



12_2.4.5_2931_Крю
ков_138-148.doc



УДК 621.311

DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-2-68-77

ТЕПЛОВИЗИОННЫЙ КОНТРОЛЬ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Шпиганович А.Н.¹, Шпиганович А.А.¹, Петров А.Р.^{2*}, Грачева Е.И.²

¹Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия

²Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

petroval13@mail.ru*

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ. Тепловизионное обследование используется для контроля технического состояния электрооборудования, а также контактов и контактных соединений коммутационных аппаратов, что позволяет повысить эффективность работы. ЦЕЛЬ. Своевременное выявление дефектов контактов и контактных соединений низковольтных коммутационных аппаратов для предотвращения возникновения аварийных ситуаций. МЕТОДЫ. Определение и контроль технического состояния электрооборудования, контактов и контактных соединений аппаратов в реальном времени с помощью индикаторов и тепловизионного контроля. РЕЗУЛЬТАТЫ. Произведен анализ значений температур нагрева контактов от материала и вида контактных соединений. Определены критерии оценки состояния контактов коммутационных аппаратов с помощью индикаторов их состояния. Получены оптимальные значения коэффициентов загрузки автоматического выключателя в литом корпусе ВА04 и контакторов КМИ и КТИ. Показаны аварийные случаи на промышленном объекте, которые доказывают необходимость применения индикаторов и тепловизионного обследования как одного из инструментов автоматизации контроля технического состояния низковольтного электрооборудования. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Предлагаемый бесконтактный метод оценки и контроля технического состояния электрооборудования, контактов и контактных соединений аппаратов в реальном времени с помощью индикаторов и тепловизионного контроля позволяет как получать данные в режиме реального времени, так и увеличивать межремонтные периоды для энергетического оборудования и повышать надежность работы всей системы в целом.

Ключевые слова: электрическая сеть; тепловизионный контроль; индикаторы; дефекты оборудования; коммутационные аппараты; контактные соединения.

Для цитирования: Шпиганович А.Н., Шпиганович А.А., Петров А.Р., Грачева Е.И. Тепловизионный контроль электрооборудования промышленных предприятий // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 2. С. 68-77. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-68-77.

THERMAL IMAGING CONTROL OF ELECTRICAL EQUIPMENT OF INDUSTRIAL ENTERPRISES

Shpiganovich¹ A.N., Shpiganovich¹ A.A., Petrov^{2*} A.R., Gracheva² E.I.

¹Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

petroval13@mail.ru*

Abstract: RELEVANCE. Thermal imaging control is used to monitor the technical condition of electrical equipment, as well as contacts and contact connections of switching devices, which allows to increase the efficiency of work. OBJECT. Timely detection of defects of contacts and contact connections of low-voltage switching devices to prevent emergencies. METHODS. Determination and control of technical condition of electrical equipment, contacts and contact connections of apparatuses in real time by means of indicators and thermal imaging control.

RESULTS. The values of contact heating temperatures from material and type of contact connections were analysed. The criteria for estimation of the state of contacts of switching devices with the help of indicators of their state have been determined. The optimum values of loading coefficients of the circuit breaker in moulded case VA04 and contactors KMI and KTI are obtained. Emergency cases at the industrial object are shown, which prove the necessity of application of indicators and thermal imaging control as one of the tools of automation of technical condition control of low-voltage electrical equipment. CONCLUSIONS. The offered non-contact method of estimation and control of technical condition of electrical equipment, contacts and contact connections of devices in real time with the help of indicators and thermal imaging control allows both to receive data in real time mode and to increase inter-repair periods for power equipment and to increase reliability of operation of the whole system.

Keywords: *electrical network; thermal imaging control; indicators; equipment defects; switching devices; contact connections.*

For citation: Shpiganovich A.N., Shpiganovich A.A., Petrov A.R., Gracheva E.I. Thermal imaging control of electrical equipment of industrial enterprises. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (2): 68-77. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-68-77.

Введение (Introduction)

Одним из эффективных методов контроля технического состояния электрооборудования и коммутационных аппаратов является тепловизионное обследование. К достоинствам данного вида контроля относятся требуемая степень точности, время проведения диагностики, предоставление наиболее полной информации о контролируемом узле или объекте, а также непрерывность самого наблюдения. Далее приведены некоторые научные работы, посвященные исследованиям в данной области.

Зарипова А. Д., Зарипов Д. К., Усачев А. Е. в [1] показали методику тепловизионного контроля для выявления дефектов электрооборудования. Для диагностируемых узлов оборудования определены степени их неисправности в зависимости от установленных значений превышения избыточных температур.

Львов М.Ю., Никитина С.Д., Лесив А.В. в [2] сравнили принципы оценки теплового состояния контактных соединений оборудования и предложили методологию применения термоиндикаторов для контроля их состояния.

