэффициент излучения не только отличается для различных материалов, но и различается в зависимости от состояния поверхности.

Так, например, для меди в зависимости от состояния поверхности (медь окисленная, медь потемневшая, медь отполированная) значение коэффициента излучения может меняться от 0,76 до 0,03. При этом следует отметить, что в соответствии с ГОСТ Р 54852-2021 [5] термографирование (тепловизионное обследование) не рекомендуется проводить, если значение коэффициента 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 другими способами. Коэффициент излучения, а значит и результат определения температуры с помощью тепловизора, зависит также от угла обзора, под котором производится измерение.



Рис. 2. Контактный термоиндикаторный контроль

Проблемы достоверности оценки состояния контактов (контактных соединений) 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 [2, 4]. 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 (контактных соединений);
- если на момент проведения тепловизионного контроля ток нагрузки находится в диапазоне ниже $0,6I_{ном}$, то количество тепла, выделяемое на контакте (контактном соединении), является незначительным, и влияние таких факторов, как теплорассеяние, обдув, теплоизоляционные свойства материалов становятся доминирующими;
- оценка состояния контакта (контактного соединения) 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 $0,6I_{ном}$;
- при разнице температуры нагрева контакта (контактного

соединения) по сравнению с температурой окружающего воздуха менее 20°C и коэффициента излучения поверхности контакта (контактного соединения) ниже 0,7 достоверность оценки состояния контактов (контактных соединений) по результатам тепловизионного контроля резко снижается;

- относительно небольшая ошибка в измерениях значения тока нагрузки электроустановки на момент проведения тепловизионного контроля может вносить существенную ошибку в результаты оценки состояния контактов (контактных соединений) при определении температуры превышения и избыточной температуры, приведенных к нормируемым значениям тока нагрузки;
- ошибка в оценке избыточной температуры при ошибке в определении температуры нагрева контакта (контактного соединения) и тока нагрузки всего на несколько процентов может давать совершенно неправильную оценку состояния, а именно квалифицировать аварийный контакт (контактное соединение) как исправный, и наоборот квалифицировать исправный контакт (контактное соединение) как аварийный.

В практике эксплуатации электроустановок наряду с применением тепловизионного контроля (рисунок 1) в последние годы активно развивается применение контактного термоиндикаторного контроля с применением необратимых термоиндикаторных наклеек [6]. Термоиндикатор — это специальная наклейка, изготовленная из композиционного материала, изменяющая цвет при достижении заданной температуры. При этом значения пороговой температуры срабатывания термоиндикатора (изменение цвета при достижении определенной температуры) задаются при изготовлении (рисунок 2).

В настоящее время в системе нормативно-технических документов, действующих в электроэнергетике, отсутствуют единые методические указания по применению термоиндикаторного контроля для оценки состояния кон-

тактов (контактных соединений). Вместе с тем на основании накопленного опыта применения термоиндикаторов в последние годы в ряде крупных энергетических и промышленных компаний России были разработаны и введены в действие стандарты организаций (СТО), регламентирующие применение термоиндикаторного контроля для оценки состояния контактов и контактных соединений [7]. В России в практике эксплуатации электроустановок закрытых распределительных устройств, как правило, применяются четырехдиапазонные термоиндикаторные наклейки, что позволяет определить не только факт наличия «аварийного дефекта» контакта (контактного соединения), но и оценить степень развития дефекта.

Объективным критерием, имеющим детерминированную диагностическую ценность для оценки состояния контактов (контактных соединений), является значение температуры нагрева, а критерием наличия «аварийного дефекта» является достижение установленного наибольшего допустимого значения температуры нагрева контакта (контактного соединения) в процессе эксплуатации электроустановки.

На рисунке 3 приведена схема, поясняющая принцип работы необратимых термоиндикаторных наклеек, и методология оценки состояния контактов (контактных соединений) по результатам осмотра.

В таблице 2 приведены установленные в соответствии с [1]

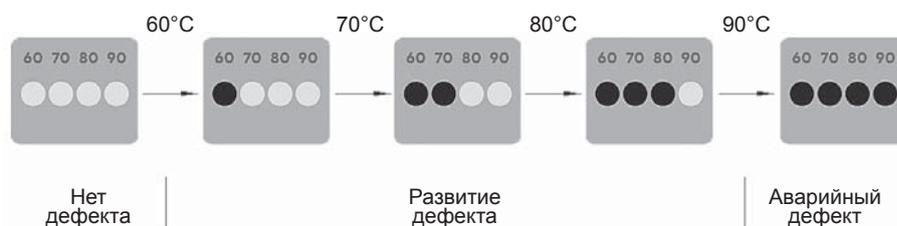


Рис. 3. Принцип работы и применения необратимых термоиндикаторных наклеек для оценки состояния контактов (контактных соединений)

нормируемые значения наибольшей допустимой температуры нагрева контактов (контактных соединений), а также рекомендуемые контролируемые диапазоны температуры термоиндикатора в зависимости от установленных допустимых значений температуры нагрева [7].