Авторами Мамонтовым А.Н., Пушницей К.А. в [3] сформирован перечень обследуемых узлов, а также определены особенности проведения тепловизионной диагностики реакторов напряжением до и выше 1000 В, а Мамонтов А.Н., Рычков А.В., Астанин С.С. в [4] представили результаты тепловизионного контроля трансформаторов тока и трансформаторов напряжения и исследовали их различные дефекты.

Федотов А. И., Грачева Е. И., Наумов О. В. в [5] предложили критерий оценки технического состояния контактных соединений низковольтных коммутационных аппаратов по результатам тепловизионного контроля, позволяющий учесть динамику изменения потерь в низковольтных сетях, а Шпигановичем А. Н., Мамонтовым А. Н., Бойчевским А. В. в [6] разработана методика тепловизионного контроля конденсаторов и высокочастотных заградителей с рассматриваемыми сроками устранения дефектов.

Шпигановичем А. Н. и Мамонтовым А. Н. в [7] исследованы особенности проведения тепловизионного контроля разъединителей и установлено количество контролируемых точек электрооборудования, приведено описание режима работы при возникновении дефекта и термограммы дефектов разъединителей.

Andrei P., Cazacu E., Stanculescu M., Andrei H., Caciula I., Drosu O. в [8] исследовали в лабораторных условиях техническое состояние контактов и контактных соединений низкого напряжения с учетом нагрева. Результаты измерений использованы для разработки математических моделей зависимости температуры контактов и контактных соединений от времени и типа нагрузки. Эти модели используются для оптимального выбора типов контактных соединений между проводниками и коммутационными аппаратами.

Авторы Bhagat A. K., Chauhan A. в [9] предлагают тепловизионное обследование в качестве одного из методов диагностики неисправностей асинхронного электродвигателя напряжением до 1000В.

Dragomir A., Adam M., Antohi S.-M., Atanasoaei M., Pantiru A. В [10] представили методику мониторинга и диагностики тепловых нагрузок высоковольтного электрооборудования с помощью инфракрасной техники.

Hadzhiev I., Malamov D., Kolev N., Balabozov I., Yatchev I. B [11] показали результаты исследований распределения температуры по поверхности ножевых контактов и корпуса низковольтного предохранителя. Авторами исследовано влияние тока и контактного сопротивления на нагрев предохранителя и время его срабатывания.

Pareek S., Sharma R., Maheshwari R. в [12] анализируют возможность применения нейронной сети для проверки электрических узлов и классификации их теплового состояния. Предложенное решение позволяет расширить функциональные возможности диагностики за счет сокращения времени работы, уменьшения трудозатрат и повышения надежности системы.

Petrov A. R., Gracheva E. I., Sinyukova T., Valtchev S., Miceli R., Rahman A. U. в [13] исследовали параметры, определяющие величину потерь мощности в низковольтной коммутационной аппаратуре. Результаты работы, дополненные данными тепловизионных обследований, могут быть использованы для уточнения значения потерь электроэнергии в цеховой сети.

Wei C. в [14] предлагает метод диагностики тепловых повреждений электросетевых объектов, в частности, силовых трансформаторов. Система позволяет оценить их техническое состояние по данным инфракрасной тепловизионной съемки.

Исследователи Zhu-Mao L., Qing L., Tao J., Yong-Xin L., Yu H., Yang B. в [15] разработали систему обнаружения тепловых неисправностей высоковольтного электрооборудования на основе анализа инфракрасных изображений.

Как показывает отечественный и зарубежный опыт, в настоящее время требуются новые усовершенствованные подходы к оценке технического состояния элементов электрооборудования и коммутационных аппаратов внутрицехового электроснабжения.

Научной и практической значимостью статьи является своевременное выявление дефектов электрооборудования и контактных соединений низковольтных коммутационных аппаратов (НКА) для предотвращения возникновения аварийных ситуаций.

В настоящее время в электроэнергетике наблюдается переход от системы планово-предупредительных ремонтов к ремонтам по фактическому состоянию оборудования при использовании универсальных средств технической диагностики, к которым относятся современные тепловизионные приборы. Полученные термографические изображения позволяют выявить различные дефектные состояния контактов НКА. При этом возможно увеличивать технический ресурс электрооборудования за счёт своевременного выявления дефектов на ранней стадии развития. На рисунке 1 представлены основные виды неисправностей в системе контактных соединений НКА, которые выявляются при помощи тепловизионного обследования.



Рис. 1. Виды неисправностей в контактных системах аппаратов и кабелей *Fig. 1. Types of faults in the contact systems of apparatus and cables*

**Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.*

Материалы и методы (Materials and methods)

При эксплуатации оборудования и НКА могут возникать неисправности, такие, как нарушение работы контактной системы, отключение из-за перегрузок в цепи и др. Данные отказы могут служить причиной размыкания цепи питания катушек контакторов, реле, электромагнитов, в результате чего аппараты повторно не могут включиться в работу. Одним из эффективных средств выявления неисправностей в контактных соединениях НКА является тепловизионный контроль.

Значения температуры нагрева контактов зависит от материала и вида контактных соединений. На основании ГОСТ 403-73 произведем разграничение температуры нагрева контактов НКА на индикаторы. Критерий оценки теплового состояния контактов НКА с помощью индикаторов является дополнением к данному стандарту, обеспечивающего формирования четкого алгоритма для автоматизации систем тепловизионного контроля.

Индикатор «контроль» соответствует допустимой температуре нагрева контактных соединений, которую следует держать под контролем. Индикатор «опасно» обязывает принять необходимые меры по устранению неисправности при ближайшем выводе оборудования в ремонт. Индикатор «дефект» – аварийное состояние, которое требует незамедлительного устранения. В таблице 1 приведены «индикаторы» в зависимости от температуры нагрева контактов НКА. Данные, представленные в таблице, актуальны для продолжительного режима работы аппаратов при температуре окружающей среды 40 °С.

Стоит также отметить, что представленные значения в таблице могут корректироваться – по определенным причинам. Это связано как с техническим прогрессом в тепловизионном обследовании оборудования, так и с ужесточением требований к допустимым температурам различных элементов аппаратов.

Для реализации системы контроля технического состояния НКА с помощью тепловизоров и индикаторов состояния необходимо реализовать автоматизированные программы, которые по заданным критериям в реальном времени будут контролировать состояние аппаратов и при отклонениях от параметров сигнализировать техническому персоналу на объекте о недопустимом состоянии.

Таблица 1
Table 1

Критерии оценки состояния контактов аппаратов по температуре нагрева
Criteria for assessing the condition of apparatus contacts by heating temperature

Контролируемый узел	Индикатор		
	«контроль»	«опасно»	«дефект»
Контакты главной цепи: – из меди без покрытия – покрытые серебром / с накладками из серебра – скользящие с накладками из серебра	до 45° до 200° до 80°	45°-85° 200°-240° 80°-120°	более 85° более 240° более 120°
Контакты вспомогательной цепи с накладками из серебра	до 80°	80°-120°	более 120°
Контакты внутри НКА (кроме паяных и сварных): – из меди, алюминия без покрытия от коррозии – из меди, алюминия с покрытием от коррозии – из меди с покрытием из серебра	до 55° до 65° до 95°	55°-95° 65°-105° 95°-135°	более 95° более 105° более 135°
Контакты внутри НКА (паяные мягким припоем – пайка обеспечивает механическую прочность)	до 60°	60°-100°	более 100°
Контакты внутри НКА (паяные мягким припоем – пайка частично обеспечивает механическую прочность)	индивидуально для каждого НКА		
Контакты внутри НКА (паяные твердым припоем / сварные)	не нормируется		
Контакты выводов НКА, предназначенные для соединения с внешними проводниками: – из меди, алюминия без защитных покрытий – с покрытием благородными металлами – из меди с покрытием из серебра	до 55° до 70° до 95°	55°-95° 70°-110° 95°-135°	более 95° более 110° более 135°

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Рассмотренный метод определения дефектного состояния контактов и контактных соединений НКА с помощью индикаторов позволит сократить время обнаружения и устранения неисправности для предотвращения аварийных ситуаций. Также наиболее рационально планировать действия при планово-предупредительных ремонтах и эффективно эксплуатировать как коммутационные аппараты, так и сеть электроснабжения в целом.

Обсуждение результатов (Discussing the results)

Одним из основных показателей, влияющих на продолжительность функционирования НКА, является режим работы с учетом коэффициента загрузки Кз. Определим наиболее оптимальное значение данного параметра с помощью рассмотренных

выше индикаторов. Для исследования выбраны одни из наиболее распространенных и используемых в системах электроснабжения промышленных предприятий г. Казани аппаратов: автоматический выключатель в литом корпусе ВА04 Курского электроаппаратного завода (КЭАЗ) и контакторы КМИ и КТИ фирмы ИЕК.

Выражение для определения расчетным способом значение температуры нагрева контакта имеет вид

$$T = \frac{I^2 \cdot \rho + \nu_0 \cdot F \cdot k_T \cdot S}{F \cdot k_T \cdot S - I^2 \cdot \rho \cdot \alpha}, \text{ } ^\circ\text{C}$$

где I – ток, проходящий через контакты, А;
 ρ – удельное электрическое сопротивление, Ом·м;
 ν_0 – температура окружающей среды, $^\circ\text{C}$;
 F – охлаждающая поверхность проводника, m^2 ;
 k_T – коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;
 S – площадь поперечного сечения контактов, m^2 ;
 α – температурный коэффициент сопротивления.