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

факторов целесообразности и эффективности применения термоиндикаторов для контроля состояния контактов и контактных соединений. Наличие срабатывания всех пороговых значений термоиндикатора однозначно свидетельствует о наличии «аварийного дефекта» контакта (контактного соединения), так как свидетельствует о достижении установленной наибольшей температуры нагрева.

В соответствии с требованиями [1] при проведении тепловизионного контроля состояния контактов (контактных соединений) применяется понятие «аварийный дефект». Следует отметить, что в соответствии с ГОСТ Р 27.102-2021 [8] определено понятие «дефект» — каждое отдельное несоответствие объекта требованиям, установленным в документации. При этом понятие «аварийный дефект» не применяется и не регламентируется.

Вместе с тем классификацию дефекта контакта (контактного соединения) при его развитии как «аварийный дефект» в значительной степени можно считать оправданным и целесообразным. Однако в этой связи необходимо правильно интерпретировать по-

Табл. 2. Наибольшая допустимая температура нагрева контактов (контактных соединений) в воздухе

Контролируемые узлы (контакты/контактные соединения в воздухе)	Наибольшее допустимое значение температуры нагрева, °С	Контролируемый диапазон температуры 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

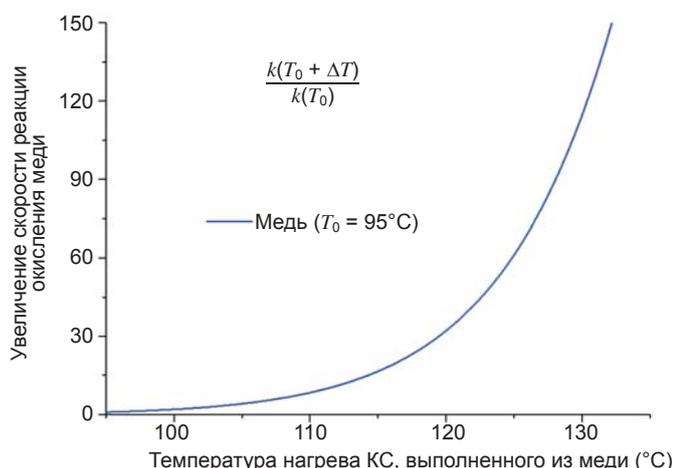


Рис. 4. Зависимость относительного увеличения константы скорости реакции окисления медного контактного соединения при росте температуры нагрева выше установленного значения допустимой температуры нагрева

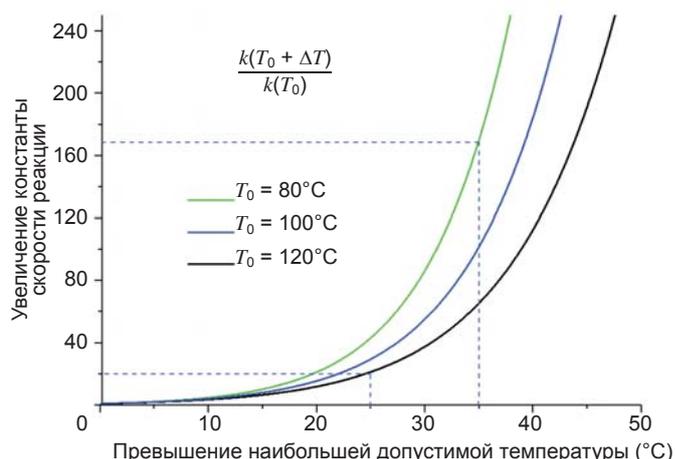


Рис. 5. Зависимость относительного увеличения константы скорости реакции окисления контактных соединений при превышении наибольшей температуры нагрева

нятие «аварийный дефект» контакта (контактного соединения). Необходимо подчеркнуть, что достижение установленного значения наибольшей допустимой температуры нагрева контакта (контактного соединения) следует рассматривать как признак наличия дефекта, который может привести к отказу оборудования при его дальнейшем развитии. При этом достижение установленного значения наибольшей допустимой температуры нагрева контакта (контактного соединения) не является пожароопасным нагревом и не приводит к возгоранию.

Увеличение переходного контактного сопротивления при росте температуры выше наибольшей

допустимой связано с развитием процесса окисления поверхности металлического проводника. Важно отметить, что скорость окисления металлов и, как следствие, скорость роста переходного контактного сопротивления в соответствии с законом Арениуса экспоненциально зависит от температуры. Пожароопасным нагревом следует считать нагрев контакта (контактного соединения) до значения температуры выше установленной допустимой температуры нагрева, при которой скорость развития дефекта резко ускоряется [8]. При достижении пожароопасного нагрева скорость развития дефекта становится непредсказуемой, что и приводит в дальнейшем к деструкции изо-

ляции, возникновению электрической дуги, оплавлению контакта (контактного соединения) и, в конечном счете, к возгоранию и пожару в электроустановке.