Для выключателя ВА04 на номинальный ток 16 А расчетное значение температуры составит

$$T = \frac{16^2 \cdot 1,7 \cdot 10^{-8} + 35 \cdot 2(2,8 + 2,8) \cdot 10^{-3} \cdot 16 \cdot 2,8 \cdot 2,8 \cdot 10^{-6}}{2(2,8 + 2,8) \cdot 10^{-3} \cdot 16 \cdot 2,8 \cdot 2,8 \cdot 10^{-6} - 16^2 \cdot 1,7 \cdot 10^{-8} \cdot 0,0043} = 38,6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Результаты расчетов температуры контактов и контактных соединений для автоматических выключателей и контакторов приведены в таблице 2.

Таблица 2

Table 2

Результаты расчетов температуры контактов аппаратов
 Results of calculations of apparatus contact temperature

Аппарат	Ток, А	Кз	Температура контактов, $^\circ\text{C}$
Автоматический выключатель ВА04	16	1,0	38,6
	32		40,8
	40		44,3
	50		49,8
Контактор КМИ	25		40,7
	40		41,6
Контактор КТИ	250		41,5
	400		43

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На рисунке 2 представлены графические зависимости температуры контактных площадок T от коэффициента загрузки K_z для автоматического выключателя марки ВА04 с номинальным током 16 А, 32 А, 40 А и 50 А.

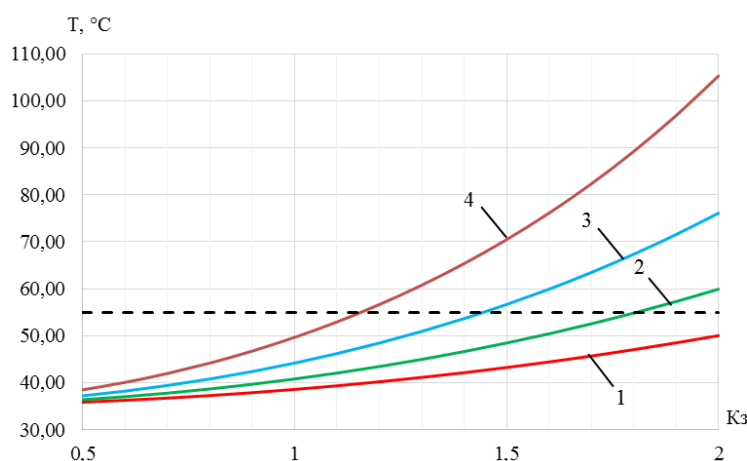


Рис. 2. Зависимости температуры нагрева контактов автоматического выключателя ВА04 от K_z : 1 – $I_{ном} = 16$ А; 2 – $I_{ном} = 32$ А; Fig. 2. Dependence of heating temperature of contacts of circuit breaker VA04 on K_z : 1 – $I_{nom} = 16$ А; 2 – $I_{nom} = 32$ А;

$3 - I_{ном} = 40 \text{ А}; 4 - I_{ном} = 50 \text{ А}$

$3 - I_{ном} = 40 \text{ А}; 4 - I_{ном} = 50 \text{ А}$

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На основании таблицы 1 индикатор «опасно» для исследуемого аппарата находится при значении $55 \text{ }^\circ\text{C}$. Значение коэффициента загрузки для автоматического выключателя на $I_{ном} = 50 \text{ А}$, при котором не происходит процесс разрушения контактов составляет $Kз = 1,15$, а максимальное значение перегрузки, при котором контактные соединения переходят в состоянии дефекта, составляет $Kз = 1,15-1,9$. Для $I_{ном} = 40 \text{ А}$ загрузка аппарата допускается до $Kз = 1,45$, при загрузке выше может произойти дефект. Аппарат на $I_{ном} = 32 \text{ А}$ выдерживает загрузку до $Kз = 1,8$ без дефектного состояния, у ВА04 на $I_{ном} = 16 \text{ А}$ двукратная загрузка не повлияла на состояние контактов.

Исследуем контакторы фирмы ИЕК на номинальные токи 25 А , 40 А , 250 и 400 А . Результаты для контакторов КМИ приведены на рисунке 3, для контакторов КТИ на рисунке 4.

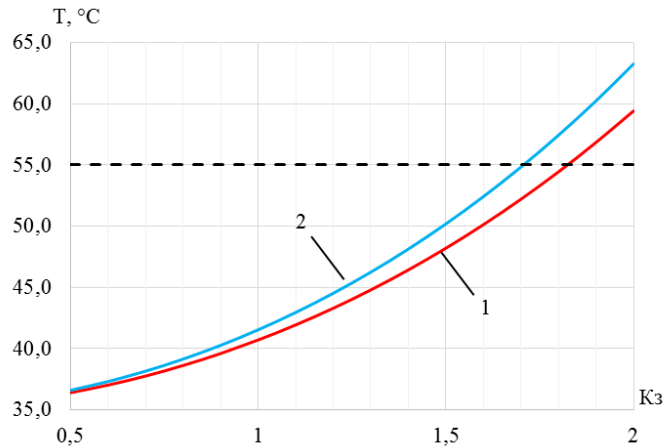


Рис. 3. Зависимости температуры нагрева контактов контактора КМИ от $Kз$:

1 – $I_{ном} = 25 \text{ А}$; 2 – $I_{ном} = 40 \text{ А}$

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Fig. 3. Dependences of contactor KMI heating temperature on Kz :

1 – $I_{ном} = 25 \text{ А}$; 2 – $I_{ном} = 40 \text{ А}$

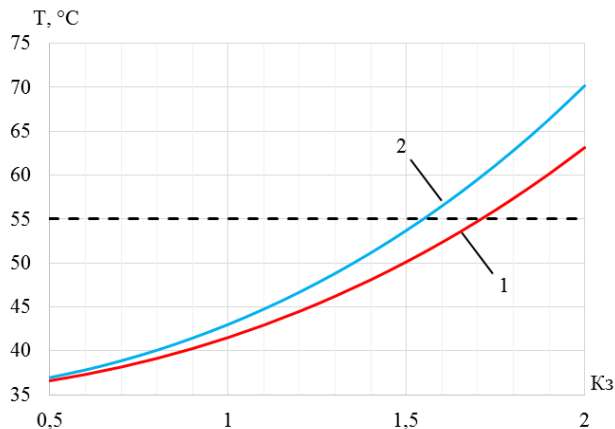


Рис. 4. Зависимости температуры нагрева контактов контактора КТИ от $Kз$:

1 – $I_{ном} = 250 \text{ А}$; 2 – $I_{ном} = 400 \text{ А}$

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Fig. 4. Dependences of contactor KTI heating temperature on Kz :

1 – $I_{ном} = 250 \text{ А}$; 2 – $I_{ном} = 400 \text{ А}$

Индикатор «опасно» также находится при значении $55 \text{ }^\circ\text{C}$. Для контакторов КМИ на токи 25 А оптимальная загрузка составляет до $Kз = 1,8$, для аппарата на номинальный ток 40 А допустимая перегрузка $Kз = 1,7$.

Оптимальная загрузка контактора КТИ с $I_{ном} = 400 \text{ А}$ составляет $Kз = 1,55$, при загрузке выше возможен переход в состояние дефекта. Аппарат с $I_{ном} = 250 \text{ А}$ выдерживает загрузку $Kз = 1,7$ без проявления дефекта.

Далее рассмотрим практическое применение предложенного метода с помощью индикаторов. Покажем применение термографической техники в аварийной ситуации, в результате которой произошло возгорание с последующим задымлением питающего кабеля

электродвигателя насосной станции цеха водоснабжения. Причиной повреждения стало отключение контактора системы управления насосом. Выход из строя контактора происходит в результате одно- либо двухфазных замыканий на землю.

На практике доказано, что по достижении температуры, свыше 95 °С, контактным соединением происходит отказ. Покажем термограмму ввода автоматического выключателя (рис. 5) и термограмму контактов трансформатора тока (рис. 6).

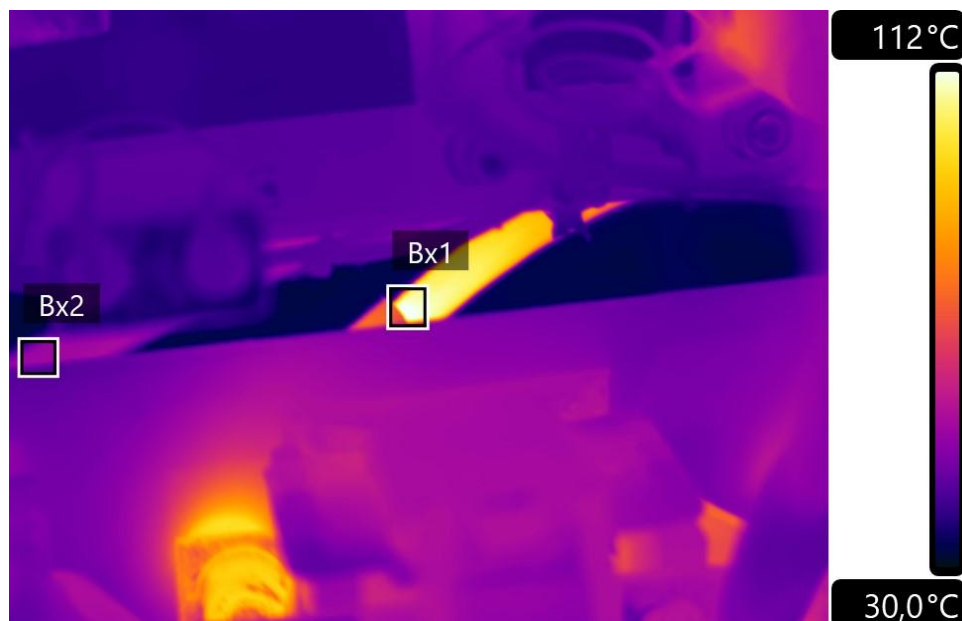


Рис. 5. Термограмма ввода автоматического выключателя *Fig. 5. Thermogram of circuit breaker entry*

*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

Рисунок 5 показывает, что максимальная температура контролируемого узла составляет 112 °С, это значительно выше значения индикатора «дефект», соответствующего 95 °С.