На рисунке 4 приведена зависимость относительного увеличения константы скорости реакции окисления медного контактного соединения при росте температуры нагрева. При достижении температуры нагрева контактного соединения значений температур в интервале 115–125°C наблюдается резкое ускорение скорости реакции окисления меди. Аналогичные зависимости имеют место также для контактных соединений, выполненных из других материалов.

На рисунке 5 приведена зависимость относительного уве-

Табл. 3. Показатели температуры пожароопасного нагрева контактов (контактных соединений) в воздухе

Контролируемые узлы (контакты / контактные соединения в воздухе)	Наибольшее допустимое значение температуры нагрева, °C	Температура пожароопасного нагрева, °C	Контролируемый диапазон температуры термоминдикатора, °C
Контакты из меди и медных сплавов:			
– без покрытий	75	105	50–60–70–80–120
– с накладными серебряными пластинами	120	150	70–90–100–120–150
– с покрытием серебром или никелем	105	135	60–80–90–110–140
– с покрытием серебром не менее 24 мкм	120	150	70–90–100–120–150
– с покрытием оловом	90	120	60–70–80–90–120
Аппаратные выводы из меди, алюминия и их сплавов, предназначенные для соединения с внешними проводниками:			
– без покрытия	90	120	60–70–80–90–120
– с покрытием оловом, серебром или никелем	105	135	60–80–90–110–140
Болтовые контактные соединения из меди, алюминия и их сплавов:			
– без покрытия	90	120	60–70–80–90–120
– с покрытием оловом	105	135	60–80–90–110–140
– с покрытием серебром или никелем	115	145	70–90–100–120–150

личения константы скорости реакции окисления контактных соединений из различных материалов, наиболее часто применяемых в электроустановках, при превышении наибольшей температуры нагрева.

Приведенная зависимость показывает, что при превышении установленной допустимой температуры нагрева на 25–35°C резко возрастает скорость реакции окисления. Как следствие происходит значительное увеличение переходного сопротивления и создаются условия для возникновения пожароопасного нагрева, который в дальнейшем может привести к возгоранию и пожару в электроустановке.

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

С целью совершенствования методологии теплового контроля состояния контактов (контактных соединений) представляется целесообразным наряду с установ-

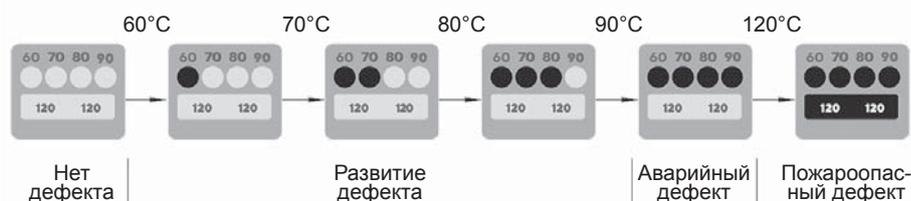


Рис. 6. Методология оценки состояния контактов (контактных соединений) по результатам осмотра для выявления «аварийных дефектов» и «пожароопасных дефектов»

ленными нормативными значениями наибольшей допустимой температуры нагрева, характеризующей наличие «аварийного дефекта», ввести температуру пожароопасного нагрева контакта (контактного соединения), а также при применении термоиндикаторного контроля ввести дополнительное пороговое значение, при достижении которого возникают условия развития «пожароопасного дефекта».

В таблице 6 приведены нормируемые значения наибольшей допустимой температуры нагрева, а также рекомендуемые значения температуры пожароопасного нагрева контактов (контактных соединений) и рекомендуемые контролируемые диапазоны температуры термоиндикатора.

На рисунке 6 приведена схема, поясняющая принцип работы необратимых термоиндикаторных наклеек, и методология оценки состояния контактов (контактных соединений) по результатам осмотра для выявления «аварийных дефектов» и «пожароопасных дефектов».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

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

3. Термоиндикатор за счет непрерывности контроля теплового состояния и необратимости срабатывания позволяет зафиксировать факт достижения (либо недостижения) установленных пороговых значений температур нагрева контакта (контактного соединения) в любой момент эксплуатации при визуальном осмотре.

ЛИТЕРАТУРА

1. РД 34.45-51.300-97. Объем и нормы испытаний электрооборудования. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 1998. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200005329>.
2. Львов М.Ю., Никитина С.Д., Львов Ю.Н., Лесив А.В., Серебрянников Е.Е., Рябиков А.И., Назаров А.А. Методы контроля и выявления пожароопасных дефектов контактов и контактных соединений при эксплуатации электроустановок // Электрические станции, 2024, № 4. С. 35–45.
3. СТО 34.01-23.1-001-2017. Объем и нормы испытаний электрооборудования. Стандарт ПАО «Россети». URL: <https://svel.ru/tekhnicheskaya-dokumentaciya/otraslevye-standarty/sto-34-01-23-1-001-2017/>.
4. 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.
5. ГОСТ Р 54852-2021. Здания и сооружения. Метод тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200182066>.
6. 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(1099). С. 44–51.
7. 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.
8. ГОСТ Р 27.102-2021. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200181141>.