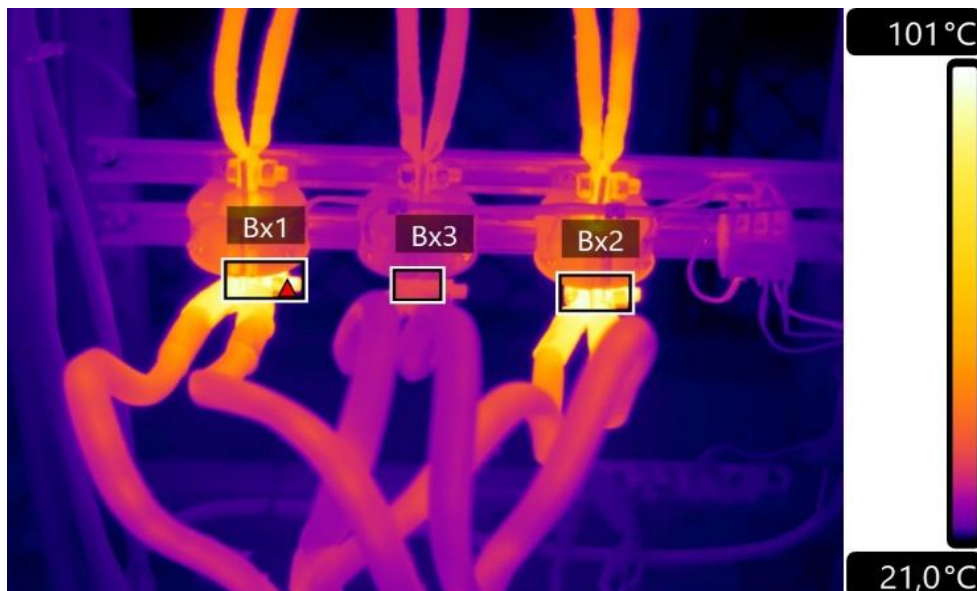


Рис. 6. Термограмма контактов трансформатора тока *Fig. 6. Thermogram of current transformer contacts*

*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

Термограмма контактов, представленная на рисунке 6, показывает, что максимальная температура контролируемого узла составила 101 °С, что также выше значения индикатора «дефект», соответствующего 95 °С.

Рассмотренные аварийные случаи на промышленном объекте доказывают необходимость применения индикаторов и тепловизионного контроля как одного из инструментов автоматизации для предотвращения аварийных ситуаций в будущем.

Заключение (Conclusions)

Исследование технического состояния контактов НКА показало, что из-за образования на поверхности проводников плёнок в ряде случаев происходит недопустимое повышение температуры контактного соединения. В результате этого возрастает сопротивление аппаратов по отношению к начальному значению. Тепловизионный контроль НКА обладает достаточной эффективностью при определении неисправностей, влияющих на функционирование всей системы электроснабжения низковольтных потребителей. Исследование позволяет оценить величину потерь в контактных соединениях, а также уточнить величину потерь электроэнергии в сетях, что планируется авторами показать в дальнейших работах.

Метод определения дефекта с помощью индикаторов рассматривается как основа автоматизации системы контроля за техническим состоянием аппаратов в реальном времени. Предлагается использовать метод при периодическом тепловизионном обследовании техническим персоналом на объектах промышленного и гражданского назначения.

Предложенный метод позволит достаточно точно рассчитать экономический ущерб от потери питания приемников электрической энергии, так как от этого зависит техническое состояние и уровень надежности наиболее ответственных узлов. Предлагаемый метод в совокупности с другими мерами способствует поддержанию должного уровня электробезопасности на объектах промышленного использования.

Литература

1. Зарипова А.Д., Зарипов Д.К., Усачев А.Е. Критерии выявления дефектов оборудования для тепловизионной системы контроля электрической подстанции // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2017;19(5-6):51-57. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2017-19-5-6-51-57>.
2. 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. doi:<http://dx.doi.org/10.34831/EP.2023.1099.2.008>.
3. Мамонтов А. Н., Пушница К. А. Тепловизионный контроль реакторов // Вестник БГТУ имени В. Г. Шухова. 2019. №8. С. 145-151. DOI: 10.34031/article_5d4d7a2f4f7a33.36054500.
4. Мамонтов А. Н., Рычков А. В., Астанин С. С. Тепловизионный контроль трансформаторов тока и трансформаторов напряжения // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2016. № 4 (46). С. 9-18.
5. Федотов А. И., Грачева Е. И., Наумов О. В. Оценка технического состояния контактных соединений низковольтных коммутационных аппаратов по данным тепловизионного контроля // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2005. №9-10. С. 47-55.
6. Шпиганович А. Н., Мамонтов А. Н., Бойчевский А. В. Тепловизионный контроль конденсаторов и высокочастотных заградителей // Вестник ТГТУ. 2020. Т.26. №4 С. 555-563. DOI: 10.17277/vestnik.2020.04.pp.555-563.
7. Шпиганович А. Н., Мамонтов А. Н. Тепловизионный контроль разъединителей // Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. №3. С. 74-79. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-3-74-79.
8. Andrei P., Cazacu E., Stanculescu M., Andrei H., Caciula I., Drosu O. Thermal Behavior of Electrical Contact for Different AC Loads // 2023 10th International Conference on Modern Power Systems (MPS), Cluj-Napoca, Romania, 2023, pp. 1-4, DOI: 10.1109/MPS58874.2023.10187457.
9. Bhagat A. K., Chauhan A. Thermal Image-Based Fault Analysis of Induction Motors using a Novel Machine Learning Model // 2022 11th International Conference on System Modeling & Advancement in Research Trends (SMART), Moradabad, India, 2022, pp. 1429-1433, DOI: 10.1109/SMART55829.2022.10046714.
10. Dragomir A., Adam M., Antohi S.-M., Atanasoaei M., Pantiru A. Monitoring and Diagnosis of Electrical Equipment by Infrared Thermography // 2022 International Conference and Exposition on Electrical And Power Engineering (EPE), Iasi, Romania, 2022, pp. 516-520, DOI: 10.1109/EPE56121.2022.9959756.
11. Hadzhiev I., Malamov D., Kolev N., Balabozov I., Yatchev I. Thermal Diagnostics of a High Power Fuse with Thermovision Camera // 2022 International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME), Maldives, Maldives, 2022, pp. 1-4, DOI: 10.1109/ICECCME55909.2022.9988120.
12. Pareek S., Sharma R., Maheshwari R. Application of artificial neural networks to monitor thermal condition of electrical equipment // 2017 3rd International Conference on Condition Assessment Techniques

in Electrical Systems (CATCON), Rupnagar, India, 2017, pp. 183-187, DOI: 10.1109/CATCON.2017.8280208.

13. Petrov A. R., Gracheva E. Ivanovna, Sinyukova T., Valtchev S., Miceli R., Rahman A. U. Simulation of the Functional Characteristics of Low-Voltage Switching Devices, Based on the Example of Automatic Circuit Breakers // 2023 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP), Terrasini, Italy, 2023, pp. 690-695, DOI: 10.1109/ICCEP57914.2023.10247405.

14. Wei C. Power Grid Facility Thermal Fault Diagnosis via Object Detection with Synthetic Infrared Imagery // 2021 3rd International Conference on Electrical Engineering and Control Technologies (CEECT), Macau, Macao, 2021, pp. 217-221, DOI: 10.1109/CEECT53198.2021.9672631.

15. Zhu-Mao L., Qing L., Tao J., Yong-Xin L., Yu H., Yang B. Research on Thermal Fault Detection Technology of Power Equipment based on Infrared Image Analysis // 2018 IEEE 3rd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC), Chongqing, China, 2018, pp. 2567-2571, DOI: 10.1109/IAEAC.2018.8577908.

Авторы публикации

Штиганович Александр Николаевич – д-р. техн. наук, профессор кафедры «Электрооборудование» Липецкого государственного технического университета. ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-1124-7901>. san@stu.lipetsk.ru.

Штиганович Алла Александровна – д-р. техн. наук, профессор кафедры «Электрооборудование», профессор кафедры «Экономика» Липецкого государственного технического университета. ORCID*: <https://orcid.org/0009-0009-5528-6652>. saa@stu.lipetsk.ru.

Петров Алмаз Радикович – аспирант Казанского государственного энергетического университета. ORCID*: <https://orcid.org/0009-0008-4497-4807>. petroval13@mail.ru.

Грачева Елена Ивановна – д-р. техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета. ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-5379-847X>. gracheva.i@bk.ru.

References

1. Zaripova A.D., Zaripov D.K., Usachev A.E. Criteria for equipment defects for thermal power substation control system. Power engineering: research, equipment, technology. 2017;19(5-6):51-57. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2017-19-5-6-51-57>.

2. L'vov M.YU., Nikitina S.D., Lesiv A.V. Methodological principles of monitoring the condition of contacts and contact connections during the operation of electrical equipment using thermal indicators. Electrical stations. 2023. n. 2, pp. 44-51. (In Russ.) doi:<http://dx.doi.org/10.34831/EP.2023.1099.2.008>.

3. Mamontov A.N., Puschnitsa K.A. Thermal control of reactors. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 8. pp. 145–151. DOI: 10.34031/article_5d4d7a2f4f7a33.36054500. (In Russ.)

4. Mamontov A. N., Rychkov A. V., Astanin S. S. Thermal imaging control of current and voltage transformers. News of higher educational institutions of the Chernozem region. 2016. No. 4 (46). pp. 9-18. (In Russ.)

5. Fedotov A. I., Gracheva E. I., Naumov O. V. Assessment of the technical condition of contact connections of low-voltage switching devices according to thermal imaging control data. Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS. 2005. № 9-10. pp. 47-55. (In Russ.)

6. Shpiganovich A. N., Mamontov A. N., Boychevsky A. V. Thermal Control of Capacitors and High Frequency Restrainers. Bulletin of Tambov State Technical University. 2020. vol. 26, no. 4, pp. 555-563. (In Russ.) DOI: 10.17277/vestnik.2020.04.pp.555-563.

7. Shpiganovich A. N., Mamontov A. N. Thermal control of disconnectors. News of Tula State University. Technical science. 2021. №3. pp. 74-79. (In Russ.) DOI: 10.24412/2071-6168-2021-3-74-79.

8. Andrei P., Cazacu E., Stanculescu M., Andrei H., Caciula I., Drosu O. Thermal Behavior of Electrical Contact for Different AC Loads // 2023 10th International Conference on Modern Power Systems (MPS), Cluj-Napoca, Romania, 2023, pp. 1-4, DOI: 10.1109/MPS58874.2023.10187457.

9. Bhagat A. K., Chauhan A. Thermal Image-Based Fault Analysis of Induction Motors using a Novel Machine Learning Model // 2022 11th International Conference on System Modeling & Advancement in Research Trends (SMART), Moradabad, India, 2022, pp. 1429-1433, DOI: 10.1109/SMART55829.2022.10046714.

10. Dragomir A., Adam M., Antohi S.-M., Atanasoaei M., Pantiru A. Monitoring and Diagnosis of Electrical Equipment by Infrared Thermography // 2022 International Conference and Exposition on

Electrical And Power Engineering (EPE), Iasi, Romania, 2022, pp. 516-520, DOI: 10.1109/EPE56121.2022.9959756.

11. Hadzhiev I., Malamov D., Kolev N., Balabozov I., Yatchev I. Thermal Diagnostics of a High Power Fuse with Thermovision Camera // 2022 International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME), Maldives, Maldives, 2022, pp. 1-4, DOI: 10.1109/ICECCME55909.2022.9988120.

12. Pareek S., Sharma R., Maheshwari R. Application of artificial neural networks to monitor thermal condition of electrical equipment // 2017 3rd International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems (CATCON), Rupnagar, India, 2017, pp. 183-187, DOI: 10.1109/CATCON.2017.8280208.

13. Petrov A. R., Gracheva E. Ivanovna, Sinyukova T., Valtchev S., Miceli R., Rahman A. U. Simulation of the Functional Characteristics of Low-Voltage Switching Devices, Based on the Example of Automatic Circuit Breakers // 2023 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP), Terrasini, Italy, 2023, pp. 690-695, DOI: 10.1109/ICCEP57914.2023.10247405.

14. Wei C. Power Grid Facility Thermal Fault Diagnosis via Object Detection with Synthetic Infrared Imagery // 2021 3rd International Conference on Electrical Engineering and Control Technologies (CEECT), Macau, Macao, 2021, pp. 217-221, DOI: 10.1109/CEECT53198.2021.9672631.

15. Zhu-Mao L., Qing L., Tao J., Yong-Xin L., Yu H., Yang B. Research on Thermal Fault Detection Technology of Power Equipment based on Infrared Image Analysis // 2018 IEEE 3rd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC), Chongqing, China, 2018, pp. 2567-2571, DOI: 10.1109/IAEAC.2018.8577908.

Authors of the publication

Alexander N. Shpiganovich – Lipetsk State Technical University. ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-1124-7901>. san@stu.lipetsk.ru.

Alla A. Shpiganovich – Lipetsk State Technical University. ORCID*: <https://orcid.org/0009-0009-5528-6652>. saa@stu.lipetsk.ru.

Almaz R. Petrov – Kazan State Power Engineering University. ORCID*: <https://orcid.org/0009-0008-4497-4807>. petroval13@mail.ru.

Elena I. Gracheva – Kazan State Power Engineering University. ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-5379-847X>. grachieva.i@bk.ru.

Шифр научной специальности: 2.4.2 Электротехнические комплексы и системы.

Получено **19.03.2024 г.**

Отредактировано **04.04.2024 г.**

Принято **19.04.2024 г.**